

**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

# Förord

SKB har de senaste tre åren genomfört en analys av den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar för använt kärnbränsle. Projektet avrapporteras härmed under titeln "Djupförvar för använt kärnbränsle; SR 97 - Säkerheten efter förslutning". Huvudrapporten i dess fullständiga form består av två delar med redogörelser för förutsättningar, metodik, analyser, resultat och slutsatser. Dessutom finns en fyllig sammanfattning som bl a innehåller hela slutsatskapitlet från den fullständiga versionen.

Rapporten är i första hand skriven för experter vilket inte hindrar att delar av texten bör vara givande också för icke specialister.

Allan Hedin har svarat för metodik och för samordning av projektets olika delar, skrivit sammanfattningen och fungerat som skrivande redaktör för den fullständiga huvudrapporten. Patrik Sellin har handlagt närområdesfrågor. Anders Ström och Jan-Olof Selroos har svarat för geosfärsfrågor och Ulrik Kautsky för biosfären. Lena Morén har arbetat med klimat- och intrångsscenarierna och Fredrik Lindström har genomfört beräkningarna av radionuklidtransport.

Många andra personer inom SKB och i omvärlden har på olika sätt bidragit till projektet. Om några få ska framhållas faller det svåra valet på Johan Andersson, Golder Grundteknik, som medverkat som expert på både geosfärsfrågor och säkerhetsanalys i allmänhet och på Harald Hökmark, Clay Technology, som arbetat med mekaniska frågor i geosfären.

SKB svarar ensamt för alla bedömningar och slutsatser i rapporten.

Stockholm i november 1999



Tönis Papp  
Chef Säkerhet och Vetenskap

# Innehåll

## Del I

<b>Sammanfattning</b>	13
<b>1 Syften och förutsättningar</b>	17
1.1 Varför SR 97?	17
1.2 Syften	18
1.3 Avgränsningar	19
1.4 Rapportstruktur	20
1.5 Referenser	21
<b>2 Säkerhetsmål och acceptanskriterier</b>	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
<b>3 KBS-3-systemet, säkerhetsprinciper</b>	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
<b>4 Metodik</b>	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
<b>5</b>	<b>Systembeskrivning; processer och variabler</b>	<b>57</b>
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
<b>6</b>	<b>Förvarets initiala tillstånd</b>	<b>79</b>
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 strömmaterial	118
6.6	Biosfären	119
6.6.1	Aberg	119
6.6.2	Beberg	120
6.6.3	Ceberg	121
6.7	Referenser	122
<b>7</b>	<b>Val av scenarier</b>	<b>127</b>
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

<b>8</b>	<b>Basscenario</b>	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	Strårelaterad 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

<b>9</b>	<b>Kapseldefektscenario</b>	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	Strålrelaterad 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 Vatteninträngning 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	Riskanalyser	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
<b>10</b>	<b>Klimatscenario</b>	<b>339</b>
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 förvarsplatserna	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 förvarsplatserna	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 förvarsplatserna	388
10.11.5	Slutsatser	392
10.12	Sammanfattning	392
10.12.1	Kommande arbete	394
10.13	Referenser	394
<b>11</b>	<b>Tektonik – jordskalvsscenario</b>	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
<b>12</b>	<b>Scenarier baserade på mänskliga handlingar</b>	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 – borrhning av djupa borrhål	430
12.6.1	Borrhningens 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

<b>13</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	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
<b>Bilaga 1</b>	Referensbränslet	457
<b>Bilaga 2</b>	Data till beräkning av radionuklidtransporter	459

# Sammanfattning

## Syfte och förutsättningar

Inför kommande platsundersökningar för lokalisering av ett djupförvar för använt kärnbränsle har regering och myndigheter begärt en analys av förvarets långsiktiga säkerhet med syftet "...att göra troligt att KBS-3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskyddskrav som SKI och SSI preciserat de senaste åren".

Säkerhetsanalysen SR 97 utgör den begärda redovisningen. Syftet är att med en systematiskt genomförd analys visa hurvida risken för skadeverkningar hos individer i förvarets närhet uppfyller svenska myndigheters acceptanskriterier dvs att risken inte får överstiga  $10^{-6}$  per år. Geologiska data hämtas från tre platser i Sverige för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund. Förvaret är av KBS-3-typ där bränslet placeras i isolerande kopparkapslar med en hållfast gjutjärnsinsats. Kapslarna omges av bentonitlera i enskilda deponeringshål på 500 meters djup i granitisk berggrund.

Analysen gäller ett förslutet förvar för använt kärnbränsle och omfattar således varken säkerheten under drift eller säkerheten hos förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Dessa frågor hanteras i separata redovisningar.

## Metodik

Metodiken i analysen innebär att först beskriva förvarets utseende då det just förslutits och därefter analysera systemets förändring i tiden till följd av dels inre processer i förvaret, dels yttre påverkan. Förvarssystemets framtida utveckling analyseras som fem scenarier. Det första är ett basscenario där förvaret tänkts vara byggt helt enligt specifikationer och där dagens förhållanden i omgivning, bl a klimatet, tänks bestå. I de fyra övriga scenarierna visas hur utvecklingen skiljer sig från den i basscenariot om förvaret innehåller ett fåtal initialt defekta kapslar, vid klimatförändringar, vid jordskalv och vid framtida oavsiktliga mänskliga intrång. Utvecklingen studeras som termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska delutvecklingar och syftet med analyserna är ytterst att utreda förvarets förmåga att dels isolera avfallet med hjälp av kapslarna, dels fördröja ett eventuellt utsläpp av radionuklider om kapslar skadas. Tidsperspektivet för analyserna är som längst en miljon år i enlighet med preliminära föreskrifter.

## Basscenario

I basscenariot analyseras med modellstudier och beräkningar hur bränslets farlighet avtar med tiden, förvarets termiska utveckling till följd av resteffekten i bränslet, den hydrauliska utvecklingen i buffert och återfyllning då dessa vattenmättas och det långsiktiga grundvattenflödet i geosfären vid de tre platserna.

Mekaniska påfrestningar på kapseln till följd av grundvattentryck och svälltryck från bufferten utreds liksom geosfärens långsiktiga mekaniska stabilitet. Den kemiska utvecklingen i berggrund och buffert samt korrosion av kopparkapseln analyseras.

Den övergripande slutsatsen av analyserna i basscenariot är att kopparkapseln isolerande förmåga inte hotas av vare sig de mekaniska eller kemiska påfrestningar den utsätts för. Säkerhetsmarginalerna är stora även i ett miljonårsperspektiv.

## Kapseldefektscenario

I kapseldefektscenario analyseras den inre utvecklingen i initialt defekta kapslar 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.

I scenariot visas först att kriticitet inte förväntas uppkomma i förvaret.

Analys av den hydromekaniska utvecklingen i en skadad kapsel då vatten tränger in visar att även den skadade kapseln hindrar frigörelsen av radionuklider under mycket lång tid eftersom inträngande vatten förbrukas genom korrosion av gjutjärnsinsatsen.

I analys av den kemiska utvecklingen i en skadad kapsel studeras bl a upplösning av bränslet och löslighetsförhållanden för radionuklider som frigörs från bränslet. Med modellberäkningar visas att vätgas från korrosion av gjutjärnsinsatsen bidrar till att hålla hastigheten för bränsleupplösning låg.

Grundvattenströmning studeras i lokal skala vid de tre platserna. Analyserna visar att spridningen i resultat till följd av den naturliga variabiliteten i berget ofta överskuggar spridning orsakad av både skillnader mellan olika modellkoncept och osäkerheter i randvillkor, sprickstruktur etc.

Radionuklidomsättning i biosfären modelleras för en rad system, bl a brunn och torvmark. Torvmarken ger förhållandevis höga doser till följd av ackumulation av bl a Ra-226.

Data från de ovannämnda studierna används därefter för beräkningar av radionuklidtransport i kapsel, buffert, återfyllning och geosfär. Utsläpp från geosfären omräknas till doser i olika ekosystem. För alla indata till beräkningarna uppskattas såväl rimliga som pessimistiska värden och i ett fåtal fall även statistiska fördelningar.

Med rimliga data ligger doserna vid samtliga platser långt under de dosgränser som kan härledas ur myndigheternas acceptanskriterier. Inverkan av osäkerheter i data analyseras genom att systematiskt byta rimliga data mot pessimistiska och studera beräkningsresultatet. Spridningen i flödesrelaterade data i geosfären har den största inverkan på resultatet, följt av dataosäkerheter för biosfären. Andra slutsatser är att förståelsen för bränsleupplösning behöver förbättras samt att sannolikhet och storlek hos initiala kapselskador som undgår kvalitetskontroll är idag svåra att bedöma.

För att få ett riskmått som direkt kan jämföras med acceptanskriteriet görs också riskanalyser i form av förenklade probabilistiska beräkningar. Riskanalyserna visar att samtliga platser ligger väl under acceptanskriteriet. För utsläpp till en brunn blir den maximala risken aldrig mer än 5 promille av acceptanskriteriet även då beräkningarna utsträcks en miljon år framåt i tiden. Detsamma gäller utsläpp till torvmark för tider upp till 100 000 år medan den maximala risken här växer till cirka en tiondel av acceptanskriteriet vid den minst gynnsamma platsen för tider efter 100 000 år.

## Klimatscenario

I klimatscenariot utreds konsekvenserna av framtida klimatförändringar. Dagens klimat är i ett historiskt perspektiv förhållandevis varmt och framtida förändringar förväntas till övervägande delen ge kallare klimat till följd av cykliska variationer i solinstrålningen. En tänkbar utveckling vid var och en av de tre platserna skisseras för de kommande 150 000 åren. Utvecklingen omfattar bl a en kraftig glaciation (nedisning).

Förvarssystemets termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska utveckling vid de förändrade förhållandena i omgivningen studeras i form av en jämförelse med utvecklingen i basscenariot.

Även i klimatscenariot är den övergripande slutsatsen att kopparkapselns isolerande förmåga inte hotas av vare sig mekaniska eller kemiska påfrestningar. De mekaniska påfrestningarna blir större än i basscenariot framför allt på grund av högre berg- och grundvattentryck vid en glaciation. De kemiska påfrestningarna blir ungefär desamma, bl a eftersom syrehaltigt grundvatten inte förväntas nå kapseln. Hållfasthetsberäkningarna för kapseln kan behöva förfinas med mer realistiska, inhomogena materialegenskaper och förståelsen för buffererosion vid extremt jonfattiga grundvattensammansättningar kan behöva utredas ytterligare.

Vad gäller förvarets fördröjande förmåga, t ex vid initiala kapselskador, sker de viktigaste förändringarna i biosfären. Förvarsplatserna förväntas vara täckta av inlandsis eller hav under långa perioder och den samlade effekten av klimatförändringar blir därför att doskonsekvenserna minskar i jämförelse med en situation där dagens klimat består.

## Jordskalvsscenario

I jordskalvsscenarioet analyseras konsekvenserna av jordskalv med modellstudier där platsspecifika data används för geosfärens struktur och för jordskalvsstatistik. Analysmetoden är ny och innehåller flera kraftigt pessimistiska förenklingar. Analyserna visar att sannolikheten för kapselskador är jämförbar med den som antas för initiala skador i kapseldefektscenariot. I utvärderingen av analysmetoden visas hur mindre pessimistiska antaganden bör kunna leda till att inga kapselskador alls uppkommer i modellstudierna. Metoden kommer att vidareutvecklas.

## Intrångsscenario

Scenariot som behandlar framtida oavsiktliga mänskliga handlingar som kan tänkas påverka förvaret är omgärdat av stora osäkerheter, framför allt eftersom samhällets och människans utveckling i princip är oförutsägbara. I SR 97 diskuteras hur tänkbara samhällsutvecklingar och framtida mänskliga handlingar som rör förvaret i någon mån ändå kan kategoriseras. I ett illustrerande exempel analyseras en situation där en kapsel i förvaret oavsiktligt penetreras av bergborrhare. Dos och risk beräknas för borrhpersonal och för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede. Risken för både borrhpersonal och familj bedöms ligga långt under acceptanskriteriet, eftersom sannolikheten för de analyserade händelserna uppskattas vara mycket små.

## Slutsatser

Den huvudsakliga slutsatsen av säkerhetsanalysen SR 97 är att förutsättningarna för att bygga ett säkert djupförvar för använt kärnbränsle i svensk granitisk berggrund är mycket goda.

De tre analyserade platserna speglar rimliga variationer av förhållandena i granitisk berggrund i Sverige. Analysen ger inte underlag för att tillmäta skillnader i den långsiktiga säkerheten mellan platserna någon avgörande betydelse vid en tänkt sammanvägning av alla de faktorer som påverkar lokaliseringen av ett djupförvar.

En annan slutsats är att den metodik som används i SR 97 utgör en god grund för kommande säkerhetsanalyser som ska baseras på data från genomförda platsundersökningar.

Resultatet av analysen ger också underlag för att formulera krav och önskemål på berggrunden vid platsundersökningar, för att utforma program för platsundersökningar, för att formulera funktionskrav på förvarets barriärer, samt för prioriteringar av forskningsinsatser.

Det kommande steget av djupförvarets lokalisering består i att undersöka berggrunden vid ett antal kandidatplatser i Sverige. Det är SKB:s bedömning att säkerhetsanalysens omfattning och tilltron till dess resultat väl uppfyller de krav som bör ställas inför detta steg.

# 1 Syften och förutsättningar

I Sverige ålägger lagen ägare av kärnreaktorer att sörja för att radioaktivt avfall från verksamheten tas om hand på ett säkert sätt. De svenska kraftbolagen äger gemensamt Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som har uppdraget att utveckla metoder för att ta hand om radioaktivt avfall och att bygga och driva de anläggningar hanteringen kräver.

Använt kärnbränsle utgör en viktig komponent i det radioaktiva avfallet eftersom det är både högaktivt och långlivat. För närvarande lagras använt bränsle något år i anslutning till reaktorn för att sedan mellanlagras vid ett centralt mellanlager för använt bränsle, CLAB. Enligt SKB:s planer ska bränslet efter 30 till 40 års mellanlagring inneslutas i kopparkapslar som deponeras på cirka 500 meters djup i urberget. De anläggningar som krävs för detta, en inkapslingsanläggning och ett djupförvar, har ännu inte lokaliserats och byggts.

Utbyggnaden av systemet sker successivt under flera decennier. Lokalisering av anläggningar och system görs i samverkan med berörda kommuner och under övervakning från säkerhets- och strålskyddsmyndigheter samt efter regeringens beslut.

## 1.1 Varför SR 97?

Inför kommande steg i utbyggnaden uttalade regeringen följande i sitt beslut efter granskningen av SKB:s forskningsprogram FUD 95 /SKB, 1995a/:

”En säkerhetsanalys av slutförvarets långsiktiga säkerhet bör enligt regeringens bedömning vara genomförd innan en ansökan om uppförande av den planerade inkapslingsanläggningen inges till myndigheterna, liksom innan platsundersökningar på två eller flera platser påbörjas.”

Denna rapport redovisar den begärda säkerhetsanalysen innan platsundersökningar påbörjas. Analysen har arbetsnamnet SR 97 (Säkerhetsrapport 97).

I sin granskning av SKB:s forskningsprogram FUD 98 /SKB, 1998/ preciserar Kärnkraftinspektionen, SKI sin syn på syfte och krav för SR 97 /SKI, 1999/:

”Syftet är att göra troligt att KBS-3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskyddskrav som SKI och SSI preciserat de senaste åren”.

SKI skriver också

”... att SR 97, förutom att demonstrera metodik för säkerhetsanalys, också bör ge underlag för att:

- visa på möjligheten att finna en plats i svensk berggrund som uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter,
- precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar,



- härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning,
- härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.”

## 1.2 Syften

Utifrån punkterna ovan kan **fyra** konkreta syften med SR 97 formuleras:

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.

Ambitionen med SR 97 är att genomföra en fullständig analys av den långsiktiga säkerheten för KBS-3-systemet för djupförvaring av använt kärnbränsle. Metodiken som tillämpas i SR 97 omfattar bl a:

- en systematisk hantering av alla de inre processer och yttre förhållanden som långsiktigt kan förändra förvaret, samt
- en systematisk hantering av de olika typer av osäkerheter som alltid omgärdar underlaget till en analys.

SR 97 bygger på data från tre verkliga platser. Data har hämtats från SKB:s undersökningar vid Gideå i Ångermanland, från Finnsjön i Norduppland och från berglaboratoriet vid Aspö utanför Oskarshamn i Småland. Platserna har valts som beräkningsexempel för att spegla olika förhållanden i svensk granitisk berggrund vad gäller geologi, grundvattenomsättning, vattenkemi, närhet till kust, nordlig eller sydlig förläggning, omgivande biosfär etc.

Rapporteringen om genomförandet och resultatet av analysen blir därför ett direkt underlag för att bedöma dels möjligheten att finna en säker plats för ett KBS-3-förvar i svensk berggrund, dels metodiken för en säkerhetsanalys.

3. SR 97 ska ge underlag för att precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar och härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning.

SR 97 utgör ett viktigt underlag till ett pågående arbete med syfte att formulera krav och önskemål på berget utifrån bl a perspektivet långsiktig säkerhet. Resultat och erfarenheter från SR 97 används också direkt i arbetet med att formulera ett samlat program för undersökningar och utvärderingar av platser. I slutsatskapitlet sammanfattas på vilket sätt SR 97 utgör underlag för dessa båda arbeten.

4. SR 97 ska ge underlag för att härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.

Möjligheterna att härleda funktionskrav ur säkerhetsanalysens resultat diskuteras i slutsatskapitlet.

### **1.3 Avgränsningar**

SR 97 ska utgöra en fullständig säkerhetsanalys av KBS-3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle där geosfärdata tas från tre verkliga platser i Sverige. Dessutom gäller följande grundläggande förutsättningar:

#### ***Långsiktig säkerhet efter förslutning***

SR 97 handlar om förvarets långsiktiga säkerhet efter förslutning. Förvarets byggnations- och driftfaser behandlas inte. Dessa faser, liksom andra aspekter som rör hela systemet för omhändertagande (inkapsling, transporter och djupförvaring) redovisas i preliminära rapporter över säkerheten vid utbyggnad och drift. Dessa utgör tillsammans med SR 97 underlag för en samlad systemanalys av alla komponenter i avfallshanteringen som ska redovisas år 2000. Inte heller säkerheten vid ett förlängt öppethållande eller vid ett delvis förslutet förvar utreds i SR 97.

#### ***Förvar för använt kärnbränsle***

SR 97 behandlar ett förvar för använt kärnbränsle. Dessutom kommer annat långlivat avfall att behöva tas om hand, t ex härdkomponenter vid rivning av kärnkraftverk och avfall från tidigare verksamhet vid forskningsreaktorn vid Studsvik. Detta avfall ska placeras i ett separat förvar, som kan samlokaliseras med förvaret för använt kärnbränsle eller med det slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR, som idag finns i drift. Förvaret kan också ges en egen lokalisering.

En preliminär anläggningsutformning och säkerhetsanalys för ett sådant förvar har utarbetats parallellt med SR 97 och presenteras i en separat rapport /SKB, 1999/. De säkerhetsmässiga konsekvenserna av eventuella samlokaliseringar utreds inte i SR 97 men analyserna baseras på samma geologiska underlag.

#### ***Del i helhetssyn på strålskyddsfrågorna***

Den långsiktiga säkerheten efter förslutning utgör en aspekt av en helhetssyn på strålskyddsfrågorna vid avfallshanteringen. En helhetsbild redovisas i den systemanalys som nämndes ovan. I den rapporten diskuteras också de frihetsgrader som finns inom ramarna för KBS-3, samt när och på vilket underlag de kommer att utvärderas och låsas.

## 1.4 Rapportstruktur

Strukturen för redovisningen i SR 97 är en vidareutveckling av den mall som togs fram under 1995 i form av säkerhetsrapporten SR 95 /SKB, 1995b/.

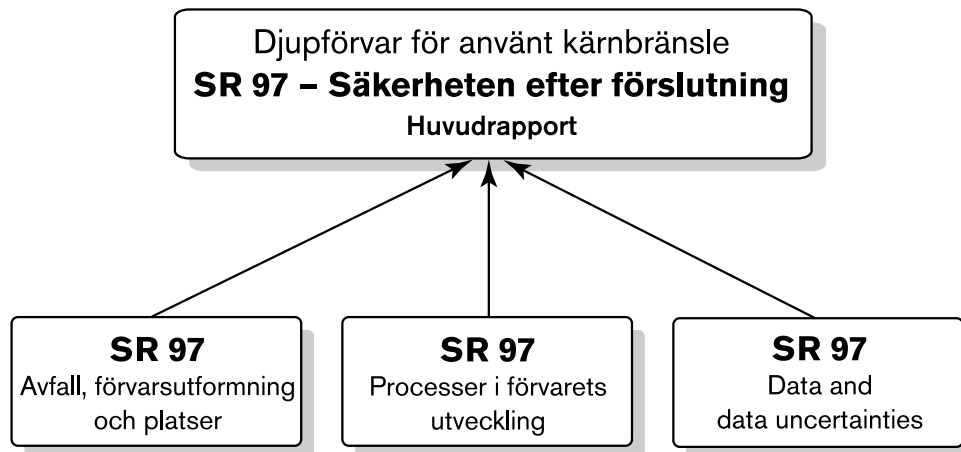
Materialet till en säkerhetsanalys är mycket omfattande. SR 97 redovisas i form av en huvudrapport och till den är tre huvudreferenser nära knutna, se figur 1-1. I huvudrapporten och huvudreferenserna refereras till rapporter i SKB:s rapportserier eller i den öppna litteraturen.

Huvudrapporten – ”Djupförvar för använt kärnbränsle; SR 97 – Säkerheten efter förslutning” – sammanfattar hela säkerhetsanalysen. Den kan läsas fristående från de övriga och innehåller metodikbeskrivning, alla väsentliga resultat samt värderingar och slutsatser. Rapporten består av två delar och en sammanfattning. Samtliga delar finns även på engelska.

”SR 97 – Avfall, förvarsutformning och platser” beskriver i detalj avfallet, förvarsutformningen med kapslar och buffert/återfyllningsmaterial, de tre platserna och de plats-specifika anpassningar som gjorts av förvarens utformningar. Rapporten finns även på engelska. I fortsättningen används benämningen ”Förvarssystemrapporten”.

”SR 97 – Processer i förvarets utveckling” beskriver de termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer i bränsle, kapsel, buffert och geosfär som styr utvecklingen i förvarssystemet. Rapporten finns även på engelska. I fortsättningen används benämningen ”Processrapporten” .

”SR 97 – Data and data uncertainties” (endast på engelska) innehåller en sammanställning av indata för beräkningar av radionuklidtransport. Här finns också en utvärdering av osäkerheter i indata. I fortsättningen används benämningen ”Datarapporten”.



**Figur 1-1.** Huvudrapport och några av de viktigaste underlagsrapporterna till SR 97.

Redovisningen i denna huvudrapport har följande uppläggning: Efter inledningen, som ger en överblick av var i programmet SKB befinner sig och redovisar syftet med säkerhetsredovisningen, ges i kapitel 2 en beskrivning av det svenska regelverket för kärnavfallens säkerhet och strålskydd. Därefter görs i kap 3 en genomgång av säkerhetsprinciperna för djupförvaret och i kapitel 4 presenteras metodiken för hur den långsiktiga säkerheten analyseras.

I kapitel 5 och 6 redovisas översiktligt de processer som är betydelsefulla för förvarets utveckling respektive det initiala tillstånd förvaret har vid förslutning.

I kapitel 7 redovisas och diskuteras valet av scenarier, dvs olika tänkbara utvecklingsvägar för förvaret och i kapitel 8–12 redovisas analyserna av de olika scenarierna.

Rapporten avslutas med ett kapitel där resultaten och erfarenheterna från arbetet med SR 97 diskuteras i förhållande till rapportens syfte och svenska myndigheters regelverk.

## 1.5 Referenser

**Miljödepartementet.** Regeringsbeslut 11 från 1995-05-18.

**SKB, 1995a.** FUD-program 95. Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning, utveckling och demonstration.  
Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1995b.** SR 95 – Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel.  
Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1998.** FUD-program 98. Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk djupförvaring.  
Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall – Preliminär säkerhetsanalys.  
SKB R-99-59. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKI, 1999.** SKI:s utvärdering av SKB:s FUD-program 98.  
SKI Rapport 99:15 och 99:16. Statens kärnkraftinspektion.

## 2 Säkerhetsmål och acceptanskriterier

Utformningen av en säkerhetsanalys och framför allt de kriterier som ska användas för att avgöra förvarets säkerhet anges i föreskrifter från säkerhets- och strålskyddsmyndigheter. Föreskrifterna utgår från övergripande lagar; de viktigaste är miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen. Strålskyddsfrågor hanteras inom en rad internationella organ och internationella regler och rekommendationer ligger ofta till grund för den nationella lagstiftningen.

För den långsiktiga säkerheten finns idag från Strålskyddsinstitutet, SSI, ”Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle” (SSI FS 1998:1). Föreskrifterna trädde i kraft 1 februari 1999.

Kärnkraftinspektionen, SKI, distribuerade våren 1999 en remissversion av ”Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall”.

### 2.2.1 SSI:s föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle

SSI skriver att människors hälsa och miljön nu och i framtiden ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning. Verksamheten får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som kan accepteras inom Sverige. Ett slutförvar ska utformas så att inga ytterligare åtgärder behövs efter förslutning för att förhindra eller begränsa utflödet av radioaktiva ämnen från slutförvaret. Institutionell kontroll och kunskap om slutförvarets lokalisering i en avlägsen framtid kan inte förutsättas. SSI:s föreskrifter gäller den långsiktiga säkerheten för ett förslutet förvar.

#### ***Skydd av människors hälsa***

Det övergripande acceptanskriteriet för ett djupförvar uttrycks i 5 § av SSI:s föreskrifter:

”Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall skall utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning, blir högst  $10^{-6}$  för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken.”

Acceptanskriteriet är således ett riskmått. Vid en riskberäkning utreds vilka förlopp som kan leda till skadeverkningar, med vilken sannolikhet de kan inträffa, samt skadans storlek (konsekvensen) för varje förlopp. Produkten av sannolikhet och konsekvens ger en delrisk för varje förlopp. Den samlade risken utgör summan av delriskerna för olika tänkbara förlopp.

SSI anger en årlig risk av  $10^{-6}$  för personer som utsätts för strålning från förvaret. För en tänkt situation med exponering som inträffar med visshet (sannolikheten 1) svarar detta mot en årlig stråldos av 0,015 milliSievert (mSv) från förvaret. Detta kan jämföras med den naturliga bakgrundsstrålningen som i Sverige är flera mSv/år.

Riskgränsen gäller en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Som indikation på omfattningen av en sådan grupp anger SSI befolkningen i ett område där det i princip är möjligt att lokalisera tio olika djupförvar. Ett sådant område är svårt att avgränsa i en riskberäkning. Som alternativ anger SSI att det "kan vara acceptabelt att utföra beräkningarna för en individ som bedöms vara högt belastad, i stället för en individ som är representativ för hela gruppens belastning".

Riskgränsen för en sådan individ anges till  $10^{-5}$  vilket motsvarar en stråldos av 0,15 mSv/år. Exponeringsmodellerna i SR 97 har inte anpassats till detaljer i SSI:s föreskrifter eftersom dessa inte trädde i kraft förrän i analysens slutskede. Modellerna är dock sedan tidigare utformade för att i de flesta fall beräkna doser till en liten och högt belastad grupp som t ex livnär sig enbart på kontaminerad föda. Beräkningsresultaten i SR 97 bör därför i de flesta fall jämföras med riskkriteriet  $10^{-5}$  per år vilket alltså svarar mot en dosgräns av 0,15 mSv/år för en exponering som säkert inträffar, se vidare avsnitt 9.10.4.

## **Miljöskydd**

SSI anger också att:

- ”6§ Slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall skall genomföras så att biologisk mångfald och hållbart nyttjande av biologiska resurser skyddas mot skadlig verkan av joniserande strålning.”
- ”7§ Biologiska effekter av joniserande strålning i berörda livsmiljöer och ekosystem ska redovisas. Redovisningen ska bygga på tillgänglig kunskap om berörda ekosystem ...”

Med mångfald menas variationsrikedomen bland levande organismer, och de ekologiska komplex dessa utgör. Av speciellt intresse, anger SSI, är organismer som är genetiskt särpräglade eller potentiellt viktiga för de ekologiska processerna, mångfalden och de biologiska resurserna. De biologiska resurserna kan vara arter eller populationer som har ett marknadsvärde t ex för förädling eller som födokälla.

I brist på etablerad metodik anger SSI att försiktighetsprincipen gäller, dvs att blotta misstanken om skadlig påverkan på miljön ska vara tillräcklig för att ingripa eller avstå från en viss verksamhet.

I SR 97 bedöms de biologiska effekterna av ett utsläpp genom att jämföra med den naturliga bakgrundsstrålningen. Om utsläppen är små jämfört med bakgrundstrålningen bör effekterna vara försumbara.

## **Intrång**

SSI anger att en redovisning ska göras av följderna av ett oavsiktligt intrång eller annan störning i slutförvaret eller dess närhet. Det väsentliga är inte att redovisa den händelsekedja som leder fram till intrånget, utan att belysa slutförvarets skyddsfunktion efter ett intrång. Skyddsförmågan för ett slutförvar får inte försämrats av planerade åtgärder för att försvåra intrång eller underlätta återtagbarhet.

Doser högre än 1 mSv/år, som kan tänkas förekomma vid ett intrång i slutförvaret, kommer att bedömas separat av SSI.

## **Tidsperioder**

SSI anser att skadliga effekter i framtiden inte ska bedömas som mindre betydelsefulla än de skadliga effekter som människan eller miljön utsätts för idag.

SSI betonar att de inledande tusen åren av förvarets utveckling är den viktigaste att utreda eftersom avfallets farlighet då är störst. För denna tidsperiod ställs de högsta kraven på redovisningen. Föreskriften kräver också en redovisning av ett fall som utgår från att de biosärsförhållanden som råder vid tiden för tillståndsansökan inte förändras. Med rådande förhållanden menas att hänsyn också tas till kända förändringar som landhöjning.

Även utvecklingen efter de inledande tusen åren ska utredas och SSI framhåller vikten av att redovisa de olika typer av osäkerheter i underlaget som ligger till grund för analyserna av olika epoker.

## **Optimering**

”4§ Vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall ska optimering ske och hänsyn tas till bästa möjliga teknik.”

Med optimering menas begränsning av stråldoser till människor så långt detta rimligen kan göras med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhällsliga faktorer. Med ”Bästa möjliga teknik” avses beprövad teknik i enlighet med accepterade vetenskapliga metoder och med hänsyn till både nytta av och kostnad för åtgärderna.

Som ett jämförelsemått vid optimeringen kräver SSI att den årliga globala kollektivdosen, till följd av förväntade utsläpp under tusen år efter förslutningen, beräknas och summeras över tiotusen år. SSI ställer inga krav på begränsning av kollektivdosen.

KBS-3-utformningen, som utgör grund för det förvarssystem vars långsiktiga säkerhet analyseras, har utvecklats under en följd av år. Försök i stor skala och över lång tid pågår, bl a för att möjliggöra en framtida optimering av systemet. SR 97 baseras på dagens teknik och tillgängliga data från de tre platserna. Eftersom syftet inte varit att bygga ett förvar på någon av de tre platserna har någon platsspecifik optimering inte gjorts. Underlag och planering för en sådan optimering redovisas i den systemanalys som ska färdigställas år 2000.

### **2.2.2 SKI:s remissversion av föreskrifter för säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall**

Föreskrifterna från SKI finns ännu bara i en remissversion. Föreskrifterna talar bl a om hur säkerhetsanalysen bör behandla olika inre och yttre förhållanden som kan ha betydelse för säkerheten. SKI framhåller betydelsen av en systematisk hantering av osäkerheter och att de modeller och data som används så långt möjligt ska visas vara tillämpliga. Analysen behöver som mest omfatta tidsperioden en miljon år framåt i tiden.

Eftersom föreskrifterna ännu inte finns i en slutlig version har de inte kunnat utgöra en direkt grund för utformningen av SR 97. Allmänt kan ändå sägas att alla moment som tas upp i remissversionen återfinns på ett eller annat sätt i SR 97.

## 3 KBS-3-systemet, säkerhetsprinciper

Parallellt med arbetet att utveckla ett säkert djupförvar i Sverige har också en filosofi vuxit fram för hur det radioaktiva avfallet i Sverige ska hanteras. Den innebär i korthet följande:

- Den långsiktiga säkerheten ska inte kräva framtida övervakning och underhåll.
- Förvaret ska utformas så att det tillåter eventuella framtida åtgärder för att förändra förvaret eller att återta avfallet.
- Förvarets långsiktiga säkerhet ska bygga på flera tekniska och naturliga barriärer som genom olika funktioner bidrar till förvarets totala säkerhet.

Den praktiska tillämpningen av filosofin har resulterat i en förvarsutformning med ett flerbarriärsystem, det s k KBS-3-systemet.

I detta kapitel ges en kort beskrivning av KBS-3-systemet och de säkerhetsprinciper som legat till grund för systemets utformning. Beskrivningen behövs som allmän introduktion till säkerhetsanalysen och som bakgrund till metodikbeskrivningen i kapitel 4. En betydligt utförligare beskrivning av förvarssystemet, anpassad för säkerhetsanalysens behov, ges i kapitlen 5 och 6.

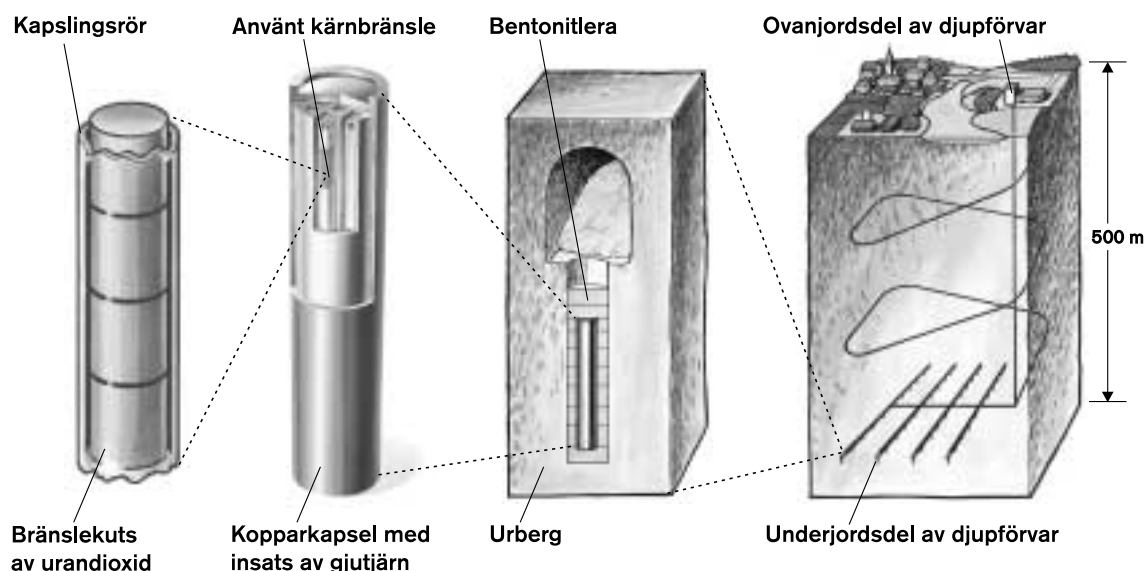
### 3.1 Säkerhetsprinciper för ett djupförvar

KBS-3-förvaret för använt kärnbränsle är utformat för att i första hand isolera avfallet. I andra hand, om isoleringen av någon anledning till någon del skulle gå förlorad, ska förvaret fördröja utsläppet av radionuklider. Säkerheten åstadkoms med ett system av barriärer, se figur 3-1:

- Bränslet placeras i korrosionsbeständiga kopparkapslar. De fem meter långa kapslarna är försedda med en insats av järn som ger mekanisk hållfasthet.
- Kapslarna omges av ett lager av bentonitlera som skyddar kapseln mekaniskt vid mindre bergrörelser och hindrar grundvatten och korroderande ämnen att komma in till kapseln. Leran adsorberar även effektivt många radioaktiva ämnen som kan frigöras om kapslarna skulle skadas.
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberget. Här råder långsiktigt stabila mekaniska och kemiska förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör bränslets och de radioaktiva ämnenas kemiska egenskaper, t ex deras svårlöslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan. Detta gäller speciellt de långsiktigt farligaste ämnena som americium och plutonium.

Förvaret är alltså uppbyggt av flera barriärer som stöder och kompletterar varandra. Säkerheten hos förvaret ska vara tillräcklig även om någon barriär skulle vara defekt eller inte fungera som avsett. Detta är innebörden i flerbarriärsprincipen.





**Figur 3-1.** KBS-3-systemet.

En annan princip är att göra förvaret ”naturnära”, dvs att använda naturliga material som koppar till kapselns hölje och bentonitlera till bufferten. Genom att välja material från naturen blir det möjligt att bedöma och utvärdera materialens långsiktiga stabilitet och uppförande i ett djupförvar med hjälp av kunskaper om naturliga förekomster. Av samma skäl strävar man efter att bygga ett förvar som förändrar de naturliga förhållandena i berget så lite som möjligt. Framför allt försöker man begränsa den kemiska påverkan förvaret ger i berget.

## 3.2 Förvarets primära funktion – isolering

I första hand ska djupförvaret isolera avfallet från människa och miljö. Detta åstadkoms direkt av kopparkapseln. Bufferten bidrar indirekt till isoleringsfunktionen genom att den håller kapseln på plats och hindrar korroderande ämnen i grundvattnet att komma i kontakt med kapseln.

Även berget bidrar till isoleringen genom att det erbjuder en stabil kemisk och mekanisk omgivning för kapslarna och bufferten. De kemiska förhållandena bestäms framför allt av grundvattnets sammansättning. Den är gynnsam eftersom vattnet innehåller låga halter av ämnen som skulle kunna vara skadliga för främst kopparkapseln och bentonitleran. Det är också gynnsamt att vattenflödet förbi förvaret är lågt så att tillförseln av oönskade ämnen begränsas. Mekaniskt erbjuder det svenska urberget en långsiktigt stabil miljö för ett djupförvar.

Även om kopparkapseln svarar för den direkta isoleringen är de övriga delarna av förvaret nödvändiga för att isoleringen ska fungera. Isoleringsfunktionen är således inte enbart knuten till kapslarna utan alla delarna samverkar i ett system.

### 3.3 Förvarets sekundära funktion – fördröjning

Om isoleringen av någon anledning skulle skadas, eller om någon kapsel initialt skulle ha en defekt som inte upptäcks vid tillverkningskontrollen, har förvaret i andra hand en fördröjande funktion. Med det menas att tiden det tar för radionuklider att transporteras från förvaret till biosfären görs så lång att farligheten hinner avta väsentligt innan radionukliderna når människan eller hennes omgivning.

Samtliga barriärer bidrar till förvarets fördröjande funktion. Även en delvis skadad kopparkapsel kan effektivt bidra till fördröjningen genom att försvåra inflöde av vatten till kapselns inre och uttransport av frigjorda radionuklider. Bränslet, där huvuddelen av radionukliderna ligger inbäddade, består av ett beständigt material som ger ett viktigt bidrag till fördröjningen.

Om bränslet kommer i kontakt med grundvatten startar en mycket långsam upplösningsprocess som leder till att radionuklider frigörs. Här kommer en viktig egenskap hos många av de långsiktigt farligaste radionukliderna in i bilden: de är svårslösliga i vatten, det medium i vilket radionuklider kan tänkas transporteras genom såväl buffertens porer som bergets spricksystem. Lerbufferten har en förmåga att länge hålla kvar många av de långsiktigt farligaste radionukliderna genom att dessa fastnar på lerpartiklarnas ytor. Berget bidrar på flera sätt till fördröjningen. Tiden det tar för radionuklider lösta i grundvattnet att röra sig i bergssprickor från förvaret på 500 meters djup till ytan kan vara tusentals år och längre. Genom att radionuklider tränger in i mikrosprickor med stillastående vatten och i många fall också fastnar på mikrosprickornas ytor, får de en betydligt längre transporttid än själva grundvattnet.

### 3.4 Spädning och spridning

Ibland har också spädning och spridning nämnts som en tredje säkerhetsfunktion: Genom att förlägga förvaret så att eventuella utsläpp får en hög grad av utspädning i biosfären lindras konsekvenserna. I SR 97 betraktas, av flera skäl, detta inte som någon säkerhetsfunktion:

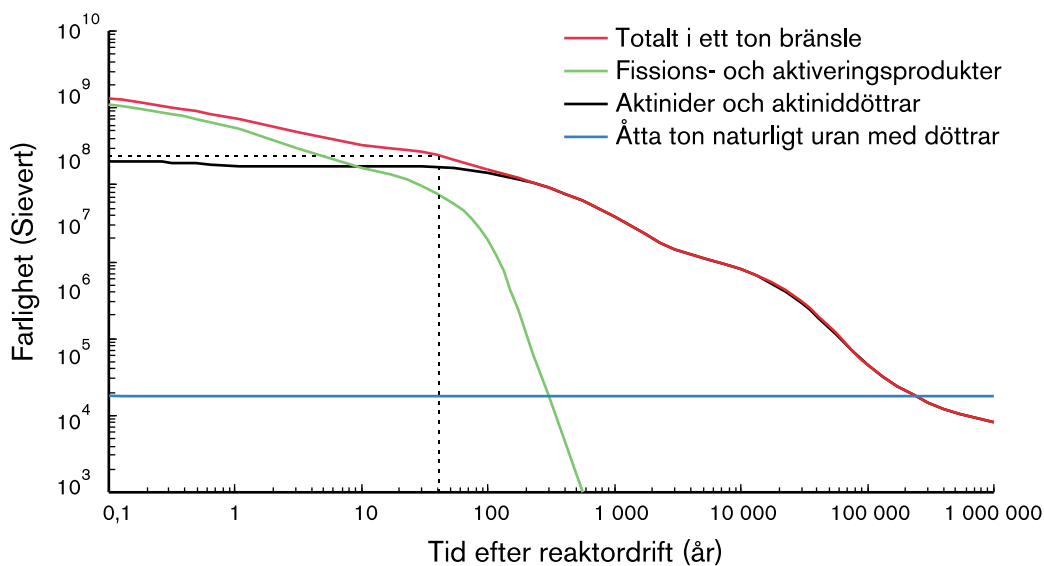
- Biosfären och därmed utspädningen förändras betydligt snabbare än själva förvarssystemet och dessutom på ett sätt som är svårt att förutsäga. Det blir därmed inte rimligt att basera en långsiktig säkerhetsfunktion på förhållanden i biosfären.
- Visserligen lindras konsekvenserna för de som drabbas mest av ett utsläpp, men å andra sidan kan en större population beröras.

Utspädningen är dock en viktig faktor som påverkar radionuklidspridningen i biosfären och därmed konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från förvaret. En värdering av utspädningsförhållandena vid en förvarsplats måste därför ingå i en säkerhetsanalys, men utspädningen betraktas alltså inte som en säkerhetsfunktion i sig.

### 3.5 Hur länge ska förvaret fungera?

Förvaret ska fungera så länge avfallet är farligt. Det tar många miljarder år innan allt radioaktivt material sönderfallit till stabila ämnen. Farligheten har dock långt tidigare avtagit till nivåer som är jämförbara med t ex farligheten hos den uranmalm som ursprungligen bröts för att framställa bränslet.

För att framställa ett ton bränsle för svenska reaktorer anrikas cirka åtta ton naturligt uran. Under driften ökar bränslets farlighet kraftigt i takt med att nya radioaktiva ämnen bildas då urankärnorna klyvs. Figur 3-2 visar hur farligheten för det använda bränslet sedan avtar med tiden. Efter cirka hundra tusen år ligger farligheten hos ett ton använt bränsle i nivå med den för de åtta ton naturligt uran som användes för bränsleframställningen.



**Figur 3-2.** Avfallets farlighet som funktion av tid för svenskt BWR-bränsle med en utbränningsgrad av 38 MWdygn per ton. Farligheten avser intag via föda. Efter 30 till 40 års mellanlagring ska bränslet deponeras. Omarbetad från Hedin /1997/.

Tiden hundra tusen år kan därför användas som en riktlinje för hur länge förvaret ska ”fungera”. Denna tid utgör dock inte någon absolut tidsgräns i utvärderingen av förvarets säkerhet:

- Å ena sidan avtar farligheten ständigt och har t ex efter tusen år sjunkit till ungefär en tiondel av nivån vid deponeringen, cirka 40 år efter drift. Detta är viktigt i värderingen av förvarets säkerhet: Med tiden tilltar ovissheten om förhållandena i och omkring förvaret, men samtidigt minskar också farligheten hos bränslet.
- Å andra sidan finns även efter hundra tusen år både små mängder radionuklider som relativt lätt kan röra sig genom förvarets barriärer om kopparkapseln skulle skadas, och större mängder svårörliga nuklider.

Förvarets säkerhet behöver således utvärderas långt in i framtiden och ständigt i ljuset av hur farligheten avtar med tiden.

### 3.6 Referenser

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

## 4 Metodik

Det finns ingen standardiserad metod för att genomföra säkerhetsanalyser av ett djupförvar för använt kärnbränsle. Olika metoder och varianter tillämpas av skilda organisationer världen över. Skillnader i angreppssätt beror dels på olika nationella förhållanden, dels på en allmän metodikutveckling. Ändå kan många gemensamma drag, om än i något varierande skepnader, urskiljas hos säkerhetsanalyser som genomförts under det senaste decenniet. Detta framgår t ex av en genomgång i OECD/NEA:s regi /NEA, 1997a/. I det arbetet ges också en rekommendation av vad en säkerhetsrapport bör innehålla. Alla dessa moment ingår i SR 97, de flesta i denna Huvudrapport, ett fåtal endast i underlagsrapporter.

Detta kapitel beskriver den metodik som används för genomförandet av SR 97. Ett systemperspektiv har genomgående anlagts på genomförandet och redovisningen av analysen. Ett annat utmärkande drag är strävan efter en balans mellan olika aspekter av förvarets utveckling. I tidigare analyser har betoningen på radionuklidtransport, dvs förvarets fördröjande funktion, ofta varit mycket stark. I SR 97 står den mest grundläggande funktionen, isoleringen, mer i centrum än tidigare.

### 4.1 Vad är en säkerhetsanalys?

#### 4.1.1 Systemperspektiv

Förvarets säkerhet är enligt kapitel 3 uppbyggd kring isolering och fördröjning. Som en utgångspunkt för en diskussion om hur en säkerhetsanalys kan genomföras ställer vi frågan: Vad skulle kunna hota isoleringen?

Kopparkapslarna kommer att påverkas kemiskt genom korrosion, om än mycket långsamt. I grundvatten finns bl a låga halter sulfid som reagerar med koppar. Korrosions-takten bestäms bl a av sulfidhalten och av hur snabbt sulfid tillförs kapseln. Detta i sin tur bestäms av hur mycket sulfidhaltigt grundvatten som i varje ögonblick når förvaret och av hur snabbt sulfid transporteras genom bufferten in till kapseln.

Kapslarna kommer också att påverkas mekaniskt: Bufferten sväller då den kommer i kontakt med grundvattnet och bygger med tiden upp ett betydande svälltryck mot kapseln. Större berg rörelser skulle också kunna påverka kapseln mekaniskt.

Det radioaktiva sönderfallet i bränslet ger en värmeutveckling som leder till en temperaturökning i kapsel, buffert och berg. Om bufferten blir alltför varm kommer den att omvandlas kemiskt och detta får konsekvenser både för hur sulfid transporteras genom bufferten och för buffertens svällförmåga.

Exemplen visar att man står inför att analysera utvecklingen i ett system av kopplade termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer.

Utgångspunkten för analysen är de förhållanden som råder då förvaret just byggts och förslutits. Kopparkapselns ursprungliga tjocklek är t ex en uppenbar utgångspunkt för att studera förvarets isolerande förmåga.

Förändringarna i förvaret drivs av både inre processer i förvaret och av yttre påverkan. Den termiska utvecklingen till följd av det radioaktiva sönderfallet i bränslet och korrosion av kopparhöljets yta är exempel på inre processer. Klimatförändringar (t ex i form av en istid) eller ett jordskalv är två former av yttre skeenden som kan påverka förvaret. En säkerhetsanalys behandlar primärt själva förvarets utveckling som beskrivs mer detaljerat än omgivningens.

Därmed kan säkerhetsanalysen sägas bestå av att:

- noga beskriva förvarssystemets utseende eller tillstånd då det just byggts och förslutits,
- kartlägga vilka förändringar förvaret kan tänkas genomgå med tiden till följd av dels inre processer, dels yttre påverkan,
- utvärdera förändringarnas konsekvenser för säkerheten.

Angreppssättet är allmänt vid analys av system som förändras med tiden: Ett system avgränsas med en systemgräns och ett initialt tillstånd beskrivs. Därefter bestäms systemets utveckling av tidsberoende, inre processer och av växelverkan med en föränderlig omgivning, figur 4-1.

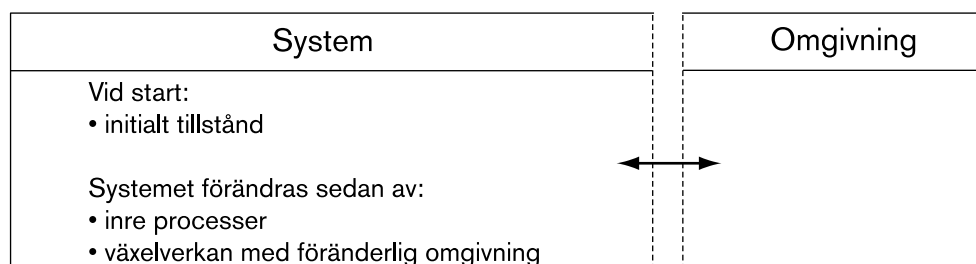
#### 4.1.2 Säkerhetskriterier och tilltro

Den tredje punkten ovan, utvärderingen av konsekvenserna för säkerheten, leder till frågan: Mot vilka kriterier ska säkerheten bedömas?

För isoleringen är det enkelt att ställa upp ett övergripande säkerhetskriterium: Kopparhöljet ska vara obrutet, annars är inte isoleringen fullständig.

Flera faktorer och processer i förvaret bestämmer tillsammans om isoleringen bibehålls. Därför är det sällan meningsfullt att ställa upp absoluta säkerhetskriterier för de enskilda faktorerna. Det är ju den samlade effekten som avgör konsekvenserna. Däremot kan t ex vattenflöden eller sulfidhalter från exemplet ovan användas som indikatorer på att omständigheterna är mer eller mindre gynnsamma för isoleringen.

På liknande sätt förhåller det sig med kriterier för fördröjningen: Om isoleringen brutits kan den yttersta konsekvensen av en otillräcklig fördröjning bli att människa och miljö skadas av strålning. Här finns absoluta krav för konsekvensbedömningen i form av myndigheternas risknivåer och dosgränser. Fördröjningens omfattning avgörs däremot av rader av samverkande faktorer i bränsle, kapsel, buffert, berg och biosfär. Det är därför inte heller här meningsfullt att ställa upp absoluta kriterier för de enskilda faktorerna.



**Figur 4-1.** Långsiktiga förändringar orsakas av inre processer i förvaret och av yttre påverkan.

Formulering av säkerhetskriterier utvecklas i avsnitt 5.7 sedan förvarssystemet beskrivits mer i detalj.

Lika viktigt som bedömningen av förvarets isolerande förmåga och det numeriska resultatet av analysen av fördröjningen är tilltron till resultatet. Underlaget till en säkerhetsanalys är alltid behäftat med brister av olika slag. Det blir t ex aldrig möjligt att i detalj känna till sprickstrukturen i förvarsberget eller att nå visshet om det framtida klimatet. Säkerheten måste utvärderas i ljuset av brister av detta slag. Enkelt uttryckt står man inför uppgiften att visa huruvida förvaret utformats med tillräckliga marginaler för att vara säkert trots den bristande kunskapen. Tilltron till resultatet beror bl a av hur metodiskt denna hantering av osäkerheter/brister genomförs.

### 4.1.3 Säkerhetsanalysens moment

Genomförandet och redovisningen av SR 97 kan konkret delas in i fem moment:

#### 1. Systembeskrivning

Av föregående avsnitt är det uppenbart att en systematisk analys kräver en strukturerad beskrivning av alla inre processer, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Att upprätta en sådan systembeskrivning är därför en första uppgift i en säkerhetsanalys. Här ingår också att definiera gränsen mellan system och omgivning.

#### 2. Beskrivning av initialt tillstånd

Därefter beskrivs förvarets utseende då det just förslutits eller dess initiala tillstånd. Här beskrivs dimensioner och material för de konstruerade delarna av förvaret (bränsle, kapsel, buffert/återfyllning) och struktur och egenskaper för geosfären kring förvaret så som dessa initialt ser ut.

#### 3. Val av scenarier

Förvarets utveckling påverkas av omgivningen. Bedömningar av omgivningens utveckling innehåller med nödvändighet osäkerheter: Vilka framtida klimatförhållanden kan förväntas? Vilka frekvenser och magnituder av jordskalv kan förväntas i förvarets omgivning i framtiden? För att täcka in olika situationer i omgivningen analyseras förvarets utveckling för ett antal olika händelseutvecklingar i omgivningen; ett antal olika scenarier väljs ut och analyseras. De valda scenarierna bör tillsammans ge en rimlig täckning av de olika utvecklingsvägar förvaret och dess omgivning kan tänkas ta.

#### 4. Analys av valda scenarier

Med hjälp av systembeskrivningen analyseras förvarets utveckling för vart och ett av de valda scenarierna. Här används efter behov en rad olika verktyg och metoder, allt ifrån resonemang och enkla överslag till detaljerade modellberäkningar baserade på platsspecifika data.

#### 5. Utvärdering

Slutligen görs en samlad bedömning av förvarets säkerhet. Här vägs de olika scenarierna ihop till en total riskbild. Slutsatserna i bedömningen utgör analysens resultat. Här måste också tilltron till resultatet diskuteras i ljuset av de osäkerheter som finns i underlaget till analysen.

I kommande avsnitt redovisas mer i detalj den använda metodiken för de olika momenten.

## 4.2 Systembeskrivning

En systematisk analys kräver en beskrivning av alla kända inre processer av någon tänkbar betydelse, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Strukturen för beskrivningen bör kunna ge såväl överblick som detaljer. Ett annat krav på strukturen är att den genomgående ska kunna användas i redovisningen av säkerhetsanalysen. Tidigare har sk interaktionsmateriser utnyttjats för att beskriva systemet av inre processer. Beskrivningen har i stor utsträckning varit fristående från analysen i övrigt och svår att integrera i redovisningen. I SR 97 har bl a av detta skäl en ny struktur för systembeskrivningen utvecklats.

### 4.2.1 Systemgräns

En förutsättning för systembeskrivningen är att systemet avgränsas. Systembeskrivningen i SR 97 omfattar de konstruerade delarna av förvaret dvs bränsle, kapsel och buffert samt geosfären i förvarets närhet. I detta inkluderas geosfärens utbredning uppåt till markytan cirka 500 meter ovanför förvaret samt utbredningen ungefär lika långt i andra riktningar från förvaret. Det är inte meningsfullt att fastställa någon exakt och allmängiltig gräns för geosfärens utbredning i olika riktningar. Nödvändiga avgränsningar görs i stället efter lämplighet i respektive delanalys.

Omgivningen, t ex biosfären eller geosfärens avlägsna delar, studeras i varierande detaljeringsgrad efter behov. Geosfärens avlägsna delar behöver beskrivas noggrant vid t ex en jordskalvsanalys. Olika aspekter av biosfären och dess utveckling blir viktiga vid ett eventuellt utsläpp av radionuklider från förvaret.

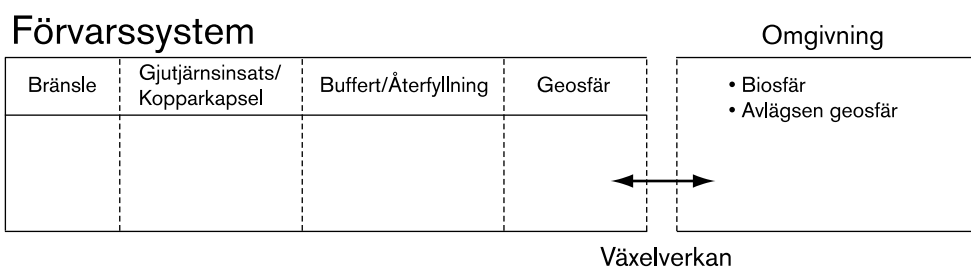
Ett skäl att göra tydlig åtskillnad mellan förvarssystemet och omgivningen är att säkerhetsfunktionerna är knutna till förvarssystemet. Ett annat skäl är strävan att visa huruvida förvaret är robust. Med detta menas att den inre utvecklingen i förvaret, i synnerhet sådana aspekter som rör säkerheten, är förhållandevis oberoende av skeenden i omgivningen. Oavsett klimatförhållanden, jordskalv eller andra yttre förlopp bör förvarssystemet bibehålla sina isolerande och fördröjande funktioner.

### 4.2.2 Fyra systemdelar

För att finna en struktur för systembeskrivningen är det lämpligt att ta fasta på att förvarssystemet består av ett antal på varandra följande barriärer eller systemdelar där de inre delarna helt omges av de yttre. Innerst i systemet finns bränslet. Allt bränsle är omgivet av kapslar, alla kapslar är omgivna av buffert och återfyllningsmaterialet i tunnlar och schakt. All buffert och återfyllning är omgiven av geosfär. Utanför geosfären finns det som definieras som omgivning. Den utgörs av biosfären m m. Detta gör att systemet kan representeras "endimensionellt" med fyra systemdelar som direkt gränsar till och växelverkar med varandra, se figur 4-2.

Buffert och återfyllning har beskrivits som en gemensam systemdel av två skäl: Dels har de liknande sammansättning och egenskaper, dels får man då en situation där buffert och återfyllning utåt enbart gränsar mot geosfären. Om buffert och återfyllning skulle beskrivas som skilda delar skulle bufferten gränsa både mot geosfär och återfyllning och enkelheten i den endimensionella beskrivningen skulle gå förlorad.





**Figur 4-2.** Förvarssystemet består av systemdelarna bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. Eftersom de inre delarna helt omsluts av de yttre kan förvaret representeras ”endimensionellt” som i figuren.

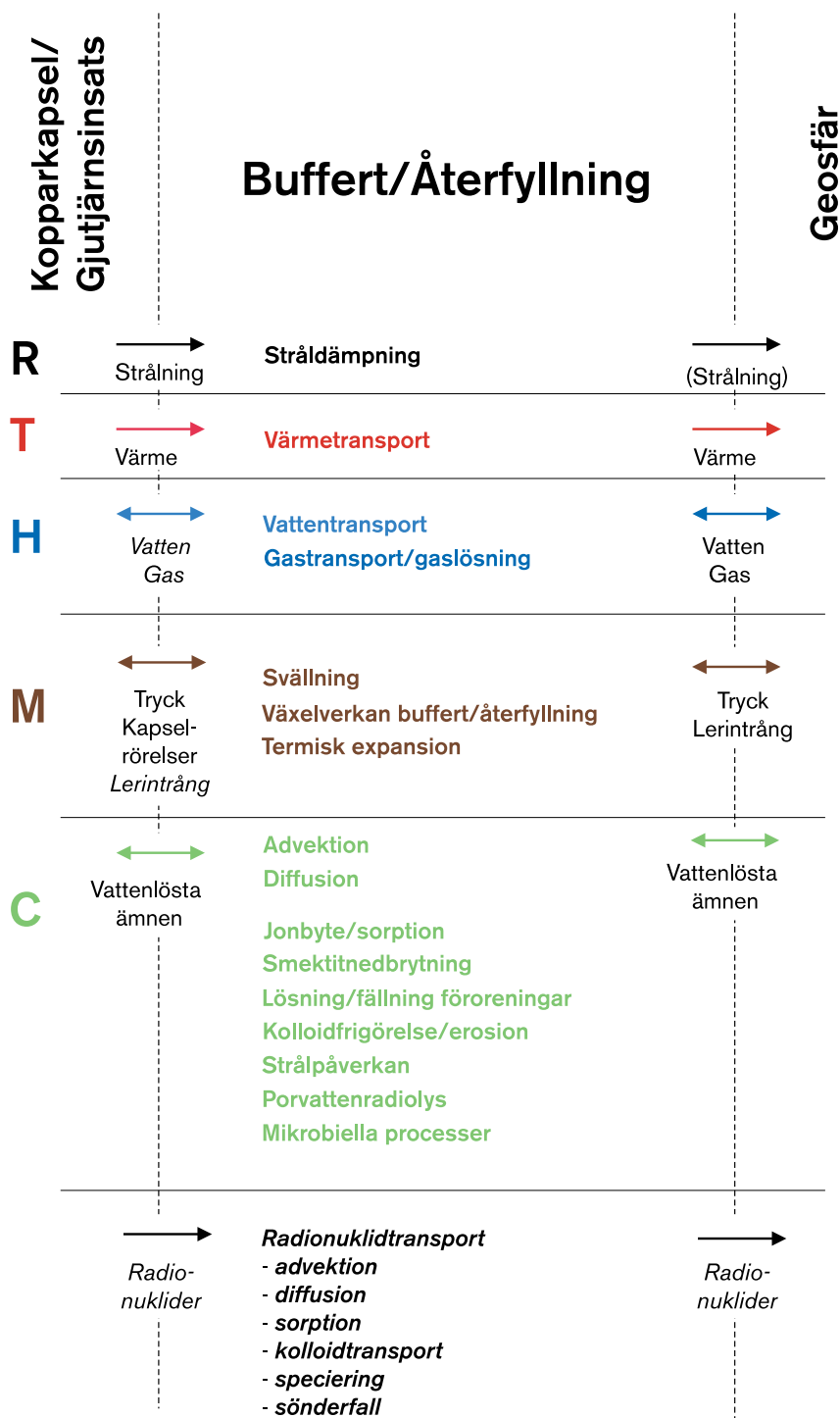
### 4.2.3 THMC interaktioner och processer

För att ge ytterligare struktur åt beskrivningen kan man notera att två systemdelar, t ex buffert och berg påverkar varandra i huvudsak termiskt (genom värmefflöde), hydrauliskt (genom framför allt vattenflöde då bufferten tar upp vatten från berget), mekaniskt (t ex genom att bufferten sväller vid vattenuptag och därefter utövar ett svälltryck mot deponeringshålets väggar) och kemiskt (framför allt genom utbyte av vattenlösta ämnen mellan bergets grundvatten och buffertens porvatten). Även de olika processer som förekommer inom en systemdel är i huvudsak termiska, hydrauliska, mekaniska eller kemiska till sin natur. I figur 4-3 visas detta för buffert/återfyllning. Beskrivningen möjliggör också en tydlig åtskillnad mellan processer inom en systemdel å ena sidan och växelverkan mellan olika delar å den andra. Kategorierna termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C efter engelskans chemical, kemisk) interaktioner eller processer benämns ofta samlat THMC i expertlitteraturen. Denna benämning används även i SR 97.

Eftersom analysen gäller ett system där strålning från radioaktivt material spelar en huvudroll tillkommer dessutom strålrelaterad växelverkan och strålrelaterade processer, framför allt radioaktivt sönderfall i bränslet och dämpning av den strålning som tränger ut ur en intakt kapsel. Till THMC-processerna fogas därför, där så är relevant, en femte kategori av strålrelaterade processer, benämnd R efter engelskan radiation, strålning.

En stor del av analysen rör radionuklidtransport, som ju också är viktig för värderingen av förvarets säkerhet. Radionuklidtransport är egentligen en samlad konsekvens av en rad hydrauliska och kemiska processer och täcks därför in av processerna i dessa kategorier. Om de kemiska och hydrauliska förhållandena liksom sprickgeometrin i geosfären är kända kan transporten också beskrivas. Eftersom radionuklidtransporten utgör en så viktig del i säkerhetsanalysen har de olika delprocesserna som är inblandade i radionuklidtransport ändå samlats i en särskild kategori i respektive systemdel, se figur 4-3.

Mikrobiella processer förekommer i buffert/återfyllning och i geosfären. Dessa har inordnats bland de kemiska processerna. En annan möjlighet vore att ha en särskild kategori av biologiska processer. Detta har undvikits eftersom de biologiska processerna dels är få, dels har en begränsad betydelse för systemets utveckling på djupet. Däremot är påverkar biologiska processer i gränsskiktet mellan biosfär och geosfär på ett avgörande sätt sammansättningen hos det vatten som tränger ner i berggrunden från biosfären.



**Figur 4-3.** THMC-processer i buffert/återfyllning. Figuren visar också växelverkan mellan buffert/återfyllning och omgivande förvarsdelar uppdelat i T, H, M och C. Dessutom förekommer strårelaterade processer/interaktioner (R) samt radionuklidtransport.

Det är inte alltid självklart vilken kategori en process ska tillhöra, lika litet som det finns strikta gränser mellan olika ämnesområden inom naturvetenskapen. Kategoriseringen är mest en hjälp att se linjer i systemstrukturen. I tveksamma fall har den kategori valts som ansetts mest ändamålsenlig för att få en klar och tydlig systembeskrivning.

#### **4.2.4 Vilka processer?**

I strukturen ovan kan alla relevanta processer inordnas. Den uppsättning processer som används i SR 97 har hämtats från tidigare arbeten med interaktionsmatriser. Där har, på ett annat format, processer och interaktioner av betydelse för förvarets utveckling identifierats i en närzonsmatris (bränsle, kapsel och buffert) samt en fjärrzonsmatris (geosfären). Dessutom finns en mer detaljerad matris för enbart bufferten. Samtliga matriser finns dokumenterade i en databas /Pers m fl, 1999/.

Materialet i matriserna kan vara antingen processer inom en systemdel, interaktioner mellan systemdelar eller beskrivningar av initialtillståndet. De tre förekommer utan tydlig åtskillnad.

Nästan all information i matriserna har inordnats i THMC-strukturer över processer och interaktioner eller förts till beskrivningen av initialtillståndet. En dokumentation av detta finns i Pers m fl /1999/.

Materialet i interaktionsmatriserna har också delvis länkats till och stämts av mot SKB:s sk FEP-databas, som innehåller egenskaper, händelser och processer (engelskans Features Events and Processes) av betydelse för förvarets utveckling. Parallellt med arbetet med interaktionsmatriserna har databasen utvecklats. Liknande information från en rad organisationer världen över finns samlad i en internationell databas som sammanställts av OECD/NEA /NEA, 1997b/.

Efter SR 97 kommer användandet av interaktionsmatriser, THMC-diagram och databaser att utvärderas för att fastlägga rollen för dessa olika redskap i kommande analyser.

Till valet av processer är också frågan om fullständighet knuten. Är alla relevanta processer identifierade? Frågan diskuteras vidare i avsnitt 4.6.1

#### ***Rangordning av processer?***

I interaktionsmatriserna har processer och interaktioner rangordnats i en tregradig kvalitativ skala. Denna information har inte överförs till systembeskrivningen. I stället är ambitionen att på sikt kvantifiera en så stor del av processerna som möjligt, alternativt visa att en process har försumbar betydelse för förvarets utveckling under alla förhållanden.

## 4.2.5 Dokumentation av processer

Till systembeskrivningen hör även att dokumentera kunskapen om varje process. En sådan dokumentation utgör en hörnsten i underlaget till en säkerhetsanalys.

För SR 97 har kunskapen om samtliga identifierade processer i systembeskrivningen dokumenteras i Processrapporten. För varje process ges bl a:

- en allmän beskrivning av processen,
- en dokumentation av modellstudier/experimentella studier,
- diskussion om osäkerheter i såväl förståelse som data till processen,
- förslag till hur processen kan hanteras för olika scenarier i säkerhetsanalysen.

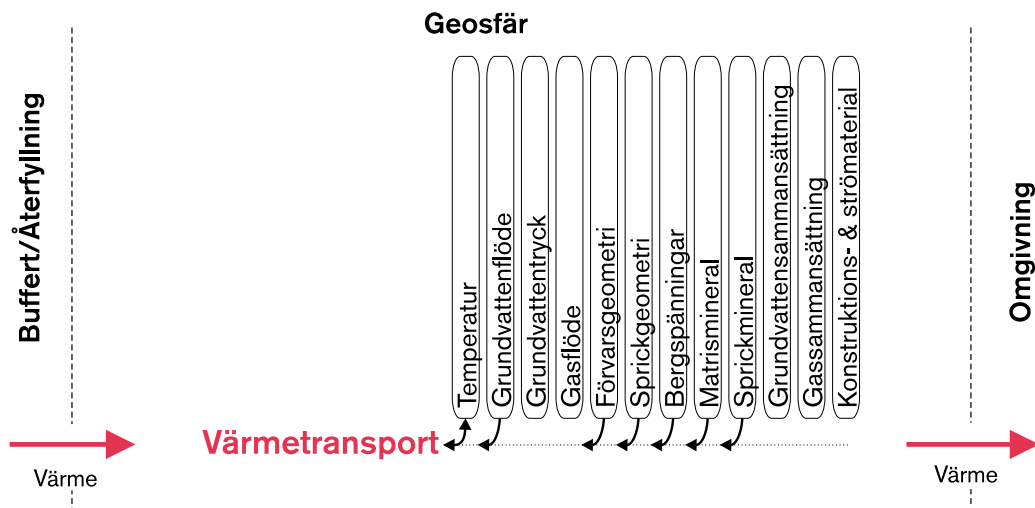
Dokumentationen är en första version som i vissa delar ska revideras till kommande analyser. Avsikten är att successivt nå fram till en permanent systembeskrivning med tillhörande processdokumentation, allt samlat i en ändamålsenlig databas.

## 4.2.6 Variabler

Tillståndet i en systemdel karakteriseras i varje ögonblick av en uppsättning variabler (med fetstil i kommande exempel). Geosfärens tillstånd karaktäras t ex av dess temperatur, som varierar i tid och rum, av sprickgeometrin (som varierar kraftigt i rummet, men knappast alls i tiden), av grundvattenflödet, grundvattensammansättningen, bergspänningar etc.

Tillsammans ska variablerna karakterisera systemet tillräckligt väl för att det ska vara möjligt att genomföra en säkerhetsanalys. Vissa variabler som temperatur och grundvattensammansättning används eller bestäms direkt i analyser och beräkningar medan andra ligger till grund för att härleda viktiga egenskaper hos systemet: geosfärens värmeledningsförmåga och densitet kan t ex beräknas ur variabeln matrismineral. Variablerna ska också vara oberoende av varandra, för att få en entydig beskrivning av det kopplade systemet av processer.

Alla variabler påverkas av en eller flera processer och alla processer påverkas av en eller flera variabler. Processen värmetransport i geosfären, figur 4-4, exemplifierar: Värmetransporten sker främst genom värmeledning och geosfärens värmeledningsegenskaper bestäms av bergmatrisens mineralsammansättning eller av tillståndsvariabeln matrismineral, som alltså påverkar värmetransporten. Värme kan också i någon mån transporteras med det flödande grundvattnet (värmeströmning) och även grundvattenflödet påverkar därför värmetransporten. Temperaturen både påverkar och påverkas av



**Figur 4-4.** Värmetransport i geosfären.

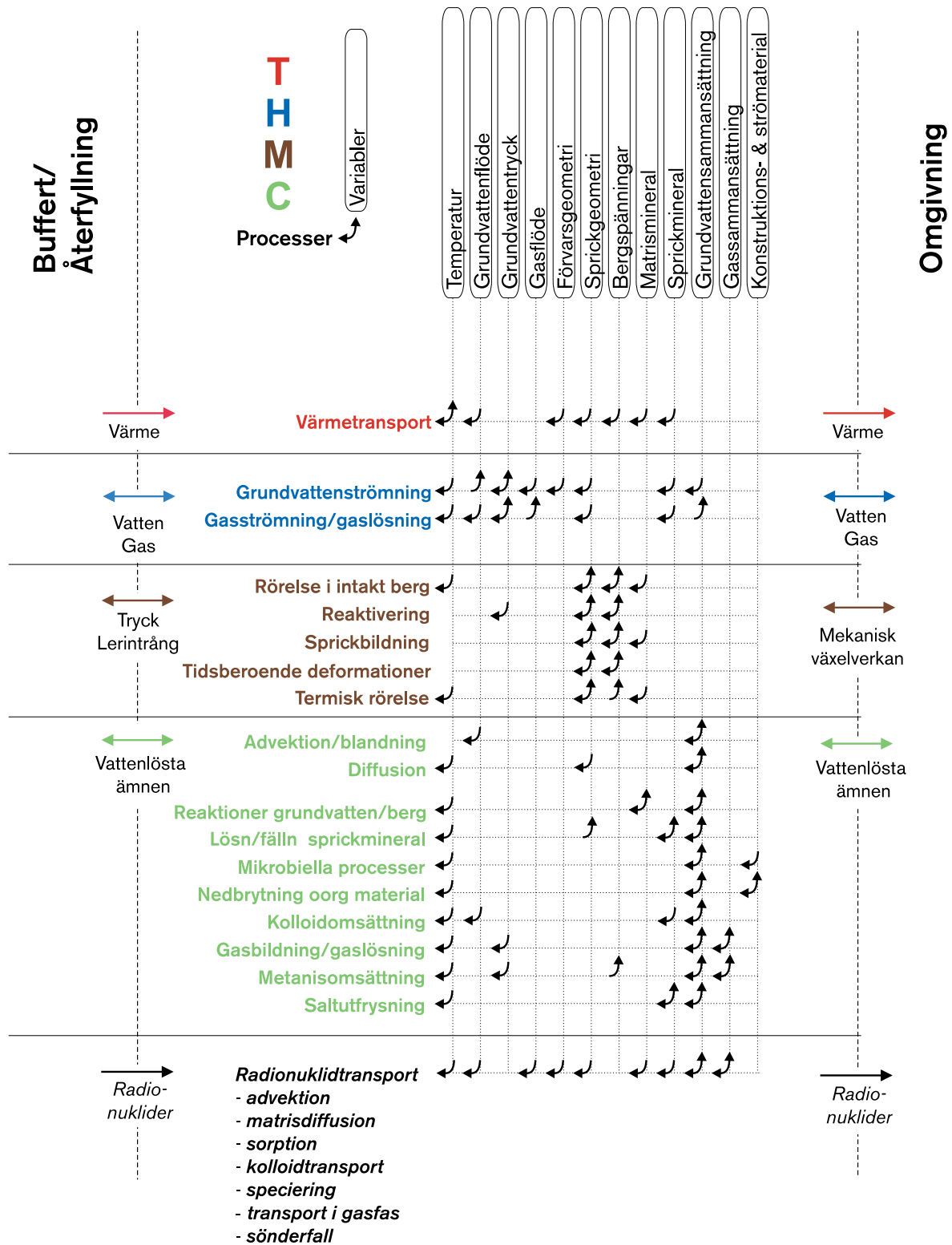
processen: Genom värmetransport förändras temperaturen men temperaturskillnaden mellan olika delar av geosfären utgör också själva drivkraften för transporten. Slutligen måste även geosfärens geometriska avgränsning mot kapselhålen ingå i beskrivningen av värmetransport eftersom värmeflödet från buffert och återfyllning till geosfären utgör den viktigaste källan till värmetransporten. Detta uttrycks av variabeln förvarsgeometri/rand.

#### 4.2.7 THMC-diagram

Det fullständiga diagrammet för geosfären visas i figur 4-5. Där visas också hur geosfären växelverkar med buffert och återfyllning och med omgivningen. För att betona uppdelningen i termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer har detta sätt att beskriva systemet kallats ett THMC-diagram. En mer detaljerad genomgång av de olika systemdelarnas THMC-diagram finns i kapitel 5.

THMC-diagrammet med alla processer, variabler och samband dem emellan kan te sig komplext. Som kommer att framgå av kapitel 8 finns dock tydliga huvuddrag i systemet som väsentligt förenklar analysen. Ett viktigt sådant huvuddrag är att utvecklingen kan delas in i en termisk, en hydraulisk, en mekanisk och en kemisk delutveckling, som påverkar varandra genom ett fåtal viktiga kopplingar. Detta är ytterligare ett starkt motiv för att använda en THMC-struktur i beskrivningen av systemet.

# Geosfär



Figur 4-5. THMC-diagrammet för geosfären.

## 4.2.8 Allmängiltigt format

Angreppssättet är som tidigare nämnts allmänt vid analys av system som förändras i tiden: Ett system avgränsas med en systemgräns och ett initialtillstånd fastställs. Därefter bestäms utvecklingen av systemet av tidsberoende inre processer och av växelverkan med omgivningen. Beskrivningen är giltig också för delsystemen: Utvecklingen i t ex buffert/återfyllning ges, om initialtillståndet där är känt, av tidsberoende inre processer och växelverkan med omgivningen, i detta fall kapsel och geosfär. I varje systemdel pågår ett antal processer samtidigt. Processerna förändrar tillståndet och tillståndet uttrycks av variablerna.

För att ytterligare tydliggöra formatet för systembeskrivningen kan man betrakta en kemisk fabrik med samma terminologi. Fabriken tänks bestå av ett fåtal delsystem i form av t ex olika reaktionskärl. I varje kärl försiggår ett antal processer samtidigt, såsom uppvärmning, kemiska reaktioner och omrörning. Varje kärl är också på flera ställen försett med mätinstrument som moment för moment visar temperatur, tryck, vätske- och gasflöden, koncentrationer av råvaror och reaktionsprodukter etc. Vid driftstart har fabriken ett initialt tillstånd; ursprungliga temperaturer, koncentrationer etc.

Den följande utvecklingen i fabriken drivs av processerna i de olika delsystemen. Tillståndet i tid och rum i fabriken kan avläsas i de olika instrumenten. Där kan man också kontrollera om någonting oönskat håller på att inträffa, t ex genom att en temperatur eller en koncentration är högre än ett bestämt gränsvärde. De olika delsystemen påverkar varandra t ex genom att reaktionsprodukter från ett kärl förs över till ett annat för att där utgöra råvaror. Hela fabriken växelverkar också med omgivningen, t ex genom intransport av råvaror och uttransport av färdiga kemiska produkter.

Medan processerna i fabriker kan gå snabbt och mycket kan hända på ett dygn, en timme eller i vissa fall till och med på några sekunder, finns i djupförvarssystemet en helt annan tröghet. Ingen nämnvärd energi pumpas in i processerna, det mesta sker mycket långsamt och parallellt avtar bränslets farlighet.

## 4.3 Initialt tillstånd

Då systembeskrivningen genomförts är nästa moment att beskriva förvarets utseende då det just förslutits eller dess initiala tillstånd. Här beskrivs bränslets utformning och innehåll av radionuklider, dimensioner och material för gjutjärnsinsats och kopparkapsel, sammansättningen hos buffert och återfyllning, geometriska mått för deponeringshål, tunnlar och schakt, sprickstruktur, temperatur, grundvattenflöde och grundvattensammansättning i geosfären etc.

Redovisningen av initialtillståndet är därmed också en komprimerad form av platsbeskrivning, anpassad till säkerhetsanalysens behov.

Beskrivningen följer systemredovisningens struktur på så sätt att man tilldelar de olika variablerna initiala värden. Mycket av informationen kan hämtas från förvarets specifikationer, t ex kopparkapselns utformning. Annat, t ex spricksystemets struktur, är platsspecifikt och måste bestämmas genom mätningar i fält. Vissa förhållanden förändras snabbt, t ex temperaturen i bufferten omedelbart efter deponeringen, medan andra med små variationer kan förväntas behålla sina initiala värden över långa tider.

I beskrivningen av det initiala tillståndet ingår även att ange osäkerheter i bestämningarna av de olika variablerna. Generellt kan osäkerheterna sägas vara relativt små för de variabler som beskriver de konstruerade delarna av förvaret och betydligt större vad gäller förhållanden i geosfären.

Speciellt för SR 97 gäller att tre olika platser analyseras. I redovisningen kallas dessa Aberg, Beberg respektive Ceberg. Initialtillståndet för samtliga dessa måste således redovisas.

Initialtillståndet som används i SR 97 redovisas i kapitel 6. Det mesta av materialet i kapitel 6 är hämtat från Förvarssystemrapporten.

## 4.4 Scenarieval

Med systemet av processer givet i systembeskrivningen blir förvarets utvecklingsväg bestämd om

- a) ett initialt tillstånd och
- b) förhållandena i omgivningen

kan fastställas. Både initialtillstånd och omgivningsförhållanden är emellertid behäftade med osäkerheter.

De yttre förhållanden som råder idag kan vi observera och beskriva. Det gäller t ex biosfärens utseende ovanför förvaret, klimatet och samhällets struktur. Däremot råder stor osäkerhet om hur klimat, biosfär och framför allt samhälle kan komma att förändras i framtiden. Ändå måste konsekvenserna för förvaret av sådana förändringar analyseras. Metoden som används för detta är att analysera förvarets utveckling för en rad olika tänkbara framtida förhållanden i omgivningen. Man analyserar en uppsättning olika scenarier.

Ett scenario definieras därmed som den utveckling förvarssystemet genomgår givet ett initialtillstånd och specificerade förhållanden i omgivningen.

Ett centralt moment i analysen är att välja ett antal scenarier som sedan vart och ett blir föremål för analys. Tillsammans bör de valda scenarierna ge en rimlig täckning av de olika utvecklingar förvaret och dess omgivning kan tänkas genomgå.

Även i beskrivningen av det initiala tillståndet finns osäkerheter som bör täckas av scenarievalet. Många sådana osäkerheter har begränsad betydelse för förvarets utveckling. Betydelsen av andra kan behöva belysas genom att analysera olika varianter av ett scenario, där t ex olika tolkningar av sprickstrukturen i geosfären skiljer varianterna åt. Det finns dock åtminstone ett viktigt initialt förhållande som har en avgörande betydelse för utvecklingen: om någon eller några av kopparkapslarna skulle vara behäftade med oupptäckta defekter från tillverkningen så att isoleringen redan från början vore äventyrad.

Även sådana avgörande osäkerheter i det initiala tillståndet kan hanteras genom att analysera olika scenarier, i detta fall ett där ett fåtal kapslar antas vara behäftade med tillverkningsfel. Att postulera att ett fåtal kapslar är initialt otäta är också ett sätt att utreda förvarets fördröjande funktion.



I SR 97 har fem scenarier valts ut för detaljerad analys. Urvalet är baserat på erfarenheter från arbetet med interaktionsmatriserna, FEP-databasen och systembeskrivningen. Dessa systematiska genomgångar av förvarssystemet har givit en uppsättning faktorer som kan påverka förvarets funktion och säkerhet. Dessutom har erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser av SKB och andra organisationer utnyttjats.

Systembeskrivningen har utvecklats under arbetet med SR 97 och har inte kunnat utnyttjas fullt ut till ett systematiskt scenarioval. Beskrivningen har dock använts för att systematisera beskrivningarna av initialtillståndet som en uppsättning variabler och växelverkan med systemets omgivning under olika förhållanden i form av THMC-interaktioner. Därmed har också scenariebeskrivningarna kunnat systematiseras i högre grad än tidigare.

#### 4.4.1 Scenarier i SR 97

För den fortsatta metodikdiskussionen är det till hjälp att redan här ange vilka scenarier som valts i SR 97. Noggrannare definitioner av förutsättningarna för de olika scenarierna ges i kapitel 7.

De valda scenarierna för SR 97 är:

- 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 jordskalvscenario.
- Ett scenario som behandlar framtida mänskliga handlingar som kan tänkas påverka djupförvaret.

För klimatscenarioet studeras utvecklingen både då alla kapslar initialt antas hela och då ett fåtal kapslar antas ha initiala fel.

#### 4.4.2 Sannolikhet att ett givet scenario inträffar; varianter

Kriteriet för förvarets säkerhet är formulerat som en riskgräns. Detta innebär att såväl sannolikheten som konsekvensen för en given händelseutveckling (ett givet scenario) måste bedömas, se också avsnitt 4.6.5. För varje scenariobeskrivning måste därför också en sådan sannolikhet redovisas.

Varje scenario täcker ett (oändligt) antal möjliga utvecklingsvägar med gemensamma huvuddrag. Små skillnader i deponeringssekvensen leder till variationer i den termiska utvecklingen i geosfären. Alla sådana variationer har dock samma huvuddrag och täcks in av den termiska utvecklingen i ett basscenario. Sannolikheten för att en enskild utvecklingsväg ska bli verklighet närmar sig noll om förutsättningarna (bl a initialtillståndet) detaljeras tillräckligt mycket. Den sannolikhet som associeras till ett givet scenario gäller sannolikheten att huvuddragen blir verklighet och är i princip (den oändliga) summan av sannolikheterna för alla förutsättningar som täcks in av scenariot.

I SR 97 diskuteras scenariernas sannolikheter i analysens sista moment, resultatutvärderingen. Detta sker i samband med att resultatet av samtliga scenarier vägs samman till en samlad riskbedömning.

Ett scenario kan ibland behöva delas upp i ett flertal varianter, var och en med sin sannolikhet. Detta blir särskilt tydligt vid probabilistiska analyser, se vidare avsnitt 4.6.5.

Gränsen för när en variant skiljer ut sig tillräckligt mycket för att kallas ett eget scenario är en definitionsfråga. Var gränsen dras är emellertid inte väsentligt så länge sannolikheten för varje scenario och varje variant uppskattas och vägs samman i den slutliga riskbedömningen.

## 4.5 Analys av valda scenarier

Sedan en systembeskrivning upprättats, initialtillståndet beskrivits och en uppsättning scenarier valts vidtar själva analysen av de valda scenarierna.

Tanken är här att först i detalj analysera basscenariot, dvs det där förvaret tänks byggt enligt specifikationer och där dagens förhållanden i omgivningen tänks råda även framgent. Därefter analyseras övriga scenarier genom att påvisa skillnader i utvecklingen jämfört med basscenariot.

Hur förändras utvecklingen om klimatet förändras? Vid jordskalv? Om några kapslar har tillverkningsfel? Vilken betydelse har förändringarna för säkerheten? En grund för att genomföra och redovisa analyserna i form av jämförelser med ett basscenario är att det analyserade förvarssystemet är konstruerat för att vara robust, dvs att varierande förhållanden i omgivningen inte ska ge dramatiska förändringar i förvarets utveckling och funktion.

### 4.5.1 Analys av omgivningsförhållanden

För varje scenario beskrivs och analyseras utvecklingen i förvarets omgivning. Metoderna för och djupet av dessa analyser varierar kraftigt mellan olika scenarier. För klimatet är t ex en enkel beskrivning av dagens klimat i form av årsmedeltemperatur och årsnederbörd tillräcklig i basscenariot. I klimatscenariot å andra sidan krävs en betydligt djupare analys av de genomgripande förändringar som sker vid t ex en istid. På liknande sätt är det viktigt att i detalj beskriva biosfären i kapseldefektscenariot, där utsläpp till biosfären kan förväntas, medan biosfärsbeskrivningen i basscenariot kan göras betydligt mer översiktlig. Metodiken för beskrivningen av omgivningsförhållandena redovisas efter behov i respektive scenarieanalys.

Ett generellt mål med analyserna av omgivningen är att de bör resultera i en beskrivning av termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska interaktioner med förvarssystemet.

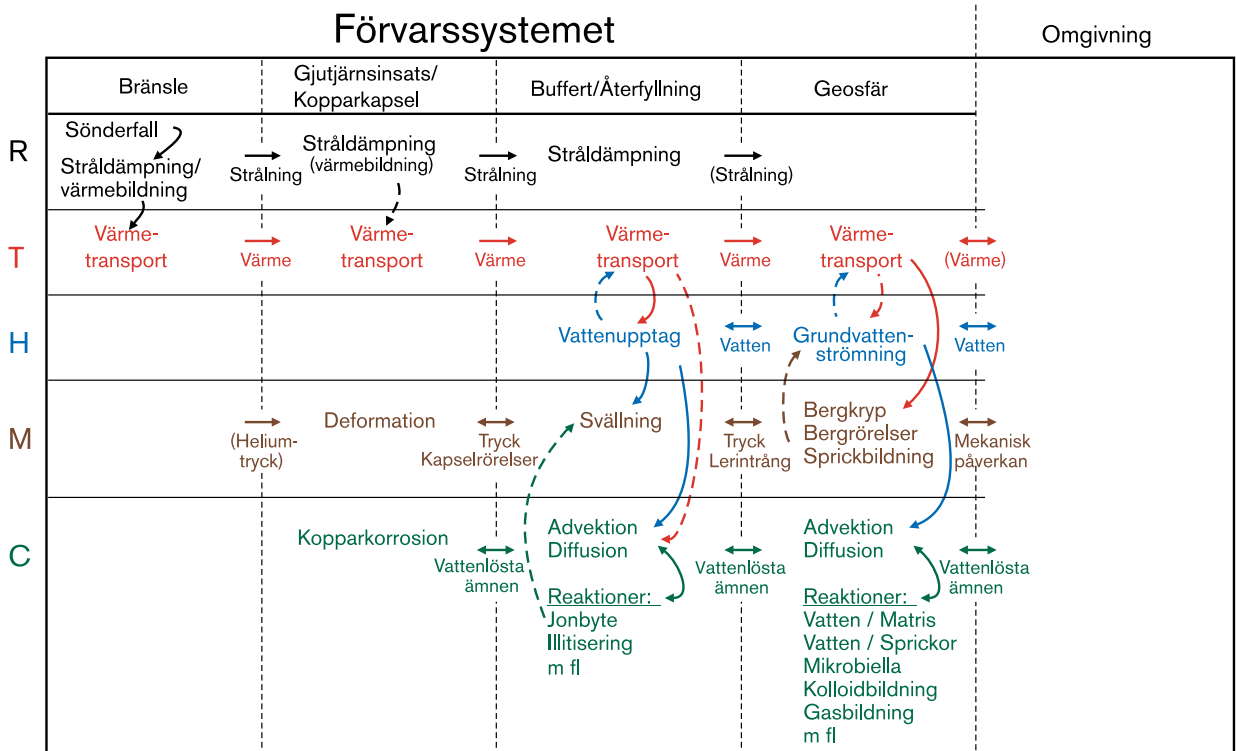
## 4.5.2 Basscenariot

I basscenariot analyseras förvarets utveckling bl a under antagande att dagens klimat består och inga kopparkapslar har tillverkningsfel.

Alla relevanta processer då kapslarna är täta hanteras i basscenariot. I scenariot visas inledningsvis också hur det komplexa systemet av processer och variabler låter sig brytas ner till väsentligen en termisk, en hydraulisk, en mekanisk och en kemisk utveckling med ett fåtal viktiga kopplingar dem emellan, figur 4-6. Figuren förklaras mer i detalj i kapitel 8.

Processdokumentationen används för att värdera och bedöma vilken betydelse olika processer har för utvecklingen. Vissa skeenden, t ex förvarets temperaturutveckling och grundvattenströmningen i geosfären studeras med modellberäkningar speciellt genomförda för SR 97. Andra processer t ex omfattningen av kopparkorrosion eller vissa strukturförändringar i bufferten kan hanteras med enkla överslagsberäkningar. Ofta används pessimistiskt valda data i modellering och överslagsberäkningar för att inte överskatta förvarets skyddsfunktion.

Analysen utmynnar i en värdering av förvarets säkerhet för basscenariot. Tyngdpunkten i analysen ligger på att utvärdera förvarets primära säkerhetsfunktion att isolera bränslet.



**Figur 4-6.** De viktigaste processerna och kopplingarna i basscenariot.

### 4.5.3 Kapseldefektscenariot

I kapseldefektscenariot blir utvecklingen densamma som i basscenariot utom för det fåtal kapslar som tänks vara behäftade med initiala skador. Den inre utvecklingen för en sådan kapsel analyseras med modellberäkningar, medan kapselns omgivning i stort sett kan förväntas förbli opåverkad, med ett viktigt undantag: efter en tid kan radionuklider tränga ut ur den defekta kapseln.

Den primära säkerhetsfunktionen, isoleringen, är satt ur spel för dessa kapslar och tyngdpunkten i analysen övergår till den sekundära funktionen, att hålla kvar och fördröja uttransporten av radionuklider. Här blir kvantitativa frågor betydelsefulla: I vilken grad fördröjs radionukliderna i kapsel, buffert och berg? Hinner de sönderfalla innan de når biosfären? Om inte, vilka blir konsekvenserna för människa och miljö? Detaljerade kvantitativa analyser av grundvattenströmning i geosfären, transporten genom kapsel, buffert och geosfär samt av radionuklidomsättning i biosfären resulterar i kvantitativa uppskattningar av doser och risker för människor i förvarets närhet. Resultaten jämförs med myndigheternas acceptanskriterier.

Mer om metodiken för beräkningarna av radionuklidtransport finns i avsnitten 4.6.4 och 4.6.5.

### 4.5.4 Övriga scenarier

Analysen av övriga scenarier syftar till att jämföra förvarets utveckling vid stora yttre förändringar med den i basscenariot. För att studera inverkan av t ex en istid krävs även analyser av omgivningsförhållanden, som utvecklingen av en inlandsis under en glaciation. Den använda metodiken för detta redovisas kort i respektive scenario, kapitlen 10–12. Även här har uppdelningen i termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska aspekter varit vägledande. För varje scenario har växelverkan mellan förvaret och omgivningen beskrivits i form av THMC-interaktioner. Om utvecklingen leder till kapselskador genomförs också beräkningar av radionuklidtransport.

För klimatscenariot analyseras också utvecklingen om initialtillståndet inkluderar kapslar med tillverkningsfel.

## 4.6 Hantering av osäkerheter

Underlaget för en säkerhetsanalys är oundvikligen behäftat med olika typer av brister och osäkerheter. En viktig del i analysen är därför hanteringen av sådana brister. Detta är inte någon separat verksamhet utan utgör en integrerad del av analysarbetet. Här diskuteras ändå hanteringen samlat eftersom den utgör en viktig del i metodiken.

Brister kan vara av kvalitativ eller kvantitativ natur. Kvalitativa brister rör t ex frågor om fullständighet: Har alla processer som påverkar förvarets utveckling identifierats i systembeskrivningen? Har alla typer av yttre påverkan täckts in i valet av scenarier? Andra kvalitativa frågor rör processförståelse: Förstår vi de inre processerna tillräckligt väl för säkerhetsanalysens behov? Förstår vi processerna som styr förhållanden i omgivningen tillräckligt väl?

**Tabell 4-1. De typer av osäkerheter som kommer in i analysens fyra första moment och var dessa redovisas och hanteras.**

<b>1. Systembeskrivning</b>	
<i>Fullständighet</i>	Diskuteras i avsnitt 5.8.
<i>Processförståelse (konceptuell osäkerhet)</i>	Redovisas utförligt i en separat rapport, Processrapporten.
<b>2. Beskrivning av initialtillstånd</b>	
<i>Dataosäkerhet</i>	Kvantitativa osäkerheter i initialtillståndet redovisas för varje variabel i kapitel 6.
<b>3. Val av scenarier</b>	
<i>Fullständighet/täckningsgrad</i>	Diskuteras i avsnitt 7.3.
<b>4. Analys av valda scenarier</b>	
<i>Modellosäkerhet (konceptuell osäkerhet)</i>	Tilltron till använda modeller i allmänhet diskuteras kort där modellstudier redovisas i scenarioanalyserna, kapitel 8-11. Tilltron till modeller för radionuklidtransport och grundvattenströmning redovisas mer utförligt i avsnitt 9.11.
<i>Indata till modeller/beräkningar</i>	Dataosäkerheter i allmänhet diskuteras kort där beräkningar och modellstudier redovisas i huvudrapporten. Dataosäkerheter som rör radionuklidtransport och grundvattenströmning redovisas och diskuteras utförligt i en särskild datarapport. I beräkningarna av radionuklidtransport görs osäkerhetsanalyser och probabilistiska analyser.

Andra frågor är kvantitativa. Hur väl kan vi bestämma initialtillståndet? Förvarets initiala temperatur kan bestämmas med en noggrannhet som mer än väl täcker analysens behov, medan beskrivningen av geosfärens sprickgeometri är behäftad med osäkerheter som kräver en mer genomtänkt hantering. Hur väl kan vi kvantitativt beskriva olika processer, t ex värmeledning eller grundvattenströmning? Denna fråga är speciellt viktig för analysen av radionuklidtransport som ju har en direkt betydelse för värderingen av förvarets säkerhet. Beräkningar av radionuklidtransport hanterar mängder av indata, som kan vara behäftade med osäkerheter i varierande grad.

En djupare diskussion om olika typer av osäkerheter förs t ex i säkerhetsrapporten SR 95 /SKB, 1995/.

Hanteringen av osäkerheterna består dels i att redovisa osäkerheter och brister i underlaget, dels i att hantera dem vid genomförandet av analysen. Tabell 4-1 visar de olika typer av osäkerheter som kommer in i analysens olika moment. I det följande diskuteras osäkerheterna kort.

#### 4.6.1 Fullständigheten i systembeskrivning och scenarieval

Det är aldrig möjligt att bevisa att alla processer, variabler och kopplingar av vikt identifierats i en systembeskrivning. Tilltron till att omfattningen är tillräcklig för säkerhetsanalysens behov måste i stället bedömas. I analysen redovisas vilka ansträngningar som gjorts för att nå en fullständig beskrivning och argumenten för att omfattningen bör vara tillräcklig. Tilltron till att omfattningen är tillräcklig för den aktuella säkerhetsanalysens syfte blir sedan föremål för bedömning. De ansträngningar som ligger till grund för att få en täckande systembeskrivning i SR 97 redovisas i avsnitt 5.8.

För fullständighet och täckningsgrad i scenarievalet gäller en liknande situation. Detta diskuteras i kapitel 7.

## 4.6.2 Kvantifiering av initialtillstånd

I SR 97 redovisas ett explicit initialtillstånd i form av ett antal variabler som ges initiala värden. För varje variabel diskuteras också osäkerheter.

Initialtillståndet är utgångspunkten för modellberäkningar av förvarets utveckling och utgör därmed en del av de indata som krävs för modellberäkningar inte bara av radionuklidtransport utan även andra i t ex basscenariot.

Beskrivningen av osäkerheter i initialtillståndet är också en grund för valet av scenarier enligt ovan.

Initialtillståndet kan också sägas vara en kvantifiering av den valda förvarsutformningen. Om säkerhetsanalysen ska utnyttjas till att diskutera konsekvenser av förändringar hos utformningen kan initialtillståndet med osäkerheter vara en grund för sådana diskussioner.

Av bl a dessa skäl har osäkerheter i initialtillståndet givits en särskild redovisning i SR 97.

## 4.6.3 Konceptuell osäkerhet

Begreppet konceptuell osäkerhet används i SR 97 dels för de osäkerheter som kommer av att den grundläggande förståelsen av en process inte är fullständig, dels för de osäkerheter som orsakas av att en matematisk modell inte korrekt beskriver en process (för vilken man trots det kan ha en god grundläggande förståelse).

### ***Grundläggande förståelse***

Förståelsen för varje process som identifierats i systembeskrivningen diskuteras och redovisas i Processrapporten. Här är det viktigt att ha rätt perspektiv. Det gäller att förstå processen tillräckligt ingående för säkerhetsanalysens syfte. Ofta kan brister i detaljerad förståelse av en process hanteras i säkerhetsanalysen genom att konsekvensen av processen överskattas.

Ett exempel är följande: Bränslet är inneslutet i kapslingsrör av Zirkaloy, en beständig legering. Om en kopparkapsel skulle skadas och vatten tränga in kommer kapslingsröret att utsättas för korrosion. Korrosionsprocessens utveckling på lång sikt är ofullständigt känd. I säkerhetsanalysen brukar man därför ofta pessimistiskt bortse från kapslingsrörets barriärfunktion. På så sätt överskattas de konsekvenser korrosionsprocessen har för uttransport av radionuklider från kapseln.

Ett annat exempel är processen illitisering, en långsiktig kemisk omvandling av bufferten. Denna process kräver flera faktorer för att äga rum. En av dessa är tillgång på kalium. Alla detaljer i processen är inte kända, men man vet säkert att omvandlingen inte kan gå fortare än vad tillförseln av kalium tillåter. Omfattningen av processen kan därför pessimistiskt beräknas som om bara kaliumtillförseln vore begränsande, något som relativt enkelt kan beräknas.

## **Modellosäkerhet**

Även om den grundläggande förståelsen av en process är god är det inte säkert att en fullgod matematisk modell av processen kan formuleras för att användas i säkerhetsanalysen. Grundvattenströmning kan tjäna som exempel: De grundläggande naturlagar som styr grundvattenströmning i sprickigt berg är väl kända, vilket också framgår av Processrapporten. I en säkerhetsanalys är däremot kännedomen om spricksystemets struktur i olika skalor bristfällig. Man tvingas därför införa nya, t ex statistiska modellbegrepp för att kunna genomföra en modellering trots bristerna.

Modellosäkerhet rör alltså frågan huruvida en given modell beskriver verkligheten tillräckligt väl för säkerhetsanalysens behov. I SR 97 diskuteras tilltron till de modeller som används i analyser av grundvattenströmning och radionuklidtransport i kapsel-defektscenariot, kapitel 9.

### **4.6.4 Osäkerheter i indata för beräkningar av radionuklidtransport**

#### ***Rimliga och pessimistiska värden samt statistiska fördelningar***

Resultaten av beräkningarna av radionuklidtransport kvantifierar förvarets säkerhet. Därmed är det särskilt viktigt att säkerställa kvaliteten i dessa beräkningar och hanteringen av osäkerheter i indata måste vara rigorös. Figur 4-7 visar de modeller (rektanglar) och de indata (ellipser) som används vid radionuklidberäkningar i SR 97. En ellips kan ofta representera en stor uppsättning data, t ex specifika värden för varje radionuklid, eller varje kemiskt element som hanteras i beräkningen.

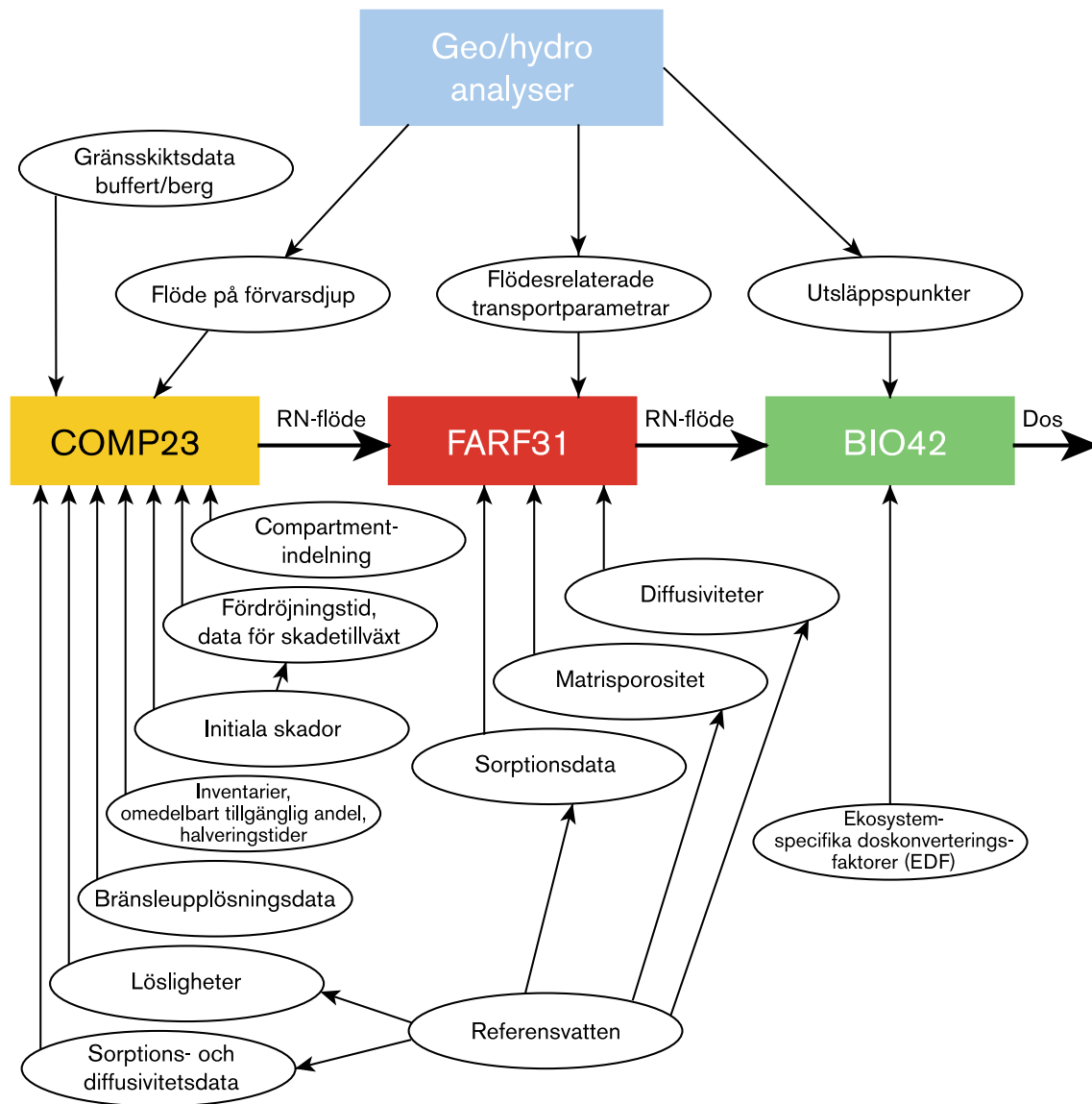
Varje sådan uppsättning indata är hämtad från underlagsrapporter av experter inom respektive område. Många av rapporterna är speciellt framställda för SR 97. Varje författare har diskuterat osäkerheter i data enligt en given mall.

Därefter har diskussionen kring osäkerheterna i de enskilda rapporterna värderats i Datarapporten. För nästan alla indata har i detta dokument också föreslagits:

- ett rimligt värde och
- ett pessimistiskt värde.

För några indata har utöver rimligt och pessimistiskt värde dessutom fördelningar av tänkbara värden redovisats. Detta gäller data som uppvisar rumslig variabilitet eller sådana som bestäms av rumsligt variabla förhållanden. I geosfären ger heterogeniteten i bl a spricksystemet en fördelning i rummet av olika data till beräkningar, ofta efter omfattande analyser.

Spännvidden mellan rimligt och pessimistiskt värde är en möjlighet att representera osäkerheter i indata. För de fåtal fall där fördelningar finns tillgängliga, representerar fördelningen huvudsakligen osäkerheter som orsakas av den rumsliga variabiliteten. Beräkningar av radionuklidtransport genomförs med olika kombinationer av rimliga och pessimistiska data för att belysa betydelsen av olika osäkerheter. Dessutom görs probabilistiska analyser vilket är ämnet för nästa avsnitt.



**Figur 4-7.** Modeller (rektanglar) och indata (ellipser) i beräkningarna av radionuklidtransport.

#### 4.6.5 Probabilistiska beräkningar

Acceptanskriteriet för ett djupförvar är formulerat som ett riskkriterium. Detta betyder att både sannolikhet och konsekvens ska uppskattas för ett tänkbart händelseförlopp. Sannolikhet och konsekvens multipliceras till en risk och risken för alla analyserade händelseförlopp adderas till en total risk som jämförs med acceptanskriteriet.

Detta kan göras på olika sätt. En möjlighet är att uppskatta en övre gräns för sannolikheten för varje scenario och sedan beräkna en konsekvens med pessimistiskt valda värden på alla ingående data. Konsekvensen multipliceras med sannolikheten och man har fått ett pessimistiskt riskmått, dvs ett som bör överskatta risken. Riskerna från de olika scenarierna adderas till ett totalt riskmått.



En annan möjlighet är att ha en långtgående probabilistisk hantering också inom ett scenario, dvs att göra en probabilistisk konsekvensberäkning. I extremfallet anges då sannolikhetsfördelningar för alla ingående data som inte är exakt kända. Ett stort antal olika realiseringar av konsekvensberäkningen genomförs, där indata slumpmässigt hämtas från de angivna fördelningarna. Varje realisering resulterar i en konsekvens, t ex en dos och alla realiseringar är lika sannolika. Det samlade resultatet blir en statistisk fördelning av doser och risken blir lika med fördelningens medelvärde. Detta kallas konditionerad risk, eftersom den förutsätter att scenariot i fråga inträffat. Den okonditionerade risken fås genom att multiplicera med sannolikheten att scenariot blir verklighet. Den samlade risken blir som tidigare summan av de okonditionerade riskerna för alla scenarierna.

På dessa sätt kan det probabilistiska inslaget göras större eller mindre i konsekvensberäkningarna i en säkerhetsanalys. Olika länder och organisationer har valt sin specifika inriktning, ofta som en återspeglning av regelverket i respektive land.

Användandet av probabilistiska metoder och analyser i en säkerhetsanalys diskuteras internationellt, se t ex NEA /1997a/. De datorprogram som används för beräkningarna i SR 97 kan hantera probabilistiska beräkningar, och sådana genomförs också.

Den probabilistiska metodiken i SR 97 är utformad med hänsyn till att fördelningar saknas för den överväldigande mängden indata.

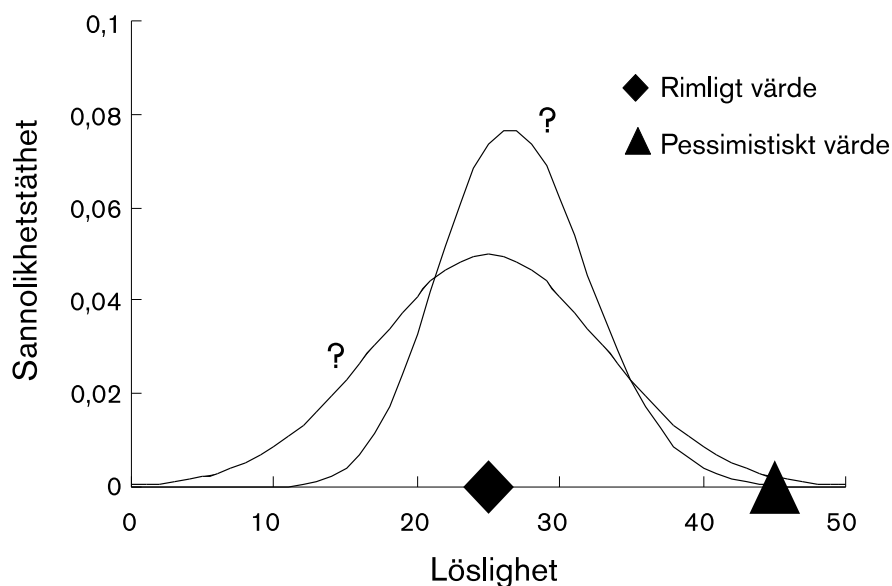
Lösligheter för olika kemiska element får illustrera svårigheten att bestämma fördelningar: Lösligheten för ett kemiskt element i en vattenfylld kapsel ger ofta en fundamental begränsning av takten för uttransport av elementet i fråga. Lösligheter som används i säkerhetsanalysen bestäms genom separata beräkningar som baseras på grundvattnets sammansättning och det kemiska elementets egenskaper.

Båda dessa faktorer bestäms av mängder av data från platsspecifika mätningar av grundvatten respektive experimentellt eller teoretiskt bestämda konstanter. Dessa primära data är i sig behäftade med osäkerheter som kräver expertbedömning för att på ett tillförlitligt sätt användas i beräkningen av lösligheter.

I den här situationen har det bedömts som rimligt att genom att värdera underliggande osäkerheter ange ett rimligt och ett pessimistiskt värde för de lösligheter som används i beräkningarna av radionuklidtransport.

Om en fullt ut probabilistisk hantering skulle ha använts skulle man i stället försökt uppskatta en sannolikhetsfördelning av lösligheter för varje element. Det har bedömts som mycket svårt att ange en tillförlitlig fördelning av tänkbara värden för lösligheten. Skillnaden illustreras i figur 4-8. Detsamma gäller t ex andra typer av kemiska indata som bestäms genom liknande procedurer som lösligheterna.

Situationen blir än mer komplicerad då man även beaktar att korrelationer mellan olika fördelningar måste beskrivas för att få en korrekt stokastisk hantering. I exemplet med lösligheter ska en fördelning anges för varje kemiskt element som förekommer. Vissa faktorer som påverkar lösligheten är gemensamma för samtliga element, t ex sådana som har med den kemiska miljön att göra. På så sätt är fördelningarna till viss del korrelerade och också detta måste beskrivas kvantitativt för att resultatet av en probabilistisk beräkning ska bli korrekt.



**Figur 4-8.** För exempelvis lösligheter av olika element har ett rimligt och ett pessimistiskt värde uppskattats. Däremot har det inte setts som möjligt att ange någon sannolikhetsfördelning för lösligheten.

Riskberäkningar för ett djupförvar kontrasterar här mot beräkningar för många tekniska system där statistik från drifterfarenheter kan ligga till grund för en probabilistisk hantering. Vid en säkerhetsanalys av t ex driften av ett kärnkraftverk kan driftstatistik för pumpar och reservgeneratorer ge underlag till en probabilistisk hantering.

I SR 97 har fördelningar bara använts där det finns någon form av statistiskt underlag att basera en fördelning på. Det gäller t ex:

- Förhållanden i geosfären som bestäms av geosfärens rumsliga variabilitet. Det kan gälla primära förhållanden som sprickstatistik eller hydraulisk konduktivitet liksom data som framräknas med den rumsliga variabiliteten som grund, t ex vatten-transporttider.
- Positioner för initialt skadade kapslar i förvaret.
- Jordskalvsstatistik som underlag i jordskalvsscenarioet.

I andra fall, som till exempel lösligheter, gäller osäkerheten till stor del en brist på kunskap om vilka förhållanden som kommer att råda. Här kan man bara allmänt säga att värden omkring de rimliga är mycket mer sannolika än de pessimistiska värdena. Det är också möjligt att generellt bedöma om en storhet är korrelerad till andra storheter.

Svårigheten att uppskatta fördelningar för alla data gör att det inte är möjligt att genomföra en probabilistisk analys fullt ut. Å andra sidan är det nödvändigt att beräkna en risk att jämföra med acceptanskriterierna. I SR 97 görs följande ansats för de probabilistiska analyserna:

- Statistiska fördelningar används bara när det finns någon form av statistiskt underlag att basera en fördelning på, se exemplen ovan.
- För övriga data används de rimliga och de pessimistiska värdena. Båda tilldelas sannolikheter som väljs så att risken bedöms bli överskattad i den probabilistiska analysen.

Metoden beskrivs och diskuteras mer i avsnitt 9.11.

Sammanfattningsvis gäller att användandet av ett stokastiskt underlag som vilar på en svag grund kan underminera tilltron till säkerhetsanalysens resultat. Probabilistiskt framräknade resultat i form av exempelvis dos- och riskfördelningar är också mer abstrakta och därigenom ibland svårare att tolka och förmedla, men behövs för de riskuppskattningar som är nödvändiga för att värdera förvarets säkerhet.

## 4.7 Kommande arbete

Med SR 97 presenteras ett nytt format för systembeskrivning, med tillhörande dokumentation av processer. Formatet genomsyrar också redovisningen av hela säkerhetsanalysen. Några kompletteringar bör genomföras inför kommande analyser:

- En revision av processvalet baserat på tillgängliga databaser.
- Kompletteringar av processdokumentationen.
- Ett mer systematiskt scenarieval baserat på formatet för systembeskrivningen och tillgängliga FEP-databaser.
- Lagring av systembeskrivning med tillhörande processdokumentation på elektroniskt medium, kopplat till befintliga databaser.
- En utvärdering av metoden för probabilistisk analys.

Dessutom bör ständigt metodiken för säkerhetsanalysen kritiskt prövas i ljuset av metodik som används i andra säkerhetsanalyser, nya metoder som presenteras, synpunkter från granskningar av denna analys etc.

## 4.8 Referenser

**NEA, 1997a.** Lessons learnt from ten performance assessment studies. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA).

**NEA, 1997b.** Safety assessment of radioactive waste repositories – Systematic approaches to scenario development – An international database of features, events and processes. Draft report (24/6/1997) of the NEA working group on development of a Database of Features, Events and Processes Relevant to the Assessment of Post-Closure Safety of Radioactive Waste Repositories. Paris, Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD/NEA).

**Pers K, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, Bruno J, Pusch R, Hedin A, Morén L, Sellin P, Ström A, 1999.** SR 97 – Identification and structuring of processes. SKB TR-99-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1995.** SR 95 – Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel. Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 5 Systembeskrivning; processer och variabler

### 5.1 Inledning

I detta kapitel beskrivs förvarssystemet på det speciella format som ska användas i säkerhetsanalysen, se avsnitt 4.2. I korthet innebär det att förvaret delas in i de fyra systemdelarna bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. För varje systemdel identifieras de processer som har betydelse för den långsiktiga utvecklingen och de variabler som behövs för att karakterisera systemdelen. Även proceduren för valet av processer beskrivs i avsnitt 4.2.

I detta kapitel ges först en överblick av KBS-3-systemet och därefter för varje systemdel:

- en allmän beskrivning,
- en överblick av variabler,
- en överblick av processer,
- ett THMC-diagram som visar samtliga processer och variabler samt kopplingen dem emellan.

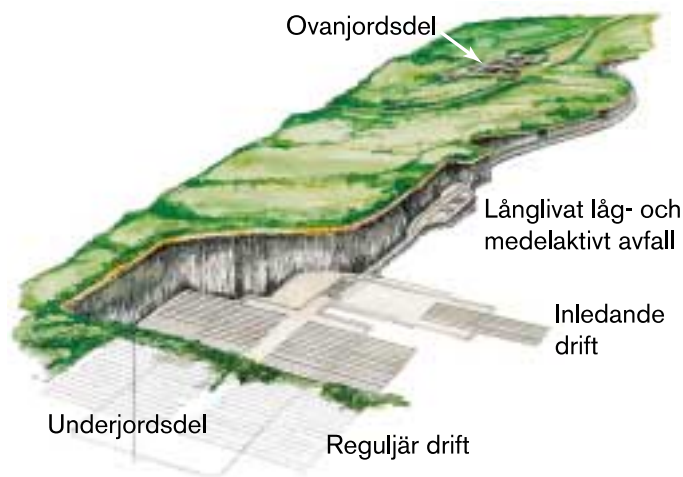
Till systembeskrivningen hör också en omfattande dokumentation av varje process. Dokumentationen av samtliga processer finns samlad i Processrapporten vars format beskrevs i avsnitt 4.2.

De översiktliga beskrivningarna i detta kapitel utgör tillsammans med processdokumentationen systembeskrivningen i SR 97. Systembeskrivningen kan sägas vara en presentation av det maskineri som styr utvecklingen i förvarssystemet. För att bestämma utvecklingen måste också ett initialt tillstånd fastläggas samt en beskrivning av hur systemet växelverkar med omgivningen. I nästa kapitel beskrivs det initiala tillståndet, dvs variablerna tilldelas initiala värden.

### 5.2 Överblick av KBS-3-systemet

Förvarsutformningen bygger på KBS-3-systemet med inkapsling av bränslet i korrosionsbeständiga kopparkapslar som omges av en lerbuffert och deponeras på cirka 500 meters djup i det svenska urberget. Kapslarna deponeras i ett system av tunnlar där deponeringshålen borrats i tunnlarnas golv.

Förutom ett förvar för använt kärnbränsle (SFL 2) ska också ett förvar för annat långlivat avfall (SFL 3–5) byggas. Detta liknar det slutförvar för radioaktivt driftavfall (SFR) som idag är i drift utanför Forsmark i Norduppland. Lokaliseringen av förvaret för annat långlivat avfall är inte beslutad. En preliminär anläggningsutformning och säkerhetsanalys för ett förvar för annat långlivat avfall har utarbetats parallellt med SR 97 och presenteras i en separat rapport /SKB, 1999/. De säkerhetsmässiga konsekvenserna av en eventuell samlokalisering utreds inte i SR 97.



**Figur 5-1.** Skiss av djupförvar för använt kärnbränsle. Skissen visar också en tänkbar placering för ett förvar för annat långlivat avfall. Detta analyseras dock inte i SR 97.

Anläggningsutformningen med bergrum, tunnlar, deponeringspositioner m m i djupförvaret för använt bränsle bygger på den som presenterades i KBS-3-rapporten /SKBF/KBS, 1983/. Djupförvarets olika delar skisseras i figur 5-1.

Djupförvaret för använt bränsle placeras i ett eller två plan på cirka 500 meters djup. Det består av parallella deponeringstunnlar med deponeringshål borrarade i botten. Deponeringstunnlarna binds samman av tunnlar för transport, kommunikation och ventilation. Dessa har förbindelse med ett centralområde under jord. I SR 97 förutsätts att alla tunnlar sprängs med konventionell teknik.

Resteffekten i det deponerade bränslet kommer att leda till en uppvärmning av förvaret. Placeringen av deponeringstunnlarna liksom avståndet mellan kapselpositionerna styrs bl a av kravet att temperaturen på kapselytan inte får överstiga 100 °C.

## 5.3 Bränsle

### 5.3.1 Allmänt

#### **Bränslemängder**

Den totala mängden bränsle från de tolv svenska kärnreaktorerna beror på drifttid, energiuttag och bränslets utbränningsgrad. Vid årsskiftet 97/98 hade ungefär 4 000 ton använt bränsle genererats /SKB, 1998/. Med en drifttid av 40 år för samtliga reaktorer kan den totala mängden använt bränsle uppskattas till 9 500 ton /SKB, 1998/. Motsvarande mängd för 25 års drifttid blir 6 500 ton.

I SR 97 antas att cirka 8 000 ton bränsle ska deponeras, se vidare avsnitt 6.5.3.

## Bränsletyper

Flera sorters bränsle ska deponeras i förvaret. För ett alternativ med 25 års reaktordrift uppskattas bränslemängden från kokarvattenreaktorer, BWR-bränsle, till ungefär 5 000 ton och mängden från tryckvattenreaktorer, PWR-bränsle, till ungefär 1 500 ton /SKB, 1998/. Utöver detta kommer det att deponeras 23 ton blandoxidbränsle, MOX-bränsle, och 20 ton bränsle från den nedlagda tungvattenreaktorn i Ågesta.

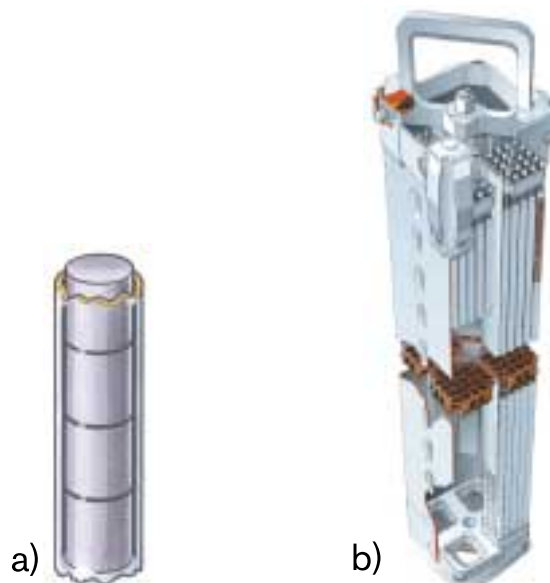
I SR 97 antas i de flesta delanalyser förenklat alla kapslar innehålla BWR-bränsle av typ SVEA 96 med en utbränningsgrad av 38 MWd/tU.

PWR-bränsle skiljer sig marginellt från BWR-bränsle när det gäller innehåll av radionuklider. Andra aspekter av betydelse i säkerhetsanalysen, t ex bränslekapslingsrörens geometri, hanteras i regel så pessimistiskt i analyser av radionuklidtransport att skillnader mellan olika bränsletyper blir irrelevanta. Skillnaden mellan MOX-bränsle och uranbränsle diskuteras i /Forsström, 1982/. MOX-bränslet har högre resteffekt än uranbränsle, vilket gör att mindre bränsle kan deponeras i varje kapsel.

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

## Bränsleelementens uppbyggnad

Kärnbränsle består av cylindriska kutsar av urandioxid. Kutsarna är 11 mm höga och har en diameter av 8 mm. I bränsle av typen SVEA 96 ligger kutsarna staplade i cirka 4 meter långa kapslingsrör av zirkaloy, en beständig zirkoniumlegering. Rören är förslutna med svetsar och hopmonterade till bränsleelement. Varje element innehåller 96 kapslingsrör. Ett bränsleelement innehåller dessutom komponenter av nickellegeringarna Inconel och Incoloy, samt av rostfritt stål.



**Figur 5-2.**

- a. Cylindriska bränslekutsar i kapslingsrör av zirkaloy. Kutsarna har en diameter av cirka en centimeter.
- b. Bränsleelement av typ SVEA 96. Elementet består av 96 bränslerör och har en höjd av cirka fyra meter.

## **Radionuklider**

Radionuklider bildas under reaktordriften genom klyvning av kärnor av framför allt uran-235 och plutonium-239 samt genom att neutroner infångas av kärnor i bränslets metalldelar. De förra kallas fissionsprodukter, de senare aktiveringsprodukter. Dessutom kan uran bilda plutonium och andra tyngre element genom att ta upp en eller flera neutroner. Dessa m fl element (inklusive uran) kallas aktinider och sönderfaller till radioaktiva aktiniddöttrar i flera steg för att till slut bilda stabila former av metallerna bly eller vismut.

Huvuddelen av radionukliderna ligger inbäddade i bränslematrisen av urandioxid. Några få fissionsprodukter är relativt lätttrörliga i bränslet och kan vandra till bränslekutsarnas yta under driften. Fördelningen av radionuklider i bränslet diskuteras utförligt i Processrapporten.

### **5.3.2 Överblick av variabler**

För säkerhetsanalysen beskrivs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller inte bara själva bränslet utan även hålrummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. I hålrummet kommer då processer som bränsleupplösning och korrosion av gjutjärnsinsatsen att äga rum. Hålrummet skulle alltså kunna ingå i endera systemdelen bränsle eller kapsel och har här inkluderats i bränslet.

Bränslet karakteriseras strålmässigt av strålintensiteten av  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - och neutronstrålning och termiskt av temperaturen. Hydrauliskt är det intressant att karakterisera hålrummet om kopparkapseln skulle skadas och vatten tränga in. Hydrauliskt karakteriseras hålrummet av vattenflöden och vattentryck samt av gasflöden och gastryck, som tillsammans benämns hydrovariabler i systembeskrivningen. Mekaniskt karakteriseras bränslet av spänningar i materialen och kemiskt av materialsammansättningen i bränslematris och metalldelar samt av radionuklidinventariet. Om vatten tränger in blir också vattensammansättning och gassammansättning relevanta i beskrivningen. Variablerna definieras i tabell 5-1.

### **5.3.3 Överblick av processer**

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

Radionukliderna i bränslet kommer med tiden att omvandlas till icke radioaktiva ämnen genom radioaktivt sönderfall. Processen ger upphov till  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - och neutronstrålning som genom växelverkan med själva bränslet och med omgivande material dämpas och omvandlas till värmeenergi. Genom värmetransport i form av värmeledning och värmestrålning ändras temperaturen i bränslet och värme förs bort till omgivningen. Temperaturförändringen kommer bl a att medföra en viss termisk expansion av bränslets beståndsdelar. Detta kan, i kombination med den heliumbildning som  $\alpha$ -strålningen ger upphov till leda till mekaniska brott på kapslingsrör i bränslet.



**Tabell 5-1. Variabler i bränsle/hålrum.**

Geometri	Geometriska mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och Zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår.
Strålintensitet	Intensitet av $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hålrum.
Mekaniska spänningar	Mekanisk spänning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.
Radionuklid-inventarium	Förekomsten av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar. Här beskrivs också hur radionuklider i kutsarna fördelas mellan matris och yta.
Material-sammansättning	De material de olika komponenterna i bränsleelementet består av exklusive radionuklider.
Vatten-sammansättning	Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hålrum.
Gas-sammansättning	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hålrum.

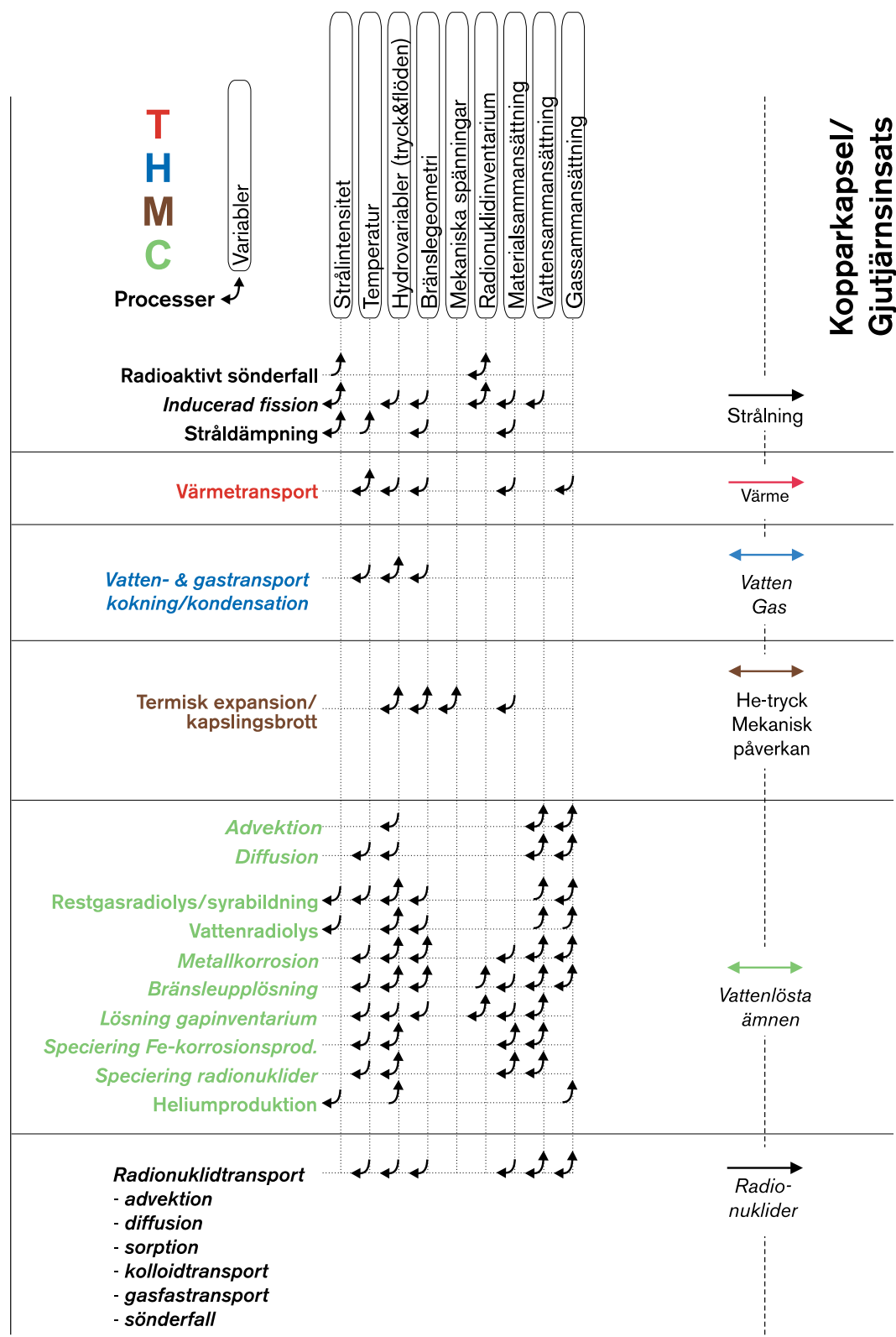
I en intakt kopparkapsel kommer radiolys av restgaser i hålrummet att leda till bildning av små mängder korrosiva gaser som skulle kunna bidra till spänningskorrosion av gjutjärnsinsatsen.

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

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

Slutligen kan vatten dämpa energin hos neutroner i kapselns hålrum. Lågenergetiska neutroner kan därefter orsaka fission av vissa nuklider i bränslet, under frigörande av fler neutroner. Om förhållandena vore ogynnsamma skulle kriticitet kunna uppnås, dvs processen skulle bli självunderhållande. Förvaret utformas så att kriticitet inte ska kunna uppnås.

# Bränsle/hålrums



**Figur 5-3.** THMC-diagrammet för bränsle/hålrums. Processer i kursiv stil förekommer endast då kopparkapselns isolering är bruten.

## 5.4 Gjutjärnsinsats/kopparkapsel

### 5.4.1 Allmänt

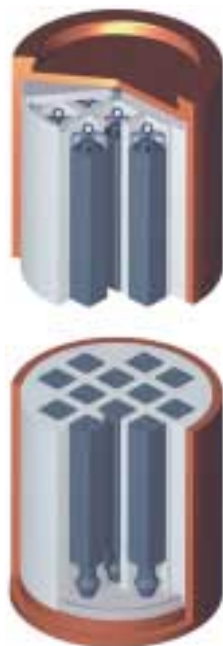
Kapseln består av en inre behållare av gjutjärn och ett hölje av koppar, figur 5-4. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön. Kopparhöljet är 5 cm tjockt och kapseln har formen av en cirka 4,8 meter hög cylinder med en diameter av 1,05 meter.

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

Kopparkapseln tillverkas antingen av heldragna sömlösa rör eller genom att samman-svetsa två rörhalvor av valsad plåt. En botten fästs med elektronstrålesvets på så sätt att svetsen kan undersökas med ultraljud och röntgenradiografi.

Efter att bränsle deponerats i kapseln försluts insatsen med ett O-ringstätat lock som fästs med bult. Därefter fästs kopparhöljets lock med elektronstrålesvets och tätheten kontrolleras med ultraljud och röntgenradiografi.

Kapseln väger totalt cirka 25 ton fylld med 12 BWR-element. En kapsel rymmer cirka två ton bränsle. I SR 97 antas att cirka 8 000 ton bränsle ska deponeras vilket alltså svarar mot cirka 4 000 kapslar.



**Figur 5-4.** Kopparkapsel med gjutjärnsinsats.

**Tabell 5-2. Variabler i kopparkapsel/gjutjärnsinsats.**

Geometri	Geometriska mått för kapselkomponenterna. Här ingår även en beskrivning av eventuella tillverkningsfel vid svetsning o dyl.
Strålintensitet	Intensitet av $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.
Material-sammansättning	Materialsammansättning hos kapselkomponenterna.

### 5.4.2 Överblick av variabler

Systemdelen gjutjärnsinsats/kopparkapsel beskrivs geometriskt av kapselgeometrin, strålmässigt av strålintensiteten (främst  $\gamma$ - och neutronstrålning) samt termiskt av temperaturen. Mekaniska spänningar och materialsammansättningar för insats och kapsel karakteriserar systemdelen mekaniskt respektive kemiskt. Variablerna definieras i tabell 5-2.

### 5.4.3 Överblick av processer

Genom stråldämpning i kapselmaterialet omvandlas en del av strålningen som tränger ut till kapseln till värmeenergi. Värmetransport sker genom ledning inom insats och kapsel samt till stor del genom strålning mellan dessa två delar.

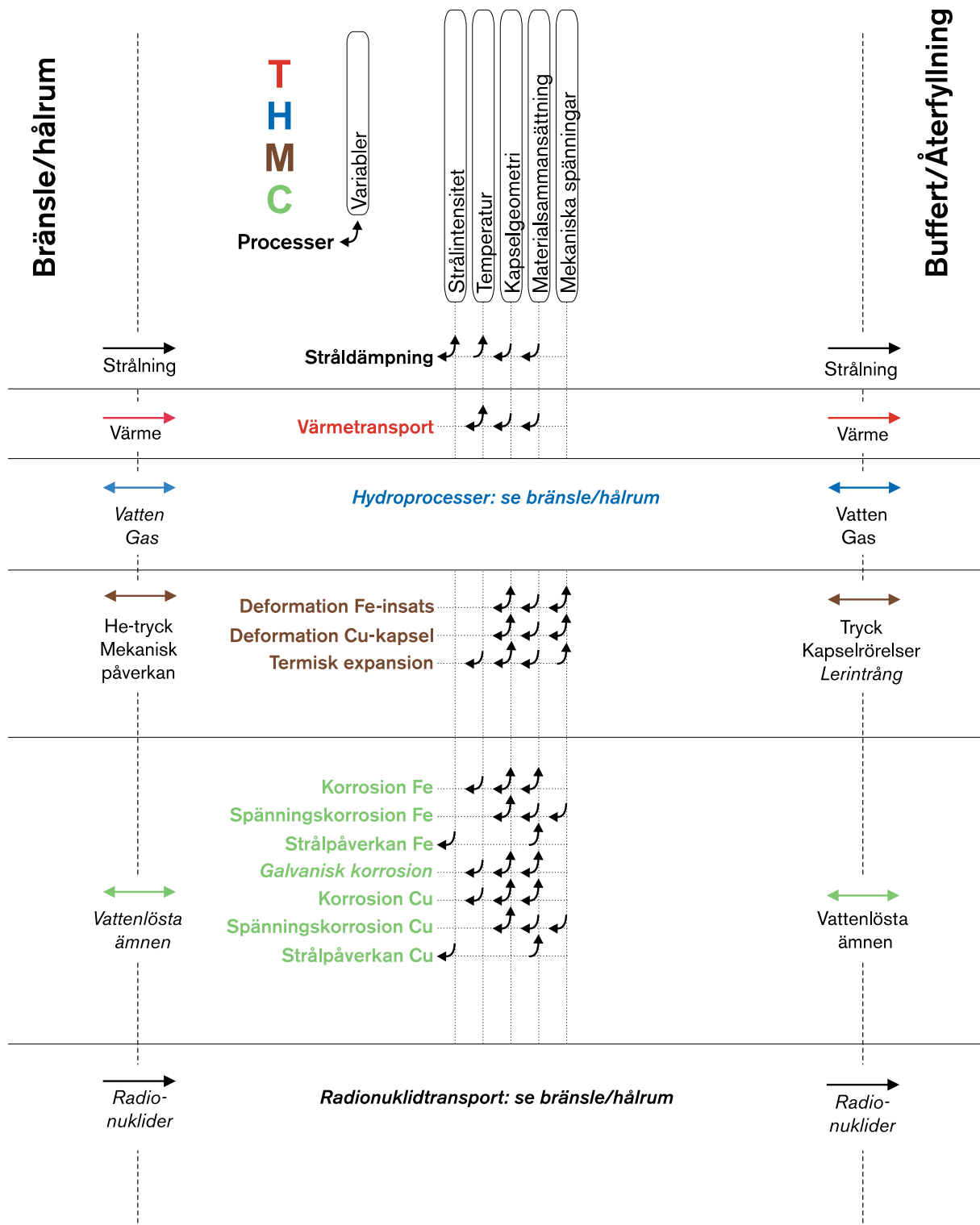
Hydrauliska processer kan ske i hålrummen som finns mellan kapsel och bränsle och mellan gjutjärnsinsats och kopparkapsel och behandlas i systemdelen bränsle/hålrum.

Mekaniskt kan insats och kapsel deformeras av yttre laster och vid en kapselskada av mekaniskt tryck från produkter från korrosion av gjutjärnsinsatsen. Dessutom förekommer termisk expansion som bl a leder till att hålrummet mellan insats och kapsel förändras.

En viktig kemisk process är utvändigt kopparkorrosion. Även spänningskorrosion skulle kunna förekomma i såväl kopparkapsel som gjutjärnsinsats. Materialet kan förändras av strålpåverkan. Om vatten tränger in sker korrosion av gjutjärnsinsatsen med åtföljande väteg bildning och galvanisk korrosion.

Radionuklidtransport i kapselns hålrum behandlas i systemdelen bränsle/hålrum.

# Kopparkapsel/Gjutjärnsinsats



**Figur 5-5.** THMC-diagrammet för gjutjärnsinsats/kopparkapsel. Processer i kursiv stil förekommer endast då kopparkapselns isolering är bruten.

## 5.5 Buffert/återfyllning

### 5.5.1 Allmänt

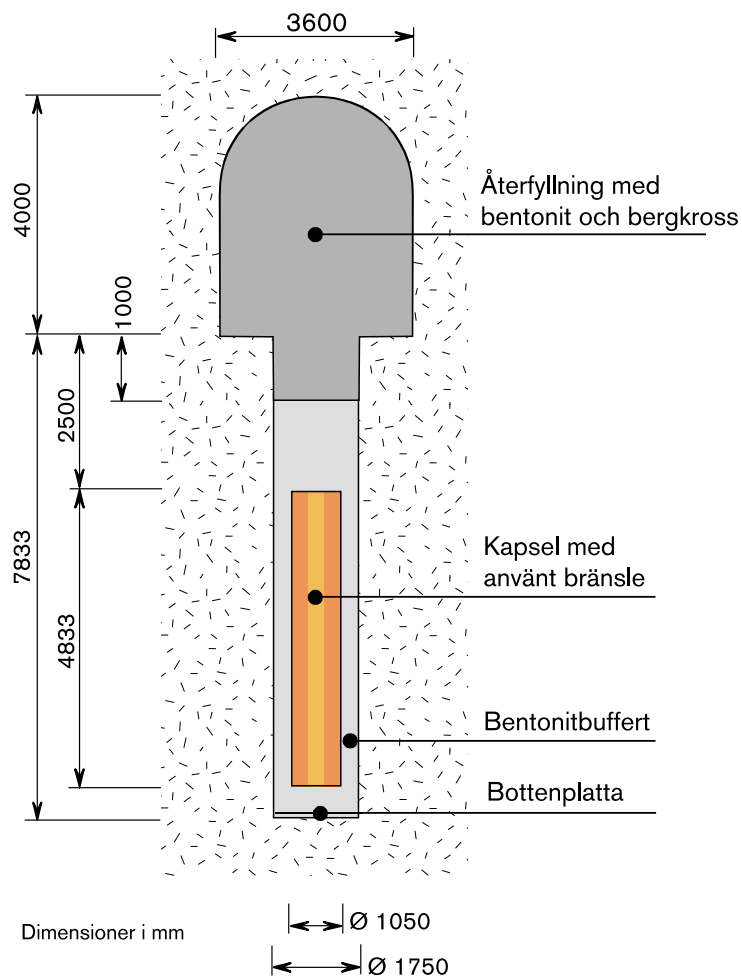
Kopparkapslarna kommer vid deponeringen att omges av en buffert av bentonitlera, se buffert samt mellan buffert och berg. Den inre spalten fylls med vatten och den yttre med bentonitpellets och vatten.

Tunneln ovanför deponeringshålet kommer efter deponeringen att återfyllas med ett material som anpassas till de kemiska förhållandena på förvarsplatsen.

#### **Buffertmaterial**

Bufferten består av MX-80 bentonit, en naturlig lera från Wyoming eller South Dakota i kornstorlek av torkad och mald bentonit.

Bentonit MX-80 består till 65–80 procent av smektitmineralet montmorillonit där lerpartiklarna är mindre än 2 µm. Kemiskt kan montmorillonit beskrivas som en s k polyelektrolyt, där utbytbara positiva joner är associerade till de negativt laddade



**Figur 5-6.** Deponeringshål med buffert och kapsel. Figuren visar också den återfyllda tunneln ovanför deponeringshålet.

lerpartiklarnas ytor. Leran har den karakteristiska egenskapen att svälla i kontakt med vatten. De utbytbara jonerna i MX-80 domineras av natrium och materialet kallas därför också natriumbentonit. Vattenmättad buffert innehåller cirka 25 viktprocent vatten. Vattenmolekylerna är absorberade i materialet och vattentransport sker huvudsakligen genom diffusion.

I MX-80 bentonit finns också bl a mineralen kvarts (cirka 15 procent) och fältspat (5–8 procent). Kemiskt viktiga komponenter utöver mineralen är karbonater (t ex kalcit), sulfater, fluorider, sulfider (t ex pyrit), järn(II) och organiskt material.

Bentoniten får efter bevättning ett porvatten med karakteristisk sammansättning som beror av sammansättningen hos bentoniten och hos det vatten som används för bevättning.

### **Återfyllningsmaterial**

Återfyllningsmaterialet består av en blandning av bentonitlera och bergkross. Proportionerna anpassas efter de kemiska förhållandena på förvarsplatsen så att återfyllningen får önskade egenskaper. I SR 97 har en sådan platsspecifik anpassning inte gjorts. I stället används en typisk sammansättning som består av 15 viktprocent MX-80 bentonitlera och 85 viktprocent bergkross.

### **5.5.2 Överblick av variabler**

I systemdelen buffert/återfyllning begränsas bufferten inåt av gränsytan mot kapseln, utåt och nedåt av gränsyterna mot deponeringshålet och uppåt av gränsytan mot återfyllningen. Återfyllningen begränsas i rummet av utbredningen av återfyllda tunnelsystem och bergrum. Här finns också pluggar som bl a har till uppgift att hydrauliskt försluta tunnelsystemet, men dessa har inte inkluderats i beskrivningen i SR 97.

Bufferten så som den avgränsas av variabeln buffertgeometri karakteriseras termiskt av temperaturen och strålmässigt av strålintensiteten, huvudsakligen  $\gamma$ - och neutronstrålning. Hydrauliskt karakteriseras bufferten av dess vattenhalt, ibland också av gashalter samt av vattentryck, vattenflöde, gstryck och gasflöde. De senare fyra, som är intressanta främst i skedet då bufferten mäts med vatten, har samlats under benämningen hydrovariabler. Mekaniskt karakteriseras bufferten av ett svälltryck.

Det kemiska tillståndet hos bufferten anges av smektithalten och smektitsammansättningen som är själva lermineralets sammansättning, inklusive de jonslag som är associerade till ytan, olika föroreningshalter och en porvattensammansättning.

För återfyllningen används samma uppsättning variabler som för bufferten. Bergkrosset, som ju utgör 85 procent av återfyllningen, inkluderas i tillståndsvariabeln föroreningshalter.

Samtliga variabler definieras i tabell 5-3.

**Tabell 5-3. Variabler i buffert/återfyllning.**

Geometri	Geometriska mått för buffert/återfyllning. En beskrivning av bl a begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären.
Porgeometri	Porgeometri som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. Ofta anges porositeten, dvs den andel av volymen som inte upptas av fast material.
Strålintensitet	Intensitet av ( $\alpha$ -, $\beta$ -,) $\gamma$ - och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert (och återfyllning).
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Smektithalt	Smektithalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Vattenhalt	Vattenhalten som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Gashalter	Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Svälltryck	Svälltrycket som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Smektit-sammansättning	Smektitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till smektitytan ingår i denna variabel.
Porvatten-sammansättning	Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning.
Föroreningshalter	Halter av föroreningar i tid och rum i buffert och återfyllning. Till föroreningar räknas även mineral, förutom smektit. I återfyllningen räknas bergkrosset till föroreningarna.

### 5.5.3 Överblick av processer

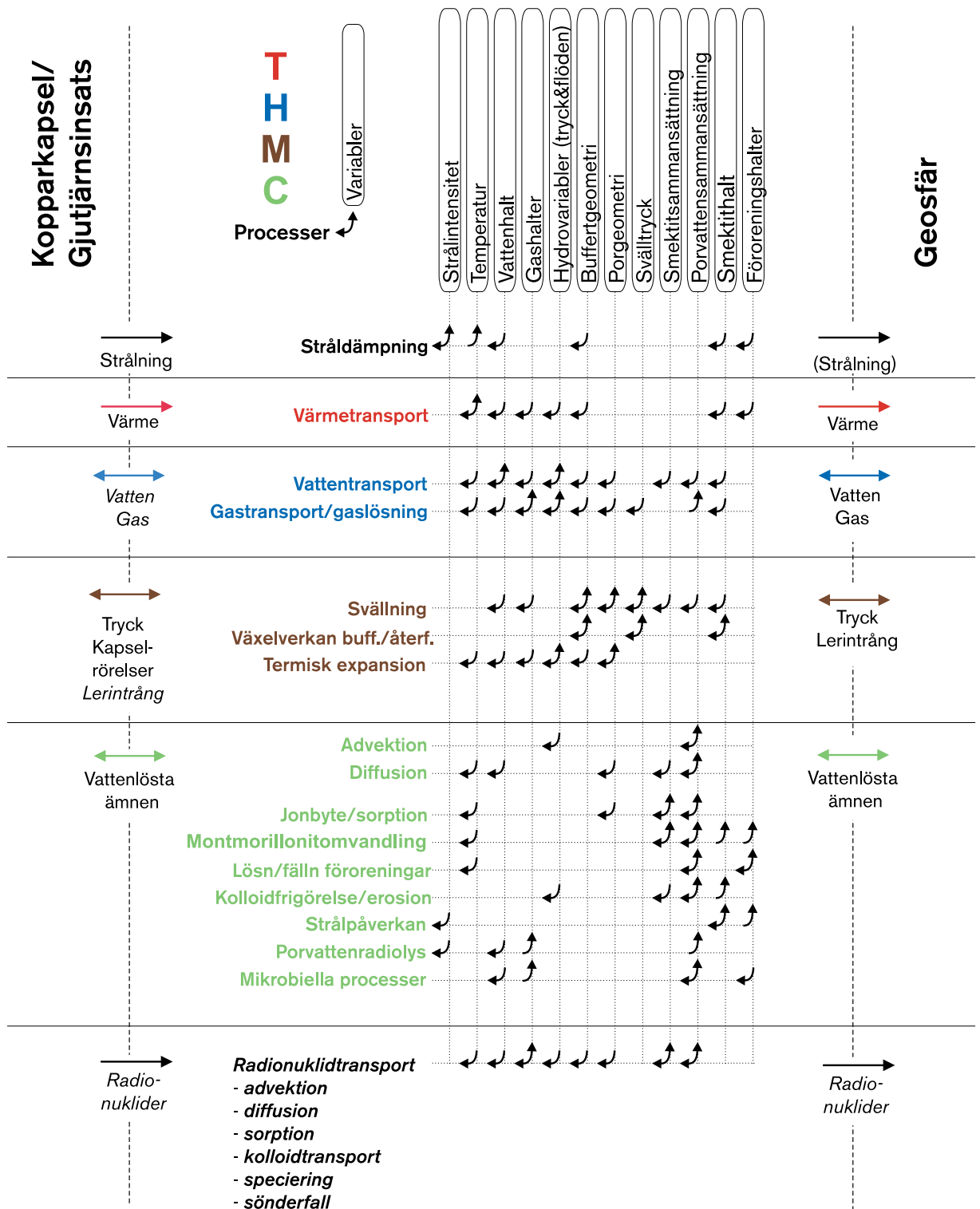
Vid inplaceringen kommer bufferten i kontakt med den varmare kapselytan och genom värmetransport sprids värmeenergin genom bufferten och temperaturen ökar. Den  $\gamma$ - och neutronstrålning som tränger ut ur kapseln minskar i intensitet genom stråldämpning i bufferten.

I buffertens porer råder ursprungligen ett kapillärt undertryck som leder till att vatten transporteras in från det omgivande berget. Efter att bufferten mättats med vatten är transporten mycket långsam. Gastransport kan förekomma vid mätnadsförloppet då ånga kan flöda från buffertens varmare delar för att kondensera i de yttre, kallare partierna. Ursprungligen finns även luft i bufferten som genom att lösas i porvattnet kan lämna bufferten; gaslösning. Efter vattenmättnad kan gastransport förekomma om en kapsel skulle skadas med åtföljande vätgasbildning i kapseln.

Vid vattenupptaget sväller buffert och återfyllning och ett svälltryck utbildas. Svälltrycket blir olika i buffert och återfyllning som växelverkar mekaniskt. Svälltrycket gör bl a att sprickor som eventuellt uppstår i bufferten ”självläker”. Vid uppvärmningen kan framför allt porvattnet utvidgas genom termisk expansion.



# Buffert/Återfyllning



**Figur 5-7.** THMC-diagrammet för buffert/återfyllning. Processer och interaktioner i kursiv stil förekommer endast då kopparkapselns isolering är bruten.

Den kemiska utvecklingen i buffert och återfyllning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. Vattenlösta ämnen kan transporteras genom advektion och diffusion. I bufferten förekommer advektion nästan uteslutande under vattenmättnadsförloppet, därefter dominerar diffusion. Genom jonbyte/sorption kan buffertens ursprungliga innehåll av joner på lerpartiklarnas ytor ersättas av andra jonslag. Kemisk smektitnedbrytning kan förekomma bl a i form av illitisering. Föroreningar omsätts i bufferten bl a genom olika lösnings/fällningsreaktioner. Vid svällningen tränger bufferten ut i det omgivande bergets sprickor och kan där tänkas bilda kolloider som kan föras bort av grundvattnet vilket kan leda till en successiv erosion av bufferten. Leran kan omvandlas genom strålpåverkan och porvattnet kan sönderdelas av radiolys. Slutligen kan mikrobiella processer tänkas förekomma i buffert/återfyllning.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer, möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Varken advektion eller kolloidtransport förväntas i en mättad buffert. Radionuklider kan sorberas till lerpartiklarnas ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering. Det radioaktiva sönderfallet bestämmer tillsammans med transportförhållandena i vilken utsträckning radionuklider från en trasig kapsel hinner sönderfalla innan de når buffertens yttre gräns.

I återfyllningen sker i princip samma processer som i bufferten, men ofta i en annan omfattning. Dessutom spelar bergkrosset (definierat som förorening i återfyllningen) en delvis annan roll än buffertens föroreningar, bl a genom att bidra till sorption.

## **5.6 Geosfär**

### **5.6.1 Allmänt**

Djupförvaret ska förläggas i kristallint berg med granitisk sammansättning. Granitisk berggrund består till största delen av mineralen kvarts, fältspater (kalifältspat), glimmer-mineral (biotit och muskovit) och amfiboler (hornblände). Dessutom finns mindre mängder av s k accessoriska mineral som kan vara av geokemisk betydelse. Exempel på sådana mineral är pyrit, klorit, magnetit, kalcit, dolomit, fluorit, apatit, anhydrit och olika lermineral.

Det kristallina berget karakteriseras också av ett system av sprickor. Frekvens, rumslig fördelning, storleksfördelning, form och orientering hos sprickorna är avgörande för både hydrauliska och mekaniska egenskaper hos berget. Sprickor förekommer i alla skalor från mikroskopiska sprickor i bergmatrisen till sprickzoner, dvs stora stråk med markerat förhöjd spricktäthet i förhållande till det omgivande berget. Sprickzoner utgör ofta dominerande flödesvägar för grundvattnet och storleken är relaterad till storleken hos de bergrörelser som kan förekomma i zonen.

### **5.6.2 Överblick av variabler**

Systemdelen geosfär begränsas inåt av förvarsgeometrin dvs gränsytan mellan geosfär och buffert/återfyllning. Utåt avgränsas geosfären uppåt av biosfären. I övriga riktningar har inte någon tydlig gräns för den delen av geosfären som räknas till förvarssystemet, och som alltså beskrivs i detalj, definierats. Som en riktlinje gäller att detaljerade, lokala

analyser av t ex grundvattenströmning och värmetransport genomförs i en volym som sträcker sig från förvaret till ytan och lika långt, dvs omkring 500 meter också i andra riktningar. De delar av geosfären som ligger utanför denna volym benämns avlägsen geosfär och räknas till omgivningen. Var gränsen går tillåts variera efter behov i olika delanalyser.

Geosfären så som den avgränsas av variabeln förvarsgeometri/rand karakteriseras av bergmatrisens mineralogiska sammansättning, matrismineral, bergets temperatur och dess mekaniska bergspänningar. Spricksystemets struktur uttrycks av sprickgeometrin, sprickytornas och sprickfyllnadernas mineralogiska sammansättning av variabeln sprickmineral. Hydrauliskt karakteriseras geosfären av grundvattenflöden och gasflöden i spricksystemet. Grundvattensammansättningen är avgörande för den kemiska utvecklingen som också påverkas av gassammansättning och förekomster av konstruktions- och strömmaterial i förvaret.

Samtliga variabler är beroende av både tid och rum. Karakteristiskt för geosfären är att flertalet variabler förändras mycket långsamt i tiden men att den rumsliga variationen eller heterogeniteten är stor. Mer utförliga definitioner av de olika variablerna ges i samband med beskrivningen av initialtillståndet i geosfären, se avsnitt 6.5.

Samtliga variabler definieras i tabell 5-4.

**Tabell 5-4. Variabler i geosfären.**

Förvars-geometri/rand	Geometrisk beskrivning av deponeringshål, tunnlar, ramper, pluggar, bergförstärkningar m m. Se även diskussion om randen i avsnitt 4.2.1.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i geosfären.
Grundvattenflöde	Grundvattenflöde som funktion av tid och rum i geosfärens spricksystem.
Grundvattentryck	Grundvattentryck som funktion av tid och rum i geosfärens spricksystem.
Gasflöde	Gasflöde som funktion av tid och rum i geosfärens spricksystem.
Sprickgeometri	Geosfärens håligheter efter utbyggnad av förvaret och framåt. Alla håligheter räknas in, från sprickzoner till matrisens mikroporer. Hit hör också den borrh- eller sprängstörd zonen (EDZ) och eventuella andra geometriska förändringar av sprickstrukturen som inducerats av utbyggnaden.
Bergspänningar	Bergspänningar som funktion av tid och rum i geosfären.
Matrismineral	Bergmatrisens kemiska sammansättning som funktion av (tid och) rum, dvs en beskrivning av de olika bergarter som förekommer och deras utbredning.
Sprickmineral	Sprickytornas kemiska sammansättning som funktion av (tid och) rum, dvs en beskrivning av de olika sprickmineral som förekommer. Dessutom mängder och sammansättning av sprickfyllnadsmaterial i befintliga sprickor.
Grundvatten-sammansättning	Grundvattnets sammansättning som funktion av tid och rum i geosfären. I den här variabeln ryms också storheter som Eh och pH, liksom eventuella radionuklider och lösta gaser.
Gassammansättning	Kemisk beskrivning av gaser i geosfärens håligheter, inklusive eventuella radionuklider.
Konstruktions- och strömmaterial	Kemisk sammansättning och mängder av injekteringsmedel, bergförstärkningar, pluggar m m.

### 5.6.3 Överblick av processer

Genom värmetransport från bränslet via kapsel och bufferten kommer geosfären att värmas upp.

Genom grundvattenströmning omfördelas grundvattnet i geosfärens spricksystem. Även gasströmning kan förekomma.

I geosfären råder initialt ett mekaniskt tillstånd som bestäms av de naturliga bergspänningar och spricksystem på förvarsplatsen samt de förändringar som konstruktionen av förvaret givit upphov till.

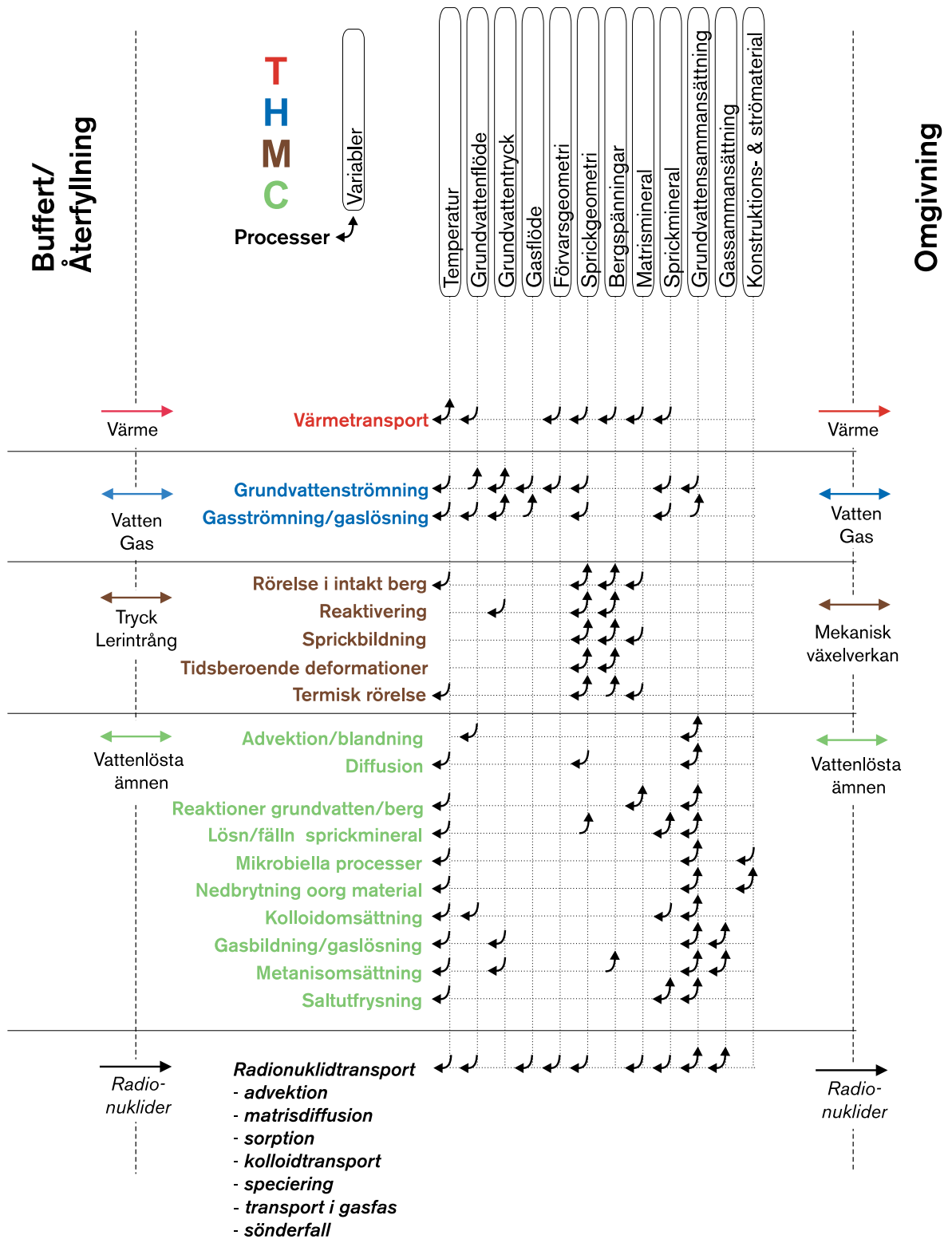
Den mekaniska utvecklingen bestäms av hur geosfären svarar på de olika mekaniska laster den utsätts för. Lasterna kan utgöras av den termiska expansion som uppvärmningen av förvaret leder till, trycket från svällande buffert/återfyllning, effekter av jordskalv och den storskaliga tektoniska utvecklingen. Förändringarna i geosfären kan förekomma i form av sprickbildning, reaktivering (plötsliga rörelser i befintliga sprickor), eller bergkryp (långsamma omlagringar i berget). Dessutom förekommer rörelser i intakt berg dvs kompression/expansion av i övrigt intakta bergblock.

Den kemiska utvecklingen efter förslutning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. Den dominerande transportprocessen i grundvattnet över långa sträckor är advektion, medan diffusion spelar stor roll över korta sträckor och i partier där vattnet är stillastående. Vid advektion följer vattenlösta ämnen med det strömmande vattnet, processen leder bl a till att olika vattentyper från olika partier av geosfären blandas. Reaktionen sker mellan grundvattnet och sprickytor genom lösning/fällning av sprickmineral och, mycket långsamt, mellan grundvatten och bergmatrisens mineral. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från förvarskonstruktionen, kolloidbildning och gasbildning. Vid en glaciation kan också metanisbildning och saltutfrysning förekomma.

Vid ett eventuellt utsläpp av radionuklider kan dessa transporteras med det strömmande grundvattnet, advektion. Även diffusion kan vara betydelsefull 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. Avgörande för radionuklidtransporten är även sorption, dvs det faktum att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa. Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsfenomenen. Vissa nuklider kan transporteras i gasfas. Det radioaktiva sönderfallet slutligen påverkar innehållet av radionuklider i grundvattnet och måste därför inkluderas i beskrivningen av transportfenomenen.

En utförlig dokumentation av samtliga processer finns i Processrapporten. Det fullständiga THMC-diagrammet för geosfären visas i figur 5-8.

# Geosfär



Figur 5-8. THMC-diagrammet för geosfären.

## 5.7 Säkerhetskriterier

Enligt avsnitt 4.1 beskriver säkerhetsanalysen vilka förändringar förvarssystemet genomgår med tiden och vilka säkerhetsmässiga konsekvenser detta får. De övergripande säkerhetsfunktionerna för ett djupförvar gäller dess isolerande och fördröjande förmåga. Acceptanskriterierna säger att risken för skadeverkningar inte får överstiga  $10^{-6}$  per år, se avsnitt 2.3.2.

Ett övergripande mål för säkerhetsanalysen är därför att utreda huruvida detta är uppfyllt. Kriteriet är generellt och inte knutet till någon speciell förvarsutformning. Baserat på utformningen av KBS-3-systemet och dess avsedda långsiktiga funktioner kan mer specifika ”hjälpkriterier” för den långsiktiga säkerheten formuleras.

Dessa avgör inte på ett direkt sätt säkerheten utan är snarare en ”hjälp på vägen” i själva säkerhetsanalysen.

### **Kapseln**

Ett första säkerhetskriterium är att kapseln långsiktigt ska vara tät, dvs att dess kopparhölje förblir obrutet.

Dessutom finns kriteriet att temperaturen på kapselytan inte får överstiga  $100\text{ °C}$  för att undvika kokning på kapselytan /Werme, 1998/. Kokning skulle kunna leda till anrikning av salter på ytan vilket i sin tur kan ge korrosionseffekter som är svåra att analysera. Detta kriterium har alltså en annan karaktär än isoleringskriteriet: Det är satt för att underlätta analysen snarare än för att det direkt anknyter till någon säkerhetsfunktion.

För kapseln finns också konstruktionskrav som ställs bl a med tanke på att isoleringen ska hålla under lång tid. Konstruktionskraven är till hjälp då kapselns material och dimensioner väljs, men används inte direkt i säkerhetsanalysen. I säkerhetsanalysen utvärderas i stället hur den valda kapselutformningen (som ibland kan tåla mycket mer än konstruktionskraven) klarar de påfrestningar den utsätts för i de olika scenarierna.

### **Bufferten**

Även för bufferten finns diverse krav som används då lämpliga material och dimensioner bestäms. Få av dessa används i själva säkerhetsanalysen. I stället utvärderas den valda buffertens funktion under de olika förhållanden som kommer att råda i scenarierna.

Buffertens övergripande uppgift är att utgöra en diffusionsbarriär mellan kapsel och berg. För att uppfylla detta måste bufferten dels ha en låg hydraulisk konduktivitet (vattenledningsförmåga), dels förmågan att hålla kapseln centrerad i deponeringshålet under lång tid. Den måste också ”självläka” mindre sprickor i leran som kan uppkomma t ex initialt vid mättnadsprocessen. För att fungera som avsett finns därför för bufferten säkerhetskriterierna att den långsiktigt ska ha:

- en hydraulisk konduktivitet om högst  $10^{-11}$  m/s,
- en tillräcklig densitet och
- ett tillräckligt svälltryck.

Den hydrauliska konduktiviteten bestäms framför allt av densitet och smektithalt. Vid den initiala densiteten  $2\,000\text{ kg/m}^3$  är en smektithalt av 10 procent tillräcklig för att uppfylla kravet och vid den initiala smektithalten, cirka 75 procent, är en densitet av  $1\,500\text{ kg/m}^3$  tillräcklig /Pusch, 1995/.

Bärförmågan styrs i huvudsak av densiteten. Det finns inget absolut krav på densiteten i detta avseende, men om de långsiktiga förändringarna är små jämfört med den tillåtna initiala variationen,  $2\,000 \pm 100\text{ kg/m}^3$ , är densiteten med god marginal tillräcklig för att bära kapseln /Pusch, 1995/.

Inte heller för svälltrycket finns någon absolut gräns men redan ett svälltryck av 1 MPa är fullt tillräckligt för att göra bufferten mekaniskt "självläkande" /Pusch, 1995/. Värdet kan jämföras med det betydligt högre svälltryck bufferten får efter vattenmättnad; 8 MPa. Svälltrycket bestäms i huvudsak av densitet, vattenhalt, smektithalt och adsorberat jonslag, se Processrapporten.

### **Återfyllningen**

För återfyllningen finns de långsiktiga säkerhetskriterierna att den ska ha:

- en hydraulisk konduktivitet som inte väsentligt överstiger det omgivande bergets genomsnittliga konduktivitet, dvs den bör vara omkring  $10^{-10}$  m/s för typiska förhållanden i svensk berggrund,
- ett svälltryck om minst 0,1 MPa mot tunneltaket för att utgöra ett stöd för berget kring tunnlarna /Processrapporten/.

Återfyllningen ska också motverka att bufferten tränger upp i tunneln vid svällning. Här finns inga absoluta kriterier för återfyllningens egenskaper.

### **Geosfären**

För geosfären finns kriteriet att grundvattnet på förvarsdjup långsiktigt ska vara syrefritt. Detta krävs dels för att undvika syrekorrosion av kopparhöljet men också för att det förenklar analysen av den kemiska utvecklingen i allmänhet.

I övrigt är det svårt att formulera kriterier för geosfären som är direkt användbara i säkerhetsanalysen. Geosfären bidrar förvisso till olika säkerhetsfunktioner: Dess mekaniska stabilitet är viktig för isoleringen, grundvattensammansättningen har betydelse för korrosionsprocesser och därmed isolering etc. Problemet vad gäller kriterier är att många olika mätbara egenskaper tillsammans på ett komplext sätt bidrar till geosfärens funktioner. Kriterier av de slag som formulerats ovan för kapsel och buffert används därför inte för geosfären då den långsiktiga utvecklingen studeras i säkerhetsanalysen.

Vid platsundersökningar kan det däremot vara meningsfullt att formulera både krav och önskemål på olika aspekter av geosfärens initiala tillstånd, dvs på förhållanden som direkt eller indirekt kan observeras vid undersökningar av möjliga förvarsplatser.

Arbetet med att finna sådana s k geovetenskapliga lämplighetsindikatorer pågår. Arbetet är bl a styrt av de långsiktiga processer som studeras i säkerhetsanalysen. Därför är Processrapporten ett viktigt underlag för det pågående arbetet liksom säkerhetsanalysen i sig som ju sätter samman de olika processerna till en integrerad utveckling, se vidare diskussionen i avslutningskapitlet.

### ***Säkerhetskriterier och variabler***

Säkerhetskriterierna ger begränsningar på en rad variabler (kopparhöljets geometri, temperaturen på kapselytan, buffertens svälltryck och smektithalt, syrehalten i grundvattnet) som inte bör överskridas långsiktigt då förvarets utveckling analyseras. Smektithalt och svälltryck kommer t ex att påverkas genom att den kemiska utvecklingen leder till materialförändringar i bufferten, kapselytan värms på grund av effektutvecklingen i bränslet etc.

Konkreta deluppgifter för säkerhetsanalysen blir därmed att kontrollera huruvida:

- kapselns kopparhölje är tätt,
- temperaturen på kapselytan ligger under 100 °C,
- buffertens och återfyllningens hydrauliska konduktivitet, densitet och svälltryck ligger inom angivna gränser samt,
- grundvattnet på förvarsdjup är syrefritt.

Syftet med nästan alla delanalyser som genomförs kan ytterst på ett eller annat sätt återföras på ett eller flera av dessa kriterier.

Det övergripande kriteriet är dock alltid de begränsningar av utsläpp från förvaret som formuleras av säkerhets- och strålskyddsmyndigheter.

### ***Tidsperspektiv***

Tiden under vilken förvaret ska fungera bestäms av hur avfallets farlighet avtar. Tiden 100 000 år utgör enligt avsnitt 3.5 en riktlinje, men inte någon absolut gräns vad gäller tidsperspektivet för funktionen. Detsamma kan sägas om tidsperspektivet för kriterierna ovan, som ju formulerats för att möjliggöra kontroll av att förvarets funktioner upprätthålls.



## 5.8 Fullständigheten i systembeskrivningen

Som konstaterats i avsnitt 4.6.1 kan det aldrig bevisas att systembeskrivningen är fullständig, dvs att den innehåller alla relevanta processer och samband för förvarets utveckling. Tilltron till systembeskrivningens fullständighet måste i stället bli föremål för bedömning.

Till grund för en sådan bedömning kan ligga både generella argument om naturvetenskapens mognad och specifika argument som rör systembeskrivningens uppbyggnad i en säkerhetsanalys.

Mycket av förståelsen av systemet vilar på naturvetenskapliga fundament som i många fall under lång tid förblivit oförändrade. Det gäller t ex kunskap om radioaktivitet, termodynamik eller hydrodynamik (grundvattenströmning). Till detta kommer ett par decennier av forskning och utveckling kring tekniska och naturvetenskapliga frågor som specifikt rör djupförvaret. Forskning förekommer i många länder och det internationella utbytet av erfarenheter är en viktig del i uppbygganden av förståelsen av förvarssystemets utveckling.

Konkreta administrativa åtgärder som kan vidtas för att nå fullständighet i en systembeskrivning är:

- Databashantering och annan systematisk dokumentation av alla processer som över tiden identifierats som viktiga för förvarets utveckling.
- Jämförelser med databaser upprättade av andra organisationer och inom internationella samarbeten.

Förutom en välutvecklad naturvetenskaplig kunskapsbas och en avancerad databashantering av relevant information krävs även en hög kompetens hos de experter som genomför systembeskrivning och säkerhetsanalys. Kompetens krävs både i metodik och förståelse av förvarssystemets funktion.

Även om fullständigheten inte kan bevisas kan konsekvenserna av en ofullständig beskrivning i viss mån illustreras. Antag t ex att en process som på kort tid bryter ned kopparkapseln vore oidentifierad. Konsekvenserna av detta kan illustreras genom att genomföra en beräkning av radionuklidtransport där kapselns isolering tänks vara helt förlorad säg 1 000 år efter förslutning. Sådana analyser redovisas som specialfall i avsnitt 9.11.

Uppbyggnaden av systembeskrivningen i SR 97, med val av processer etc beskrevs kort i avsnitt 4.2. Det är SKB:s bedömning att alla viktiga processer i förvarssystemets utveckling finns representerade i systembeskrivningen.

## 5.9 Referenser

**Forsström H, 1982.** Hantering och slutförvaring av använt plutoniumberikat bränsle (Mox-bränsle)

SKBF/KBS AR 82-33. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avd KBS

**Pusch R, 1995.** Selection of buffer materials with special respect to their performance in a long-term perspective.

SKB AR 95-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1998.** Plan 98, Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.

Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall

– Preliminär säkerhetsanalys.

SKB R-99-59. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3.

Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avd KBS.

**Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle.

SKB R-98-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 6 Förvarets initiala tillstånd

(Inkluderar platsbeskrivningar)

### 6.1 Inledning

I detta kapitel beskrivs det initiala tillståndet för de olika systemdelarna, uppdelat i de variabler som definierades i kapitel 5. Även osäkerheter i initialtillståndet diskuteras för varje variabel. Beskrivningen av geosfärens initiala tillstånd utgör dessutom den platsbeskrivning som redovisas här i huvudrapporten. Sist i avsnittet finns en översiktlig beskrivning av biosfären på respektive plats.

Materialet till framför allt geosfärsbeskrivningarna är hämtat från Förvarssystemrapporten. Där beskrivs:

- avfallet och radionuklidinventariet utgående från förutsättningarna i PLAN 98,
- de tekniska barriärerna och den principiella utformningen av djupförvarsanläggningen samt
- de tre platserna och den platsspecifika anpassningen av förvarsutformningen på respektive plats.

Även underlaget för diskussion om osäkerheter är för många variabler hämtat från Förvarssystemrapporten. Osäkerheter för de variabler som direkt utgör indata till beräkningar av radionuklidtransport diskuteras i Datarapporten. Det gäller t ex inventariet av radionuklider och kopparkapselns geometri (tillverkningsfel som leder till bristande isolering).

SR 97 genomförs för det specifika initialtillstånd som beskrivs i detta kapitel. Många aspekter av förvarets initiala tillstånd kan innan ett verkligt förvar står färdigt påverkas och styras genom utformning av barriärer, kvalitet i tillverkning och drift, val av plats, val av förvarsutformning på platsen, val av positioner för deponeringshål etc. Ett sådant aktivt förhållningssätt ("Design as you go") under processen fram till färdigt förvar är viktigt för säkerheten. Detta möjliggörs bl a genom att utnyttja återkommande funktions- och säkerhetsanalyser inför viktiga beslut.

#### 6.1.1 Starttidpunkt

Säkerhetsanalysen ska behandla den långsiktiga säkerheten, dvs epoken efter att förvaret konstruerats, fyllts med använt bränsle och förslutits. Förvaret byggs emellertid successivt under flera decennier och det går därför inte att definiera någon entydig starttidpunkt för förvaret som helhet.

Det initiala tillståndet ska beskriva utgångspunkten för de olika analyser som genomförs i kommande kapitel. Många analyser rör utvecklingen kring enskilda deponeringshål. Alla deponeringshål kommer att genomgå i stort sett samma utveckling från den tidpunkt kapsel och bentonit deponeras i dem, oavsett var de är placerade i förvaret och därmed oavsett när de kommer in i den successiva förvarsutbyggnaden. Det blir därför naturligt att använda deponeringstidpunkten som initial tidpunkt för beskrivningen av bränsle, kapsel och buffert/återfyllning.

Andra analyser rör förvaret som helhet. Här finns stora skillnader mellan olika delar av förvaret på grund av den successiva utbyggnaden. Problemet med att finna en starttidpunkt förenklas dock av att flera väsentliga variabler i geosfären, t ex sprickgeometrin, inte förändras nämnvärt under denna tid. För geosfären är inte bara det initiala tillståndet omedelbart efter utbyggnad av vikt att beskriva. Det naturliga tillstånd som rådde innan förvarsutbygganden är ofta av större intresse för den långsiktiga säkerheten eftersom förhållandena vad gäller t ex grundvattenflöde och grundvattensammansättning kan förväntas återgå till de naturliga någon tid efter att förvaret förslutits. Detta diskuteras mer utförligt i inledningen till geosfärsavsnittet 6.5 nedan.

## 6.2 Bränsle

### 6.2.1 Geometri

#### *Initialt värde*

Detaljerade mått för referensbränslet finns i ritning och datablad för bränslet /Bilaga 1/. Zirkaloykapslingen kan fungera som en barriär mot radionuklidtransport om den är intakt. Detta gör att det är intressant att veta hur många bränslestavar som har defekt kapsling vid deponering. Ungefär 500 defekta stavar av en miljon totalt mellanlagrade i CLAB hade rapporterats 1995 /SKB, 1995/.

#### *Osäkerheter*

De geometriska måtten för bränsleelementen är mycket väl kända. Efter inkapsling kommer bränslet att utsättas för höga temperaturer och antalet kapslingsskador kan då öka. Dessa osäkerheter har betydelse för analysen av radionuklidtransport och hanteras där pessimistiskt.

### 6.2.2 Strålintensitet

#### *Initialt värde*

Strålintensiteten redovisas som dosrater. Dosraten från  $\alpha$ - och  $\beta$ -strålning dominerar totalt i själva bränslekutsarna och i gapet mellan kutsar och Zirkaloykapsling. Utanför Zirkaloykapslingen dominerar  $\gamma$ - och neutronstrålning.

I Eriksen /1995/ har dosraten på ytan av en bränslekuts uppskattats. Baserat på dessa resultat kan ytdosraten vid deponeringstillfället, cirka 40 år efter uttag ur reaktorn, uppskattas till cirka 700 Gy/h. Bidraget från  $\beta$ -strålning är cirka 15 procent. Uppskattningen gäller för PWR-bränsle med utbränningsgraden 40 MWdygn/kg uran.

Vid samma tid är  $\gamma$ - och neutrondosraterna på en meters avstånd från två ton oskyddat bränsle (dvs innehållet i en kapsel) 130 000 respektive cirka 5 mGy/h (38 MWdygn/kg U BWR) /Hedin, 1997/.

## ***Osäkerheter***

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

### **6.2.3 Temperatur**

#### ***Initialt värde***

Temperaturen på bränslets yta vid deponering är beroende av resteffekt, de termiska egenskaperna hos gjutjärnsinsats och kopparkapsel samt den yttre kylningen av kapseln. Resteffekten är väl känd, medan de övriga faktorerna är svåra att uppskatta innan alla steg i hanteringen är fastlagda. Uppskattningsvis hamnar temperaturen mellan 200 och 400 °C /Bjurström och Bruce, 1997; Bjurström och Bruce, 1998/.

#### ***Osäkerheter***

Osäkerheterna är stora enligt ovan. Temperaturen ligger dock i ett intervall där bränslets integritet inte hotas och osäkerheten i temperaturen saknar därför betydelse för den långsiktiga säkerheten.

### **6.2.4 Radionuklidinventarium**

#### ***Initialt värde***

Inventariet av radionuklider har beräknats av Håkansson /1999/. Tabell 6-1 visar aktiviteten i bränsleelementen 40 år efter uttag ur reaktorn, angivet per ton bränsle. Totalt ska cirka 8 000 ton bränsle deponeras i djupförvaret.

För några radionuklider ansamlas en del av inventariet på bränslekutsarnas yta och blir därmed mer lättillgänglig för transport. Johnson och Tait /1997/ har bedömt storleken hos denna andel. Tabell 6-2 visar dessa andelar samt hur stor del av inventariet som finns i bränslets strukturdelar. Även denna andel blir relativt lättillgänglig för transport.

#### ***Osäkerheter***

Inventariet av radionuklider i bränslet går att beräkna med relativt stor noggrannhet. Osäkerheten ligger på något tiotal procent och är bl a relaterade till bränslets utbränningsgrad. Uppskattningen av ytfraktion baseras på experimentella data från framför allt kanadensiskt CANDU-bränsle. Samtliga data och osäkerheter ovan diskuteras i Datarapporten.

Tabell 6-1. Aktivitet i referensbränslet (SVEA 96, 38 MWd/kg U) 40 år efter uttag ur reaktorn /efter Håkansson, 1999/.

Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag	Halveringstid*	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag	Halveringstid*	Nuklid	Aktivitet (Bq/t U) 40 år efter uttag	Halveringstid*
<b>Fissionsprodukter</b>			<b>Aktinider och aktiniddöttrar</b>			<b>Aktiveringsprodukter</b>		
H-3	$2,1 \cdot 10^{12}$	12,33 år	Ra-226	$1,4 \cdot 10^5$	1 600 år	H-3	$1,1 \cdot 10^{12}$	12,33 år
Se-79	$2,8 \cdot 10^9$	$1,13 \cdot 10^6$ år	Th-229	$1,0 \cdot 10^4$	7 340 år	C-14	$5,0 \cdot 10^{10}$	5 730 år
Kr-85	$2,7 \cdot 10^{13}$	10,756 år	Th-230	$1,6 \cdot 10^7$	75 380 år	Cl-36	$5,5 \cdot 10^8$	301 000 år
Sr-90	$1,2 \cdot 10^{15}$	28,79 år	Th-234	$1,2 \cdot 10^{10}$	24,10 dagar	Fe-55	$9,3 \cdot 10^9$	2,73 år
Y-90	$1,2 \cdot 10^{15}$	64,10 timmar	Pa-231	$1,8 \cdot 10^6$	32 760 år	Co-60	$8,9 \cdot 10^{11}$	5,2714 år
Zr-93	$5,0 \cdot 10^{10}$	$1,53 \cdot 10^6$ år	Pa-233	$1,5 \cdot 10^{10}$	26,967 dagar	Ni-59	$8,8 \cdot 10^{10}$	76 000 år
Nb-93m	$4,2 \cdot 10^{10}$	16,13 år	Pa-234m	$1,2 \cdot 10^{10}$	1,17 minuter	Ni-63	$9,3 \cdot 10^{12}$	100,1 år
Tc-99	$5,7 \cdot 10^{11}$	211 100 år	U-233	$3,1 \cdot 10^6$	159 200 år	Sr-90	$2,6 \cdot 10^7$	28,79 år
Ru-106	$2,7 \cdot 10^4$	373,59 dagar	U-234	$4,6 \cdot 10^{10}$	245 500 år	Y-90	$2,6 \cdot 10^7$	64,10 timmar
Pd-107	$4,9 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^6$ år	U-235	$4,5 \cdot 10^8$	$7,038 \cdot 10^8$ år	Zr-93	$5,6 \cdot 10^9$	$1,53 \cdot 10^6$ år
Cd-113m	$1,7 \cdot 10^{11}$	14,1 år	U-236	$1,0 \cdot 10^{10}$	$2,342 \cdot 10^7$ år	Nb-93m	$2,3 \cdot 10^{10}$	16,13 år
Sn-121	$4,4 \cdot 10^{10}$	27,06 timmar	U-237	$1,9 \cdot 10^{10}$	6,75 dagar	Nb-94	$2,9 \cdot 10^9$	20 300 år
Sn-121m	$5,7 \cdot 10^{10}$	55 år	U-238	$1,2 \cdot 10^{10}$	$4,468 \cdot 10^9$ år	Mo-93	$4,4 \cdot 10^7$	4 030 år
Sb-125	$1,1 \cdot 10^{10}$	2,7582 år	Np-237	$1,5 \cdot 10^{10}$	$2,144 \cdot 10^6$ år	Ag-108	$4,3 \cdot 10^7$	2,37 minuter
Te-125m	$2,7 \cdot 10^9$	57,40 dagar	Np-239	$1,2 \cdot 10^{12}$	2,3565 dagar	Ag-108m	$5,0 \cdot 10^8$	418 år
Sn-126	$2,3 \cdot 10^{10}$	100 000 år	Pu-238	$9,5 \cdot 10^{13}$	87,7 år	Cd-113m	$3,4 \cdot 10^{10}$	14,1 år
Sb-126m	$2,3 \cdot 10^{10}$	19,15 minuter	Pu-239	$9,5 \cdot 10^{12}$	24 110 år	Sn-121	$1,4 \cdot 10^{10}$	27,06 timmar
I-129	$1,3 \cdot 10^9$	$1,57 \cdot 10^7$ år	Pu-240	$1,2 \cdot 10^{13}$	6 563 år	Sn-121m	$1,7 \cdot 10^{10}$	55 år
Cs-134	$9,1 \cdot 10^9$	2,0648 år	Pu-241	$7,7 \cdot 10^{14}$	14,35 år	Sb-125	$1,2 \cdot 10^9$	2,7582 år
Cs-135	$2,1 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^6$ år	Pu-242	$1,0 \cdot 10^{11}$	373 300 år	Te-125m	$3,0 \cdot 10^8$	57,40 dagar
Cs-137	$1,8 \cdot 10^{15}$	30,07 år	Am-241	$1,5 \cdot 10^{14}$	432,2 år	Eu-154	$3,2 \cdot 10^{11}$	8,593 år
Ba-137m	$1,7 \cdot 10^{15}$	2,552 minuter	Am-242m	$4,5 \cdot 10^{11}$	141 år	Eu-155	$1,3 \cdot 10^{10}$	4,7611 år
Pm-146	$9,8 \cdot 10^8$	5,53 år	Am-242	$4,5 \cdot 10^{11}$	16,02 timmar	Ho-166m	$7,5 \cdot 10^7$	1 200 år
Pm-147	$1,5 \cdot 10^{11}$	2,6234 år	Am-243	$1,2 \cdot 10^{12}$	7 370 år	Totalt	$1,2 \cdot 10^{13}$	
Sm-151	$9,4 \cdot 10^{12}$	90 år	Cm-242	$3,7 \cdot 10^{11}$	162,8 dagar			
Eu-152	$3,3 \cdot 10^{10}$	13,537 år	Cm-243	$4,4 \cdot 10^{11}$	29,1 år			
Eu-154	$1,8 \cdot 10^{13}$	8,593 år	Cm-244	$2,8 \cdot 10^{13}$	18,10 år			
Eu-155	$7,6 \cdot 10^{11}$	4,7611 år	Cm-245	$9,4 \cdot 10^9$	8 500 år			
Totalt	$6,0 \cdot 10^{15}$		Cm-246	$2,9 \cdot 10^9$	4 730 år			
			Totalt	$1,1 \cdot 10^{15}$				

\* Karlsruher Nuklidkarte, 5:e uppl.

**Tabell 6-2. Andel av inventariet som är omedelbart tillgänglig (IRF) enligt Datarapporten /efter Johnson och Tait, 1997/.**

Nuklid	IRF (%) rimligt värde, enbart bränsle	IRF (%) rimligt värde, inklusive strukturdelar	IRF (%) pessimistisk uppskattning
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	-	-	-

## 6.2.5 Materialsammansättning

### *Initialt värde*

Bränsleelementens sammansättning finns i detalj angiven i Bilaga 1. Radionuklidinventariet i strukturdelarna innan och efter drift finns i Håkansson /1999/, se avsnittet ovan.

### *Osäkerheter*

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

## 6.2.6 Vattensammansättning

### *Initialt värde*

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

### *Osäkerheter*

Inte relevant.

## 6.2.7 Gassammansättning

### *Initialt värde*

**Gap mellan bränslekutsar och kapslingsrör:** Bränslestavarna fylls med helium till ett tryck av 0,4 MPa vid tillverkning. Dessutom förekommer fissionsgaser från driften, vid deponeringstidpunkten finns huvudsakligen Kr-85 kvar.

**Kapselns hålrum:** Kapseln kommer att förslutas vid atmosfärstryck (torr luft) eller vakuumförhållanden, vilket gör att trycket i kapselns hålrum kan bli ett par atmosfärer om den initiala temperaturen blir så hög som 400 °C. Vattenånga: Maximalt tillåten mängd vatten i en kapsel är 50 gram. Detta värde motsvarar tomvolymen i en bränslestav och förutsätter alltså att en Zirkaloykapsling är defekt under drift eller mellanlagring.

### *Osäkerheter*

Osäkerheterna i tryck orsakas främst av osäkerheterna i temperatur. Möjliga variationer har inte betydelse för den långsiktiga säkerheten.

## 6.2.8 Hydrovariabler

### *Initialt värde*

Vattentryck, vattenflöden och gasflöden är inte relevanta att beskriva initialt. Gastrycket diskuteras i avsnitt 6.2.7.

### *Osäkerheter*

Inte relevant.

## 6.2.9 Mekaniska spänningar

### *Initialt värde, osäkerheter*

Bränslekutsarna har inbyggda spänningar på grund av korntillväxt m m till följd av kärnklyvningar och bestrålning. Kutsarnas inre struktur förändras under bestrålning beroende på temperatur och utbränning. Bränslestavar och konstruktionselement har inbyggda spänningar på grund av övertryck från fissionsgaser och gasfyllning. Dessa varierar med fabrikat och utbränningsgrad. Spänningsfördelningen i elementen påverkas på ett oöverskådligt sätt av bestrålningen i reaktorn dels genom att denna ibland orsakar tillväxt/svällning av konstruktionsmaterialen, dels genom att relaxationen av spänningen varierar beroende på lokala tidsvariationer i temperatur.

Detta påverkar bränslekutsarnas yta vilket har betydelse för hur snabbt radionuklider kan frigöras om bränslet kommer i kontakt med vatten. Data till säkerhetsanalysen baseras på ytbestämningar av använt bränsle som påverkats av processerna och förhållandena ovan.



## 6.3 Gjutjärnsinsats/kopparkapsel

### 6.3.1 Geometri

#### *Initialt värde*

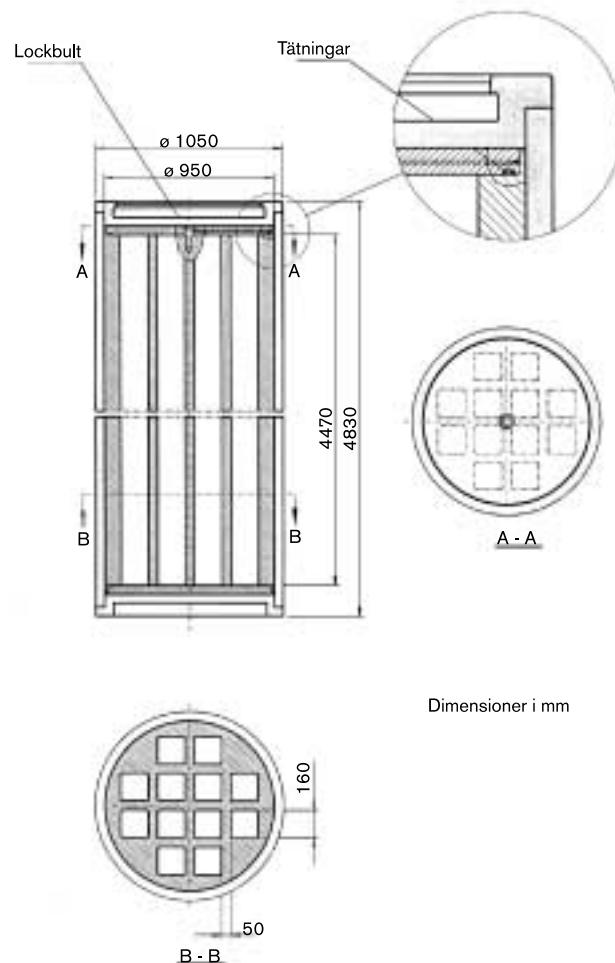
Kapselns geometri framgår av figur 6-1.

#### *Osäkerheter*

Osäkerheter i kapselns initiala geometri gäller i första hand tätheten. Kapslarna ska tillverkas, förslutas och kontrolleras med metoder som garanterar att högst 0,1 procent av de färdiga kapslarna innehåller fel som är större än vad acceptanskriterierna för den oförstörande provningen tillåter. Detta är en nivå som kan uppnås med tillgängliga metoder för provning /Werme, 1998/. Säkerhetsanalysen utgår därför ifrån att högst en kapsel på tusen har en defekt av de typer som beskrivs i Werme /1998/, exempelvis en icke-genomgående kavitet i locksvetsen.

Sannolikheten för en defekt är störst i locksvetsen, eftersom möjligheterna till inspektion och kontroll är mycket större för botten svetsen och den längsgående svetsen (om kapseln tillverkas med sådan). I SR 97 förutsätts därför att en eventuell defekt i kapseln finns i locket.

Initiala kapselskador diskuteras mer utförligt i kapseldefektscenariot, kapitel 9.



**Figur 6-1.** Utformning av kopparkapsel och gjutjärnsinsats i BWR-utförande.

## 6.3.2 Strålintensitet

### *Initialt värde*

Dosraten orsakad av  $\gamma$ - och neutronstrålning utanför kapseln har beräknats av Håkansson /1996/. En kapsel med 40-årigt bränsle avger  $\gamma$ - och neutrondosrater av 350 respektive 20–40 mGy/h.

### *Osäkerheter*

Lundgren /1997/ jämför olika beräkningar av stråldoser kring kapseln. Variationen ligger mellan 100 och 500 mGy/h för  $\gamma$ -strålning för olika positioner på kapselytan, bl a beroende på att insatsen inte är cylindersymmetrisk.

$\gamma$ -dosraten utanför kapseln har betydelse för radiolytisk sönderdelning av vatten samt för saltpetersyrabildning från instängd luft innan mättnad av bufferten, se kapitel 8. I kriterier för kapselns utformning krävs att  $\gamma$ -dosraten inte överstiger 1 Gy/h för att minimera betydelsen av de processerna. Därmed hamnar hela intervallet i angivelsen ovan under kravgränsen.

## 6.3.3 Temperatur

### *Initialt värde*

Kapselytans ytemperatur vid deponering blir uppskattningsvis omkring 90 °C.

### *Osäkerheter*

Ytemperaturen beror av hanteringssekvensen vid deponering (kylning) samt inventariet hos de bränsleelement som stoppas i. Hanteringssekvensen är inte slutgiltigt fastlagd.

## 6.3.4 Materialsammansättning

### *Initialt värde*

Insatsen består av segiärn SS0717-00, kopparhöljet ASTM UNS C10100 med tillsats av 50 ppm fosfor. Ytorna på insatsen och höljet är grovbearbetade.

### *Osäkerheter*

Metallytornas egenskaper har stor betydelse för värmeöverföringen i kapseln och mellan kapseln och buffert. Dessa är beroende på resultatet från maskinbearbetningen och den miljö som de tomma kapseldelarna har lagrats i. Detta gör att osäkerheten i ytornas emissivitet är stor.

## 6.3.5 Mekaniska spänningar

### *Initialt värde*

Efter förslutning finns restspänningar i locksvetsen. Försök att bestämma storleken på dessa har gjorts både experimentellt /Leggatt, 1995/ och genom modellering /Lindgren m fl, 1998/. Modelleringen visade att direkt efter svetsning (20 sekunder) kan framför allt ringspänningarna vara höga, upp till dragspänningar på 100 MPa, men de relaxerar

med tiden och har efter en vecka sjunkit till cirka 50 MPa. Dragspänningarna kommer sedan gradvis att övergå till tryckspänningar när kopparhöljet får kontakt med insatsen och processen avstannar efter cirka tre år /Lindgren m fl, 1998/.

De dragspänningar som kvarstår även efter mycket lång tid är låga och bedöms inte ha någon betydelse för kapseln livslängd.

### ***Osäkerheter***

De uppmätta och de beräknade restspänningarna stämmer relativt väl överens. Uppskattningsvis ligger största restspänningarna omedelbart efter svetsning i intervallet 50–100 MPa.

## **6.4 Buffert/återfyllning**

### **6.4.1 Buffertgeometri**

#### ***Initialt värde***

Måtten för buffert och återfyllning beror av måtten hos tunnlar och deponeringshål. I Bäckblom /1996/ finns alla geometriska mått för buffert och återfyllning samt för initiala spalter mellan kapsel/buffert och buffert/berg, se även figur 5-6.

### ***Osäkerheter***

Buffert: Toleranser för mått, raket och spalter finns i Bäckblom /1996/. Eventuella stenutfall i deponeringshålen kommer att fyllas med bentonitpellets.

Återfyllning: Återfyllningen anpassas till tunnlar, som i sin tur är anpassade till platsen.

### **6.4.2 Porgeometri (porositet)**

#### ***Initialt värde, osäkerheter***

Buffert: Enligt Bäckblom /1996/ är slutdensiteten  $2,00 \pm 0,05$  g/cm<sup>3</sup> och torrdensiteten  $1,59 \pm 0,03$  g/cm<sup>3</sup>. Detta ger porositeten 41 procent. Osäkerheterna i densitet är korrelerade, så osäkerheten i porositet bör bli  $\pm 2$  procent.

Återfyllning: Se ovan för bentonitkomponenten.

### **6.4.3 Strålintensitet**

#### ***Initialt värde***

Lundgren /1997/ beräknar den initiala dosraten på kapselytan och på utsidan av bufferten.  $\gamma$ -dosraten vid kapselytan är 100–500 mGy/h (avsnitt 6.3.2). På utsidan av bufferten är dosraten cirka 2 mGy/h.

Dosraten i återfyllningen har inte beräknats, eftersom den är avsevärt lägre än på utsidan av bufferten och saknar betydelse i säkerhetsanalysen.

### ***Osäkerheter***

Buffert: På utsidan av bufferten har dosraten minskat med en faktor 200, och varierar på liknande sätt som på insidan, se avsnitt 6.3.2.

## **6.4.4 Temperatur**

### ***Initialt värde***

Buffert och återfyllning har vid deponeringen omgivningstemperatur. Denna varierar med förvarsplatsen och deponeringsdjupet och är cirka 10–15 °C.

### ***Osäkerheter***

Temperaturen beror till viss del på hanteringssekvensen, var buffertblocken har lagrats, värme från deponeringsmaskinen, etc. Det är rimligt med en osäkerhet av omkring 5 °C. Detta saknar betydelse för den termiska utvecklingen i förvaret.

## **6.4.5 Smektithalt**

### ***Initialt värde***

Buffert: Smektithalten i bufferten vid deponering är cirka 75 procent.

Återfyllning: 15 procent av återfyllningen utgörs av bentonit med samma smektithalt som bufferten.

### ***Osäkerheter***

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

Återfyllning: Se ovan.

## **6.4.6 Vattenhalt**

### ***Initialt värde***

Buffert: De kompakterade bentonitblocken har en initial vattenmättnadsgrad av 85 procent och pelletsen i spalterna mellan buffert/berg 50 procent. Spalterna mellan buffert/kapsel och buffert/berg fylls med vatten.

Återfyllning: Återfyllningsmaterialet har en initial mättnadsgrad av 65 procent.

### ***Osäkerheter***

De värden som anges här är toleranser i förvarets specifikation.

Buffert: ± 5 procent i bentonitblock, ± 5 procent i pellets.

Återfyllning: ± 10 procent.

### 6.4.7 Gashalter

#### **Initialt värde**

Buffert: Bentonitblocken har vattenmättnadsgraden 85 procent, vilket betyder att 85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft. Den yttre spalten fylls med bentonitpellets och vatten och den inre med vatten. Luften i ett deponeringshål upptar cirka sex procent av volymen.

Återfyllning: Porositeten i återfyllningen är 30 procent och vattenmättnadsgraden 65 procent, vilket gör att luften i ett tunnelsystemet initialt upptar cirka tio volymprocent.

#### **Osäkerheter**

Osäkerheterna i gashalter är inte betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten.

### 6.4.8 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gastryck. Initialt är det relevant att beskriva gas- och vattentryck. Flöden förekommer inte initialt i buffert/återfyllning.

#### **Initialt värde**

Buffert: Vid inplacering av kapsel och buffert kommer deponeringshålen att hållas dränerade och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av 1 atm (cirka 0,1 MPa) och ett vattentryck av 0–0,1 MPa.

Återfyllning: Se buffert.

#### **Osäkerheter**

Buffert: Obetydliga.

Återfyllning: Obetydliga.

### 6.4.9 Svälltryck

#### **Initialt värde**

Svälltrycket utbildas när buffert/återfyllning närmar sig full vattenmättnad. Initialt finns inget svälltryck.

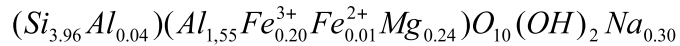
#### **Osäkerheter**

Inte relevant.

## 6.4.10 Smektitsammansättning

### *Initialt värde*

Buffert: I SR 97 antas bufferten bestå av MX-80 bentonit. Den består av cirka 75 procent Na-montmorillonit. Na-montmorillonit i MX-80 bentonit har mineralformeln:



och har en katjonbyteskapacitet på 73 meq/100 g med 85 procent Na och återstoden Ca och Mg /Müller-Vonmoos och Kahr, 1983/.

Återfyllning: Lerdelen (15 viktprocent) har samma sammansättning som bufferten.

### *Osäkerheter*

MX-80 är en kommersiell produkt med specificerade krav på bl a svällförmåga och jonbyteskapacitet. Osäkerheterna i smektitens sammansättning är därför små och bedöms vara utan betydelse för säkerheten.

## 6.4.11 Porvattensammansättning

### *Initialt värde*

Buffert: Vid leverans är vattenhalten maximalt 12 procent enligt produktspecifikation. Vattnet har en sammansättning som bestäms av vattensammansättningen på den plats där materialet ursprungligen bröts. Vattnet är också i eller nära jämvikt med de mineral som ingår i bufferten. Det finns dock inga relevanta mätningar av sammansättningen av vattnet i omättad bentonit. Råmaterialet torkas och mals och destillerat vatten tillsätts sedan före pressning för att nå en vattenkvot av 17 procent, vilket motsvarar en vattenmättnadsgrad av 85 procent efter pressning.

Återfyllning: Vattnet i återfyllningen är en blandning av vatten från bergkrosset, bentonitens ursprungliga vatten samt vatten som tillsätts vid deponeringen.

### *Osäkerheter*

Buffert: Variationer beror av variationen i bentonitmaterialet. Eftersom materialet är relativt homogent förväntas variationerna vara små.

Återfyllning: Se ovan. Här tillkommer variationer i det platsspecifika vattnet i bergkrosset samt i det vatten som tillförs vid deponeringen.

## 6.4.12 Föroreningshalter

### *Initialt värde*

Buffert: De viktigaste föroreningarna i MX-80 bentonit återges i tabell 6-3. Under hanteringsskedet är det också möjligt att bentoniten förorenas. En sammanställning av möjliga sådana föroreningar finns i Sjöblom /1998/.

**Tabell 6-3. Föroreningar i MX-80 bentonit /Müller-Vonmoos och Kahr 1983/.**

Komponent	Halt (viktprocent)
Karbonat (kalcit)	1,4
Kvarts	15
Pyrit	0,3
Ickesvällande lermineral	1,4
Kaolin	<1
Fältspat	5-8
Humusämnen	0,04-0,4
Övrigt	2

Återfyllning: De naturliga föroreningarna i bentoniten är av underordnad betydelse i återfyllningen, eftersom den består till 85 procent av krossat berg som i sin tur består av mineral som liknar bentonitens föroreningar. Se vidare den mineralogiska beskrivningen av geosfären.

Dessutom kan material som använts under förvarets utbyggnad och vid deponeringen ha lämnas kvar i deponeringstunnlarna. Det kan röra sig om verktyg, förpackningar och utspillda organiska vätskor.

### **Osäkerheter**

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

I Sjöblom /1998/ finns en sammanställning över maximala mängder av de föroreningar som kan tänkas tillföras under de olika hanteringsstegen. De viktiga föroreningarna är humus från brytning, sot från torkning och smörjmedel från pressning och transport. De organiska ämnen som kan tillföras under hanteringen ligger storleksordningar under den naturliga halten, även vid extrema händelser.

Återfyllning: Se ovan för bentonitkomponenten.

## **6.5 Geosfär**

### **6.5.1 Starttidpunkt för geosfärsbeskrivningen**

För geosfären är beskrivningen av initialtillståndet mer komplicerad än för andra förvarsdelar. Beskrivningen av initialtillståndet måste byggas på tolkningar av observationer vid platserna, och inte på ritningar och materialspecifikationer som är fallet för bränsle, kapsel och buffert/återfyllning. Den starka heterogeniteten i geosfären bidrar ytterligare till dessa svårigheter eftersom det inte är möjligt att direkt observera hela geosfären. Tillståndet och egenskaper i områden som ligger mellan direkta mätområden (vanligen borrhål) kan bara uppskattas genom interpolation. Prognoserna bygger på mer eller mindre välgrundade antaganden om bergets struktur.

För flera av variablerna är det dessutom intressant att känna till inte bara det initiala tillståndet, dvs det då förvaret just konstruerats, utan också det naturliga tillstånd som rådde innan anläggningen påbörjades.

Analysen tar sin utgångspunkt i situationen som råder då förvaret just konstruerats och förslutits. För geosfären utgör denna situation en störning av det tillstånd som rådde innan förvaret konstruerades. Framför allt påverkas den hydrauliska situationen dvs grundvattenflöde och grundvattentryck av dräneringen. Även den grundvattenkemiska situationen påverkas av den förändrade grundvattenströmningen som kan medföra att vatten med avvikande sammansättning strömmar mot förvaret. De kemiska förhållandena påverkas också av att förvaret står öppet och att olika material tillförs. Storleken av inverkan beror på flera faktorer, bl a hur förvaret konstruerats och hur lång tid förvaret dräneras. Bedömningen av hur förvaret påverkar tillståndet i geosfären utgör en del av analysen i basscenariot. I vissa fall, t ex den termiska utvecklingen, behövs kvantitativa beräkningar. I andra fall, t ex beträffande grundvattenströmningen, görs bedömningar av hur och när tillståndet övergår till den situation som rådde innan förvaret konstruerades.

Situationen för grundvattenflödet kompliceras också av att det krävs en modellering för att bestämma initialtillståndet ur de data som hämtas från en platsundersökning. Andra variabler, t ex temperaturen, är direkt observerbara.

För de hydrauliska variablerna grundvattenflöde, grundvattentryck och gasflöde ges därför här endast en kort, kvalitativ redogörelse för initialtillståndet. I basscenariot beskrivs sedan hur detta kan förväntas återgå till de naturligt rådande förhållandena. För grundvattenflöde och -tryck visas i basscenariot också hur modelleringen av den naturliga situationen genomförts. Mer detaljerade, lokala modellstudier redovisas i kapseldefektscenariot.

För de kemiska variablerna grundvattensammansättning (och gassammansättning) beskrivs de ostörda förhållandena som uppmäts i fält innan konstruktionen. Dessutom diskuteras vilken påverkan konstruktionen kan tänkas få på dessa.

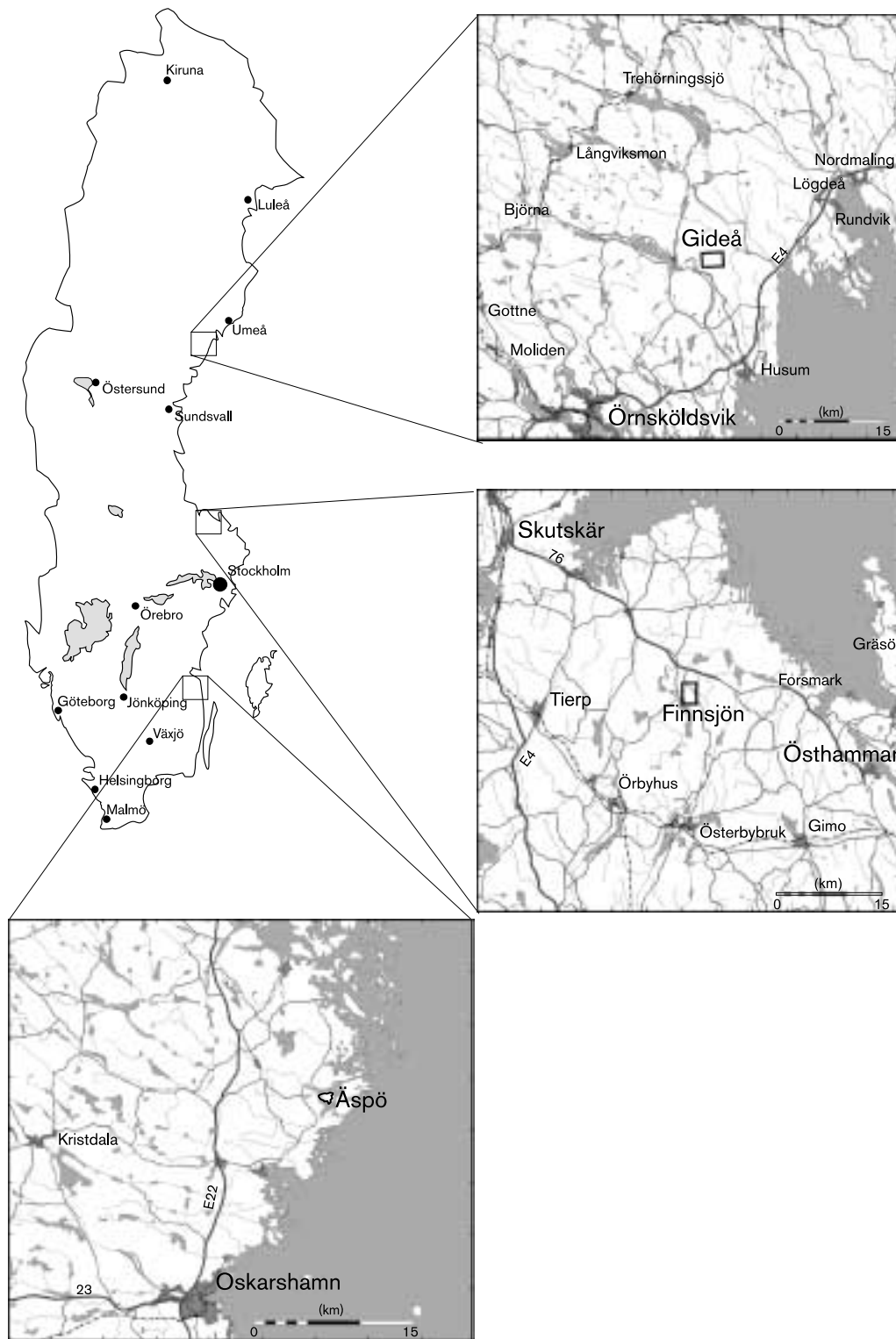
Andra variabler som bergspänningar och per definition förvarsgeometri och konstruktions- och strömmaterial, blir permanent förändrade av konstruktionen. Det är detta förändrade tillstånd som är intressant för den fortsatta analysen och som också beskrivs nedan.

Återstående variabler påverkas måttligt av konstruktionen. Det gäller temperatur, sprickgeometri, matrismineral och sprickmineral.

## 6.5.2 Allmänt om platserna i säkerhetsanalysen

Tre hypotetiska förvarsplatser, Aberg, Beberg och Ceberg, analyseras i SR 97 för att illustrera verkliga förhållanden i svensk kristallin berggrund. Data tas från Äspö i Småland, Finnsjön i Uppland respektive Gideå i Ångermanland, se figur 6-2. Platserna representerar tre områden i stabil geologisk miljö. Samtliga platser är relativt kustnära, Äspö ligger i skärgårdsmiljö.





**Figur 6-2.** Data för de hypotetiska förvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg är hämtade från Äspö, Finnsjön respektive Gideå.

De tre platserna har undersökts av olika experter vid olika tillfällen under en tjugofårsperiod med delvis olika syften och omfattning på undersökningarna. Det finns därför skillnader mellan vilken terminologi som används i de olika platserna (exempelvis för att beskriva sprickzoner), vad som har undersökts och hur resultaten har analyserats och presenterats. I SR 97 har till stor del den ursprungliga nomenklaturen och presentationsättet behållits, vilket innebär att termer och utformning av kartor delvis skiljer sig mellan de tre platserna.

Undersökningsmaterialet är störst för Äspö och minst för Gideå. Det beskrivs i detalj i Förvarssystemrapporten och sammanfattas i detta avsnitt.

Vid Äspö har SKB under tidsperioden 1986–1995 byggt ett berglaboratorium (Äspölaboratoriet) med avsikt att utforska berggrunden och genomföra demonstrationsövningar på förvarsdjup i ett tidigare ostört område. En stor mängd data samlades in före och under byggnationen av underjordsanläggningen. Anläggningen används idag i forskningssyfte och data om berget samlas kontinuerligt in från olika forskningsprojekt i laboratoriet. I SR 97 används dock endast data från förundersökningarna och från byggskedet.

Finnsjön undersöktes först under åren 1977–1978 inom ramen för KBS-projektet. Under 1985–1991 gjordes studier av en flackt liggande sprickzon för att få detaljkunskap om flacka zoners betydelse för transport av grundvatten och grundvattenlösta ämnen.

Vid Gideå utfördes undersökningar under åren 1981–1983 som underlag till säkerhetsanalysen KBS-3. Undersökningarna har kompletterats i SR 97 med bl a en omfattande genomgång av ursprungsdata där nya modeller har tagits fram för strukturgeologi och geohydrologi i berget.

Sveriges Geologiska Undersökning har nyligen presenterat geologiska översikter över de län där platserna ligger. Av tidsskäl har resultat från dessa översikter inte inarbetats i SR 97.

Berggrunden vid Äspö är heterogen vad gäller bergarter och har en relativt hög andel sprickzoner och sprickor. Vattengenomsläppligheten är förhållandevis hög, både för sprickzoner och bergmassa. Grundvattnet är salt på förvarsdjup. Salthalten är högre än omgivande hav vilket tyder på inslag av relict havsvatten. Det kustnära läget med en pågående landhöjning medför en långsam ursköljning av det salta grundvattnet med ett sött grundvatten.

Finnsjön är ett bergartsmässigt homogent område med en medelhög andel sprickzoner och sprickor. Vattengenomsläppligheten är relativt hög både i sprickzoner och i bergmassan. Vad som särskilt utmärker Finnsjön är den flacka sprickzonen i det norra blocket. Den är starkt vattengenomsläpplig och har ett högt naturligt flöde i sin övre del. I zonen nedre del indikerar flödesmätning och grundvattensammansättning mycket låga grundvattenflöden. Grundvattnet är salt med inslag av relict havsvatten. På lång sikt kommer det kustnära läget, med en pågående landhöjning, att medföra att det salta grundvattnet ersätts med ett sött.

Även Gideå är ett tämligen homogent område vad gäller bergarter, med undantag för de frekvent förekommande vertikala diabasgångarna. Frekvensen av sprickzoner är låg, vilket även gäller sprickfrekvensen på förvarsdjup. Vattengenomsläppligheten både i sprickzoner och i bergmassan är förhållandevis låg. Grundvattnet är sött. Landhöjningen bedöms inte påverka grundvattensammansättningen.

### 6.5.3 Försvarsgeometri/rand

#### *Initialt värde*

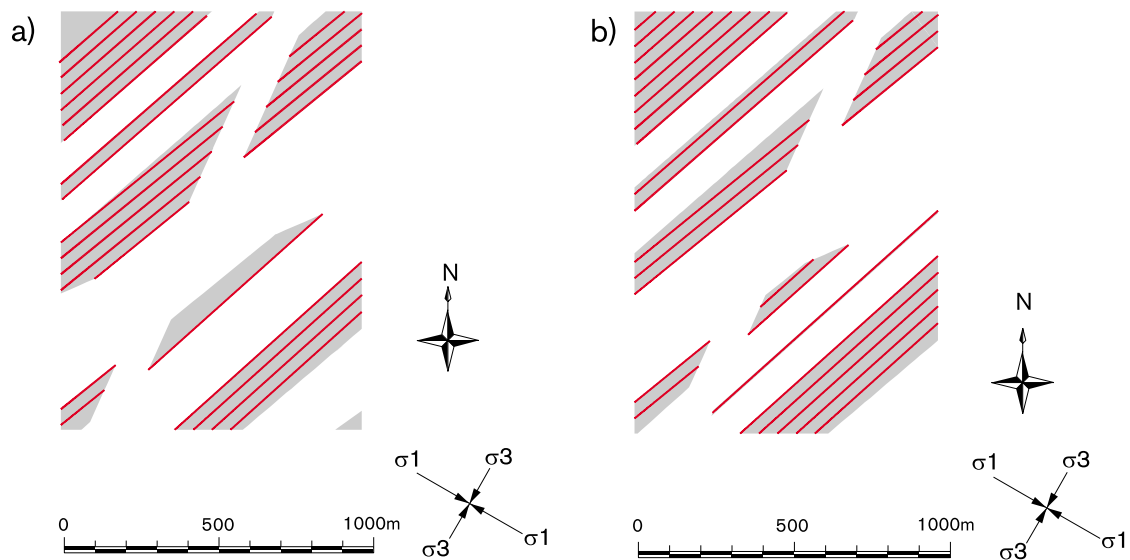
Utformning av bergrum, tunnlar och deponeringspositioner i försvarssystemet bygger på principer som först presenterades i KBS-3-studien /SKBF/KBS, 1983/, se avsnitt 5.2 för en översiktlig beskrivning.

För Aberg, Beberg och Ceberg har ett antal möjliga försvarsplaceringar tagits fram och huvudalternativet för respektive plats redovisas nedan. De förutsättningar som gäller för utformningarna redovisas i detalj i Försvarssystemrapporten och Munier m fl /1997/.

För varje försvarsplats gjordes först en preliminär försvarsutformning för att rymma cirka 4 000 kapslar. Tunnlarnas sammanlagda längd valdes så att kapslarna utplacerade med sex meters avstånd rymdes i förvaret.

Därefter beräknades för varje plats vilket minsta kapselavstånd som krävdes för att uppnå kravet på temperaturbegränsning på kapselytan. I den slutliga försvarsutformningen används dessa nya kapselavstånd och samma tunnelsystem som i den preliminära utformningen. Detta betyder att antalet kapslar som rymms i den slutliga utformningen varierar något mellan platserna, beroende på deras olika termiska egenskaper. I en fullständigt genomförd procedur för en verklig plats, skulle tunnelsystem och/eller ytan hos förvaret behöva ändras, men detta har inte utförts i SR 97.

I Aberg är den föreslagna försvarsutformningen uppdelad på två nivåer på 500 meters och 600 meters djup för att rymma hela förvaret inom det relativt begränsade undersökningsområdet, se figur 6-3.

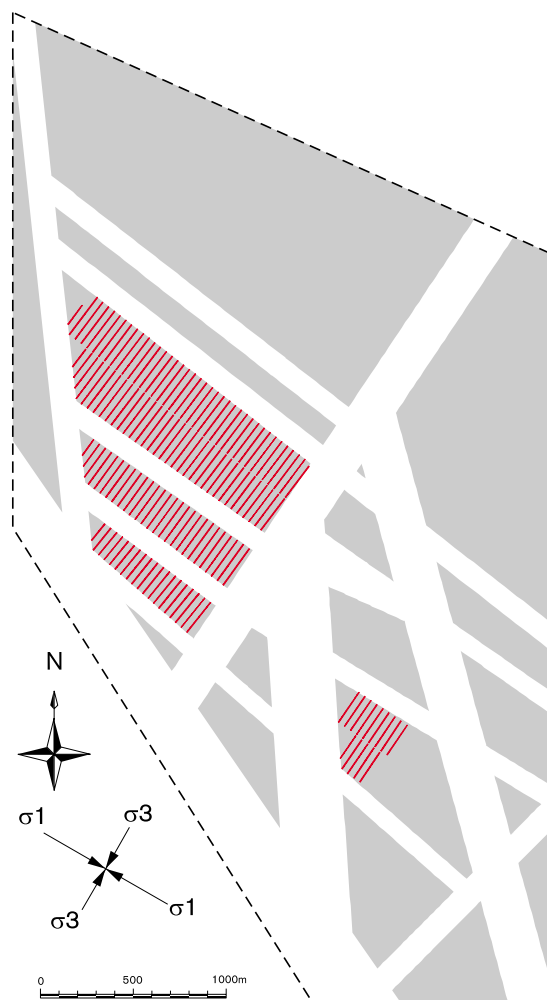


**Figur 6-3.** Försvarsutformning för Aberg där bergblocken fastlagts med hänsyn till hydrauliska strukturers geometri och respektavstånd till dessa. Figuren representerar snitt på a)  $z = -500$  m och b)  $z = -600$  m.

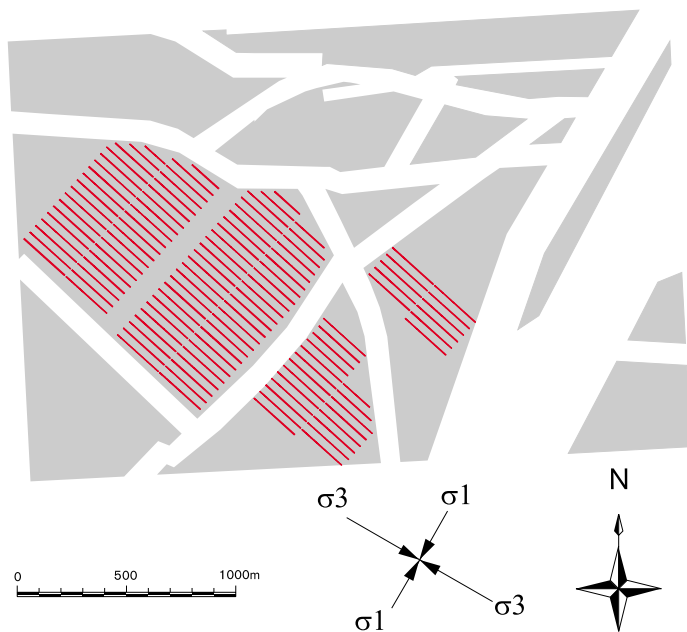
Termiska beräkningar för den föreslagna förvarsutformningen i Aberg visar att minsta avståndet mellan kapslarna måste ökas från sex meter till cirka 7,5 meter om tunnelavståndet är 40 meter för att maximalt tillåten temperatur på kapselytan inte ska överskridas /Ageskog och Jansson, 1999/.

I Beberg är föreslagen layout placerad 600 meter under havsnivå för att med marginal undvika en dominerande horisontell struktur vid platsen, se figur 6-4. Anslutning sker med ramp. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen. Riktningen har valts för att undvika långa skärningar med vattenförande sprickor som har samma riktning som horisontalspänningen /Munier m fl, 1997/. Utformningen överensstämmer väl med den som användes som exempel i säkerhetsanalysen SKB 91 /SKB, 1992/.

Termiska beräkningar för den föreslagna förvarsutformningen i Beberg visar att det ursprungliga avståndet mellan kapslarna (6 meter) inte leder till att maximalt tillåten temperatur på kapselytan överskrids /Ageskog och Jansson, 1999/.



**Figur 6-4.** Förvarsutformning för Beberg med deponeringstunnlar orienterade vinkelrätt mot den största horisontalspänningen;  $z = -600$  m.



**Figur 6-5.** Förvarsutformning för Ceberg med deponeringstunnlar orienterade vinkelrätt mot den största horisontalspänningen;  $z = -500$  m.

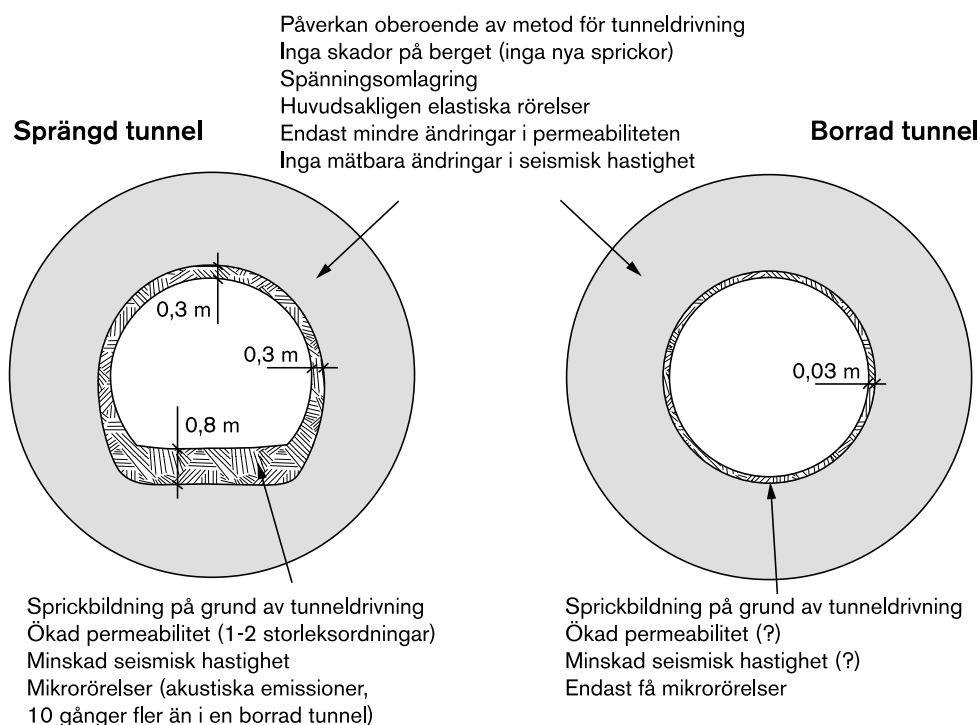
I Ceberg föreslås förvaret placeras 500 meter under havsnivå, dvs omkring 600 meter under markytan, se figur 6-5. Anslutning sker med ramp. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen.

Termiska beräkningar för den föreslagna förvarsutformningen i Ceberg visar att det ursprungliga avståndet mellan kapslarna (6 meter) inte leder till att maximalt tillåten temperatur på kapselytan överskrids /Ageskog och Jansson, 1999/.

### **Störd zon**

Borrning och sprängning av tunnlar och deponeringshål ger uppsprickning i en zon kring hål- och tunnelperiferier. Beskrivningen av denna sk störda zon tillhör egentligen variabeln sprickgeometri, avsnitt 6.5.4, men har ändå lagts här eftersom den är ett resultat av förvarsutbygganden.

Sprängning av deponeringstunnlar och övriga tunnlar åstadkommer betydligt större skador i berget än mekaniserad brytning såsom fullprofilbörning. Sprängskadeförsök i Äspörampen /Pusch och Stanfors, 1992/ och i ZEDEX-tunneln /Emsley m fl, 1997/ bekräftar de preliminära uppskattningar av skadornas omfattning, som gjordes i Stripaprojektet /Börgesson m fl, 1992/, samt de skadeverkningar som beräknats på teoretisk grund /Andersson, 1994/. Försöken i Äspörampen och ZEDEX-tunneln indikerar en 0,3 meters zon utanför väggar och tak och en 0,8–1,5 meters zon under golvet, som är betydligt påverkade. Resultat från hydrauliska mätningar i ZEDEX-tunneln visar på en ökning av den axiella permeabiliteten i den sprängskadade zonen. Det gick dock inte utifrån resultaten att kvantifiera ökningen. Längre ut från tunneln leder spänningsomlagring till endast smärre förändringar, se figur 6-6.



**Figur 6-6.** Utsträckningen av den störda zonen runt en sprängd tunnel respektive runt en TBM-tunnel. Sammanställning av resultat från ZEDEX-experimenten i Åspö.

## Osäkerheter

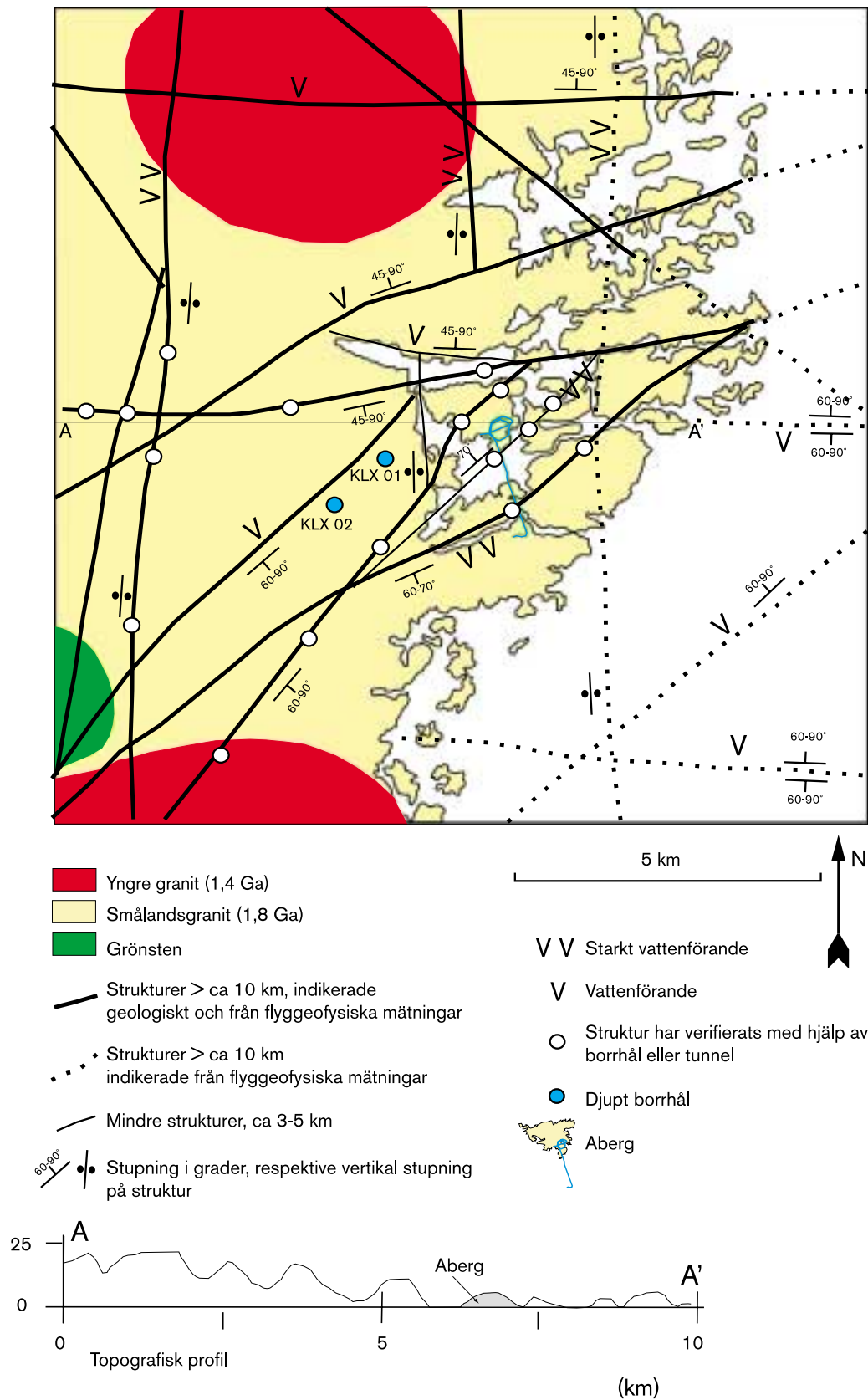
Förvarets utformning är anpassad till den kunskap som idag finns om sprickgeometrin vid de olika platserna. De utformningar som analyseras i SR 97 är tillräckligt detaljerat beskrivna för syftet med SR 97. Vid lokalisering av ett djupförvar förbättras stegvis kunskaperna om sprickgeometrin under lokaliseringsarbetets olika faser, såsom platsundersökning och detaljundersökning. Förvarets utformning detaljanpassas i takt med den ökande informationsmängden.

## 6.5.4 Sprickgeometri och genomsläplighet

### Aberg

Regionen domineras av nordvästliga, nordostliga och nord-sydliga brant stående regionala sprickzoner (benämns här strukturer) med en horisontell utbredning av mer än 10 km (figur 6-7) /Rhén m fl, 1997b/. Sprickzonerna tolkas ofta ha en bredd på hundratals meter med en central uppsprucken del som kan vara upp till ett tiotal meter bred. De nord-sydliga regionala sprickzonerna är förmodligen bland de senast bildade och tolkas vara de mest vattenförande enligt resultat från geofysiska mätningar.

Sprickzonerna i lokal skala har av Stanfors m fl /1997/ indelats i större och mindre zoner där större sprickzoner har en vidd av mer än fem meter. Totalt har 16 sprickzoner definierats inom undersökningsområdet (figur 6-8). En förteckning över dessa finns i tabell 6-4. Sprickzonerna domineras av större zoner med öst-västlig och nordostlig riktning och mindre zoner med nordvästlig till nordostlig riktning, se figur 6-8.



**Figur 6-7.** Regional geologisk beskrivning över Aberg /efter Rhén m fl, 1997b/. Topografisk profil i östvästlig riktning /efter Walker m fl, 1997/.

**Tabell 6-4. Aberg, större sprickzoner /efter Rhén m fl, 1997b/. Sprickzonsvidd inom parentes anger uppskattad, ej observerad medelvidd.**

Sprickzon	Stupning	Vidd (m)	Transmissivitet medelvärde (m <sup>2</sup> /s)
EW-1N	88 SO	(30)	$5,2 \cdot 10^{-7}$
EW-1S	78 SE	(30)	$1,2 \cdot 10^{-5}$
EW-3	79 S	15	$1,7 \cdot 10^{-5}$
EW-7	81 SO	(10- 15)	$1,5 \cdot 10^{-5}$
NE-1	70- 75 NV	30	$2,2 \cdot 10^{-4}$
NE-2	77 SO	5	$1,2 \cdot 10^{-7}$
NE-3	70- 80 NV	50	$3,2 \cdot 10^{-4}$
NE-4	71- 78 SO	40	$3,1 \cdot 10^{-5}$
NW-1	30 NO	(10)	$4,1 \cdot 10^{-7}$
NNW-1	(vertikal)	(20)	$8,6 \cdot 10^{-6}$
NNW-2	(vertikal)	(20)	$2,4 \cdot 10^{-5}$
NNW-3	(vertikal)	(20)	$2,0 \cdot 10^{-5}$
NNW-4	85 NO	10	$6,5 \cdot 10^{-5}$
NNW-5	(vertikal)	(20)	$4,0 \cdot 10^{-6}$
NNW-6	(vertikal)	(20)	$1,4 \cdot 10^{-5}$
NNW-7	85 NO	(20)	$7,5 \cdot 10^{-6}$
NNW-8	(vertikal)	(20)	$8,4 \cdot 10^{-6}$

Den största enskilda zonen är en regional nordostlig plastisk deformationszon som skär tvärs över ön. I den geologiska modellen benämns denna zon EW-1. Zonen är mer än 100 meter bred och är tydligt indikerad av geofysiska mätningar och i borrhål. Den kännetecknas av stark förskiffring och meterbredda myloniter. Aspölaboratoriet med tillfartstunnel är beläget söder om zonen.

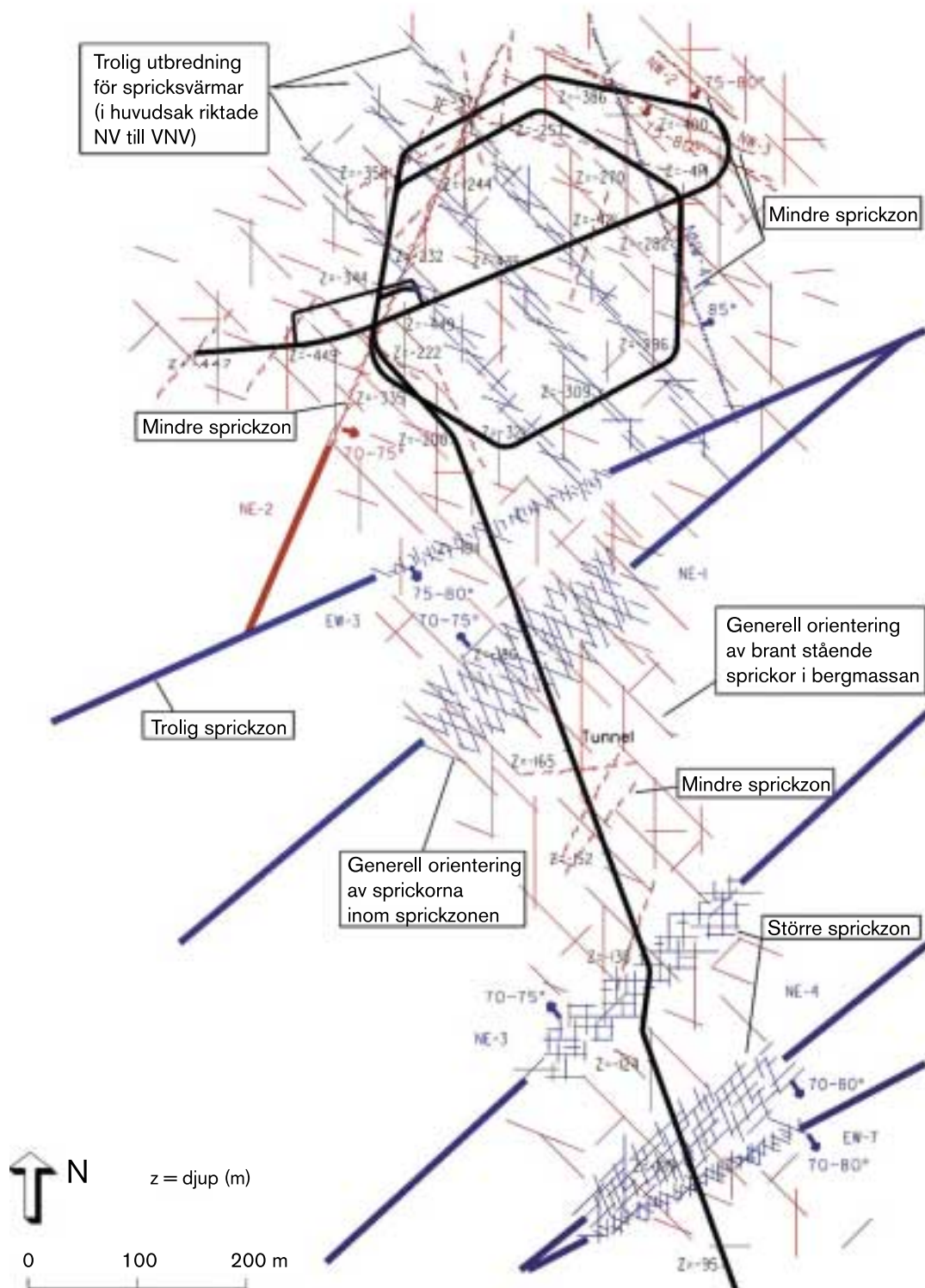
Sprickzonerna NE-1, NE-3, EW-3 och NE-4 är alla tydligt identifierade genom geofysiska mätningar på markytan, i borrhål och i tunnlar. Zonerna karakteriseras av kraftigt uppspräckta, 10–40 meter breda centrala partier, mer eller mindre vattenförande i samband med förekomst av finkornig granit, grönsten och diorit. NE-2 är en brant stående mindre zon som följer en tidigare mylonit/plastisk deformationszon och varierar i vidd mellan 1 och 5 meter.

De mindre nordvästliga-nordostliga sprickzonerna är brantstående och med en vidd som vanligen är mindre än fem meter. De har även en mindre utbredning än de ovannämnda zonerna. De är lokalt mycket vattenförande och består vanligen av en eller flera zoner i grupp.

Förutom ytliga avlastningssprickor har endast två mindre flackt liggande sprickzoner dokumenterats från underjordsundersökningarna /Rhén m fl, 1997a/. De har båda en vidd av cirka 0,5 meter och är synliga ett hundratal meter längs tunneln.

Antalet uppmätta sprickor uppgår till över 25 000. Av dessa har cirka 10 000 karterats på hållar och i diken. Resten har karterats vid konstruktionen av underjordslaboratoriet. Spricksystemet är uppdelat i fyra sprickgrupper med brantstående sprickor i nord-syd, nordnordväst och västnordväst samt ett flackt liggande spricksystem. Vattenförande sprickor är företrädesvis branta och stryker västnordväst.





**Figur 6-8.** Aberg, strukturgeologisk modell över undersökningsområdet /efter Rhén m fl, 1997a/.

**Tabell 6-5. Hydraulisk konduktivitet (m/s) för bergmassan i lokal skala för Aberg. Bergmassan är indelad i fem olika domäner som representerar delar av berggrunden med olika konduktivitet. Värdena baseras på 3 m manschettmätningar men är uppskalade till 24 m skala /efter Rhén m fl, 1997b; Walker m fl, 1997/.**

Domän	Aritmetiskt medelvärde log K för 24 m skala
RD1	- 8,0
RD2	- 7,1
RD3	- 8,8
RD4	- 7,5
RD5	- 7,6
Övriga RD (medelvärde av RD1- RD3)	- 8,5

Hydrauliska egenskaper för bergmassa och sprickzoner har beräknats från tre meters manschettmätningar och hydrauliska tester från hål borrade från tunneln.

Hydrauliska egenskaper för sprickzoner redovisades i tabell 6-4. Tabellen visar värden uppskalade till 24 meters skala /efter Rhén m fl, 1997b; Walker m fl, 1997/.

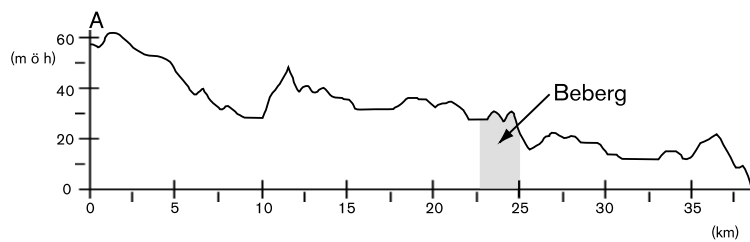
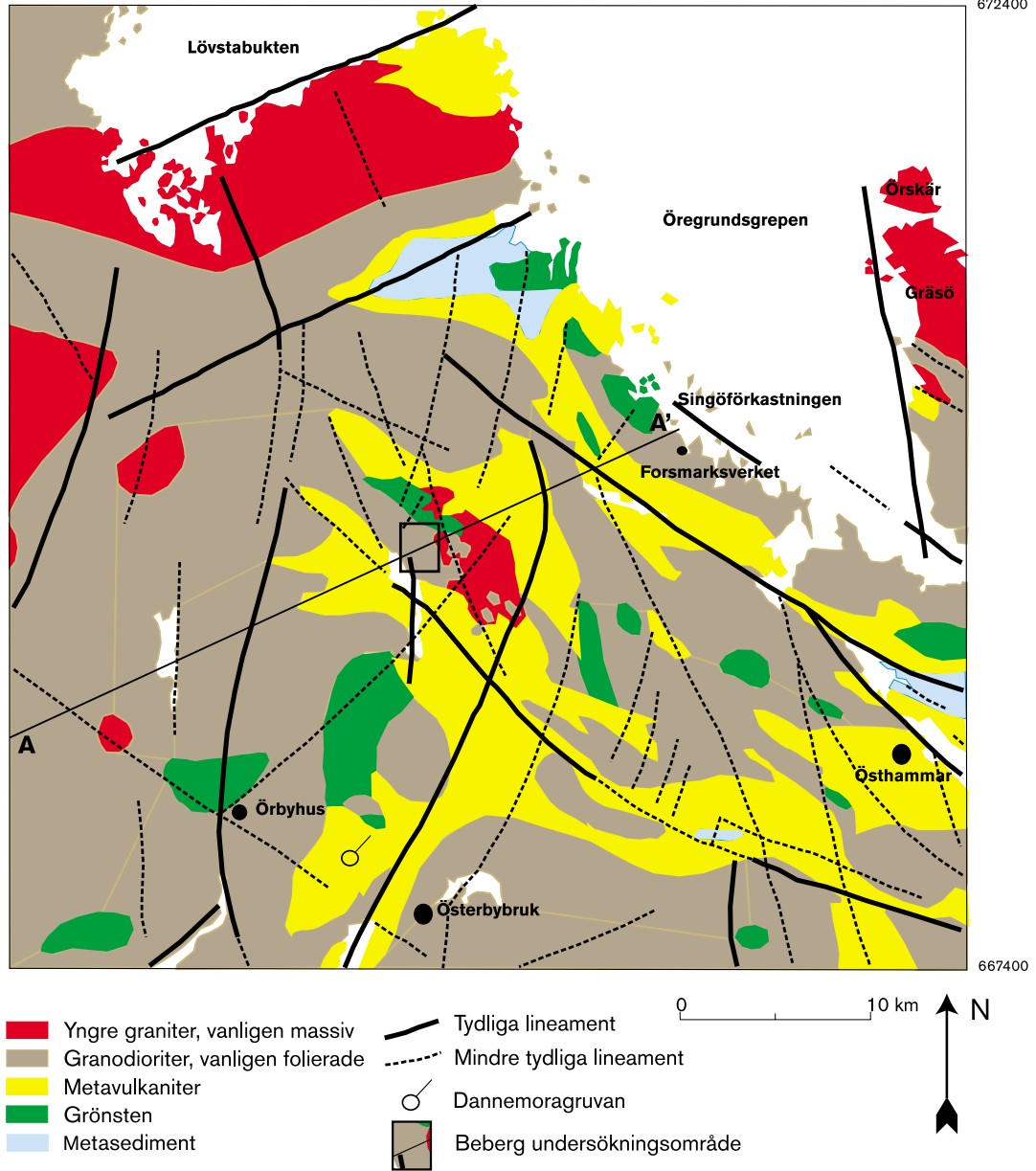
I lokalskala har bergmassan delats in i fem olika domäner med olika konduktivitet enligt tabell 6-5. Bergmassan har en dominerande sprickriktning åt västnordväst, varför konduktiviteten kan vara större parallellt med denna riktning. Baserat på undersökningar i hammarborrhål utmed tunneln har Rhén m fl /1997b/ visat att transmissiviteten följer den dominerande sprickriktningen. Alternativa beskrivningar av bergmassans anisotropi anges av Walker m fl /1997/.

### **Beberg**

Regionala sprickzoner bildar ett blockliknande nätverk (figur 6-9). Markytan i de block som begränsas av nordnordostliga sprickzoner lutar mot ostsydost och mot nordost i de block som begränsas av nordvästliga sprickzoner. Denna blocklutning tolkas vara ett resultat av ett system av regionala förkastningar med brant lutning nära markytan /Ahlbom och Tirén, 1991/.

En brantstående sprickzon, zon 1, som löper från nordost till sydväst delar området i två halvkor, det norra och det södra blocket. Zon 1 är dokumenterad till cirka 5–6 km längd och har en vidd av cirka 20 meter. Borrhål genom zonen visar en förhöjd sprickfrekvens och en omvandlad, rödfärgad granodiorit.

En subhorisontell sprickzon, zon 2, finns i det norra blocket. Zonen är cirka 100 meter bred och har identifierats i nio borrhål i vilka överytan på zonen har påträffats på ett djup av mellan 100–295 meter (se vertikalprofilen i figur 6-11). Det finns inga indikationer på att zon 2 skär igenom zon 1 in i det södra blocket och den har inte påträffats i berghäll. Zon 2 tros ha bildats genom reaktivering av en tidigare plastisk struktur. De mest intensivt spruckna sektionerna förekommer längs zonens avgränsningar uppåt och nedåt.



**Figur 6-9.** Beberg, regional geologisk beskrivning /efter Söderholm m fl, 1983; Ahlbom och Tirén, 1991/. Topografisk profil i nordostlig riktning /efter Walker m fl, 1997/.

**Tabell 6-6. Beberg, sprickzoner /efter Ahlbom m fl, 1992; Walker m fl, 1997/.  
Konduktivitetvärden är baserade på 3 m manschettmätningar och i vissa fall  
uppskalade till 100 m skala. K = hydraulisk konduktivitet (m/s).**

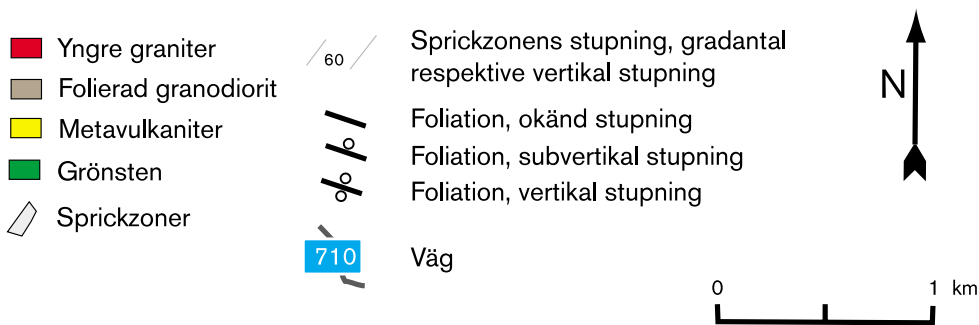
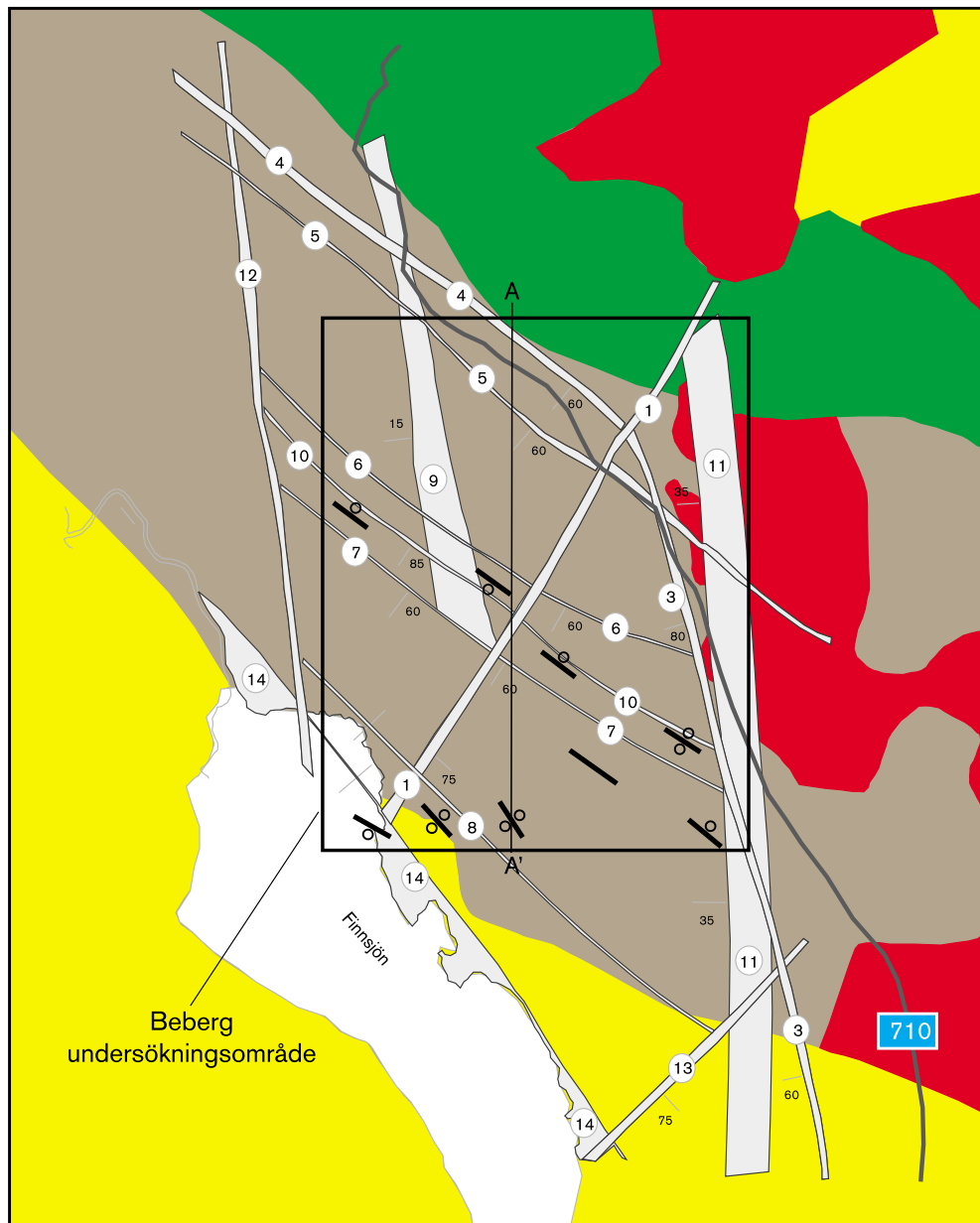
Sprickzon	Strykning	Stupning	Vidd (m)	100 m skala median log K	3 m skala median log K
1	N30O	75SO	20	- 4,33	- 5,66
2	N28V	16SV	100	- 5,15	- 6,34
3	N15V	80V	50	- 5,63	- 6,82
4	N50V	65SV	10	- 5,16	- 6,35
5	N50V	60SV	5		- 6,35
6	N55-65V	60SV	5		- 8,39
7	N55V	60SV	5		- 7,39
8	N50V	90	5		- 7,39
9	N10V	15V	50		- 7,94
10	NV	85SV	5		- 8,34
11	N5V	35V	100		- 7,22
12	N-S	90	25	- 4,91	- 6,10
13	N30O	75SO	20	- 4,33	- 5,66
14	NV	90	100	- 4,91	- 6,10

Förutom de ovannämnda zonerna har ytterligare tolv sprickzoner identifierats. De sammanfattas i tabell 6-6 och figur 6-10. Flera av zonerna är mindre kända, särskilt inom det södra blocket. I det norra blocket förekommer även mindre skjuvzoner regelbundet med en nordvästlig riktning. Dessa zoner är vanligen cirka 1–5 meter breda och har en utbredning av något hundratal meter.

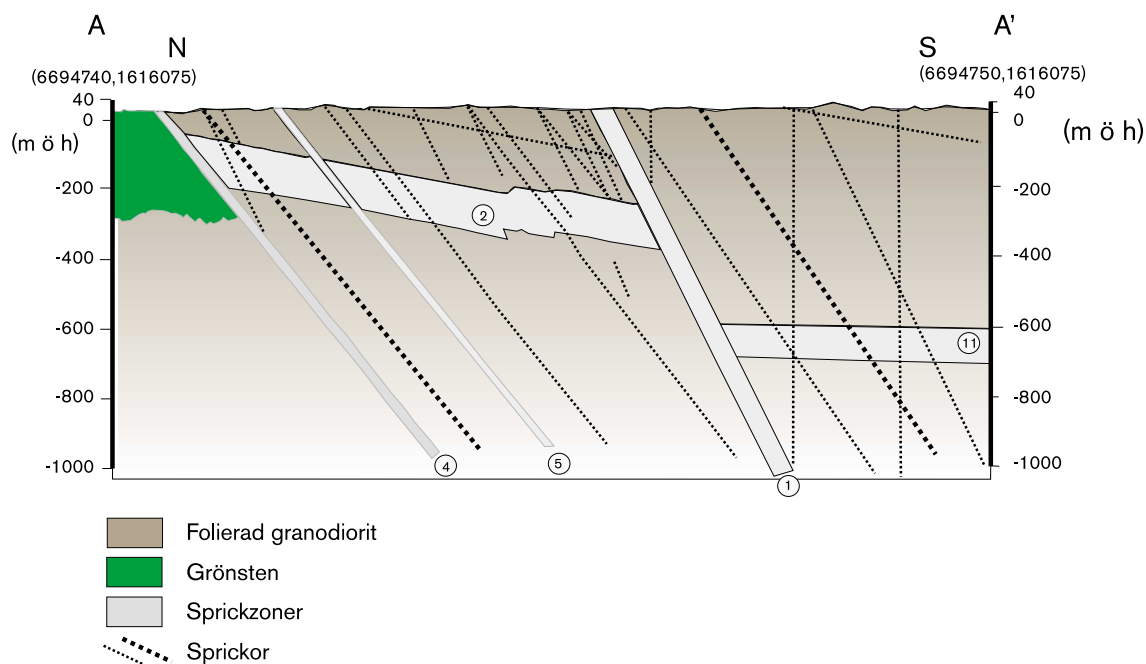
Spricksystemet domineras av brant stående nordostliga och nordvästliga sprickor respektive flackt liggande sprickor. Medelsprickfrekvensen i det södra blocket är cirka tre sprickor per meter uppmätt längs två vinkelräta profiler utmed markytan och i de översta 100 meterna i kärnbråhålen /Olkiewicz och Arnefors, 1981; Ahlbom m fl, 1992/. Ingen minskning av sprickfrekvens har noterats mot djupet. I det norra blocket är däremot den uppmätta frekvensen endast 1,5 sprickor per meter baserad på mätningar i håll. Borrhål i detta block visar liknande sprickfrekvens.

Den hydrogeologiska modellen, som baseras på en strukturgeologisk modell av Andersson m fl /1991/, skiljer mellan bergmassa och sprickzoner. Bergmassan är i sin tur uppdelad i ett sydligt och ett nordligt block. Tabell 6-7 anger hydraulisk konduktivitet på olika djup i bergmassan. Konduktiviteten beräknas från tre meters manschettmätningar och skalas upp till 24 meters block /efter Rhén m fl, 1997b; Walker m fl, 1997/.

Utöver detta basfall föreslår Walker m fl /1997/ alternativa modeller, i vilka bergmassan betraktas som anisotrop betingat av den dominerande sprickriktningen och spänningsfältet i området.



**Figur 6-10.** Beberg, berggrundskarta och generaliserad bild av sprickzoner /efter Ahlbom och Tirén, 1991; Ahlbom m fl, 1992/.



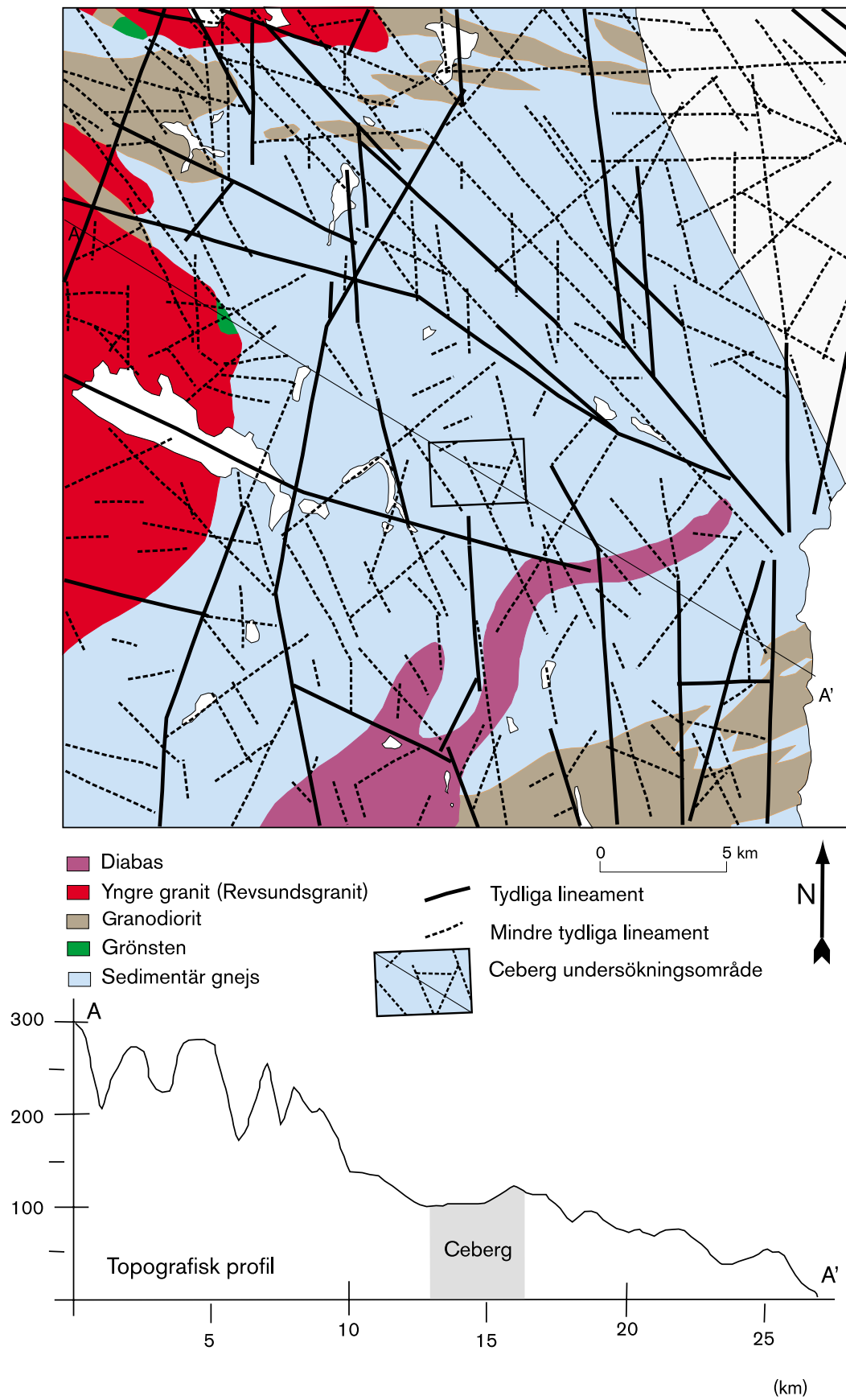
**Figur 6-11.** Beberg, nordsydlig vertikalprofil genom undersökningsområdet /efter Ahlbom och Tirén, 1991/. För profilens sträckning se profilen A–A' i figur 6-10.

**Tabell 6-7.** Hydraulisk konduktivitet (m/s) för bergmassa i lokal skala för Beberg. Värdena baserad på 3 m manschettmätningar men är uppskalade till 24 m skala /efter Rhén m fl, 1997b; Walker m fl, 1997/.

Höjd (meter över havet)	Aritmetiskt medelvärde log K för 24 m skala
Norra blocket	
över - 100	- 6,6
- 100 till - 200	- 7,2
- 200 till - 400	- 7,8
djupare än - 400	- 7,6
Södra blocket	
över - 100	- 6,8
- 100 till - 200	- 7,8
- 200 till - 400	- 8,1
djupare än - 400	- 7,9
Övrig bergmassa	
över - 100	- 7,8
under - 100	- 7,8

## Ceberg

De regionala sprickzonerna (lineamenten) är tolkade som brantstående med huvudsakligen västnordvästlig till nordvästlig riktning /Ahlbom m fl, 1983; Askling, 1997; Walker m fl, 1997/, figur 6-12. Enligt Askling /1997/ kan en regional sprickzon finnas i det nordöstra hörnet av området. Inga borrhål skär dock igenom sprickzonen och geofysiska undersökningar i området har inte kunnat påvisa zonen. Ett mindre antal andra lineament korsar området och kan korreleras till existerande sprickzoner. Trots att flera borrhål skär igenom dessa zoner bör deras geologiska och hydrauliska egenskaper betraktas som osäkra /Ahlbom m fl, 1983; Askling, 1997; Hermanson m fl, 1997/.



**Figur 6-12.** Ceberg, regional geologisk beskrivning /efter Ahlbom m fl, 1983; Walker m fl, 1997/. Topografisk profil i nordvästlig riktning /efter Walker m fl, 1997/.

**Tabell 6-8. Ceberg, sprickzoner /efter Hermanson m fl, 1997/. Konduktivitetvärden är baserade på 25 m manschettmätningar, uppskalade till 100 m skala /efter Walker m fl, 1997/.**

Sprickzon	Strykning	Stupning	Vidd (m)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
1	NNO	Brant O	41	$< 5 \cdot 10^{-12}$
2A	NNO	80 O	7- 16	$1 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-6}$
2B	NNO	60 O	35	$1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$
3A	O-V	30 N	11- 30	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-10}$
3B	O-V	Brant N	4- 12	$7 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-12}$
4	O-V	Brant N	9	$7 \cdot 10^{-12}$
5	O-V	Brant N	50	
6	NNO	70 SO	3- 10	$5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-12}$
7	NNV	75 O	8	$7 \cdot 10^{-10} - 7 \cdot 10^{-11}$
8	NV	Brant SO	10	
9	O-V	N	5	
10	N-S	90	5	
11A	ONO	75 SO	25	$5 \cdot 10^{-7}$
11B	ONO	75 SO	13	$2 \cdot 10^{-6}$
12	ONO	75 SO	10	$5 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-10}$

I undersökningsområdet har 15 sprickzoner identifierats med en bredd på 5–50 meter, se tabell 6-8 och figur 6-13. De flesta zonerna har lokaliserats med hjälp av geofysiska mätningar och verifierats med hammarborrhål och senare även med kärnborrhål.

Sprickzonerna skär igenom alla bergarter i området och följer inte några bergartsgränser men kan ha influerats av foliationen. Inga flackt liggande zoner har observerats ned till 700 meters djup. Saksa och Nummela /1998/ påpekar dock att flackt liggande sprickzoner kan förekomma i samband med möjliga flacka diabasgångar på större djup än 700 meter. Vertikala profiler i figur 6-14 visar både diabasgångar och sprickzoner.

Sprickzonerna är generellt identifierade genom förhöjd sprickfrekvens, sektioner av kärnkross och vattenförluster. Både sprickzoner och diabasgångar innehåller vanligen leromvandlade sektioner.

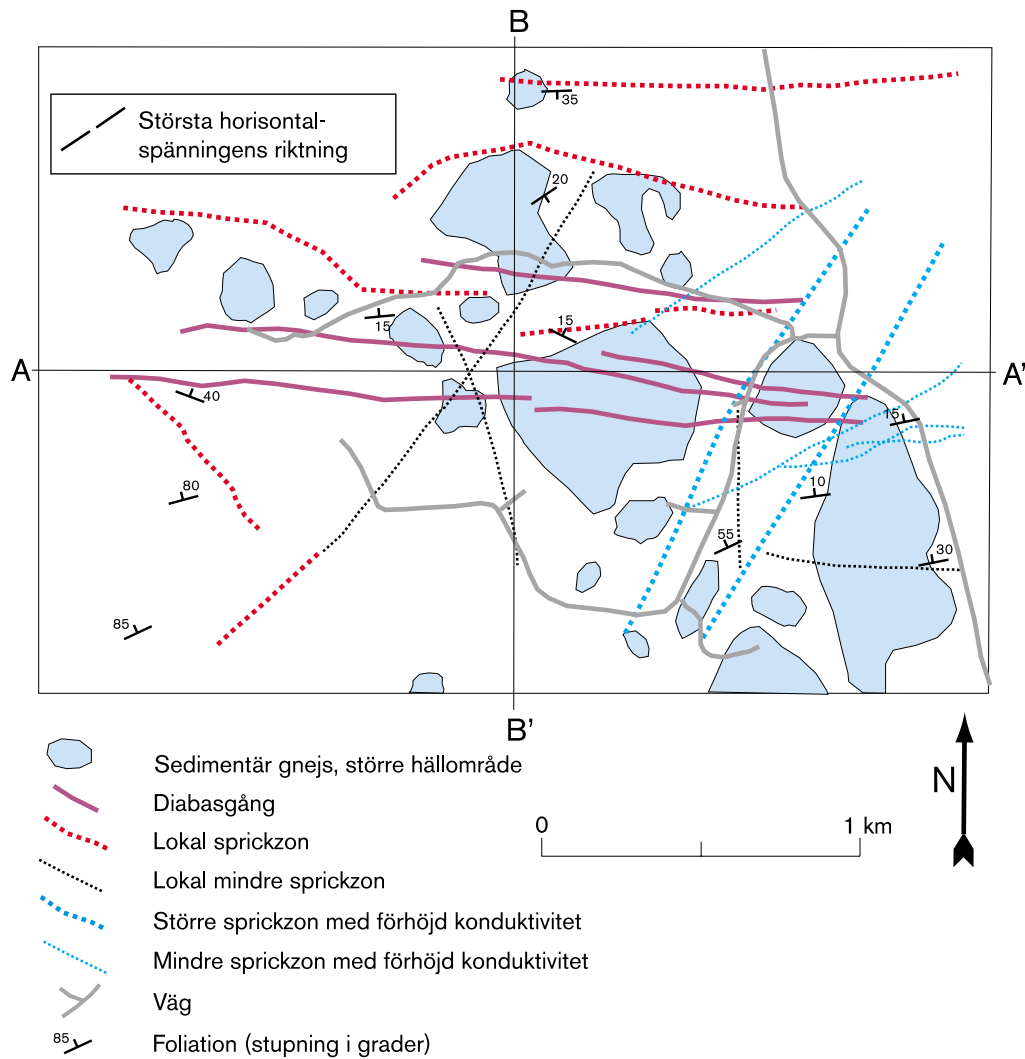
För den lokala hydromodelleringen delas Ceberg in i de två konduktivitetsdomänerna bergmassa och sprickzoner. Delningen baseras på den strukturella modellen av Hermanson m fl /1997/. Domänerna skiljer sig åt genom relativt låga konduktiviteter i bergmassan jämfört med zonerna /Walker m fl, 1997/. Den hydrauliska konduktiviteten för bergmassan, angiven i tabell 6-9, baseras på 25 meters manschettmätningar.

Hydrauliska egenskaper för sprickzoner redovisades i tabell 6-8.

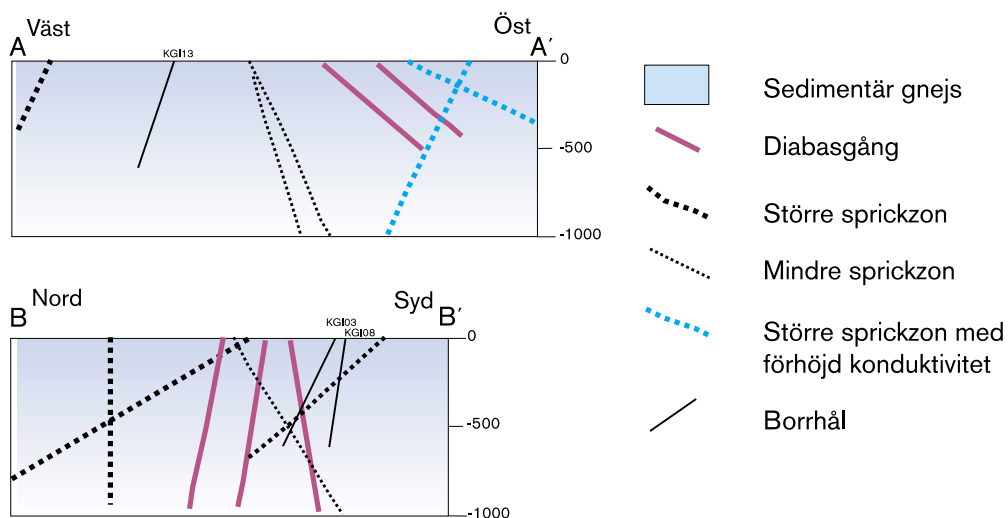
**Tabell 6-9. Hydraulisk konduktivitet K (m/s) för bergmassa i lokal skala för Ceberg. Värdena för 25 m skalan /Walker m fl, 1997/ är uppmätta.**

Höjd (meter över havet)	Aritmetiskt medelvärde log K för 25 m skala
+110 till 0	- 7,6
0 till - 100	- 9,0
- 100 till - 300	- 10,0
djupare än - 300	- 10,3





**Figur 6-13.** Ceberg, strukturgeologisk modell /efter Ahlbom m fl, 1991; modifierad av Hermanson m fl, 1997/.



**Figur 6-14.** Vertikala profiler i nordsydlig och östvästlig riktning /efter Ahlbom m fl, 1991/.

## Osäkerheter

För strukturerna i den regionala strukturmodellen (regionala sprickzoner) bedöms osäkerheten vad gäller strukturernas geografiska läge i sidled till mellan 100 och 200 meter, när enbart flyggeofysiska och lineamentindikationer finns. I de fall då strukturernas läge verifierats med markgeofysik, geologiska fältobservationer och borrning minskar osäkerheten avsevärt (5–20 meter).

Osäkerheten i zonernas stupning och karaktär är mycket stor (20–30 grader) om enbart geofysiska data finns. Geologiska fältobservationer och framför allt borrning ökar säkerheten avsevärt men är oftast baserad på enstaka avsnitt genom zonen. En relativt stor osäkerhet kring stupning och karaktär finns därför nästan alltid för en större struktur såvida inte mycket omfattande undersökningar utförts.

De tre platserna ligger i olika geologiska miljöer som alla är representativa för svensk berggrund utanför fjällkedjan. Datarapporten sammanfattar de osäkerheter som påverkar den geologiska beskrivningen. Den dominerande osäkerheten beror på begränsad tillgång till data som används för att beskriva en stor volym. Begränsning av datamängden kan ha många orsaker, t ex otillgänglig terräng med få blottningar, tidsbegränsningar som inte tillåter en fullständig geologisk kartering, eller undersökningar som endast täcker en del av området.

Platsspecifika osäkerheter för de geologiska strukturmodeller som använts för Aberg, Beberg och Ceberg diskuteras av Saksa och Nummela /1998/:

- De geologiska modeller av bergmassa och sprickzoner som används är i stort sett gjorda med samma metodik. Den största osäkerheten utgörs av beskrivningen av sprickzoner i skalan från 10 till 300–1 000 meters längd.
- Aberg saknar ett avgränsat undersökningsområde. Används ön Äspö som områdesavgränsning, finns indikationer på att bergvolymen inom området utgör en kraftigt tektoniserad del av regionen. Detta innebär att borrhålsdata från södra Äspö inte med säkerhet är typiska för hela området.
- För Beberg och Ceberg finns relativt stora osäkerheter i den geologiska beskrivningen och därmed i sprickgeometrin.

Beträffande sprickzonernas och bergmassans hydrauliska konduktivitet gäller att egenskaperna varierar i rummet, vilket illustreras av standardavvikelsen hos den hydrauliska konduktiviteten. Skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan olika block i 30 meter skalan kan uppgå till en faktor hundra, eller mer. Den rumsliga variationen utgör i sig ingen osäkerhet, utan är en egenskap hos berget, men läget för högkonduktiva, respektive lågkonduktiva områden kan bara bestämmas statistiskt utifrån den information som kan erhållas från borrhål (platsundersökning). Den rumsliga variationen och den statistiska osäkerheten hanteras med den stokastiska kontinuumsbeskrivning som används för att analysera grundvattenströmningen (se kapitel 9). Undersökningar direkt från deponeringstunnlar (detaljundersökning) minskar inte den rumsliga variationen, men kommer att leda till betydligt större kunskap om var hög- respektive lågkonduktiva områden är belägna. I en säkerhetsanalys som utförs på sådan detaljerad information, blir det därmed möjligt att ta hänsyn till att deponeringshål placeras i de lågkonduktiva områdena. En sådan lokal anpassning av förvaret, som skulle kunna leda till avsevärt förbättrad funktion, har inte genomförts i SR 97.

Det finns vidare relativt omfattande osäkerheter kring själva konduktivitetsvärdena för bergmassa och sprickzoner:

- Det finns alternativa möjligheter att dela in berget i sprickzoner och bergmassa (se ovan).
- Tolkningen av de olika hydrauliska test som använts för att ta fram konduktivitetsvärdena begränsas av förenklingar och antaganden.
- Det finns olika förklaringsmodeller av hur de högkonduktiva områdena i berget hänger ihop, vilket leder till osäkerheter om hur testresultat från en liten skala ska anpassas till beräkningar som utförs i en större skala.
- Den hydrauliska konduktiviteten kan tänkas vara riktning beroende.

Datarapporten diskuteras dessa osäkerheter relativt ingående.

I SR 97 hanteras osäkerheterna ovan främst genom att formulera och analysera ett antal alternativa tolkningar av den hydrauliska informationen. Dessutom studeras olika begreppsmodeller. Den resulterande osäkerheten i grundvattenströmningen beaktas därefter när data till beräkning av radionuklidtransport bestäms (se analysen av kapseldefektscenariot, kapitel 9).

### 6.5.5 Temperatur

#### *Initialt värde*

Värmeflödet vid 500 meters djup i svensk berggrund har sammanställts i Förvarssystemrapporten /efter Sundberg, 1995/ och baseras på information från ett sextiotal borrhål, företrädesvis djupa och borrade i samband med gruvprospektering, geotermisk prospektering eller vid SKB:s lokaliseringsstudier. Den geotermiska gradienten vid Aberg, Beberg och Ceberg redovisas i samma rapport.

#### *Osäkerheter*

Se diskussion i Ahlbom m fl /1995/.

### 6.5.6 Grundvattenflöde

#### *Initialt värde*

Grundvattenflödet bestäms av bergets vattenledande förmåga i kombination med den hydrauliska gradienten. En beskrivning av flödessituationen på platserna finns i den hydrauliska utvecklingen i basscenariot, avsnitt 8.7.2.

### 6.5.7 Grundvattentryck

Gradienten för grundvattnets tryckhöjd är den viktigaste drivande kraften för grundvattenströmningen; ju lägre gradient desto lägre grundvattenströmning. Storskaligt varierar gradienten inte lika mycket som bergets ledningsförmåga utan bestäms i hög grad av den topografiska variationen.

Naturlig gradient för de tre platserna i SR 97: Aberg 0,05–0,2 procent, Beberg 0,2–0,3 procent, Ceberg 0,5–0,6 procent på typiskt förvarsdjup /efter Walker m fl, 1997/.

### 6.5.8 Gasflöde

Gasflöden i förvaret hanteras kvalitativt. De halter av löst gas som förekommer naturligt i grundvattnet kan inte bilda en separat gasfas. Initialt kan gas som tillförts vid konstruktionen finnas i förvaret. Sådan gas förväntas lösas i grundvattnet och det är därför inte meningsfullt att tala om gasflöden initialt.

### 6.5.9 Bergspänningar

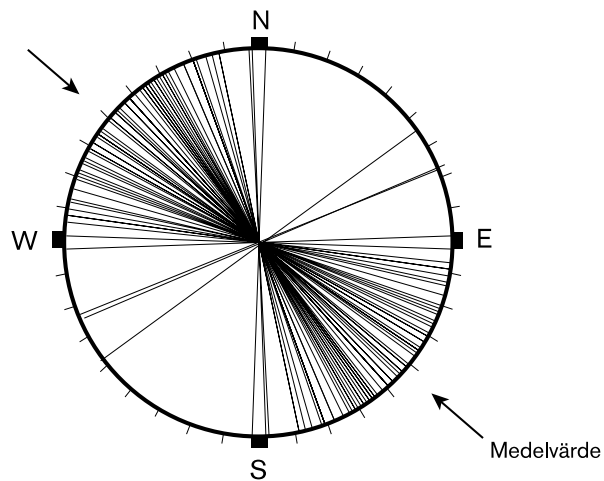
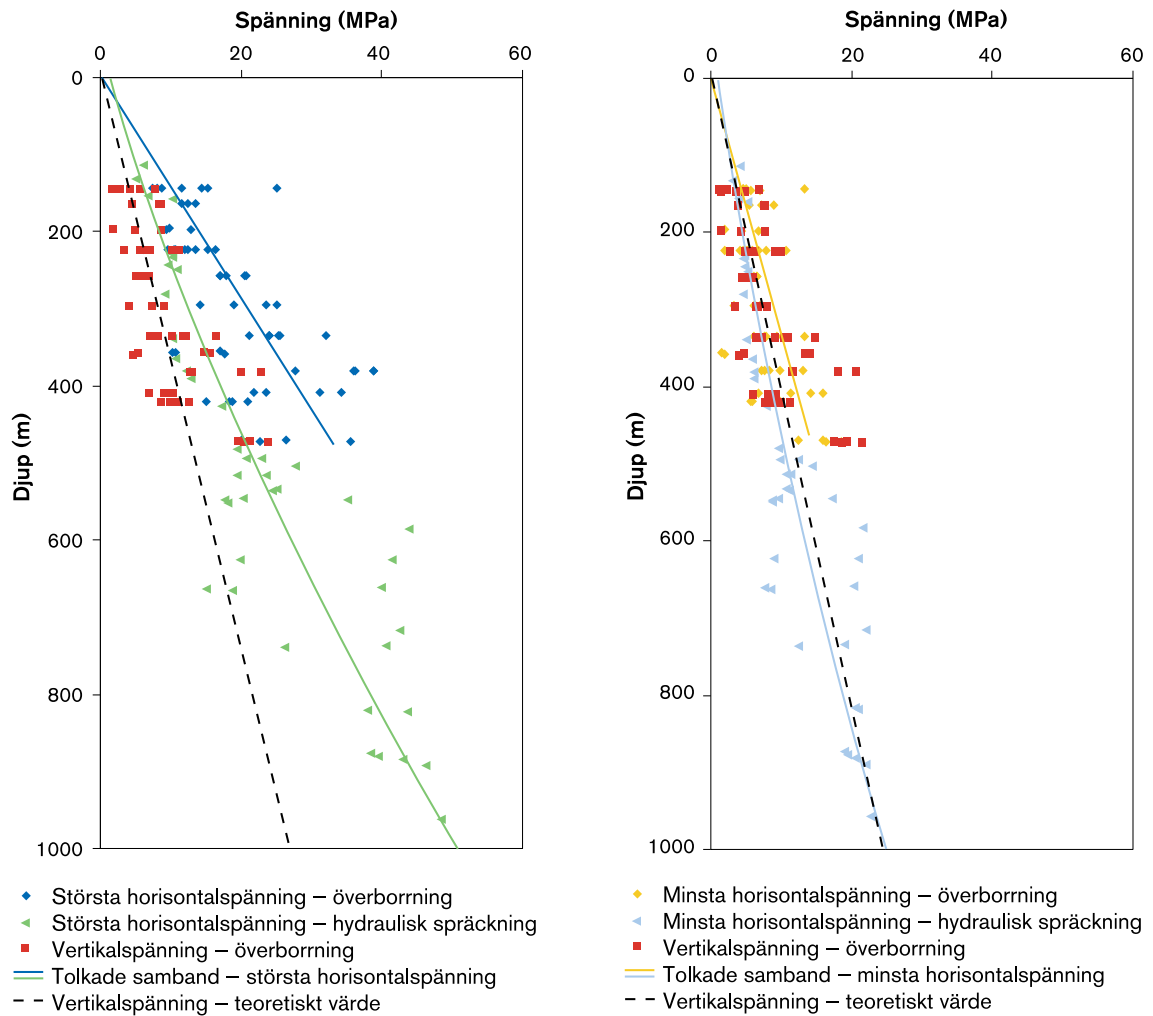
Det platsanknutna bergmekaniska dataunderlaget utgörs huvudsakligen av resultat från bergspänningsmätningar samt laboratoriebestämningar av deformations- och hållfasthets-egenskaper för borrhänsprover. I varierande utsträckning finns också resultat från bergteknisk klassificering att tillgå.

#### **Aberg**

Det bergmekaniska underlaget från Aberg skiljer sig från övriga platser i två avseenden. Det ena är den långt större omfattningen på undersökningar och data. Det andra, och viktigare, är att det från området finns tillgång till såväl data från borrhålsundersökningar som praktiska erfarenheter från utbyggnad och drift av en berganläggning.

Innan Äspölaboratoriet byggdes gjordes bergspänningsmätningar till som mest cirka 900 meters djup i tre nära vertikala borrhål /Bjarnason m fl, 1989/. Metoderna som användes var hydraulisk spräckning och överborrning. Mätningarna kompletterades med bergmekaniska laborietester av borrhänsor. I samband med utbyggnad och drift av anläggningen har sedan ytterligare mätningar gjorts, utslutande med överborrning, i ett flertal korta (upp till cirka 20 meter) borrhål på olika nivåer ner till som mest cirka 450 meters djup.

Sammantaget finns det alltså en stor mängd bergspänningsdata från Aberg. Figur 6-15 sammanfattar tillgängliga data. Av figuren framgår att spänningstillståndet i horisontalplanet genomgående är utpräglat anisotropt, dvs den största horisontalspänningen är avsevärt större än den minsta ( $\sigma_H \gg \sigma_h$ ). Värdena på  $\sigma_H$  är, liksom ökningstakten med djupet, något högre än genomsnittet för svenskt urberg, men kan inte sägas vara onormalt höga. Riktningen på största horisontalspänningen är med viss variation nordväst-sydostlig, oavsett djup. Detta stämmer väl överens med såväl mätningar i det näraliggande Laxemarområdet /Ljunggren och Klasson, 1997/ som trender i nationell skala /Stephansson m fl, 1991; Ljunggren och Persson, 1995/. Vertikalspänningen är avsevärt lägre än största horisontalspänningen och överensstämmer åtminstone genomsnittligt någorlunda väl med den litostatiska belastningen.

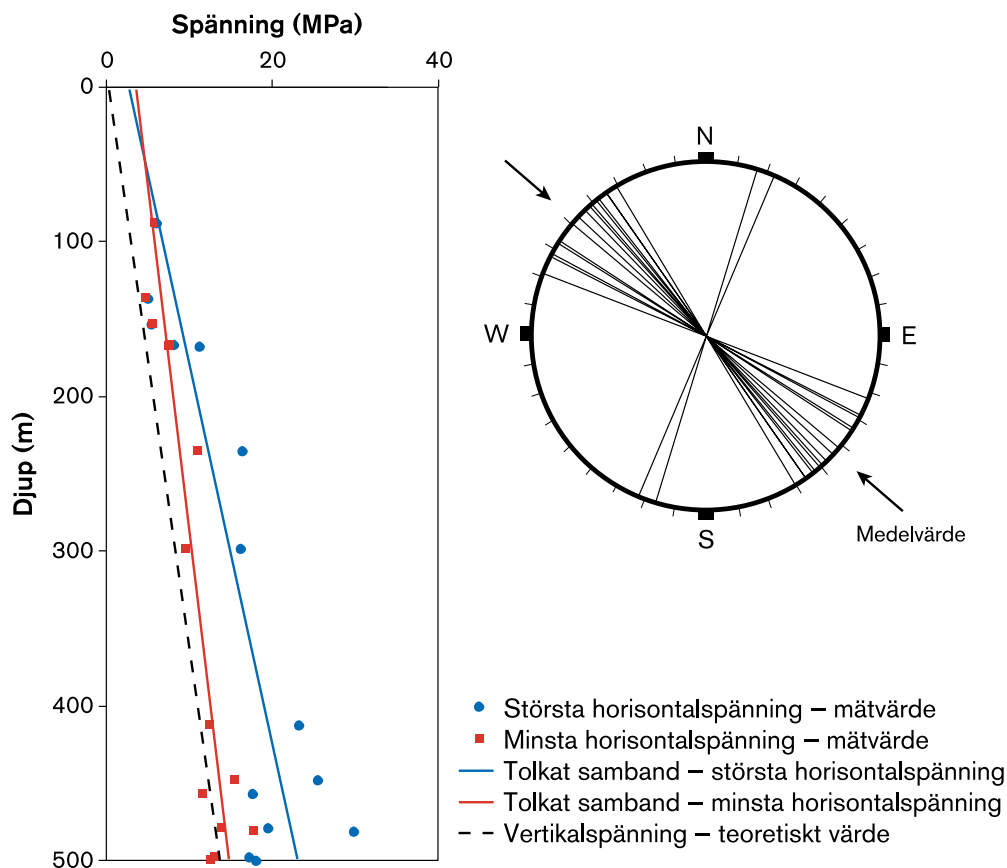


**Figur 6-15.** Bergspänningsituationen i Aberg. Belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella och vertikala spänningskomponenter. Största horisontalspänningsens riktning, i genomsnitt och för enskilda mätpunkter, visas också.

## Beberg

De bergmekaniska mätningar som gjorts vid Beberg är bergspänningsmätningar samt ett fåtal laborietester av kärnprover.

Bjarnason och Stephansson /1988/ redovisar bergspänningsmätningar i ett vertikalt borrhål. Mätningarna gjordes genom hydraulisk spräckning vilket innebär att resultaten är begränsade till spänningskomponenter i horisontalplanet. Resultaten redovisas i figur 6-16, och visar genomgående på en spänningssituation som är mycket typisk för svenskt urberg. Det innebär horisontalspänningar som är något högre än den teoretiska vertikalspänningen (litostatiska belastningen) och som ökar gradvis med djupet till belopp på 15–25 MPa på 500 meters djup. Största horisontalspänningen är orienterad i nordväst-sydöstlig riktning.



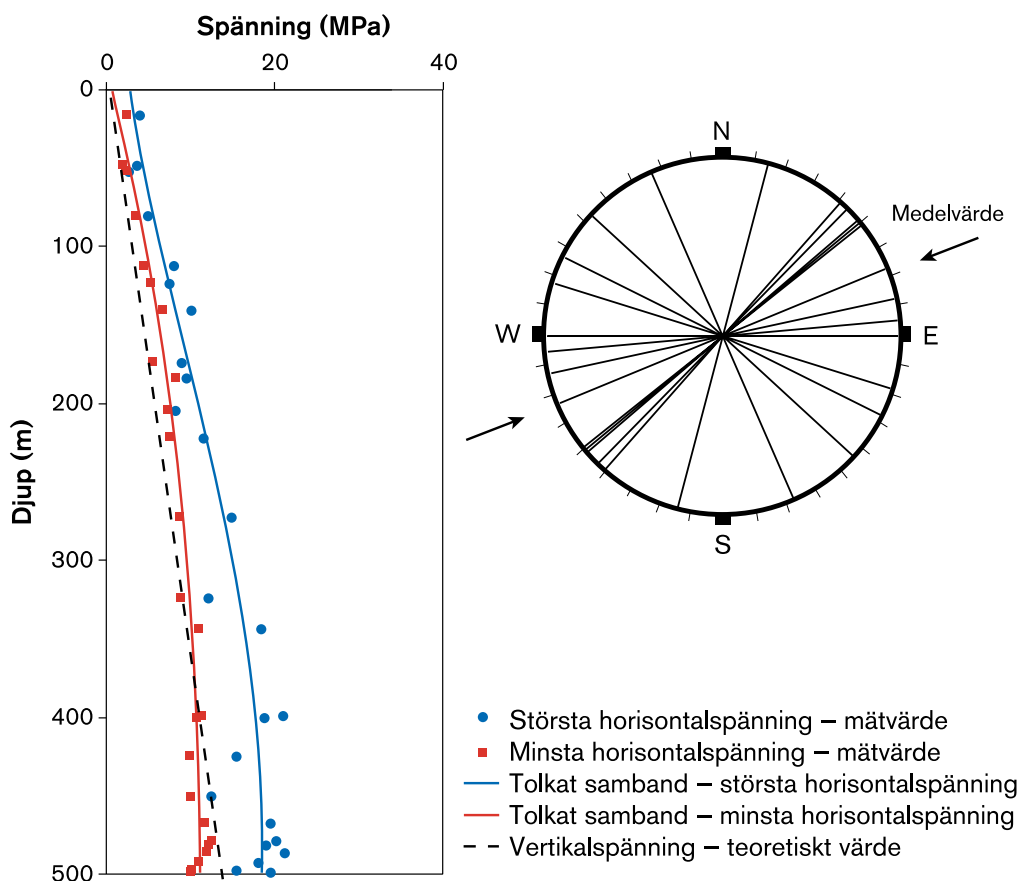
**Figur 6-16.** Bergspänningssituationen i Beberg. Till vänster belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella spänningskomponenter (teoretisk vertikalspänning visas som jämförelse). Till höger största horisontalspänningens riktning, i genomsnitt och för enskilda mätpunkter. Samtliga data från mätning med hydraulisk spräckning i ett vertikalt borrhål.

## Ceberg

Bergmekaniska data från Ceberg är av ungefär samma art och omfattning som från Beberg. Bergspänningsmätningar har gjorts i ett borrhål och laboratoriebestämningar av mekaniska egenskaper har gjorts på kärnprover från samma borrhål. Data sammanställs och redovisas av Ahlbom m fl /1991/.

Bergspänningsmätningarna gjordes med hydraulisk spräckning, från ytan och ner till cirka 500 meters djup, i ett nära vertikalt borrhål. Resultaten visas i figur 6-17. De uppmätta spänningsbeloppen är genomgående normala för svenskt urberg. Den minsta horisontalspänningen är till belopp och gradient jämförbar med den teoretiska vertikalspänningen. Data indikerar också att bergspänningarnas ökningstakt med djupet avtar under 300 meters djup, vilket är skälet till de tolkade sambanden i figur 6-17. Denna tolkning är emellertid osäker och finner inget uppenbart stöd i den geologiska informationen från Ceberg.

Riktningen på den största huvudspänningen är enligt figur 6-17 öst-västlig till nordost-sydvästlig, dock med stora variationer och utan tendenser till rotation med djupet. Detta avviker från den allmänna trenden med en dominerande nordväst-sydöstlig spänningsriktning. Sådana lokala avvikelser har noterats på många platser och är alltså



**Figur 6-17.** Bergspänningsituationen i Ceberg. Till vänster belopp som funktion av djup för uppmätta, horisontella spänningskomponenter (teoretisk vertikalspänning visas som jämförelse). Till höger största horisontalspänningens riktning, i genomsnitt och för enskilda mätpunkter. Samtliga data från mätning med hydraulisk spräckning i ett vertikalt borrhål.

inte ovanliga. Det kan inte uteslutas att riktningsbestämningarna innehåller betydande mätfel. Denna misstanke grundar sig på att bergarten uppvisar en brantstående foliation som kan ha påverkat sprickgenereringen vid hydraulisk spräckning, och därmed mätvärdena för spänningsriktningar.

### **Osäkerheter**

Bergspänningsmätningar ger punktvärden. Mätmetoderna för bergspänningar är mindre exakta än vad som är fallet för mekaniska egenskaper, samtidigt som den rumsliga variationen är större och svårare att koppla till geologin. Vid mätningar i bra berg och belastningsnivåer som är typiska för djup kring 500 meter brukar osäkerheten i enskilda mätningar som tumregel skattas till några tiotals procent. Osäkerheterna i kunskapen om bergspänningarna har störst betydelse för bedömning av hur djupförvaret bör konstrueras. Inverkan på den långsiktiga säkerheten är mindre väsentlig.

Allmänt gäller att de avgörande osäkerheterna sällan ligger i kunskapen om bergarternas mekaniska egenskaper eller i bergspänningarna, som enskilda komponenter. Den ligger istället i förståelsen för hur det mekaniska systemet bergmassa-hålrum kommer att uppföra sig under aktuella belastningar och i aktuell skala. Osäkerheterna brukar framför allt gälla bärförmågan hos bergmassan (inklusive sprickor och sprickzoner), deformationsmönster och eventuella brottmekanismer. Erfarenhetsåterföring från praktikfall är den huvudsakliga metoden för att reducera dessa osäkerheter. Osäkerheterna ökar därför markant i fall där det saknas tidigare ingenjörtillämpningar mot vilka prognoser och bedömningar kan avstämmas. Så är delvis fallet för de bergmekaniska bedömningar som blir aktuella i samband med funktions- och säkerhetsanalyser av djupförvaret, huvudsakligen därför att dessa involverar tidsrymder som vida överstiger erfarenhetsbasens. De långsiktiga bergmekaniska förändringarna diskuteras därför ingående i basscenariot (kapitel 8) och i de olika scenarier som innebär att den mekaniska omgivningen förändras (klimat- och tektonikscenarier).

### **6.5.10 Matrismineral**

Samtliga platser utgör exempel på svensk kristallin berggrund men av olika karaktär. En utförlig bergartsbeskrivning ges i Förvarssystemrapporten.

Vid Aberg domineras berget av fyra typer av bergarter, Ävrögranit (Smålandsgranit), Äspödiorit, grönsten och finkornig granit. Både Äspödiorit och Ävrögranit kan ses som varianter av Smålandsgranit /Kornfält och Wikman, 1988; Wikman och Kornfält, 1995/. Äspödioriten är åldersbestämmd till cirka 1 800 miljoner år och dominerar bergartsfördelningen jämfört med den något yngre Ävrögraniten. Äspödioriten har en något mera basisk karaktär än Ävrögraniten och är vanligtvis grå till gråröd.

Berggrunden vid Beberg domineras av en grå granodiorit med ett djupgående på minst 700 meter (djupaste borrhålet). Granodioriten har en brant stående nordvästlig foliation. Gångar av basiska bergarter, pegmatiter och apliter skär igenom granodioriten. Äldre omvandlade sura vulkaniter förekommer väster och söder om området. Basiska bergarter förekommer som utdragna brottstycken längs med foliationen.

Ceberg domineras av sedimentär gnejs (metagråvacka) samt partier av äldre granit. Genom denna berggrund skär vertikala öst-västliga diabasgångar som kan vara upp till 15 meter breda. Tjockare lagergångar av diabas har troligen tidigare överlagrat platsen. Även om inga lagergångar har påträffats ner till 700 meters djup utesluter Saksa och Nummela /1998/ inte att sådana kan finnas på större djup.



## **Osäkerheter**

Det exakta läget och gränserna för de olika bergarterna är endast delvis kända. För geosfärens fördröjande funktion spelar det mindre roll vilken bergart som dominerar. Sorptionsbenägenheten varierar betydligt mer med t ex pH- och Eh-förändringar än med bergarterna. Också bergets vittrings- och omvandlingsgrad har viss men inte avgörande betydelse för sorptionen /Carbol och Engkvist, 1997/.

### **6.5.11 Sprickmineral**

#### **Initialt värde**

Vid Aberg är spricksystemet uppdelat i fyra sprickgrupper med brant stående sprickor i västnordvästlig, nordnordvästlig och nordsydlig riktning samt ett flackt liggande spricksystem. Sprickväggarna är ofta rödfärgade av tidigare hydrotermala lösningar. Mineralfyllningar består mest av kalcit och klorit som finns i alla sprickgrupper, men även kvarts, epidot, fluorit, hematit/FeOOH, adularia och pyrit förekommer. Lermineral av illit, smektit och blandskikt förekommer i mindre mängd i sprickor och sprickzoner.

Vid Beberg är nordostliga sprickor de mest frekvent förekommande. Sprickväggarna är ofta rödfärgade av tidigare hydrotermala lösningar och fyllda med järnrik phrenit. Den nordvästliga sprickgruppen är äldre än den nordöstliga och har bildats genom en reaktivering av tidiga plastiska strukturer och är de längsta sprickorna i området. Kärnan från zon 1 (Brändan) kännetecknas av omvandlad, rödfärgad granodiorit med sprickfyllnader av hydroxider och hematit.

Vid Ceberg dominerar nordsydliga och nordvästliga sprickor. Horisontella-subhorisontella sprickor är mer frekventa här än vid de andra platserna. De vanligast förekommande sprickmineralen vid Ceberg är kalcit, klorit, laumontit, pyrit och lermineralen smektit, illit och bergbeck. Både sprickzoner och diabasgångar innehåller vanligen leromvandlade sektioner.

## **Osäkerheter**

Erfarenheter från tunneln och senare borrhning med dubbla borrhör (s k triple tube-teknik) har visat att andelen löst sittande material (inklusive lermineral) i sprickorna vid Aberg har underskattats vid karteringen av de konventionellt borrhade borrhörarna, eftersom detta material då har spolats bort. En underskattning av andelen löst material i sprickorna leder t ex till att mängden material som kan sorbera och fördröja nuklider är större än vad som beräknas baserat på de konventionella borrhörarna. Detta kan vara fallet även vid Beberg och Ceberg där endast konventionellt borrhade borrhörar är tillgängliga. I säkerhetsanalysen försummas dock den fördröjning som uppstår på grund av sorption på sprickmineralen.

### **6.5.12 Grundvattensammansättning**

Den grundvattenkemiska beskrivningen för de tre platserna sammanfattas av Laaksoharju m fl /1998/. Det naturliga, ostörda grundvattnets sammansättning representeras av prover tagna ur fyra borrhål, ett från Aberg, två från Beberg och ett från Ceberg. Proverna täcker väl in de olika typer av grundvattensammansättning som uppmätts på andra platser i Sverige. Referensvattenprovernas kemiska sammansättning framgår i detalj av tabeller i avsnitt 8.9.2, där grundvattensammansättningens utveckling på sikt diskuteras.

För Aberg visar referensvattenprovet på ett salt, kalkfattigt och sulfatrikt vatten. Kloridfördelningen kan förklaras av en komplex blandning av vatten med olika ursprung. Referensvattenproven från Beberg visar dels ett salt, kalkfattigt och sulfatrikt vatten, dels ett kalkrikt, klorid- och sulfatfattigt sötvatten. För Ceberg visar referensvattenproven på ett kalkfattigt och sulfatfattigt sötvatten.

Omedelbart efter konstruktionen av förvaret kommer grundvattnets kemiska sammansättning att påverkas av konstruktions- och strömmaterial från byggnationen samt av syre som tillförs då förvaret är öppet. Detta diskuteras vidare i basscenariot, avsnitt 8.9.2.

### **Osäkerheter**

Osäkerheterna i den grundvattenkemiska beskrivningen innefattar dels mätosäkerheter och provtagningsfel, dels representativitet hos vattenproven och variabilitet över rummet.

Enligt Laaksoharju m fl /1998/ representerar referensvattenproverna ett typiskt vatten från varje plats på förvarsnivå ( $500 \pm 100$  meters djup). De olika grundvattenproven från platserna har kraftigt varierande sammansättningar, med salt, kalkfattigt och sulfatrikt vatten i Aberg, klorid- och sulfatfattigt samt kalkrikt vatten i Beberg och kalk- och sulfatfattigt vatten i Ceberg.

Enligt Datarapporten är det rimligt att anta att osäkerheten i grundvattensammansättningen, både dess rumsliga variationer och den framtida utvecklingen, i stort sett begränsas av den variation som finns mellan sammansättningarna hos de fyra referensgrundvattnen.

### **6.5.13 Gassammansättning**

Förekomster av gas diskuteras kort i kemisk utveckling i basscenariot, avsnitt 8.9.2.

### **6.5.14 Konstruktions- och strömmaterial**

#### **Initialt värde**

Under byggandet kommer främmande material att föras ned i djupförvaret. Under driftperioden förekommer olika tillfälliga och ibland permanenta konstruktioner av bl a betong och stål, vilket innebär ytterligare tillförsel av främmande material. Innan kapslar börjar deponeras bortförs i möjligaste mån material som inte är nödvändigt ur stabilitets- eller säkerhetssynpunkt.

Mängderna främmande material som tillförs under byggnads- och drifttiden har uppskattats av Larsson m fl /1997/. Med hjälp av denna utredning och antaganden om den kemiska sammansättningen hos de främmande materialen har Jones m fl /1999/ gjort en sammanställning av mängderna av olika specifika ämnen i förvaret, tabell 6-10. En bedömning av dessa ämnens påverkan på förvarets säkerhet har också gjorts. Mängden främmande ämnen jämförs med förekomsten i de material som naturligt finns i förvaret, dvs kapsel, buffertmaterial, återfyllningsmaterial samt ämnen som är lösta i grundvatten.

**Tabell 6-10. Beräknade maximala mängder ämnen från främmande material i olika delar av förvaret. Deponeringshål avser kapsel och buffert, kapselposition avser deponeringshål samt 6 m deponeringstunnel, driftgata avser 40 m tunnallengd i den tunnel där deponeringstunnlarna mynnar.**

Ämne	Deponeringshål (kg)	Kapselposition (kg)	Driftgata (kg)
Kolhydrater	1,5	4,5	940
Kolväten	15	35	940
Ytaktiva ämnen	1	2,5	50
Kväve	0,19	0,48	86
Svavel	0,06	0,18	13
Fosfat	0,06	0,22	35
K <sub>2</sub> O	6,7	22	390
CaO	730	2 400	41 000
Na <sub>2</sub> O	1,3	4,8	80
FeO	1	1,5	450
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53	175	3 000
SiO <sub>2</sub>	250	850	14 500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41	140	2 300
Metaller	67	430	7 300

### **Osäkerheter**

Osäkerheterna vid uppskattningarna av tillförseln är stora. Jones m fl /1999/ konstaterar dock att andelen främmande ämnen som tillförs vid byggande och drift är mycket liten jämfört med de mängder som tillförs med buffert- och återfyllningsmaterial. Osäkerheterna har därför liten betydelse för säkerhetsanalysen.

Ett undantag är förekomsten av kalcium i deponeringshålen. Om botten på hålen avjämnas med betong, kan under vissa antaganden om avjämnings tjocklek, kalciummängden i deponeringshålen fördubblas relativt kalciuminnehållet i buffertmaterialet.

## **6.6 Biosfären**

I det följande ges sammanfattande beskrivningar av biosfären vid Aberg, Beberg och Ceberg. Fullständig beskrivning återfinns i Lindborg och Schüldt /1998/, om inget annat anges i texten.

### **6.6.1 Aberg**

**Topografi, vattendrag och marktyper:** Aberg ligger i kustområdet med omgivande skärgård. Den topografiska reliefen varierar från -21 till +15 meter över havet och karakteriseras som ett sprickdalslandskap. En stor del av området har öppna vattenytor som utgörs av fjärdarna. Avrinningen sker huvudsakligen till fjärdarna. Det finns en stor andel hållar i Aberg och avlagringarna i sänkorna är tunna (0-5 meter). Avlagringarna domineras av svallad blockig morän som kan överlagras med tunna sand- och lerlager. Andelen mullrika jordar är stor och det förekommer fläckvis tunna torvlager. I vikarna är moränen överlagrad med gyttja. Det finns ingen modern karta över de lösa avlagringarna i Aberg.

**Dominerande ekosystem:** De öppna vattenytorna som fjärdarna utgör en stor andel av den totala ytan. I Aberg's modellområde är ungefär halva totalarealen vatten. Markvegetationen i Aberg domineras av skogsmark som utgör cirka 40 procent i Aberg's modellområde. Resterande yta är våtmarker samt en mindre andel jordbruksmark.

**De akvatiska ekosystemen** i Aberg består av grunda fjärdar med riklig vegetation av vass och mjuka sedimentbottnar som går upp nära till ytan där ibland hållar förekommer. På grund av den låga salthalten dominerar troligen sötvattensvegetation, djurlivet i fjärdarna domineras troligen av sötvattensfauna med diverse insektslarver i sedimenten. Möjligen kan det finnas bestånd av Östersjömusslor i mjukbottnarna. Fiskpopulationen utgörs troligen enbart av sötvattensfisk som abborre och gädda.

**Skogen** domineras av tallskog, med stora inslag av ekskog och andra lövträd. Undervegetationen är ofta gräs där det finns ett jordtäck. Skogen har låg produktivitet och rotationstiden för skogen är lång, cirka 100 år.

**Öppen mark** som jordbruk eller ängsmark utgör cirka sju procent av markarean i regionen. Ängsmark/betesmark utgör huvuddelen av den öppna marken. Då jordbruket och kreatursbetet minskat kraftigt de senaste åren pågår en igenväxning av forna jordbruksmarker, ängsmarker och hagar.

**Våtmarkerna** utgör en stor andel av markytan men är i allmänhet små kärr och mossar som är omgiven av riklig lövvegetation, t ex al.

**Djurlivet** är något artrikare än på de andra platserna beroende på blandningen av mark och vattenekosystem, men uttaget av vilt är måttligt i området.

## 6.6.2 Beberg

**Topografi, vattendrag och marktyper:** Beberg ligger mer än 10 km från kusten. Området är flackt och den topografiska reliefen varierar mellan 20 och 44 meter över havet. Den sydvästra delen av området avgränsas av en större sjö, Finnsjön, och det finns en del mindre vattendrag i området. Området ligger i Forsmarksåns avrinningsområde. Det är välundersökt och det finns en modern jordartskarta. Området ligger under högsta kustlinjen och har svallad morän som är överlagrad med sandlager i sänkorna. Avlagringarnas mäktigheter är som mest fem meter. Det förekommer isälvsavlagringar i de centrala delarna och glaciärrer i sänkor som täcks av sand eller torvmark. Marken är delvis täckt av torv upp till fyra meters tjocklek. Hållar utgör cirka 15 procent av ytan. Det finns rikligt med kalkhaltiga block och avlagringar som transporterats från Bottenhavet av inlandsisen.

**Dominerande ekosystem:** Skogsmark dominerar totalarealen i Beberg. I modellområdet utgör den 60 procent jämfört med 25 procent jordbruksmark samt 15 procent torvmark. I hela regionen utgör sjöar cirka 10 procent av totalarean.

**Skogen** domineras av tallskog men det finns också en stor andel gran och en del lövträd. Undervegetationen är blåbärsris och lingonris omväxlande på hållmark och våtmarker. Undervegetationen kan delvis vara artrik på grund av de kalkrika avlagringarna i området. Skogbruket ger stora kalhyggen och rikligt med ungskog. Rotationstiden är cirka 85 år med en god avkastning.

Drygt hälften av **den öppna marken** brukas medan resterande del utgör ängs- och betesmark. De senaste 50 åren har cirka en tredjedel av den brukade marken övergått till ängsmark i regionen. Mindre produktiv ängsmark har planterats med skog.

**Våtmarkerna** i området utgörs av utsträckta kärr, mossar och gungflyn. Flera är kalkrika med rikkärrsvegetation. Många våtmarker har de senaste seklerna dikats ut för att producera åkrar och ängar.

**Sjöarna och vattendragen** i angränsning till området är måttligt näringsrika brunvatten och har en för området god fiskproduktion av vanliga insjöarter. Sjöarna och vattendragen har varit utsatta för omfattande regleringar de senaste seklerna /Brunberg och Blomqvist, 1998/.

**Djurlivet** är rikligt i området med en stor artrikedom av fågel. Uttaget av vilt i området är högst av alla platserna med t ex 100 kg älgkött/km<sup>2</sup>.

### 6.6.3 Ceberg

**Topografi, vattendrag och marktyper:** Ceberg ligger mer än 5 km från kusten. Området ligger i bergkullsterräng med topografisk relief mellan 80 och 130 meter över havet. Området genomströmmas av två älvar och det finns tre mindre sjöar. Området är välundersökt och detaljerade studier är utförda på flera platser, det finns dock ingen modern jordartskarta. Området ligger under högsta kustlinjen och avlagringarna domineras av svallad morän som överlagras av sand och mo i sänkorna. Stora områden är täckta av utsträckta torvmarker. Två större sammanhängande torvmossar finns i områdets östra del. Mäktigheterna är mellan 1,5 och 4,5 meter. Förutom torvmarker finns det podzoljordar. De västra delarna av området har en stor andel hållar där sänkorna täcks av våtmarker.

**Dominerande ekosystem:** I regionen är skogsmark det dominerande ekosystemet, den utgör 75 procent av ytan. Öppen mark, sjöar, och våtmarker fördelar jämt över resterande yta. I modellområdet dominerar torvmarker (48 procent) något över skogen (41 procent) medan jordbruksmark utgör cirka fyra procent av ytan och vattendragen cirka åtta procent.

**Skogen** är till största delen barrskog som utgörs av lika delar tall och gran samt en mindre andel av lövträd (15 procent). Skogens produktivitet är måttlig och rotationstiden är cirka 90 år. Undervegetationen utgörs av blåbärsris till stora delar. Skogsbruket är intensivt med stora kalhyggen i området.

**Våtmarkerna** består av två stora områden av torvmossar i de östra delarna samt rikligt med kärr och mossar mellan skogspartier. Flera våtmarker har dikats ut för att öka skogsproduktionen. Torvmossarna har dikats för att kunna bryta torv. Den öppna marken är koncentrerad till Gideälven och används huvudsakligen som ängsmark.

**Lax och öring** har återinförts i området och sportfisket är omfattande i Gideälven och Husaån som har rikligt med fisk. De småsjöar som finns i området är näringsfattiga.

Rikedomen av **djurarter** är något lägre i detta område jämfört med Aberg och Beberg. Uttaget av vilt är också det lägsta jämfört de andra områdena, t ex 40 kg älgkött/km<sup>2</sup>.

## 6.7 Referenser

- Ageskog L, Jansson P, 1999.** Heat propagation in and around the deep repository. Thermal calculations applied to three hypothetical sites: Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Albino B, Carlsson L, Nilsson G, Olsson O, Stenberg L, Timje H, 1983.** Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gideå. SKBF/KBS TR 83-53. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avd KBS.
- Ahlbom K, Tirén S, 1991.** Overview of geological and geohydrologic conditions at the Finnsjön site and its surroundings. SKB TR 91-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ahlbom K, Andersson J-E, Nordquist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1991.** Gideå study site. Scope of activities and main results. SKB TR 91-51. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Ahlbom K, Olsson O, Sehlstedt S, 1995.** Temperature conditions in the SKB study sites. SKB TR 95-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J-E, Nordquist R, Nyberg G, Smellie J, Tirén S, 1991.** Hydrogeological conditions in the Finnsjön area. Compilation of data and conceptual model. SKB TR 91-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson P, 1994.** Skadezon vid tunneldrivning. SveBeFo Rapport 8. SveBeFo, Stockholm.
- Askling P, 1997.** Gideå lineament map. An interpretation based on elevation data models. SKB PR U-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bjarnason B, Klasson H, Leijon B, Strindell L, Öhman T, 1989.** Rock stress measurements in boreholes KAS02, KAS03 and KAS05 on Äspö. SKB HRL PR 25-89-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bjarnason B, Stephansson O, 1988.** Hydraulic fracturing stress measurements in borehole FI-6, Finnsjön study site, central Sweden. SKB AR 88-54. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bjurström H, Bruce A, 1997.** Temperaturer i en kapsel enligt TR-95-02, en första uppskattning. SKB Inkapsling PPM 97-3420-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bjurström H, Bruce A, 1998.** Temperaturer i en kapsel enligt TR-95-02, etapp 2. SKB Inkapsling PPM 98-3420-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brunberg A-K, Blomqvist P, 1998.** Vatten i Uppsala län 1997 – Beskrivning, utvärdering, åtgärdsförslag. Rapport nr 8/1998. Upplandsstiftelsen, Uppsala.

- Bäckblom G, 1996.** Preliminär utformning av djupförvarets närområde. SKB AR D-96-011. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Pusch R, Fredriksson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T, 1992.** Final report of the rock sealing project – Identification of zones disturbed by blasting and stress release. Stripa TR 92-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carbol P, Engkvist I, 1997.** Compilation of radionuclide sorption coefficients for performance assessment. SKB R-97-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997.** ZEDEX – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR 97-30. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksen T, Eklund U-B, Werme L, Bruno J, 1995.** J. Nucl. Mat. 227, pp 76–82.
- Hedin A, 1997.** Använt kärnbränsle – hur farligt är det? En delrapport från projektet ”Beskrivning av risk”. SKB R-97-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hermanson J, Mærsk Hansen L, Follin S, 1997.** Update of the geological models of the Gideå study site. SKB R-97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Håkansson R, 1996.** Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. NR-96/079, Studsvik Nuclear AB, Nyköping.
- Håkansson R, 1999.** Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jones C, Christiansson Å, Wiborgh M, 1999.** Främmande material i ett djupförvar för använt kärnbränsle. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johnsson L H, Tait J C, 1997.** Release of segregated nuclides from spent fuel. SKB TR 97-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kornfält K-A, Wikman H, 1988.** The rocks of the Äspö Island. Description to the detailed maps of solid rocks including maps of 3 uncovered trenches. SKB PR 25-88-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Gurban I, Skärman C, 1998.** Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR 98-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Larsson H, Kenne A, Edelsvärd C, 1997.** Främmande material i djupförvar. Tillförsel och fördelning i deponeringsområdena för kapslar. SKB PR D-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Leggatt R H, 1995.** Measurements of residual stresses in copper canisters. SKB Inkapsling PPM 96-3420-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lindborg T, Schöldt R, 1998.** The biosphere at Aberg, Beberg and Ceberg – a description based on literature concerning climate, physical geography, ecology, land use and environment.  
SKB TR-98-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lindgren L-E, Häggblad H-Å, Josefson L, Karlsson L, 1999.** Thermo-mechanical FE-analysis of residual stresses and stress redistribution in butt welding of a copper canister for spent nuclear fuel. Presented at the Int Conf on Structural Mechanics in Reactor Technology. SmiRT-15, Seoul, Korea, Aug 15–20.

**Ljunggren C, Klasson H, 1997.** Drilling KLX02 – Phase 2, Lilla Laxemar, Oskarshamn. Deep hydraulic fracturing rock stress measurements in borehole KLX02, Laxemar.  
SKB PR U-97-27. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ljunggren C, Persson M, 1995.** Beskrivning av databas – Bergspänningsmätningar i Sverige.  
SKB PR D-95-017. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Lundgren K, 1997.** Kontroll av strålskämsberäkningar för kopparkapsel.  
ALARA Engineering Rapport 97-0028R (Rev 1).

**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.

**Müller-Vonmoos M, Kahr G, 1983.** Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel.  
NAGRA Technischer Bericht NTB 83-12, NAGRA, Switzerland.

**Olkiewicz A, Arnefors J, 1981.** Berggrundsbeskrivning av undersökningsområdet vid Finnsjön i norra Uppland.  
SKBF/KBS AR 81-35. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avd KBS.

**Pusch R, Stanfors R, 1992.** Disturbance of rock around blasted tunnels. Int J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 29(1992):5, 447–456.

**Rhén I (ed), Bäckblom G (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997a.** Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Summary report.  
SKB TR 97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997b.** Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995.  
SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Saksa P, Nummela J, 1998.** Geological-structural models used in SR 97. Uncertainty analysis.  
SKB TR-98-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**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.



- SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avd KBS.
- Sjöblom R, 1998.** Främmande material i bentonit. SKB R-98-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stanfors R, Olsson P, Stille H, 1997.** Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/3. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of predictions and observations. Geology and mechanical stability. SKB TR 97-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, Ljunggren C, Jing L, 1991.** Stress measurements and tectonic implications for Scandinavia. Tectonophysics, Vol 189, No 1/4 pp 317–322.
- Sundberg J, 1995.** Termiska egenskaper för kristallint berg i Sverige. Kartor över värmekonduktivitet, värmeflöde, och temperatur på 500 meters djup. SKB PR D-95-018. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Söderholm H, Müllern C, Engqvist P, 1983.** SGU Serie Ah Hydrogeologiska översigtskartor i skala 1:250 000 Nr 5. Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Uppsala län. Berggrundskarta och Hydrogeologisk karta över Uppsala län.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wikman H, Kornfält K-A, 1995.** Updating of a lithological model of the bedrock of the Äspö area. SKB HRL PR 25-95-04. Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 7 Val av scenarier

### 7.1 Inledning

Ett scenario definieras som den utveckling förvarssystemet genomgår givet ett initialtillstånd och specificerade förhållanden i omgivningen. Tillsammans bör de valda scenarierna ge en rimlig täckning av de olika utvecklingar förvaret och dess omgivning kan tänkas genomgå.

Följande scenarier har valts för SR 97:

- Ett basscenario där förvaret tänks vara byggt enligt specifikation och där dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå.
- Ett kapseldefektsscenario som skiljer sig från basscenarioet genom att ett fåtal kapslar tänks vara behäftade med initiala skador.
- Ett klimatscenario som behandlar framtida klimatförändringar.
- Ett tektonik/jordkalvsscenario.
- Ett samlingsscenario som behandlar framtida mänskliga handlingar som kan tänkas påverka djupförvaret.

Figur 7-1 visar översiktligt de olika scenarierna. Förutsättningarna för scenarierna beskrivs närmare i avsnitt 7.2 och mer detaljerat i de olika kapitlen (8–12) där de valda scenarierna analyseras.

Valet är en expertbedömning av vilka förhållanden initialt och i omgivningen som är viktiga att belysa i en säkerhetsanalys. Valet av scenarier i SR 97 baseras på systembeskrivningen och erfarenheter från tidigare arbete. Fullständigheten i scenarievalet diskuteras i avsnitt 7.3 nedan.

## Basscenario

Bränsle	Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel	Buffert/Återfyllning	Geosfär	Omgivning
Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dagens klimat består</li> <li>• Pågående landhöjning</li> <li>• Dagens biosfär, påverkad av landhöjning</li> <li>• Inga jordskalv</li> <li>• Inga mänskliga intrång</li> </ul>

## Kapseldefektscenario

Bränsle	Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel	Buffert/Återfyllning	Geosfär	Omgivning
Initialt: • Ett fåtal kapslar har tillverkningsfel  • Förvaret i övrigt byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Som basscenariot</li> </ul>

## Klimatscenario

Bränsle	Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel	Buffert/Återfyllning	Geosfär	Omgivning
Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg  Variant: • Ett fåtal kapslar har tillverkningsfel				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimatförändringar</li> <li>• Klimatpåverkad biosfär</li> <li>• I övrigt som basscenariot</li> </ul>

## Tektonik/jordskalvsscenario

Bränsle	Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel	Buffert/Återfyllning	Geosfär	Omgivning
Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jordskalv</li> <li>• I övrigt som basscenariot</li> </ul>

## Intrångsscenario

Bränsle	Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel	Buffert/Återfyllning	Geosfär	Omgivning
Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mänskliga intrång</li> <li>• I övrigt som basscenariot</li> </ul>

**Figur 7-1.** De olika scenarierna i SR 97.

## 7.2 Förutsättningar för valda scenarier

### 7.2.1 Basscenariot

För basscenariot gäller initialtillståndet att alla kapslar postuleras vara tillverkade och förslutna utan defekter. Förvaret i övrigt är byggt enligt specifikationer enligt beskrivningen i kapitel 6.

För omgivningen antas följande:

- Dagens klimatförhållanden antas råda framgent.
- Landhöjning och den inverkan detta har på framför allt biosfären inkluderas i basscenariot. Inverkan på grundvattenflödet diskuteras översiktligt.
- 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 i basscenariot.
- Inga mänskliga intrång förekommer.

I SR 97 utgör basscenariot en jämförelsegrund för övriga scenarier. Dagens klimat antas råda trots att det är känt att klimatet varierar långsiktigt. En annan möjlighet vore att inkludera framtida klimatförändringar i basscenariot i strävan efter en mer realistisk jämförelsegrund. Detta har av följande skäl inte gjorts i SR 97:

- Det råder idag inte enighet bland forskare och experter om vilka klimatförändringar som är att förvänta. Detta gäller inte bara den omdebatterade växthuseffekten. Även bedömningar om tidpunkt för och framför allt omfattning av kommande perioder av kallare klimat är osäkra.
- Det är relativt enkelt att beskriva den påverkan dagens klimat har på förvarssystemet. Därmed hamnar fokus i basscenariot på förvarets inre utveckling. Detta ger en gradvis uppbyggnad av komplexiteten i analysen av förvarets utveckling: Först analyseras utvecklingen för enkla randförhållanden i basscenariot och sedan för mer komplexa i klimatscenariot. Det bör dels ge en pedagogisk vinst, dels möjliggöra en tydligare bedömning av vilka inre och yttre förhållanden som kan störa funktionen efter att övriga scenarier analyserats.

Ett annat skäl att låta dagens klimat utgöra randförhållanden för basscenariot är att SSI:s föreskrifter explicit anger att redovisningen av säkerheten ska omfatta ett fall där biosfärsförhållandena inte ändras. Det finns däremot inget som i princip hindrar att klimatförändringar (eller andra förändringar i omgivningsfaktorer) inkluderas i basscenariot.

Basscenariot beskrivs och analyseras i kapitel 8.

## 7.2.2 Kapseldefektscenariot

I kapseldefektscenariot antas förvarets initiala tillstånd vara detsamma som i basscenariot förutom att ett fåtal kapslar antas ha initiala skador till följd av tillverkningsfel. Omgivningsförhållandena är desamma som i basscenariot. Tyngdpunkten i analysen ligger på utvecklingen i de initialt skadade kapslarna, på en detaljerad beskrivning av den hydrauliska situationen i geosfären samt på beräkningar av radionuklidtransport.

Kapseldefektscenariot analyseras i kapitel 9. Där diskuteras också sannolikhet för och omfattning av initiala kapselskador.

## 7.2.3 Klimatscenariot

I klimatscenariot analyseras de omgivningsförändringar som inträffar på grund av förväntade klimatförändringar i ett hundrausenårigt perspektiv. Övriga förhållanden antas vara desamma som för basscenariot. Förvarets utveckling jämförs med den i basscenariot. Konsekvenser av initiala kapselskador analyseras som en jämförelse med kapseldefektscenariot.

Klimatscenariot beskrivs och analyseras i kapitel 10.

## 7.2.4 Tektonik/jordskalvsscenario

I tektonik/jordskalvsscenario analyseras effekterna av seismiska förändringar i omgivningen. Övriga förhållanden antas vara desamma som i basscenariot. Sannolikheten för olika seismiska händelser och konsekvenser i form av bergrörelser kring deponeringshål analyseras inom scenariot.

Scenariot beskrivs och analyseras i kapitel 11.

## 7.2.5 Scenarier baserade på mänskliga handlingar

Listan över mänskliga handlingar som påverkar förhållandena på en förvaringsplats kan göras i det närmaste oändligt lång. På grund av att 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,
- handlingar som genomförs utan kännedom om förvarets och/eller dess funktion och syfte, dvs oavsiktliga handlingar utan uppsåt.

Initialtillstånd och övriga omgivningsförhållanden antas vara desamma som för basscenariot. Vad gäller påverkan på radionuklidtransporten antas samma förutsättningar gälla som i kapseldefektscenariot.

Scenariot beskrivs och analyseras i kapitel 12.

## 7.3 Fullständighet/täckningsgrad i scenariovalet

Liksom det inte går att bevisa att systembeskrivningen är fullständig (se avsnitt 5.8) är det omöjligt att bevisa att alla tillstånd i omgivningen som kan påverka förvaret har identifierats. Tilltron till att scenariernas gemensamma täckning är tillräcklig för att analysera djupförvarets säkerhet måste istället bedömas.

Viktiga åtgärder för att nå fullständighet i scenariovalet är att:

- för varje process i systembeskrivningen ställa frågan om denna direkt kan påverkas av det initiala tillståndet eller den yttre omgivningen,
- för varje variabel i systembeskrivningen bedöma huruvida osäkerheter i det initiala värdet föranleder val av specifika scenarier eller varianter,
- systematiskt dokumentera de omgivningsförhållanden som över tiden identifierats som viktiga för förvarets utveckling,
- jämföra med databaser upprättade av andra organisationer och inom internationella samarbeten.

Scenariovalet i SR 97 baseras i princip på alla dessa punkter. Valet baseras på systembeskrivningen och erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser av SKB och andra organisationer.

### 7.3.1 Analys baserad på systembeskrivningen

Som nämnts i kapitel 4 har systembeskrivningen utvecklats under arbetet med SR 97 och har därför inte hunnit utnyttjas fullt ut till ett nytt, genomgripande scenarioval. Beskrivningen har använts för att systematisera beskrivningarna av initialtillståndet som en uppsättning variabler och växelverkan med systemets omgivning under olika förhållanden i form av THMC-interaktioner. I Processrapporten avslutas varje processbeskrivning med en diskussion av hur processen bör behandlas i fyra av de fem scenarier som analyseras inom SR 97. På detta sätt analyseras inverkan kvalitativt av dessa scenarier på ett konsekvent sätt.

Även i beskrivningen av det initiala tillståndet finns osäkerheter som bör täckas av scenariovalet. Det initiala tillståndet beskrivs i SR 97 av en rad variabler för de fyra systemdelarna **bränsle**, **kapsel**, **buffert/återfyllning** och **geosfär**. En översiktlig genomgång av osäkerheterna har givit följande resultat:

- För **bränslet** har inga osäkerheter i det initiala tillståndet bedömts vara så avgörande för utvecklingen att de bör hanteras i ett eget scenario. Osäkerheter i t ex radionuklidinventarium och resteffekt kan vid behov analyseras som varianter av basscenariot (termisk utveckling) och kapseldefekts scenariot (radionuklidtransport).
- För **kapseln** rör osäkerheterna framför allt den initiala tätheten. Detta hanteras genom att analysera effekterna av initiala skador i ett eget scenario.

- För **buffert och återfyllning** har inga osäkerheter i det initiala tillståndet bedömts vara så avgörande att de hanteras med egna scenarier. SR 97 omfattar inte analys av missöden vid tillverkning eller deponering av buffert. Sådana "buffertdefekter" bör kunna undvikas genom lämpliga kontrollrutiner vid tillverkning och deponering av bufferten. Effekterna bedöms dessutom bli av en betydligt lägre dignitet än de av initiala kapselskador. Om man i kommande analyser ändå skulle välja att studera konsekvenserna av "buffertdefekter" kan det lämpligen göras som en variation inom i första hand basscenariot.
- För **återfyllningen** gäller att återfyllningsmaterialet ska anpassas till de grundvattenkemiska förhållandena på förvarsplatsen, framför allt salthalten. Någon sådan plats-specifik anpassning, och därmed plats-specifik beskrivning av återfyllningens initialtillstånd, har inte gjorts i SR 97. Analyserna av återfyllningens långsiktiga utveckling och funktion är ibland förenklade. Eventuella behov av att belysa osäkerheter i återfyllningens initialtillstånd görs lämpligen som variationer inom basscenariot i kommande säkerhetsanalyser.
- För **geosfären** finns stora osäkerheter i initialtillståndet bl a vad gäller sprickstrukturen och den rumsliga fördelningen av hydrauliska egenskaper både för sprickzoner och bergmassa. Osäkerheterna har bl a betydelse för analysen av radionuklidtransport i kapseldefekts scenariot. Osäkerheterna hanteras genom att studera en rad varianter i de detaljerade hydrauliska analyserna av geosfären i kapseldefekts scenariot.

Den systematiska beskrivningen av initialtillståndet med osäkerheter i SR 97 utgör en grund för en eventuell revision av valet av scenarier och varianter i kommande analyser.

### 7.3.2 Systematisk dokumentation av egenskaper, händelser och processer

En beskrivning av vilka omgivningsförhållanden som kan påverka slutförvaret har alltid utgjort en del i de säkerhetsanalyser som SKB genomfört. I ett inledande samarbetsprojekt mellan SKB och SKI /Andersson m fl, 1989/ dokumenteras olika egenskaper, händelser och processer som skulle kunna påverka förvaret. Databasen sammanställdes med hjälp av ett stort antal nationella och internationella experter. SKB har sedermera utvecklat sin databas (se avsnitt 4.2.4), bl a i samband med utvecklandet av de s k interaktionsmatriserna /Pers m fl, 1999/.

De flesta egenskaper, händelser eller processer som finns i SKB:s databas ingår direkt i systembeskrivningen. De som inte ingår kan i regel sorteras in under något av de olika scenarier som valts för SR 97. Vissa mer extrema händelser har dock redan i samband med att de identifierats, avförts som kandidater för vidare analys. Det gäller till exempel meteoritnedslag eller direktträff med kärnvapen. Analysen av dessa händelser utesluts dels eftersom de har låg sannolikhet, dels eftersom konsekvenserna av händelsen sannolikt inte väsentligt påverkas av om ett djupförvar ligger under träffpunkten.

### 7.3.3 Jämförelse med andra organisationer

OECD Nuclear Energy Agency har samlat en internationell databas /NEA, 1999/ med material från organisationer världen över. Även SKB:s databas har utnyttjats för att ta fram denna databas. En översiktlig genomgång av innehållet i NEA:s databas visar att relevanta händelser och processer i omgivningen ingår i scenarierna för SR 97. Någon systematisk och formell kontroll av detta har dock inte genomförts. Enligt nästa stycke är det dock troligt att en sådan analys inte skulle tillföra någon väsentlig ny information.

Scenarioanalysen i den finska säkerhetsanalysen TVO-92 /Vieno m fl, 1992/ har stämts av /Andersson och King-Clayton, 1996/ mot innehållet i SKI:s respektive SKB:s olika FEP-databaser. Scenarioanalysen i den senaste finska säkerhetsanalysen TILA-99 /Vieno och Nordman, 1999/ har stämts av /Vieno och Nordman, 1997/ mot OECD/NEA:s internationella databas utan att någon väsentlig ny information framkom. Scenarierna som valts för SR 97 är minst lika omfattande som de scenarier som analyserats i de finska säkerhetsanalyserna. Någon formell kontroll av om alla egenskaper, händelser och processer som analyseras i de finska arbetena också ingår i SR 97 har dock inte gjorts.

SKI:s säkerhetsanalys SITE-94 /SKI, 1996/ har en scenarioindelning som till stora delar liknar den som valts för SR 97. I SITE-94 väljs ett s k "basfall" vars definition liknar den som valts för basscenariot och kapseldefektscenariot. Centralscenariot i SITE-94 visar stora likheter med klimatscenariot i SR 97. I övrigt diskuterar SITE-94 översiktligt scenarioklasserna förslutning av förvar, seismiska effekter, alternativa klimat och olika mänskliga påverkningar av omgivningen. Effekterna av ofullständigt förslutet förvar analyseras inte i SR 97, men i övrigt täcker scenarioanalysen i SR 97 in dem i SITE-94. Någon formell kontroll av om alla egenskaper, händelser och processer som analyseras i SITE-94 också ingår i SR 97 har dock inte gjorts.

Den schweiziska säkerhetsanalysen Kristallin-I /Nagra, 1994/ innehåller inte väsentligt annorlunda scenarier än de som valts för SR 97. Detsamma gäller en scenarioanalys som nyligen gjorts i Storbritannien av UK Nirex /Billington och Bailey, 1998/. Inte heller i dessa fall har det gjorts någon formell kontroll av om alla egenskaper, händelser och processer som analyseras också ingår i SR 97.

### 7.3.4 Kommande arbete

För kommande analyser planeras en revision av scenariovalet med en strikt genomgång av bl a initialtillståndet och tillgängliga databaser, bl a OECD/NEAs internationella databas.

### 7.3.5 Slutsats

SKB bedömer att de valda scenarierna ger en god täckning av framtida utvecklingsvägar för djupförvaret. Detta hindrar inte att valet av scenarier och varianter i kommande analyser kan komma att modifieras något.



## 7.4 Referenser

**Andersson J (ed), Carlson T, Eng T, Kautsky F, Söderman E, Wingefors S, 1989.** The joint SKI/SKB scenario development project. SKI Technical Report 89:14. Statens kärnkraftinspektion. SKB TR 89-35. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson J, King-Clayton L, 1996.** Evaluation of the practical applicability of PID and RES scenario approaches for performance and safety assessments in the Finnish nuclear spent fuel disposal programme. Posiva Work Report TURVA-96-02. Posiva Oy, Finland.

**Billington D E, Bailey L E F, 1998.** Development and Application of a Methodology for identifying and Characterising Scenarios. Nirex Science Report S/98/013, U K Nirex Limited.

**Nagra, 1994.** Kristallin-I Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22. Nagra, Switzerland.

**NEA, 1999.** An International Database of Features, Events and Processes. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.

**Pers K, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, Bruno J, Pusch R, Hedin A, Morén L, Sellin P, Ström A, 1999.** SR 97 – Identification and structuring of processes. SKB TR-99-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKI, 1996.** SKI SITE-94. Deep repository performance assessment project. Vol I and II. SKI Report 96:36. Statens kärnkraftinspektion.

**Vieno T, Hautojärvi A, Koskinen L, Nordman H, 1992.** TVO-92 Safety analysis of spent fuel disposal. Report YJT-92-33E. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Finland.

**Vieno T, Nordman H, 1997.** FEPs and scenarios. Auditing of TVO-92 and TILA-96 against International FEP database. Posiva 97-11. Posiva Oy, Finland.

**Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. Posiva 99-07. Posiva Oy, Finland.

## 8 Basscenario

### 8.1 Inledning

I basscenariot beskrivs den förväntade utvecklingen för fallet då förvaret är byggt enligt specifikationer och förhållandena i omgivningen antas vara i princip oföränderliga och lika med dagens. Alla kapslar antas vara utan tillverkningsfel och dagens klimat råder framgent.

Baserat på tidigare säkerhetsanalyser kan kapslarna förväntas hålla under mycket lång tid med dessa förutsättningar. Därför bör radionuklidtransport inte behöva behandlas i basscenariot. Detta är dock ingen förutsättning utan måste visas genom de analyser som görs för scenariot.

I basscenariot är det övergripande syftet att studera kapselns isolerande funktion. Ett fundamentalt säkerhetskriterium för förvarssystemet är att kapslarnas kopparhöljen ska förbli obrutna. Om detta är uppfyllt är det ensamt tillräckligt för att visa säkerheten. Flera andra kriterier, t ex att grundvattnet bör vara syrefritt och att bufferten bör ha en låg vattenledningsförmåga kan ”härledas” ur täthetskriteriet och barriärsystemets avsedda funktioner enligt avsnitt 5.7. Uppgiften i basscenariot kan sägas vara att visa huruvida täthetskriteriet och andra hjälpkriterier är uppfyllda.

### 8.2 Initialtillstånd

Initialtillståndet antas vara det som beskrivs i kapitel 6, med det viktiga tillägget att samtliga deponerade kapslar postuleras vara utan tillverkningsfel.

### 8.3 Randförhållanden

I basscenariot utreds utvecklingen som följer om man antar att dagens platsspecifika förhållanden i omgivningen gäller även i framtiden. Det gäller t ex klimatet på platsen och den lokala biosfärens utseende.

Vissa förändringar i omgivningen inkluderas dock i basscenariot, för att göra situationen mer realistisk. Det gäller förändringar som kan karakteriseras som ”kända trender”. Den pågående landhöjningen är ett sådant exempel. Landhöjningen är en kvardröjande effekt av den senaste istiden. En annan, mer långsiktigt känd trend är den tektoniska utvecklingen, dvs långsiktiga och storskaliga mekaniska förändringar i berggrunden.

I sammanfattning antas i basscenariot följande om förvarets omgivning:

- Dagens klimatförhållanden antas råda framgent.
- Landhöjning och den inverkan detta har på framför allt biosfären inkluderas i basscenariot. Inverkan på grundvattenflödet diskuteras översiktligt.
- 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 i basscenariot.
- Inga mänskliga intrång förekommer.

I det följande ges mer detaljerade beskrivningar av klimat och förväntad biosfärsutveckling för de tre platserna.

### 8.3.1 Klimat

Klimatet vid de olika platserna varierar mellan ett varmt tempererat klimat i Aberg och ett kallt tempererat snöklimat i Ceberg. Beberg ligger i gränzonen mellan klimatområdena. Alla områden påverkas av ett kustklimat. Viktiga klimatdata anges i tabell 8-1.

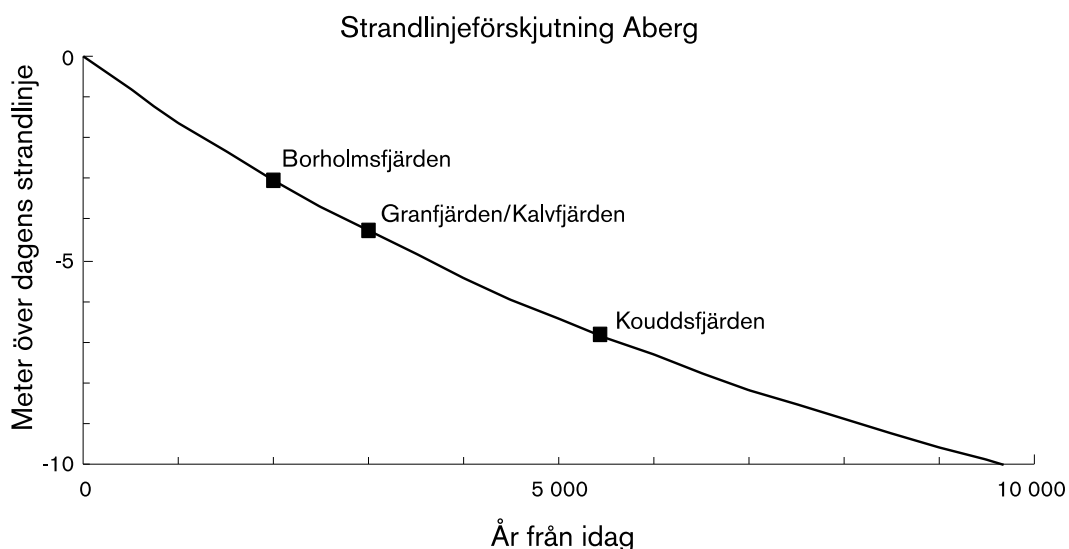
### 8.3.2 Biosfärens utveckling

Väsentliga förändringar som förväntas i basscenariot i biosfären är landhöjning, igenväxning av sjöar och naturliga förändringar av vegetationen samt grundvattenförändringar beroende på återmättnaden av förvaret. Förändringar till följd av klimatvariationer beskrivs under klimatscenarier. Östersjöns salthalt kan förändras i framtiden beroende på klimatförhållanden men också genom att vattenutbytet genom Öresund kan ändras. I SR 97 bortses från denna förändring.

Framtida landhöjning kan förutsägas relativt väl /Påsse, 1997/. Strandlinjeförskjutningen är en mera korrekt benämning av förloppet eftersom det är en sammansatt effekt av havsnivåförändringar och höjningen av land. Strandlinjeförskjutningen påverkar fördelningen av havsvatten, insjöar och land. Den påverkar också den hydrauliska gradienten både för ytnära men också djupare grundvattenflöden. Vidare kommer tidigare havsbotten successivt att bli torrlagda och därmed möjligen odlingsbara.

Tabell 8-1. Några viktiga klimatdata /Lindborg och Schüldt, 1998/.

	Aberg	Beberg	Ceberg
Årsmedeltemperatur (°C)	7	5,5	2,7
Nederbörd (mm/år)	675	670	765
Avrinning (mm/år)	150-200	240	345
Andel snö i nederbörd (%)	18	35	33
Medelsnödjup (cm)	10	20	30
Snötäckning (dagar/år)	91	110	160
Tjälldjup (cm)	30	50	>100



**Figur 8-1.** Strandlinjeförskjutningen i Aberg, baserat på beräkningar från Pässe /1997/. Punkterna på kurvan visar när olika fjärdar vid Aberg förväntas bli isolerade från havet. Efter 5 000 år blir osäkerheterna i förutsägelsen stora eftersom eventuell nedisning kan påskynda strandlinjeförskjutningen genom att havsytan sänks, se vidare klimatscenariot.

De större vegetationsförändringar som sker är igenväxningen enligt ovan men också att öppna marker blir skogsklädda. Vattensammansättningen i de ytnära ekosystemen påverkas av förändringar från havsvatten till sötvatten vid landhöjningen, då havsvikar avsnörs. Dessutom sker en naturlig försurning och urlakning av marken.

I **Aberg** sker den mest dramatiska förändringen eftersom platsen ligger vid kusten. Här förutses Borholmsfjärden isoleras och bli en insjö om cirka 2 000 år, se figur 8-1. Sjön kommer troligen att växa igen snabbt och bilda en våtmark. Gran/kalvfjärden isoleras om cirka 3 000 år och den yttersta fjärden om cirka 5 500 år. De kommer troligen att vara insjöar under en längre tid eftersom de är förhållandevis djupa (21 respektive 10 meter). När fjärdarna isoleras övergår de till sötvattensmiljöer som påverkar artsammansättningen, vattenomsättningen samt potentiella födovägar.

I **Beberg** och **Ceberg** kommer inte landhöjningen att påverka de ytnära ekosystemen direkt, eftersom kustlinjen är mer än 5 km från platserna. Finnsjön i Beberg förväntas dock växa igen och bilda en större våtmark. I Ceberg är det troligt att torvmarkerna kommer att täckas av skog.

Efter förslutningen av förvaret återfylls det delvis dränerade berget med vatten. De begränsade områden som kan ha påverkats av grundvattensänkningen förväntas då återfå grundvatten och utveckla en mera frodig vegetation.

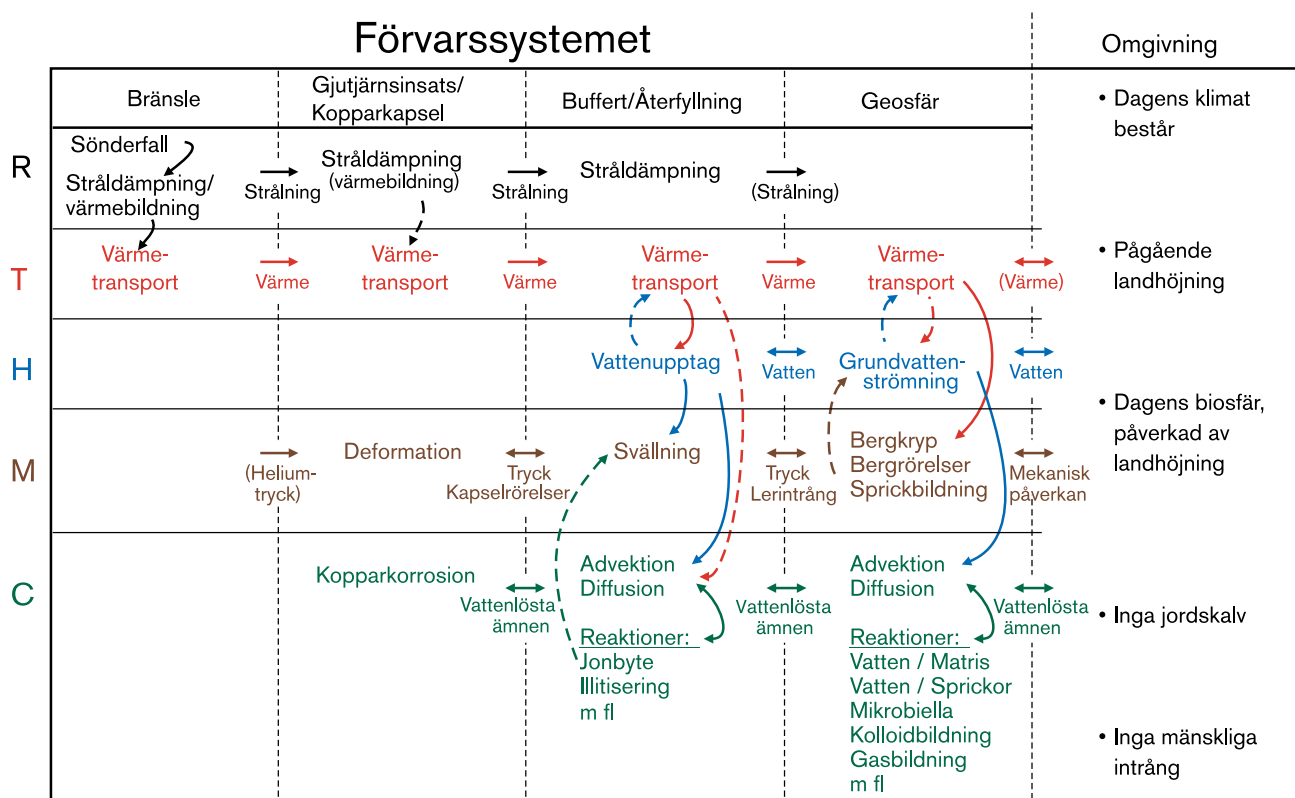
## 8.4 Överblick av processer och beroenden

Förvarets initiala tillstånd förändras över tiden av en rad processer som äger rum i bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. Processerna kan delas in i kategorierna strålningsrelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C). I figur 8-2 ges en förenklad bild av systemet av processer.

Många processer sker parallellt och kopplat och situationen kan därför te sig mycket komplex. En närmare analys av vilka väsentliga kopplingar som finns i systemet visar dock tydliga huvuddrag som väsentligt förenklar hanteringen i säkerhetsanalysen.

De strålningsrelaterade processerna, radioaktivt sönderfall och stråldämpning, bestämmer hur strålintensiteten ser ut i förvarets olika delar. Dessa är i stort sett oberoende av alla andra processer och kan därför beskrivas först.

Sedan de strålningsrelaterade processerna kvantifierats kan förvarets termiska utveckling till väsentliga delar bestämmas. Det radioaktiva sönderfallet utgör källan till uppvärmningen och den vidare utvecklingen styrs av värmetransporten i de olika förvarsdelarna. Värmetransporten beror av materialegenskaper hos förvarsdelarna som i stort sett är oföränderliga över långa tider. Ett undantag av betydelse finns: Buffertens termiska egenskaper beror av dess vattenhalt, som ändras under buffertens vattenmättnadsförlopp.



**Figur 8-2.** Huvuddragen i processsystemet för basscenariot. De starkaste kopplingarna beskrivs med heldragna pilar, svagare kopplingar som streckade pilar. Många kopplingar som bedömts ha försumbara effekter har utelämnats.

Den hydrauliska utvecklingen i basscenariot rör endast bufferten och geosfären eftersom kapselns inre och bränslet är hydrauliskt isolerade av kopparhöljet. I geosfären förväntas de ursprungliga flödesförhållanden återställas inom en tidsperiod av tio upp till etthundra år efter att förvaret förslutits. Vattenmättnadsförloppet i buffert/återfyllning beror av tillrinningen av grundvatten till enskilda deponeringshål respektive tunnlar. För bufferten finns alltså också ett samspel med den termiska utvecklingen.

Därefter kan förvarets mekaniska utveckling bestämmas. Bränslet är mekaniskt isolerat från omgivningen av gjutjärnsinsatsen. Den mekaniska utvecklingen domineras till att börja med av svällningen i bufferten, som bestäms av buffertens vattenhalt, och bergets värmeutvidgning som bestäms av temperaturutvecklingen i berget och berggrundens sammansättning. Buffertens svällning leder till en mekanisk påverkan på både kapsel och berg. Långsiktigt styrs den mekaniska utvecklingen bl a av storskaliga förändringar i geosfären.

Slutligen kan förvarets kemiska utveckling beskrivas. Även i kemiskt avseende är bränslet och kapselns inre isolerade från omgivningen av kopparhöljet. Den kemiska utvecklingen domineras av reaktions- och transportprocesser i buffert och geosfär samt av korrosion av kopparkapselns utsida. Den kemiska utvecklingen kan ge långsiktiga materialförändringar som i sin tur kan påverka bl a den mekaniska utvecklingen i bufferten.

I följande avsnitt beskrivs i tur och ordning förvarets strålrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska utveckling.

## 8.5 Strålrelaterad utveckling

### 8.5.1 Överblick

Den strålrelaterade utvecklingen beskriver hur strålningen från de radioaktiva sönderfallen i bränslet sprids och dämpas i förvarets olika delar. Energin hos den frigjorda strålningen omvandlas till värme vid stråldämpningen.

#### ***Strålrelaterade processer***

Det följande är en sammanfattning ur Processrapporten av beskrivningarna av de strålrelaterade processer som rör basscenariot.

Den strålrelaterade utvecklingen i basscenariot omfattar processerna radioaktivt sönderfall i bränslet samt stråldämpning i samtliga systemdelar.

Sönderfallet ger upphov till  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - och neutronstrålning. Huvuddelen av  $\alpha$ - och  $\beta$ -strålningen dämpas i bränslet medan  $\gamma$ - och neutronstrålningen kan tränga ut till kapsel, buffert och berg.

Stråldämpningen/värmealstringen är mest intensiv i bränslet men även i gjutjärnsinsatsen utgör processen en signifikant värmekälla i förvaret. Stråldämpningen bestäms av de olika förvarsdelarnas geometriska mått och materialsammansättning.

## **Kopplingar till förvarets övriga utveckling**

Den strålrelaterade utvecklingen kan behandlas oberoende av förvarets övriga utveckling i basscenariot. Detta är möjligt eftersom den strålrelaterade utvecklingen inte påverkas signifikant av andra processer så länge kopparkapseln är intakt.

Uppvärmningen vid stråldämpningen utgör värmekällan i förvarets termiska utveckling. Strålningen i de olika förvarsdelarna orsakar kemiska processer som radiolys av vatten och materialpåverkan i kapsel och buffert.

## **Vad behöver visas i basscenariot?**

I kommande avsnitt ges en närmare beskrivning av följande aspekter av den strålrelaterade utvecklingen:

- Utvecklingen av radioaktivitet och farlighet för radionuklidinventariet i bränslet som funktion av tid.
- Effektutvecklingen i bränslet som funktion av tid som grund för den termiska utvecklingen.
- En grov kvantitativ uppskattning av intensiteten av olika strålslag som funktion av tid i de olika förvarsdelarna. Detta behövs för att kunna uppskatta de kemiska effekterna av strålningen som utgör en del av den kemiska utvecklingen.

## **Betydelse för säkerheten**

Den strålrelaterade utvecklingen omfattar inga processer som direkt berör förvarets isolerande förmåga. Strålningen påverkar inte kapselns eller buffertens material-egenskaper på sikt. Resultaten används som indata till andra delar av analysen.

## **8.5.2 Aktivitet och farlighet**

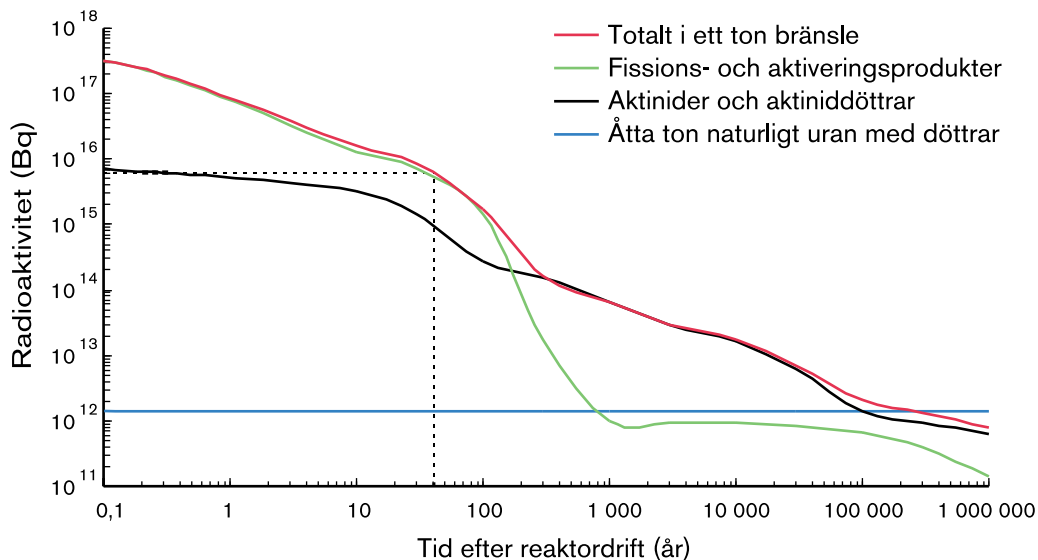
### **Aktivitet**

Figur 8-3 visar radioaktivitetens utveckling i tiden för bränslet uppdelat på fissionsprodukter och aktinider /Hedin, 1997/. Av figuren framgår att aktiviteten domineras av fissions- och aktiveringsprodukter under de inledande 100 åren medan aktinider och aktiniddöttrar är klart dominerande för tider efter cirka 500 år.

Det använda bränslet kommer i ett långt tidsperspektiv alltmer att likna den mineral som ursprungligen bröts för att framställa bränslet allt eftersom de radioaktiva ämnen som bildas vid driften sönderfaller. Kvar blir de naturligt förekommande uranisotoperna U-238 och U-235 med halveringstiderna 4,5 respektive 0,7 miljarder år samt deras dotterprodukter. Även små mängder uran-236 och dess dotternuklid torium-232 med halveringstiderna 23 miljoner respektive 14,1 miljarder år och deras döttrar blir kvar på mycket lång sikt.

### **Farlighet**

Figur 8-4 visar farligheten för använt bränsle vid olika tidpunkter efter drift. Farligheten avser intag via föda. Staplarnas höjd är ett mått på farligheten och det framgår även vilka ämnen som dominerar vid olika tidpunkter. Alla farlighetsmått är i procent av den totala



**Figur 8-3.** Aktivitet för BWR-bränsle med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg uran. Materialet till figuren är hämtat från Hedin /1997/ och gäller SVEA-64-bränsle. Aktiviteten för referensbränslet i SR 97, SVEA 96, med samma utbränningsgrad är mycket snarlik.

farligheten en månad efter drift, den första stapeln i figuren. Efter 40 år, då bränslet ska deponeras, och mer än tusen år framåt domineras farligheten av Am-241 som bildats vid sönderfall av Pu-241. I takt med att kortlivade isotoper försvinner kommer farligheten att domineras av mer långlivade radionuklider. Efter 10 000 år utgörs t ex farligheten till cirka hälften av plutoniumisotopen Pu-239 med halveringstid 24 000 år. Farlighetens utveckling i tiden visas också i figur 3-2, kapitel 1.

### 8.5.3 Resteffekt

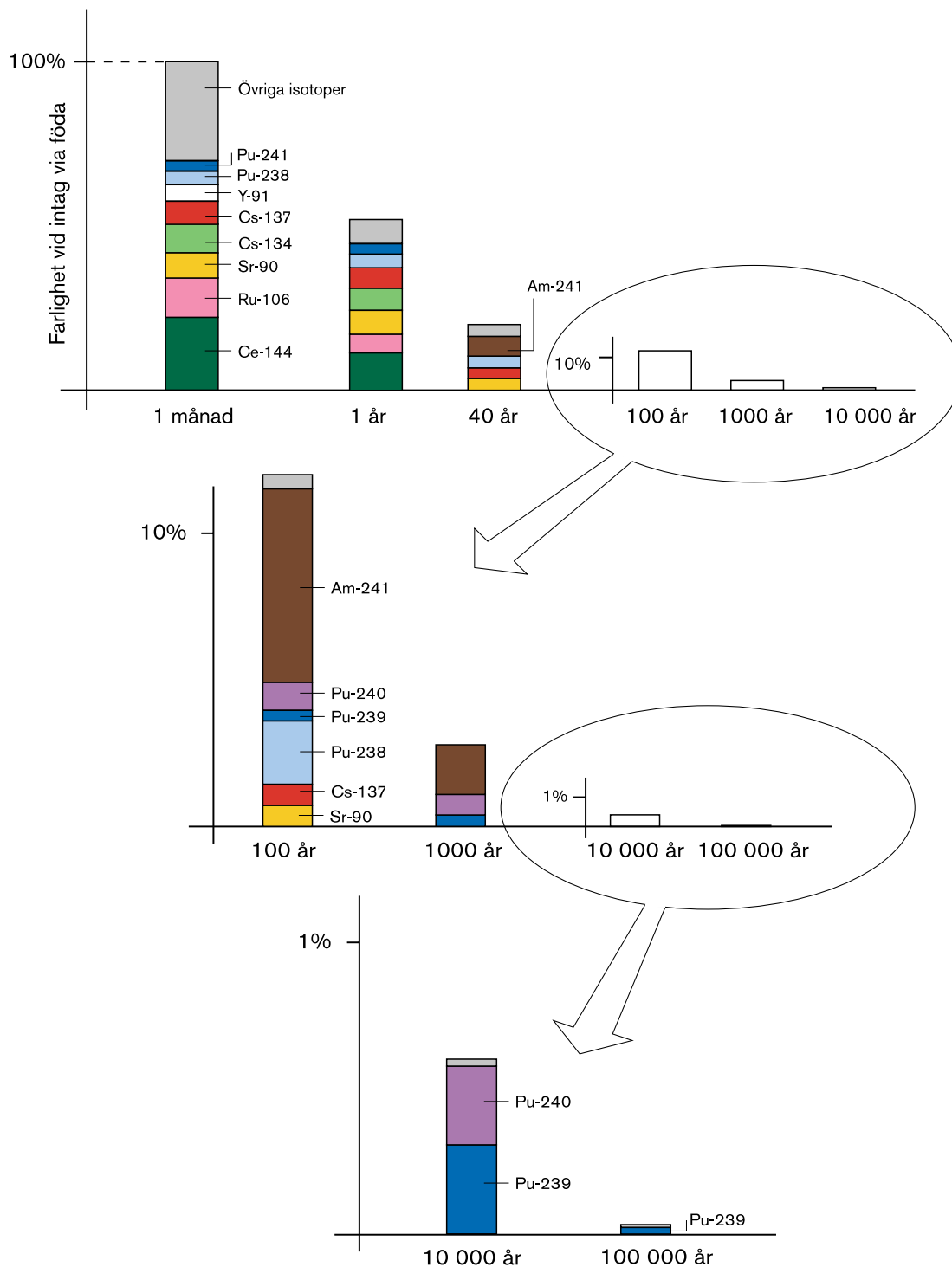
Strålningsenergin som frigörs vid de radioaktiva sönderfallen i bränslet omvandlas till värme. Värmeutvecklingen i bränslet efter drift benämns resteffekt. Figur 8-5 visar hur resteffekten avtar med tiden /Håkansson, 1999/.

Då bränslet ska djupförvaras efter cirka 40 år utvecklas en effekt av cirka 800 Watt per ton bränsle. Effekten fortsätter därefter att sjunka enligt figur 8-5. Resteffekten utgör värmekällan i den termiska utvecklingen som diskuteras i avsnitt 8.6.

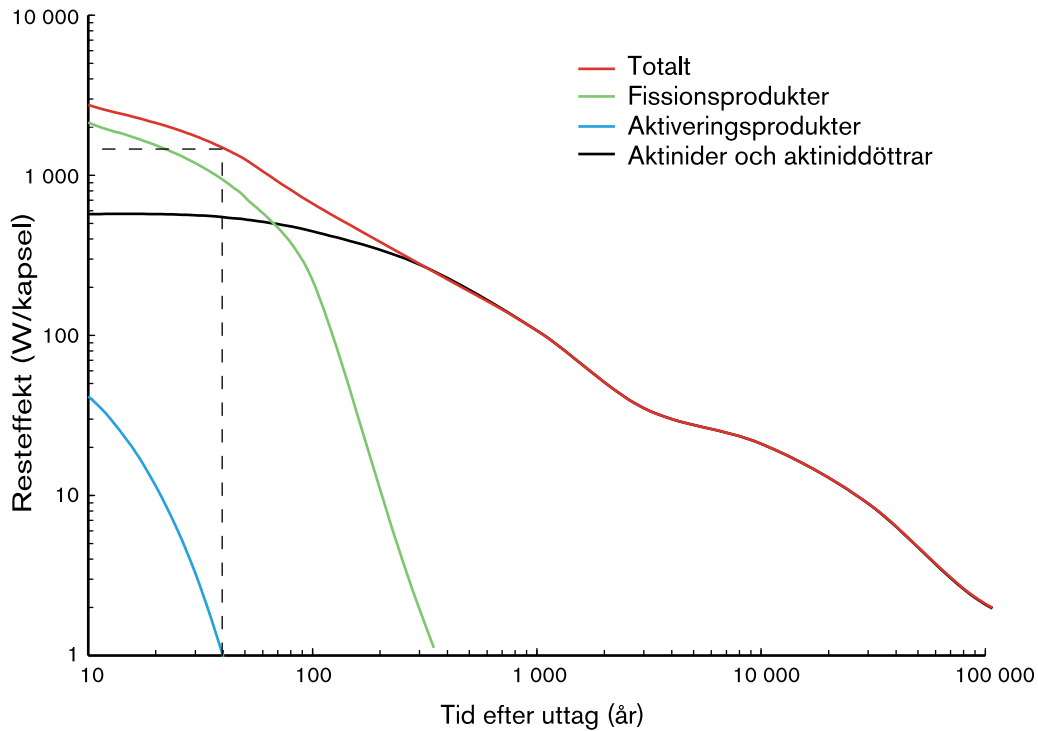
### 8.5.4 Gamma- och neutronintensiteter

Initialt är gamma- och neutronsosraten cirka 130 000 respektive 5 mGy/h på en meters avstånd från två ton oskyddat bränsle (innehållet i en kapsel) /Hedin, 1997/. Intensiteterna avtar sedan enligt figur 8-6. Omedelbart utanför kapseln är motsvarande initiala värden 350 respektive 40 mGy/h (neutroner dämpas mycket måttligt av kapseln). Även dessa dosrater avtar ungefär som i figur 8-6.

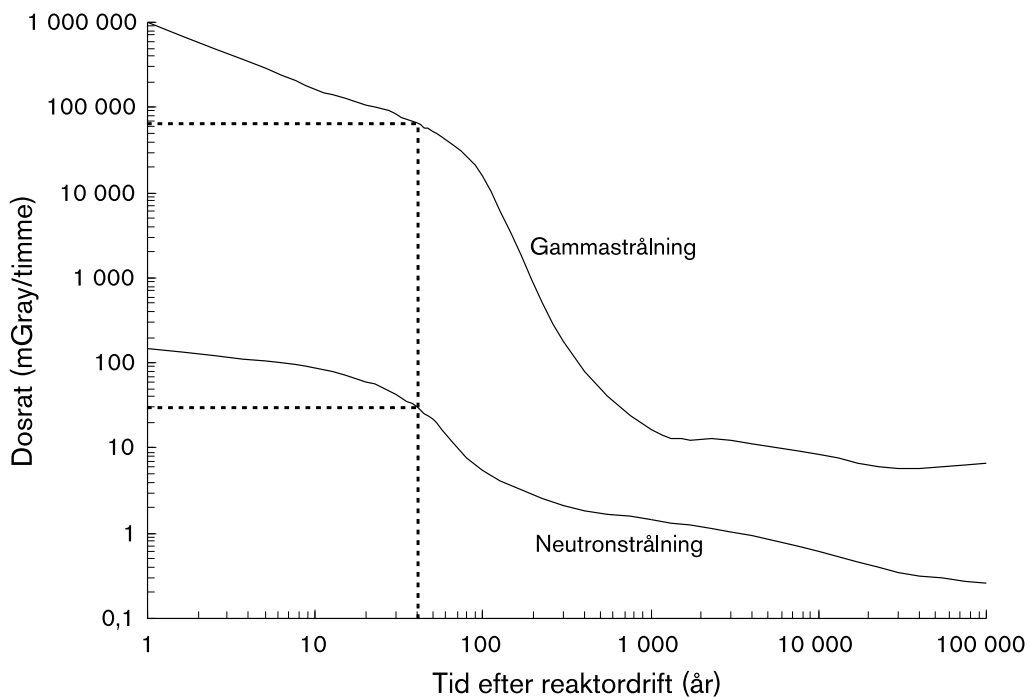




**Figur 8-4.** Relativ farlighet vid intag via föda för BWR-bränsle med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg uran. Materialet till figuren är hämtat från Hedin /1997/ och gäller SVEA-64-bränsle. Farligheten för referensbränslet i SR 97, SVEA 96, med samma utbränningsgrad är mycket snarlik.



**Figur 8-5.** Resteffekt som funktion av tid för referensbränslet SVEA 96 med en utbränningsgrad av 38 MWdygn/kg uran.



**Figur 8-6.** Gamma- och neutrongdosrater som funktion av tid en meter från två ton oskyddat BWR-bränsle (innehållet i en kapsel). Materialet till figuren är hämtat från Hedin /1997/ och gäller SVEA-64-bränsle. Dosraterna för referensbränslet i SR 97, SVEA 96, med samma utbränningsgrad är mycket snarlika.

## 8.5.5 Tilltro

### *Processförståelse*

De grundläggande processerna i den strålrelaterade utvecklingen, radioaktivt sönderfall och stråldämpning, är väl förstådda både experimentellt och teoretiskt, se Processrapporten.

### *Modeller*

Utvecklingen av radioaktivitet, farlighet och resteffekt kan beräknas analytiskt när innehållet av radionuklider vid deponeringen är känd. Modeller för strålskärmsberäkning ger en tillräckligt detaljerad behandling av stråldämpningen.

### *Data*

Den strålrelaterade utvecklingen kräver sönderfallsdata och inventarier av radionuklider i bränslet samt strålskärmsdata för bränsle-, kapsel- och buffertmaterialen. Kvaliteten i tillgängliga data är fullt tillräcklig för de beräkningar som genomförs i basscenariot. Osäkerheter i radionuklidinventariet diskuteras i Datarapporten.

## 8.5.6 Slutsatser

Den strålrelaterade utvecklingen har ingen direkt bäring på säkerheten i basscenariot. Beräkningsresultaten används i andra analyser, framför allt används resteffekten i analysen av den termiska utvecklingen.

Den grundläggande förståelsen för inblandade processer är god liksom kvaliteten i tillgängliga modeller och data.

## 8.6 Termisk utveckling

### 8.6.1 Överblick

I jordskorpan transporteras värme från jordens inre varma delar till jordytan där värme avges till atmosfären. Även värme från sönderfall i radioaktiva mineral ger signifikanta bidrag till temperaturutvecklingen i den övre berggrunden.

Med förvaret tillkommer en ny värmekälla genom att strålningsenergin som frigörs vid de radioaktiva sönderfallen i bränslet omvandlas till värmeenergi. Den alstrade värmen flödar ut till kapsel, buffert och berg och ger en uppvärmning som varar i tusentals år. Uppvärmningen gör att en värmevåg utbreder sig i geosfären. Från ett förvar på 500 meters djup når vågen ytan något hundratal år efter deponering. Storleken och hastigheten för vågen bestäms av effektutvecklingen i bränslet och bergets värmeledningsförmåga.

## **Termiska processer**

Initialt, vid deponeringen, har geosfären en platsspecifik och djupberoende temperatur. Övriga förvarsdelars initiala temperatur beskrivs i kapitel 6.

Det följande är en sammanfattning ur Processrapporten av beskrivningarna av de termiska processer som rör basscenariot.

Den termiska utvecklingen i förvaret styrs av processen värmetransport i och mellan de olika förvarsdelarna. Värmetransport kan ske genom ledning, strömning (konvektion) eller strålning. Värmetransporten inom olika förvarsdelar kan ofta beskrivas väl medan värmeöverföringen mellan olika delar kan vara omgärdad av större osäkerheter.

Värme transporteras inifrån bränslet och ut. Efter en kort tid inträder ett tillstånd där temperaturutvecklingen för en viss förvarsdel, t ex kapseln, bestäms av den utvecklade effekten i bränslet samt av värmetransportegenskaperna för de förvarsdelar och gränssytor som ligger utanför i detta fall kapseln, dvs buffert/återfyllning och geosfär.

I **bränslet** sker transporten som ledning och värmeledningsegenskaperna är väl kända.

Mellan bränslet och gjutjärnsinsatsen överförs värme både genom värmestrålning och värmeledning. Ledningen sker via restgaser i bränslet och vid ytor där bränsle/insats står i direkt kontakt.

I metallen i **gjutjärnsinsats och kopparkapsel** sker värmetransporten genom ledning. Mellan insats och kapsel överförs värme genom strålning samt genom ledning i direktkontakten i bottenytan. Metallernas värmeledningsegenskaper är väl kända medan strålningsegenskaperna hos kopparkapselns inre yta, och därmed värmeöverföringen insats/kapsel, utgör en osäkerhet som påverkar den termiska utvecklingen i bränslet.

I en **vattenmättad buffert** transporteras värme genom ledning med väl kända värmeledningsegenskaper. Efter svällning, vid full vattenmättnad, står bufferten i direktkontakt med både kapsel och berg och värmeövergången sker genom ledning.

Värmetransporten i **bufferten under mättnadsförloppet** är mer komplicerad bl a eftersom värmeledningsförmågan beror av vattenhalten. I själva bufferten kan under detta skede även konvektion ge ett mindre bidrag till transporten genom att vattenånga flödar i bufferten. Ångflödet ökar buffertens värmeledningsförmåga och man kan därför pessimistiskt bortse från den eftersom man därmed överskattar temperaturen på kapsel-ytan.

Även värmeövergången mellan kapsel/buffert blir mer komplicerad eftersom det finns en vatten/gasfylld spalt i detta gränsskikt under vattenmättnadsfasen. Spalten kommer att fyllas ut då bufferten sväller men förståelsen av utvecklingen och därmed värmeledningsegenskaperna i spalten är behäftad med osäkerheter.

**Återfyllningens** inverkan på den termiska utvecklingen är liten, se Processrapporten.

I **geosfären** transporteras värme huvudsakligen genom ledning. Värmeströmning med grundvattnet ger ett försumbart bidrag. Olika bergarters värmeledningsegenskaper är kända med god noggrannhet. Noggrannheten i beskrivningen av utvecklingen begränsas i stället av hur väl man kan bestämma sammansättningen av olika bergarter i geosfären.

### ***Kopplingar till förvarets övriga utveckling***

Den termiska utvecklingen drivs av den strålrelaterade utvecklingen. I bufferten finns under mättnadsfasen en växelverkan med den hydrauliska utvecklingen. I övrigt är den termiska utvecklingen i stort sett oberoende av förvarets övriga utveckling.

Temperaturen leder till termisk expansion i alla förvarsdelar. Detta har framför allt betydelse för geosfärens mekaniska utveckling. Temperaturen har också betydelse för samtliga kemiska reaktioner.

### ***Vad behöver visas i basscenariot?***

I kommande avsnitt ges en närmare beskrivning av följande aspekter av den termiska utvecklingen:

- Beräkningar för enskilda deponeringshål vid Aberg, Beberg och Ceberg. Bl a redovisas den maximala temperaturen på kapselytan, som inte får överstiga 100 °C. Därmed uppfylls också automatiskt kriteriet att temperaturen i bufferten inte bör överstiga 100 °C för att undvika mineralomvandlingar (illitisering).
- Beräkningar av temperaturen i hela förvaren i Aberg, Beberg och Ceberg som indata till beskrivningen av de hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som beror av temperaturen. Dessutom behöver den termiska påverkan på markytan ovan förvaret uppskattas.

Utvecklingen i bränsle och kapsel beräknas inte i SR 97. I Processrapporten refereras beräkningar där yttemperaturen på bränslestavarna med pessimistiska antaganden kan bli upp till cirka 400 °C vid deponeringen. Så länge kopparkapseln är intakt spelar temperaturfördelningen i kapselns inre ingen roll för utvecklingen i basscenariot.

### ***Betydelse för säkerheten***

Den termiska utvecklingen omfattar inga processer som direkt berör förvarets isolerande förmåga. Resultaten används i de mekaniska och kemiska analyserna.

## **8.6.2 Termisk utveckling i buffert och geosfär**

I detta avsnitt redovisas beräkningar av den termiska utvecklingen i buffert och geosfär. I Processrapporten finns en detaljerad beskrivning av de termiska processerna i de olika förvarsdelarna. Texten i det här avsnittet är en sammanfattning av Ageskog och Jansson /1999/.

Analysen av den termiska utvecklingen i buffert och geosfär ska ge temperaturen som funktion av tid och rum i de båda systemdelarna. Temperaturerna används som underlag för analysen av de framför allt mekaniska och kemiska processer som är temperaturberoende.

Ett annat viktigt syfte med beräkningarna är att kontrollera att temperaturen på kapselns yta inte överskrider 100 °C. Kriteriet är satt för att undvika kokning på kapselytan /Werme, 1998/. Kokning skulle kunna leda till en anrikning av salter på ytan vilket i sin tur kan ge korrosionseffekter som är svåra att analysera.

### **Förutsättningar**

**Bränslemängder:** Cirka 8 000 ton bränsle antas vara deponerat på var och en av de tre platserna, se vidare under ”geosfärsdata” nedan.

**Kapseldata:** I förvarets termiska utveckling uppnås redan några veckor efter deponering ett kvasistationärt tillstånd där värmeflödet genom kapsel och buffert bestäms av bränslets effektutveckling. För temperaturberäkningarna i buffert och geosfär är det därför bara värmeflödet från kapseln som är av intresse. Flödet från kapseln är beroende av mängden och utbränningsgraden hos bränslet den fyllts med. Med justeringar av mellanlagringstid och deponeringssekvens kan samma värmeflöde fås för alla kapslar även om drifttiden varierar mellan 25 och 40 år. I denna studie förutsätts en initial effekt på 1 625 W per kapsel och en anpassning av deponeringssekvensen för de olika platserna. Detta svarar mot en genomsnittlig mellanlagringstid av cirka 30 år.

**Värmeledning mellan kapsel och buffert:** Vid deponeringen av kapslarna finns en centimeterstor spalt mellan kapsel och buffert. Spalten fylls vid deponeringen med vatten och den svällande bufferten kommer med tiden att fylla ut spalten. Värmen från kapseln kan dock komma att driva ut vattnet från spalten i ett tidigt skede, vilket får stor betydelse för spaltens ledningsförmåga och därmed för temperaturen på kapselytan /Ageskog och Jansson, 1999/. I beräkningarna av den maximala temperaturen på kapselytan nedan antas pessimistiskt spalten ständigt vara öppen.

**Buffertdata:** Buffertens värmeledningsförmåga beror av vattenmättnadsgraden. En fullt vattenmättad buffert har värmeledningsförmågan 1,2–1,4 W/(m·K). I SR 97 antas buffertblocken deponeras med en mättnadsgrad av 85 procent. Efter deponering kommer värmen från kapseln att omfördela vattnet i bufferten inom några månader /Börgesson och Hernelind, 1999/, så att mättnadsgraden blir lägre närmare kapseln. I modelleringen har bufferten delats upp i tre koncentriska lager, där vattenmättnadsgraden varierar mellan 70 och 100 procent vilket pessimistiskt antas svara mot värmeledningsförmågor mellan 0,9 och 1,15 W/(m·K).

Mättnadsgraden kommer med tiden att öka då bufferten tar upp vatten från det omgivande berget. Det är dock inte realistiskt att den maximala kapseltemperaturen uppnås innan vattenupptaget blivit signifikant. Denna process kan därför inte tillgodoräknas i korta tidsperspektiv då den maximala temperaturen på kapselytan bestäms.

**Geosfärsdata:** De platsspecifika förvarsutformningarna i kapitel 6 har använts i temperaturberäkningarna. Tunnelavstånden är 40 meter och avstånden mellan deponeringshålerna sex meter i Beberg och Ceberg. Detta är ett preliminärt minsta avstånd som valts av konstruktionstekniska skäl. I Aberg gav den platsspecifika anpassningen ett kapselavstånd av 7,5 meter. Kapselavstånden svarar mot ett totalt antal kapslar av 3 650, 4 261 respektive 4 165 i de givna tunnelsystemen på de tre platserna. (Tunnelsystemens totala längd varierar mellan platserna, därmed också antalet kapslar mellan Beberg och Ceberg.)

**Tabell 8-2. Termiska egenskaper hos geosfären på de tre platserna /Ageskog och Jansson, 1999/.**

	Dominerande bergart	Värmeledningsförmåga W/(m · K)	Specifik värmekapacitet MJ/(m <sup>3</sup> · K)	Initial temperatur °C	Temperaturgradient °C/km
<b>Aberg</b>	Diorit	2,8	2,0	16,0	13,5
<b>Beberg</b>	Granit	3,2	2,1	13,5	12,7
<b>Ceberg</b>	Gnejs	3,8	2,3	11,0	15,5

Geosfären vid Aberg, Beberg och Ceberg domineras av bergarterna diorit, granit respektive gnejs. Bergarten bestämmer värmeledningsförmåga och specifik värmekapacitet. De tre platserna ligger i södra, mellersta respektive norra Sverige, vilket har betydelse för den initiala temperaturen. I tabell 8-2 finns de plats-specifika termiska data som används i analysen.

### **Kapselns ytemperatur**

Temperaturen på kapselytan får enligt ovan inte överskrida 100 °C för att undvika kokning. För att ta hänsyn till osäkerheter i indata används i temperaturberäkningar det strängare kriteriet att den maximala ytemperaturen inte får överstiga 90 °C. Spalten mellan kapsel och buffert hanteras genom att anta ett temperaturfall av 10 °C mellan kapselyta och buffert. Detta motiveras av Ageskog och Jansson /1999/. Det som konkret beräknas är sedan temperaturen på buffertens inre rand. Denna får alltså inte överstiga 80 °C.

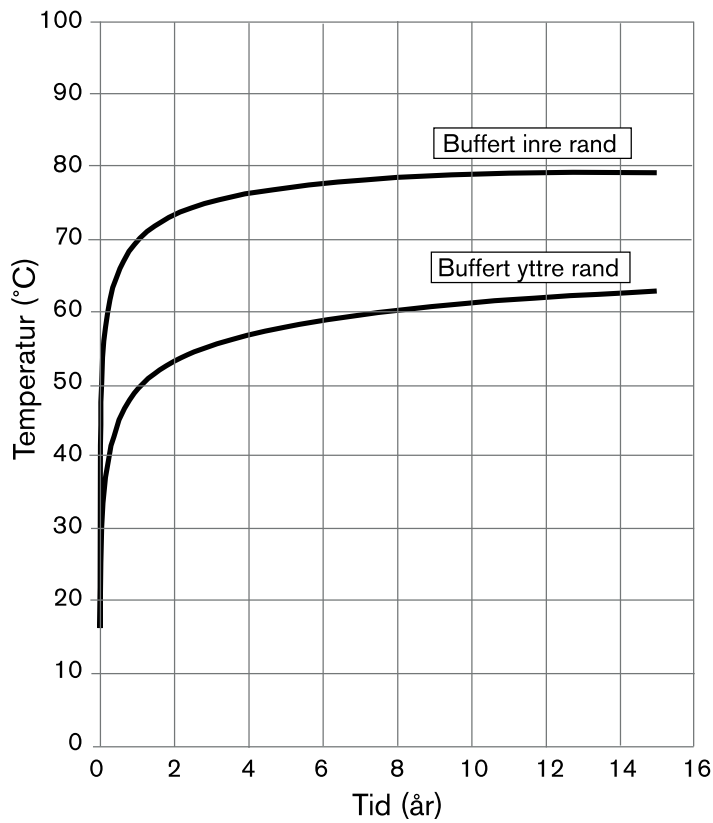
Detaljer om modelleringen finns i Ageskog och Jansson /1999/. Figur 8-7 visar resultatet från modelleringen av temperatur som funktion av tid på den inre ytan av bufferten deponerad vid Aberg.

Figur 8-8 visar temperaturen som funktion av avståndet från en kapsel deponerad vid Aberg, vid ett antal olika tidpunkter mellan noll och 15 år.

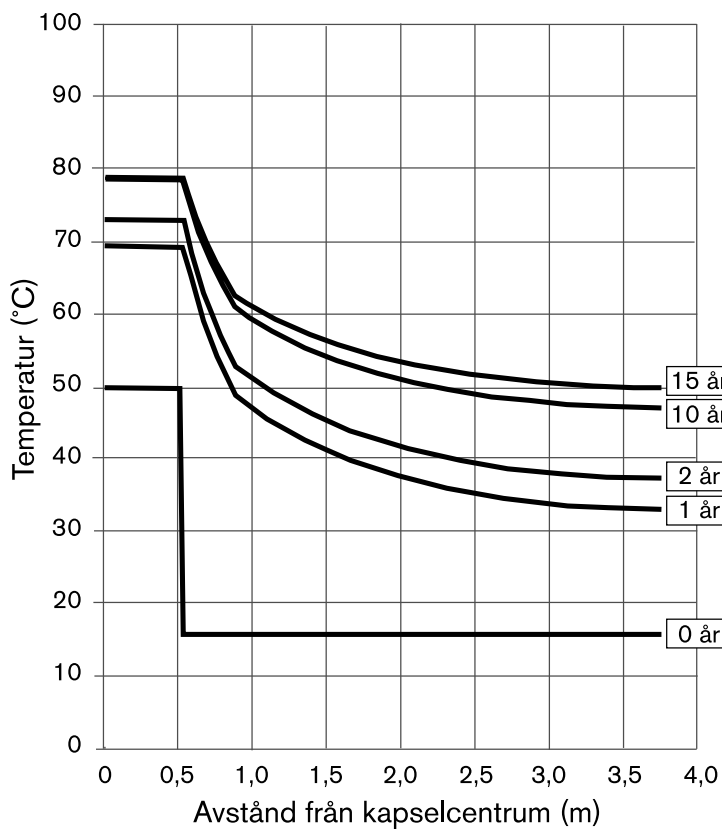
I Ceberg skulle resteffekten kunna ökas till cirka 1 850 W per kapsel med sex meters kapselavstånd medan i Beberg resteffekten relativt väl motsvarar kapselavståndet sex meter. I Aberg är det temperaturrestriktionerna som bestämmer kapselavståndet och kapseffekten kan därför inte heller där ökas.

### **Värmetransport i geosfären**

Värmetransport i geosfären modellerades med förenklade antaganden om närområdets geometri. Endast deponeringstunnlarna är representerade i modellen, utan detaljer om deponeringshål, kapsel och buffert. Återfyllningens betydelse för den termiska utvecklingen i geosfären kan försummas, se Processrapporten. Den initiala kapseffekten är även här 1 625 W för samtliga platser.



**Figur 8-7.** Temperatur som funktion av tid på buffertens ränder vid Aberg.



**Figur 8-8.** Temperatur som funktion av avståndet från kapseln i Aberg.



**Tabell 8-3. Tidsschema för deponeringssekvensen i temperaturberäkningen.**

	Antal kapslar i fas ett	Antal kapslar i fas två	Antal år för fas två
<b>Aberg</b>	400	3 250	16
<b>Beberg</b>	400	3 861	19
<b>Ceberg</b>	400	3 765	19

I beräkningen antas deponeringen ske i två steg för att simulera det planerade förloppet av förvarsutbyggnaden. I steg ett deponeras 400 kapslar och i steg två 200 kapslar per år. Starttiden för steg två bestäms av mängden bränsle som ska deponeras och är olika för de olika platserna. Värmelasten läggs på årsvis för att simulera den verkliga deponeringssekvensen. Detaljer kring deponeringssekvensen i beräkningen finns i tabell 8-3.

Figur 8-9 visar temperaturen på 600 meters djup i Aberg 15 och 200 år efter deponeringsstart. Figur 8-10 visar ett vertikalt snitt av Aberg efter 1 000 år.

Temperaturen vid deponeringshålens rand blir maximal efter cirka 20 år och uppgår då till cirka 60, 50 och 45 °C i Aberg, Beberg respektive Ceberg. I en större skala nås den maximala temperaturen då värmevågor från olika tunnlar interfererar och i Aberg då värme också från de två förvarsplanen överlagras. Maximal medeltemperatur i bergblocken mellan förvarsplanen i Aberg blir cirka 55 °C och nås efter 450 år. Motsvarande temperaturer i förvarsplanen i Beberg och Ceberg är 45 respektive 40 °C och nås efter 90 respektive 80 år.

**Påverkan på ytan:** Värme från förvaret når ytan efter några hundra år. Värmen kommer att ha marginell inverkan på de termiska förhållandena på markytan. Effekten är jämförbar med det naturliga geotermiska värmeflödet vilket i sin tur är mindre än en promille av effekttillförseln vid solsken.

### 8.6.3 Tilltro

#### *Processförståelse*

Den grundläggande förståelsen av olika värmetransportfenomen är god för såväl kapsel, buffert som berg, se Processrapporten.

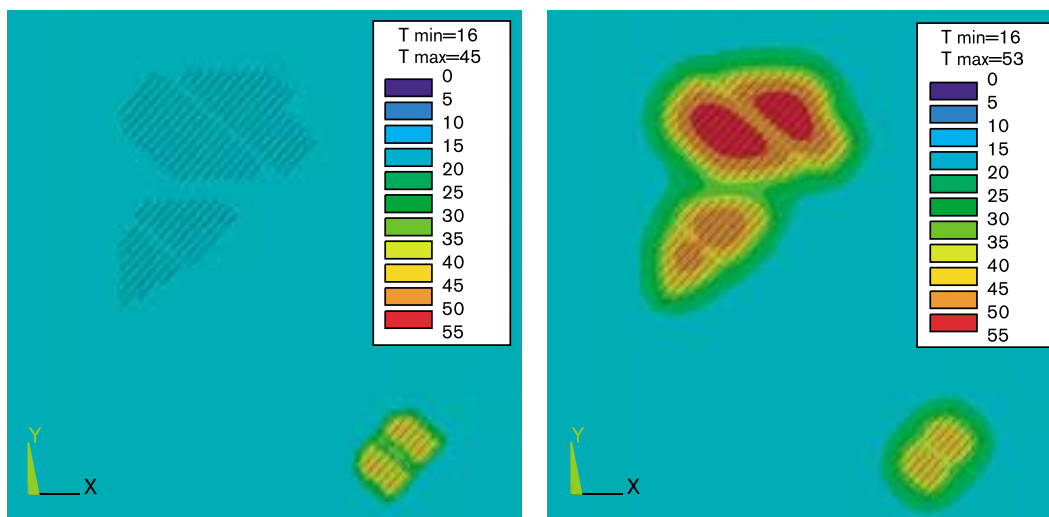
#### *Modeller*

Tillgängliga modeller representerar tillräckligt väl värmetransport i förvarets olika delar. För geosfären finns fullgoda både analytiska och numeriska modeller.

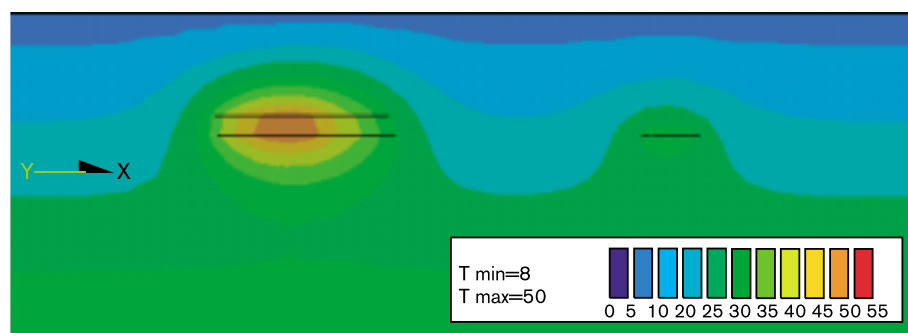
#### *Data*

Analysen kräver data om resteffekt för bränslet (från strålrelaterad utveckling) liksom termiska och geometriska data för kapsel och buffert. Dessutom krävs platsspecifika termiska data för geosfären. I allmänhet är data om värmeöverföring mellan olika medier, t ex gjutjärnsinsats och kopparkapsel eller kapsel och buffert, mer osäkra än värmeledningsdata inom ett medium.

Dataosäkerheter hanteras pessimistiskt vid uppskattningen av kapselns ytemperatur. I övrigt är kvaliteten hos data tillräcklig för de beräkningar som krävs i basscenariot.



**Figur 8-9.** Temperaturen på 600 meters djup i Aberg 15 och 200 år efter deponeringsstart.



**Figur 8-10.** Temperaturen i ett vertikalt snitt vid Aberg 1000 år efter deponeringsstart. De horisontella svarta strecken markerar förvaret. Toppen i figuren svarar mot markytan.

#### 8.6.4 Slutsatser

Kravet att kapselns ytemperatur inte får överstiga 100 °C kan alltid uppnås med nödvändig säkerhetsmarginal genom att välja lämpliga avstånd mellan deponeringshålen eller genom att anpassa bränsleinhåll i kapslarna. Kravet verifieras genom standardiserade temperaturberäkningar där dataosäkerheter hanteras pessimistiskt.

Beräkningar av den termiska utvecklingen i övrigt kan genomföras med tillräcklig precision. Resultaten har ingen direkt bäring på säkerheten utan används i framför allt beskrivningen av den mekaniska och den kemiska utvecklingen.

## 8.7 Hydraulisk utveckling

### 8.7.1 Överblick

Den hydrauliska utvecklingen i basscenariot berör bara buffert/återfyllning och geosfär så länge kapseln är intakt. Kapseln inre och bränslet är hydrauliskt isolerade av den intakta kapseln.

Initialt är geosfären kring förvaret delvis dränerad till följd av bygge och drift. Vid dräneringen kan djupare liggande grundvatten, ofta med högre salthalt, "sugas upp" till förvarsdjup, s k upconing. Dränering och återgång till ursprunglig grundvattennivå sker successivt i takt med att olika delar av förvaret byggs och efter deponering återfylls och försluts. En tid efter förslutning förväntas grundvattnets nivå och flödesmönster återgå till det ursprungliga tillståndet.

Buffert och återfyllning är vid deponeringen delvis vattenmättade. Efter deponeringen kommer de med tiden att mättas med vatten. Tidsåtgången för detta förlopp beror av vattenflödet kring tunnlar och deponeringshål och förväntas i allmänhet ta något tiotal år.

Efter vattenmättnad är vattenledningsförmågan hos bufferten mycket låg vilket bidrar till dess isolerande funktion i förvaret. I geosfären nås ett mer eller mindre konstant flödes-tillstånd efter att grundvattennivån återgått till den ursprungliga.

### *Hydrauliska processer*

Det följande är en sammanfattning ur Processrapporten av beskrivningarna av de hydrauliska processer som rör basscenariot.

Den dominerande hydrauliska processen i **geosfären** är grundvattenströmning. Den grundläggande drivkraften för grundvattenflödet i geosfären är tryck- och potentialskillnader mellan olika punkter. Ytterst drivs flödet av nederbörden.

I de områden som kan vara aktuella för ett djupförvar har geosfären en förhållandevis låg genomsläpplighet för vatten och detta leder till att grundvattennivån i allmänhet kommer att följa landskapets topografiska variationer. Skillnaderna i grundvattennivån ger skillnader i potentiell energi mellan olika punkter. Grundvattenflödet strävar efter att utjämna skillnaderna medan nederbörden ständigt "fyller på" grundvattennivån och en jämviktssituation för flödet utbildas. Grundvattnet strömmar i geosfärens spricksystem och rinner förr eller senare ut i källor eller direkt i vattendrag, sjöar eller hav.

Flödesmönstret i geosfären bestäms av storleken hos energiskillnaderna och av geosfärens vattenledande förmåga. Ledningsförmågan bestäms framför allt av sprickstrukturen som är starkt heterogen. Kunskapen om sprickstrukturen utgör den dominerande osäkerheten i beskrivningen av grundvattenströmningen.

Strömningen påverkas också av variationer i salthalt och därmed vattendensitet mellan olika partier av geosfären. Salthalten ökar vanligen med djupet. Salthalterna kan variera på lång sikt till följd av kvardröjande förändringar från den senaste istiden. En annan långsiktig förändring som kan påverka grundvattenströmningen är den pågående landhöjningen som bl a leder till en förskjutning av kustlinjen. Utfällning/upplösning av sprickmineral kan förändra de hydrauliska egenskaperna i spricksystemet, men detta förväntas ge nämnvärda effekter endast vid större klimatförändringar /Processrapporten/.

Grundvattenströmningen är viktig att beskriva i basscenariot eftersom grundvattnet transporterar vattenlösta ämnen och därmed påverkar förvarets kemiska miljö.

Till de hydrauliska processerna i geosfären räknas även gastransport. Gastransport kommer in i basscenariot framför allt genom att luft transporteras bort då mätnadsförhållandena återupprättas i geosfären. Eventuell gas som därefter förekommer kan med god marginal lösas i grundvattnet och ingen gastransport förväntas. Gastransport behandlas därför inte explicit i basscenariot, se vidare Processrapporten.

I **buffert och återfyllning** förekommer de två hydrauliska processerna vattentransport och gastransport. Vid deponeringen står buffert/återfyllning inte i hydraulisk jämvikt med det omgivande berget. Bufferten strävar efter att ta upp vatten tills en sådan jämvikt uppnås. De viktigaste drivkrafterna är lermineralets förmåga att binda vatten och osmos som tillsammans skapar ett undertryck mot det omgivande berget. Förloppet är ett komplicerat samspel mellan bl a vattenflöde och värmeflödet från kapseln genom bufferten. Parallellt med vattenflödet kan även ånga transporteras utåt från det varmare inre till de yttre delarna av bufferten där ångan kondenserar.

Så småningom fylls porerna helt med vatten, buffert/återfyllning sägs vara vattenmättade. De hydrauliska förhållandena i det omgivande berget är avgörande för hur lång tid det tar att nå detta tillstånd. Under förloppet sväller bufferten och mot slutet uppstår därvid ett svälltryck mot kapsel och berg som motsvarar bentonitens vattenbindande förmåga. Vattnet i bentoniten och grundvattnet i berget har då nått ett jämviktsstillstånd och inget ytterligare vattenutbyte sker.

Den detaljerade utvecklingen vid mätnadsförloppet är inte viktig att beskriva i säkerhetsanalysen. Däremot behövs en beskrivning av tillståndet bufferten uppnått vid mätnad samt en uppskattning av hur lång tid mätnadsprocessen tar.

Efter vattenmättnad har bufferten en mycket låg vattengenomsläpplighet. Vattenlösta ämnen transporteras då genom bufferten huvudsakligen med diffusion.

Även i buffert/återfyllning förekommer gastransport i basscenariot framför allt genom att innestängd luft från deponeringsskedet tidigt lämnar förvaret. Därefter förväntas bildningen av gas vara så liten att gasen med god marginal ska kunna lösas i buffertens/återfyllningens porvatten. Någon transport i gasfas behandlas därför inte vidare i basscenariot, se vidare Processrapporten.

### ***Kopplingar till förvarets övriga utveckling***

I bufferten finns en koppling till den termiska utvecklingen under vattenmättnadsfasen. Den hydrauliska utvecklingen påverkar den mekaniska framför allt genom svällningen av bufferten, och den kemiska genom advektion i geosfären.

### ***Vad behöver visas i basscenariot?***

I basscenariot behövs:

- en grov redovisning av den platsspecifika hydrauliska utvecklingen i geosfären samt
- en mer detaljerad beskrivning av den hydromekaniska utvecklingen då buffert/återfyllning vattenmättas.

## ***Betydelse för säkerheten***

Den hydrauliska utvecklingen i geosfären berör indirekt kapselns isolerande förmåga eftersom grundvattnet transporterar vattenlösta ämnen och därmed påverkar kemiska förlopp som kapselkorrosion.

Buffertens hydrauliska utveckling berör inte direkt kapselns isolerande förmåga. Det är dock viktigt att säkerställa att bufferten mättas under alla förhållanden för att den långsiktigt ska fungera som avsett i förvaret. Dessutom är det viktigt att studera svälltryckets uppbyggnad då bufferten mättas, bl a för att kunna bedöma vilka påfrestningar ett eventuellt ojämnt svälltryck innebär för kapseln.

## **8.7.2 Hydraulisk utveckling i geosfären vid Aberg, Beberg och Ceberg**

### ***Naturlig flödessituation, dränering och återmättnad***

Då förvaret byggs kommer området att delvis dräneras för att successivt återgå till den naturliga situationen då förvaret efterhand återfylls.

Praktiska erfarenheter i svensk berggrund av dränering kring olika typer av undermarksanläggningar visar att omfattningen i hög grad beror av det vattenförande spricksystemets hydrauliska och strukturella egenskaper /Axelsson m fl, 1994/. Erfarenheterna från Äspölaboratoriet stödjer denna uppfattning /Rhén m fl, 1997a/.

Cox och Rodwell /1989/ har med numerisk modellering och analytiska beräkningar studerat betydelsen av bergets vattengenomsläpplighet, förvarsdjup och intern gasproduktion för återmättnadstiden av förvarsnivån i ett djupförvar. För platserna innebär Cox och Rodwells /1989/ resultat att tiden för återmättnad av förvarsnivån förmodligen är kortast i Aberg och längst i Ceberg under i övrigt likartade förhållanden. En enkel överslagsberäkning på mängden inläckande vatten i Äspölaboratoriet visar att en hypotetisk förvarsanläggning på den platsen skulle återmättas inom 1–10 år. I ett djupförvar kommer man dock troligen att begränsa inflödet i förhållande till det som nu förekommer i Äspölaboratoriet, vilket skulle ge en längre återmättnadstid. I överslagsberäkningen antas att halva den öppna tunnelvolymen ska fyllas med tillrinnande vatten.

I samband med dränering och återmättnad kan djupt liggande salt vatten tränga upp till förvaret, s k upconing. Detta diskuteras kort i den kemiska utvecklingen för geosfären, avsnitt 8.9.2.

I takt med att geosfären återmättats förväntas flödesmönstret återgå till den ursprungliga, naturliga situation som rådde innan förvaret byggdes.

Beräkningar av regionala grundvattenflöden för ostörda, naturliga förhållanden sammanfattas nedan för de tre platserna. Texten bygger bl a på hydrogeologiska beskrivningar av Aberg, Beberg och Ceberg /Walker m fl, 1997/ som är baserade på en stor mängd material från undersökningar av platserna. Sammanfattningen nedan är kortfattad. En mer detaljerad beskrivning av den lokala flödessituationen för platserna redovisas i kapseldefektscenariot, kapitel 9.

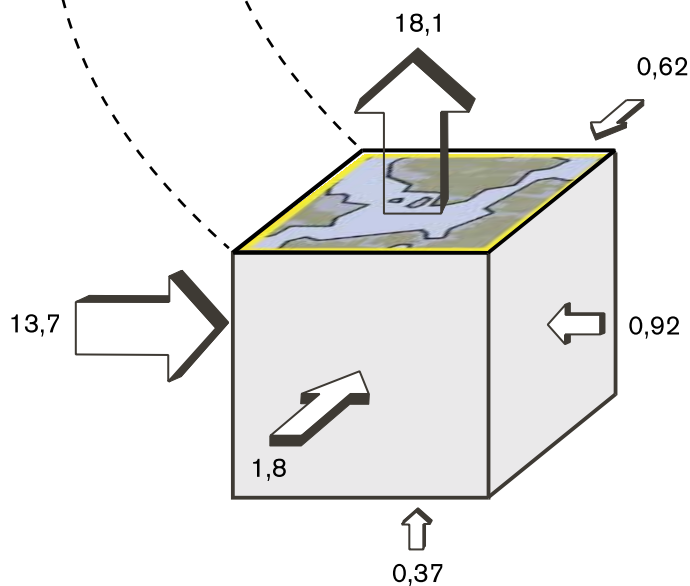
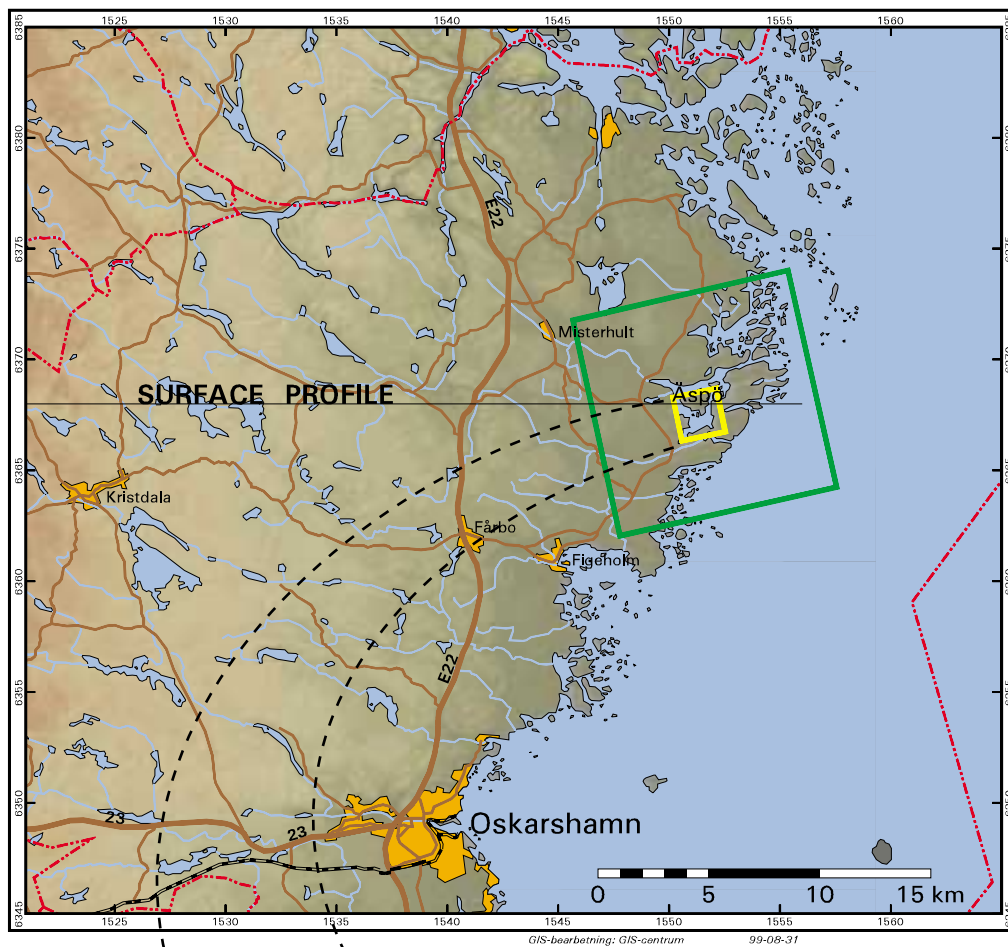
På lång sikt leder bl a landhöjningen till förändringar i det naturliga flödesmönstret. Detta diskuteras sist i avsnittet.

### ***Storskalig naturlig flödessituation vid Aberg***

Regionen kring platsen karakteriseras av låglänt, kustnära terräng med en höjdskillnad på omkring 30 meter från havsnivån till områdets västra del. I terrängen finns ett stort antal mindre avrinningsområden, se figur 8-11. Dessa beskrivs närmare i Walker m fl /1997/. Den regionala grundvattenytan följer topografin och det regionala flödet är på grund av de topografiska nivåskillnaderna riktat från de höga områdena i väster mot kusten i öster. I kustområdet finns bräckt vatten under det söta ytvattnet.

Ett 100 km<sup>2</sup> stort område studeras i en storskalig flödesmodell för Aberg /Svensson, 1997/. Modellen inkluderar densitetsdriven strömning där densiteten beror av salthalten. Modellen simulerar de centrala hydrologiska processerna i området som infiltration, avrinning och saltvatteninträngning under land. Modellen har kalibrerats med hjälp av uppmätta grundvattennivåer och salthaltsfördelningar. Figur 8-11 ger en illustration av grundvattnets flödesmönster vid platsen baserad på modellberäkningarna. Studien visar bl a följande:

- Grundvattenflödet är riktat från de högre områdena väster ut och ned mot kusten. Utströmningsområden för ett tänkt förvar vid Aberg blir de havsvikar som omger ön.
- Grundvattenbildningen ger en lins av sötvatten under ön ner till omkring 200 meters djup. Vid det angränsande Laxemarområdet är motsvarande djup 700–800 meter.
- Flödet på förvarsdjup på den tänkta förlägningsplatsens är typiskt tre liter/(m<sup>2</sup>•år) i den grova upplösningen som den storskaliga modellen medger. För mer detaljerade beräkningar hänvisas till avsnitt 9.8.



**Figur 8-11.** Den övre figuren visar modellområdet för storskalig (grön) och lokal (gul) grundvattenmodellering vid Aberg. Den undre visar summaflöden över begränsningssytor till den lokala modellen (liter/sekund) från den storskaliga modellen. Det lokala modellområdet är  $2\,400 \times 2\,200 \times 1\,250 \text{ m}^3$ .

### **Storskalig naturlig flödessituation vid Beberg**

Området ligger omkring 15 km öster om den norra upplandskusten, i en relativt låglänt terräng med flacka berghällar, myrar och mindre insjöar (figur 8-12). I den omgivande regionen varierar höjden över havet mellan noll och 60 meter. Medelhöjden i regionen är cirka 30 meter. Den norra delen av regionen dräneras av Dalälven, Tämnrån, Forsmarksån och Olandsån. Den södra delen dräneras av Mälaren via Örsundaån och Fyråsån. Grundvattenytan i regionen är relativt jämn på grund av flack topografi. Det regionala grundvattenflödet är riktat från sydväst mot nordost /Andersson m fl, 1991/.

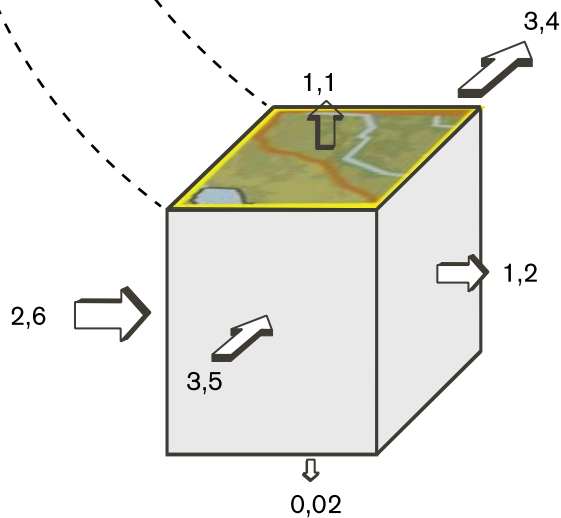
Ett 150 km<sup>2</sup> stort område studeras i en storskalig flödesmodell för Beberg /Hartley m fl, 1998/. För att förstå grundvattenströmning och salthaltsfördelning vid Beberg är det nödvändigt att beakta områdets historiska utveckling över de senaste årtusendena. I studien antas att berget för 9 000 till 4 000 år sedan, då Yoldia- och Litorinahaven täckte området, helt mättades med salt grundvatten. Modellen simulerar utvecklingen under tidsperioden från Litorina till nutid. Figur 8-12 ger en illustration av grundvattnets flödesmönster vid platsen. Studien visar bl a följande:

- Området har två tänkbara utströmningsvägar. Öster om det tänkta förvaret finns en relativt kort flödesväg som följer en vertikal sprickzon; västerut finns ett längre strömningsstråk genom bergmassan.
- Den höga permeabilitetskontrasten mellan bergmassa och sprickzoner leder till att sprickzonerna blir dominerande strömningsvägar.
- Densitetsvariationerna orsakade av varierande salthalter har en stor inverkan på grundvattenflödet. Det salta grundvattnet strävar neråt så att strömningsvägarnas längd och grundvattnets strömningstid förlängs.
- Den pågående storskaliga utvecklingen sedan föregående istid är också avgörande för grundvattenflödet vid Beberg som alltså förändras över tiden av denna orsak.
- Flödet på förvarsdjup på den tänkta förläggingsplatsens är typiskt en liter/(m<sup>2</sup>•år) i den grova upplösningen som den storskaliga modellen medger. För mer detaljerade beräkningar hänvisas till avsnitt 9.8.





GIS-bearbetning: GIS-centrum 99-08-31



**Figur 8-12.** Den övre figuren visar modellområdet för storskalig (grön) och lokal (gul) grundvattenmodellering vid Beberg. Den undre visar summaflöden över begränsningsytorna till den lokala modellen (liter/sekund) från den storskaliga modellen. Det lokala modellområdet är  $4\,130 \times 5\,355 \times 1\,505 \text{ m}^3$ .

### ***Storskalig naturlig flödessituation vid Ceberg***

Området kring Ceberg har till skillnad från Aberg och Beberg en signifikant topografisk relief med en höjd som varierar mellan cirka 300 meter över havet och havsnivå. Området ligger mellan vattendragen Husån och Gideälven och har lokalt en relativt jämn topografi. Både brunnars geografiska läge och grundvattenkartans konturer talar för att grundvattensystemet på den centrala platån i regionen domineras av ett inströmningsområde och att utströmning sker till vattendrag i sprickzonsdalarna /Walker m fl, 1997/. Det är rimligt att anta att det regionala grundvattensystemet drivs av topografin och rinner från de högre regionerna i norr och väst genom undersökningsområdet mot havet.

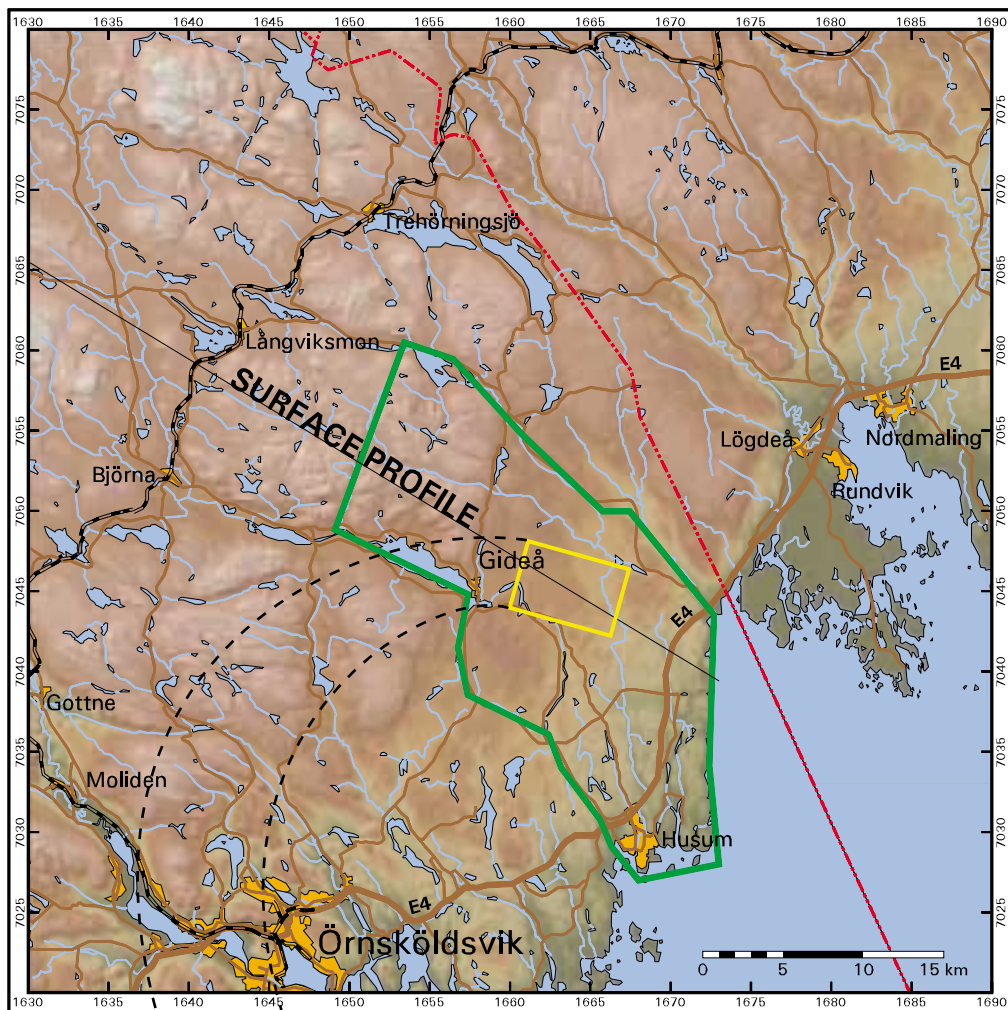
I den storskaliga flödesmodellen för Ceberg /Boghammar m fl, 1997/ studeras ett 300 km<sup>2</sup> stort område. Inget salt grundvatten har påträffats i borrhål ner till 700 meters djup vid platsen och överslagsberäkningar bekräftar att salt grundvatten endast bör påträffas på större djup. Densitetsdriven grundvattenströmning har därför försumrats i de storskaliga beräkningarna. Figur 8-13 ger en illustration av grundvattnets flödesmönster vid platsen. Studien visar bl a följande:

- Vattnet som passerar genom undersökningsområdet på 500 meters djup, strömmar huvudsakligen ut i tre olika delområden öster, söder och väster om förvarsplatsen.
- Grundvattenflödet är främst styrt av lokala betingelser. Storskaliga grundvattenrörelser syns endast betydligt djupare än typiskt förvarsdjup och dessa rörelser är dessutom mycket långsamma.
- Flödet på förvarsdjup på den tänkta förlägningsplatsens är typiskt 0,03 liter/(m<sup>2</sup>•år) i den grova upplösningen som den storskaliga modellen medger. För mer detaljerade beräkningar hänvisas till avsnitt 9.8.

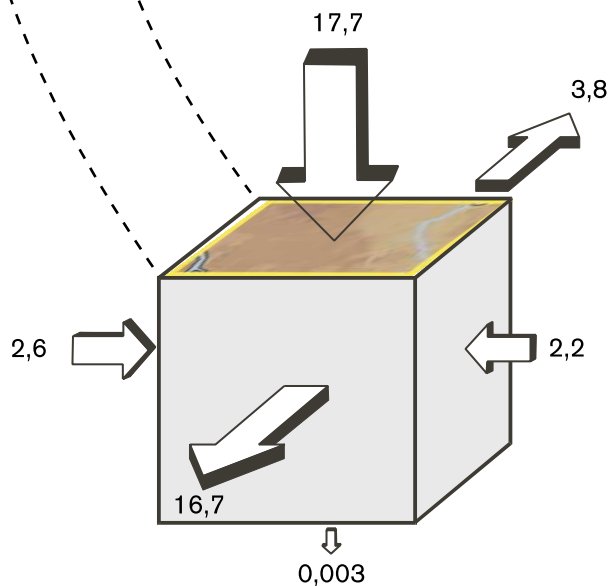
### ***Jämförelser mellan Aberg, Beberg och Ceberg***

Undersökningsmetodiken som använts för de tre platserna skiljer sig relativt mycket. En jämförelse av beskrivningarna ovan ger ändå följande:

- Skillnader i platsernas hydrogeologiska karaktär beror på generella hydrologiska drag som inströmnings- och utströmningsområden, topografisk relief samt andelar salt och sött vatten.
- Den tolkade hydrauliska konduktiviteten i Aberg och Beberg ligger på samma nivå medan Ceberg har lägre konduktivitet. Detta styr också i hög grad de beräknade flödena på typiskt förvarsdjup.
- Kontrasten i hydraulisk konduktivitet mellan sprickzoner och bergmassa är lägre i Ceberg än övriga platser.
- De beräknade naturliga gradienterna på förvarsdjup för de tre platserna är för Aberg 0,05–0,2 procent, för Beberg 0,2–0,3 procent och för Ceberg 0,5–0,6 procent /Svensson, 1997; Hartley m fl, 1998; Boghammar m fl, 1997/.



GIS-bearbetning: GIS-centrum 99-08-31



**Figur 8-13.** Den övre figuren visar modellområdet för storskalig (grön) och lokal (gul) grundvattenmodellering vid Ceberg. Den undre visar summaflöden över begränsningsytorna till den lokala modellen (liter/sekund) från den storskaliga modellen. Det lokala modellområdet är  $6\,510 \times 4\,290 \times 1\,190 \text{ m}^3$ .

### **Långsiktiga förändringar i flödessituationerna**

Landhöjningen leder till förändringar i det långsiktiga naturliga flödesmönstret. Även långsiktigt varierande salthalter (densiteter) kan påverka strömningen.

Voss och Andersson /1993/ konstaterar att strandlinjeförskjutning, dvs den kombinerade effekten av landhöjning och sänkning av havsvattennivån, är en viktig hydrologisk process för områden vid den Baltiska skölden.

Dagens strandlinjeförskjutning är framför allt viktig att beskriva under innevarande klimatperiod cirka femtusen år framåt. Efter denna tidpunkt, alltså under den stora merparten av förvarets livslängd, förväntas andra förhållanden dominera. Dessa beskrivs närmare i klimatscenariot, kapitel 10.

Strandlinjeförskjutningen har inte beaktats vid de regionala modelleringsstudierna av Aberg och Ceberg. Vid Beberg har den transienta historiska utvecklingen beaktats enligt ovan; simulering framåt i tiden har dock inte gjorts.

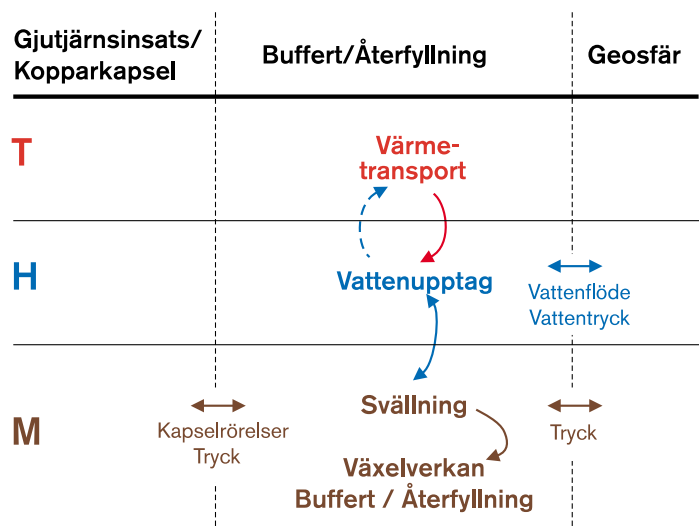
I en kompletterande studie för Aberg /Svensson, 1999/ simuleras den historiska utvecklingen från tiotusen år innan dagens situation till femtusen år efter dagens situation. Samma strukturgeologiska modell och hydrogeologiska egenskaper som i Svensson /1997/ används. Den transienta modellen /Svensson, 1999/ kan kvalitativt förklara den kemiska sammansättningen av grundvattnet, dvs hur olika vattentyper under olika tidsperioder dominerat grundvattnet vid Aberg. Modellen förutspår också något ökande specifika flöden på förvarsnivå, och något kortare gångtider från förvarsnivå till biosfär, femtusen år framåt i tiden jämfört med dagens situation. Dessa skillnader är dock små jämfört med övriga osäkerheter.

På motsvarande sätt konstaterar Hartley m fl /1998/ att effekten av landhöjning är försumbar vid beräkning av gångtider och utläppspunkter till biosfären för dagens förhållanden vid Beberg. Detta beror på att kusten för mer än tvåtusen år sedan drog sig tillbaka flera kilometer från Beberg. Hartley m fl /1998/ bedömer att landhöjning är en viktigare process för andra platser närmare dagens kustlinje.

### **8.7.3 Hydromekanisk utveckling i buffert/återfyllning**

När förvaret förslutits kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Den mättade bufferten kommer att utbilda ett svälltryck som påverkar berget, kapseln och återfyllningen mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bufferten är en komplicerad process som bl a beror av temperatur, smektit- och vattenhalt i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för vattenmättnad är ett kapillärt undertryck i buffertens porer som leder till ett vattenupptag från berget.

Detaljerna i vattenmättnadsprocessen är inte väsentliga att beskriva i säkerhetsanalysen. Det är ändå viktigt att ha en bild över hur vattenmättnaden går till, eftersom buffertens tillstånd efter processen är utgångspunkten för den fortsatta beskrivningen av förvarets funktion.



**Figur 8-14.** De processer som inkluderats i modelleringen av buffertens hydromekaniska utveckling.

Vattenmättnadsprocessen är kopplad till buffertens termiska utveckling eftersom temperaturfördelningen i bufferten spelar en avgörande roll för mättnadsförloppet. Genom svällningen finns också en stark koppling till den mekaniska utvecklingen. Både kapsel och återfyllningsmaterialet i tunneln ovanför deponeringshålet påverkas mekaniskt vid svällningen. Den hydrauliska växelverkan mellan buffert och berg har avgörande betydelse för mättnadsförloppet. De hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet avgör helt hur mättnadsprocessen utvecklas i tiden.

Samtliga dessa processer och kopplingar har studerats i en integrerad modellering där buffertens hydrauliska utveckling står i centrum /Börgesson och Hernelind, 1999/. Figur 8-14 visar de processer som inkluderats i modelleringen.

Temperaturfördelningen i bufferten beräknas för den vattenmättnad som råder vid deponeringen och används sedan i de hydromekaniska beräkningarna genom hela vattenmättnadsförloppet. Denna förenkling överskattar temperturgradienten vid längre tider, men detta har liten betydelse för mättnadsförloppet jämfört med skillnaderna i bergets egenskaper i de olika beräkningsfallen.

Den hydrauliska utvecklingen beräknades sedan för en rad olika hydrauliska förhållanden i närberget. Dessutom beräknades för samtliga fall det svälltryck som uppstår mot slutet av förloppet. Svällningen leder till att bufferten expanderar uppåt och delvis tränger undan återfyllningsmaterialet i tunneln ovanför deponeringshålet. Även detta modellerades.

Avgörande för förloppets utveckling är alltså de hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad inom ett fåtal år. En rad förhållanden i berget har betydelse för vattentillgången:

- Bergets hydrauliska konduktivitet (vattenledningsförmåga).
- Den hydrauliska konduktiviteten hos den störda zonen kring deponeringshålet.
- Transmissiviteten hos de sprickor som skär deponeringshålet.

- Återfyllningens hydrauliska konduktivitet.
- Vattentrycket i berget.
- Ångbildning i berget<sup>1</sup>.

Samtliga dessa förhållanden varierades i beräkningarna.

### **Typiskt fall för vattenmättnad**

Som en utgångspunkt för att diskutera betydelsen av olika förhållanden i berget modelleras först ett typiskt fall för mättnadsförloppet. Fallet är valt för att efterlikna de förhållanden man typiskt kan förvänta vid ett deponeringshål.

Bergmatrisen har här en hydraulisk konduktivitet av  $10^{-13}$  m/s och det finns ingen borrhörad zon kring deponeringshålet. Två sprickor skär hålet, en mitt på kapseln och en längst ned i hålet, och dessa skulle ge ett vattenflöde av 0,01 liter/minut till ett tomt hål. Vattentrycket i berget är 5 MPa och ångbildning i berget inkluderas. Bufferten är ursprungligen vattenmättad till 80 procent. Tabell 8-4 sammanfattar förutsättningarna för beräkningen.

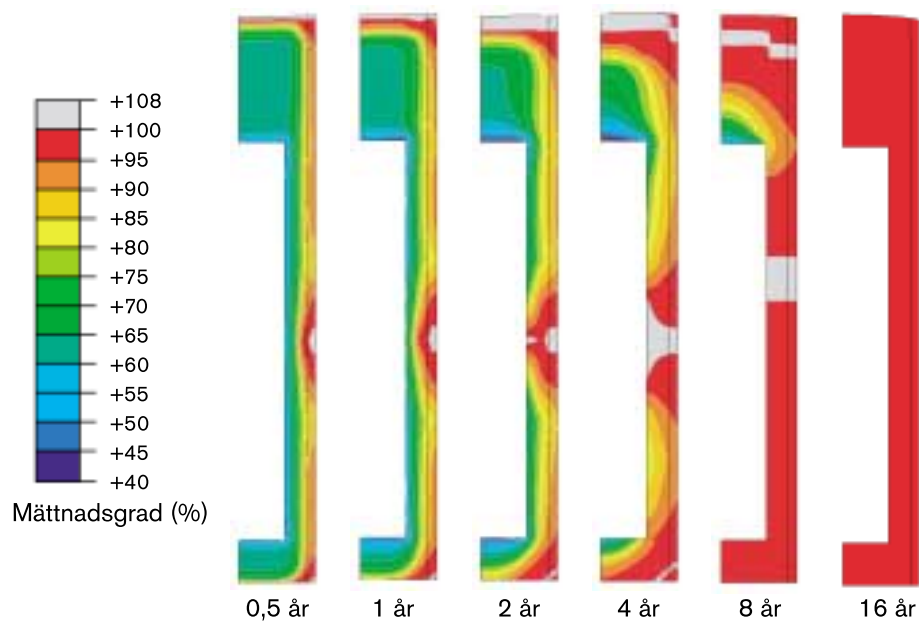
Figur 8-15 visar vattenmättnadsgraden vid olika tider. Vatten tas upp från bergmatrisen, men de huvudsakliga transportvägarna är genom sprickorna och återfyllningen. Tiden för att nå full mättnad för hela bufferten beräknades för detta typiska fall till tolv år.

Figur 8-16 visar porvattentrycket i berget; dragspänningar i vattenfasen ger negativa värden. Om dragspänningarna överskrider 1 MPa (dvs om trycket i figuren underskrider -1 MPa) övergår vatten till ånga och berget dräneras. Så är fallet upp till en halvmeter ut från deponeringshålet mellan sprickorna i figuren.

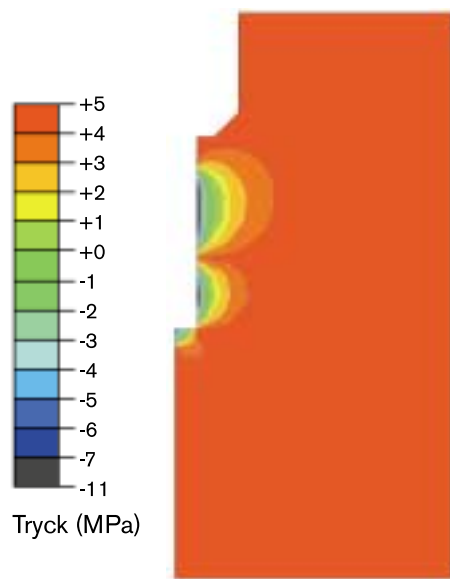
**Tabell 8-4. Förutsättningar för beräkningar av normalfallet för vattenmättnadsförloppet i bufferten.**

Ångbildning i berget	Ja
Borrhörad zon	Nej
Antal sprickor genom deponeringshål	2
Hydraulisk konduktivitet hos bergmatris	$10^{-13}$ m/s
Transmissivitet hos sprickor	$5 \cdot 10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s
Hydraulisk konduktivitet hos återfyllning	$2 \cdot 10^{-10}$ m/s
Vattentryck i berget	5 MPa

<sup>1</sup> Den omättade bufferten har en hög sugförmåga. Om bergets konduktivitet är låg kan bufferten "suga" ut vatten ur berget och orsaka dragspänningar i vattenfasen. Om dragspänningarna överstiger 1 MPa kan berget bli omättat, dvs vattnet går över i ångfas. Ångfasen gör att den hydrauliska konduktiviteten sjunker. I modelleringen av vattenmättnadsförloppet har betydelsen av detta studerats genom att tillåta respektive inte tillåta ångbildning i berget. I de fall där ångbildning inte tillåts kan dragspänningarna bli orealistiskt stora och den hydrauliska konduktiviteten orealistiskt hög.



**Figur 8-15.** Vattenmättnadsgrad i bufferten vid olika tider.



**Figur 8-16.** Porvattentryck i berget efter fyra år.  
Berget är dränerat vid de grå, blå och mörkgröna områdena.

I figur 8-17 visas totaltrycket (summan av svälltryck och vattentryck) i bufferten som funktion av tid.

Följande kan observeras:

- Totaltrycket ökar snabbt i hela bufferten och är ett par MPa redan efter ett år.
- Ytterligare tryckökning kommer som en följd av vattenmättnadsprocessen och trycket ökar betydligt snabbare vid sprickornas mynningar. Trycket mittemot sprickan är efter fyra år ungefär tre gånger större än mot dess topp och botten.
- Trycket ökar sedan snabbare i den nedre delen än i toppen dels eftersom bufferten till en del kan expandera uppåt, dels eftersom mer vatten tillförs nerifrån. Efter åtta år är trycket i botten tre gånger högre än i toppen, men utjämnas sedan på något tiotal år.

Den materialmodell som använts i beräkningarna av svälltrycket ger ett svälltryck för bufferten på 8,1 MPa vid konstant volym. I mättnadsberäkningen varierar det slutliga svälltrycket lokalt mellan 7,5 och 8,75 MPa, beroende på lokala variationer i densitet.

Resultaten av beräkningarna är bl a intressanta för att diskutera vilka mekaniska påfrestningar kapseln kommer att utsättas för, avsnitt 8.8.2. De lastfall kapseln kontrollberäknats för innebär större påfrestningar än de som redovisas ovan, särskilt vad gäller skjuvkrafter från sidorna till följd av ojämn svällning. En ökning av transmissiviteten i sprickorna påverkar inte ojämnheten i tryckuppbyggnaden, eftersom sprickan redan vid  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}$  (fallet ovan) tillför så mycket vatten att det blir buffertens egenskaper som styr takten i mättnadsprocessen.

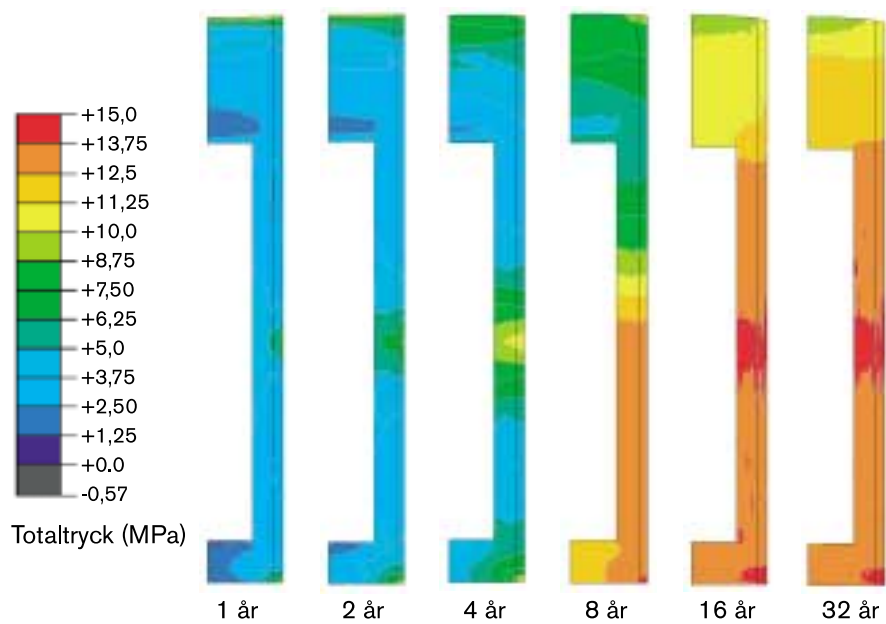
Som ett resultat av svällningen rör sig kapseln uppåt samtidigt som bufferten delvis tränger undan återfyllningsmaterialet i tunneln ovanför deponeringshålet. Dessa rörelser motverkas av återfyllningens svälltryck och tyngd på ett sätt som bestäms av återfyllningens deformerbarhet /Processrapporten/. Figur 8-18 visar rörelsen av kapseln i deponeringshålet och buffertens topp in i återfyllningen som funktion av tid /Börgesson och Hernelind, 1999/.

Kapseln rör sig uppåt ungefär en centimeter och återgår efter cirka tio år till utgångsläget. Bufferten tränger permanent in cirka åtta centimeter i återfyllningen.

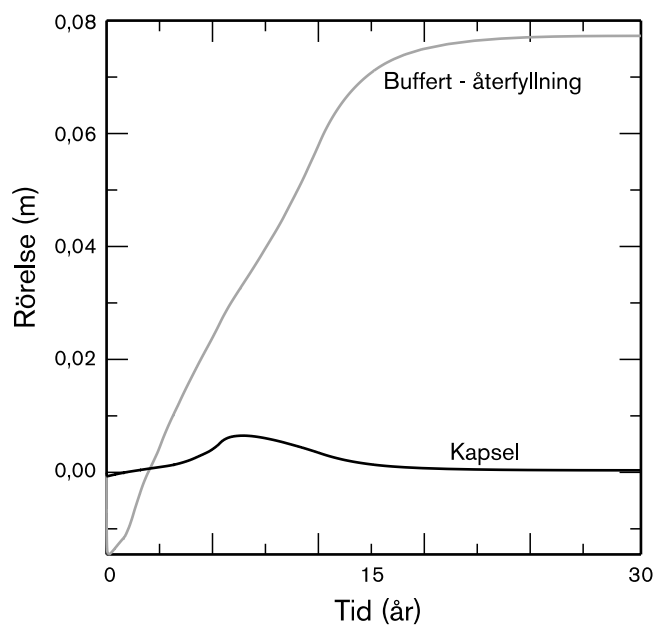
### ***Variationer av vattenmättnadsförloppet***

**Bergets konduktivitet:** En ökning av konduktiviteten i bergmatrisen till  $10^{-10} \text{ m/s}$  ger en nästan dubbelt så snabb mättnad som för huvudfallet, även om inga sprickor skär deponeringshålet. En minskning till  $10^{-14} \text{ m/s}$  i både bergmatris och återfyllning ger däremot en mycket långsam mättnadsprocess. Efter 32 år är den största delen av bufferten då inte vattenmättad till mer än 85 procent och berget är omättat flera meter ut från deponeringshålet. Beräkningen stoppades vid tiden 32 år, men man kan förmoda att det tar mycket lång tid att mätta bufferten under dessa förhållanden. Situationen är dock orimlig eftersom bufferten mäts genom återfyllningen om berget kring deponeringshålet är tätt.





**Figur 8-17.** Totaltryck i bufferten vid olika tider.



**Figur 8-18.** Rörelsen hos kapseln och gränsen mellan buffert och återfyllning som funktion av tid.

**Externt vattentryck:** Vattenmättnadstiden har beräknats med och utan externt vattentryck, dvs med tryckrandvillkoren 5 respektive 0 MPa. Trycket har betydelse endast då mättnadsgraden överstigit cirka 95 procent. Detta beror på att bentonitens sugförmåga minskar kraftigt med ökande mättnadsgrad. Avsaknad av yttre tryck fördubblar tiden för att uppnå full vattenmättnad.

**Störd zon:** I detta sammanhang betyder störd zon en borrhörad zon med en centimeter vidd i deponeringshålets periferi. En sådan zon har enligt beräkningarna begränsad betydelse för mättnadsprocessen eftersom:

- Om det finns sprickor som skär deponeringshålet kommer dessa att dominera vattentillförseln.
- Om det inte finns sprickor underlättar den störda zonen tillförseln av vatten till bufferten, men dess transportkapacitet är begränsad och undertrycket i berget blir nästan lika stort som i det fall där ingen zon finns.

Slutsatsen är att närvaron av en borrhörad zon ökar vattenmättnadshastigheten med maximalt 20 procent.

**Närvaro av sprickor:** Vattenmättnadstiden har beräknats med och utan två vattenförande sprickor som skär deponeringshålets vägg. I de (orealistiska) fall där ångbildning i berget inte inkluderas minskar mättnadstiden med cirka 15 procent om sprickorna är närvarande. Med ångbildning blir effekten större, mättnadstiden minskar med cirka 30 procent. Detta beror på att det omättade berget har lägre konduktivitet och betydelsen av sprickorna blir då större.

**Sprickornas transmissivitet:** Transmissiviteten hos de två sprickor som skär deponeringshålet varierades mellan  $5 \cdot 10^{-12}$  och  $5 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>s, vilket ger ett totalt inflöde till deponeringshålet på mellan 0,01 och 1 liter/minut. Resultaten av dessa fall är identiska, vilket betyder att även sprickor med låg konduktivitet tillför tillräckligt med vatten för buffertens ”behov”.

**Ångbildning i berget:** I flera olika fall har effekten av ångbildning studerats. Slutsatsen är att ångbildning har stor betydelse för vattenmättnadsprocessen om bergmatrisen är den dominerande transportvägen för vatten, men har begränsad betydelse om det finns andra transportvägar.

### ***Buffertens egenskaper efter mättnad***

Vid tiden för full vattenmättnad har bufferten fått de hydrauliska och mekaniska egenskaper som är avgörande för dess långsiktiga funktion i förvaret. Den hydrauliska konduktiviteten ligger under  $10^{-12}$  m/s, vilket innebär att diffusion är den dominerande transportmekanismen mellan kapsel och berg. Svälltrycket har byggts upp till över 5 MPa, vilket gör att kapseln hålls på plats och att bufferten kan ”självläka” eventuella skador.

## 8.7.4 Tilltro

### *Processförståelse, buffert/återfyllning*

**Buffert/återfyllning:** Förståelsen av de processer som driver vattentransport i omättade buffert- och återfyllningsmaterial och kunskapen om hur processerna påverkas av olika faktorer är tillräckligt god för att genomföra tillförlitliga modellberäkningar i säkerhetsanalysen /Processrapporten/.

### *Tilltro till modeller och data för buffert/återfyllning*

Beräkningarna kräver hydrauliska och mekaniska data om buffert/återfyllning samt data om de hydrauliska förhållandena i berget kring deponeringshål, vilket utgör den dominerande osäkerheten i beskrivningen av utvecklingen.

Kvalitet i indata och modeller som används i beräkningarna bedöms som tillräcklig för att genomföra en fullgod analys av den hydrauliska utvecklingen i basscenariot. Precisionen i beräkningarna skulle öka med bättre kunskap om de hydrauliska egenskaperna kring enskilda deponeringshål, något som kan förväntas först vid själva förvarsutbyggnaden. Långsiktiga hydromekaniska konsekvenser av kemiska förändringar i buffert- och återfyllningsmaterialen diskuteras i avsnitt 8.9.3.

### *Tilltro, geosfär*

Processförståelsen är god och kvaliteten i modeller och data för den hydrauliska utvecklingen i basscenariot bedöms som tillräcklig. Även i geosfären utgör spricksystemets struktur och hydrauliska egenskaper en grundläggande osäkerhet. En utförligare diskussion finns i kapseldefektscenariot, kapitel 9.

## 8.7.5 Slutsatser

De redovisade beräkningarna visar att tiden för att uppnå full vattenmättnad ligger mellan sex och 35 år för samtliga variationer, utom för den där bergmassan har extremt låg konduktivitet. Denna skillnad saknar praktisk betydelse för förvarets fortsatta funktion. I fallet med den extremt låga konduktiviteten förväntas bufferten mättas genom vattentillförsel från återfyllningen, men detta förlopp har inte modellerats.

Då full vattenmättnad uppnåtts har bufferten de hydrauliska och mekaniska egenskaper som är avgörande för dess långsiktiga funktion i förvaret. Den hydrauliska konduktiviteten ligger under  $10^{-12}$  m/s, vilket innebär att diffusion är den dominerande transportprocessen mellan kapsel och berg. Svälltrycket har byggts upp till cirka 8 MPa, vilket gör att bufferten kan "självläka" eventuella skador.

Skillnaderna i hydraulisk konduktivitet hos bergmassan i Aberg, Beberg och Ceberg påverkar vattenmättnadstiden. Det är troligt att skillnader mellan de hydrauliska egenskaperna mellan olika deponeringshål på samma plats är större än skillnaden mellan platserna, detta eftersom alla platser förväntas ha några deponeringshål i mycket tätt berg utan vattenförande sprickor.

Tilltron till förståelse, modeller och data bedöms som tillräcklig för basscenariot.

För slutsatser om den hydrauliska utvecklingen i geosfären hänvisas till kapitel 9.

## 8.8 Mekanisk utveckling

### 8.8.1 Överblick

Bränslet är mekaniskt isolerat från omgivningen så länge kapseln behåller sin mekaniska stabilitet.

Efter deponeringen kommer den mekaniska utvecklingen kortsiktigt att domineras av att bufferten till följd av vattenupptag sväller och utövar ett växande svälltryck mot kapsel, återfyllning och deponeringshålets väggar. På lång sikt spelar mekaniska processer i geosfären en avgörande roll för den mekaniska utvecklingen.

Ytterst är det gjutjärnsinsatsens mekaniska hållfasthet som bestämmer konsekvenserna av förvarets mekaniska utveckling.

#### *Mekaniska processer*

Det följande är en sammanfattning ur Processrapporten av beskrivningarna av de mekaniska processer som rör basscenariot.

I **geosfären** råder initialt ett mekaniskt tillstånd där det spänningstillstånd i förvarsberget som rådde innan förvaret byggdes förändrats på grund av spänningsomvandlingar kring förvarets hålrum. Spänningsomvandlingar leder till lokala deformationer av spricksystemet. Lokalt kan sprickor även påverkas mekaniskt av själva byggnationen.

Den fortsatta utvecklingen bestäms av hur geosfären svarar på de olika mekaniska laster den utsätts för. Lasterna kan utgöras av den termiska expansion som uppvärmningen av förvaret leder till, trycket från svällande buffert/återfyllning och storskaliga tektoniska förändringar. Geosfärens reaktion på belastningarna ges av de spännings/deformations-samband som råder i systemet. Förändringarna/deformationerna kan förekomma i form av sprickbildning, reaktivering (rörelser i befintliga sprickor), eller bergkryp (långsamma omlagringar i berget). Dessutom förekommer rörelser i intakt berg dvs kompression/expansion/deformation av i övrigt intakta bergblock. En integrerad beskrivning av geosfärens långsiktiga mekaniska utveckling ges i avsnitt 8.8.3.

I **buffert och återfyllning** kommer vattenupptaget efter deponeringen att leda till svällning. I bufferten leder dessutom uppvärmningen till termisk expansion av porvattnet. Bufferten med sin högre lerhalt kommer att svälla kraftigare än återfyllningen. Detta ger en mekanisk växelverkan mellan buffert och återfyllning i form av att bufferten förväntas tränga upp i den återfyllda tunneln. Buffertrörelser kan också leda till kapselrörelser, så att kapseln skulle kunna röra sig i deponeringshålet. Samtliga dessa processer behandlades i avsnitt 8.7.3 ovan. Svällningen leder också till lerintrång i bergets sprickor. På lång sikt kan också kemiska förändringar i bufferten leda till att svällegenskaperna modifieras, se avsnitt 8.9.3 under kemisk utveckling.

En huvudfråga i förvarets mekaniska utveckling är huruvida **kapseln**, där gjutjärnsinsatsen utgör en viktig mekanisk barriär i förvaret, kommer att tåla de mekaniska påfrestningar den kan komma att utsättas för under olika förhållanden. I processbeskrivningen uttrycks utvecklingen med processerna deformation av gjutjärnsinsats respektive deformation av kopparkapsel. De deformationer som kan förekomma är, så länge kopparkapseln är intakt, orsakade av yttre laster från i första hand buffertens svälltryck och porvattentrycket. Kapselns mekaniska utveckling beskrivs närmare i avsnitt 8.8.2.

Då gjutjärnsinsats och kopparkapsel är intakta förekommer mekaniska påfrestningar mellan bränsle och kapsel endast genom det tryck som byggs upp i kapselns hålrum till följd av heliumbildning vid  $\alpha$ -sönderfall i bränslet. Effekten av den inre tryckupbyggnaden på kapseln är försumbar, se vidare Processrapporten.

I det mekaniskt isolerade **bränslet** kan brott på Zirkaloykapslingen förekomma, bl a till följd av ökat gastryck vid temperaturhöjningar hos bränslet vid djupförvaring. Processen gynnas av kemiska förändringar som kan ske under drifttiden, t ex hydridbildning och försprödning, se vidare Processrapporten. Processen saknar betydelse för den långsiktiga säkerheten så länge kopparkapseln är intakt och behandlas därför inte vidare i basscenariot.

### ***Kopplingar till förvarets övriga utveckling***

Uppvärmningen av förvaret leder till termisk expansion hos samtliga förvarsdelar, vilket utgör en del av den mekaniska utvecklingen. Buffertens vattenupptag leder till svällning, vilket påverkar kapsel och geosfär mekaniskt.

Dessutom leder de mekaniska processerna till geometriska förändringar som dock vanligen är små. Den geometriska formen hos respektive förvarsdel påverkar i stort sett alla processer i förvarssystemet. Sprickgeometrin har t ex avgörande betydelse för grundvattenströmningen.

### ***Vad behöver visas i basscenariot?***

I kommande avsnitt ges en närmare beskrivning av följande aspekter av den mekaniska utvecklingen:

- Den mekaniska utvecklingen för kapseln givet den utveckling som förväntas i buffert/återfyllning. Även effekterna av berg rörelser på kapseln analyseras.
- En beskrivning av geosfärens mekaniska utveckling och dess stabilitet på lång sikt.

Beskrivningen av den mekaniska utvecklingen för buffert/återfyllning har integrerats med beskrivningen av den hydrauliska utvecklingen för dessa systemdelar, avsnitt 8.7.3.

### ***Betydelse för säkerheten***

Den mekaniska utvecklingen kan ha direkt betydelse för säkerheten genom att de mekaniska påfrestningarna på kapseln skulle kunna påverka dess isolerande förmåga.

## **8.8.2 Mekanisk utveckling för kapseln**

Materialet i detta avsnitt är en sammanfattning av beskrivningen av de mekaniska processerna för gjutjärnsinsats/kopparkapsel i Processrapporten.

Kapselns gjutjärnsinsats utgör den främsta mekaniska barriären i förvarssystemet. En viktig del i säkerhetsanalysen är därför att visa hur kapseln över tiden reagerar på de mekaniska påfrestningar den kan komma att utsättas för av buffert och berg. Via bufferten utsätts kapseln för svälltryck och vattentrycket på förvarsdjup. Mekaniska påfrestningar på kapseln kan också orsakas av rörelser i berget.

Vid små belastningar deformeras kapseln elastiskt, dvs den återfår sin ursprungliga form om belastningen tas bort. Vid större laster kan deformationen bli permanent; plastisk deformation. Det är vanligt, men inte nödvändigt, att man dimensionerar konstruktioner så att det finns en god säkerhetsmarginal till gränsen mellan elastisk och plastisk deformation. Denna s k sträckgräns är därför av betydelse vid studier av kapselns hållfasthet. För materialet i gjutjärnsinsatsen är sträckgränsen cirka 235 MPa och för materialet i kopparkapseln omkring 45 MPa.

För kapselinsatsen har hållfastheten kontrollberäknats /Ekberg, 1995/ för ett yttre, jämnt fördelat tryck. De inre stöden i insatsen leder till att den behåller sin form även om lokala deformationer uppstår. Därför har kollapstrycken antagits ligga vid en trycknivå som ger en töjning som motsvarar 80 procent av brotttöjningen. Med detta antagande kommer insatsen i BWR-utformningen att klara yttre övertryck på 80 MPa och den i PWR-utformningen 110 MPa. Detta är långt över det yttre tryck på 12 MPa sammansatt av 7 MPa svällningstryck från bentoniten och 5 MPa vattentryck på 500 meters djup, som kapseln utsätts för i djupförvaret.

För att kunna stoppa in insatsen i kopparkapseln har insatsen en ytterdiameter som är 3,5 mm mindre än kopparkapselns innerdiameter. Med detta spel garanteras en maximal töjning i koppargodset på mindre än fyra procent när kopparkapseln trycks mot insatsen då vattentrycket och bentonitens svälltryck byggs upp. Krypbrotttöjningen kan uppskattas till tio procent. Den maximala töjningen inträffar lokalt på insidan av höljet i närheten av övergången till locket.

### ***Ojämnt svälltryck***

Under vattenmättnadsfasen kan trycket komma att bli ojämnt fördelat över kapseln beroende på den hydrauliska utvecklingen i bufferten, se avsnitt 8.7.3. Efter mättnad kan bestående mindre tryckjämnheter förekomma om t ex kapseln skulle vara snedplacerad eller om deponeringshålets väggar är ojämna. Tidsåtgången för att mätta bufferten beror av tillgången på vatten och varierar mellan något och några tiotal år.

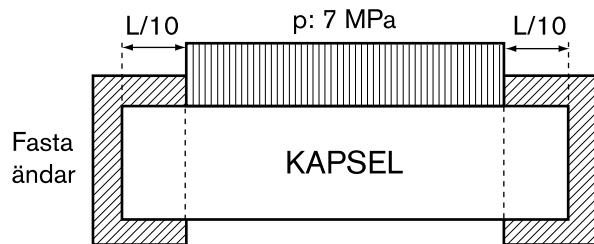
För att analysera de mekaniska konsekvenserna för kapseln i sådana situationer har hållfasthetsberäkningar genomförts /Werme, 1998; Börgesson och Hernelind, 1998/ för ett antal lastfall. Fallen är utformade för att vara pessimistiska förenklingar av inte helt orimliga situationer.

**Vattenmättnadsfasen:** Tre fall har beräknats för tänkbara situationer under vattenmättnadsfasen. I samtliga har tryckskillnader och framför allt inspänningsgrad överdrivits jämfört med förväntade förhållanden i djupförvaret. Lastfallen ger större påfrestningar än fallen för den hydrauliska utvecklingen i bufferten som redovisas i avsnitt 8.7.3.

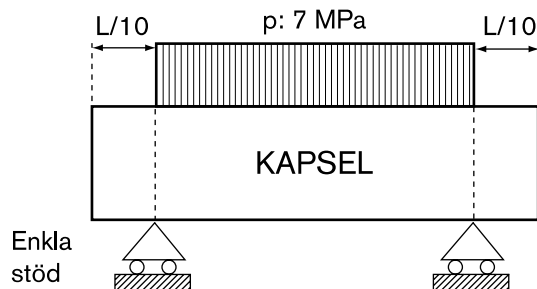
Fall 1. Kapseln är fast inspänd i ändytorna och i en tiondel av längden längs mantelytan närmast ändytorna. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt svälltryck i bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.

Fall 2. Kapseln är fritt upplagd längs en tiondel av längden längs mantelytan närmast ändarna. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt svälltryck från bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.

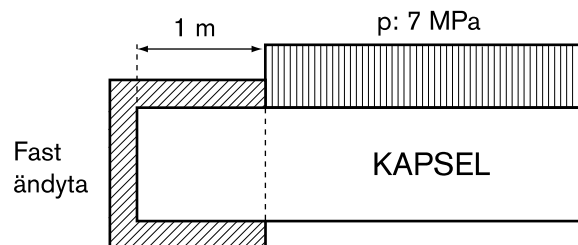
Fall 3. Kapseln är fast inspänd i ena ändytan och 1 meter längs mantelytan närmast denna ändyta. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt utbildat svälltryck i bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.



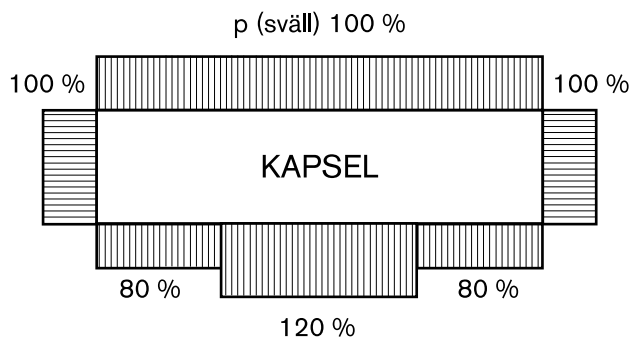
**Figur 8-19.** Lastfall 1.



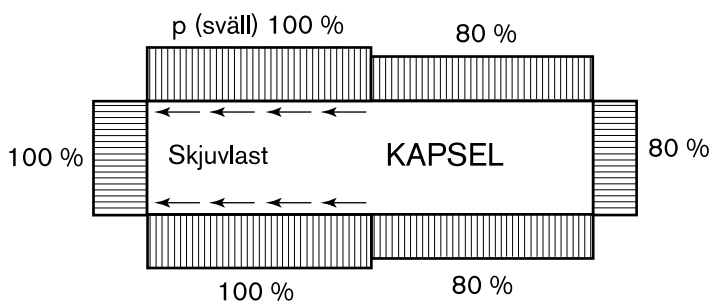
**Figur 8-20.** Lastfall 2.



**Figur 8-21.** Lastfall 3.



**Figur 8-22.** Lastfall 4.



**Figur 8-23.** Lastfall 5.

**Efter vattenmättnad:** Två fall har beräknats för tänkbara situationer efter vattenmättnad.

Fall 4. Svälltrycket är fullt utbildat på ena sidan av kapselns mantelyta och ändytorna. På andra sidan av mantelytan råder 20 procent förhöjt svälltryck längs den centrala halvan och 20 procent sänkt svälltryck längs de resterande fjärdedelarna vid kapselns ändar.

Fall 5. Svälltrycket är fullt utbildat runt nedre halvan av kapseln medan svälltrycket är 20 procent lägre runt övre halvan. Den resulterande uppåtriktade kraften, som uppkommer av skillnaderna i tryck mot kopparkapselns ändytor, balanseras av en skjuvkraft längs nedre halva mantelytan. Detta lastfall ger alltså en belastning på kopparhöljet.

Om de mekaniska spänningarna i kapseln överskrider sträckgränsen kommer kapseln att få en bestående deformation. För fallen 1, 2 och 4 är enkla handboksberäkningar tillräckliga för att konstatera att den maximala böjspänningen ligger under kapselinsatsens sträckgräns som är (235 MPa vid 100 °C), se tabell 8-5.

**Tabell 8-5. Böjmoment och böjspänning för lastfallen 1, 2 och 4 enligt handboksberäkningar.**

Lastfall	Maximalt böjmoment (MNm)	Maximal böjspänning (MPa)
1	7,2	122
2	10,8	183
4	1,7	29



För fall 3 är handboksberäkningar en alltför grov metod för att bedöma insatsens hållfasthet, bl a eftersom buffertens egenskaper inte kommer med. För fallen 2 och 3 har därför finita elementberäkningar genomförts där man även tagit hänsyn till bentonitens materialegenskaper /Börgesson och Hernelind 1998/. Största spänningarna i kapselinsatsen visade sig då ligga under 55 MPa.

I lastfall 5 kan hela lasten tänkas komma att bäras av kopparhöljet. Den obalanserade kraften mellan kapselns ändrar måste bäras av den axiella friktionen mellan koppar och bentonit. Om man bortser från friktionen mellan kopparhöljet och insatsen kommer kraften att tas upp av höljet. Den axiella spänningen i koppargodset kommer då enligt handboksberäkning att bli mindre än 10 MPa att jämföra med sträckgränsen 45 MPa.

Inga sneda belastningar av de postulerade slagen bedöms således kunna leda till skador på kapseln.

### **Bergrörelser**

För att kunna bedöma konsekvenserna av bergrörelser kring deponeringshåll har också kapselns hållfasthet preliminärt beräknats för en postulerad förskjutning på 0,1 meter under 30 dagar längs en horisontell spricka /Börgesson, 1992/. Bergrörelser diskuteras i nästa avsnitt samt i tektonikscenariot, kapitel 11.

Den undersökta kapseln var av en tidigare utformning med en självbärande insats i form av ett stålrör. Kollapslasten för den kapselutformningen ligger i intervallet 45–55 MPa, att jämföras med 80 respektive 110 MPa för nuvarande BWR- och PWR-utformningar. Beräkningarna kan därför i detta avseende betraktas som pessimistiska. Resultaten visade att bergrörelser i storleksordningen 0,1 meter inte leder till omedelbara kapselbrott. Kapseln deformerades plastiskt men kopparhöljet förblev obrutet. De plastiska töjningarna i kopparhöljet låg under 2,5 procent, vilket är lågt i jämförelse med de 40 procent som materialet tål.

En pessimistisk uppskattning av krypdeformationen i kopparkapseln efter bergrörelsen visade att deformationen under en tidsperiod på upp till hundratusen år kunde leda till töjningar på ungefär sex procent på den cylindriska delen på kopparkapseln och upp till 36 procent i locket. Brottöjningen kan uppskattas till tio procent. Det kan därför inte uteslutas att en 0,1 meters bergrörelse kan leda till att kapseln skadas efter mycket lång tid.

Om bergrörelsen är snabbare är detta i praktiken likvärdigt med en högre densitet på bentoniten. Om skjuvrörelsen sker på en sekund istället för 30 dagar skulle detta motsvara en densitet på bufferten på ungefär 2,13 g/cm<sup>3</sup>. Beräkningar för denna densitet har gjorts i skala 1/10 för en kapsel i massiv koppar. Beräkningarna visade plastiska töjningar på upp till fyra procent. Detta är långt från den förväntade brottöjningen för kopparmaterialet. Eftersom beräkningarna genomfördes för en kapsel i massiv koppar är storleken på töjningarna troligen också överskattade. På samma sätt som för den långsammare skjuvrörelsen kan man emellertid inte utesluta ett senare krypbrott på kapseln.

I de följande bergmekaniska analyserna i basscenariot, avsnitt 8.8.3 samt i jordskalvsanalyserna i kapitel 11 förutsätts pessimistiskt att bergrörelser av storleken 0,1 meter och däröver kring ett deponeringshåll kan leda till kapselskador.

### 8.8.3 Mekanisk utveckling i geosfären

De olika processer som styr geosfärens mekaniska utveckling diskuteras ingående i Processrapporten. Den följande texten bygger i hög grad på texten i Processrapporten.

#### **Allmänt**

Kapsel och buffert/återfyllning växelverkar mekaniskt med geosfären. Dels påverkar buffert/återfyllning bergmassan i förvarets närhet, dels påverkas kapsel och buffert/återfyllning av att bergmassan i förvarsberget utsätts för laster som kan bero på uppvärmning, glaciation eller på storskaliga rörelser i jordskorpan. Förvaret kan också påverkas av långsamma tidsberoende förändringar av bergmassans mekaniska egenskaper.

Bergmassan deformeras vid belastningsförändringar på ett sätt som beror av bergstrukturen och av de spännings/deformationssamband som gäller för de ingående komponenterna, dvs det intakta berget och sprickorna. Vid belastningsförändringar påverkas också bergmassans spänningstillstånd.

Vid alla belastningsförändringar sker mindre rörelser i intakt berg, men bergmassans egenskaper gör att betydelsefulla deformationer i första hand sker längs befintliga sprickor, reaktivering. Begreppet reaktivering avser här alla typer av sprickrörelser, inte bara sådana som tidigare skett eller nu sker på grund av rörelser i jordskorpan, utan även sådan som orsakas av lokala störningar, t ex vid tunnelbyggnad. Två typer av rörelse längs sprickor förekommer: skjuvrörelser som innebär relativförskjutningar av sprickyrtorna och normalrörelser som innebär sprickviddsförändringar. Lokala spänningskoncentrationer i små volymer utan lämpligt orienterade sprickor kan ge upphov till brott i intakt berg, sprickbildning. Sprickbildning kan ske i form av nybildning, eller som propagering av befintliga sprickor.

Skjuvrörelser som sker i närfältet kan ha direkt betydelse för säkerheten. Om förskjutningsbeloppet överstiger 0,1 meter och rörelsen sker längs en spricka som skär ett deponeringshål kan kapseln skadas, se vidare avsnitt 8.8.2. Eftersom stora skjuvrörelser bara kan ske utmed sprickor eller sprickzoner som har stor utsträckning i sitt eget plan undviker man deponeringshålpositioner som genomskärs av stora sprickor då förvaret byggs.

Skjuvrörelser som sker i större skala och på något avstånd från tunnlar och deponeringshål har ingen direkt inverkan på säkerheten, vare sig de sker på grund av naturliga orsaker eller på grund av förvarets egen inverkan på förvarsberget. Sådana rörelers inverkan är indirekt och innebär att effekterna av olika belastningsförändringar, t ex tektoniska eller termiska, på spänningstillståndet i närfältet modifieras. I allmänhet är effekten gynnsam, eftersom rörelsen absorberar töjningsenergi och begränsar tillväxten av stora skjuvspänningar i närfältet.

Normalrörelser hos sprickor i närfältet påverkar permeabiliteten kring tunnlar och deponeringshål. Bedömningen för basscenariot i SR 97 är att den sammantagna effekten av normalrörelserna, vilka innebär både aperturminskningar och aperturökningar, inte ger systematiska permeabilitetsförändringar av sådan betydelse att de behöver kvantifieras och beaktas i säkerhetsanalysen, se Processrapporten.

Inte heller normalrörelser som sker i större skala bedöms ge sådana systematiska effekter på genomsläppligheten i närheten av förvaret att de behöver beaktas i säkerhetsanalysen.

Sprickbildning, dvs brott i intakt berg, kan ha direkt betydelse för säkerheten om omfattningen av brottet är sådan att deponeringshålets geometri förändras så att trycket på kapseln blir så stort eller ojämnt att kapseln skadas. Andra effekter av brott, t ex lokala förändringar i genomsläpplighet, bedöms vara av så liten betydelse att de inte behöver kvantifieras eller beaktas i säkerhetsanalysen.

### **Initialtillståndet**

Redan i samband med de berguttag som görs när förvaret byggs utsätts berget för belastningsförändringar. I området närmast tunnlar och deponeringshål sker deformationer och spänningsomfördelningar så att tangentialspänningarna kring hålrummen blir stora och trycket mot hålrumsväggarna försvinner. Initialt, dvs det tillstånd som råder efter deponering och förslutning, har således både rörelser i det intakta berget och rörelser längs existerande sprickor ägt rum. I hålrummens periferi, framför allt i de övre delarna av deponeringshålen, kan spänningskoncentrationerna vara sådana att också brott i intakta bergblock, sprickbildning, har ägt rum. Sprickbildningen kan leda till fragmentering och mindre bergutfall vid deponeringshålsranden eller i tunnelperiferin. Omfattningen beror på bergets mekaniska egenskaper och på det spänningstillstånd, primärspänningstillståndet, som rådde innan förvaret byggdes.

Till ett djup av cirka en meter från tunnelperiferin kan berget ha direktpåverkats eller skadats vid tunneldrivningen. Omfattningen beror på drivningsmetod. I den skadade zonen är de mekaniska egenskaperna förändrade. Uppsprickningen gör att framtida belastningsförändringar inte ger lika stora spänningar som om berget vore opåverkat. Kring deponeringshålen är skadezonen ur mekanisk synpunkt däremot försumbar.

På avstånd större än 10–15 meter från hålrummen är berget opåverkat och spänningstillståndet är identiskt med det som gällde innan förvaret byggdes, dvs primärspänningarna råder fortfarande. För svensk berggrund i allmänhet, och också för de tre förvarsplatserna, gäller att den primära vertikalspänningen i stort sett bestäms av bergets egentyngd och att horisontalspänningarna är något större. Variationer är dock stora, både mellan olika platser och lokalt inom mindre områden. För Beberg och Ceberg ger regressionssamband baserade på bergspänningsmätningar en största horisontalspänning på 500 meters djup av 23 MPa respektive 20 MPa /Ljunggren m fl, 1998/. För Aberg har horisontalspänningar mellan 35 och 40 MPa mätts upp /Leijon, 1995/. Jämförelser mellan spänningstillståndet vid de tre förvarsplatserna är dock osäkra på grund av skillnader i mätmetoder och antal gjorda mätningar.

### **Vattenmättnad av buffert och återfyllning**

Efter deponering och förslutning börjar buffert/återfyllning vattenmättas. Den hårt kompakterade återfyllningen utgör redan i icke vattenmättat skick ett stöd för tunnelperiferin. Det svälltryck som under vattenmättnaden efter hand utbildas på grund av återfyllningens bentonitnehåll är litet och har därför liten inverkan på spänningstillståndet i berget. Bufferten kommer däremot att utveckla ett svälltryck som något reducerar de tangentialspänningar vid deponeringshålsperiferin som fanns initialt. I förhållande till de tangentialspänningar som råder efter borring av deponeringshålen är även denna effekt liten. Vattenmättnaden kan ta något tiotal år, beroende på i vilken takt grundvattentrycket byggs upp i förvaret och också beroende på vattenföringen kring de individuella deponeringshålen, se avsnitt 8.7.3. När svälltrycket väl utvecklats kommer det, under förutsättning att buffertens fysikaliska egenskaper inte förändras, att bestå framgent.

Även om effekten av bufferten och återfyllningen är liten när det gäller spänningsnivåerna, är effekten när det gäller stabiliteten hos berget närmast hålrumsväggarna mycket betydande. Hålrum i hårt belastat berg brukar med tiden deformeras genom progressiva brott med åtföljande fragmentering och bergutfall i de mest ansträngda delarna av periferin, dvs sådana partier som efter berguttaget är i potentiellt brottillstånd. Buffertens och återfyllningens mothåll förskjuter balansen från instabilitet mot stabilitet och begränsar därmed starkt initiering och utveckling av sådana brott.

### ***Värmepulsen: Tiden fram till femtusen år efter deponering***

Direkt efter deponeringen, dvs samtidigt som vattenmättnadsförloppet startar, börjar värme överföras från kapseln till berget via bufferten, se avsnitt 8.6. Värmerörelserna i kristallmatrisen kommer till stor del att omsättas till termospänningar eftersom berget inte kan expandera fritt. Vid deponeringshålsranden når temperaturen ett maximum cirka 30 år efter deponering, se avsnitt 8.6.2. I närfältet invid deponeringshålen blir termospänningarna som störst omkring 50–200 år efter deponering. Därefter minskar termospänningarna, dels på grund av att temperaturen i närfältet sjunker, dels därför att allt större delar av det omgivande berget värms upp och volymexpanderar, vilket minskar inspänningen av närfältsberget.

I närfältet blir termospänningarna stora, inte bara därför att man här får de högsta temperaturerna, utan framför allt därför att närheten till hålrumsväggarna styr spänningsutvecklingen. Kompressionsegenskaperna hos buffert och återfyllning är sådana att trycket mot hålrumsväggarna ökar bara marginellt på grund av uppvärmningen, medan tangentialspänningarna i berget kring hålrummen ökar kraftigt. Det spänningstillstånd med stora skjuvspänningar som råder i närfältet redan initialt accentueras alltså ytterligare, framför allt vid deponeringshålens periferi. Detta kommer att ge skjuvrörelser hos sprickor i närfältet. Beräkningar visar att skjuvrörelserna blir av någon millimeters storlek, se t ex Shen och Stephansson /1996/. Räckvidden av hålrummens mekaniska inverkan är begränsad till cirka 10–15 meter. På större avstånd från hålrummen, t ex mellan deponeringstunnlarna, innebär temperaturförhöjningen att horisontalspänningarna ökar medan vertikalspänningarna påverkas bara marginellt. Spänningsnivåerna intill deponeringshålen kommer att vara sådana att också brott i intakt berg kan uppstå. Områdena som är i brottillstånd är dock små. Mothållet från bufferten begränsar dessutom både omfattningen av uppsprickningen och konsekvenserna i form av möjlig rörelse hos lösgjorda fragment. Efter femtusen år är temperaturen i området kring förvaret fortfarande cirka 15 °C högre än initialt och termospänningarna kring hålrummen 10–20 MPa, se figur 8-24.

I förvarsskalan (storleksordningen 1 000 meter) är termospänningarna oberoende av hålrummen och av deponeringsgeometrin. Efter cirka 50 år har man ett maximalt tillskott av horisontella tryckspänningar i en tunn skiva kring själva förvaret. Över och under den tunna skivan får man reduktioner av de tryckspänningar som rådde initialt. Efterhand som värmevågen breder ut sig utjämnas spänningarna så att utsträckningen av området med förhöjda horisontalspänningar blir större, dvs den tunna skivan blir allt tjockare, samtidigt som spänningsförhöjningen blir allt mindre, se figur 8-24. Utanför det växande området med tryckspänningstillskott finns ett område med reducerade horisontella tryckspänningar. Strax under markytan kan detta i teorin resultera i horisontella dragspänningar. I verkligheten får man räkna med att brantstående sprickor och sprickzoner utan förmåga att överföra dragspänningar istället vidgas så horisontalspänningarna blir nästan noll. De vertikala spänningarna är i huvudsak bestämda av

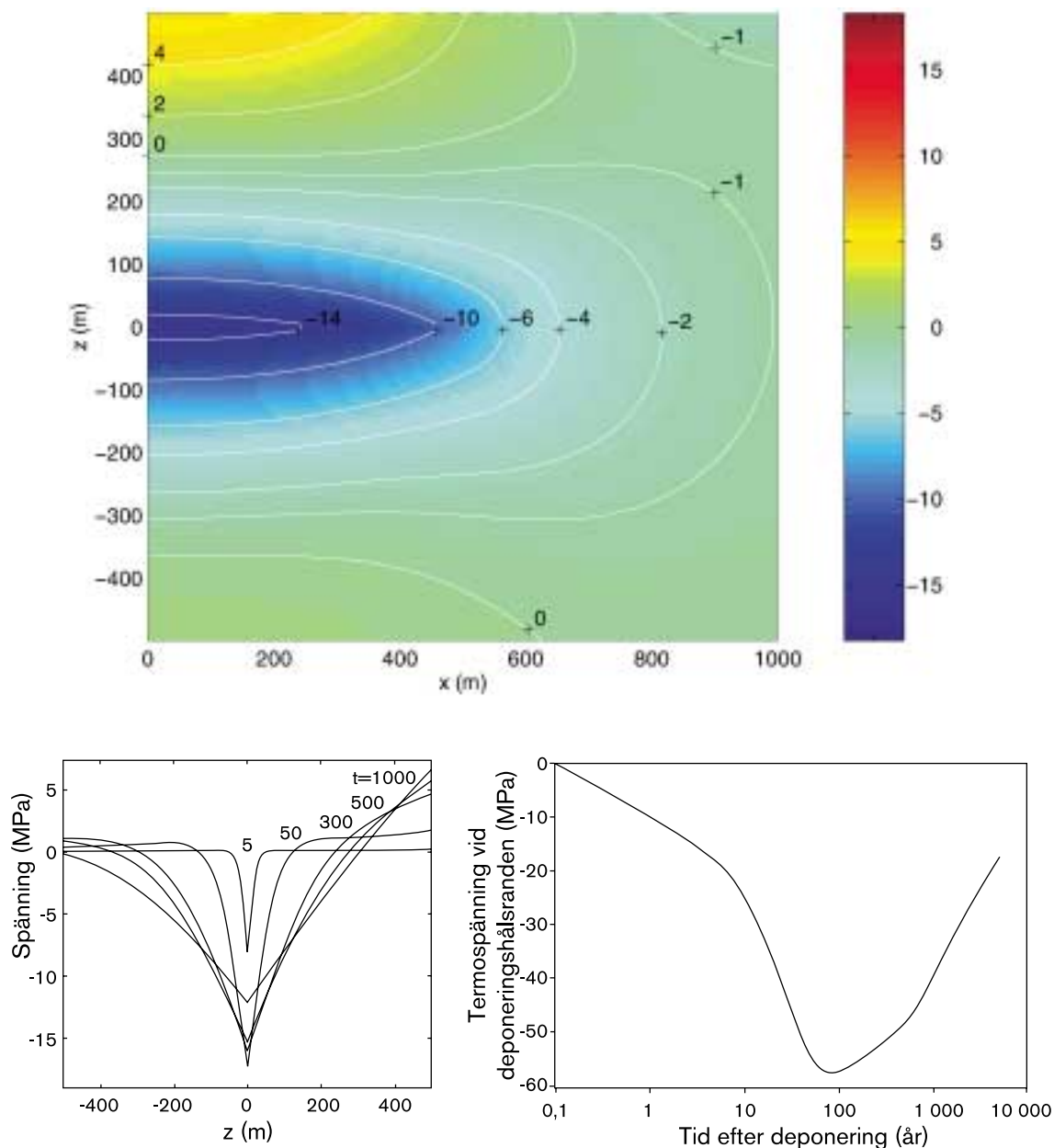
bergets egentyngd och påverkas bara i liten grad av värmevägen. Effekten av värmevägen i förvarsskalan är därför att den spänningssituation som rådde på förvarsnivå initialt, dvs med spänningar som är något större i horisontalriktningen än i vertikalriktningen, förstärks, vilket innebär ökade skjuvspänningar. Efter några hundra år, när spänningarna har börjat jämnas ut, minskas effekten. Skjuvspänningstillskottet är dock litet och ger skjuvrörelser längs stora sprickzoner som maximalt är i storleksordningen någon centimeter /Hansson m fl, 1995; Israelsson, 1996/.

Förvarets layout, dvs den geometriska utformningen, kan naturligtvis påverka både spänningsnivåerna och utsträckningen av de områden som på grund av värmepulsen får tryckspänningstillskott respektive tryckspänningsreduktioner. För den avvikelse i layout som planeras för förvaret i Aberg, dvs ett tvåplansförvar med 100 meter mellan de två planen i stället för ett plan, blir skillnaden i förhållande till enplanslayouten som gäller för Beberg och Ceberg att skivan med tryckspänningstillskott blir tjockare och att de horisontella tryckspänningarna blir större /Probert och Claesson, 1997/. Skillnaden i horisontalspänningstillskott, och därmed i skjuvspänningstillskott, är dock marginell, vilket innebär att skjuvrörelser hos sprickor och sprickzoner approximativt blir av samma storlek som vid enplansförvaret.

Termospänningarnas verkliga storlek, både i närfältet och i förvarsskalan, beror också på kompressionsegenskaperna hos bergmassan, både hos de uppvärmda delarna och hos de omgivande, ännu kalla delarna. Det omgivande, icke uppvärmda bergets mekaniska egenskaper avgör vilken volymexpansion av det värmda berget som kommer att medges och bidrar därmed till att styra spänningsnivåerna i de uppvärmda delarna. De mekaniska egenskaperna, t ex kompressionsegenskaperna, hos stora bergvolymmer är sannolikt påverkade av skaleffekter, vilket inte brukar beaktas i analyser av den termomekaniska utvecklingen av förvaret. Analyserna är därför gjorda med pessimistiska antaganden om de mekaniska randvillkoren. Förekomst av kompressibla sprickzoner i förvarets omgivning skulle t ex innebära att inspänningen av det uppvärmda berget, och därmed spänningsnivåerna vid uppvärmning, reduceras. Figur 8-24 visar termospänningar i närfältet och i förvarsskalan beräknade med det pessimistiska antagandet att förvarsberget och det omgivande berget är likformigt, elastiskt och med materialegenskaper som svarar mot små bergvolymmer, dvs utan hänsyn till möjliga skaleffekter.

Från säkerhetssynpunkt är effekterna av den termiska pulsen små, både vad gäller skjuvrörelser längs sprickor och sprickzoner, och brott i intakt berg intill deponeringshålen. Detta framgår av numeriska och analytiska termomekaniska beräkningar som gjorts under pessimistiska antaganden beträffande inspänningen av förvaret, se Processrapporten. Den termiska pulsen orsakar instabilitet, men stabiliteten återvinns genom små deformationer som är oväsentliga för säkerheten.

Slutsatserna om effekterna av den termiska lasten baseras på analyser där bergmassan antas ha homogena och isotropa termomekaniska egenskaper, medan det i verkligheten i allmänhet finns en variation av bergarter med olika egenskaper. Variabiliteten i bergart-sammansättning skiljer sig mellan de tre förvarsplatserna. De möjliga konsekvenserna av att gränser mellan bergarter med skilda egenskaper förekommer i områden med starkt förhöjd temperatur, dvs i deponeringshålens närhet, återstår att analysera.



**Figur 8-24.** Termospänningar i förvarsskalan och i närfältet. Minustecken anger tryckspänning och plustecken dragspänning. Den övre bilden visar horisontalspänningar efter 500 år i en vertikalsektion genom förvaret /från Probert och Claesson, 1997/. Den nedre vänstra visar horisontalspänningar i en vertikal linje genom förvaret så att  $z = 500$  m är vid markytan /från Probert och Claesson, 1997/. Den nedre högra figuren visar termiskt genererad tangentialspänning i en punkt vid periferin av ett deponeringshål /efter Hökmark, 1996/.

## ***Tiden efter värmepulsen***

De mekaniska effekterna av temperaturpulsen har klingat av efter några tusen år. Den mekaniska utvecklingen i förvarsberget bestäms därefter av förlopp med mycket långa tidsperspektiv och som dessutom är behäftade med stora osäkerheter. Dels kan belastningen på förvarsberget påverkas av långsamma storskaliga rörelser i berggrunden, dels kan förvarsberget tänkas ha egna tidsberoende materialegenskaper så att redan verkande spänningar orsakar tidsfördröjda deformationer (kryprörelser).

## ***Storskaliga rörelser i berggrunden***

Man kan uppskatta den horisontella töjningen av jordskorpan i Sverige till cirka  $10^{-9}$ /år /Muir Wood, 1993/. Orsakerna är dels den alltså pågående differentiella landhöjningen efter den senaste istiden, dels tektoniska rörelser som överförs till det inre av den Baltiska skölden /Muir Wood, 1995/. Grovt svarar detta mot en genomsnittlig spänningsförändring av 5 MPa på hundratusen år, vilket är lite jämfört med den osäkerhet som finns i bl a bestämningen av de naturliga bergspänningarna initialt. Effekterna i form av skjuvrörelser längs sprickor i närfältet och brott i ansträngt, intakt berg intill deponeringshålen, blir väsentligt mindre än motsvarande effekter av den termiska pulsen. Osäkerheterna i uppskattningen är dock stora och bygger bl a på förutsättningen att töjningen är jämt fördelad i tid och rum.

Här förutsätts att storskaliga rörelser i berggrunden ger tidskontinuerliga effekter i förvaret. Möjliga dynamiska effekter av storskaliga rörelser behandlas i tektonikscenariot.

## ***Kryprörelser***

Kunskapen om kryprörelser i stora bergsvolymer under lång tid är ännu dålig. Processen förutsätter förekomst av skjuvspänningar, vilket innebär att i första hand områdena kring tunnlar och deponeringshål kan tänkas bli påverkade /Pusch och Hökmark, 1993/. De ansatser som gjorts att med olika reologiska modeller uppskatta omfattningen av och tidsskalan för en eventuell krypinducerad förändring av deponeringshålens geometri har visat på långsamma förlopp och små deformationer trots att man i dessa ansatser inte beaktat den stabiliserande inverkan av bufferten i deponeringshålet. Uppskattningarna varierar dock starkt. Räknat som radiell förskjutning av deponeringshålsranden har värden som 10 mm på  $10^9$  år /Eloranta m fl, 1992/ och 6 mm på  $10^4$  år /Pusch, 1996/ rapporterats, där den senare uppskattningen bygger på pessimistiska antaganden.

Tar man hänsyn till inverkan av bufferten kan man gränssätta effekten av en kryprörelse som hypotetiskt kan tänkas pågå så länge det alls finns skjuvspänningar i berget. En sådan kryprörelse, som alltså innebär att spänningsanisotropin kring deponeringshål och tunnlar efterhand försvinner, kan som mest leda till att bufferten komprimeras tills dess svälltryck svarar mot medeltrycksspänningen i berget, vilken för de tre förvarsplatserna är cirka 20 MPa. Detta tryck är inte tillräckligt för att orsaka kapselbrott. Det spännings-tillskott som därutöver kan uppstå på grund av storskaliga tektoniska rörelser, dvs 5 MPa på hundratusen år enligt uppskattningar av de genomsnittliga rörelserna i den Baltiska skölden, kan försummas. I själva verket blir medeltrycksspänningen vid förvarsdjupet mindre än 20 MPa om berget verkligen deformeras enligt ovan, alltså som en trög vätska. Spänningstillståndet blir då hydrostatiskt med medeltrycksspänning som motsvarar bergets egentyngd, dvs cirka 14 MPa. Denna typ av kryprörelse, som innebär att berget deformeras som ett visköst medium så att valvverkan kring förvarets hålrum går förlorad måste, om den alls kan äga rum, bedömas som mycket långsam och ger dessutom inga kapselskador för de spänningar man kan räkna med i basscenariot.

De tidsfördröjda rörelserna kan också tänkas ske i huvudsak utefter sprickor, t ex på grund av successiva lokala brott i anslutning till spänningskoncentrationer vid ojämnheter i sprickytorna, medan bergblocken förblir intakta. Effekten blir då inte en generell reduktion av deponeringshålets diameter med följande ökning av buffertens densitet och ökat tryck på kapseln. Effekten kan i stället bli ojämn deformation av bufferten. För att effekten ska ha betydelse för en kapsels integritet fordras skjuvrörelser av storleken 0,1 meter. En så stor skjuvrörelse förutsätter, med de spänningar som råder i basscenariot, att deponeringshålet skär igenom de centrala delarna av en spricka med utsträckning av mer än hundra meter. Dessutom måste processen med lokala brott vid ojämnheter i sprickytorna äga rum i stora delar av sprickans utbredningsplan, vilket innebär att också delar av sprickan som ligger på stort avstånd från spänningskoncentrationerna kring hålrummen, dvs i det ostörda berget, måste påverkas. Inga belägg finns för att en sådan process skulle kunna äga rum. Den spänningstillväxt som kan uppstå på grund av storskaliga tektoniska rörelser och som skulle kunna förstärka effekten är alltför liten för att signifikant påverka nu rådande spänningstillstånd under de närmaste hundra-tusen åren.

#### **8.8.4 Tilltro, kapselanalyser**

##### ***Processförståelse***

Den grundläggande förståelsen för hållfasthet och deformationer i kapselmaterialet är god.

##### ***Modeller och data***

Tilltron till modeller och data bedöms som tillräcklig för de beräkningar som redovisas i basscenariot. Analyserna kan behöva utvidgas till att innefatta även inhomogena materialegenskaper som t ex kan uppkomma till följd av gjutfel i järninsatsen. Även beräkningarna av kryprörelser behöver revideras i takt med att materialdata för det faktiska kapselmaterialet blir tillgängliga.

#### **8.8.5 Tilltro, geosfärsanalyser**

##### ***Processförståelse***

Den grundläggande förståelsen för de processer och omgivningsförhållanden som styr förvarets mekaniska utveckling är inte fullständig. Särskilt gäller detta tidsberoende deformationer. Förståelsen är dock fullt tillräcklig för att med bl a pessimistiska överslag bedöma den mekaniska utvecklingen och stabiliteten i basscenariot.

##### ***Modeller***

För några processer finns väl fungerande numeriska modeller som beskriver det mekaniska uppförandet hos berg och bergmassor och kan tillämpas både i närfältsskalan och i förvarsskalan för de lastfall som förekommer i basscenariot. För tidsberoende deformationer och för nybildning av sprickor finns ännu inga fullt tillämpbara och validerade modeller. För bergmekaniska modeller gäller generellt att de används för att bygga upp processförståelsen och för att gränssätta de rörelser och deformationer som kan ha betydelse för förvarets säkerhet, snarare än för att göra noggranna prediktioner.



## **Data**

Noggranna värden finns för de flesta bergmekaniska egenskaper i laboratorieskalan, men vid uppskalning till stora bergvolymer kan osäkerheterna bli betydande. Även bergspänningsdata från fält kan ha betydande osäkerheter. För den principiella och gränssättande typ av analys som ligger till grund för slutsatserna i basscenariot är datakvaliteten dock fullt tillräcklig.

### **8.8.6 Slutsatser**

I sammanfattning bedöms bergets långsiktiga stabilitet i basscenariot vara sådan att inga berg rörelser av omfattning som kan leda till kapselbrott kommer att äga rum under de närmaste hundratusen åren. Överslagsberäkningar visar att väsentligt större skjuvspänningar och spänningsnivåer än de som i allmänhet råder i den svenska berggrunden på cirka 500 meters djup skulle fordras för att kryprörelser eller lastförändringar orsakade av storskaliga tektoniska rörelser, var för sig eller tillsammans, ska kunna leda till kapselbrott. Det finns inget som motsäger att ett miljonårsperspektiv skulle resultera i samma bedömning.

Denna bedömning gäller också för de tre förvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg, där förhållandena inte avviker signifikant från förhållandena i berggrunden i övrigt.

Inte heller de grundvatten- eller svälltryck (jämnt eller ojämnt fördelade) som kan förekomma i basscenariot ger belastningar som kan hota kapselns integritet.

Basscenariot och därmed dessa slutsatser omfattar inte jordskalv, se vidare kapitel 11.

## **8.9 Kemisk utveckling**

### **8.9.1 Överblick**

Kapselns inre är kemiskt isolerad från omgivningen så länge kopparkapseln förblir intakt. I buffert, återfyllning och berg bestäms den kemiska utvecklingen ytterst av grundvattnets sammansättning. På lång sikt avgör grundvattnets kemiska egenskaper tillsammans med buffertens och kopparkapselns egenskaper hur länge buffert och kapsel fungerar.

### ***Kemiska processer***

Det följande är en sammanfattning ur Processrapporten av beskrivningarna av de kemiska processer som rör basscenariot.

I **geosfären** kring förvaret bestäms den kemiska utvecklingen efter förslutning av en rad transport- och reaktionsprocesser. Den dominerande transportprocessen är advektion, men även diffusion spelar roll. Reaktionen sker mellan grundvattnet och sprickytor i form av lösning/fällning av sprickmineral och, mycket långsamt, mellan grundvatten och bergmatrisens mineral. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från byggnationen, kolloidbildning och gasbildning/gaslösning.

Buffert och geosfär växelverkar kemiskt genom utbyte av vattenlösta ämnen. Särskilt betydelsefullt är flödet från geosfär till buffert av ämnen som kan skada buffert eller kapsel (kopparkorrosanter).

Även den kemiska utvecklingen i **bufferten** omfattar transport- och reaktionsprocesser. Dessa bestämmer tillsammans den kemiska utvecklingen i bufferten.

Efter vattenmättnad är den dominerande transportprocessen diffusion. Under mättnadsförloppet kan även advektion förekomma. De viktigaste reaktionerna är jonbytesprocesser, där joner i porvattnet byts mot joner i smektitens ytskikt, kemisk nedbrytning av buffertens montmorillonitkomponent samt lösning och fällning av föreningar i bufferten. Den lera som vid svällning trängts ut i bergets spricksystem kan eroderas i form av kolloider så att buffertens densitet successivt minskar. Samtliga dessa processer behandlas i avsnitt 8.9.3.

Andra reaktioner är strålpåverkan, porvattenradiolys, mikrobiella processer och gasbildning/gaslösning. Dessa processer bedöms ha små effekter på den kemiska utvecklingen i buffert/återfyllning, se vidare Processrapporten, och behandlas därför inte vidare i basscenariot. Effekterna av de mikrobiella processerna kan försummas om buffertens densitet bibehålls, vilket måste visas i basscenariot.

Kemiskt växelverkar kapseln och bufferten genom utbyte av vattenlösta ämnen. Särskilt betydelsefullt är flödet av kopparkorrosanter från buffert till kapsel.

I **kopparkapseln** domineras den kemiska utvecklingen av kopparkorrosion på kapselns utsida, se avsnitt 8.9.4. Dessutom kan spänningskorrosion, materialförändringar till följd av strålpåverkan och korntillväxt förekomma. De två första processerna bedöms ha små effekter på den kemiska utvecklingen och säkerheten i basscenariot, se Processrapporten, och behandlas därför inte vidare. Korntillväxt har diskuterats av Pettersson /1996/, som drog slutsatsen att korntillväxten i kopparkapseln kommer att vara försumbar.

I **gjutjärnsinsatsen** förekommer spänningskorrosion och materialförändringar till följd av strålpåverkan. Dessa två processer bedöms ha små effekter på den kemiska utvecklingen och säkerheten i basscenariot, se Processrapporten, och behandlas därför inte vidare.

I den isolerade kapselns inre förekommer i **bränslet** radiolys av restgas samt heliumproduktion till följd av att alfapartiklar (heliumkärnor) från det radioaktiva sönderfallet tar upp elektroner och bildar heliumgas. Dessa två processer bedöms ha små effekter på den kemiska utvecklingen i basscenariot och behandlas därför inte vidare, se Processrapporten.

### ***Kopplingar till förvarets övriga utveckling***

Den kemiska utvecklingen påverkas av den termiska genom att diffusion och samtliga reaktionsprocesser är beroende av temperaturen. Den kemiska utvecklingen påverkas också starkt av den hydrauliska genom advektion i geosfären. Dessutom förekommer några strålinducerade kemiska processer av mindre betydelse, dvs en påverkan från den strålrelaterade utvecklingen. Jonbytesprocessen i buffert/återfyllning kan ge en påtaglig påverkan på svällningen.

**Tabell 8-6. Översikt av viktiga processer som påverkas av sammansättningen av por- och grundvatten.**

Process	Komponent/variabel	"Önskemål"/kommentar
<b>Kopparkorrosion</b>	Löst syre	Syrefritt (indikeras av negativa Eh värden)
	Sulfid	Ju lägre dess bättre
	Kombinationen kloridjoner/pH	Undvik kombinationen [Cl <sup>-</sup> ] > 100 g/l och pH < 3
	Total salthalt	Under 100 g/liter*
<b>Svällning</b>		
<b>Smektitnedbrytning (illitisering)</b>	Kalium	Ju lägre dess bättre
<b>Kolloidbildning/erosion av buffert</b>	Tvåvärda katjoner, främst Ca <sup>2+</sup> och Mg <sup>2+</sup>	[Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> ] > 4 mg/l

\* Återfyllningen är känsligare än bufferten i detta avseende. Återfyllningens sammansättning kommer att anpassas efter bl a salthalt på platsen. Detta görs dock inte i SR 97.

### ***Vad behöver visas i basscenariot?***

I kommande avsnitt ges en närmare beskrivning av följande aspekter av den kemiska utvecklingen:

- Utvecklingen av grundvattnets sammansättning på sikt för Aberg, Beberg och Ceberg.
- Buffertens kemiska utveckling vid de tre platserna.
- Korrosion av kopparkapseln vid de tre platserna.

Tabell 8-6 sammanfattar de viktigaste processerna i kapsel och buffert/återfyllning som är direkt kopplade till säkerheten och som påverkas av sammansättningen hos geosfärens grundvatten och buffertens porvatten för basscenariot. Av tabellen framgår också vilka förhållanden i grund- och porvatten som är önskvärda ur säkerhetssynpunkt.

### ***Betydelse för säkerheten***

Den kemiska utvecklingen kan ha direkt betydelse för säkerheten genom att korrosion av kapseln skulle kunna påverka dess isolerande förmåga. Dessutom kan buffertens funktion påverkas av kemiska förändringar. På lång sikt avgör grundvattnets kemiska egenskaper tillsammans med buffertens och kopparkapselns egenskaper hur länge buffert och kapsel fungerar.

## **8.9.2 Utveckling av grundvattnets sammansättning på sikt**

### ***Inledning***

Den geokemiska situationen i svensk berggrund är generellt mycket stabil. Reaktions- och transportprocesser pågår ständigt men leder i allmänhet till förändringar bara i ett mycket långt tidsperspektiv. Reaktionen förekommer bl a mellan olika komponenter i grundvattnet, mellan vatten och sprickmineral och mellan vatten och bergmatris. Grundvattenflödet svarar för transport av reaktanter och reaktionsprodukter till respektive från reaktionerna. Det flödande grundvattnet leder också till en blandning av olika grundvattentyper från olika områden i geosfären.

Ramarna för utvecklingen ges av in- och utströmning av vatten från/till biosfären, samt av utbyte med mycket djupt liggande grundvatten. Utvecklingen styrs därmed bland annat av nederbörds mängder och marknära kemiska förhållanden. Den geokemiska utvecklingen på en förvarsplats bestäms således av:

- Dagens geokemiska situation.
- Transport- och reaktionsprocesser i geosfären.
- Växelverkan med omgivningen, framför allt av in- och utflöden från/till biosfären som i sin tur beror av klimatet.

Dagens geokemiska situation är på motsvarande sätt resultatet av tidigare klimatförhållanden, transport- och reaktionsprocesser.

Stora förändringar i grundvattnets kemiska sammansättning orsakas främst av långsiktiga klimatförändringar. Med klimatet ändras nederbörd och framför allt flödesförhållandena och detta kan leda till märkbara effekter på grundvattnets sammansättning. Effekter av klimatförändringar diskuteras i klimatscenariot. I basscenariot ger framför allt landhöjningen långsiktiga effekter på flödesmönster och därmed grundvattensammansättningen.

Av tabell 8-6 ovan framgår att total salthalt, halter av kalium, kalcium, magnesium, klorid, sulfid och löst syre samt redoxpotential (Eh) och pH är av direkt vikt för säkerheten. Flera av dessa, bl a pH, Eh och salthalt är dessutom nödvändiga för en allmän förståelse av de geokemiska förhållandena. För radionuklidtransport behövs dessutom kunskap om fulvo- och humussyror, kolloidhalter och mikrober.

### ***Växelverkan med omgivningen***

Den grundvattenkemiska situationen vid en plats influeras av flödesmönster och grundvattensammansättning i den omgivande regionen. Influensområdets storlek kan variera kraftigt mellan olika platser.

Storskaliga flödessystem har modellerats numeriskt och visat på flödesmönster som varierar avsevärt mellan platserna, se avsnitt 8.7.2. Den uppåtriktade flödessituationen vid Aberg är förenlig med den relativt höga salthalten på förvarsdjupet, som skulle vara en konsekvens av upptransport av djupare grundvatten med en högre salthalt. På stort djup är grundvattnet vid Aberg extremt salt och har dessutom varit isolerat från atmosfären i miljontals år /Laaksoharju och Wallin, 1997/. Indirekt kan man påstå att den nedåtriktade flödessituationen i Ceberg också styrks hydrokemiskt av det faktum att inget salt vatten påträffats på förvarsdjup.

### ***Ursprungligt tillstånd***

Beskrivningen av den hydrokemiska utvecklingen baseras på en granskning av samtliga vattenprov från respektive plats, se Laaksoharju m fl /1998/. Dessa sk referensvatten bör därmed återspegla dagens naturliga vattensammansättning på förvarsdjup. I underlaget ingår 483 vattenprov från Aberg, 37 från Beberg och elva från Ceberg. Den rumsliga variabiliteten hos vattensammansättningen är därmed relativt välkänd i Aberg, medan motsvarande kunskap är betydligt sämre i såväl Beberg som Ceberg. Referensvattnen redovisas som kolumnen ”ostört tillstånd” i tabell 8-7, tabell 8-8 och tabell 8-9 för Aberg, Beberg respektive Ceberg.

Det finns ingen påtaglig korrelation mellan bergarter och vattensammansättning på de tre platserna. I Aberg finns en korrelation mellan sammansättning och vattengenomsläpplighet då olika mätpunkter jämförs.

Baserat på bedömningar av tidigare grundvattensammansättningar och klimatförhållanden har den historiska utvecklingen av grundvattnets sammansättning rekonstruerats /Laaksoharju och Wallin, 1997/. Med hjälp av principalkomponentanalys och efterföljande blandningsberäkningar har dagens hydrokemiska förhållanden kunnat förklaras på de tre platserna /Laaksoharju m fl, 1998/.

Byggandet och driften av förvaret kommer att förändra de hydrokemiska förhållandena genom det ökade vattenflödet i berget och genom kemisk påverkan från bl a konstruktions- och strömmaterial vid byggnationen. Dessa förändringar bedöms bli kortvariga i förhållande till förvarets tilltänkta livslängd. De ursprungliga förhållandena kan förväntas återinträda inom cirka hundra år efter förslutning. Erfarenheter från underjordsanläggningar visar dock stora variationer i tiden för att återställa ursprungliga förhållanden, se avsnitt 8.7.2.

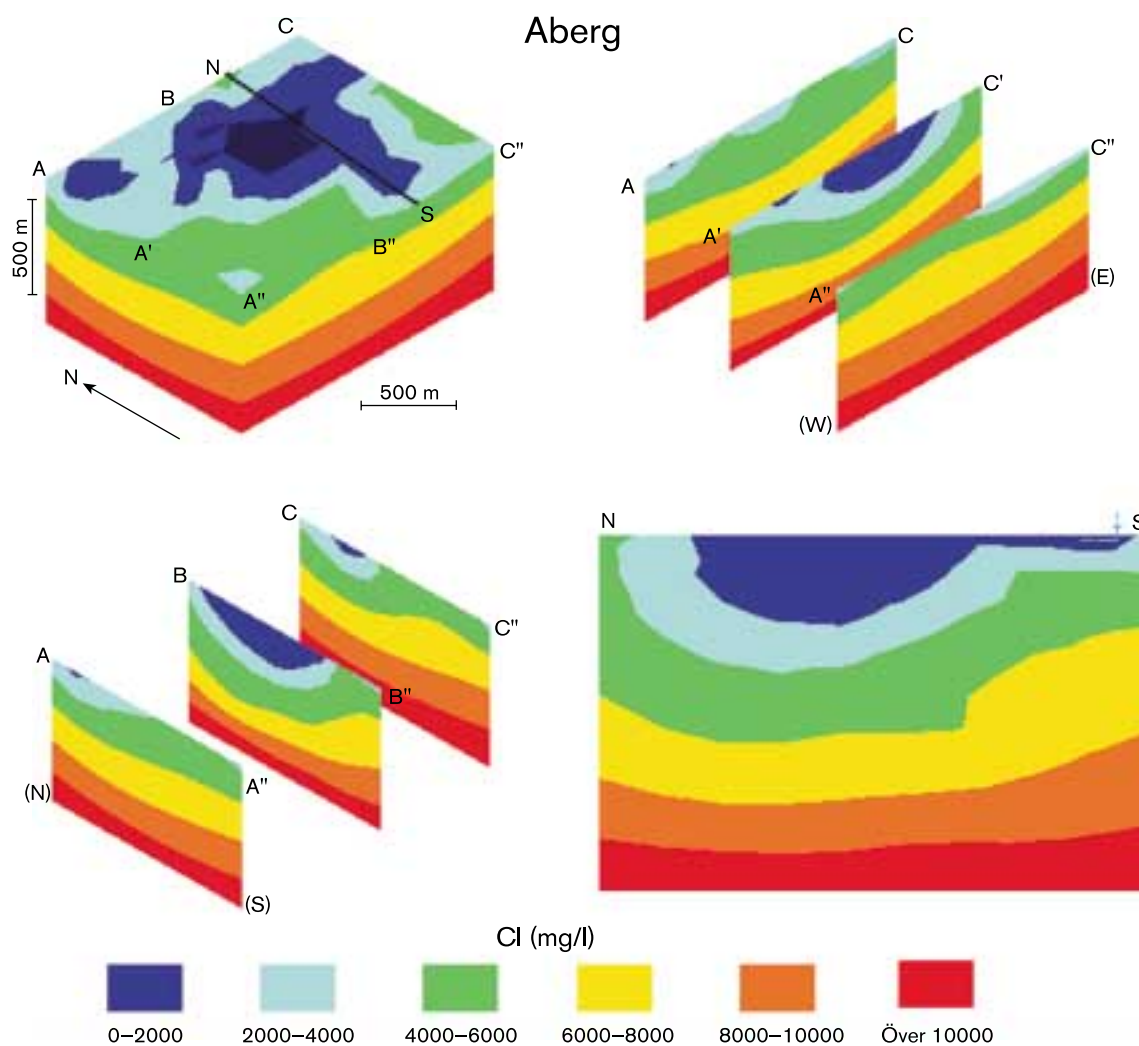
### **Långsiktig utveckling vid Aberg**

Den långsiktiga utvecklingen kan beskrivas utifrån den allmänna kunskapen om vattenkemins utveckling från långt tillbaka i tiden fram till nu. På varje plats är denna utveckling styrd av de hydrauliska drivkrafterna och variationer i bergets vattengenomsläpplighet samt fördelning av salt och sött vatten. Vid samtliga platser påverkas utvecklingen av landhöjning.

I Aberg finns idag grundvatten som härrör från olika tidsskeden innan och efter den senaste isavsmältningen. Figur 8-25 illustrerar salthaltsfördelningen i Aberg. Meteoriskt vatten har infiltrerat berggrunden ned till 100 meters djup och tvättat ut tidigare saltvatten. Detta bedöms ha skett under de senaste tretusen åren som en effekt av den pågående landhöjningen. På större djup finns inslag av modernt och äldre Östersjövatten, glacialt smältvatten och på stort djup salt vatten som har sitt ursprung i berget /Rhén m fl, 1997b/.

Under förvarets drift förväntas sött vatten dras ned uppifrån, Östersjövatten från sidorna och salt vatten underifrån. Salthaltsfördelningen förväntas därmed påverkas i viss omfattning och blandningsproportionerna kommer att förändras. De lokala variationerna förväntas bli stora och beroende av riktningen för flödesvägarna. Man kan räkna med att saltvatten under denna tid kan dras upp nedifrån och orsaka en salthaltsökning med 50–100 procent. I andra punkter kan sötvatten infiltrera på förvarsnivå och sänka halterna påtagligt. Liknande effekter har observerats i Äspölaboratoriet till följd av den avsänkning som anläggningen förorsakat /Rhén m fl, 1997a; Rhén m fl, 1997b/. Ursprungliga förhållanden förväntas återinträda så snart flödes- och tryckförhållandena återgått till de ursprungliga dvs efter cirka hundra år.

Under denna period kommer konstruktions- och strömmaterial från byggnationen att kunna påverka vattensammansättningen i förvaret.



**Figur 8-25.** Saltbaltfördelningen i Aberg baserad på kriging (interpolation) av uppmätta kloridhalter i borrhål.

Organiskt material och instängt syre kommer att reagera. Initialt kommer instängt syre att förbrukas av aeroba bakterier. Allt syre beräknas vara förbrukat inom ett fåtal år /Puigdomenech m fl, 1999/. Därefter förväntas trevärt järn i sprickmineral att omvandlas till löst tvåvärt järn av järnreducerande bakterier om organiskt material ännu finns närvarande. Om det därefter fortfarande finns nedbrytbart organiskt material förväntas sulfat i grundvattnet reduceras till sulfid. Effekterna av de biologiska processerna blir att karbonathalten i vattnet ökar i proportion till mängden nedbrutet organiskt material i den omsatta vattenvolymen. Detta ger också en pH-sänkning ned till cirka sju eller strax under. Den ökade karbonathalten kan leda till nybildning av kalkitskikt på sprickytor, men kan också i det fall pH-värdet sjunker kraftigt leda till en upplösning av kalkit från sprickytor. I ett något längre tidsperspektiv kommer även fältspatvittring att påverka utvecklingen.

Genom bakteriell sulfatreduktion kan teoretiskt all tillgänglig sulfat reduceras till sulfid. Sulfidhalten kan då för referensvattnet i Aberg öka till 180 mg/liter. Detta begränsas av tillgången på organiskt nedbrytbart material som under ostörda förhållanden uppskattas till under 10 mg/liter, men som under återmättnadsfasen efter förslutning kan förväntas

uppgå till storleksordningen 100 mg/liter. Den sulfid som bildas kommer dessutom att fällas ut, bl a som järnsulfid så att sulfidhalten sannolikt begränsas till under 10 mg/liter. I de flesta fall ligger sulfidhalterna under 1 mg/liter. Detta gäller för de valda referensvattnen /Laaksoharju m fl, 1998/.

Den bildade järnsulfiden och andra sulfidutfällningar utgör en buffert mot oxidation. Experiment och beräkningar har visat att även under ett forcerat inflöde, som t ex skulle kunna förekomma då en inlandsis smälter, försvinner det lösta syret snabbt /Puigdomenech m fl, 1999; Guimera m fl, 1999/.

Nedbrytningen av oorganiskt material, främst betong och stål i konstruktionsmaterial, bedöms inte att ha någon betydelse för vattenkemin i stort i bergvolymen kring förvaret. De cementinjekteringar som gjordes under byggandet av Äspötunneln kunde endast spåras i form av förhöjt pH under några få dagar /Rhén m fl, 1997a/. Cement och betong i närheten av deponeringshål kan höja pH-värdet lokalt och mera långvarigt.

Genom landhöjning utvecklas Aberg successivt från att vara en ö mot ett kustnära landläge där infiltrerande grundvatten kommer att tvätta ut alltmer av det salta grundvattnet. Sannolikt kommer då en skarpare gräns mellan sött och salt vatten att uppkomma. Om man antar att dagens infiltrationsmönster är konstant och att meteoriskt vatten tvättat rent till 100 meters djup under de senaste tretusen åren förväntas det ta minst fem gånger så lång tid att tvätta rent till 500 meters djup, förmodligen mycket längre. Ju skarpare övergången mellan sött och salt vatten blir, desto långsammare sker urtvättningen och ju djupare gränsen ligger desto mindre blir flödet som kan driva ut saltvattnet. Då Aberg övergår från att vara en ö till att bli en del av fastlandet ökar den hydrauliska drivkraften. Detta förväntas ske om cirka tvåtusen år och gränsen mellan salt och sött vatten bedöms då ligga på cirka 150 meters djup. Därför bör referensvattnet för Aberg vara representativt under de nästkommande hundra till tiotusen åren. Därefter bedöms salthalten minska genom att andelen meteoriskt sötvatten ökar och sammansättningen skulle då närma sig referensvattensammansättningen för Ceberg, se nedan. I en sådan dynamisk situation kommer det med säkerhet att finnas isolerade volymer där utbytet sker mycket långsammare, kanske på hundratusen år. Andelen av dessa volymer kan inte förutses idag.

Tabell 8-7 sammanfattar möjliga hydrokemiska förhållanden i Aberg vid olika tillfällen. ”Ostört tillstånd” avser situationen innan förvarsutbyggnad och den förväntade situationen hundra till tiotusen år efter förslutning. Kolumnen visar sammansättningen av referensvattnet för Aberg /Laaksoharju m fl, 1998/. ”Vid förslutning” avser tiden fram till hundra år efter förslutning och är en expertbedömning av förändringar innan och efter förslutning baserad på kunskap om förhållandena i Äspölaboratoriet innan, under och efter tunnelkonstruktionsfasen /Rhén m fl, 1997b/; ”i framtiden” perioden tiotusen till hundratusen år efter förslutning, baserad på en utveckling i riktning mot dagens situation i Ceberg.

Halten av organiskt material är mycket hög under tiden efter förslutning, tiotals till kanske hundratals mg/liter. Därefter bedöms den sjunka till cirka 1 mg/liter inom något år. Kolloidhalten kan uppskattas till tiotals mg/liter efter förslutning för att efter några år ligga under 0,5 mg/liter.

**Tabell 8-7. Möjliga hydrokemiska förhållanden i Aberg vid olika tillfällen. Referensvattensammansättningen för Aberg anges som ostört tillstånd.**

Komponent/ variabel	Ostört tillstånd	Vid förslutning	I framtiden; 10 000–100 000 år efter förslutning
pH	7,7	6- 8	8- 9
Eh (mV)	- 308	0 till - 400	- 200 till - 300
Na <sup>+</sup> (mg/l)	2 100	1 000- 3 000	100- 2 000
K <sup>+</sup> (mg/l)	8	5- 20	2- 10
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	1 890	1 000- 3 000	20- 2 000
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	42	10- 200	1- 40
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	10	10- 1 000	10- 20
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	6 410	3 000- 10 000	200- 5 000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	560	100- 600	1- 400
HS <sup>-</sup> (mg/l)	0,15	0- 10	0- 1
Kolloider (mg/l)	0,05*	1- 100	< 0,5
Fulvo- och humussyror (mg/l)	0,1*	0- 10	< 0,5

\* Specifikt mätvärde för den provtagna nivån saknas. Värdet är en generell uppskattning för djupa grundvatten i Sverige.

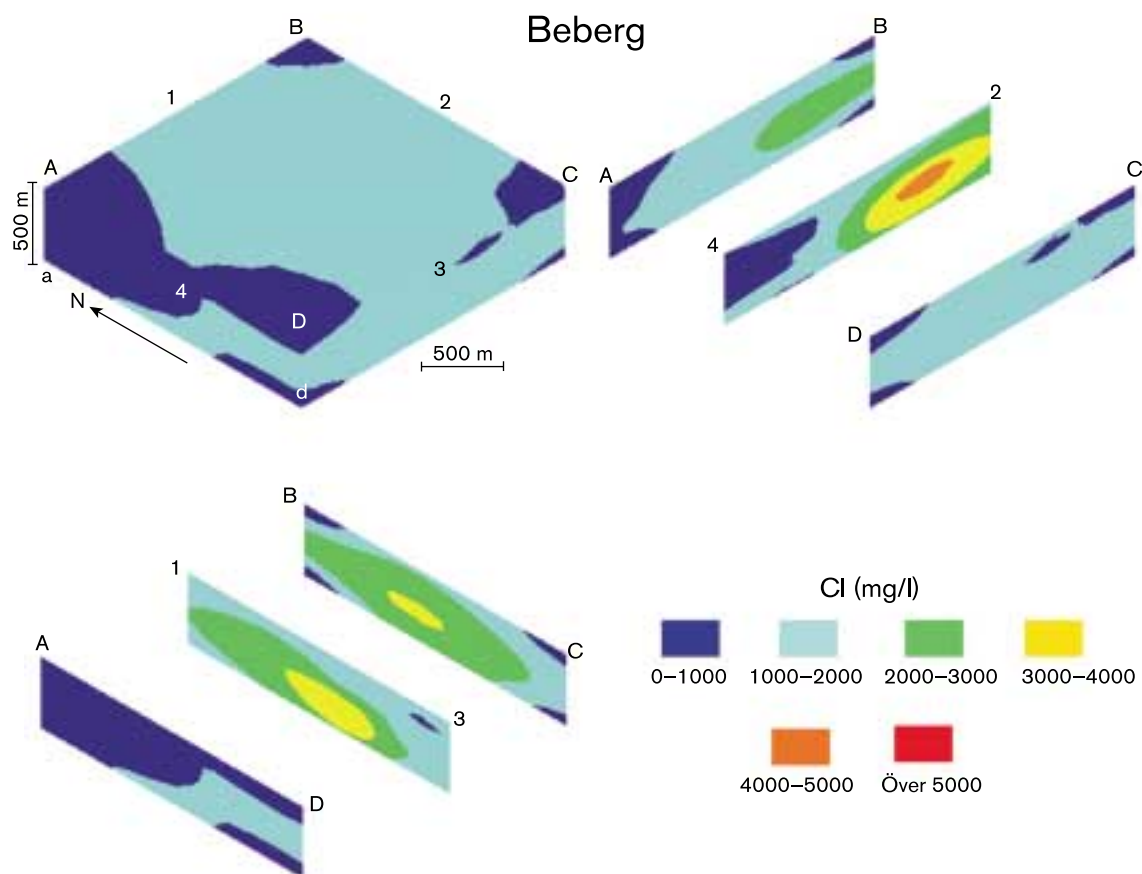
Jämviktsberäkningar med programmet WATEQ /Laaksoharju m fl, 1998/ visar att vattensammansättningen står i jämvikt med mineralen kalcit, gips, kvarts, hematit, götit och järnsulfid. Detta innebär att Eh är bestämt av både järn- och sulfidsystemen samtidigt dvs båda systemen är i jämvikt. Detta visar att hydrokemin är så stabil man kan förvänta sig och att det därmed inte pågår omfattande mineralupplösningar och utfällningar, samt att dataunderlaget är tillförlitligt.

### **Långsiktig utveckling vid Beberg**

I Beberg förekommer salt och sött vatten i ett komplext mönster. Figur 8-26 visar salthaltsfördelningen i bergvolymen.

Beberg befinner sig idag i en situation som förväntas råda i Aberg om något tusental år. Den heterogena salthaltsfördelningen i Beberg kontrasterar mot den relativt homogena fördelningen i Aberg. Om Beberg skulle ha genomgått en liknande utveckling som skissas för Aberg borde salt vatten förekomma allmänt på djupet också i Beberg. Nu förekommer det i en del av området men inte i den andra. Detta kan vara en effekt av rådande hydrologiska och strukturella egenskaper hos Beberg som gör att en urtvättning av saltvatten gått mycket djupare i ena delen av området. Eftersom data för Beberg är betydligt mindre omfattande än för Aberg kan det heller inte uteslutas att det också i sötvattendelen kan finnas salt vatten på djupet. Om så vore fallet, skulle även förhållandena i Beberg understryka uppfattningen från Aberg, nämligen att urtvättningen av salt vatten går mycket långsamt.





**Figur 8-26.** Salthaltsfördelningen i Beberg, baserad på kriging (interpolation) av uppmätta kloridhalter i borrhål.

I dagsläget finns både salt och sött vatten i Beberg. Efter att ett förvar har byggts och stått öppet i 50 år finns det förmodligen endast sött eller salt vatten kvar. Båda möjligheterna är rimliga, och därför har två referensvatten definierats /Laaksoharju m fl, 1998/. Det mest troliga är dock att vattnet under förvarsnivå är salt och att detta vatten dras upp till förvaret. Därefter förväntas det att sjunka tillbaka under de första hundra åren efter förslutning.

Organiskt och oorganiskt konstruktions- och strömateriäl förväntas brytas ned/förbrukas på samma sätt som vid Aberg under de inledande hundra åren av förvarets livstid.

Tabell 8-8 sammanfattar möjliga hydrokemiska förhållanden i Beberg vid olika tillfällen. "Ostört tillstånd" avser situationen innan förvarsutbyggnad och den förväntade situationen hundra till tiotusen år efter förslutning. Kolumnen visar sammansättningen för salt och sött referensvatten för Beberg /Laaksoharju m fl, 1998/. "Vid förslutning" avser tiden fram till hundra år efter förslutning och är en expertbedömning av förändringar innan och efter förslutning baserad på kunskap om förhållandena i Äspölaboratoriet innan, under och efter tunnelkonstruktionsfasen /Rhén m fl, 1997b/; "i framtiden" perioden tiotusen till hundratusen år efter förslutning, baserad på en utveckling i riktning mot dagens situation i Ceberg.

**Tabell 8-8. Möjliga hydrokemiska förhållanden i Beberg. Sammansättningen för salt och sött referensvattnet för Beberg anges som ostört tillstånd.**

Komponent/ variabel	Ostört tillstånd salt/sött	Vid förslutning	I framtiden; 10 000–100 000 år efter förslutning
pH	7,0/7,9	6- 8	7- 9
Eh (mV)	- 200*/- 250	0 till - 400	- 200 till - 300
Na <sup>+</sup> (mg/l)	1 700/275	300- 2 000	100- 1 000
K <sup>+</sup> (mg/l)	13/2	2- 13	2- 10
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	1 650/142	150- 1 650	20- 1 000
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	110/17	17- 110	4- 100
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	47/278	50- 300	20- 40
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	5 500/555	500- 5 000	200- 5 000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	370/49	40- 400	1- 400
HS <sup>-</sup> (mg/l)	<0,01/-	0- 10	0- 1
Kolloider (mg/l)	0,05*	0- 100	< 0,5
Fulvo- och humussyror (mg/l)	0,1*	0- 10	< 0,5

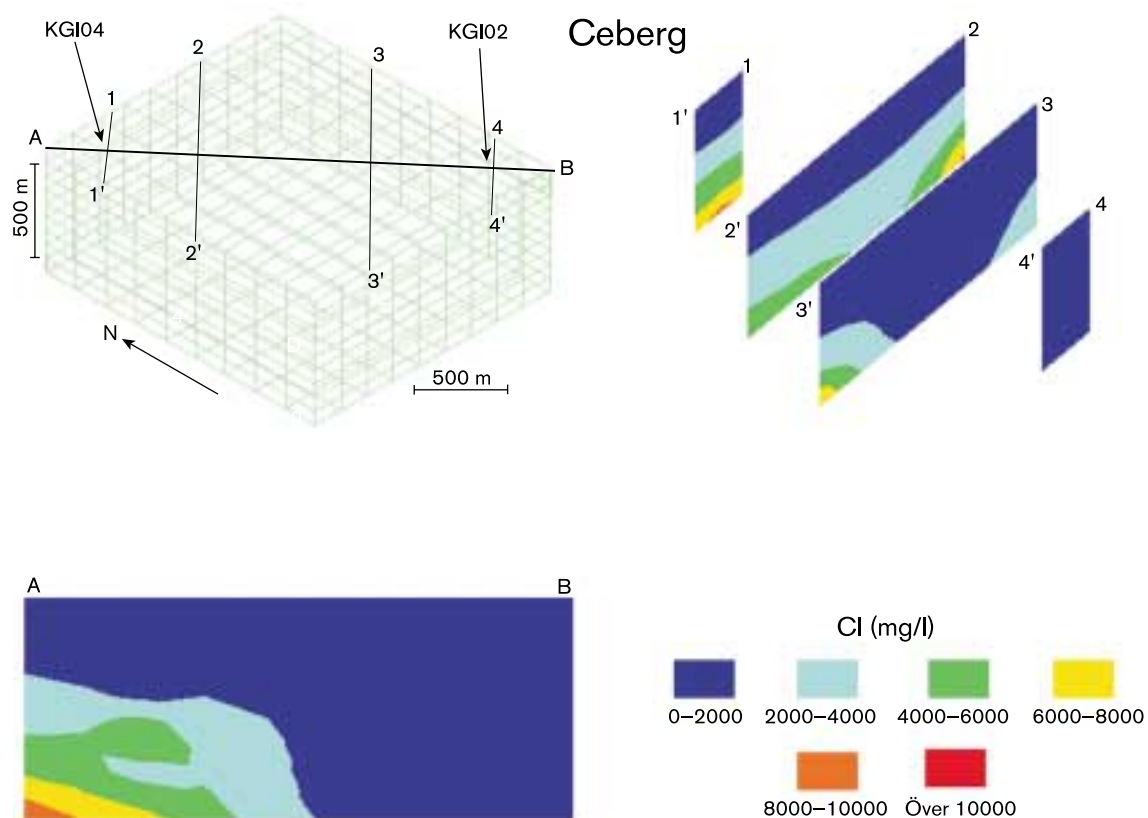
\* Specifikt mätvärde på den provtagna nivån saknas. Värdet är en generell uppskattning för djupa grundvatten i Sverige.

Halten löst organiskt material i Beberg är påtagligt högre än i Aberg och Ceberg. Halten på 5,7 mg/liter kan bero på kontaminering i samband med borrhning och borrhålsundersökningar, men kan också vara ett korrekt värde. I SKB-91 angavs maximivärdet för kolloidhalter till 0,4 mg/liter. Senare detaljstudier av kolloider har visat att halterna generellt kan ligga under 0,05 mg/liter i ostörda granitiska grundvatten /Laaksoharju m fl, 1995/.

Jämviktsberäkningar med programkoden WATEQ /Laaksoharju m fl, 1998/ visar att vattensammansättningen står i jämvikt med mineralen kalcit, gips, kvarts, fluorit, hematit och götit. Järnsulfid är kraftigt undermättad vilket tyder på störningar i samband med undersökningarna som genomfördes redan i början av 1980-talet. Siderit är undermättad på motsvarande sätt som i Aberg. Därmed kan man hävda att de mineralfaser som uppnår snabb jämvikt visar att det salta typvattnet i Beberg har en stabil sammansättning och kan anses representativt för rådande förhållanden. Eh-värdet är uppskattat med hjälp av vattnets järnhalt och pH-värde eftersom mätvärde saknas.

### **Långsiktig utveckling vid Ceberg**

Ceberg ligger vid högsta kustlinjen och har utsatts för in- och utströmning av infiltrerande grundvatten under den längsta tiden av de tre platserna. Det har sannolikt inte funnits salt vatten i Ceberg efter den senaste istiden. Därmed bör grundvattnet ha fått sin kemiska karaktär genom växelverkan mellan vatten och berg. Detta betyder dock inte att vattnet infiltrerat uppe på markytan och sedan kommit ner till större djup som en enhetlig front. Blandning förekommer och har förekommit i olika sammanhang, men allt vatten har ett meteoriskt ursprung. Salthaltsfördelningen i Ceberg illustreras i figur 8-27.



**Figur 8-27.** Salthaltsfördelningen i Ceberg, baserad på kriging (interpolation) av kloridhalter som uppmätts i borrhål.

Under driften av förvaret kommer mer ytnära vatten att dras ner i berget. Eftersom karaktären på ytligt och djupt vatten i Ceberg är relativt lika förväntas detta inte ändra vattensammansättningen påtagligt. Efter förslutning kommer förhållandena att återgå till de initiala i en takt som bestäms av tillrinningen av regionalt vatten från norr och väst, se avsnitt 8.7.2.

Utvecklingen på lång sikt kommer inte heller att påverka vattenkemin nämnvärt. Eftersom grundvattnet redan nu är av meteoriskt ursprung kommer landhöjningen att sakna betydelse för utvecklingen.

Organiskt och oorganiskt konstruktions- och strömateriell förväntas brytas ned/förbrukas på samma sätt som vid Aberg under de inledande hundra åren av förvarets livstid. I Ceberg förväntas dock sulfatreduktion inte förekomma eftersom sulfathalterna är så låga.

Tabell 8-9 sammanfattar möjliga hydrokemiska förhållanden i Ceberg vid olika tillfällen. "Ostört tillstånd" avser situationen innan förvarsutbyggnad och den förväntade situationen hundra till tiotusen år efter förslutning. Kolumnen visar sammansättningen av referensvattnet för Ceberg /Laaksoharju m fl, 1998/. "Vid förslutning" avser tiden fram till hundra år efter förslutning och är en expertbedömning av förändringar innan och efter förslutning baserad på kunskap om förhållandena i Äspölaboratoriet innan, under och efter tunnelkonstruktionsfasen /Rhén m fl, 1997b/; "i framtiden" perioden tiotusen till hundratusen år efter förslutning, baserad på en utveckling som i stort gör att dagens situation i Ceberg bibehålls.

**Tabell 8-9. Möjliga hydrokemiska förhållanden i Ceberg. Referensvattensammansättningen för Ceberg anges som ostört tillstånd.**

Komponent/ variabel	Ostört tillstånd	Vid förslutning	I framtiden; 10 000 –100 000 år efter förslutning
pH	9,3	7- 9	8- 10
Eh (mV)	- 200	0 till - 400	- 200 ± 100
Na <sup>+</sup> (mg/l)	100	10- 100	100 ± 50
K <sup>+</sup> (mg/l)	2	1- 10	5- 0
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	21	1- 20	10- 20
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	1	1- 5	1- 5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	18	10- 100	10- 20
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	180	20- 200	100- 200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	0,1	0,1- 10	0,1- 1
HS <sup>-</sup> (mg/l)	< 0,01	0- 1	0,1- 1
Kolloider (mg/l)	0,05*	1- 100	< 0,5
Fulvo- och humussyror (mg/l)	0,1*	0- 10	< 0,5

\* Specifikt mätvärde för den provtagna nivån saknas. Värdet är en generell uppskattning för djupa grundvatten i Sverige.

Jämviktsberäkningar med programkoden WATEQ /Laaksoharju m fl, 1998/ visar att vattensammansättningen står i jämvikt med kalcit, siderit, fluorit, kvarts, amorf järnhydroxid och järnsulfid. Vattnet är övermättat med avseende på götit och hematit och starkt undermättat med avseende på gips. Detta tyder på viss störning i samband med borrning och/eller provtagning. Redoxförhållandena har beräknats utifrån pH och järn(II) halter. Övermättnaden med avseende på götit och hematit tyder på syreinträngning vid provtagning eller tidigare borrhålsaktiviteter.

### **Långsiktiga redoxförhållanden**

Ett av de grundläggande kriterierna för förvarets säkerhet är att grundvattnet är fritt från löst syre. I infiltrerande regnvatten är halten löst syre cirka 10 mg/liter. Syret förbrukas då vattnet passerar genom jordskiktet innan det når ner till berget. I tunna eller obefintliga jordlager når syresatt vatten ner till bergets spricksystem. Även här förbrukas syret fullständigt i biologiska processer samt i reaktioner med bergets järnhaltiga mineral /Puigdomenech m fl, 1999/. Det finns inga indikationer på att järn(II) mineral oxiderats av syresatt grundvatten någonstans på förvarsdjup /Gascoyne, 1999; Guimera m fl, 1999/. Detta betyder dock inte att järn(III) mineral är frånvarande på stort djup. Hematit förekommer allmänt i sprickläkningar och är resultat av oxidation under hydrotermala förhållanden, då vatten oxiderat järnet utan tillskott av löst syre.

### **Kvalitetsbedömning för referensvattnen**

Tillförlitligheten hos de valda referensvattnen varierar. Generellt har de vattenprov som tagits senare en högre tillförlitlighet (är mer representativa) än de som tagits i ett tidigare skede. Ett kvalitetsmått har utvecklats på basis av ett semikvantitativt bedömningssystem som tagits fram i samarbete med TVO, numera Posiva. Måttet anger vattenprovets representativitet i förhållande till samtliga de som ingick i utvärderingen (som kan sägas

vara typiskt för svensk-finsk granitisk berggrund). De olika momenten som ingår i undersökningssekvensen bedöms och poängsätts utifrån hur väl de genomförts i de enskilda fallen /Laaksoharju m fl, 1993/. Exempel på frågor där svaren poängsätts är: Hur mycket spolvatten har använts vid borrning genom den provtagna sektionen? Hur kraftigt undertryck användes vid provtagningen? Hur lång tid har provet uppehållit sig i slangar och flaskor innan analys? Med vilken metod har analysen genomförts? etc. Medianvärdet är noll för alla de svenska och finländska vattenprov som ingick i utvärderingen. Ett positivt värde anger därmed en högre representativitet (tillförlitlighet) medan ett negativt värde anger en lägre representativitet än medianvärdet för alla de provtagningar som genomförts i SKB och Posivas platsundersökningar.

Värdena för referensvattnen vid Aberg är 0,86, vid Beberg 0,63 (salt) och -0,36 (sött) och vid Ceberg -0,15. Detta betyder att representativiteten för Aberg och salta Beberg vattnen är hög, medan den är lägre för Ceberg och speciellt för det söta referensvattnet i Beberg.

### **Osäkerheter**

Osäkerheter i den geokemiska modellbeskrivningen diskuteras i Datarapporten:

- Störningar vid mättillfället på grund av tunnelbyggnation eller drift av anläggning förändrar flödesbilden kring förvaret med risk för introduktion av saltare grundvatten från lägre djup i berggrunden. (Denna situation utnyttjas för att utröna vilka förhållanden som kan tänkas råda vid förslutning.)
- Mätfel vid analys av huvudkomponenter ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}$ ) är i storleksordningen 1–5 procent och pH kan variera upp till en enhet.
- Effekten av framtida grundvattenrörelser kommer att påverka dagens vattenkemi med landhöjningen. Främst salthalter väntas förändras i takt med strandförskjutningen.
- Påverkan av ingenjörbarriärer (bentonit) kan förändra vattensammansättningen, dock i mycket liten omfattning i förhållande till de förändringar som antas till följd av förändrade flödesregimer kring det öppna förvaret.

Det är rimligt att anta att osäkerheten i grundvattenkemi, både dess rumsliga variationer och den kommande utvecklingen, i stort begränsas av variationen mellan de fyra referensvattnen som används i SR 97.

### **8.9.3 Kemisk utveckling hos buffert/återfyllning**

#### **Processer**

Buffertmaterialet, MX-80 bentonit, består av cirka 75 procent montmorillonit med natrium som dominerade sorberad katjon och cirka 25 procent andra mineral (föroreningar), där kvarts och fältspat dominerar. MX-80 innehåller också små mängder kalcit och pyrit och dessa föroreningar kan ha betydelse för den kemiska miljön i förvaret.

En rad kemiska processer i buffert/återfyllning kommer över tiden att förändra sammansättningen hos buffert och återfyllning. Processerna kan därmed också ha betydelse för egenskaperna hos buffert och återfyllning.

De kemiska processer som identifierats i buffert/återfyllning som kan ha långsiktig betydelse är:

- Jonbyte i montmorilloniten, huvudsakligen mellan  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{Na}^+$ ; även jonbyte med protoner kan ha betydelse.
- Upplösning av föroreningar i bentoniten.
- Omvandling av montmorilloniten till icke svällande mineral.
- Utfällning av mineral orsakat av temperaturgradienten.

Processerna finns utförligt beskrivna i Processrapporten. I detta avsnitt sammanfattas beskrivningarna och processerna kvantifieras med platsspecifika modellberäkningar eller enklare överslag.

Dessutom diskuteras sannolikheten för erosion av bufferten på lång sikt, dvs att buffertmaterial som tränger in i sprickor kring deponeringshål kan föras bort med grundvattnet. Sist i avsnittet analyseras effekterna om ett vatten med mycket högre jonstyrka än de som förväntas vid de tre analyserade platserna skulle tränga in i förvaret. En sådan situation är inte trolig i basscenariot, men diskuteras ändå som en extrem variant.

### ***Långsiktig påverkan på funktion***

Den kemiska utvecklingen kan långsiktigt påverka många egenskaper hos buffert och återfyllning.

Buffertens övergripande uppgift är att utgöra en diffusionsbarriär mellan kapsel och berg. För detta krävs dels en låg hydraulisk konduktivitet, dels förmågan att hålla kapseln centrerad i deponeringshålet under lång tid. Detta ställer i sin tur krav på densitet och svälltryck, se avsnitt 5.7. För återfyllningen finns kriterier för hydraulisk konduktivitet och svälltryck.

Av processerna som beskrivs i detta avsnitt kan för både buffert och återfyllning:

- den hydrauliska konduktiviteten och svälltrycket påverkas av jonbyte, mineralutfällning, mineralomvandling och erosion,
- densiteten påverkas av erosion.

### ***Jonbyte***

Montmorilloniten i (MX-80) har initialt cirka 80 procent natrium i jonbytespositionerna. Generellt binds tvåvärda joner hårdare till montmorilloniten än envärda. Granitiska grundvatten har i allmänhet ett högre Ca/Na-förhållande än det som rådde där bentoniten bildades. Detta innebär att kalcium kan förväntas byta plats med natrium när bentoniten kommer i kontakt med grundvatten. Tiden det tar för att omvandla större delen av Na-montmorilloniten till Ca-montmorillonit beror på grundvattnets sammansättning, halten kalciumhaltiga föroreningar i bufferten och på vattenomsättningen i närområdet.

Bruno m fl /1999/ beräknar med en jonbytesmodell omvandlingen från Na- till Ca-montmorillonit för de tre referensvattnen i SR 97. I modellen antas att bufferten mätas med det platsspecifika grundvattnet och att montmorilloniten med föroreningar omedelbart jämviktas med porvattnet, vilket medför att pH sjunker och karbonathalten stiger. Porvattnet byts sedan kontinuerligt ut mot det platsspecifika grundvattnet.

I beräkningarna har porvattnet i bufferten antagits omsättas helt på tiotusen år i samtliga fall. En vattenomsättningstid på tiotusen år motsvarar ett flöde i berget av ungefär  $10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$  vilket ungefär motsvarar förhållandena i Ceberg. En ökning av flödet med en tiopotens (motsvarar Aberg och Beberg) skulle ge en omsättningstid av tretusen år /KBS-3/.

I modellen inkluderas jonbyte mellan katjonerna i det inträngande vattnet och de som var ursprungligt bundna till montmorillonityorna samt tillförsel av kalciumjoner från upplösning av kalcitföroreningar i bentoniten. Tabell 8-10 visar de viktigaste egenskaperna hos grundvattnet som användes vid beräkningarna. För Beberg används det söta vattnet som har en relativt hög halt av bikarbonat. Det salta vattnet i Beberg påminner om Abergvattnet och förväntas därför ge upphov till en liknande kemisk utveckling i bufferten.

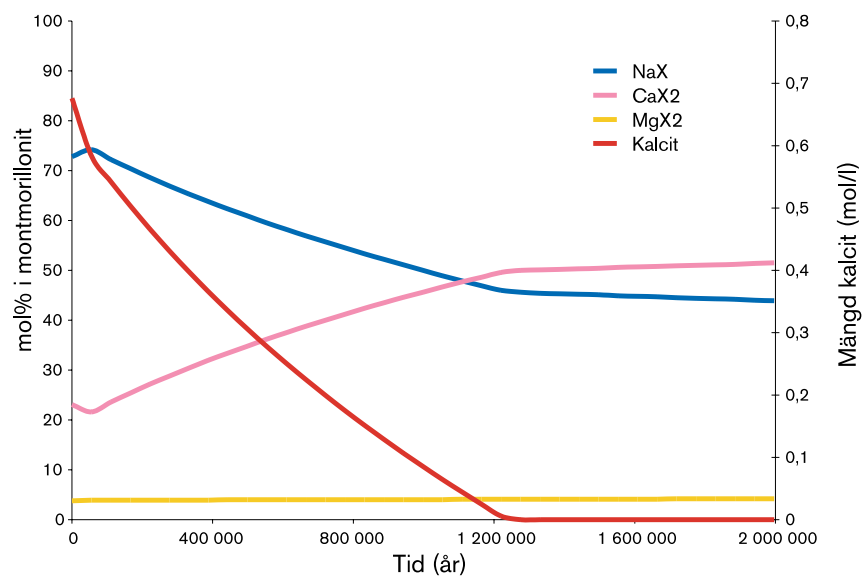
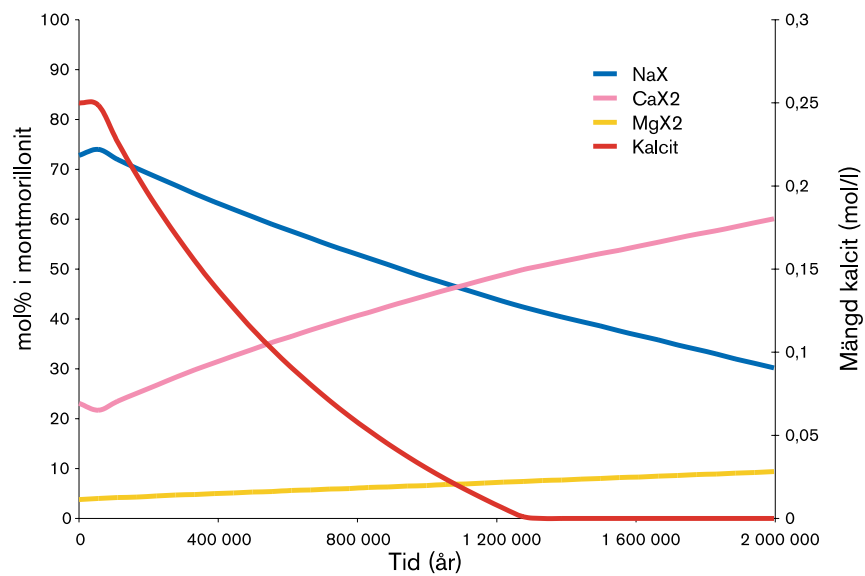
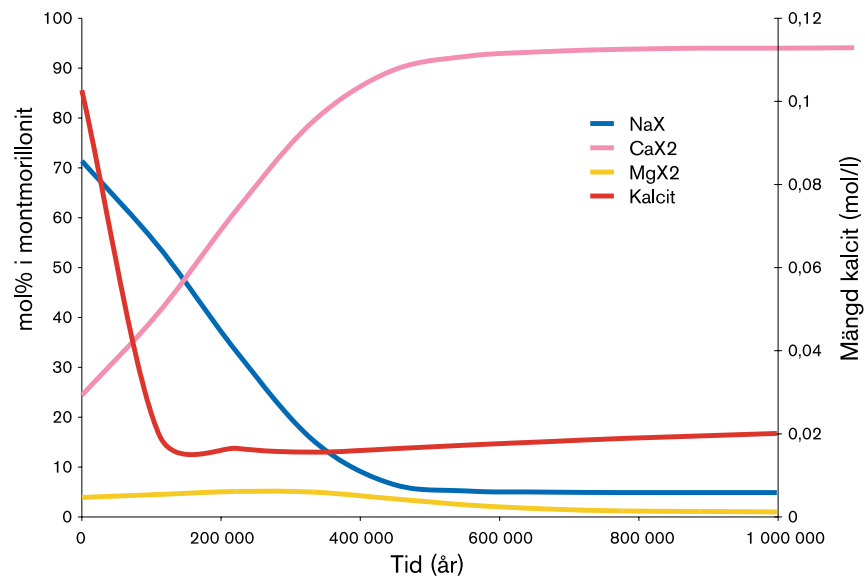
Figur 8-28 visas resultaten från beräkningarna av jonbytesprocessen.

I Aberg, som har ett salt grundvatten med hög kalciumhalt, går jonbytesprocessen snabbast: efter några hundratusen år har största delen av Na-montmorilloniten omvandlats till Ca-montmorillonit. I referensvattnen från Beberg och Ceberg går omvandlingen betydligt långsammare på grund av lägre kalciumhalter. I Cebergvattnet avstannar omvandlingen när all kalcit i bufferten lösts upp, eftersom förhållandet Na/Ca i grundvattnet är för högt för att något nämnvärt jonbyte ska ske. Tidsangivelsen i figurerna gäller förhållandena vid Ceberg. Vid Aberg och Beberg kan man förvänta att förloppen går ungefär tre gånger snabbare än vad som anges i respektive figur.

För MX-80 bentonit gäller att flertalet envärda joner i utbytesposition medför en stor potentiell svällning, med flervärda joner och större envärda joner, t ex  $\text{Cs}^+$ , ger avsevärt mindre potentiell svällning. För bufferten kommer, på grund av den höga densiteten, dock en hög svällförmåga att behållas även vid fullständig omvandling till Ca-montmorillonit. En total omvandling från Na- till Ca-montmorillonit skulle ge en sänkning av svälltrycket från 7–8 MPa till 4–5 MPa /Processrapporten/. Vid Aberg kan man alltså förvänta att svälltrycket på ungefär hundratusen år sjunker till 4–5 MPa. Detta har dock ingen betydelse för buffertens funktion.

**Tabell 8-10. Några egenskaper hos grundvattnen vid de tre platserna.**

	Aberg	Beberg (sött)	Ceberg
Ca <sup>2+</sup> (mg/liter)	1 900	140	21
Na <sup>+</sup> (mg/liter)	2 100	280	110
pH	7,7	7,9	9,3



**Figur 8-28.** Resultat av modelleringen av jonbytesprocessen vid de tre platserna. Figurerna visar hur natrium, kalcium och magnesium fördelar sig i bentonitens jonbytespositioner samt hur kalcit med tiden löses upp.



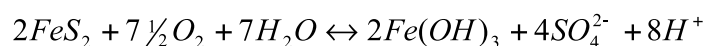
I återfyllningen är situationen en annan, mängden montmorillonit per volymenhet är mycket lägre än i bufferten och en omvandling kommer att medföra ett förlorat svälltryck. Denna effekt kan dock kompenseras genom att välja högre andel bentonit på en plats där jonbytet förväntas bli omfattande. I SR 97 antas att återfyllningen är platsanpassad på så sätt att kriterierna för konduktivitet och svällförmåga klaras.

Till en liten andel av jonbytespositionerna binds protoner. Detta medför att montmorilloniten får en pH-buffrande förmåga. Om ett vatten med lågt eller högt pH tränger in i bufferten kommer protoner att bindas respektive frigöras, vilket buffrar pH mot ett neutralt värde. Den pH-buffrande effekten av kalcitföreningar är dock större.

### **Upplösning av föreningar**

MX-80 innehåller ungefär 75 procent montmorillonit och 25 procent föreningar i form av andra mineral, se avsnitt 6.4.12. Dessa är stabila i svenska grundvatten, med ett fåtal undantag:

**Pyritoxidation:** Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) är stabilt i syrefria grundvatten. Inträngande syrehaltigt vatten kan dock oxidera pyriten enligt:



Reaktionen frigör protoner och kan därför sänka pH. Denna reaktion är relativt snabb och kan därför bidra till att reducerande förhållanden snabbt återställs i förvaret efter att det byggts och förslutits.

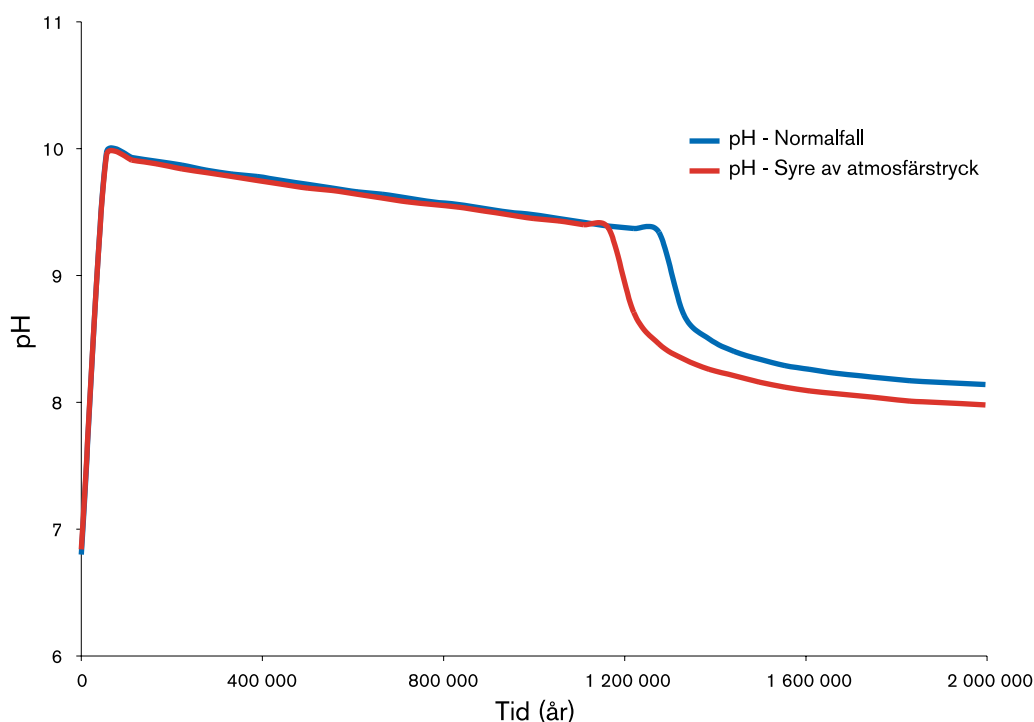
**Kalcitupplösning:** Kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) är normalt stabilt i svenska grundvatten, men jonbytesprocessen förbrukar de fria kalciumjoner som krävs för att förhindra kalcitupplösning. I vattnen från Beberg och Ceberg förväntas enligt ovan all kalcit lösas upp på grund av detta (se figur 8-28). Kalcit är också en effektiv pH-buffert. Reaktionen



förbrukar protoner. Detta är särskilt viktigt i ett tidigt skede, då syre som finns kvar i tunnlar och deponeringshål oxiderar pyriten i bufferten under bildning av protoner. Kalcit har lägre löslighet vid höga temperaturer än vid låga. I ett tidigt skede efter förslutningen av förvaret är temperaturgradienten över bufferten cirka 30 °C, vilket skulle kunna medföra att kalcit löser sig i den yttre delen av bufferten och vandrar till den varmare inre delen och faller ut där.

I modellstudien ovan /Bruno m fl, 1999/ beräknas också, integrerat med modelleringen av jonbytesprocessen, hur kalcitupplösning och pyritoxidation påverkar pH och redoxförhållanden i förvarets närområde, för grundvattnen vid Aberg, Beberg och Ceberg. Två olika uppsättningar indata användes i beräkningarna:

- Huvudfallet, där redoxpotentialen ges från reaktionerna mellan grundvattnet och bentoniten.
- Ett fall med oxiderande förhållanden, där det inträngande grundvattnet står i jämvikt med luft av atmosfärstryck. Fallet återspeglar situationen direkt efter förslutning av förvaret eller effekten av direkt inträngning av ett ytvatten.



**Figur 8-29.** pH-utveckling i bufferten i kontakt med Bebergvatten.

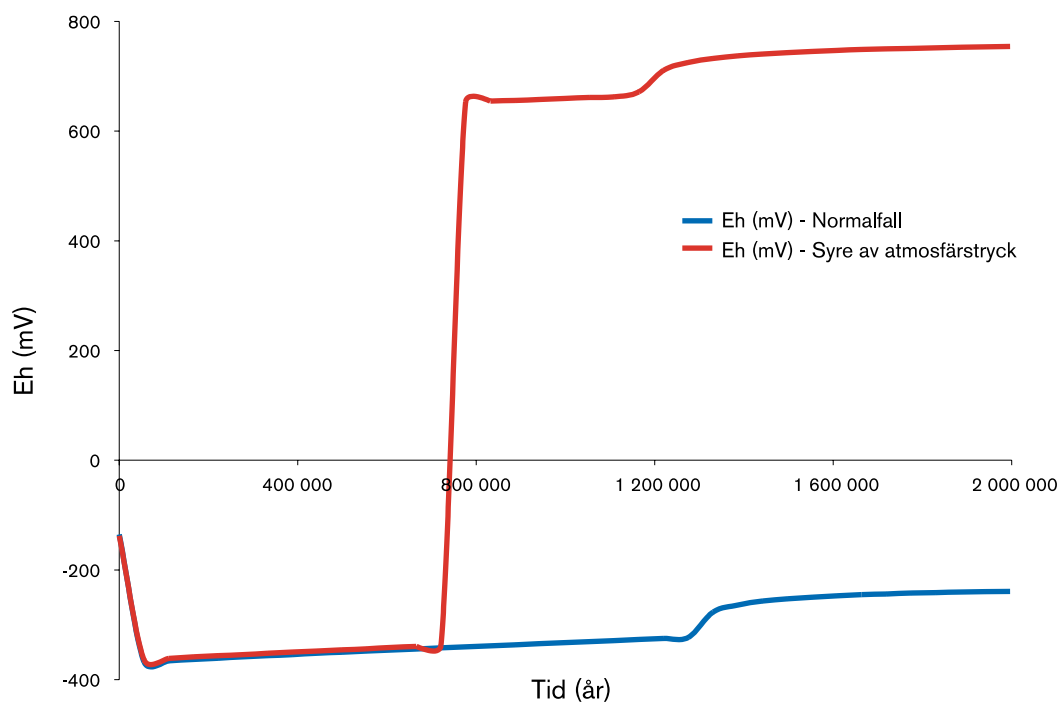
I figur 8-29 visas resultaten från simuleringarna med referensvattnet från Beberg. Aberg och Ceberg visar samma trender. Enligt figuren uppvisar samtliga fall en initial sänkning av pH till cirka sju som beror på en initial pyritoxidation. Denna sänkning följs av en pH-ökning till nära tio efter ett utbyte med grundvatten. I referensvattnet för Ceberg blir pH-värdet något högre (10,7) och i Aberg lägre. pH sjunker sedan långsamt tills all kalcit i bufferten har förbrukats. Porvattnet antar då samma pH-värde som det inträngande grundvattnet, dvs cirka åtta i Beberg.

I huvudfallet tillförs inget syre. Detta betyder att ingen pyritoxidation utöver den som beror på den initiala jämviktningen förekommer. Om det inträngade vattnet däremot är syresatt, behålls reducerande förhållanden så länge det finns pyrit kvar i bufferten. Figur 8-30 och figur 8-31 visar hur pyritinnehållet i bentoniten buffrar redoxförhållandena. Pyriten räcker mer än en halv miljon år även om grundvattnet skulle vara mättat med luft av atmosfärstryck.

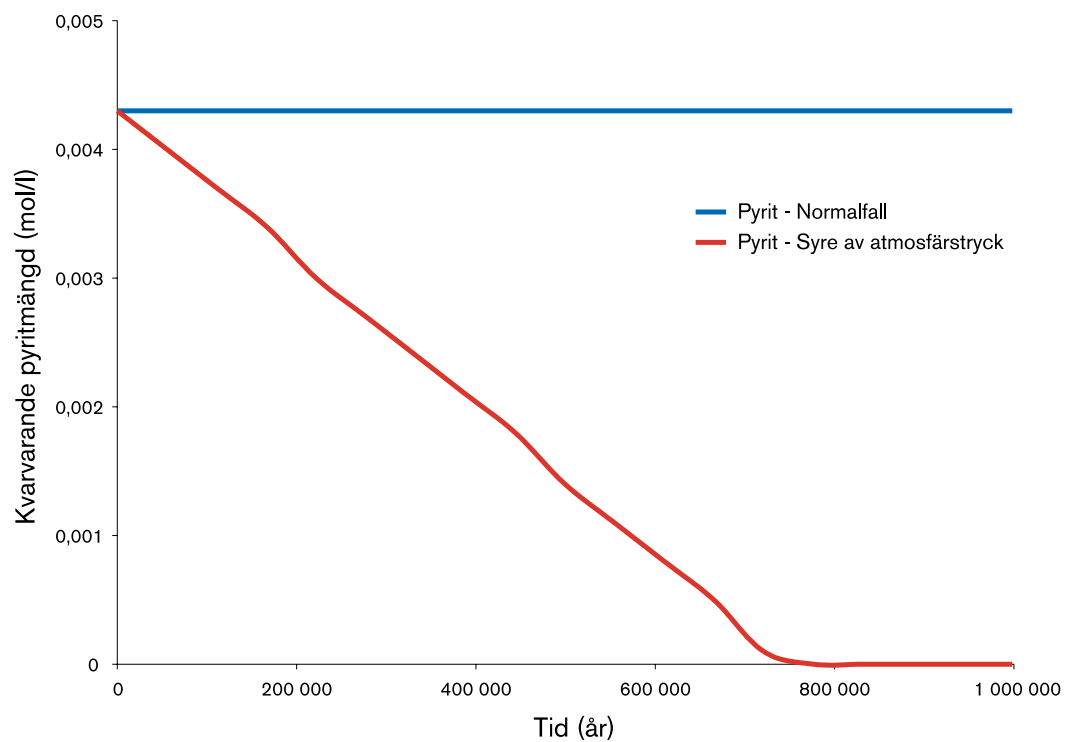
Förändringarna i pH och redoxförhållanden påverkar inte buffertens hydrauliska konduktivitet eller svälltryck nämnvärt.

### **Utfällning av mineral orsakat av temperaturgradienten**

I bufferten kommer temperaturen initialt att vara cirka 80 °C vid kapselytan och cirka 60 °C vid berget, se avsnitt 8.6. Kalciumsulfater (gips och anhydrit) har liksom kalcit lägre löslighet vid höga temperaturer och skulle också kunna "vandra" mot kapselytan. Kvarts och andra kiselöreningar är normalt stabila under förvarsförhållanden, men även här kan temperaturgradienten ha betydelse. Kiselföreningarnas löslighet ökar normalt med ökande temperatur och det är tänkbart att kisel kan lösa sig nära kapseln för att sedan falla ut i den kallare delen. Om denna process är omfattande skulle de utfällda föreningarna kunna påverka bentonitens porsystem, vilket i sin tur skulle kunna påverka buffertegenskaperna.



**Figur 8-30.** Redoxutveckling i bufferten i kontakt med Bebergvatten.



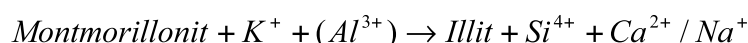
**Figur 8-31.** Förbrukning av pyrit i bufferten i kontakt med Bebergvatten.

En modellering av dessa processer visar att varken kalciumsulfat, kalcit eller kisel-föreningar anrikas i buffertmaterialet. Temperaturen är för låg och gradienten för liten för att ge utfällningar /Arcos, 1999/.

### **Omvandling av montmorilloniten till icke svällande mineral**

De fördelaktiga fysikaliska egenskaperna i bufferten, t ex svällförmåga och låg hydraulisk konduktivitet, styrs av samverkan mellan vatten och montmorillonitmaterialet i bentoniten. Montmorillonitens mineralogiska stabilitet är därför avgörande för buffertens funktion i ett djupförvar. Mineralet är stabilt i sin naturliga miljö, men omvandlingar kan förväntas under speciella kemiska betingelser. Processerna leder till en minskning av montmorillonithalten och det är viktigt att kunna kvantifiera omvandlingen för långa tidsperspektiv.

I naturliga system leder förhöjd temperatur och tillgång till kalium till omvandling från montmorillonit i riktning mot illit. Processen kan förenklat beskrivas:



Det finns ett stort antal publikationer, se Processrapporten, om illitiseringsprocessen och från dessa kan man dra slutsatsen att den inte är betydelsefull i ett djupförvar av KBS-3-typ (maximal temperatur < 100 °C). Argumentationen kan sammanfattas i tre områden:

- 1) Temperaturinducerad omvandling begränsas av brist på kalium.

För att en omvandling till illit ska kunna äga rum krävs tillgång till kaliumjoner. Eftersom den naturliga andelen kalium i bufferten kan hållas låg måste kalium transporteras in från omgivningen. Kaliumbehovet för att helt omvandla montmorilloniten i bufferten är cirka fem viktsprocent, vilket motsvarar närmare ett ton kalium för ett deponeringshål. Beräkningar och modelleringar visar att intransporten förväntas ske mycket långsamt och att detta i sig utgör ett effektivt hinder för en betydande omvandling. Tabell 8-11 visar en uppskattning av omvandlingen baserat på omedelbar reaktion mellan montmorillonit och kalium.

**Tabell 8-11. Uppskattning av hastigheten för illitisering baserat på tillgången på kalium för Aberg, Beberg och Ceberg. De platsspecifika kaliumhalterna är hämtade från avsnitt 8.9.2 (ostört tillstånd, sött vatten i Beberg), flödes hastigheter från Datarapporten.**

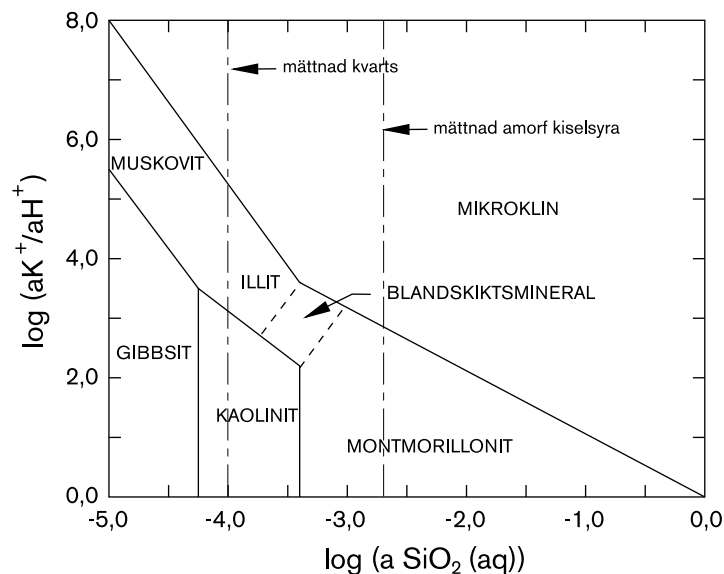
	Medianflöde (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · år)	Q <sub>ekv</sub> (liter/ kapsel · år)	Kaliumhalt (mg/l)	Tid för fullständig omvandling (år)	Andel omvandlat vid 1 milj år (%)
Aberg	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	3	8	40 miljoner	2,5
Beberg	1 · 10 <sup>-3</sup>	3	2	160 miljoner	0,6
Ceberg	3,3 · 10 <sup>-5</sup>	0,5	2	1 miljard	0,1

2) Bentonitmaterialiet är nära mineralogisk jämvikt i utgångsläget.

I sin ursprungsmiljö är bentoniten vanligen nära mineralogisk jämvikt, dvs endast obetydliga mineralogiska förändringar äger rum. I ett djupförvar är utbytet mellan buffert och omgivande miljö starkt begränsat, och buffertens massa är relativt stor. Bentoniten i bufferten kommer därför i utgångsläget att skapa sin egen kemiska miljö, se t ex Fritz m fl /1984/. Figur 8-32 visar stabilitetsområden för montmorillonit/illit med avseende på pH, kalium och kiselinhåll vid 25 °C. Av figuren framgår att om kiselhalten är i jämvikt med kvarts så är montmorillonit inte stabil, däremot är den stabil om kiselkoncentrationen styrs av amorf kiselsyra. Vid låga temperaturer är utfällningen av kvarts mycket långsam och den enda mekanismen för att föra bort kisel är transport med grundvattnet. Flödena är emellertid mycket låga och skillnaden i kiselkoncentration mellan buffert och grundvatten så liten att effekten blir försumbar. Två tidiga förändringar av den kemiska miljön är emellertid uppenbara:

- Ökning av joninnehållet i porvattnet som följd av intransport av lösta ämnen under vattenmättningen. För grundvattnen vid Aberg, Beberg och Ceberg är ökningen liten i förhållande till den naturligt höga katjonkoncentration som råder i montmorilloniten i bufferten.
- Temperaturökning som följd av bränslets sönderfall. Perioden med påtagligt förhöjd temperatur är emellertid relativt kort; efter 1 000 år är t ex förhöjningen mindre än 20 °C i Ceberg /Ageskog och Jansson, 1999/.

Systemet kan alltså förväntas vara nära mineralogisk jämvikt under huvuddelen av förvarsperioden.



**Figur 8-32.** Stabilitetsområden för montmorillonit/illit med avseende på pH, kalium och kiselinhåll vid 25 °C. Förenklad från Agard och Helgesson /1983/.

3) Omvandlingshastigheten vid förvarets maxtemperatur är mycket låg.

Kinetiska modeller finns för omvandlingen av smektit till illit. Samband och konstanter har fastställts genom laboratorieförsök och genom jämförelser med naturliga system, t ex Eberl och Hower /1976/, Pytte /1982/ och Huang m fl /1993/. Huangs modell visar en omvandling på 50 procent vid en miljon år vid 90 °C och 400 ppm kalium. Vid förväntade temperaturer och kaliumhalter blir omvandlingen avsevärt lägre.

### ***Kolloidbildning/erosion***

Montmorillonit från den expanderande bufferten förväntas till viss del tränga in i sprickor kring deponeringshålen. Grundvattnet i sprickorna skulle därefter kunna tänkas erodera bufferten. Två möjliga orsaker till erosion har identifierats:

- Kemisk erosion där lergelen dispergeras.
- Mekanisk erosion där lerpartiklar rycks bort av det strömmande vattnet.

För att lergelen ska vara kemiskt stabil och inte dispergeras till en kolloidal suspension krävs att vattnet innehåller en tillräcklig halt av positiva joner. Kalcium är t ex vanligt i djupa grundvatten och om halten överstiger 4 mg/liter är lergelen stabil. I referensvattnen för de tre platserna, avsnitt 8.9.2, är  $\text{Ca}^{2+}$ -halterna tillräckligt höga för att förhindra erosion, både idag och i framtiden.

Mekanisk erosion kräver mycket höga flödeshastigheter hos grundvattnet. En beräkning av kritisk hastighet visar att den överstiger typiska medelhastigheter på förvarsdjup med minst 1 000 gånger.

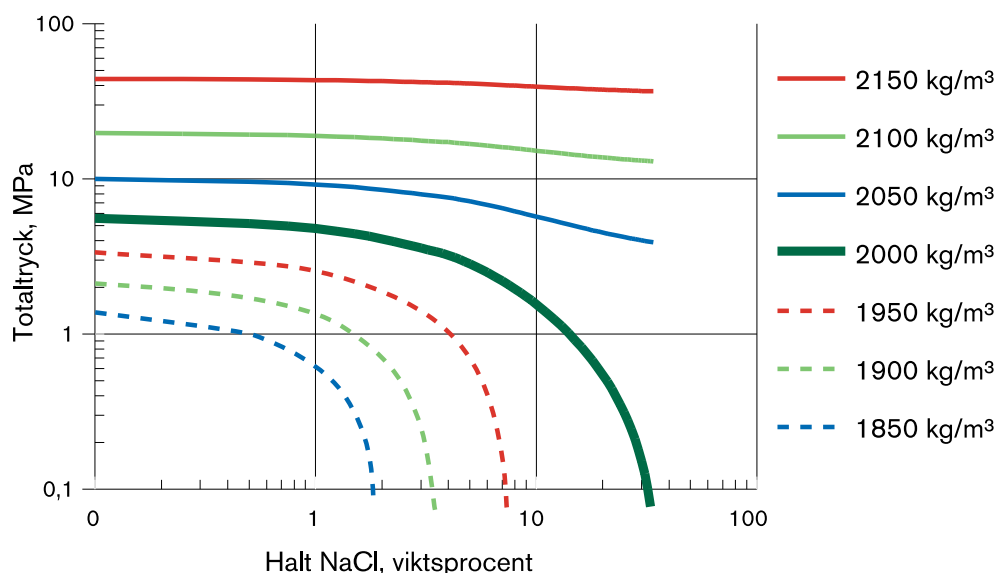
Under de förhållanden som råder i djupförvaret i basscenariot förväntas den långsiktiga omfattningen av erosion bli försumbar. Sannolikhet för erosion under extremt jonfattiga grundvattenförhållanden behöver studeras ytterligare.

### ***Inträngning av vatten med hög jonstyrka***

Grundvattnen vid Aberg, Beberg och Ceberg har alltför låga jonstyrkor för att detta ska ha betydelse för buffertens svällförmåga. Om vatten med betydligt högre jonstyrka skulle tränga in i förvaret skulle detta kunna påverka buffertens egenskaper /Processrapporten/.

Ökad jonkoncentration leder generellt till en reducerad potentiell svällning, och därmed till likartade effekter på porgeometrin som ett jonbyte till tvåvärda joner /Norrish och Quirk, 1954/. Ökad jonkoncentration leder också till en sänkning av svälltrycket på grund av osmotiska effekter, och till ändringar i porgeometrin som påverkar materialets hydrauliska konduktivitet /Karnland, 1997/.

Effekten av hög jonkoncentration på svälltryck kan beräknas med termodynamiska modeller. Maximalt pessimistiska modeller ger att svälltrycket sjunker med ökande salthalt för att upphöra helt i bufferten vid en NaCl-halt av cirka sju procent. Beräkningar baserade på mindre pessimistiska antaganden och experimentella förstudier visar att svälltryck kan förväntas även vid mättade saltlösningar /Karnland, 1997/. Figur 8-33 visar resultaten från dessa beräkningar.



**Figur 8-33.** Svälltryck som funktion av saltbalt för Na-bentonit vid olika densiteter.

Laborariestudier av kanadensisk bentonit ger stöd för den senare beräkningen /Dixon m fl, 1996/. Temperatureffekter på svälltryck och hydraulisk konduktivitet är inte experimentellt dokumenterade för mycket höga salthalter.

### Sammanfattning

Redovisningen ovan visar att:

- Jonbyte i kombination med kalcitupplösning påverkar både pH och buffertens svällförmåga. Modelleringen visar att pH i vattnet kommer att stiga med 1–2 enheter när det kommer i kontakt med bufferten. Jonbytet kommer att omvandla en del av Na-montmorilloniten i bufferten till Ca-montmorillonit. Detta påverkar svällförmågan. I Aberg skulle svälltrycket kunna sjunka till cirka 4–5 MPa på cirka hundrausen år. Detta påverkar dock inte buffertens funktion.
- Pyriten i bufferten förväntas förbruka det syre som skulle kunna komma in då förvaret byggs och är i drift. Det vatten som kommer i kontakt med kapseln förväntas därför alltid vara reducerande. När naturligt (reducerande) grundvatten är i kontakt med bufferten är pyrit stabilt och påverkar inte kemin.
- Kaliumjoner i grundvattnet tillsammans med förhöjd temperatur skulle kunna omvandla montmorilloniten till icke-expanderbara mineral (illit). Processen är dock för långsam för att ha någon betydelse.
- Kisloxider, karbonater (kalcit och siderit) och kalciumsulfat (anhydrit) har omvänt temperaturberoende lösligheter och skulle kunna "vandras" i buffert under perioden med en temperaturgradient. Resultaten från den enkla modell som redovisas ovan visar dock att temperaturerna är för låga och gradienterna för små för att detta ska ha någon betydelse.

Buffertmaterialet är valt och dimensionerat för att behålla sina gynnsamma egenskaper under mycket långa tider. De processer som har beskrivits i avsnittet kommer att påverka buffertens egenskaper i ett långt tidsperspektiv. Omfattningen är inte större än att de långsiktiga säkerhetskriterierna för hydraulisk konduktivitet, densitet och svälltryck (avsnitt 5.7) klaras med god marginal.

Skillnaderna mellan de naturliga grundvattnen vid Aberg, Beberg och Ceberg leder inte till några avgörande skillnader för den kemiska utvecklingen i bufferten. De viktigaste skillnaderna är att:

- Ca/Na-kvoten i Aberg är högre, så att jonbytet från Na till Ca blir mer eller mindre fullständigt efter långa tider med reducerat svälltryck som följd.
- Det initiala pH-värdet i Ceberg är så högt att pH efter reaktion med bufferten beräknas stiga till 10,7.

Resultatet av de kemiska analyserna, nämligen att bufferten förväntas behålla sin funktion under mycket lång tid, är inte förvånande med tanke på att buffertmaterialet är hämtat från en miljö som länge liknat förhållandena i svensk berggrund.

Buffertmaterialet i SR 97, bentonit med handelsnamnet MX-80, hämtas från gränsområdet mellan Wyoming och South Dakota. Bentoniten bildades för 100–120 miljoner år sedan genom nedfall av vulkanisk aska i det hav som vid den tiden delade den nordamerikanska kontinenten. Vattnet i havet var sött eller bräckt, dvs relativt likt svenska grundvattnen. Bentoniten täcktes förhållandevis snabbt av sediment och låg sedan kvar under dessa förhållanden fram till för cirka 60 miljoner år sedan då landhöjningen lyfte förekomsterna över grundvattennivån.

Återfyllningens kemiska utveckling har inte diskuterats närmare. Den kommer att anpassas till den valda platsen för att uppfylla säkerhetskriterierna. Detta behöver närmare utredas i kommande säkerhetsanalyser.

#### 8.9.4 Korrosion av kopparkapseln

Kopparkapselns isolerande förmåga är en central faktor i förvarets säkerhet. En viktig uppgift i säkerhetsanalysen är därför att utreda hur det fem centimeter tjocka kopparhöljet skulle kunna skadas på kemisk väg, dvs genom olika former av korrosion. Spänningskorrosion behandlas som tidigare nämnts i Processrapporten där slutsatsen är att processen kan försummas. Nedanstående avsnitt behandlar kemiska korrosion och bygger på Werme /1998/.

Metallisk koppar är termodynamiskt mycket stabil vid de syrefria förhållanden som naturligt råder på förvarsdjup. Stabiliteten skulle kunna störas av ett ämne som bildar kopparfaser som är ännu stabilare än den metalliska fasen. Den enda komponenten av det slaget som identifierats i svenska djupa grundvattnen är **sulfid**. Även bland föroreningarna i bufferten har endast sulfid identifierats som potentiell orsak till kopparkorrosion.

En annan orsak till korrosion skulle kunna vara kloridjoner. Koppar bildar starka kloridkomplex och dessa skulle kunna höja bortransportabiliteten av löst koppar. För att en sådan process ska ha betydelse krävs dock extremt höga kloridkoncentrationer (>100 g/liter) i kombination med pH-värden under tre. Bentoniten är en effektiv pH-buffert och vattnet kring kapseln beräknas ha ett pH mellan sju och elva.



Under tidiga skeden av förvaringen kan korrosion dessutom orsakas av **syre** från förvarets byggnation och drift samt av **salpetersyra** som bildats genom  $\gamma$ -radiolys av kväveföreningar i fuktig luft i gapet mellan kapsel och buffert.

### **Syrekorrosion**

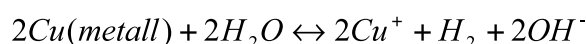
Kvarblivet syre i buffert och grundvatten från förvarets byggnation och drift kan med enkla, pessimistiska antaganden visas leda till ett maximalt korrosionsdjup av omkring 0,03 mm jämnt fördelat över kapselytan. Allt tillfört syre från byggnation och drift har då antagits leda till kopparkorrosion. Även lokala korrosionsangrepp, gropfrätning, har analyserats för dessa förhållanden. De maximala frätgropsdjupen har pessimistiskt uppskattats till ett par millimeter men blir sannolikt betydligt mindre.

### **Korrosion av salpetersyra**

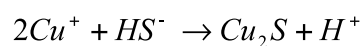
Även korrosion orsakad av den salpetersyra som bildas vid radiolys i gapet mellan kapsel och buffert kan med enkla överslag visas vara försumbar. Även i dessa beräkningar antas att all salpetersyra som teoretiskt kan bildas åtgår till kopparkorrosion.

### **Sulfidkorrosion**

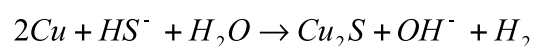
Reaktionen



ger vid jämvikt en fri kopparjonkoncentration av omkring  $10^{-20}$  M. Vätesulfid som kommer i kontakt med kapseln kan bilda kopparsulfid enligt:



där jämviktskoncentrationen för kopparjoner är cirka  $10^{-25}$  M. Om kopparsulfid faller ut medför det att mer kopparjoner frigörs från kapseln. Nettoreaktion för sulfidkorrosion blir:



Sulfid finns i grundvattnet och i buffertens porvatten. Dessutom finns sulfidhaltiga mineral, främst pyrit, som kan lösas upp och bidra med sulfid i såväl buffert som berg.

**Sulfid från buffert:** Pyritinnehållet i bufferten, cirka 0,3 procent, kan omvandlas till sulfid i porvattnet under syrefria förhållanden. Om all pyrit i bufferten i ett deponeringshåll skulle åtgå till kopparkorrosion svarar detta mot ett korrosionsdjup av cirka 0,5 mm vid ett jämnt fördelat angrepp över ytan. Pyriten är jämnt fördelad i bufferten och det finns ingen anledning att förvänta lokala angrepp. Förloppet beräknas ta cirka 300 000 år. Det potentiella sulfidinnehållet i bufferten ger alltså en försumbar reduktion av kapselns väggtjocklek.

**Sulfid i grundvattnet:** Hastigheten för korrosion orsakad av sulfid i grundvatten styrs av takten i vilken sulfiden kan tillföras kapseln. Både det långsamma grundvattenflödet och buffertens transportmotstånd begränsar korrosionstakten.

För att uppskatta takten om bara bufferten skulle begränsa kan man anta att grundvattenflödet förmår transportera löst sulfid till buffertens gräns mot berget i tillräcklig omfattning för att där upprätthålla den naturliga koncentrationen i grundvattnet. Korrosionshastigheten,  $R_{Korr / Buffert}$ , kan då uppskattas med

$$R_{Korr / Buffert} = \frac{2C_{Sulfid} D_e M_{Cu}}{d_{Buffert} \rho_{Cu}}$$

där  $C_{Sulfid}$  är sulfidkoncentrationen i grundvattnet,  $d_{Buffert}$  buffertens tjocklek (0,35 meter),  $D_e$  diffusiviteten för sulfid i bufferten (antas vara  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{år}$ ),  $M_{Cu}$  och  $\rho_{Cu}$  molvikt respektive densitet för koppar. Man har då antagit att all sulfid som tränger igenom bufferten omedelbart reagerar med koppar.

Om i stället bara grundvattenflödets transportförmåga kring deponeringshålet begränsar hastigheten kan korrosionshastigheten uppskattas med

$$R_{Korr / Flöde} = \frac{2C_{Sulfid} \phi M_{Cu}}{\rho_{Cu}}$$

där  $\phi$  är grundvattenflödet kring deponeringshålet.

I tabell 8-12 visas resultat av båda uppskattningarna för Aberg, Beberg och Ceberg.

I det minst gynnsamma fallet, där endast en pessimistiskt hög flödeshastighet begränsar korrosionen i Aberg, blir kapselns uppskattade livslängd omkring tio miljoner år. Buffertmotståndet ensamt ger teoretiskt en livslängd på 500 miljoner år i Aberg.

Var för sig begränsar alltså grundvattenflödet och bufferten korrosionshastigheten så att kapselns livslängd teoretiskt kan beräknas till minst tio miljoner år. Det är också värt att notera att bufferten inte är nödvändig för att garantera kapselns livslängd i detta avseende.

**Tabell 8-12. Uppskattning av hastigheten för kopparkorrosion begränsad av antingen buffertens transportmotstånd eller grundvattenflödet för Aberg, Beberg och Ceberg. De platsspecifika sulfidhalterna i referensvattnen är hämtade från avsnitt 8.9.2, median- och pessimistiska flödeshastigheter från Datarapporten.**

	Sulfid-koncentration $C_{Sulfid}$ mg/liter	Korrosions-hastighet $R_{Korr / Buffert}$ cm/år	Grundvattenflöde $\phi$ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$		Korrosionshastighet $R_{Korr / Flöde}$ cm/år	
			Median	Pessi-mistiskt	Median	Pessi-mistiskt
Aberg	0,14	$10^{-8}$	0,002	0,1	$10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Beberg	< 0,01	< $4 \cdot 10^{-10}$	0,001	0,02	< $4 \cdot 10^{-10}$	< $8 \cdot 10^{-9}$
Ceberg	< 0,01	< $2 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	< $9 \cdot 10^{-14}$	< $4 \cdot 10^{-13}$

## **Sulfatreduktion**

Beräkningarna ovan baseras på uppmätta halter av sulfidmineral i bufferten och halter av sulfid i grundvattnet. Sulfatreducerade bakterier skulle kunna producera mer sulfid från sulfatinnehållet i buffert och grundvatten.

Sulfidhalterna i svenska grundvatten i allmänhet begränsas dock av att sulfid faller ut som fasta mineral då sulfidhalterna blir tillräckligt höga. De fasta mineralen bildas framför allt genom reaktion med järn. De högsta sulfidkoncentrationer som mätts i svenska grundvatten ligger kring 1 mg/liter, se avsnitt 8.9.2. Detta gör att bakteriell sulfatreduktion i berget har begränsad betydelse; sulfidkoncentrationen kan ändå inte nå oacceptabla nivåer.

Det har dessutom visats att sulfatreducerande bakterier inte kan överleva i högkompakterad bentonit.

## **Groprätning**

Kapselns livslängd skulle kunna förkortas om korrosionen skedde mycket lokalt. För sulfidkorrosion finns det dock ingen känd mekanism som skulle kunna leda till en lokal korrosionsattack.

Man kan ändå förvänta att korrosionen inte sker helt jämnt över kapselytan, men den djupaste korrosionen är sannolikt inte mer än dubbelt så djup som medelvärdet.

## **8.9.5 Tilltro; grundvattensammansättningens utveckling**

### **Processförståelse**

Förståelsen av de grundläggande reaktionerna liksom mekanismerna för hur lösta ämnen transporteras med grundvattnet är god, se Processrapporten.

### **Modeller**

Modeller som på olika sätt behandlar grundvattnets sammansättning och utveckling används inte direkt för prediktioner i säkerhetsanalysen. Modelluppsättningen utvecklas ständigt och utgör ett stöd i uppbyggnaden av förståelsen av den grundvattenkemiska utvecklingen vid en förvarsplats.

### **Data**

Dataosäkerheterna är generellt stora. Dels kan dagens situation bara observeras i enstaka punkter (borrhål) i den heterogena geosfären, dels styrs den framtida utvecklingen av förhållandena utanför förvarsområdet och av kvardröjande effekter av den historiska klimatutvecklingen för vilka båda råder stora osäkerheter. Osäkerheterna gör att den framtida grundvattensammansättningen på en förvarsplats måste anges som ett intervall. Tilltron till att sådana intervall kan bestämmas genom att systematiskt ta hänsyn till faktorer och osäkerheter som påverkar utvecklingen är god.

## 8.9.6 Tilltro; buffertens kemiska utveckling

### *Processförståelse*

Den grundläggande förståelsen för samtliga processer i buffertens kemiska utveckling är tillräcklig för att möjliggöra en hantering i säkerhetsanalysen. De långsiktiga effekterna av erosion under extrema förhållanden kan eventuellt behöva utredas ytterligare.

### *Modeller och data*

Tilltron till de modeller och data som används för beräkningar av buffertens kemiska utveckling bedöms som tillräcklig för de relativt grova modellberäkningar som krävs i basscenariot.

## 8.9.7 Tilltro; kapselkorrosion

### *Processförståelse*

Den grundläggande förståelsen av olika mekanismer för kopparkorrosion i djupförvarsmiljö är god, se Processrapporten.

### *Modeller och data*

I säkerhetsanalysen görs kvantitativa uppskattningar av kopparkorrosion med överslagsberäkningar, vilket ger en tillräcklig noggrannhet. Dataosäkerheter rör framför allt tillgången på korrodanter. Osäkerheterna hanteras i säkerhetsanalysen pessimistiskt.

## 8.9.8 Slutsatser

I basscenariot har inga långsiktiga förändringar identifierats som motsäger slutsatsen att grundvattnet på förvarsdjup kommer att förbli syrefritt i ett miljonårsperspektiv.

Grundvattnets långsiktiga sammansättning i allmänhet och särskilt dess innehåll av ämnen som kan skada kapsel eller buffert kan uppskattas platsspecifikt i form av intervall. Intervallens storlek bestäms av osäkerheter i dagens platsspecifika grundvattensammansättning och i den långsiktiga utvecklingen av flödessituationen och de hydrokemiska förhållanden i berggrunden.

Intervallen kan användas för att bl a studera kemisk utveckling i buffert och kapsel t ex genom att pessimistiskt anta att det mest ogynnsamma värdet i intervallet blir rådande. Sådana analyser visar att bufferten förväntas behålla ett tillräckligt högt svälltryck, en tillräckligt hög densitet och en tillräckligt låg vattenledningsförmåga vid samtliga platser i ett mycket långt tidsperspektiv. Kapseln beräknas med god marginal klara de korrosionsangrepp den utsätts för i ett miljonårsperspektiv.

Behandlingen av återfyllningsmaterialets långsiktiga funktion behöver utvecklas inför kommande säkerhetsanalyser. Även omfattningen av erosion vid extremt jonfattiga grundvattenförhållanden kan behöva studeras ytterligare.

## 8.10 Sammanfattning

### 8.10.1 Basscenariot i ett tidsperspektiv

Som en inledning till sammanfattningen av resultatet av analysen av basscenariot summeras här hela utvecklingen uppdelad i tre tidsepoker.

#### ***De inledande hundra åren***

Bränslets farlighet minskar under denna epok till ungefär 60 procent av farligheten vid deponering.

Omedelbart efter deponering startar en uppvärmning av hela förvaret, driven av resteffekten i bränslet. Den maximala temperaturen på kapselns utsida, högst 90 °C, nås efter cirka tio år. På randen till deponeringshålen nås temperaturmaximum efter cirka 20 år. I en större skala nås temperaturmaximum på förvarsdjup efter 90 år i Beberg (45 °C) och efter 80 år i Ceberg (40 °C).

Bufferten, som initialt har en vattenmättnadsgrad av cirka 80 procent, tar samtidigt med uppvärmningen upp vatten från det omgivande berget. Tiden till full vattenmättnad är något tiotal år och varierar med de hydrauliska förhållandena i berget kring deponeringshålet. Samtidigt återställs successivt grundvattennivån ovanför förvaret.

I slutskedet av buffertens vattenmättnadsförlopp utvecklas ett svälltryck mot kapseln. Svälltrycket och grundvattentrycket ger ett totalt tryck av omkring 12 MPa mot kapseln vilket är långt under den mekaniska belastning kapseln klarar. Svälltrycket kan framför allt under vattenmättnadsskedet vara ojämnt fördelat över kapselns yta. De mekaniska spänningar detta leder till i kapseln ligger också långt under de påfrestningar kapseln är dimensionerad att tåla. Värmeutvidgningen av förvarsberget kan ge millimeterstora sprickrörelser kring deponeringshålen.

Den grundvattenkemiska utvecklingen karakteriseras under de inledande hundra åren av att den naturliga situationen störts av att vatten i regionen kring förvaret ”dragits in” mot förvaret som en konsekvens av att grundvattnet ständigt pumpats bort under byggnationen. Djupare liggande salt vatten kan på detta sätt dras upp till förvarets närhet. De kemiska förhållandena är också störda av att bl a syre och konstruktionsmaterial tillförts då förvaret byggs. Tillfört både organiskt och oorganiskt material förväntas förbrukas så att grundvattensammansättningen blir snarlik den ursprungliga inom hundra år.

#### ***Hundra år till tiotusen år***

Bränslets farlighet minskar under denna epok från 60 procent till cirka 0,6 procent av farligheten vid deponering. Uppvärmningen av geosfären fortsätter och en värmevåg beräknas nå ytan, men påverkan blir försumbar. Vid tvåplansförvaret i Aberg nås temperaturmaximum mellan förvarsplanen (55 °C) efter cirka 450 år.

Hydrauliskt sker endast små förändringar under denna epok. Bufferten är mättad med vatten och grundvattnets strömning i geosfären liknar den naturliga situation som rådde innan förvaret byggdes. Med tiden kommer landhöjningen att påverka flödet, framför allt vid ön Aberg som förväntas övergå till att bli en del av fastlandet om ungefär tvåtusen år, men effekterna på flödet är små.

Den mekaniska situationen för buffert och kapsel förväntas vara stationär eftersom bufferten förblir vattenmättad. I geosfären leder uppvärmningen till en uppbyggnad av spänningar som delvis relaxeras genom termisk expansion. Vissa sprickor sluts och andra öppnas men påverkan är sannolikt inte tillräcklig kraftig för att leda till sprickbildning. I större sprickzoner kan centimeterstora termiskt orsakade rörelser förekomma.

På lång sikt leder förändringar av flödesförhållandena till att det salta vattnet vid Aberg och blandningen av sött och salt vatten vid Beberg övergår till en sammansättning som alltmer liknar dagens söta vatten vid Ceberg.

I bufferten pågår ett utbyte av buffertens ursprungliga innehåll av natriumjoner mot kalciumjoner i grundvattnet. Kalcit i bufferten löses långsamt upp.

Bufferten har en så låg vattenledningsförmåga att transport av vattenlösta ämnen, bl a kapselkorrodanter helt sker genom diffusion. Korrosionsprocesser i kopparhöljet har under denna epok försumbara konsekvenser.

### ***Tiden efter tiotusen år***

I realiteten är det sannolikt med större klimatförändringar under denna epok. I basscenariot studeras utvecklingen vid dagens klimatförhållanden för att användas som jämförelsegrund för effekterna av klimatförändringar som är osäkra till både art och omfattning.

På hundrausen år avtar farligheten till cirka 0,05 procent av den initiala och ligger därefter i nivå med farligheten hos den uranmalm som brutits för att framställa bränslet. Fortfarande finns i bränslet både små mängder radionuklider som relativt lätt kan röra sig genom förvarets barriärer om kapseln skulle skadas, och större mängder svårörliga nuklider. Resteffekten har efter tiotusen år avtagit till mindre än en procent av den ursprungliga och temperaturförhållandena i förvarssystemet närmar sig åter den naturliga situationen.

Eftersom dagens klimat består enligt definitionen av scenariot förblir den hydrauliska situationen i geosfären oförändrad. Även grundvattensammansättningen kring förvaret förblir oförändrad.

Under denna epok påverkas den mekaniska belastningen på förvarsberget av dels långsamma, storskaliga rörelser i berggrunden, dels av bergets egna långsiktiga material-egenskaper som kan ge tidsfördröjda deformationer (kryprörelser). Överslagsberäkningar visar att effekterna av båda dessa processer är försumbara.

Buffertens kemiska utveckling karakteriseras av ett fortsatt jonbyte och upplösning av kalcit. I Aberg förväntas ett fullständigt utbyte från natrium till kalcium efter några hundrausen år. Effekten blir en sänkning av svälltrycket till 4–5 MPa. Vid Beberg går processen ungefär tio gånger långsammare och vid Ceberg blir omvandlingen aldrig fullständig eftersom förhållandet natrium/kalcium i grundvattnet är för högt. Minskningen i svälltryck har ingen betydelse för buffertens funktion. Inte heller kalcit-upplösningen eller påverkan av det omgivande grundvattnet ger några förändringar som påverkar buffertens normala funktion.

## 8.10.2 Övergripande slutsatser

Under förvarssystemets utveckling i basscenariot behåller kapseln sin isolerande förmåga.

De mekaniska påfrestningarna på kapseln från grundvattentryck, buffertens svälltryck och från berggrörelser kring deponeringshålen är alla långt mindre än vad som krävs för att äventyra isoleringen. Den mekaniska utvecklingen i förvarsberget har diskuterats i ett hundratusenårigt perspektiv och det finns inget som motsäger att ett miljonårsperspektiv skulle resultera i samma bedömning.

Inte heller de kemiska påfrestningarna på kapseln i form av korrosion av syre eller sulfid ger ens i ett miljonårsperspektiv skador på kopparhöljet som äventyrar isoleringen.

Bedömningen grundar sig bl a på kraven att kapselns yttemperatur ska ligga under 100 °C och att vattnet på förvarsdjup ska vara syrefritt. Det förra kan alltid uppnås med en lämplig utplacering av deponeringshålen eller genom anpassning av bränsleinnehållet i kapslarna. I djupa svenska grundvatten har syre aldrig observerats. Syre i regnvatten förbrukas i regel effektivt redan i markskiktet. Dessutom finns mikrober i berget och mineral i både berg och buffert med mycket stor potential till syreförbrukning. I basscenariot har inga långsiktiga förändringar eller processer identifierats som motsäger slutsatsen att grundvattnet på förvarsdjup kommer att bli syrefritt i ett miljonårsperspektiv.

Bedömningen av kapselns integritet grundar sig också på att bufferten ska fungera som avsett vilket bl a betyder att bufferten bör ha en tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet, en tillräckligt hög densitet och ett tillräckligt svälltryck. Processer som t ex jonbyte, mineralomvandlingar eller erosion ger i basscenariot inga förändringar av buffertens egenskaper som skulle kunna äventyra funktionen ens i ett miljonårsperspektiv. Resultatet är förväntat i så motto att buffertmaterialet är taget från en naturlig miljö där förhållandena i årmiljoner liknat dem på förvarsdjup i svensk berggrund.

## 8.10.3 Kommande arbete

Analysen av basscenariot kan göras mer distinkt i takt med att platsspecifika data om geosfären på en verklig förvarsplats blir tillgängliga. Även andra delar av underlaget och själva analysen av scenariot kan utvecklas på en del punkter som omnämns i texten. Till möjliga förbättringar hör:

- Beräkningar av kapselns hållfasthet med realistiska, inhomogena materialegenskaper för olika situationer.
- Platsspecifika bergmekaniska analyser.
- Analys av varianter där bufferten antas vara defekt eller felaktigt deponerad.
- En mer detaljerad analys av återfyllningens utveckling.
- Utredning av sannolikheten för buffeterosion vid extremt jonfattiga grundvattenförhållanden.
- Analys av den hydromekaniska utvecklingen av spalten mellan kapsel och buffert i tidiga skeden.

Även pedagogiskt kan framställningen utvecklas, t ex med fler bilder som för olika delutvecklingar visar vilka processer som tas om hand med modellberäkningar, vilka som försummas etc. Det bör också vara möjligt att för de flesta av variablerna i systembeskrivningen visa hur de utvecklas i tiden i enhetliga diagram. Därmed kan man på ett enhetligt sätt, som en rad tidsberoende kurvor visa t ex bränslets samlade farlighet och resteffekt, temperatur på kapselytan, medianflöde på förvarsdjup, vattenhalt i bufferten, svälltryck i bufferten, Ca-halt i bufferten etc. En sådan illustration skulle kunna komplettera framställningen i t ex avsnitt 8.10.1

## 8.11 Referenser

**Aagard P, Helgesson H C, 1983.** Activity/composition relations among silicates in aqueous solution II. Clay and Clay Minerals 31, 207.

**Ageskog L, Jansson P, 1999.** Heat propagation in and around the deep repository. Thermal calculations applied to three hypothetical sites: Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR-99-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson J-E, Nordquist R, Nyberg G, Smellie J, Tirén S, 1991.** Hydrogeological conditions in the Finnsjön area. Compilation of data and conceptual model. SKB TR-91-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Arcos D, Steven Benbow S, Bruno J, Takase H, 1999.** Behaviour of bentonite accessory minerals during the thermal stage. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Axelsson C-L, Ekstav A, Hansen L, 1994.** Avsänkning runt gruvor. SKB PR 44-94-026. Svensk Kärnbränslehantering.

**Boghammar A, Grundfelt B, and Hartley L, 1997.** Investigation of the large scale regional hydrogeological situation at Ceberg. SKB TR 97-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Bruno J, Arcos D, Duro L, 1999.** Processes affecting the near field hydrochemistry – Groundwater-Bentonite Interaction. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

**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.

**Börgesson L, Pusch R, Fredriksson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T, 1992.** Final report of the rock sealing project – Identification of zones disturbed by blasting and stress release. Stripa TR 92-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Uneven swelling pressure on the canister. FEM calculation of the effect of uneven water supply in the rock. SKB Inkapsling PPM 98-3420-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.



- Börgesson L, Hernelind J, 1999.** Coupled Thermo-Hydro-Mechanical calculations of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole – Influence of hydraulic rock properties on the water saturation phase. SKB TR-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cox I, Rodwell W, 1989.** Post-closure resaturation of a deep radioactive waste repository. NSS/R141, U K Nirex Ltd, UK.
- Dixon D A, Gray M N, Graham J, 1996.** Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and the USA. Environmental Geotechnics, Kamon (ed), Balkema, Rotterdam.
- Eberl D D, Hower J, 1976.** Kinetics of illite formation: Geol. Soc Amer. Bull. 87, 1326–1330.
- Ekberg M, 1995.** Lagringsbehållare för utbränt kärnbränsle, kollapstryck hos gjuten cylinder. SKB Inkapsling PPM 95-3420-11. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eloranta P, Simonen A, Johansson E, 1992.** Creep in crystalline rock with application to high level nuclear waste repository. Report YJT-92-10. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Finland.
- Fritz B, Kam M, Tardy Y, 1984.** Geochemical simulation of the evolution of granitic rocks and clay minerals submitted to a temperature increase in the vicinity of a repository for spent fuel. SKB/KBS TR-84-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Hansson H, Stephansson O, Shen Baotang, 1995.** SITE-94. Far-field rock mechanics modelling for nuclear waste disposal. SKI Report 95:40. Statens kärnkraftinspektion.
- 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.
- Huang W-L, Long J M, Pevear D R, 1993.** An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. Clay and Clay Minerals 41, 162–177.
- Håkansson R, 1999.** Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB R-99-XX (under bearbetning). Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Hökmark H, 1996.** Canister positioning. Stage 1: Thermomechanical nearfield rock analysis.  
SKB AR D-96-014. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Israelsson J, 1996.** Global thermo-mechanical effects from a KBS-3 type repository. Phase 2: Three-dimensional modelling with major fracture zones – base case.  
SKB PR D-96-006. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, 1997.** Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Correlation between model calculation and experimentally determined data.  
SKB TR 97-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Smellie J, Ruotsalainen P, Snellman M, 1993.** An approach to quality classification of deep groundwaters in Sweden and Finland.  
SKB TR 93-27. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Degueldre C, Skärman C, 1995.** Studies of colloids and their importance for repository performance assessment.  
SKB TR 95-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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, Skärman C, 1998.** Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg.  
SKB TR 98-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Leijon B, 1995.** Summary of rock stress data from Äspö.  
SKB HRL PR 25-95-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T, Schüldt R, 1998.** The biosphere at Aberg, Beberg and Ceberg – a description based on literature concerning climate, physical geography, ecology, land use and environment.  
SKB TR-98-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljunggren C, Klasson, Leijon B, 1998.** Valuation of rock stress measurements at Aberg, Beberg and Ceberg (under bearbetning).  
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.
- Norrish K, Quirk J P, 1954.** Crystalline swelling of montmorillonite.  
Nature 173:255–256.
- Pettersson K, 1996.** A study of recrystallization in copper.  
SKB Inkapsling PPM 96-3420-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Probert T, Claesson J, 1997.** Thermoelastic stress due to a rectangular heat source in a semi-infinite medium. Application for the KBS-3 Repository. SKB TR 97-26. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Puigdomenech I, Banwart S A, Bateman K, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Kotelnikova S, Lartigue J-E, Michaud V, Milodowski A E, Morosini M, Pedersen K, Rivas Perez J, Trotignon L, Tullborg E-L, West J M, Yoshida H, 1999.** Äspö Hard Rock Laboratory, Redox experiment in detailed scale (REX): First Project Status Report. SKB HRL ICR 99-01.
- Pusch R, Hökmark H, 1993.** Mechanisms and consequences of creep in the nearfield rock of a KBS-3 repository. SKB TR 93-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, 1996.** JADE, Jämförelse av bergmekaniska funktionssätt hos KBS3-V, KBS3-H och MLH. Underlagsrapport för konceptjämförelse. Clay Technology AB, Lund.
- Pytte A, 1982.** The kinetics of smectite to illite reaction in contact metamorphic shales. M A Thesis. Dartmouth College: Hanover, N H 78 p.
- Pässe T, 1997.** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia. SKB TR 97-28. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I, Gustafson G, Wikberg P, 1997a.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/4. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Comparison of predictions and observations. Hydrogeology, groundwater chemistry and transport of solutes. SKB TR 97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997b.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR 97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shen B, Stephansson O, 1996.** SITE-94. Near-field rock mechanical modelling for nuclear waste disposal. SKI Report 96:17. Statens kärnkraftinspektion.
- Svensson U, 1997.** A regional analysis of groundwater flow and salinity distribution in the Äspö area. SKB TR 97-09. 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.
- Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997.** Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB TR 97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Voss C I, Andersson J, 1993.** Regional flow in the Baltic Shield during holocene coastal regression, Ground Water, vol 31, no 6, pp 989–1006.