

Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

Huvudrapport från projekt SR-Site

Del III

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2011

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISBN 978-91-980362-0-6

ID 1291339

Uppdaterad 2015-05

Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

Huvudrapport från projekt SR-Site

Del III

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2011

Uppdateringsmeddelande

Den ursprungliga rapporten, daterad mars 2011, visade sig innehålla sakfel som har korrigerats i denna uppdaterade version. De korrigerade sakfelen presenteras nedan.

Uppdaterad 2015-05

Plats	Ursprunglig text	Korrigerad text
Sidan 729, stycke 1, två sista meningarna	...skulle utsläppet av C-14 utgöra ungefär 10 GBq. Ett utsläpp av Rn-222 skulle motsvara ungefär 25 GBq om...	...skulle utsläppet av C-14 utgöra ungefär 25 GBq. Ett utsläpp av Rn-222 skulle motsvara ungefär 45 GBq om...
Sidan 729, Tabell 13-11, rubrik	...och Rn-222 /SKB 2006g, a/.	...och Rn-222 /SKB 2006g/, uppdaterat med de inventarsdata som använts i SR-Site.
Sidan 729, Tabell 13-11, tabellhuvud, kolumn 2	(10 GBq-utsläpp)	(25 GBq-utsläpp)
Sidan 729, Tabell 13-11, tabellhuvud, kolumn 3	(25 GBq-utsläpp)	(45 GBq-utsläpp)
Sidan 729, Tabell 13-11, rad 1, kolumn C-14	0,036	0,033
Sidan 729, Tabell 13-11, rad 2, kolumn C-14	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
Sidan 729, Tabell 13-11, rad 2, kolumn Rn-222	0,22	0,20
Sidan 729, Tabell 13-11, rad 3, kolumn C-14	0,0028	0,0035
Sidan 729, Tabell 13-11, rad 3, kolumn Rn-222	7,2	8,3

Uppdaterad 2012-12

Plats	Ursprunglig text	Korrigerad text
Sidan 670, stycke 4 Sidans 671, all text och figur 13-20		Hela stycke 4 uppdaterad All text och figur 13-20 uppdaterad, sista stycket är nytt
Sidan 672, stycke 1		Nytt stycke
Sidan 729, stycke 2, rad 1	/SKB 2006g, h/	/SKB 2006g, a/
Sidan 729, Tabell 13-11, rubrik	/SKB 2006g, h/.	/SKB 2006g, a/.
Sidan 736, stycke 2, rad 3	/Bond et al. 2007/	/Bond et al. 1997/
Sidan 852		<i>Ny referens:</i> Bradbury and Baeyens, 2005
Sidan 853		<i>Ny referens:</i> Bäckblom et al. 2004

Uppdaterad 2012-01

Plats	Ursprunglig text	Korrigerad text
Sidan 602, Sammanfattning, rad 5	...1 MPa, något som...	...1 MPa, där advektiva förhållanden måste beaktas, något som...
Sidan 766, Figur 14-5	Positiva potenser på y-axeln	Figur 14-5 uppdaterad Negativa potenser på y-axeln

Innehåll

Del I

Sammanfattning	15
S1 Syfte och allmänna förutsättningar	15
S2 Att uppnå säkerhet i praktiken – platsens egenskaper samt utformningen och uppförandet av förvaret	18
S2.1 Säkerhetsprinciper	18
S2.2 Förvarsplatsen i Forsmark	19
S2.3 Den platsanpassade referensutformningen av förvaret	21
S3 Analysen av långsiktig säkerhet	25
S3.1 Inledning	25
S3.2 Steg 1: Hantering av egenskaper, händelser och processer (FEP)	25
S3.3 Steg 2: Beskrivning av initialtillståndet	25
S3.4 Steg 3: Beskrivning av externa förhållanden	26
S3.5 Steg 4: Sammanställning av processrapporter	27
S3.6 Steg 5: Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer	27
S3.7 Steg 6: Sammanställning av indata	28
S3.8 Steg 7: Definition och analys av referensutvecklingen	29
S3.9 Steg 8: Val av scenarier	33
S3.10 Steg 9, del 1: Analys av inneslutningspotentialen för de valda scenarierna	35
S3.11 Steg 9, del 2: Analys av fördröjningspotentialen för de valda scenarierna	36
S3.12 Steg 10: Ytterligare analyser och stödjande argument	40
S4 Slutsatser från SR-Site	41
S4.1 Översikt av resultaten	41
S4.2 Uppfyllelse av föreskriftskrav	43
S4.3 Återkoppling från analyserna i SR-Site	49
S4.4 Tilltron till analysresultaten	50
S5 Översikt av SR-Sites huvudrapport	52
1 Inledning	53
1.1 SKB:s program för använt kärnbränsle	53
1.1.1 SR-Site-rapportens roll i tillståndsansökningarna	54
1.2 Syftet med säkerhetsanalysprojektet SR-Site	55
1.3 Återkoppling från SR-Can-rapporten	55
1.3.1 Granskning	56
1.4 Myndighetsföreskrifter	57
1.4.1 Föreskrifter för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SSMFS 2008:37	57
1.4.2 Föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SSMFS 2008:21	58
1.5 SR-Site-projektets organisation	58
1.6 Angränsande projekt	58
1.6.1 Platsundersökningar och platsmodellering	58
1.6.2 Förvarsutformning	60
1.6.3 Kapselutveckling	60
2 Metodik	61
2.1 Inledning	61
2.2 Säkerhet	62
2.2.1 Säkerhetsprinciper för KBS-3-förvaret	62
2.2.2 Säkerhetsfunktioner och säkerhetsmått	63
2.3 Systemgränser	63
2.4 Tidsskalor	64
2.4.1 Föreskrifternas krav och allmänna råd	64
2.4.2 Säkerhetsanalysens tidsskalor	65
2.4.3 Relevanta tidsskalor för förvarets utveckling	66

2.5	Metodik i elva steg	67
2.5.1	Steg 1: FEP-hantering	67
2.5.2	Steg 2: Beskrivning av initialtillståndet	67
2.5.3	Steg 3: Beskrivning av externa förhållanden	69
2.5.4	Steg 4: Beskrivning av processer	69
2.5.5	Steg 5: Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer	70
2.5.6	Steg 6: Sammanställning av data	71
2.5.7	Steg 7: Analys av referensutvecklingen	71
2.5.8	Steg 8: Val av scenarier	72
2.5.9	Steg 9: Analys av valda scenarier	75
2.5.10	Steg 10: Ytterligare analyser och stödjande argument	76
2.5.11	Steg 11: Slutsatser	76
2.5.12	Rapporthierarki i SR-Site-projektet	77
2.6	Metod för riskberäkningar	78
2.6.1	Föreskrifternas krav och allmänna råd	78
2.6.2	Tillämpning i SR-Site	79
2.6.3	Alternativa säkerhetsindikatorer	81
2.7	Bästa möjliga teknik och optimering	83
2.7.1	Inledning	83
2.7.2	Föreskrifternas krav	84
2.7.3	Allmänna frågor rörande optimering och bästa möjliga teknik	84
2.7.4	Optimering kontra bästa möjliga teknik	85
2.7.5	Slutsatser relaterade till SR-Site-analysens metodik	85
2.8	Övergripande hantering av information och osäkerheter	85
2.8.1	Klassificering av osäkerheter	85
2.8.2	Behov av stiliserade exempel	86
2.8.3	Osäkerhetshantering – allmänt	87
2.8.4	Integrerad hantering av osäkerheter	89
2.8.5	Formella expertutfrågningar	92
2.9	Kvalitetssäkring	92
2.9.1	Allmänt	92
2.9.2	Kvalitetssäkringsplanens syfte	93
2.9.3	Styrdokument för SR-Site	93
2.9.4	Expertbedömningar	94
2.9.5	Sakgranskning	95
3	FEP-hantering	97
3.1	Inledning	97
3.2	SKB:s FEP-databas	97
3.3	FEP-katalogen för SR-Site	98
3.4	Kopplingar	101
4	Förvarsplatsen i Forsmark	105
4.1	Inledning	105
4.2	Forsmarksområdet	107
4.2.1	Läge	107
4.2.2	Prioriterat område för förvaret	107
4.3	Bergdomäner och tillhörande termiska och bergmekaniska egenskaper	111
4.3.1	Bergartssammansättning och indelning i bergdomäner	111
4.3.2	Mineraltillgångar	113
4.3.3	Termiska egenskaper	114
4.3.4	Hållfasthet och andra mekaniska egenskaper i intakt berg	114
4.4	Deformationszoner, sprickdomäner och sprickor	116
4.4.1	Uppkomst och reaktivering under geologisk tid	116
4.4.2	Deterministiska deformationszoner	118
4.4.3	Sprickdomäner, sprickor och DFN-modeller	120
4.4.4	Sprickmineralogi	122
4.4.5	Mekaniska egenskaper hos deformationszoner och sprickor	123

4.5	Bergspänning	124
4.5.1	Spänningsutveckling	124
4.5.2	Spänningsmodell	124
4.6	Hydrauliska egenskaper i berggrunden	127
4.6.1	Utveckling	127
4.6.2	Hydrauliska egenskaper hos deformationszoner och sprickdomäner	127
4.7	Kombination av modeller för sprickdomäner, hydrogeologiska diskreta spricknätverk (DFN) och bergspänning	131
4.8	Grundvatten	132
4.8.1	Utveckling under kvartärperioden	132
4.8.2	Grundvattensammansättning och reaktioner mellan vatten och berggrund	133
4.8.3	Grundvattenflöde och överensstämmelse med grundvattensignaturer	137
4.9	Transportegenskaper i berggrunden	138
4.9.1	Bergmatrisens egenskaper	138
4.9.2	Flödesrelaterade transportegenskaper	139
4.10	Ytsystemet	140
4.10.1	Utveckling under kvartärperioden	140
4.10.2	Beskrivning av ytsystemet	141
4.10.3	Befolkning och markanvändning	144
5	Förvarets initialtillstånd	145
5.1	Inledning	145
5.1.1	Förhållande mellan konstruktionsförutsättningar, produktionsrapporter och datarapport	146
5.1.2	Översikt av systemet	147
5.1.3	FEP för initialtillståndet	149
5.2	Platsanpassat förvar – bergutrymmen	151
5.2.1	Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet	151
5.2.2	Förvarsutformning och resulterande layout	152
5.2.3	Initialtillstånd för bergutrymmen	158
5.3	Initialtillstånd för bränslet och kapselns hålrum	163
5.3.1	Krav på hanteringen av det använda kärnbränslet	163
5.3.2	Bränsletyper och bränslemängder	164
5.3.3	Hantering	165
5.3.4	Initialtillstånd	165
5.4	Initialtillstånd för segjärnsinsats och kopparkapsel	170
5.4.1	Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet	170
5.4.2	Referensutformning och produktion	171
5.4.3	Initialtillstånd	176
5.5	Buffertens initialtillstånd	180
5.5.1	Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet	180
5.5.2	Referensutformning och produktionsmetoder	181
5.5.3	Initialtillstånd	186
5.6	Initialtillstånd för återfyllningen i deponeringstunnlarna	190
5.6.1	Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet	190
5.6.2	Referensutformning och produktionsrutiner	190
5.6.3	Initialtillstånd	194
5.7	Initialtillstånd för förvarsförslutningen och andra tekniska komponenter i förvaret	197
5.7.1	Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet	198
5.7.2	Referensutformning	199
5.7.3	Produktionsrutiner	203
5.7.4	Initialtillstånd	203
5.8	Övervakning – ”monitering”	206
5.8.1	Övervakning för att beskriva utgångsförhållanden	206
5.8.2	Övervakning av inverkan från uppförandet av förvaret	207
5.8.3	Kontrollprogram för uppförande och drift av förvaret	207
5.8.4	Övervakning efter avfallets deponering	207

6	Hantering av externa förhållanden	209
6.1	Inledning	209
6.2	Klimatrelaterade frågor	210
6.2.1	Allmän klimatutveckling	210
6.2.2	Inverkan på förvarets säkerhet	213
6.2.3	Hantering av den osäkra den långsiktiga klimatutvecklingen	213
6.2.4	Dokumentation	215
6.3	Framtida mänskliga handlingar	216
7	Hantering av interna processer	217
7.1	Inledning	217
7.1.1	Identifiering av processer	217
7.1.2	Processer i biosfären	218
7.2	Format för processrepresentationer	218
7.3	Format för processdokumentation	220
7.4	Processtabeller	224
7.4.1	Bränslet och kapselns inre	225
7.4.2	Kapsel	227
7.4.3	Buffert	229
7.4.4	Återfyllning i deponeringstunnlar	233
7.4.5	Geosfären	236
7.4.6	Tillkommande systemdelar	242
7.5	Modellscheman (assessment model flow charts, AMF)	243
8	Säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer	249
8.1	Inledning	249
8.1.1	Differentierade säkerhetsfunktioner i SR-Site	249
8.1.2	Hantering av utspädning	250
8.2	Allmänt om säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer	250
8.3	Säkerhetsfunktioner för inneslutning	254
8.3.1	Kapsel	254
8.3.2	Buffert	256
8.3.3	Återfyllning i deponeringstunnlar	259
8.3.4	Geosfär	260
8.3.5	Sammanfattning av säkerhetsfunktioner relaterade till inneslutning	263
8.4	Säkerhetsfunktioner för fördröjning	263
8.4.1	Bränsle	263
8.4.2	Kapsel	266
8.4.3	Buffert	266
8.4.4	Återfyllning i deponeringstunnlar	267
8.4.5	Geosfär	268
8.4.6	Sammanfattning av säkerhetsfunktioner relaterade till fördröjning	268
8.5	Faktorer som påverkar tidsutvecklingen för säkerhetsfunktionsindikatorer – FEP-diagram	270
9	Sammanställning av indata	273
9.1	Inledning	273
9.2	Syftet med Datarapporten för SR-Site	273
9.2.1	Bakgrund	274
9.2.2	Instruktioner för att uppfylla syftet	274
9.3	Datainventarium	274
9.4	Instruktioner för leverans av data	274
9.4.1	Leverantörer, kunder och Datarapportgruppen för SR-Site	275
9.4.2	Användning av instruktionen	275
9.5	Kvalificering av indata	275
9.6	Slutlig kontroll av data som används vid beräkningar och modellering för SR-Site	278

Del II

10	Analys av en referensutveckling för ett förvar i Forsmark	291
10.1	Inledning	291
10.1.1	Utförlig beskrivning av förutsättningarna	292
10.1.2	Analysstruktur	293
10.1.3	Hydrogeologisk modellering i SR-Site	295
10.2	Bygg- och driftskedet	297
10.2.1	Närområdets termiska utveckling	297
10.2.2	Mekanisk utveckling hos berget i närområdet till följd av berguttag	298
10.2.3	Hydrogeologisk utveckling	301
10.2.4	Utvecklingen av buffert, återfyllning och plugg	307
10.2.5	Kemisk utveckling i och omkring förvaret	314
10.2.6	Driftverksamhetens effekter på färdigställda delar av förvaret	320
10.2.7	Sammanfattning av bygg- och driftskedet	321
10.3	Den inledande perioden med tempererat klimat efter förslutning	323
10.3.1	Inledning	323
10.3.2	Externa förhållanden	323
10.3.3	Biosfären	324
10.3.4	Termisk utveckling av närområdet	329
10.3.5	Mekanisk utveckling av berggrunden	332
10.3.6	Hydrogeologisk utveckling	341
10.3.7	Kemisk utveckling i och omkring förvaret	358
10.3.8	Mättnad av buffert och återfyllning	371
10.3.9	Svällning och svälltryck	377
10.3.10	Buffertens och återfyllningens kemiska utveckling	393
10.3.11	Frigörelse av kolloider från buffert och återfyllning	402
10.3.12	Utveckling av bufferten med dess bottenplatta och återfyllningen med dess plugg efter perioden med förhöjd temperatur	409
10.3.13	Kapselns utveckling	422
10.3.14	Utveckling av centralområdet, toppförslutningen och borrhålspluggarna	429
10.3.15	Sammanfattning av de första tusen åren efter förslutning	433
10.3.16	Säkerhetsfunktioner för den inledande tempererade perioden efter förslutningen	436
10.4	Den återstående delen av glaciationscykeln	441
10.4.1	Referensutveckling för långsiktiga klimatrelaterade förhållanden	441
10.4.2	Biosfären	456
10.4.3	Termisk utveckling	458
10.4.4	Bergmekanik	461
10.4.5	Kapselbrott till följd av bergets skjuvrörelser	468
10.4.6	Hydrogeologisk utveckling	492
10.4.7	Geokemisk utveckling	514
10.4.8	Effekter på buffert och återfyllning	529
10.4.9	Effekter på kapseln	534
10.4.10	Utveckling av andra delar av förvarssystemet	538
10.4.11	Säkerhetsfunktioner vid slutet av referensglaciationscykeln	538
10.5	Efterföljande glaciationscykler	543
10.5.1	Säkerhetsfunktioner vid slutet av analysperioden	544
10.6	Variant med global uppvärmning	547
10.6.1	Externa förhållanden	547
10.6.2	Biosfären	551
10.6.3	Förvarets utveckling	551
10.6.4	Säkerhetsfunktionsindikatorer för varianten med global uppvärmning	553
10.7	Slutsatser från analysen av referensutvecklingen	553

Del III

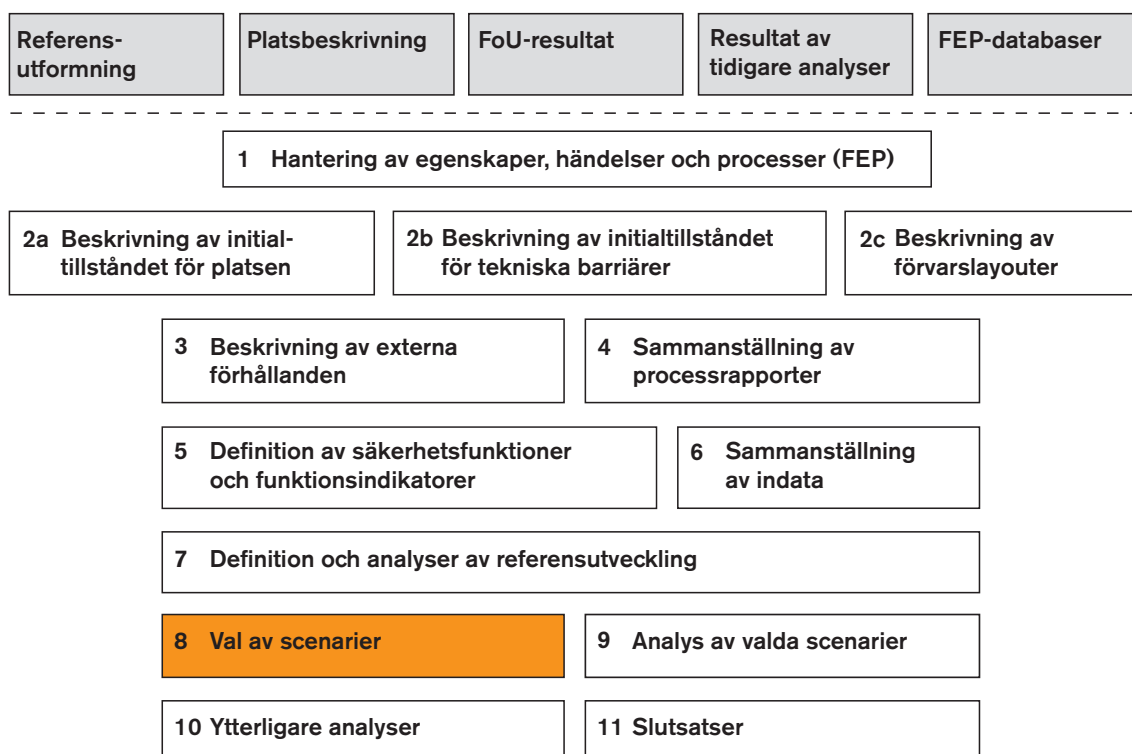
11	Val av scenarier	569
11.1	Inledning	569
11.2	Scenarier härledda utifrån säkerhetsfunktioner; val och struktur för analys	570
11.2.1	Val av ytterligare scenarier	570
11.2.2	Struktur för analys av de ytterligare scenarierna	571
11.2.3	Mall för analys av scenarier baserade på säkerhetsfunktioner	574
11.3	Sammanfattning av val av scenarier	575
12	Analys av inneslutningspotentialen för utvalda scenarier	577
12.1	Inledning	577
12.1.1	Allmänt	577
12.1.2	Definition av huvudscenariot	578
12.1.3	Klimatutveckling för scenarieanalyserna	578
12.2	Advektion i bufferten	579
12.2.1	Inledning	579
12.2.2	Kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till advektion i bufferten	582
12.2.3	Slutsatser	587
12.2.4	Specialfall av advektiva förhållanden: Sjunkande kapsel	588
12.3	Buffertfrysning	588
12.3.1	Inledning	588
12.3.2	Kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till buffertfrysning	590
12.3.3	Slutsatser	598
12.4	Buffertomvandling	599
12.5	Slutsatser från analyser av buffertscenarier	603
12.6	Kapselbrott till följd av korrosion	603
12.6.1	Inledning	603
12.6.2	Kvantitativ utvärdering av korrosion	604
12.6.3	Slutsatser	615
12.7	Kapselbrott till följd av isostatisk last	616
12.7.1	Inledning	616
12.7.2	Glacial last	617
12.7.3	Buffertens svälltryck	620
12.7.4	Kapselns hållfasthet	621
12.7.5	Kombinerad analys	622
12.8	Kapselbrott till följd av skjuvlast	623
12.8.1	Inledning	623
12.8.2	Kvantitativ analys av förlopp som leder till kapselbrott till följd av skjuvlast	624
12.8.3	Slutsatser	626
12.9	Sammanfattning och kombinationer av analyserade scenarier	626
12.9.1	Sammanfattning av analysresultaten	626
12.9.2	Bedömning av inneslutningspotential för huvudscenariot	627
12.9.3	Kombinationer av analyserade scenarier och fenomen	628
13	Analys av de valda scenariernas fördröjningspotential	631
13.1	Inledning	631
13.2	Biosfärsanalyser och beräkning av landskapspecifika doskonverteringsfaktorer för en glaciationscykel	632
13.2.1	Tillvägagångssätt och centrala begrepp i biosfärsanalyserna	632
13.2.2	Identifiering av biosfärsobjekt och deras utveckling över tiden	635
13.2.3	Radionuklidmodellen för biosfären	637
13.2.4	Resultater LDF-värden och värden för LDF-puls	643
13.2.5	Metoder för att analysera strålningseffekter på miljön	646
13.2.6	Osäkerheter i riskskattningar	647
13.3	Kriticitet	652
13.4	Modeller för att beräkna radionuklidtransport och dos	653
13.4.1	Närområdesmodellen COMP23	653
13.4.2	Fjärrområdesmodellerna FARF31 och MARFA	655

13.4.3	Representation av biosfären	656
13.4.4	Förenklade analytiska modeller	657
13.4.5	Val av radionuklider	657
13.5	Kapselbrott till följd av korrosion	657
13.5.1	Inledning	657
13.5.2	Konceptualisering av transportförhållanden	658
13.5.3	Indata till transportmodeller	660
13.5.4	Beräkning av det centrala korrosionsfallet	661
13.5.5	Analys av möjliga alternativa transportförhållanden/transportdata	666
13.5.6	Beräkning av alternativa fall	675
13.5.7	Doser till andra organismer än människa för korrosionsscenarioet	686
13.5.8	Alternativa säkerhetsindikatorer för korrosionsscenarioet	687
13.5.9	Sammanfattning av resultat från beräkningsfall för korrosionsscenarioet	692
13.5.10	Beräkningar med analytiska modeller	693
13.5.11	Känslighetsanalyser	695
13.6	Kapselbrott till följd av skjuvlast	699
13.6.1	Konceptualisering av transportförhållanden	699
13.6.2	Konsekvensberäkningar	700
13.6.3	Kombination av skjuvlastscenariot och scenariot med advektion i bufferten	704
13.6.4	Analys av möjliga alternativa transportförhållanden/transportdata	705
13.6.5	Doser till biota, alternativa säkerhetsindikatorer, analytiska beräkningar och kollektivdos	709
13.7	Hypotetiska restscenarier för att illustrera barriärfunktioner	710
13.7.1	Kapselbrott till följd av isostatisk last	710
13.7.2	Växande pinnhål	711
13.7.3	Ytterligare fall som illustrerar barriärfunktioner	717
13.8	Radionuklidtransport i gasfas	728
13.9	Risksummering	730
13.9.1	Inledning	730
13.9.2	Risker förknippade med korrosionsscenarioet	730
13.9.3	Risk förknippad med skjuvlastscenariot	732
13.9.4	Riskutspädning	732
13.9.5	Utvidgad diskussion om risk under de inledande tusen åren	734
13.9.6	Slutsatser	737
13.10	Sammanfattning av osäkerheter som påverkar den beräknade risken	738
13.10.1	Sammanfattning av viktiga osäkerheter som påverkar den beräknade risken	738
13.10.2	Kandidatfrågor för expertutfrågning	742
13.11	Slutsatser	744
14	Ytterligare analyser och stödjande argument	745
14.1	Inledning	745
14.2	Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar	745
14.2.1	Inledning	745
14.2.2	Principer och metodik för att hantera FHA-scenarier	746
14.2.3	Teknisk och samhällelig bakgrund	748
14.2.4	Val av representativa fall	749
14.2.5	Utvärdering av borrhningsfallet	751
14.2.6	Utvärdering av fallet med bergguttar eller tunnel	758
14.2.7	Utvärdering av en gruva i närheten av förvarsplatsen vid Forsmark	760
14.2.8	Ofullständigt förslutet förvar	761
14.3	Analys som krävs för att påvisa optimering och användning av bästa möjliga teknik	767
14.3.1	Inledning	767
14.3.2	Kapselbrott till följd av korrosion	768
14.3.3	Kapselbrott till följd av skjuvrörelser	772
14.3.4	Utformningsrelaterade faktorer som inte bidrar till risk	774

14.4	Verifiering av att FEP som uteslutits i tidigare delar av utvärderingen är försumbara mot bakgrund av den slutförda analysen av scenarier och risker	777
14.4.1	Inledning	777
14.4.2	Bränslet	779
14.4.3	Kapseln	780
14.4.4	Bufferten	782
14.4.5	Återfyllningen	785
14.4.6	Geosfären	786
14.5	En kort redovisning av tidsperioden bortom en miljon år	789
14.6	Naturliga analogier	791
14.6.1	Studier av naturliga analogier och deras roll i säkerhetsanalyser	791
14.6.2	Analogier till förvarsmaterial och processer som påverkar dem	792
14.6.3	Transport- och fördröjningsprocesser i geosfären	797
14.6.4	Testning av modeller och metodutveckling	799
14.6.5	Sammanfattande kommentarer	801
15	Slutsatser	803
15.1	Inledning	803
15.2	Översikt av resultaten	804
15.2.1	Uppfyllelse av föreskrifternas riskkriterium	804
15.2.2	Frågor relaterade till förändrade klimatförhållanden	805
15.2.3	Andra frågor relaterade till barriärernas funktion och utformning	806
15.2.4	Tilltro	807
15.3	Uppfyllelse av föreskriftskrav	808
15.3.1	Inledning	808
15.3.2	Säkerhetskonceptet och säkerhetens allokering till systemkomponenter	808
15.3.3	Uppfyllelse av SSM:s riskkriterium	809
15.3.4	Effekter på miljön av radionuklidutsläpp	813
15.3.5	Optimering och bästa möjliga teknik, BAT	813
15.3.6	Tilltro	817
15.3.7	Gränssättande fall, robusthet	819
15.3.8	Ytterligare allmänna krav på säkerhetsanalysen	819
15.4	Konstruktionsstyrande fall	820
15.4.1	Allmänt	821
15.4.2	Kapseln: Isostatisk last	822
15.4.3	Kapseln: Skjuvrörelser	823
15.4.4	Kapseln; korrosionspåkänning	824
15.4.5	Bufferten	825
15.5	Återkoppling till utvärderad referensutformning och relaterade konstruktionsförutsättningar	826
15.5.1	Inledning	826
15.5.2	Kapselns mekaniska stabilitet – motstå isostatisk last	827
15.5.3	Kapselns mekaniska stabilitet – motstå skjuvrörelse	827
15.5.4	Utgöra korrosionsbarriär – koppars tjocklek	828
15.5.5	Kapselmaterial och övrigt	828
15.5.6	Buffertmateriallets hydromekaniska egenskapers varaktighet	828
15.5.7	Installerad mängd buffertmaterial	830
15.5.8	Bufferttjocklek	831
15.5.9	Buffertens mineralogiska sammansättning	832
15.5.10	Bottenplattan i deponeringshålen	832
15.5.11	Återfyllningen i deponeringstunnlarna	833
15.5.12	Val av deponeringshåll – mekanisk stabilitet	833
15.5.13	Val av deponeringshåll – hydrologiska och transportrelaterade förhållanden	834
15.5.14	Hydrauliska egenskaper i deponeringshållens väggar	836
15.5.15	Deponeringspositioner – anpassade till de termiska förhållandena	836
15.5.16	Kontroll av den skadade zonen (EDZ)	837
15.5.17	Material för injektering och betongsprutning	838
15.5.18	Förvarsdjup	838

15.5.19	Stamtunnlar, transporttunnlar, tillfartstunnlar, schakt och centralområde samt förslutning	839
15.5.20	Förslutning av borrhål	839
15.6	Återkoppling till detaljerade undersökningar och platsmodellering	840
15.6.1	Fortsatt karakterisering av deformationszoner med potential att orsaka stora jordskalv	840
15.6.2	Vidareutveckla hjälpmedlen för att begränsa storleken på sprickor som skär deponeringshål	840
15.6.3	Minska osäkerheten i DFN-modellerna	841
15.6.4	Identifiera konnekterade transmissiva sprickor	841
15.6.5	Förvarsvolymens hydrauliska egenskaper	841
15.6.6	Verifiera överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna för EDZ	842
15.6.7	Bergmekanik	842
15.6.8	Termiska egenskaper	842
15.6.9	Hydrogeokemi	843
15.6.10	Yttnära ekosystem	843
15.7	Återkoppling till Fud-programmet	843
15.7.1	Använt bränsle	844
15.7.2	Kapseln	844
15.7.3	Bufferten och återfyllningen	845
15.7.4	Geosfären	846
15.7.5	Biosfären	847
15.7.6	Klimatet	848
15.8	Slutsatser beträffande säkerhetsanalysens metodik	848
16	Referenser	849
Bilaga A	Tillämpliga föreskrifter och SKB:s implementering av dessa i säkerhetsanalysen SR-Site	877
Bilaga B	Ordlista med förkortningar och speciella termer som används i SR-Site	893
Bilaga C	Topografi och geografiska namn i Forsmarksområdet	899

11 Val av scenarier



Figur 11-1. SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.

11.1 Inledning

En central fråga vid hanteringen av osäkerheter i den framtida utvecklingen av förvarssystemet är, som nämns i avsnitt 2.5.8, att reducera antalet möjliga utvecklingar som ska analyseras genom att välja ut en uppsättning representativa scenarier.

Valet fokuseras på att hantera de aspekter av utvecklingen som är relevanta för säkerheten. Dessa beskrivs på övergripande nivå av säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning, vilka detaljeras ytterligare genom säkerhetsfunktionsindikatorerna som redovisas i kapitel 8.

I avsnitt 2.5.8 behandlades föreskrifternas krav vid valet av scenarier och en generell metod för att välja scenarier presenterades. Metoden förklarar i) hur ett huvudscenario som är nära relaterat till referensutvecklingen definieras och ii) principerna för att välja ett antal ytterligare scenarier, med utgångspunkt från säkerhetsfunktioner.

I avsnitt 11.2.1 nedan beskrivs valet av ytterligare scenarier baserat på säkerhetsfunktioner. En struktur för de fortsatta analyserna av dessa scenarier presenteras i avsnitt 11.2.2. Strukturen ger en mall för redovisning av analyserna som beskrivs i avsnitt 11.2.3. Alla utvalda scenarier sammanfattas i avsnitt 11.3. Osäkerheter relaterade till scenarievalet behandlas i avsnitt 2.8.

11.2 Scenarier härledda utifrån säkerhetsfunktioner; val och struktur för analys

11.2.1 Val av ytterligare scenarier

Osäkerheter som inte hanteras genom referensutvecklingen

Enligt tidigare diskussion utgår huvudscenariot från referensutvecklingen, som beskriver utvecklingen av förvarssystemet utifrån ett **realistiskt** initialtillstånd för förvaret och för ett exempel på en **trolig** utveckling av de yttre förhållandena under analysperioden.

Precis som uttrycken ”realistiskt” och ”trolig” antyder kan således helt andra förhållanden – och därmed även andra utvecklingar av förvaret – inte uteslutas. Det förekommer osäkerheter angående initialtillståndet, de processer som styr utvecklingen och de externa förhållandena. Alla dessa osäkerheter hanteras inte genom den referensutveckling som motsvarar huvudscenariot, utan måste undersökas med hjälp av ytterligare scenarier. Vid utvärderingen av osäkerheter undersöker man om extremare initialtillstånd och yttre förhållanden behöver tas med i analyserna, samt om osäkerheter med avseende på hanteringen av processer motiverar ytterligare analyser.

Metodik för att välja ytterligare scenarier

För att erhålla en uppsättning ytterligare scenarier som kan hävdas vara heltäckande, behövs en strukturerad urvalsmetod. Syftet med scenarierna är att underlätta en kritisk utvärdering av förvarets säkerhet. Det är därför naturligt att använda de säkerhetsfunktioner och relaterade indikatorer som tas upp i kapitel 8 för att ta fram en struktur för att välja scenarier.

Det angreppssätt som använts i SR-Site är att använda säkerhetsfunktionerna, med tillhörande indikatorer och indikatorkriterier enligt figur 10-2, för att definiera en uppsättning scenarier som kännetecknas av säkerhetsfunktionernas olika tillstånd. Scenarierna beaktar således olika fall, för vilka möjligheterna att en eller flera av säkerhetsfunktionerna helt eller delvis faller bort utvärderas. Exempel på detta är scenarier då kapselbrott sker på grund av korrosion, isostatiskt övertryck eller skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringsshålet. Scenarierna har definierats utan att hänsyn tas till hur stor sannolikheten är för att de inträffar.

Vid analysen av de valda scenarierna genomförs en kritisk undersökning av alla tänkbara förlopp som leder till att den säkerhetsfunktion som definierar scenariot faller bort. Avsikten är att utvärdera sannolikheten för att scenariot inträffar, dess konsekvenser och dess eventuella bidrag till risksummeringen för förvaret. Utifrån kunskapen om hur förvarssystemet fungerar fokuseras undersökningen på de faktorer som bidrar till säkerhetsfunktionen i fråga. Således fokuseras utvärderingen av varje scenario på en begränsad mängd osäkra faktorer. FEP-diagrammet, se figur 8-4, är ett hjälpmedel för att identifiera sådana faktorer. Utgångspunkten vid utvärderingen är analysen av referensutvecklingen, där alla faktorer som tas upp i FEP-diagrammet analyseras för referensförhållandena.

Det tillvägagångssätt som används för att välja scenarier är således att ställa frågan: Vad kännetecknar ett förvar som inte fungerar? Svaret på frågan utgörs av en lista över tillstånd där en eller flera säkerhetsfunktioner inte kunnat upprätthållas, till exempel en situation där advektion är den dominerande transportmekanismen i bufferten. Analyserna av de scenarier som valts ut på detta sätt inriktas sedan på att identifiera och kvantifiera alla tänkbara förlopp som kan leda till sådana tillstånd. För varje scenario är målet att antingen avfärda det, baserat på att inget troligt sådant förlopp kan identifieras, eller att utvärdera scenariots sannolikhet och konsekvenser så att det kan tas med i risksummeringen för förvaret. För de sistnämnda scenarierna kan det, som återkoppling till kommande utveckling av utformningen, vara lämpligt att överväga om ändringar av utformningen skulle kunna eliminera eller minska risken för att scenariot inträffar.

Framtagning av lista över säkerhetsfunktioner för valet av scenarier

Den primära säkerhetsfunktionen för ett KBS-3-förvar är inneslutning. Ett naturligt steg vid valet av scenarier utgående från säkerhetsfunktioner är därför att välja tre **kapselscenarier** med utgångspunkt från de tre säkerhetsfunktioner som står i direkt samband med kapselneslutning, dvs scenarier som kännetecknas av (se figur 10-2):

- A. Kapselbrott på grund av korrosion – säkerhetsfunktionen Can1.
- B. Kapselbrott på grund av isostatisk last – säkerhetsfunktionen Can2.
- C. Kapselbrott på grund av skjuvlast – säkerhetsfunktionen Can3.

För det fortsatta arbetet med att välja scenarier behöver listan över säkerhetsfunktioner detaljeras ytterligare, eftersom många av säkerhetsfunktionerna överlappar eller har samband med varandra. Säkerhetsfunktionen ”begränsa advektiv transport” som är relaterad till bufferten har till exempel ett samband med kapselsäkerhetsfunktionen ”utgöra korrosionsbarriär”, eftersom korrosionen ökar kraftigt om advektiva förhållanden råder i bufferten. En heltäckande utvärdering av scenariot för kapselkorrosion måste därför även omfatta en utvärdering av advektion i bufferten. Generellt behöver vart och ett av de tre scenarier som är relaterade till kapselbrott kombineras med relevanta tillstånd för bufferten för att utvärderingen ska bli heltäckande.

Härledning av kritiska tillstånd för bufferten

Utifrån säkerhetsfunktionerna är det möjligt att härleda sex tillstånd för bufferten som står i samband med säkerheten.

1. Ett grundtillstånd är en **intakt buffert**, där alla säkerhetsfunktioner upprätthålls.
2. Ett annat tillstånd som kan härledas direkt från säkerhetsfunktionerna är en **buffert med advektiva förhållanden**, vilket är relaterat till att säkerhetsfunktionerna Buff1a eller Buff1b fallit bort. Ett specialfall av advektiva förhållanden uppträder när bufferten inte kan hålla kapseln i det avsedda vertikala läget, så att kapseln i extremfallet sjunker till botten av deponeringshålet. Buffertens diffusionsbarriär försvinner då, och massöverföringen mellan grundvattnet och kapseln styrs av advektion i det omgivande berget och eventuellt även i bufferten. Detta fall är relaterat till buffertfunktionen Buff5 (förhindra kapselsjunkning).
3. Ett annat tillstånd som behöver beaktas är en **omvandlad buffert**. Detta tillstånd är relaterat till buffertfunktionen Buff4 som avser högsta tillåtna temperatur i bufferten. Det finns emellertid ytterligare ett antal möjliga orsaker eller förlopp som kan leda till buffertomvandling och som man behöver ta hänsyn till för att en fullständig utvärdering av tillståndet för bufferten ska kunna genomföras.
4. En **frusen buffert** måste beaktas, vilket är relaterat till buffertfunktionen Buff6b.
5. En **alltför kompakt buffert** avser en situation då buffertens densitet är högre än vad konstruktionsförutsättningarna anger. Detta tillstånd är relaterat till buffertfunktionen Buff3 (dämpa bergets skjuvrörelser) och Buff6a (begränsa svälltrycket på kapseln).
6. Slutligen innebär en **buffert som innehåller aktiva mikrober** att mikrobiell reduktion av sulfat i själva bufferten måste beaktas. Detta tillstånd är relaterat till funktionen Buff2.

Av dessa sex tillstånd för bufferten – som alla kan härledas från listan över säkerhetsfunktioner samt från den allmänna kunskapen om bufferten och dess utveckling över tid – kan fem tillstånd kännetecknas som ”ej fungerande”. De fyra första hanteras som olika buffertscenarier (ett intakt och tre ”ej fungerande”). De två sistnämnda, en alltför tät buffert och en buffert som innehåller aktiva mikrober, ingår i analyserna av relevanta kapselscenarier enligt figur 11-2 nedan. Båda dessa är relaterade till buffertdensiteten och svälltrycket samt kan enkelt analyseras i samband med lämpliga kapselscenarier. På så sätt minskar antalet scenarier och dessutom blir redovisningen av scenarierna mindre komplex.

11.2.2 Struktur för analys av de ytterligare scenarierna

Tillvägagångssätt

Vid analysen av ytterligare scenarier används referensutvecklingen som en utgångspunkt. Analysen av vart och ett av scenarierna riktas sedan in på en utveckling av möjliga osäkerheter som är relevanta för scenariot i fråga, inklusive sådana osäkerheter som inte hanteras i analysen av referensutvecklingen. Dessa osäkerheter kan ha samband med förvarets initialtillstånd, med processer som styr förvarets utveckling eller med extern påverkan.

Analysera en heltäckande referensutveckling som används till att definiera:

Huvudscenario

där följande är definierat:
referensinitialtillstånd, referenshantering av processer och externa referensförhållanden

Välj sex ytterligare scenarier utgående från säkerhetsfunktioner:

tre relaterade till försämrade funktion hos bufferten
tre relaterade till försämrade funktion hos kapseln

Analysera förekomsten av:

"Advektiv" buffert
Buff1ab, Buff5
R1bc, R2ab

Frusen buffert
Buff6b
R4a

Omvandlad buffert
Buff4
R1de, R2ab

Följande utvärderas för varje fall:

Revelanta osäkerheter med koppling till
Initialtillståndet, processer och externa förhållanden
som inte omfattas av huvudscenariot

Var och en av dessa (beskrivningar av buffertförhållanden) analyseras med avseende på:

Kapselbrott beroende på korrosion
Can1, Buff1
R1adf, R2ab + §

Kapselbrott beroende på isostatisk last
Can2 R3a + §

Kapselbrott beroende på skjuvlast
Can3, Buff3
R3bc + §

§ säkerhetsfunktioner relaterade till analyserade och indirekt inkluderade bufferttillstånd

Följande utvärderas åter för varje fall:

Revelanta osäkerheter med koppling till
Initialtillståndet, processer och externa förhållanden
som inte omfattas av huvudscenariot

Figur 11-2. Huvudkomponenterna i proceduren för att välja och analysera ytterligare scenarier med kapselns och buffertens säkerhetsfunktioner som grund (gula och orange rutor). De säkerhetsfunktionsindikatorer som är relevanta för varje scenario anges med samma nomenklatur som i figur 8-2.

Bland annat följande frågor behandlas vid analysen av scenariot med buffertadvektion:

- Skulle buffertens initiala densitet, där densiteten är en kritisk faktor för förekomsten av buffertadvektion, av någon anledning kunna vara lägre än den initiala referensdensitet som antas för referensutvecklingen?
- Återstår några konceptuella osäkerheter när det gäller kolloidfrigörelse/erosionsprocesser i bufferten (vilket leder till minskad densitet), vilka inte hanteras genom de modeller som används för att kvantifiera denna process i referensutvecklingen? Här ingår följder av kanalbildning och erosion under förvarets mättnadsfas.
- Skulle grundvattnets sammansättning och flöde kunna vara mindre gynnsamma för uppkomst av buffertadvektion än vad som följer av de yttre referensförhållandena i referensutvecklingen, dvs en uppreppning av Weichselglaciationscykeln?

Kombination av scenarier relaterade till buffertfunktioner och kapselfunktioner

Vart och ett av dessa tre ej fungerande tillstånd för bufferten utvärderas som ett separat scenario. Alla identifierade förlopp som kan leda till sådana tillstånd undersöks kritiskt på det sätt som beskrivs i föregående avsnitt. Deras konsekvenser med avseende på kapselbrott och utsläpp av radionuklider utvärderas enbart i kombination med de tre kapselscenarier som definieras ovan. På så sätt hanteras en stor del av problemet med att kombinera scenarier. Figur 11-2 visar schematiskt hur scenarieanalysen utförs med utgångspunkt från säkerhetsfunktionerna. Det bör noteras att om analysen av ett särskilt buffertscenario leder till slutsatsen att det ska betraktas som ett restscenario, så förs det inte vidare till de kapselscenarier som definieras ovan.

De säkerhetsfunktioner som berör berget utvärderas inom var och en av dessa kombinationer genom att hänsyn även tas till osäkerheter som är relaterade till geosfären och externa förhållanden vid utvärdering både av tillstånden för bufferten och av de olika typerna av kapselbrott (se exemplet med buffertadvektion ovan). Detta är nödvändigt eftersom till exempel den eventuella förekomsten av advektiva förhållanden i bufferten står i direkt samband med grundvattnets sammansättning genom säkerhetsfunktionen R1c (minimal jonstyrka hos grundvattnet) och förekomsten av kapselbrott på grund av bergets skjuvrörelser står i direkt samband med bergrörelser genom säkerhetsfunktionerna R3b och c. Se även figur 11-2.

Hantering av fördröjning

Det tillvägagångssätt som hittills presenterats avser direkta brottyper för kapseln och vilket samband buffertens säkerhetsfunktioner har med dessa brottyper. Tillvägagångssättet är således relaterat till förvarets primära säkerhetsfunktion. Det tillvägagångssätt som använts för att utvärdera även den sekundära säkerhetsfunktionen – fördröjning – är att för var och en av kapselbrottstyperna fastställa osäkerheter som är relaterade till fördröjning. Detta tillvägagångssätt motiveras i hög grad av det faktum att varje typ av kapselbrott ger särskilda konsekvenser för fördröjningen, genom orsakerna till kapselbrottet ifråga. Därför krävs en särskild utvärdering av osäkerheter som gäller denna egenskap.

Inom varje scenario utvärderas osäkerheter – med avseende på relevanta aspekter för det särskilda scenariot – för fördröjningsegenskaper hos bränslet, kapseln, bufferten, deponeringstunnelns återfyllning och geosfären. Många av frågorna avseende osäkerheter överlappar med dem som är relevanta för inneslutning. Till exempel är advektiva förhållanden i bufferten relevanta både för inneslutning genom att kapselkorroderande ämnen transporteras in och för fördröjning genom att radionuklider transporteras ut. Denna utvärdering görs i kapitel 13 på ett sätt som liknar det som används i utvärderingen av scenarier som är relaterade till inneslutning, men som är förenklat, se avsnitt 11.2.3.

Kategorisering som "mindre sannolikt scenario" eller "restscenario"

En central fråga vid utvärderingen av scenarierna är att bedöma om det är möjligt att scenariot blir verklighet. Om så är fallet klassificeras scenariot som "mindre sannolikt" och tas med i risksummeringen, annars definieras det som ett "restscenario".

Det finns inget numeriskt gränsvärde för den sannolikhet under vilken ett scenario betraktas som ett restscenario i SR-Site. Det angreppssätt som använts är att om det kan hävdas att ett scenario fysikaliskt inte är rimligt – mot bakgrund av försiktiga utvärderingar av nuvarande kunskap om exempelvis barriäregenskaper, processer och effekter av framtida klimatförändringar – så betraktas scenariot som ett restscenario.

Det har inte bedömts vara möjligt eller meningsfullt att formulera en mer exakt definition som täcker alla upptänkliga situationer. Läsaren hänvisas till implementeringen i kapitel 12 för den detaljerade tillämpningen.

Gemensamma faktorer som påverkar flera scenarier och kombinationer av scenarier

Som nämns ovan kan en stor del av problemet med kombinerade scenarier hanteras med hjälp av kombinationen av buffert- och kapselrelaterade scenarier. Det finns dock ytterligare faktorer som behöver beaktas när det gäller kombinationer av scenarier.

Bland annat måste hänsyn tas till kombinationer av kapselscenarier. Är de identifierade feltillstånden oberoende av varandra så att deras riskbidrag kan adderas, dvs är orsakerna till dem oberoende av varandra? Och är effekterna av en särskild felorsak oberoende av om en annan felorsak ger en påverkan

samtidigt? Kombinationen av isostatisk last på kapseln och laster beroende på skjuvrörelser åskådliggör båda dessa problem: Är sannolikheten för ett jordskalv oberoende av om en betydande inlandsis, som kan skapa höga grundvattentryck, finns ovanför förvaret? Om dessa två lastsituationer kan förekomma samtidigt, är i så fall kapselns reaktion på en skjuvrörelse orsakad av jordskalv oberoende av förekomsten av ett isostatiskt övertryck?

Man behöver även ta hänsyn till kombinationer av tillstånden för bufferten på liknande sätt. Buffertens frystemperatur beror till exempel på buffertdensiteten, som minskar när advektiva förhållanden råder i bufferten.

När de analyser som beskrivs i figur 11-2 slutförts ses problemet med kombinationer över genom ett strukturerat tillvägagångssätt som syftar till att hantera kombinationer av scenarier på ett heltäckande sätt, se vidare avsnitt 12.9.

Risksummering

Riskbidragen från vart och ett av scenarierna utgör basen för en risksummering sedan scenarieanalyserna har utförts.

Riskbidrag från scenarier som är oberoende av varandra adderas, om kombinationer inte ger större konsekvenser än de enskilda scenarierna. Om kombinationer kan leda till större konsekvenser utvärderas även sådana kombinationers sannolikhet och konsekvens.

Vid summeringen noteras det även om vissa grupper av scenarierna är ömsesidigt uteslutande. I sådana fall kan gruppens totala konsekvens inte vara större än konsekvensen för det scenario i gruppen som har den största konsekvensen. Detta är ett sätt att begränsa risken från en grupp ömsesidigt uteslutande scenarier (eller olika fall inom ett scenario) om kunskapen om hur sannolikheter fördelas bland scenarierna i gruppen är begränsad.

Förhållande till referensutvecklingen

För flera av säkerhetsfunktionsindikatorerna finns sådana kriterier att om kriteriet är uppfyllt kan ett visst fenomen, som påverkar säkerheten negativt, uteslutas. Frysning av bufferten kan till exempel uteslutas om bufferttemperaturen ligger över -4 °C . Om man bedömer att kriteriet upprätthålls i referensutvecklingen, kan utvärderingen inriktas på tänkbara förlopp som kan leda till att kriteriet inte upprätthålls, förutom sådana förlopp som tas upp i referensutvecklingen. Med hjälp av FEP-diagrammet, se avsnitt 8.5, undersöks osäkerheter med avseende på initialtillstånd och externa förhållanden, såväl som konceptuella osäkerheter förenade med processer.

Om en indikator inte har något samband med ett kriterium, eller om man bedömt att kriteriet inte upprätthålls i referensutvecklingen, görs en utvärdering av om värdet på säkerhetsfunktionsindikatorn skulle kunna vara mindre gynnsamt för säkerheten än vad som är fallet i referensutvecklingen. Återigen undersöks osäkerheter med avseende på initialtillstånd, externa förhållanden och processer.

11.2.3 Mall för analys av scenarier baserade på säkerhetsfunktioner

En gemensam mall följs vid analysen av alla scenarier som härletts från säkerhetsfunktionsindikatorer. Mallen beskrivs nedan och för varje rubrik ges en kort beskrivning av den information som kan förväntas under den. Vid behov görs mindre modifieringar av strukturen för ett särskilt scenario, men det innehåll som anges nedan finns alltid med.

Observera att mallen bara täcker analysen av inneslutningspotentialen i kapitel 12. Konsekvensberäkningar för de typer av kapselbrott som analyseras i scenarierna utförs i kapitel 13, enligt rutiner som beskrivs i det kapitlet.

Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)

Den säkerhetsfunktion som behandlas anges. Om scenariot gäller en säkerhetsfunktion för vilken ett kriterium för lämplig säkerhetsfunktion har fastställts, konstateras det att detta kriterium inte antas vara uppfyllt. Till vilken grad det inte upprätthålls specificeras i den fortsatta analysen.

I vissa fall utvärderas flera säkerhetsfunktioner inom samma scenario, eftersom de alla tyder på omständigheter som är relevanta för en gemensam säkerhetsfunktion. Om så är fallet förklaras alla inblandade funktioner och deras beroenden. Funktionsindikatorn ”buffertens hydrauliska konduktivitet” har till exempel samband med indikatorerna ”buffertens svälltryck”, ”minimal jonstyrka hos grundvattnet”, ”begränsad salthalt” och ”återfyllningens densitet”.

Hantering av denna fråga i referensutvecklingen

Hantering i referensutvecklingen beskrivs kortfattat.

Kvalitativ beskrivning av förlopp som leder till denna situation

Tabellen med osäkerheter som härletts från analysen av referensutvecklingen ses över, i syfte att identifiera osäkerheter som kräver ytterligare behandling i det aktuella scenariot. Utifrån denna tabell och FEP-diagrammet presenteras de faktorer som bidrar till att scenariot kan inträffa. Presentationen ger en lista över i) initialtillståndsfaktorer, ii) processer och iii) externa förhållanden som bör beaktas.

Kvantitativ beskrivning av förlopp som leder till denna situation

Analysen av referensutvecklingen granskas kritiskt i syfte att på ett uttömmande sätt utvärdera alla tänkbara förlopp som kan leda till den situation som kännetecknar scenariot. De osäkerheter som eventuellt finns kvar efter hanteringen i referensutvecklingen tas om hand. Till exempel hanteras förhållanden för initialtillståndet som inte tas upp i referensinitialtillståndet, liksom externa förhållanden som inte täcks in av den externa referensutvecklingen. Konceptuella osäkerheter som gäller de berörda processerna behandlas.

Betydelsen av i vilken ordningsföljd olika processer eller händelser inträffar analyseras

Om det inte finns antaganden avseende detta särskilda scenario som gör att vissa alternativ kan åsidosättas, analyseras scenariot med avseende på både referensglaciationscykeln, global uppvärmning och andra relevanta klimatfall. Detta görs för att uppfylla SSM:s krav att varje scenario ska analyseras med avseende på flera alternativa klimatutvecklingar.

Kategorisering som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”

Utgående från en uppskattning av hur rimliga de förlopp är som kan leda fram till situationen, betecknas scenariot antingen som ”mindre sannolikt” om man inte kan utesluta att det inträffar, eller som ett ”restscenario”. I det förra fallet tas konsekvenserna av scenariot med i risksummeringen för förvaret, vilket innebär att sannolikheten för att scenariot inträffar uppskattas. I vissa fall är det relevant att ta hänsyn både till sannolikheten för att ett enstaka deponeringshål påverkas och till sannolikheten för att alla (eller många) hål påverkas. I händelse av ett ”restscenario” tas konsekvenserna av scenariot inte med i risksummeringen för förvaret.

Slutsatser

Slutsatser dras på grundval av resultaten under föregående rubriker.

11.3 Sammanfattning av val av scenarier

I tabell 11-1 sammanfattas resultatet av det scenarieval som genomförts enligt detta kapitel.

Den referensutveckling som beskrivs i kapitel 10 definieras som huvudscenariot och utgör grunden för att välja ytterligare scenarier.

Säkerhetsfunktionerna används som utgångspunkt för att välja ytterligare scenarier. Dessa omfattar tre buffertscenarier som representerar buffertfel, och tre kapselscenarier som representerar olika typer av kapselbrott. Buffertscenarierna analyseras först och varje bufferttillstånd beaktas sedan vid analyserna av de olika typerna av kapselbrott. Om analyserna av något av bufferttillstånden leder till slutsatsen att det tillståndet kan uteslutas, förs det emellertid inte vidare i analysen. Slutsatserna av

analyserna enligt kapitel 12 bestämmer om en kombination är ”mindre sannolik” och således tas med i risksummeringen, eller om den är ett ”restscenariö”.

Scenarier som är relaterade till framtida mänskliga handlingar och andra scenarier som analyserats, t ex för att skaffa kunskap om barriärfunktioner, tas med om de inte täcks in av resultaten av redan analyserade scenarier. De sistnämnda punkterna behandlas i avsnitt 2.5.8.

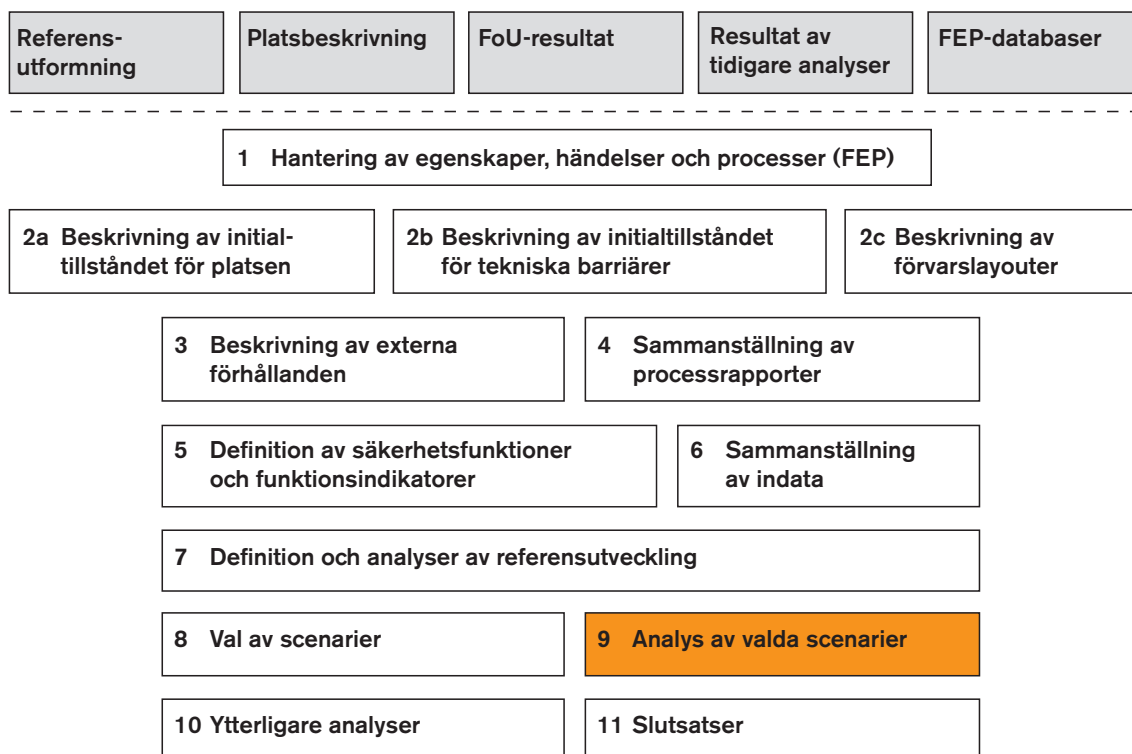
Hur heltäckande de utvalda scenarierna är diskuteras i kapitel 15.

Sammanfattningsvis utgörs scenariemetodiken av en undersökning av alla förlopp som kan leda till de tre identifierade typerna av kapselbrott. Metodiken syftar till att utesluta eller kvantifiera brottyperna med hänsyn tagen till alla tänkbara utvecklingsalternativ för systemet. Säkerhetsfunktionerna hos förvarets olika delar och den kunskap om förvarssystemets utveckling som kommer från analysen av referensutvecklingen utgör grunden för ingående utvärderingar av sådana förlopp.

Tabell 11-1. Resultat av valet av scenarier. Gröna celler anger förhållanden för huvudscenariots basfall, röda celler anger avvikelser från dessa förhållanden.

Huvudscenariö/Referensutveckling				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Basfall	Referens ± toleranser.	Platsbeskrivande modell (med varianter/osäkerheter).	Enligt Processrapporter .	Referensklimat (upprepningar av Weichselglaciationscykeln). Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Variant med global uppvärmning	Referens ± toleranser.	Platsbeskrivande modell (med varianter/osäkerheter).	Enligt Processrapporter .	Utsträckt varm period. Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Ytterligare scenarier baserade på möjligt bortfall av säkerhetsfunktioner ("mindre sannolika" eller "restscenarier" baserat på analysresultat)				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Advektion i bufferten	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, interna processer och externa förhållanden som kan leda till att den aktuella säkerhetsfunktionsindikatorn inte upprätthålls. Analys av referensutvecklingen används som utgångspunkt.			
Buffertfrysning	Se ovan.			
Buffertomvandling	Se ovan.			
	Beakta vart och ett av de tre bufferttillstånden ovan + intakt buffert vid analys av de tre kapselscenarierna nedan.			
Kapselbrott på grund av isostatisk last	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, interna processer och externa förhållanden som kan leda till att den aktuella säkerhetsfunktionsindikatorn inte upprätthålls. Analys av referensutvecklingen används som utgångspunkt.			
Kapselbrott på grund av skjuvlast	Se ovan.			
Kapselbrott på grund av korrosion	Se ovan.			
Hypotetiska restscenarier som belyser barriärfunktioner				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Flera fall som tillsammans täcker in KBS-3-barriärema	Som basfallet av huvudscenariot, med undantag av faktorer som avser hypotetiskt bortfall av barriärer.			
Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Intrång genom borming	Som basfallet av huvudscenariot.	Som basfallet av huvudscenariot.	Som basfallet av huvudscenariot, förutom processer som påverkas av borming.	Referensklimat + borming.
Ytterligare fall av intrång, t ex närliggande berganläggning	Som basfallet av huvudscenariot.	Som basfallet av huvudscenariot.	Som basfallet av huvudscenariot, förutom processer som påverkas av intrång.	Referensklimat + intrångsaktivitet.
Ej förslutet förvar	Som basfallet av huvudscenariot, men otillräcklig förslutning.	Som basfallet av huvudscenariot.	Som basfallet av huvudscenariot, modifierat enligt initialtillståndet.	Referensklimat.

12 Analyser av inneslutningspotentialen för utvalda scenarier



Figur 12-1. SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat. I detta kapitel beskrivs analysen av inneslutningspotentialen i steg 9. Fördröjningspotentialen analyseras i kapitel 13.

12.1 Inledning

12.1.1 Allmänt

I detta kapitel behandlas analyserna av inneslutningspotentialen för de flesta av de utvalda scenarier som beskrevs i kapitel 11.

Scenarier som härletts från säkerhetsfunktionsindikatorer analyseras i avsnitten 12.2 till och med 12.8. De tre buffertscenarierna behandlas i avsnitten 12.2 till 12.4 och förs sedan vidare till de tre kapselscenarierna som analyseras i avsnitten 12.6 till 12.8.

I avsnitt 12.9 i detta kapitel beskrivs också hur möjliga kombinationer av scenarierna ovan analyseras.

Analysen av fördröjningspotentialen för de scenarier som analyseras i detta kapitel behandlas i kapitel 13.

Inneslutningspotentialen för huvudscenariot analyseras inte i detalj i detta kapitel, eftersom den hänger nära samman med inneslutningspotentialen för referensutvecklingen som analyserades i kapitel 10, se vidare i avsnitt 12.1.2.

Hypotetiska restscenarier som illustrerar barriärfunktioner analyseras inte heller i detta kapitel, eftersom de berörda barriäregenskaperna är antagna och inte resultatet från en analys. Antaganden för sådana barriärtillstånd samt konsekvensanalyser presenteras i kapitel 13, se avsnitt 13.7.

Både inneslutnings- och fördröjningspotential för FHA-scenarier analyseras i avsnitt 14.2, där också metodiken för FHA-scenarierna redovisas.

12.1.2 Definition av huvudscenariot

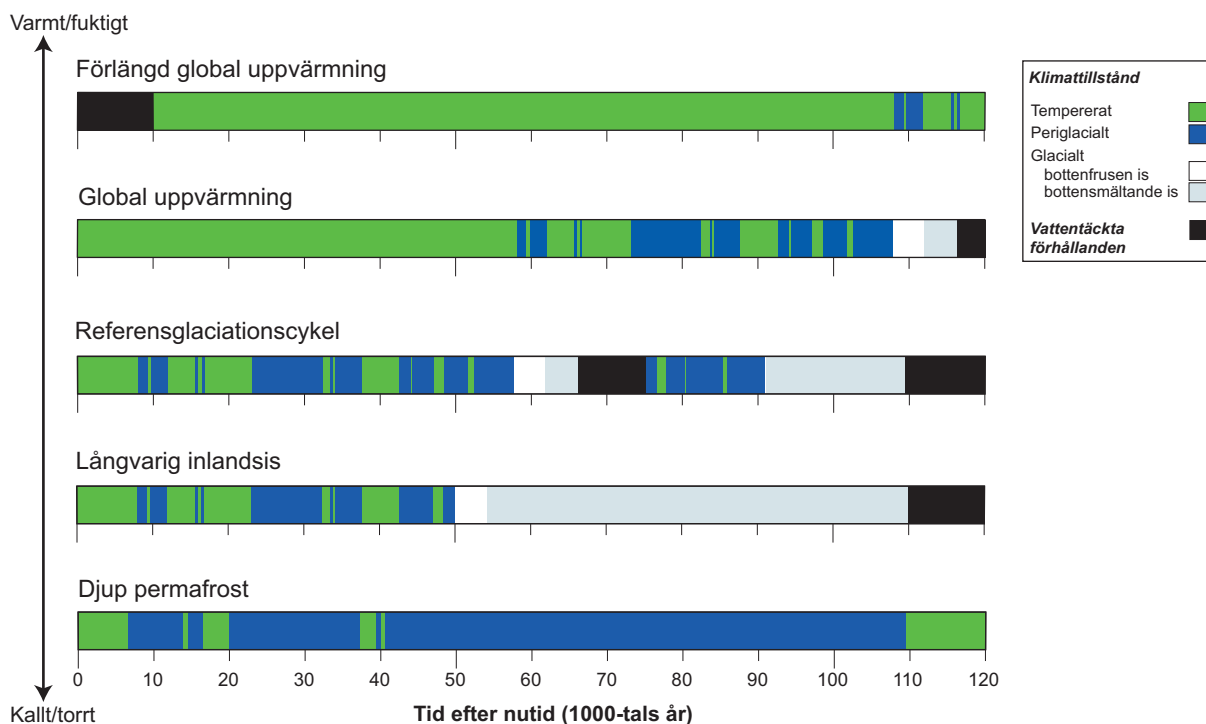
Huvudscenariot är starkt kopplat till analysen av referensutvecklingen som beskrivs i kapitel 10. I definitionen av huvudscenariot ingår därför de detaljerade förutsättningar som ges för den allmänna utvecklingen i avsnitt 10.1.1. Syftet med den beskrivningen, liksom syftet med huvudscenariot, är att presentera en rimlig utveckling av förvarssystemet. De flesta av de utvecklingar och resultat som beskrivs i kapitel 10 gäller därför också för huvudscenariot. Liksom för referensutvecklingen finns två versioner av huvudscenariot: Weichsel-basfallet och varianten med global uppvärmning.

Referensutvecklingen är också förknippad med ett antal osäkerheter. De osäkerheter som kräver att inneslutningen analyseras ytterligare sammanfattas i tabell 10-27. Alla dessa osäkerheter beaktas vid analyserna av de ytterligare scenarierna som redovisas i efterföljande avsnitt och tas upp om de är aktuella för scenariot ifråga. Det är därför inte meningsfullt att utvärdera dessa osäkerheter här för att komma fram till en mer exakt uppskattning av huvudscenariots utveckling. I stället ges en kort utvärdering av huvudscenariots inneslutningspotential i avsnitt 12.9.2, efter analyserna av de ytterligare scenarierna. En sådan utvärdering kan då baseras på resultatet från en mer detaljerad analys av osäkerheterna i de ytterligare scenarierna.

12.1.3 Klimatutveckling för scenarieanalyserna

Som nämndes i avsnitt 6.2.4 har – utöver den externa utvecklingen för referensscenariot – kompletterande klimatfall med potentiellt större påverkan på förvarets säkerhet än referensglaciationscykeln identifierats och beskrivs i **Klimatrapporten**. Dessa resultat utnyttjas på lämpligt sätt i analyserna av de ytterligare scenariernas inneslutningspotential. Klimatfallen visas i figur 12-2.

Referensglaciationscykeln utgör referensutvecklingens externa förhållanden, vilka analyseras i kapitel 10. Klimatfallet med *global uppvärmning* är en variant som också analyseras i kapitel 10.



Figur 12-2. Sammanfattning av de framtida klimatfall som ingår i säkerhetsanalysen SR-Site. Klimatfallet med den maximala inlandsisutbredningen, inklusive den maximala istjockleken, visas inte. Men detta fall ryms tidsmässigt inom utvecklingen i fallet med långvarig inlandsisutbredning. I avsnitt 1.2.3 i **Klimatrapporten** finns en beskrivning av de olika klimatillstånden.

Den längsta perioden av tempererade klimatförhållanden under de kommande 120 000 åren beskrivs i klimatfallet med *långvarig global uppvärmning*. Detta utgör således den längsta perioden under vilken grundvatten bildas genom nederbörd. Fallet är relevant då omfattningen av den bufferterosion som potentiellt leder till advektiva förhållanden i bufferten ska analyseras, se avsnitt 12.2.

Den längsta perioden av periglaciala klimatförhållanden, med de längsta perioderna av permafrost och med det största frysdjupet i Forsmark, återfinns i fallet med *kraftig permafrost*. Detta fall är relevant för analysen av buffertfrysning i avsnitt 12.3. Den största osäkerheten för utvecklingen av permafrost och frusen mark hör emellertid samman med referensglaciationscykeln, vilket betyder att den största osäkerhet kring frysdjupet inträffar i detta klimatfall.

Den längsta perioden med glaciala förhållanden, och den tillhörande perioden då grundvatten bildas från glacialt smältvatten, återfinns i fallet med *långvarig inlandsisutbredning*. Även detta fall är relevant för analysen av advektion i bufferten i avsnitt 12.2.

Den maximala framtida mäktigheten hos inlandsisen uppnås i fallet med *maximal inlandsisutbredning*. Ökningen i hydrostatiskt tryck på förvarsdjup är då som störst. Detta fall är inte åskådliggjort i figur 12-2, men ryms tidsmässigt inom fallet med långvarig inlandsisutbredning. Fallet är relevant för analysen av kapselbrott till följd av isostatisk last i avsnitt 12.7.

Tillsammans täcker de sex klimatfallen det förväntade maximala intervallet inom vilket klimatet och de klimatrelaterade processerna som har betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet kan variera i de tidsskalor som analyseras i SR-Site, dvs under flera glaciationscykler. Den *verkliga* framtida utvecklingen hos klimatet och de klimatrelaterade processerna av betydelse för ett KBS-3-förvar i Forsmark förväntas hamna inom det intervall som täcks in av de sex klimatfallen i figur 12-2.

12.2 Advektion i bufferten

12.2.1 Inledning

Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)

En av buffertens centrala säkerhetsfunktioner är att förhindra advektiv transport av lösta ämnen mellan grundvattnet och kapseln (säkerhetsfunktionsindikatorer Buff1a och b) och därigenom säkerställa att diffusion är den dominerande transportmekanismen. För att kunna upprätthålla denna säkerhetsfunktion måste bufferten ha tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet. En förutsättning för en ändamålsenlig och homogen hydraulisk konduktivitet är också ett visst minimalt buffertsvälltryck, vilket säkerställer materialets täthet och förmåga till självläkning.

I detta scenario undersöks tänkbara förlopp som leder till att kriteriet för buffertens hydrauliska konduktivitet inte upprätthålls. Det finns i princip två förlopp som kan leda till en situation där advektion skulle kunna vara en betydande mekanism för transport i bufferten.

- En minskad torrdensitet orsakad av förlust av buffertmaterial skulle ge en hydraulisk konduktivitet som är tillräckligt hög för att advektion ska dominera över diffusion, eller ge ett svälltryck som är för lågt för att den självläkande förmågan ska kunna upprätthållas.
- Omvandling av montmorillonit i bufferten till ett annat mineral med annorlunda hydrauliska egenskaper.

Dessa förlopp kan leda till antingen:

- *Hög konduktivitet*: Ett fall där så mycket buffertmaterial har gått förlorat att vatten kan strömma genom bufferten.
- *Sprickor*: Ett fall där bufferten har förlorat sin självläkande förmåga och det bildas en vattenförande spricka i den.

För en intakt kapsel rör advektion transporten av korroderande ämnen till kapseln. För en otät kapsel är det transporten av radionuklider till grundvattnet som påverkas.

Ett antal faktorer påverkar direkt eller indirekt buffertens hydrauliska konduktivitet. Den hydrauliska konduktiviteten påverkas direkt av buffertens densitet och av vilken typ av katjoner som finns i

bufferten. Dessa faktorer påverkar också buffertens svälltryck. Svälltrycket påverkas dessutom av det omgivande grundvattnets jonstyrka.

Det finns ett antal säkerhetsfunktionsindikatorer som kan uppfattas som ”underindikatorer” till ”huvudindikatorn” hydraulisk konduktivitet i bufferten. Dessa används samtliga för att utvärdera detta scenario:

- Buffertens svälltryck > 1 MPa.
- Minsta tillåtna katjonladdningskoncentration i grundvattnet, $\Sigma q[M^{q+}] > 4$ mM.
- Begränsad salthalt i grundvattnet.

En maximal temperatur av 100 °C och $\text{pH} < 11$ kan också betraktas som underindikatorer för detta scenario. Följderna av sådana förhållanden utvärderas i avsnitt 12.4.

Ett specialfall av detta scenario är effekten av en sjunkande kapsel. Detta behandlas i avsnitt 12.2.4.

Hantering av frågan i referensutvecklingen

För referensutvecklingen antas att advektion som transportmekanism i bufferten förekommer i den omfattning som anges av beräkningarna för referensutvecklingens basfall i avsnitt 10.3.11. Advektiva förhållanden beräknas råda i 23 deponeringspositioner av totalt omkring 6 000 stycken under en miljon år vid realiseringar av basfallets semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modell.

Gränssättande fall

För referensutvecklingen visar probabilistiska beräkningar att det genomsnittliga antalet kapslar som kommer att bli otäta under den en miljon år långa analysperioden uppgår till 0,12 för den semikorrelerade DFN-modellen, se avsnitt 10.4.9. Orsaken till kapselbrott är kolloidfrigörelse från bufferten, vilket leder till advektion i bufferten och påföljande ökad korrosion. Där visas också att följderna i form av kapselbrott är liknande (i genomsnitt 0,17) **om advektion förutsätts råda initialt i samtliga deponeringspositioner.** (I båda fallen antas deponeringshål ha uteslutits enligt EFPC.)

Detta resultat är viktigt för hanteringen av scenariot med advektion i bufferten. Oavsett resultatet av det komplexa samspelet mellan ett antal osäkra faktorer som påverkar förekomsten av advektion i bufferten, begränsas alltid följderna i form av kapselbrott av det fall där advektion antas för samtliga kapslar under hela analysperioden. Förekomsten av dessa kapselbrott liknar den för referensutvecklingen, där advektiva förhållanden i bufferten endast råder i en liten del av deponeringshålen. Anledningen till denna förenklade omständighet är att den tid det tar för att erodera bufferten så mycket att advektion uppstår är kortare än den tid som krävs för att orsaka kapselbrott på grund av korrosion när väl de advektiva förhållandena har uppstått. För båda processerna är grundvattenflödet i den aktuella deponeringspositionen en viktig avgörande faktor. Beroendet av andra faktorer som påverkar erosion respektive korrosion är sådant att den tid som krävs för att advektion ska uppstå i allmänhet är kortare än den tid som krävs för att orsaka kapselbrott på grund av korrosion när väl de advektiva förhållandena har uppstått. Det slås även återigen fast att det bara är i de fåtal hål där det advektiva flödet är stort i de skärande sprickorna som erosion och påföljande ökad korrosion kan leda till kapselbrott i ett miljonårsperspektiv.

Som också diskuterades i avsnitt 10.3.11 om referensutvecklingen, är en situation där erosion inte uppstår också tänkbar mot bakgrund av den bristande kunskapen om denna process i sig och osäkerheter rörande grundvattnets framtida sammansättning.

Tre viktiga fall kan därför förutses innan detta scenario analyseras:

1. ett fall där advektiva förhållanden uppstår i den omfattning som ges av referensutvecklingen som behandlades i kapitel 10,
2. ett fall där advektiva förhållanden råder i varje deponeringshål under hela analysperioden,
3. ett fall där diffusiva förhållanden består i varje deponeringshål under hela analysperioden.

Dessa tre fall, av vilka två är gränssättande, används som bakgrund för den fortsatta diskussionen.

Som nämns för referensutvecklingen är kolloidfrigörelse från bufferten/erosion en process om vilken kunskapen är otillräcklig. Redan i referensutvecklingen leder den till buffertförlust i sådan omfattning att advektion inte kan uteslutas för ett fåtal deponeringshål under den första glaciationscykeln. I miljonårsperspektivet skiljer sig fall 2 därför inte mycket från referensutvecklingens fall 1, i synnerhet eftersom kapseln tål advektiva förhållanden i bufferten under hela analysperioden för de flesta av deponeringshålen och under omkring 100 000 år för samtliga hål, i enlighet med beräkningarna i kapitel 10. De tre fallen kan därför anses ge en rimlig återspeglning av den i dagsläget osäkra kunskapen om omfattningen av kolloidfrigörelse från bufferten/erosion. De är emellertid också heltäckande i den meningen att det är svårt att tänka sig en värre situation än fall 2 eller en mer gynnsam situation än fall 3.

Kvalitativ beskrivning av förlopp som leder till advektion i bufferten (inklusive aspekter av initialtillståndet samt externa förhållanden)

Som nämnes tidigare har buffertdensiteten en nyckelroll för buffertens förmåga att förhindra advektion. Densiteten kan minska på grund av erosion som orsakas av kanalbildning då bufferten mätts, på grund av buffertens expansion in i deponeringstunneln då en mättad buffert sväller eller på grund av erosion som orsakas av utspätt grundvatten under glaciala förhållanden. Buffertens expansion in i deponeringstunneln kommer att motverkas av tunnelns återfyllningsmaterial, vilket betyder att faktorer som påverkar återfyllningsmaterialets densitet och kompressibilitet också skulle kunna påverka buffertens hydrauliska konduktivitet indirekt.

Av dessa faktorer är det kolloidfrigörelse/erosion orsakad av utspätt grundvatten som har den i särklass största inverkan på densiteten i referensutvecklingen. Det är den enda faktor som orsakar en avsevärd förändring av buffertdensiteten över analysperioden på en miljon år för denna utveckling.

Den övergripande slutsatsen från analysen av referensutvecklingen är därför att bufferten förväntas fungera som avsett tills utspätt grundvatten tränger ned i den. Om de utspädda förhållandena består under tiotusentals år är tilltron svag till att advektion ska kunna förhindras i de deponeringspositioner som skärs av sprickorna med högst flödes hastighet. Vid slutet av den en miljon år långa analysperioden beräknas advektiva förhållanden råda i 23 deponeringspositioner vid realiseringen av basfallets semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modell.

Följande faktorer med betydelse för advektion i bufferten, baserat på diskussionen ovan, anges i tabell 10-27 som beskriver de osäkerheter som identifierats för referensutvecklingen och i FEP-diagrammet, se figur 8-4.

Berörda initialtillståndsfaktorer

- Buffertdensitet (mängd deponerad torrmasa).
- Återfyllningsdensitet (mängd torrmasa deponerad ovanför deponeringshålet).
- Typ av buffertmaterial som används (detta är inte en osäker faktor, men utvecklingen kommer i vissa avseenden skilja sig för exempelvis de två material som beaktas i SR-Site).

Berörda processer

Det finns ett antal olika processer som kan leda till att buffertens densitet minskar:

- kanalbildning/erosion under det tidiga skedet,
- svällning/expansion in i återfyllningen,
- bufferterosion/kolloidfrigörelse.

För en given densitet avgörs den hydrauliska konduktiviteten och svälltrycket av följande processer:

- jonbyte,
- osmos.

Buffertens hydrauliska konduktivitet och svälltryck bestäms dessutom av processen montmorillonit-omvandling.

Berörda externa förhållanden

- Geofärsförhållanden som ger mycket höga eller låga jonstyrkor i grundvattnet.
- Geofärsförhållanden som leder till ökat flöde.

Det finns således ett stort antal faktorer som måste beaktas i scenariot med advektion i bufferten.

12.2.2 Kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till advektion i bufferten

I referensutvecklingen behandlas densiteten enligt referensutformningen för bufferten och återfyllningen, liksom rimligt höga och låga jonstyrkor samt utsträckningen i tiden för sådana förhållanden under en glaciationscykel. Även risken för att montmorilloniten i bufferten ska omvandlas utvärderas.

Initialt deponerad torr buffertmassa

Effekten av variationer i buffertmaterialets sammansättning tas inte upp i referensutvecklingen. Det förväntas att de definierade leverans- och kvalitetskontrollsystemen kommer att säkerställa att allt material uppfyller de specificerade kraven. Dessa materialkrav har ännu inte definierats till fullo. Med tanke på hur obetydlig skillnaden i kritiska egenskaper mellan de två referensmaterialen i SR-Site är vid den eftersträvade densiteten (se avsnitt 5.5) kan det konstateras att variationer i materialets sammansättning kommer att ha en relativt begränsad effekt på buffertens funktion. Som observerades vid analysen av buffertens geokemiska utveckling i avsnitt 10.3.8 samt i /Sena et al. 2010/ har buffertmaterialets sammansättning, och i synnerhet utbytbara katjoner, en tendens att nå jämvikt vid liknande värden för båda materialen på grund av den interaktion som sker med grundvattnet i Forsmark. Den tillåtna variationen i sammansättningen hos det utvalda buffertmaterialet kommer att vara definierad vid inköpstillfället. Denna variation förväntas under alla omständigheter att vara liten.

Den övergripande slutsatsen beträffande initialt deponerad buffert i form av torrs substans är att buffertens initiala massa och sammansättning med god marginal förväntas ligga inom konstruktionsförutsättningarna.

Initialt deponerad återfyllning i form av torrs substans

De förväntade osäkerheterna beträffande mängden återfyllning som deponeras initialt diskuteras i avsnitt 5.6. Om en mindre mängd återfyllning deponeras skulle det eventuellt kunna leda till att bufferten sväller in i deponeringstunneln och till att buffertmaterial går förlorat. Enligt de produktions- och kontrollprocedurer som beskrivs i avsnitt 5.6 finns emellertid ingen anledning att tro att misslyckanden i återfyllningsprocessen i någon betydande omfattning kommer att bidra till att det uppstår advektiva förhållanden i bufferten.

Svällning

Om den initiala densiteten i tunnelåterfyllningen är lägre än den eftersträvade densiteten i referensutvecklingen kan bufferten expandera in i återfyllningen, vilket i sin tur ger en lägre genomsnittlig buffertdensitet. Detsamma gäller om bufferten mäts innan återfyllningen och expanderar in i en stapel av torra återfyllningsblock. Dessa fall utvärderades för referensutvecklingen, se avsnitt 10.3.9. Torr återfyllning och torra pelletar i spalten vid taket har identifierats som det fall som påverkar den slutliga buffertdensiteten mest. Tabell 10-3 visar den slutliga densiteten för bufferten runt kapseln för olika antaganden om pelletfyllningen. Enligt beräkningarna för referensutvecklingen finns tillräcklig marginal för densiteten hos återfyllningen för att säkerställa att funktionen är acceptabel för samtliga rimliga kombinationer. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare här.

Erosion som orsakas av kanalbildning

Erosion som uppstår på grund av kanalbildning diskuteras för referensutvecklingen i avsnitt 10.2.4. Om trycket från det vatten som flödar in i ett deponeringshål är högre än svälltrycket kommer bufferten inte att kunna täta som avsett och det kan bildas en kanal. Kanalen kommer med största sannolikhet att mynna ut i deponeringstunneln. Så länge tunneln inte har förslutits och det hydrostatiska trycket inte återställts kommer det att förekomma ett flöde i kanalen. Flödet kan erodera bufferten och material gå förlorat. Den potentiella förlusten kan beräknas från det ackumulerade vattenflödet.

För det maximalt tillåtna inflödet i deponeringshålet (150 m³) beräknades en erosion på upp till 41 kg, se avsnitt 10.2.4. Vid en torrdensitet hos bufferten, $\rho_d=1\ 570\ \text{kg/m}^3$, motsvarar detta en volym på 0,026 m³.

Totalt sett är osäkerheterna i parametrarna relaterade till kanalbildning relativt begränsade under dessa omständigheter. Det är inte troligt att erosion till följd av kanalbildning skulle vara väsentligt högre än för referensutvecklingen. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare här.

Erosion av återfyllning

Erosion av återfyllningsmaterial under driftskedet kan leda till lokala förluster av återfyllningsmaterial i övre delen av ett deponeringshål. Detta skulle i sin tur kunna leda till att buffertmaterialet expanderar in i återfyllningen och att buffertens densitet sjunker. Som visades i avsnitt 10.2.4, uppskattas den maximala förlusten (omfördelning) av återfyllningen i detta skede till 1 640 kg, vilket är försumbart jämfört med de återfyllningsförluster (220 ton) som skulle leda till advektiva förhållanden i bufferten i enlighet med avsnitt 10.3.11. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare här.

Erosion/kolloidfrigörelse från bufferten

Uppkomst och frigörelse av buffertkolloider under en glaciationscykel behandlas för referensutvecklingen i avsnitt 10.3.11. Flera osäkra aspekter av kolloidfrigörelsen nämns i samband med analysen av referensutvecklingen. Till dessa hör bland annat den konceptuella osäkerheten i erosionsmodellen /Neretnieks et al. 2009/, hur det utvalda buffertmaterialet beter sig, hur långa perioderna med låg jonstyrka i grundvattnet är och flödes hastigheterna för grundvattnet under dessa perioder. Dessa osäkerheter är det huvudsakliga skälet till att välja de gränssättande fallen för det bufferterosions-scenario som beskrivs i avsnitt 12.2.1.

En kvantitativ behandling av i vilken grad erosionen påverkas av osäkerheter hos de faktorer som påverkar erosionsprocessen ges i ett underavsnitt nedan.

Jonbyte och osmos

Figur 5-14 visar svälltrycket för de två referensbuffertmaterialen som funktion av torrdensitet för olika salthalter. En jämförelse mellan de två materialen ger även en god indikation på effekten av jonbyte. MX-80 är Na-bentonit som exponerats för NaCl-lösningar, medan Ibeco RWC är Ca-bentonit som exponerats för CaCl₂-lösningar. Varken den utbytbara katjonen eller salthalten har någon större effekt på buffertens egenskaper vid referensdensiteten. Vid lägre densiteter blir emellertid inverkan av båda processerna mycket starkare. Effekten av hög salthalt får betydelse för svälltrycket vid en torrdensitet av ~1 400 kg/m³. För de salthalter som förväntas i Forsmark, se tabell 10-8, kan effekten försummas för torrdensiteter > 1 000 kg/m³. Jonbytesegenskaperna har ingen betydelse förrän densiteten sjunker till omkring 1 000 kg/m³, men väl under detta värde är effekten mycket stark.

Grundvattnets sammansättning, Ca/Na-kvot och totala salthalt, kommer att avgöra mängden buffertmaterial som kan förloras innan advektion börjar bli en viktig faktor.

Effekten av grundvattnets salthalt kommer endast att få betydelse om stora mängder buffertmaterial förloras, dvs i kombination med kolloidfrigörelse. Processerna är ömsesidigt uteslutande, eftersom kolloidbildning endast sker vid låga kalciumkoncentrationer, men de skulle kunna ske vid olika tidsperioder om grundvattnets sammansättning förändras.

Sammanfattningsvis är osäkerheterna beträffande effekterna av ökade salthalter oviktiga jämfört med osäkerheterna beträffande processen kolloidfrigörelse.

Omvandling av montmorillonit

Omvandling av montmorillonit i bufferten till andra mineraler på grund av ökad temperatur utvärderas i referensutvecklingen och i buffertomvandlingsscenario, se avsnitt 12.4.

Geosfärförhållanden

Utvecklingen av bufferten beror på de förhållanden geosfären skapar i bufferten. Nyckelparametrar är:

1. Flöden och gradienter under byggskedet. Dessa parametrar avgör storleken på mängden material som förloras genom kanalbildning/erosion.
2. Jonstyrkan i grundvattnet för alla tidsskalor. Låg laddningskoncentration av katjoner i grundvattnet gör att bufferten kan bilda en kolloidal fas som kan transporteras bort med grundvattnet. Hög jonstyrka påverkar buffertens hydromekaniska egenskaper, vilket kan leda till högre hydraulisk konduktivitet och lägre svälltryck i de fall där viss förlust av buffertmaterial har skett. Ca/Na-kvoten kommer att påverka jonbyteskapaciteten som i sin tur kan påverka buffertegenskaperna vid mycket låga densiteter.
3. Grundvattenflödet avgör hur mycket buffertmaterial som kan transporteras bort i det fall det frigörs kolloider.

Flöden och gradienter under byggskedet har behandlats tidigare under ”Erosion som orsakas av kanalbildning”. De två senare faktorerna behandlas i den känslighetsanalys som nu följer.

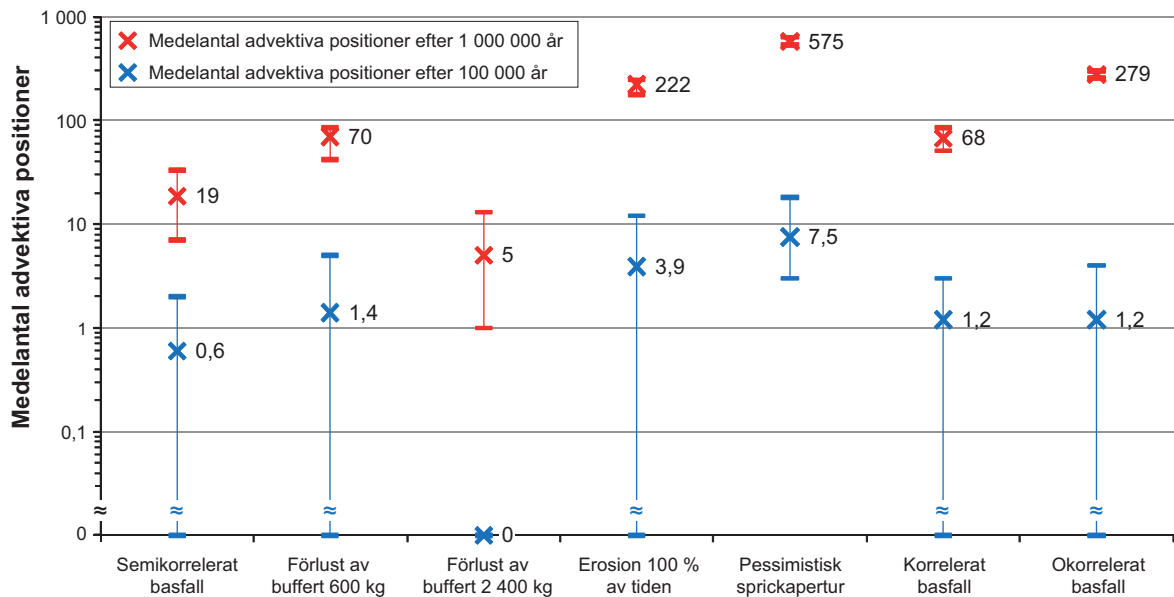
Kvantitativ känslighetsanalys av erosion/kolloidfrigörelse från bufferten.

Nedan följer en kvantitativ behandling av i vilken grad erosionen påverkas av osäkerheter i faktorer som påverkar erosionsprocessen.

Omfattningen av bufferterrosionen beräknas med hjälp av den modell som beskrivs i avsnitt 10.3.11. Den beräknade omfattningen av erosionen kommer att bero på den grundvattensammansättning som krävs för att erosion ska ske, på den andel av den en miljon år långa analysperioden under vilken grundvattnet har en sammansättning som gynnar erosion och på den kvantitativa omfattningen av korrosionsprocessen för dessa förhållanden. Ytterligare en faktor av betydelse är den mängd buffert som måste eroderas bort innan advektiva förhållanden uppkommer i ett deponeringshål. Följande antaganden eller slutsatser beträffande dessa faktorer utnyttjades i SR-Site:

- *Kriteriet* som avgör om processen inträffar anger att katjonladdningskoncentrationen i grundvattnet, $\Sigma q[M^{q+}]$, ska överstiga 4 mM för att erosion ska undvikas, se avsnitt 10.3.11.
- *Tidsfraktionen* av den en miljon år långa analysperioden under vilken erosionen sker antogs vara 25 procent av tiden i de två procent av deponeringshålen som exponeras för de högsta flödes-hastigheterna, baserat på analyser som sammanfattas i avsnitten 10.3.7 och 10.4.7.
- *Mängden buffert* som måste eroderas för att advektiva förhållanden ska uppkomma i deponeringshålet antas vara 1 200 kg, baserat på diskussionen i avsnitt 10.3.9.
- *Den kvantitativa modellen* som används för att kvantifiera erosionens omfattning ger erosions-hastigheten, $R_{Erosion}$, som $A \cdot \delta \cdot v^{0,41}$, där v är grundvattnets hastighet i en spricka som skär bufferten, δ är aperturen hos den skärande sprickan och A är en konstant, se avsnitt 10.3.11 samt /Neretnieks et al. 2009/.
- *Grundvattnets hastighet och sprickaperturen* erhålls från beräkningarna av grundvattenflödet. Den naturliga variationen hos dessa parametrar täcks in genom att fastställa flödesförhållandena i var och en av förvarets 6 000 deponeringspositioner. I beräkningen används den hydrogeologiska DFN-modellen med ett semikorrelerat förhållande mellan spricklängd och transmissivitet, se avsnitt 10.3.6.
- Beräkningsresultatet beror också på det *sovringskriterium för deponeringshål* som används i layouten och som simuleras vid den hydrogeologiska modelleringen. Detta är inte en osäkerhet i samma mening som faktorerna ovan, utan ett val som görs vid utformningen. För SR-Site antas att deponeringshålen utesluts i enlighet med EFPC samt med det transmissivitetsrelaterade kriterium som beskrivs i avsnitt 5.2.2.

Utgående från antagandena ovan beräknas att det i genomsnitt kommer att råda advektiva förhållanden i 0,6 deponeringshål av förvarets totalt 6 000 hål efter 100 000 år. Vid slutet av den en miljon år långa analysperioden kommer motsvarande siffra att vara nästan 20, se ”semikorrelerat basfall” i figur 12-3. Dessa resultat erhöles genom att medelvärdet bestämdes över tio realiseringar av den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. (Det tidigare refererade värdet 23 erhöles vid



Figur 12-3. Beräknad omfattning av erosionen efter 100 000 år och efter en miljon år för ett antal olika fall. Kryssen anger medelvärden och staplarna variationen över de olika realiseringarna av de hydrogeologiska DFN-modellerna.

realisering av basfallet med samma DFN-modell.) Varje realisering omfattar de 6 000 deponeringspositionerna och täcker således in rumslig variation inom den aktuella realiseringen. Variationen mellan realiseringarna visas av intervallen i figur 12-3.

Följande känslighetsberäkningar utfördes, i huvudsak genom att variera en av de ovan nämnda faktorerna i taget. Resultaten visas i figur 12-3.

- Antagandet om *mängden buffert* som måste erodera bort för att advektiva förhållanden ska uppkomma i deponeringshålet ändrades från 1 200 kg med en faktor två uppåt och nedåt, dvs till i) 600 kg respektive ii) 2 400 kg. Detta ledde till att det beräknade antalet deponeringshål förändrades med mer än en faktor två.
- Osäkerheter som rör beskaffenheten hos det *kriterium* som avgör om erosion inträffar och också den *tidsfraktion* under vilken kriteriet är uppfyllt beaktas genom antagandet att erosion sker under hela analysperioden på en miljon år. Som visas i figur 12-3 leder detta till att antalet deponeringshål i vilka advektiva förhållanden råder ökar med en faktor som är större än tio i miljonårsperspektivet. Efter en miljon år råder således advektiva förhållanden i omkring 220 deponeringshål. Motsvarande antal efter 100 000 år är omkring fyra deponeringshål av totalt 6 000 stycken. Det finns osäkerheter i båda de faktorer som täcks in av denna variation och varken mer eller mindre omfattande erosion än i basfallet kan uteslutas. Känslighetsanalyser för fallet som beräknas här sätter en övre gräns för den möjliga variationen.
- I den hydrogeologiska modellen erhålls sprickaperturer (δ) från sprickans transmissivitet (T) i enlighet med $\delta = 0,5 T^{0,5}$, se vidare i avsnitt 10.3.6. För en mer pessimistisk buffererosion utvärderades också ett alternativt förhållande: $\delta = 0,28 \cdot T^{0,3}$ /Joyce et al. 2010, Selroos och Follin 2010/. Detta ökar antalet beräknade deponeringshål med advektiva förhållanden efter en miljon år med nästan en faktor 30. Det andra av de två förhållandena avfärdas emellertid i **Datarapporten** som överdrivet pessimistiskt, eftersom sambandet ger sprickaperturer större än de som uppmätts på platsen med hjälp av elektriska resistivitetmätningar. Därför är det motiverat att använda det första förhållandet för att kvantifiera buffererosionen i SR-Site.
- En viktig aspekt av de konceptuella osäkerheter som rör *grundvattnets hastighet* i de sprickor som skär deponeringshålen visas av beräkningarna med de hydrogeologiska DFN-modeller som baseras på okorrelerade och helt korrelerade förhållanden mellan sprickstorlek och transmissivitet, se avsnitt 10.3.6 för detaljer. Som visas i figur 12-3 ger båda dessa modeller större buffererosion. Både den okorrelerade och den helt korrelerade modellen representerar

extremfall av korrelationsstrukturen. I synnerhet den okorrelerade modellen saknar stöd i form av observationer. Den semikorrelerade modellen som används som basfall anses vara den mest realistiska, men att strikt kvantifiera graden av korrelation är inte möjligt. Intervallet som täcks in av de tre modellerna betraktas därför som en rimlig illustration av de konceptuella osäkerheter som är associerade med de hydrogeologiska DFN-modellerna.

Beträffande varierande grundvattenflödesförhållanden under en glaciationscykel visas i avsnitt 10.4.6 att det tidsmässigt genomsnittliga värdet under referensglaciationscykeln på $q^{0.41}$, vilket är relevant för bufferterrosion, är omkring 80 procent av motsvarande värde för tempererade förhållanden, se ML2-data i figur 10-147. Valet av värdena för tempererade förhållanden är alltså pessimistiskt och ger viss marginal för alternativa utvecklingar i förhållande till referensglaciationscykeln. Frågan om tidsmässig variation behandlas därför inte ytterligare här.

Med antaganden för basfallet (semikorrelerat basfall) beräknas sammanfattningsvis att advektiva förhållanden kommer att råda i omkring en av 6 000 deponeringspositioner efter 10^5 år och i mindre än en procent av positionerna efter 10^6 år.

Känslighetsfallen som analyseras här visar att omfattningen av erosionen kan variera avsevärt jämfört med resultatet för basfallet. Även vid de mest ogynnsamma fallen når dock endast mindre än tio procent av deponeringspositionerna advektiva förhållanden efter en miljon år. Känslighetsfallen ger också långt mindre variation av erosionens omfattning än de två gränssättande fallen som beskrevs i början av detta avsnitt, dvs ingen erosion och advektiva förhållanden initialt i samtliga deponeringshål.

Den konceptuella modellen för att kvantifiera omfattningen av erosionen är behäftad med osäkerheter som är svåra att kvantifiera:

- det finns potentiellt mildrande effekter som igensättning av den vattenförande sprickan med slam från den eroderade bentoniten /Neretnieks et al. 2009/,
- det finns också potentiellt förvärrande effekter, t ex gravitationseffekter, men dessa hävdas vara små eller försumbara /Neretnieks et al. 2009/,
- det finns ytterligare faktorer som kan leda till en minskning av lerans dispersionshastighet, se vidare i den sammanfattande diskussionen av osäkerheter i avsnitt 10.3.11.

Känslighetsfallens påverkan på korrosionens omfattning utvärderas i korrosionsscenarioet, se avsnitt 12.6.2. En fullständig dokumentation över samtliga beräkningar av bufferterrosion/kolloidfrigörelse och kapselkorrosion återfinns i /SKB 2010d/.

Variant med global uppvärmning och övriga klimatfall

Uppkomsten av advektion i bufferten är starkt relaterad till förekomsten av grundvatten med låg jonstyrka på förvarsdjup. Som visas i avsnitt 10.3.6 av referensutvecklingen kan en förlängd inledande period med tempererade klimatförhållanden ge upphov till längre perioder med exponering för utspätt grundvatten. Detta tyder på att en variant med global uppvärmning skulle kunna leda till större kolloidfrigörelse jämfört med basfallet. I varianten med global uppvärmning är det emellertid endast den inledande tempererade perioden som är förlängd. Den relativt begränsade effekten av en variant med global uppvärmning täcks dessutom in av antagandet att det kommer att förekomma utspätt grundvatten i två procent av deponeringshålen under 25 procent av en glaciationscykel, eftersom andelen deponeringshål endast skulle vara 0,02 under 60 000 år av tempererade förhållanden, se avsnitt 10.3.6. Denna lilla skillnad jämfört med basfallet gäller bara under den första glaciationscykeln. Effekterna av global uppvärmning antas inte påverka påföljande glaciationscykler i scenariot med global uppvärmning. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare i SR-Site för varianten med global uppvärmning.

Vad beträffar andra klimatfall skulle fallet med *långvarig global uppvärmning* och fallet med *långvarig inlandsutbredning*, se avsnitt 12.1.3, kunna innebära en mer omfattande nedträngning av utspätt vatten än vid referensutvecklingen. Sådana utvecklingar täcks in av det gränssättande fallet, där advektion initialt antas föreligga i samtliga deponeringshål.

12.2.3 Slutsatser

Som framgår av redovisningen ovan finns ett antal osäkerheter rörande utvecklingen av buffertens densitet. Samtliga tänkbara initialtillstånd och efterföljande utvecklingar täcks emellertid in, vad avser advektion som detta scenario behandlar, av de tre fall som beskrivs i början av analysen av scenariot, se avsnitt 12.2.1. Denna analys gäller för fallet med hög konduktivitet, se avsnitt 12.2.1.

För sprickfallet, se avsnitt 12.2.1, har inget förlopp som leder till denna situation kunnat identifieras och det betraktas därför som ett restscenario. Kapselkorrosion för en uppsprucken buffert kan illustreras med de uttryck som ges i /Neretnieks et al. 2010/. Kapselns livstid är betydligt längre för en uppsprucken buffert jämfört med en eroderad buffert, om övriga omständigheter är identiska, se exempel i /Neretnieks 2006b/. Inga ytterligare sådana beräkningar har utförts i SR-Site.

Beträffande ordningsföljden för olika händelser kan utvecklingen naturligtvis påverkas av i vilken ordning svällning, materialförlust, nedträngning av olika typer av grundvatten, etc sker. Återigen begränsas dessa situationer av de tre fall som beaktas.

Om transporten i bufferten inte kontrolleras av diffusion skulle kapselkorrosion till slut styras av advektion av korroderande ämnen i grundvattnet. Detta visas för referensutvecklingen. Omfattningen av korrosionen behandlas ytterligare i korrosionsscenarioet, se avsnitt 12.6, till vilket de tre fallen med advektion i bufferten förs vidare. Detta innebär att advektionen beräknas med antagandena för basfallet och för de två gränssättande fallen med initial advektion i samtliga deponeringshål samt ingen advektion under analysperioden. Enligt slutsatsen ovan förs även samtliga tre hydrogeologiska modellvarianter vidare till ytterligare analyser. Detta resulterar i de nio fall som bör beaktas och som visas i figur 12-4.

Förekomsten av advektion i bufferten kan inte uteslutas och scenariot med advektion i bufferten betraktas därför som ett mindre sannolikt scenario och behandlas ytterligare i kombination med kapsel-scenarierna. Sannolikheten för att scenariot kommer att inträffa kan inte kvantifieras på ett exakt sätt. Det representeras av de nio fallen i figur 12-4. I tre av dessa förekommer ingen advektion.

Hydrogeologisk DFN-modell		Medelantal advektiva positioner	
		(efter 10 ⁵ år)	(efter 10 ⁶ år)
Okorrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000
	Erosionsmodell för SR-Site	(1,2)	280
	Ingen advektion	(0)	0
Semikorrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000
	Erosionsmodell för SR-Site	(0,6)	19
	Ingen advektion	(0)	0
Helt korrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000
	Erosionsmodell för SR-Site	(1,2)	68
	Ingen advektion	(0)	0

Figur 12-4. Erosionfall som förs vidare till ytterligare analyser av kapselkorrosion.

12.2.4 Specialfall av advektiva förhållanden: Sjunkande kapsel

Beaktad(e) funktionsindikator(er)

En central säkerhetsfunktion hos bufferten är att förhindra advektiv transport av ämnen mellan grundvatten och kapseln. För att säkerställa detta krävs att bufferten har en viss tjocklek. Om kapseln sjunker eller lutar i ett deponeringshål kan denna minsta tjocklek inte garanteras. Det krävs ett svälltryck på 200 kPa för att hålla kapseln på plats i deponeringshålet (Buff5). Förutsättningen för att använda denna funktionsindikator är att bufferten består av bentonit.

Hantering av denna fråga i referensutvecklingen

Eftersom den förlust av buffertmaterial som krävs för att de advektiva förhållanden som beskrivs i avsnitten 10.3.9 och 10.3.11 ska uppstå är mindre än den förlust som krävs för att en kapsel ska sjunka, kan advektiva förhållanden till följd av en sjunkande kapsel i sig aldrig förekomma i referensutvecklingen. Advektiva förhållanden kommer redan att råda då kapseln sjunker.

Kvalitativ beskrivning av förloppen som leder till att en kapsel sjunker

Svälltrycket kan sjunka genom:

1. förlust av buffertmaterial,
2. omvandling av montmorillonit till ett icke svällande mineral.

Om tillräckligt mycket buffertmaterial förloras för att det genomsnittliga svälltrycket runt kapseln ska sjunka till 200 kPa skulle advektion förmodligen redan vara den dominerande transportmekanismen. Punkt 1 ovan täcks således in av referensutvecklingen och det allmänna scenariot med advektion i bufferten ovan. Omvandling av montmorillonit i bufferten diskuteras i omvandlingsscenarioet, se avsnitt 12.4.

Kvantitativ utvärdering av förloppen som leder till att en kapsel sjunker

Förloppen som leder till att svälltrycket sjunker diskuteras i scenarierna som nämndes ovan.

Kategorisering som "mindre sannolikt scenario" eller "restscenario"

Följderna av stora förluster av buffertmaterial diskuteras i referensutvecklingen och vidare i det allmänna scenariot med advektion i bufferten ovan. Eftersom avsevärt större massförluster krävs för att en kapsel ska sjunka än för att advektiva förhållanden ska uppstå och eftersom advektiva förhållanden även i fallet med en sjunkande kapsel är den säkerhetsrelaterade frågan, skulle en sjunkande kapsel inte leda till följder utöver de som redan kvantifierats i avsnitt 12.2.3.

Slutsats

Det enda som skulle leda till att en kapsel sjunker till botten av deponeringshålet är stora förluster av buffertmaterial. Om detta skulle hända försvinner buffertens diffusionsbarriär långt innan kapseln börjar sjunka. En förlust av diffusionsbarriären som orsakas av en sjunkande kapsel behöver därför inte behandlas som ett eget scenario.

12.3 Buffertfrysning

12.3.1 Inledning

Icke uppfyllt funktionsindikatorkriterium

Detta scenario rör kriteriet för lägsta tillåtna bufferttemperatur, dvs buffertens temperatur får inte sjunka under $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att garantera att den inte fryser.

Om kriteriet för lägsta bufferttemperatur inte upprätthålls skulle det kunna påverka både inneslutning och fördröjning. Det har tidigare visats att bentoniten kommer att behålla sina egenskaper efter en fryscykel. Inneslutningen kan emellertid ändå äventyras eftersom en buffert som fryser skulle kunna påverka kapseln mekaniskt. Vidare kan fördröjningspotentialen försämrats vid kraftig islinnbildning.

Hantering av buffertfrysning i referensutvecklingen

Buffertfrysning bedömdes som uteslutet för referensutvecklingen. Detta grundar sig på en rimlig glaciationscykel under vilken permafrost (dvs 0 °C-isotermen) utvecklas ned till ett maximalt djup av 259 m i Forsmark, se avsnitt 10.4.3. När alla osäkerheter beaktas, både vid markytan och under ytan (dvs osäkerheter avseende lufttemperatur, luftfuktighet, markfuktighet, vegetation, snötäcke, berggrundens värmeledningsförmåga och diffusivitet samt geotermiskt värmefflöde) och alla osäkerheter antas ha de värden som mest gynnar permafrosttillväxt, når osäkerhetsintervallet för permafrost ett maximalt djup av 463 m i referensutvecklingen. På motsvarande sätt når, i samma fall, osäkerhetsintervallet för ständigt frusen mark ett maximalt djup av 422 m. För att buffertmaterialet ska frysa krävs enligt funktionsindikatorkriteriet temperaturer på -4 °C eller lägre, se avsnitt 8.3.2. I referensutvecklingen når -4 °C-isotermen ett maximalt djup av 148 m. Med den mest pessimistiska kombinationen av alla osäkerheter når osäkerhetsintervallet för -4 °C-isotermen ett maximalt djup av 316 m, se avsnitt 10.4.3. Detta visar att temperaturer som skulle kunna orsaka frysning av bufferten inte når förvarsdjup i referensutvecklingen ens i det mest pessimistiska fallet.

Kvalitativ beskrivning av förloppen som leder till buffertfrysning

Förloppet som beaktas i detta scenario är utveckling av permafrost under periglaciala klimatförhållanden.

Följande faktorer som är av betydelse för buffertfrysning har – med utgångspunkt från diskussionen ovan – identifierats utifrån tabell 10-27, som beskriver de osäkerheter som identifierats för referensutvecklingen, och utifrån FEP-diagrammet i figur 8-4.

Faktorer vid initialtillståndet

- Berggrundens värmeledningsförmåga.
- Värmekapacitet i berggrunden.
- Geotermiskt värmefflöde.
- Hydraulisk konduktivitet i berggrunden.
- Grundvattnets salthalt.
- Berggrundens porositet.
- Värmeeffekten från det använda bränslet, inklusive effektminskningen över tid.

Processer

- Värmeledning i berggrunden.
- Värmeledning i bufferten.
- Frysning i bufferten.

Externa förhållanden

- Periglaciala klimatförhållanden som leder till sänkt temperatur vid markytan.
- Jordtäckning vid markytan.
- Vegetationstäckning vid markytan.
- Snötäckning vid markytan.
- Glaciala förhållanden som leder till temperaturförändringar vid markytan.
- Vattentäckta förhållanden som leder till temperaturförändringar vid markytan.

För ytterligare information om de processer som medverkar till utvecklingen av permafrost och ständigt frusen mark, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten** och /Hartikainen et al. 2010/.

12.3.2 Kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till buffertfrysning

Tre typer av känslighetsanalyser har utförts för att undersöka om och under vilka förhållanden permafrost, ständigt frusen mark och temperaturer under noll grader kan nå förvarsdjup:

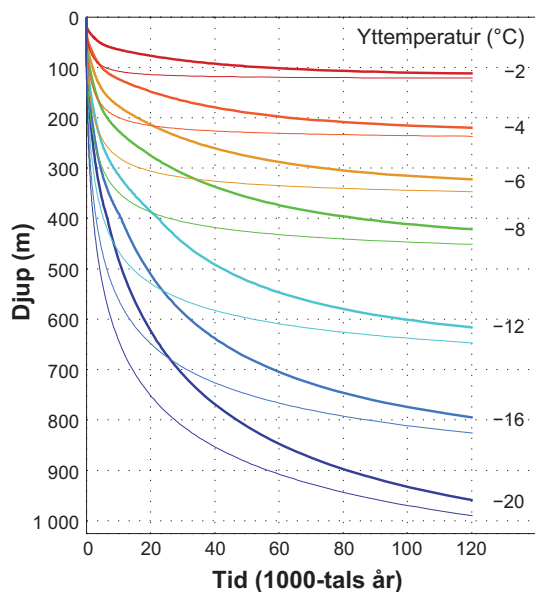
- Sänkning av konstanta temperaturer vid markytan.
- Sänkning av den lufttemperaturkurva som rekonstruerats för den senaste glaciationscykeln.
- Antaganden om extremt torra förhållanden under perioder med kallt klimat, dvs att det inte förekommer någon inlandsis, hav, vegetation eller snö under vintern på den aktuella platsen under en hel glaciationscykel.

Känslighetsanalys avseende sänkning av konstanta marktemperaturer

Först genomfördes känslighetsanalyser av hur permafrost utvecklas vid olika konstanta temperaturer. Platsspecifika data för berggrundens fysikaliska, termiska och hydrologiska egenskaper användes, se **Klimatrapporten**. Beräkningarna gjordes för två fall, med och utan värmebidrag från förvaret, med hjälp av en 1D-permafrostmodell, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten**. Resultaten visar att då hänsyn tas till värmen från det använda bränslet (dvs förhållanden som gäller för den första framtida glaciationscykeln) måste marktemperaturen vara *lägre* än -8 °C för att permafrosten (0 °C -isotermen) ska nå förvarsdjupet (450 m), se figur 12-5. Om värmen från det använda bränslet inte beaktas (vilket gäller för efterföljande glaciationscykler) når 0 °C -isotermen förvarsdjupet efter ungefär 120 000 år om marktemperaturen är -8 °C , se figur 12-5. Den årliga genomsnittliga lufttemperaturen i Forsmark är för närvarande cirka $+5\text{ °C}$, se avsnitt 2.4.2 i **Klimatrapporten**. Lufttemperaturen är ofta ett par grader lägre än marktemperaturen /Hartikainen et al. 2010/. Resultaten tyder därför på att det krävs en sänkning av lufttemperaturen med mer än 13 °C för att permafrost ska utvecklas till förvarsdjup när konstanta temperaturer antas.

Känslighetsanalys avseende sänkning av luft- och marktemperaturkurvor som rekonstruerats för den senaste glaciationscykeln

Permafrostsimuleringar har utförts för att undersöka hur mycket luft- och marktemperaturen måste sänkas i ett mer realistiskt *varierande* klimat för att permafrost, ständigt frusen mark och temperaturer under noll ska nå förvarsdjup. Särskilt undersöktes hur mycket den lokala temperaturkurvan som användes för att utvärdera permafrost i referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.3, behövde sänkas för

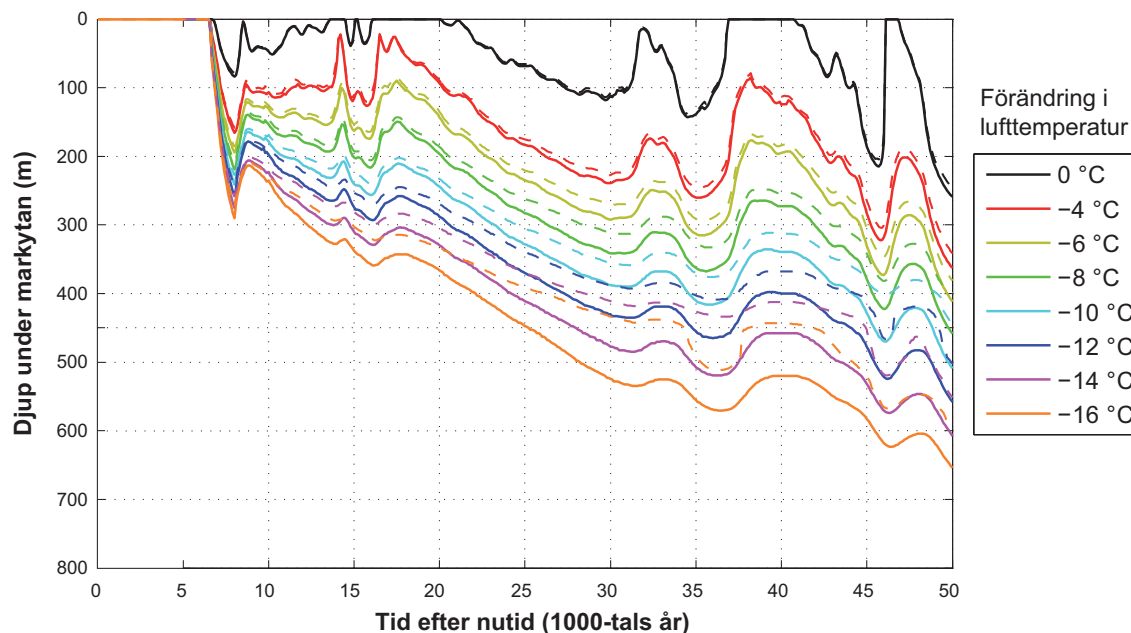


Figur 12-5. Beräknad utveckling av permafrostdjup (definierat av 0 °C -isotermen) vid förvaret i Forsmark för olika konstanta temperaturer vid markytan. Linjer i fetstil: med värmebidrag från förvaret. Tunna linjer: utan värmebidrag från förvaret.

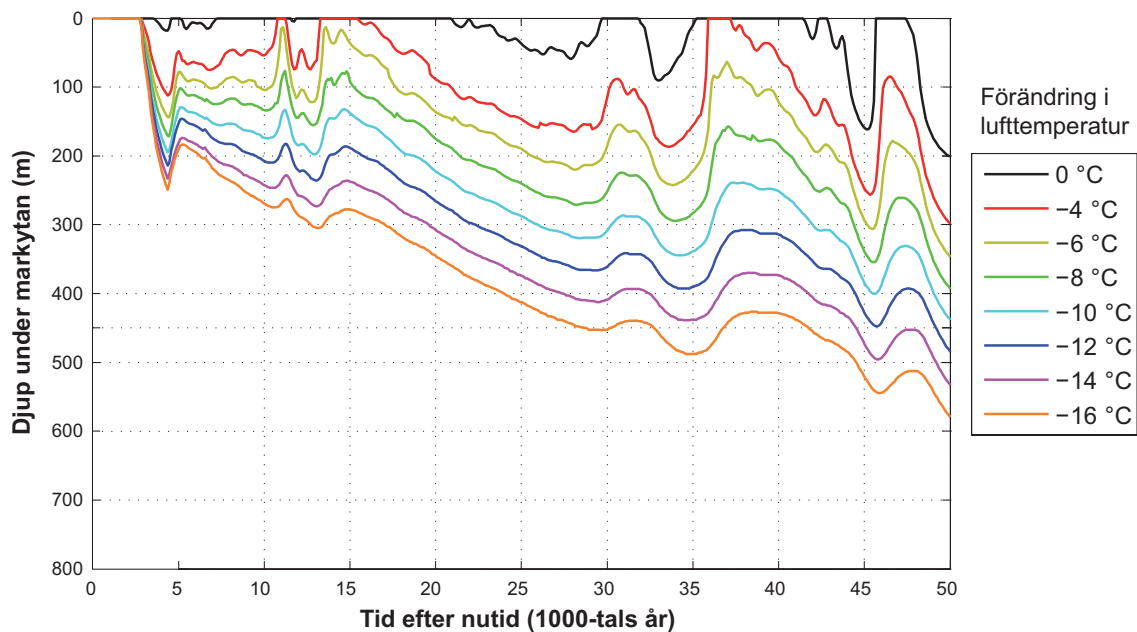
att 0 °C-, -2 °C- och -4 °C-isotermerna skulle nå förvarsdjup (450 m). Temperaturen 0 °C motsvarar fryspunkten för sötvatten vid normalt tryck och är också definitionen för permafrost. Temperaturerna -2 °C och -4 °C är frystemperaturerna för återfyllningsmaterialet i deponeringstunnlarna respektive buffertleran, se avsnitten 8.3.2 och 8.4.4. Utifrån de resultat som erhöles i SR-Can /SKB 2006c/ studerades temperatursänkningar på 4, 6, 8, 10, 12, 14 och 16 °C. Dessa känslighetsexperiment gjordes med hjälp av en 2D-permafrostmodell, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten** och /Hartikainen et al. 2010/.

I de 2D-permafrostsimuleringar som utfördes för SR-Site var det motiverat att analysera två varianter på grund av de signifikanta osäkerheter som är förknippade med beskrivningar av ytförhållandena – en variant med fuktiga ytförhållanden och en med torra förhållanden, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten** och /Hartikainen et al. 2010/. Som ett pessimistiskt fall för denna känslighetsanalys användes den torra varianten av rekonstruktionen av förhållandena för den senaste glaciationscykeln, eftersom denna leder till djupare permafrost än den fuktiga varianten. Genomsnittliga termiska egenskaper användes för förhållandena under ytan. Notera att dessa simuleringar endast omfattar glaciationscykelns inledande 50 000 år. Under denna period är dock glaciationscykelns permafrost som djupast, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten**.

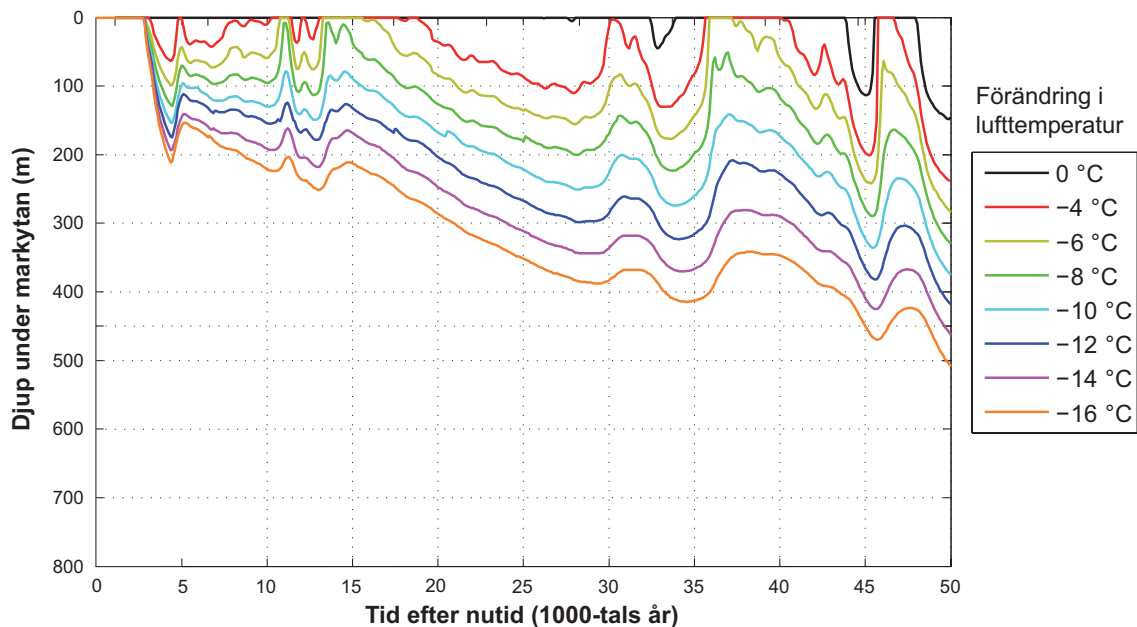
Den resulterande tidsmässiga utvecklingen för maximala 0 °C-, -2 °C- och -4 °C-isotermdjup ovanför förvaret visas i figur 12-6 till figur 12-8. Figur 12-6 visar också djupet för den ständigt frusna marken, som på grund av de rådande tryck- och salthaltförhållandena inte når lika djupt som permafrostdjupet (0 °C-isotermen). Resultaten visar att den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln måste sänkas med 8 °C för att permafrost ska nå förvarsdjup, se figur 12-6. Resultaten visar också att det krävs en sänkning av temperaturkurvan med mer än 10 °C respektive med omkring 14 °C för att -2 °C- och -4 °C-isotermerna ska nå förvarsdjup, se figurerna 12-7 och 12-8. Dessa sänkningar är stora, i synnerhet för -2 °C- och -4 °C-isotermerna. De är till exempel mycket större än den beräknade maximala osäkerheten i lufttemperaturkurvan (± 6 °C) som används som indata vid simuleringarna, se avsnitt 10.4.3 i denna rapport samt bilaga 1 och avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten**.



Figur 12-6. Utveckling av 0 °C-isotermdjupet, dvs permafrostdjupet, (heldragna linjer) och djupet för den ständigt frusna marken (streckade linjer) vid platsen för förvaret under referensglaciationscykeln (torr klimatvariant, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten**). Figuren visar också motsvarande resultat för simuleringarna där den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln sänktes med 4, 6, 8, 10, 12, 14 och 16 °C. Resultaten har extraherats från den 2D-permafrostmodellering som utfördes för Forsmark, se avsnitten 3.4.4 och 5.5 i **Klimatrapporten** samt /Hartikainen et al. 2010/.



Figur 12-7. Utveckling av det maximala -2 °C -isotermdjupet vid platsen för förvaret för referensglaciationscykeln (torr klimatvariant). Figuren visar också motsvarande resultat för simuleringarna där den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln sänktes med 4, 6, 8, 10, 12, 14 och 16 °C. Resultaten har extraherats från den 2D-permafrostmodellering som utfördes för Forsmark, se avsnitten 3.4.4 och 5.5 i **Klimatrapporten** samt /Hartikainen et al. 2010/.



Figur 12-8. Utveckling av det maximala -4 °C -isotermdjupet vid platsen för förvaret för referensglaciationscykeln (torr klimatvariant). Figuren visar också motsvarande resultat för simuleringarna där den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln sänktes med 4, 6, 8, 10, 12, 14 och 16 °C. Resultaten har extraherats från den 2D-permafrostmodellering som utfördes för Forsmark, se avsnitten 3.4.4 och 5.5 i **Klimatrapporten** samt /Hartikainen et al. 2010/.

Känslighetsanalys avseende antaganden om att det inte förekommer någon inlandsis, hav, vegetation eller snö på vintern under en hel glaciationscykel (fall med kraftig permafrost)

Den största osäkerheten vid alla de permafrostsimuleringar som utfördes för SR-Site är osäkerheten i den lufttemperaturkurva som användes som indata, se avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten**. Denna osäkerhet behandlades i avsnitt 10.4.3 tillsammans med alla andra kända osäkerheter för klimatet samt för förhållanden vid och under ytan som är relevanta för referensglaciationscykeln. I den känslighetsanalys som beskrivs här behandlas de återstående osäkerheterna, om exempelvis utbredning av inlandsis och hav, utifrån resultaten för fallet med kraftig permafrost, se avsnitt 5.5 i **Klimatrapporten**.

Huvudantagandet i fallet med kraftig permafrost är att ett mycket torrt periglacialt klimat dominerar, ett klimat som resulterar i att inlandsisen inte når Forsmark någon gång under hela glaciationscykeln. För att främja tillväxten av permafrost ytterligare uteslöts effekterna av ett skyddande snö- och vegetationstäck, också i linje med antagandet om ett mycket torrt klimat. Dessutom antogs det att platsen för förvaret hela tiden ligger ovanför havsnivån, i överensstämmelse med antagandet om att det inte förekommer någon inlandsis. Värme som genereras från förvaret är däremot inkluderad i simuleringarna, eftersom detta är relevant för den första framtida glaciationscykeln. 2D-permafrostmodellen användes vid simuleringarna. Mer information om permafrostmodellerna och hur simuleringarna utfördes finns i avsnitten 10.4.1 och 10.4.3 i denna rapport, i avsnitt 4.5.5 i **Klimatrapporten** och i /Hartikainen et al. 2010/.

I fallet med kraftig permafrost tas vidare hänsyn till alla kända osäkerheter som är förenliga med huvudantagandet om att det inte förekommer någon inlandsis i Forsmark. Det bör noteras att huvudantagandet för fallet med kraftig permafrost, dvs att det inte förekommer någon inlandsis vid den aktuella platsen, inte är förenligt med den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln, inklusive dess osäkerhetsintervall mot lägre temperaturer som behandlades i referensutvecklingen, se avsnitten 10.4.1 och 10.4.3. Anledningen är att dessa temperaturer leder till inlandsis över Forsmark, se avsnitt 3.1.4 i **Klimatrapporten**. För att göra ett pessimistiskt val av temperaturkurva för fallet med kraftig permafrost antogs ändå en lufttemperaturutveckling motsvarande den som rekonstruerats för referensglaciationscykeln, se figur 12-9. Ytterligare beskrivning och motiv till antagandena i simuleringen av fallet med kraftig permafrost återfinns i avsnitt 5.5 i **Klimatrapporten**.

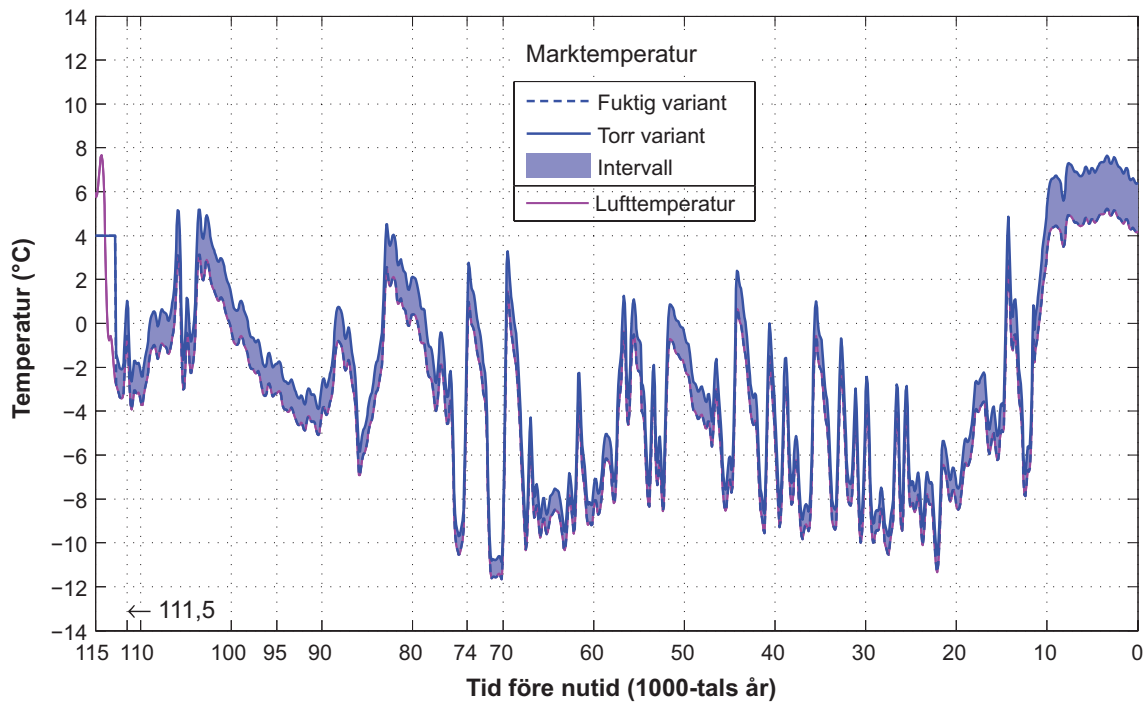
Den lufttemperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln användes först för att beräkna marktemperaturer för fallet med kraftig permafrost, se figur 12-9. För detta användes ett empiriskt förhållande mellan luft- och marktemperaturer, se /Hartikainen et al. 2010/.

Hur djupt permafrosten, den ständigt frusna marken samt -2 och -4 °C-isotermen utvecklas över förvaret i fallet med kraftig permafrost visas i figur 12-10. Som en variant av fallet med kraftig permafrost gjordes en simulering för att studera effekterna av osäkerheter beträffande berggrundens termiska egenskaper tillsammans med osäkerheter beträffande ytförhållandena (förutom lufttemperatur, se ovan). För att få ett så stort osäkerhetsintervall som möjligt kombinerades den torra klimatvarianten med de termiska egenskaper i berggrunden som förstärker permafrosttillväxt. Vidare kombinerades den fuktiga klimatvarianten med termiska egenskaper som minimerar permafrosttillväxt, se figur 12-11.

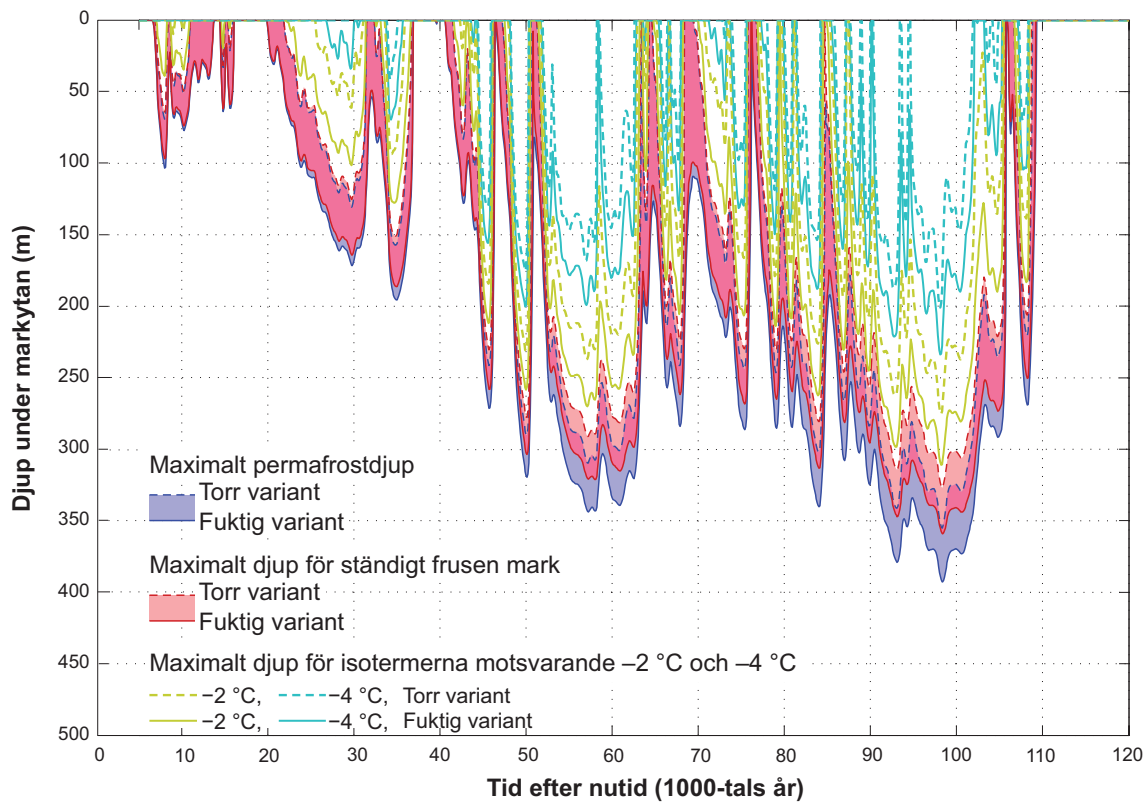
Resultaten visar att det maximala permafrostdjupet över förvaret i fallet med kraftig permafrost är 393 m, figur 12-10, där osäkerhetsintervallet når ned till 456 m, se figur 12-11. Detta inträffar efter mer än 90 000 år in i framtiden. Det maximala djupet för den ständigt frusna marken inträffar samtidigt och är 359 m, med ett osäkerhetsintervall ned till 408 m. -2 °C- och -4 °C-isotermerna når djup av 311 respektive 234 m, med osäkerhetsintervall som når ned till 359 och 268 m. Tabell 12-1 sammanfattar samtliga resultat från fallet med kraftig permafrost, tillsammans med resultaten från referensutvecklingen.

Siffrorna i tabell 12-1 gäller för den första framtida glaciationscykeln under den en miljon år långa period som analyseras i säkerhetsanalysen. För den andra och de därpå följande glaciationscyklerna är värmen från förvaret försumbar, vilket leder till cirka 37 m djupare permafrost och ständigt frusen mark, se avsnitt 4.5.3 i **Klimatrapporten**.

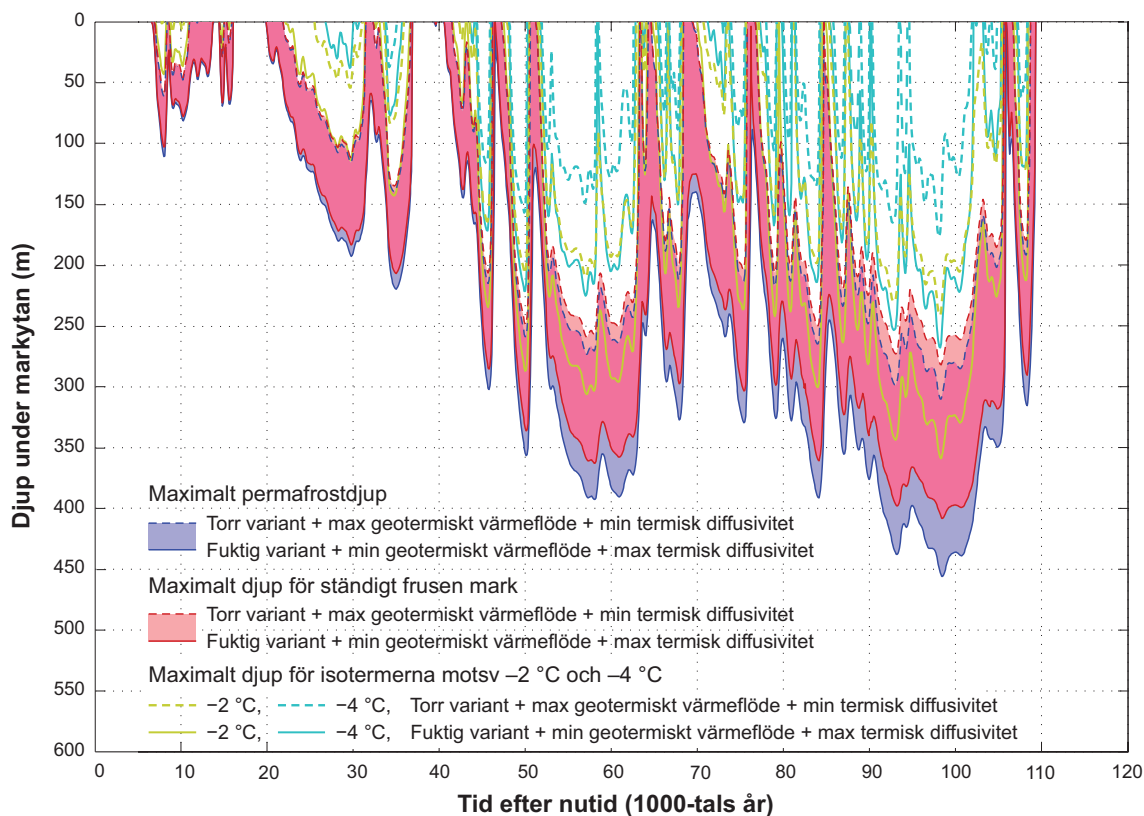
Ytterligare resultat från de 2D-permafrostsimuleringar som utförts för fallet med kraftig permafrost – till exempel vad gäller saltkoncentrationer, grundvattenflöde och vertikala temperaturprofiler för olika typer av marktäckan – återfinns i avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten** och i /Hartikainen et al. 2010/.



Figur 12-9. Exempel på den utveckling av lufttemperatur och de modellerade marktemperaturer som användes för fallet med kraftig permafrost. I detta diagram har temperaturen inte projicerats in i framtiden. För en beskrivning av modelleringen av marktemperatur, se /Hartikainen et al. 2010/.



Figur 12-10. Utveckling av maximalt permafrostdjup, maximalt djup för den ständigt frusna marken och det maximala djupet för -2 °C - och -4 °C -isotermerna över förvaret för fallet med kraftig permafrost. För perioder med upptining ovanifrån visas inte permafrostens överyta. Området skuggat i blått och rött representerar det intervall som uppstår då man beaktar de torra och fuktiga klimatvarianterna för fallet med kraftig permafrost. Lila färg anger att resultaten för permafrost och ständigt frusen mark överlappar.



Figur 12-11. Utveckling av maximalt permafrostdjup, maximalt djup för ständigt frusen mark och det maximala djupet för $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ - och $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermerna över förvaret för fallet med kraftig permafrost då man kombinerar osäkerheter i ytförhållanden och termiska egenskaper som spelar roll för permafrosttillväxt. Området skuggat i blått och rött representerar det intervall som uppstår då man beaktar de torra och fuktiga klimatvarianterna. Lila färg anger att resultaten för permafrost och ständigt frusen mark överlappar.

Tabell 12-1. Maximalt djup för permafrost ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen), ständigt frusen mark, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen och $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen för referensutvecklingen och för fallet med kraftig permafrost. Osäkerhetsintervallet för referensglaciationscykeln baseras på den osannolika kombinationen att alla osäkerheter är satta till det värde som är mest gynnsamt för permafrosttillväxt. Även i osäkerhetsintervallet för fallet med kraftig permafrost ingår alla relevanta osäkerheter för detta fall, som samtliga antas ha sitt mest pessimistiska värde. Lufttemperatur ingår inte som en explicit osäkerhet i denna beräkning, eftersom lägre lufttemperaturer än den lufttemperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln inte är förenlig med huvudentagandet att det inte förekommer någon inlandsis över den aktuella platsen. Dock är lufttemperaturens osäkerhet hanterad genom valet av temperaturkurva för detta fall, se texten.

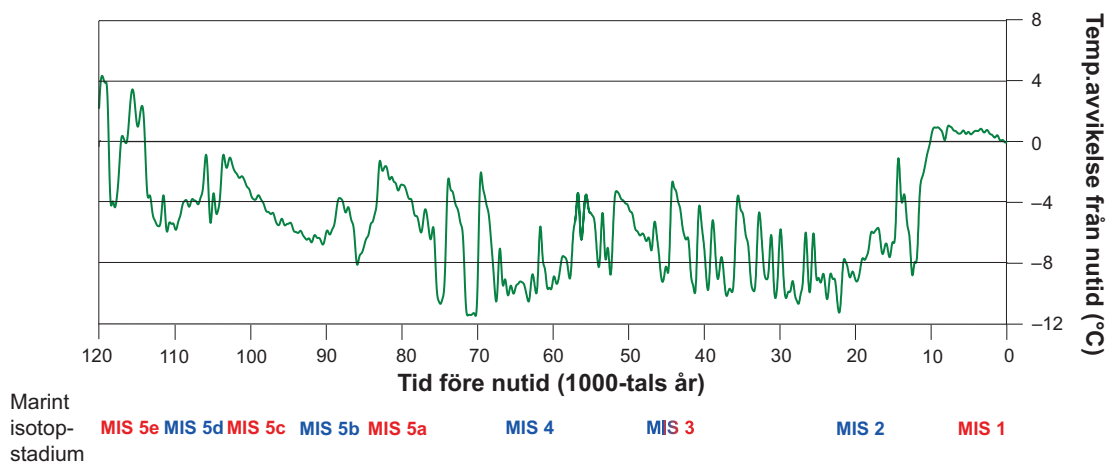
	Maximalt permafrost-djup ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen) [osäkerhetsintervall]	Maximalt djup för ständigt frusen mark [osäkerhetsintervall]	Maximalt djup för $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ isotermen (återfyllningens frystemperatur) [osäkerhetsintervall]	Maximalt djup för $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ isotermen (buffertens frystemperatur) [osäkerhetsintervall]
Referens-utveckling	259 m [ned till 463 m]	246 m [ned till 422 m]	200 m [ned till 388 m]	148 m [ned till 316 m]
Fall med kraftig permafrost	393 [ned till 456]	359 [ned till 408]	311 [ned till 359]	234 [ned till 268]

Slutsatsen för fallet med kraftig permafrost är att de osäkerheter som återstår från analysen av referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.3, dvs i huvudsak osäkerheten rörande utbredning av inlandsis och hav, gav större djup för permafrost, ständigt frusen mark, -2 - och -4 °C-isotermen, men med ett mindre osäkerhetsintervall, se tabell 12-1. För de flesta parametrar når osäkerhetsintervallen maximala djup som är några tiotals meter grundare i fallet med kraftig permafrost än i referensutvecklingen, se tabell 12-1. Det största djupet för den ständigt frusna marken uppnås inte i fallet med kraftig permafrost, utan i stället för den orealistiska kombinationen där samtliga osäkerheter som är relevanta för referensutvecklingen antas ha det värde som är mest gynnsamt för tillväxt av permafrost, se tabell 12-1 och avsnitt 10.4.3. I analysen av största möjliga frysdjup gränsätts förhållandena av att både referensglaciationscykeln och fallet med kraftig permafrost beaktas, inklusive deras respektive osäkerhetsintervall.

Kan klimatet bli så kallt att bufferten fryser?

Rekonstruerade sen-glaciala klimatförhållanden för södra Sverige tyder på att det rådde kontinentalt arktiska förhållanden för ungefär 15 000 år sedan. Vid denna tidpunkt var de genomsnittliga julitemperaturerna omkring 10 – 12 °C /Lem Dahl 1988, Coope et al. 1998, Hohl 2005/, dvs omkring 5 – 7 °C kallare än i dag. Skillnaden mellan de nuvarande varma interglaciala temperaturerna och de kallaste temperaturerna under den senaste glaciationscykeln som registrerats i GRIP-iskärnan är i storleksordningen 12 °C, se figur 12-12. Med hjälp av ett alternativt sätt att tolka ^{18}O -värden från iskärnan till lufttemperatur föreslog /Lang et al. 1999/ att denna kalla klimathändelse avspeglar en temperaturförändring på 16 °C, vilket är flera grader mer än i /Dansgaard et al. 1993/. Enligt samtliga tolkningar är detta en mycket kortvarig klimathändelse, se /Lang et al. 1999/. Detta exemplifierar en typisk egenskap hos temperaturklimatarkiv, nämligen att de visar att klimatet varierar mycket på både lång och kort sikt, se avsnitt 4.3.4 i **Klimatrapporten** och /IPCC 2007/. Denna variabilitet kan till exempel ses i temperaturdata tolkat från GRIP-iskärnan, se figur 12-12. När mycket kalla klimatförhållanden råder varar dessa perioder inte under lång tid. Den här typen av klimatvariationer observeras också vid frekvensanalyser av paleoklimatdata, se exempelvis /Moberg et al. 2005, Witt och Schumann 2005/.

Hur låga kan temperaturerna ha varit i Forsmark under den senaste glaciationscykeln? Nyligen utförda globala och regionala klimatmodelleringar tyder på att de årliga medellufttemperaturerna i de proglaciala områdena syd, sydost och sydväst om inlandsisens front under det senaste glaciala maximumet (Last Glacial Maximum, LGM) i norra Europa var omkring 0 till -6 °C (dvs cirka 9 – 12 °C kallare än i dag), se figur 3-27 i /Kjellström et al. 2009/ samt /Brandefelt och Otto-Bliesner 2009/. För Forsmark är resultaten från dessa LGM-simuleringar inte relevanta för denna diskussion, eftersom Forsmark då var täckt av en tjock inlandsis. /Kjellström et al. 2009/ har dock också gjort en klimatsimulering för en stadial under Marina IsotopStadium 3 (MIS 3), också under Weichselglacialen, för cirka 44 000 år sedan. I denna simulering antogs, med stöd från geologisk information, isfria förhållanden i stora delar av Sverige, bland annat i Forsmark. Resultatet tyder



Figur 12-12. Temperaturkurva rekonstruerad från proxydata i GRIP-projektet ("Greenland Ice Core Project"). Under den senaste glaciationscykeln varierade temperaturen mycket både på kort och på lång sikt. Modifierad från /Dansgaard et al. 1993/.

på ett kallt och torrt periglacialt klimat med en årsmedeltemperatur i luften i Forsmarkregionen av cirka $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (omkring $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ lägre än i dag), se figur 4-4 och tabellerna 4-2 och 5-1 i /Kjellström et al. 2009/. En årsmedeltemperatur i luften på $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ överensstämmer väl med temperaturen i den rekonstruerade temperaturkurvan för denna specifika period (se figur 12-9) vilken ligger på omkring $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, dvs resultaten för den oberoende temperaturen från klimatmodellen och den temperaturkurva som rekonstruerats för den senaste glaciationscykeln överensstämmer. Båda visar att temperaturen i Forsmarksregionen ofta kan ha varit mer än $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ grader kallare än i dag, under kortare perioder, under den senaste glaciationscykelns kalla stadialer.

Dessutom tyder den lufttemperaturkurva som rekonstruerats för den senaste glaciationscykeln för Forsmarkregionen (se figur 12-9) på att årsmedeltemperaturen i luften under glaciationscykelns *kallaste* stadialer kan ha varit omkring -11 till $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (16 till 18 grader kallare än i dag). Med tanke på osäkerheterna i exempelvis överföringsfunktionerna mellan ^{18}O och lufttemperatur samt anpassningen av kurvan för fennoskandiska förhållanden kan temperaturerna till och med ha varit ännu lägre, se bilaga 1 i **Klimatrapporten**. I detta sammanhang bör det också noteras att årsmedeltemperaturen vad gäller marktemperaturer, vilken är relevant för tillväxt av permafrost, normalt är ett par grader *högre* än lufttemperaturen, se figur 12-9 i denna rapport, avsnitt 3.4.4 i **Klimatrapporten** och figur 3-57 i /Kjellström et al. 2009/.

Under den senaste glaciationscykeln var lufttemperaturerna riktigt låga bara under stadialer som varade under relativt kort tid, normalt omkring ett par tusen år, se figur 12-12. Detta förhindrade permafrosten från att utvecklas till stora djup, se figur 10-102, och skulle även förhindra detta vid mer extrema förhållanden under en glaciationscykel, se figurerna 12-10 och 12-11. Mer information om klimatet under den senaste glaciationscykeln finns i avsnitt 4.3 i **Klimatrapporten**.

Om klimatet skulle gå mot kallare glaciationscykler är det dock inte troligt att variationen inom klimatsystemet skulle ändras markant. Mycket kalla perioder har tidigare varit kortvariga och ingenting tyder på att så inte skulle vara fallet också under framtida glaciationscykler. Variation är en karakteristisk egenskap hos jordens klimatsystem på dessa tidsskalor. Nedan finns emellertid en diskussion om klimat med mindre variation.

Om en liknande klimatvariation som under den senaste glaciationscykeln antas krävs att hela dess temperaturkurva sänks med så mycket som $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen ska nå förvarsdjupet i Forsmark, se figur 12-8. Även med hänsyn till den betydande uppskattade maximala osäkerheten i den rekonstruerade lufttemperaturkurvan ($\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$) motsvarar detta en orealistiskt stor förändring av de glaciala klimatförhållandena.

Under glaciationscyklernas kallaste faser är dessutom Fennoskandia täckt av is och det glaciala tillståndet dominerar i Forsmark. Beräkningar som gjorts indikerar att om temperaturen sjunker med $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ är den inlandsis som bildats så stor att den täcker Forsmarksregionen, se avsnitt 5.4.2 i **Klimatrapporten**. När detta händer utvecklas permafrost mycket långsammare eller, vilket är än vanligare, minskar i mäktighet, se avsnitten 3.4.4 och 4.5 i **Klimatrapporten**. Då en större inlandsis breder ut sig över centrala Sverige, inklusive Forsmarksområdet, kommer förvarsområdet oundvikligen också att vara täckt av vatten under en avsevärd tid efter avsmältningen, vilket ytterligare hindrar permafrosten från att utvecklas. Om framtida glaciationscykler skulle bli kallare än de tidigare varit skulle detta troligen leda till större inlandsisar och längre perioder med inlandsisar, vilket minskar permafrostens och $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermens djup.

Effekten av ett osannolikt framtida klimat med avsevärt mindre klimatvariation under glaciala cykler än under de senaste två miljoner åren kan analyseras med hjälp av resultaten från känslighetsanalysen som presenteras i figur 12-5. Om marktemperaturen är $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Forsmark tar det omkring $120\ 000$ år för permafrosten ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermen) att utvecklas till förvarsdjupet (när den värme som genereras från förvaret inkluderas). För närvarande är årsmedeltemperaturen i luften i Forsmark cirka $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se avsnitt 2.4.2 i **Klimatrapporten**. Eftersom lufttemperaturen ofta är ett par grader lägre än temperaturen vid markytan, se figur 12-9 och /Hartikainen et al. 2010/ samt figur 3-57 i /Kjellström et al. 2009/, tyder resultaten på att det krävs en sänkning av lufttemperaturen med mer än $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att permafrosten ska utvecklas till förvarsdjup om konstanta temperaturer antas (dvs motsvarande ett klimat utan variabilitet). Sådana låga temperaturer skulle tillfälligt kunna uppträda under en glaciationscykel, se figurerna 12-9 och 12-12. De kalla perioderna varar dock *avsevärt* kortare tid än $120\ 000$ år, se avsnitt 4.3 och bilaga 1 i **Klimatrapporten**. I **Klimatrapporten** görs en teoretisk uppskattning av det maximala trycket från frysning med hänsyn tagen till jämviktsläget mellan bentoniten och isen.

Slutsatser om frysning av återfyllning

Under permafrostperioder i referensutvecklingen fryser återfyllningen ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isoterme) i rampen och schakten ned till ett djup av maximalt 200 m, med ett osäkerhetsintervall ned till 388 m, se tabell 12-1. I fallet med kraftig permafrost fryser återfyllningen ned till maximalt 311 m, se figur 12-10, med ett osäkerhetsintervall ned till 359 m, se figur 12-11 och tabell 12-1. Eventuella konsekvenser av detta diskuteras i avsnitt 10.4.8.

12.3.3 Slutsatser

Utifrån de modellstudier som gjorts, inklusive känslighetsanalyser av alla osäkerheter, når varken den ständigt frusna marken eller -2 och $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermerna förvarsdjupet i referensutvecklingen och inte heller i fallet med kraftig permafrost. Med en mycket pessimistisk kombination av osäkerheter i referensutvecklingen skulle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isoterme kunna nå förvarsdjup. För den första framtida glaciationscykeln leder detta emellertid inte till frysning på förvarsdjup, eftersom värme från förvaret samt de rådande tryck- och salthaltsförhållandena motverkar frysning. Under den andra framtida glaciationscykeln – och under alla därefter följande glaciationscykler under den en miljon år långa analysperioden – leder den mest pessimistiska kombinationen av osäkerheter till att vattnet fryser vid förvarsdjupet då värmen från förvaret avklingat. Det ska emellertid återigen betonas att denna kombination av osäkerheter anses vara orealistisk och således är även frysning på förvarsdjup att betrakta som orealistisk. Värt att notera är också att det finns en stor marginal till frysning av buffertleran och återfyllningen i förvarstunneln även med den mest pessimistiska kombinationen av antaganden.

Isbildning i buffertmaterialet kräver temperaturer på $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller lägre. Resultaten i figurerna 12-10 och 12-11 visar att det i det pessimistiska kalla och torra fallet med kraftig permafrost finns god marginal innan $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isoterme når förvarsdjup. Resultaten i figur 12-8 visar att den temperaturkurva som rekonstruerades för den senaste glaciationscykeln måste sänkas med omkring $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isoterme ska nå ett djup av 450 m. Även med hänsyn till den betydande osäkerheten i den rekonstruerade lufttemperaturkurvan, se bilaga 1 i **Klimatrapporten** och /Hartikainen et al. 2010/ anses sådana låga temperaturer vara orealistiska utifrån vad som är känt om historiska klimatförhållanden och klimatvariation. Att buffertleran skulle frysa i någon av alla tänkbara framtida klimatutvecklingar anses därför som uteslutet.

Kategorisering som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”

Eftersom slutsatsen från analysen av detta scenario är att bufferten inte kommer att frysa betraktas detta som ett restscenario.

Kvantitativ konsekvensanalys/diskussion – inneslutning och fördröjning

Om konsekvenserna vad gäller inneslutning av en antagen frysning skulle analyseras, skulle ett gränssättande fall vara ett där samtliga kapslar har skadats på grund av frysning. Detta liknar den situation där alla kapslar går sönder på grund av isostatiskt övertryck, vilken analyseras som ett hypotetiskt fall i avsnitt 13.7.1.

Klimatfall med global uppvärmning och övriga klimatfall

Förekomsten av permafrost fördröjs i varianten med global uppvärmning, se avsnitt 10.6.1. Denna fördröjning skulle också senarelägga en buffertfrysning och därmed skulle även eventuella följder fördröjas och minskas. Buffertfrysning behandlas därför inte ytterligare i varianten med global uppvärmning.

Eftersom klimatfallet med kraftig permafrost, se avsnitt 12.1.3, har använts i analysen ovan och eftersom detta fall definierats för att maximera omfattningen av buffertfrysning behöver inga ytterligare klimatfall beaktas.

Kombination av bufferterosion och buffertfrysning

Resultaten från permafrostsimuleringarna visar att grundvattnet inte fryser på förvarsnivå under första glaciala cykeln vare sig i referensutvecklingen eller i fallet med kraftig permafrost. Detta gäller även om $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isoterme kan nå förvarsdjupet under mycket pessimistiska antaganden. För ett fall där bufferterosion kombineras med ett frysningsfall baserat på referensutvecklingen eller fallet med kraftig permafrost, innebär detta att grundvatten som förekommer i hålrum som bildas vid bufferterosionen inte heller fryser under den första glaciationscykeln. Ett sådant kombinationsfall behandlas därför inte ytterligare i denna rapport.

Under den andra framtida glaciationscykeln och samtliga därefter följande glaciationscykler under den en miljon år långa analysperioden har värmen från det använda bränslet avklingat, vilket gör att vatten kan frysa på förvarsdjup under dessa glaciationscykler med den mest pessimistiska kombinationen av osäkerheter. En analys av frysning av vatten i de hålrum som uppkommit genom buffererosion presenteras därför i bilaga 3 i **Klimatrapporten**. Resultaten visar att om frysning skulle inträffa på förvarsdjup skulle det maximala frysinducerade trycket i hålrum orsakade av buffererosion vara 26–27 MPa. Detta är avsevärt lägre än det kritiska tryck som behövs för att en kapsel ska skadas och som beskrivs i scenariot som behandlar kapselbrott till följd av isostatisk last, se avsnitt 12.7.2.

12.4 Buffertomvandling

Icke uppfyllt indikatorkriterium

Detta scenario rör samtliga tänkbara förlopp som leder till att montmorilloniten i buffertmaterialet förändras. Förändringen avser omvandling av montmorilloniten i bufferten till mineraler som inte kan svälla (t ex illit), men också ackumulation av föroreningar som skulle kunna förändra buffertens egenskaper. Detta rör huvudsakligen funktionsindikatorerna för maximal bufferttemperatur och begränsat pH:

1. Buffertens temperatur får inte överstiga 100 °C.
2. Grundvattnets pH får inte överstiga 11.

Det kan även finnas andra processer som påverkar montmorillonitens stabilitet. En *temperaturgradient över bufferten* kan leda till att kiseldioxid transporteras från den varma till den kalla delen. *Metalliskt järn i kontakt med bentonit* skulle också kunna förändra montmorilloniten.

Om buffertmaterialet omvandlas skulle det eventuellt kunna påverka både inneslutning och fördröjning genom att andra funktionsindikatorer påverkas. Inneslutningen skulle indirekt kunna äventyras på grund av avsaknad av svälltryck, vilket skulle kunna leda till ökad sulfidkorrosion och skapa förhållanden som gör att mikrober kan orsaka korrosion på kapslarnas yta. Fördröjningen skulle kunna påverkas av ökad hydraulisk konduktivitet i bufferten, eller av att svälltrycket minskar, vilket i sin tur skulle kunna leda till att det bildas flödesvägar i bufferten.

Hantering av förloppen som leder till omvandling i referensutvecklingen

Enligt avsnitt 10.3.4 finns det avsevärda marginaler till 100 °C-funktionsindikatorn även om hänsyn tas till osäkerheter i berggrundens värmeledningsförmåga. Temperaturer över 100 °C beaktades därför inte i referensutvecklingen.

Enligt avsnitt 10.3.12 kan det under en period föreligga förhållanden där pH kortvarigt är högre än 11 i kontaktytan mellan bottenplattan och bufferten. Ett sådant högt pH-värde föreligger emellertid bara under en mycket kort tid. Buffertomvandling på grund av höga pH-värden beaktades därför inte i referensutvecklingen.

Transport av kiseldioxid i den termiska gradienten diskuteras i avsnitt 10.3.10, se figur 10-64. De förväntade termiska gradienterna leder till mycket små omfördelningar av kiseldioxid.

Kontakt mellan metalliskt järn och bufferten kan endast uppkomma om det finns en defekt i kopparköljet. Denna fråga behandlades inte i referensutvecklingen.

Kvalitativ beskrivning av förloppen som leder till buffertomvandling

Följande faktorer som är av betydelse för om buffertomvandling kommer att inträffa har – med utgångspunkt från diskussionen ovan – identifierats utifrån tabell 10-27, som beskriver de osäkerheter som identifierats för referensutvecklingen, samt utifrån FEP-diagrammet i figur 8-4.

Hög temperatur

Höga temperaturer kan orsakas av:

1. en resteffekt i kapseln som är högre än konstruktionsförutsättningen,
2. feltolkning av berggrundens termiska egenskaper på den tilltänkta förvarsplatsen,
3. ett lägre initialt vatteninnehåll i bufferten än konstruktionsförutsättningen,
4. torkning av bufferten, vilket leder till minskad värmeledningsförmåga.

Den enda orsaken som identifierats leda till förlopp 4 är ventilation av deponeringshålet under en lång tidsperiod. Följderna av att berget torkar och vilka effekter det har på buffertens termiska egenskaper diskuteras i avsnitt 10.3.8. Det finns ingen förväntad utveckling i närområdet som skulle kunna leda till dessa förhållanden och torkning av bufferten beaktas därför inte ytterligare.

Högt pH

Grundvatten med högt pH skulle kunna komma i kontakt med bufferten om de kvalitetskontrollsystem som används under uppförandet av förvaret inte fungerar eller fungerar på fel sätt. De möjliga förloppen skulle antingen kunna vara att pH från den cement som används felbedöms eller att en felaktig cementblandning används.

Termisk gradient

Den termiska gradienten beror på den termiska effekten som kapseln utvecklar och på bergets termiska egenskaper. Känsligheten för dessa parametrar är emellertid låg och slutsatserna från referensutvecklingen förväntas gälla för alla tänkbara förhållanden som kan uppstå.

Interaktion med metalliskt järn

Denna process inträffar om kapselinsatsen kommer i kontakt med buffertmaterialet. Nyligen utförda laboratorieexperiment vid förvarsförhållanden visade att reaktionerna mellan montmorillonit och metalliskt järn i en syrefri miljö kan vara relativt snabba och i vissa fall också leda till en allmän nedbrytning av montmorillonitens struktur /Lantenois et al. 2005/.

En annan möjlighet kan vara att utrustning eller material som innehåller järn eller stål finns kvar i ett deponeringshål då bufferten installeras. För SR-Site antas emellertid att kvalitetssystemet säkerställer att deponeringshålen rensas innan bufferten installeras.

Kvantitativ konsekvensanalys/diskussion

Effekt på bufferten av perioden med förhöjd temperatur beskrivs i avsnitt 10.3.10. Slutsatsen som drogs där var att den förväntade temperaturökningen inte kommer att ha någon betydande effekt på buffertens egenskaper.

En bufferttemperatur som överstiger funktionsindikatornivån skulle kunna få följande konsekvenser:

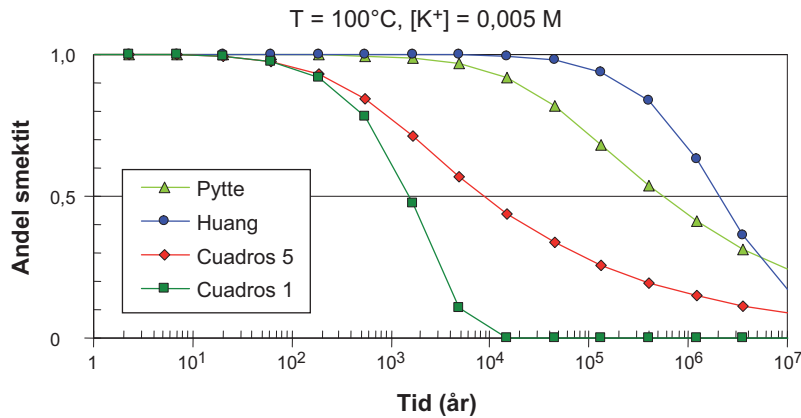
1. Omvandling av montmorilloniten i bufferten till mineraler som inte kan svälla (illit). Detta skulle leda till högre hydraulisk konduktivitet samt lägre svälltryck.
2. Ackumulation av föroreningar i bufferten på den varma (eller kalla) sidan. Detta skulle orsakas av temperaturberoende lösligheter. En sådan ackumulation skulle potentiellt kunna leda till att porerna sätts igen och att de reologiska och/eller hydrauliska egenskaperna förändras.

Omvandling av montmorillonit till illit diskuteras i avsnitt 10.3.10. Det framgår tydligt att omvandling är en mycket långsam process även om förvarets tidsskalor beaktas. /Karnland och Birgersson 2006/ har granskat olika kinetiska modeller för omvandling av smektit till illit. Figur 12-13 visar resultaten från olika modeller. Enligt Cuadros modeller /Cuadros och Linares 1996/ (Cuadros 1) är omvandlingshastigheten mycket snabbare än den som användes för beräkningarna i SR-Can-analysen (Huang). I Cuadros försök gjordes emellertid inte specifika bestämningar av alla hastighetsbestämmande konstanter och parametrar såsom gjordes av /Huang et al. 1993/. Cuadros använde därför naturliga analogier för att justera modellen (Cuadros 5) för att efterlikna förhållandena i naturen, där bentonit finns kvar under geologiska tidsskalor.

För denna process finns två typer av dataosäkerheter:

- Osäkerheter i temperaturberäkningen. Detta beskrivs i avsnittet ovan.
- Osäkerheter i de data som används vid omvandlingsberäkningen /Karnland och Birgersson 2006/ och vid beräkningen av reaktiv transport.

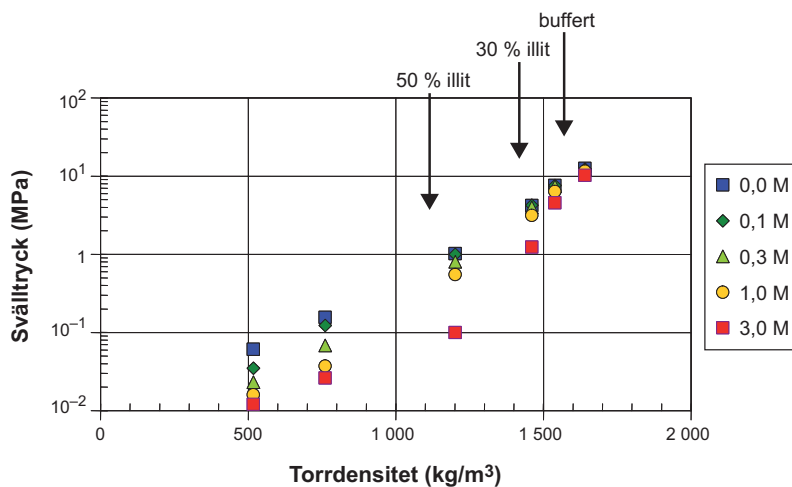
De potentiellt sett mest kritiska osäkerheterna i data rör frekvensfaktorn för en första ordningens reaktion (Arrheniusekvation) och aktiveringsenergin i det kinetiska uttrycket för omvandlingshastigheten.



Figur 12-13. Jämförelse av kinetiska modeller för omvandling av smektit till illit. Linjerna visar den beräknade andelen smektit som återstår med tiden, vid en konstant temperatur av 100 °C och en konstant kaliumkoncentration av 0,005 M.

Då Huang-modellen används skulle en temperatur på 125 °C under 10 000 år inte ha någon signifikant effekt på funktionsindikatorerna för svälltryck och hydraulisk konduktivitet /Karlund och Birgersson 2006/. De experimentellt uppmätta modellparametrarna har bestämts vid temperaturer som är betydligt högre än temperaturen i förvaret. Osäkerheten i modellens prediktioner ökar därför med minskande temperatur. Den kinetiska modellen används därför enbart för att styrka temperaturkriteriet men inte för en detaljerad prediktion av omvandlingen med tanke på den sjunkande temperaturen. Som visas i figur 10-16 kommer temperaturen i buffertens varmaste delar att sjunka till under 60 °C redan efter 200 år. Det betyder att osäkerheterna i den kinetiska modellen bara kommer att ha betydelse under en mycket begränsad tidsperiod under förvarets utveckling.

Figur 12-14 /Karlund och Birgersson 2006/ visar svälltrycket i buffertmaterialet MX-80 som funktion av torrdensteteten. Pilarna i figuren visar svälltrycket för referensdensiteten, för ett material med 30 procents omvandling och för ett material med 50 procents omvandling till illit. En omvandling av 30 procent montmorillonit till illit skulle fortfarande ge ett svälltryck som är högre än funktionsindikatorn 1 MPa. Figur 12-13 visar att det med Huang-modellen krävs en temperatur på 100 °C under mer än en miljon år för att få en omvandlingsgrad på 30 procent. Det är tydligt att en period med förhöjd temperatur under alla rimliga tänkbara förhållanden aldrig kommer att vara så lång. Problemet med den kinetiska modellen är inte den långa tidsperioden, utan snarare en mer direkt effekt av den sjunkande temperaturen. Överslagsberäkningar, där temperaturen används, anses därför vara en användbar metod eftersom dessa inte ger någon omfattande omvandlingsgrad ens vid mycket pessimistiska antaganden om temperaturen.



Figur 12-14. Svälltrycket hos MX-80-material i kontakt med rent vatten och NaCl-lösningar. Symbolerna visar uppmätta värden. "Buffert" anger svälltrycket hos oförändrat buffertmaterial vid densiteten i referensutformningen för KBS-3-förvaret, "30 procent illit" anger trycket vid högsta tillåtna omvandling och "50 procent illit" visar trycket vid 50 procent illitomvandling.

Ånga har visats ha en effekt på bentonitens egenskaper /Couture 1985/. Detta har även diskuterats av /Pusch 2000/ och /Karnland och Birgersson 2006/. Det har observerats att ånga skulle kunna påverka bentonitens maximala fria svällning. Någon tydlig mineralomvandling har emellertid inte identifierats av Couture, trots att experimenten genomfördes vid en högre temperatur än den maximala temperaturen i förvaret. Ångans påverkan på buffertens långsiktiga funktion förväntas därför vara begränsad.

Högt pH

Om grundvatten med högt pH ($\text{pH} > 11$) skulle komma i kontakt med bufferten kan viss omvandling eller upplösning förväntas ske. Omvandlingens omfattning beror på vattnets faktiska pH, den lokala hydrologiska miljön samt mängden cement som genererar det höga pH-värdet (massbalans). För SR-Site antas emellertid att kvalitetskontrollsystemen kommer att vara tillräckliga för att undvika att sådan cement som skulle kunna ge upphov till vatten med högt pH i förvaret används.

Termisk gradient

Effekten av en temperaturgradient på omfördelningen av föroreningar har beräknats av /Sena et al. 2010/ och /Karnland och Birgersson 2006/. Denna process visade sig ha en mycket begränsad effekt. Temperaturgradienten påverkas endast i begränsad omfattning av den absoluta temperaturen och processens beroende av temperaturen är därför begränsad.

Interaktion med metalliskt järn

I dagsläget finns ingen mekanistisk kunskap om detta och inte heller någon kvantitativ modell. Så länge som kopparkapseln är intakt förväntas emellertid inte någon interaktion mellan bentoniten i bufferten och metalliskt järn.

Sammanfattning

Eftersom det fortfarande finns vissa osäkerheter som rör effekten av höga temperaturer på buffertens långsiktiga funktion kan ett fall med en omvandlad buffertzona intill kapseln inte helt uteslutas. Följderna av ett sådant fall skulle vara sänkt svälltryck intill kapseln och en korrelerad konsolidering av denna del av bufferten på grund av svälltrycket i resten av bufferten. Det krävs emellertid att en stor del av bufferten omvandlas för att svälltrycket i bufferten ska sjunka under tryckkriteriet 1 MPa, där advektiva förhållanden måste beaktas, något som är mycket osannolikt. Om ett så lågt tryck uppstod skulle sulfatreducerande bakterier kunna överleva och sulfidkorrosionen öka.

Undersökningar av interaktionen mellan järn och buffertmaterial pågår. Med antagandet att det förekommer kontakt mellan insatsen och bufferten är det troligt att endast området närmast insatsen skulle påverkas och att buffertens övergripande transportegenskaper fortfarande skulle upprätthållas. I dag kan det emellertid inte uteslutas att hela diffusionsbarriären skulle kunna förloras. Detta skulle emellertid endast få följder för fördröjningen.

Variant med global uppvärmning och övriga klimatfall

Det finns ingenting förenat med varianten med global uppvärmning (i huvudsak 60 000 år innan första förekomsten av permafrost) som skulle kunna förvärpa buffertomvandlingen. Klimatet på ytan påverkar inte någon av de processer som diskuteras i detta avsnitt. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare i varianten med global uppvärmning. Inte heller är något av de övriga klimatfall som beskrivs i avsnitt 12.1.3 relevant för buffertomvandlingsscenario.

Kategorisering som "mindre sannolikt scenario" eller "restscenario"

Hög temperatur, högt pH och stora temperaturgradienter förväntas inte ha någon betydande effekt på buffertens stabilitet under några rimliga förhållanden. Omvandling av buffertmaterial i sådan omfattning att de fördelaktiga inneslutnings- och fördröjningsegenskaperna påverkas betraktas därför som ett restscenario.

Om bufferten kommer i kontakt med metalliskt järn kommer en viss förändring att ske. Omfattningen av en sådan förändring är för närvarande inte känd. Denna process kan endast förekomma när en kopparkapsel förlorat sin integritet och är inte relevant för kapselbrott i de fall buffert saknas.

Slutsatser

Processer som kan förändra eller omvandla montmorillonit enligt ovan förväntas inte ha någon betydande effekt på de viktiga buffertegenskaperna. Eftersom det finns osäkerheter för den kombinerade effekten av förhöjda temperaturer och högt pH är det emellertid lämpligt att studera ett fall där bufferten intill kapseln omvandlas och svälltrycket sjunker till en nivå där bakterier kan överleva. Detta fall behandlas som ett restscenario.

12.5 Slutsatser från analyser av buffertscenarier

Från resultaten av analyserna av de tre buffertscenarierna ovan kan följande slutsatser dras om att föra buffertförhållandena vidare till analyserna av kapselscenarier.

- Scenariot med advektion i bufferten förs vidare till kapselscenarierna som tre fall: i) advektiva förhållanden i varje deponeringshål under hela analysperioden, ii) advektiva förhållanden som beräknats med antagandena för basfallet i avsnitt 12.2.2, iii) inga advektiva förhållanden i något av deponeringshålerna under någon del av analysperioden.
- Scenariot med buffertfrysning betraktas som ett restscenario. Det förs därför inte vidare till kapselscenarierna i SR-Site.
- Scenariot med buffertomvandling betraktas som ett restscenario. Det förs därför inte vidare till kapselscenarierna i SR-Site.

Utöver de buffertscenarier som behandlar omvandlade bufferttillstånd måste även fallet med intakt buffert beaktas. Detta täcks av fall iii) i den första punkten i punktlistan.

12.6 Kapselbrott till följd av korrosion

12.6.1 Inledning

Korrosion av kapseln utvärderades för ett antal situationer i referensutvecklingen. I kapitel 10 visades att korrosion av kapseln leder till kapselbrott enbart vid advektiva förhållanden i bufferten och vid sådana förhållanden enbart för de deponeringshål som har högst flöden. Kapselbrott sker i allmänhet efter flera hundratusentals år.

Buffertförhållandena är därför avgörande vid utvärderingen av scenariot med kapselbrott till följd av korrosion. Baserat på resultaten från analyserna av buffertscenarierna behöver fallen för intakt buffert och för advektiva förhållanden i bufferten föras vidare till detta korrosionsscenario. Enligt analysen av scenariot med advektion i bufferten, se avsnitt 12.2, förs tre fall för advektiva förhållanden i bufferten vidare för fortsatt analys.

Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)

Detta scenario avser säkerhetsfunktionen Can1, ”Utgöra korrosionsbarriär”, vilken är direkt relaterad till kapselns inneslutningspotential.

Detta är en övergripande säkerhetsfunktion, vilket innebär att ett antal underliggande funktioner måste utvärderas för att en fullständig utvärdering av scenariot med kapselkorrosion ska kunna ske. Åtskilliga resultat från andra scenarier, i synnerhet avseende bufferten, förs därför vidare till detta scenario.

Hantering av kapselkorrosion i referensutvecklingen

Kapselbrott till följd av korrosion förekommer i referensutvecklingen, för fallet med advektiva förhållanden i bufferten. För en intakt buffert visades marginalerna för skydd mot korrosionsbrott vara avsevärda.

De två syftena med detta korrosionsscenario är därför att i) utvärdera om alla osäkerheter för korrosionsfallet med advektiva förhållanden i bufferten har hanterats på lämpligt sätt i referensutvecklingen och ii) utvärdera om det för en intakt buffert återstår några osäkerheter som skulle kunna motsäga slutsatsen att korrosionsbrott inte kommer att inträffa.

Kvalitativ beskrivning av förloppen som kan leda till korrosion

Med utgångspunkt från diskussionen ovan har följande faktorer, som är av betydelse för om kapselbrott till följd av korrosion kommer att inträffa, identifierats utifrån tabell 10-27 som beskriver de osäkerheter som identifierats för referensutvecklingen, och utifrån FEP-diagrammet, se figur 8-4.

Berörda initialtillståndsfaktorer

- Initial minsta koppartjocklek.
- Sovringskriterier för deponeringshål.
- Korroderande ämnen i buffert och återfyllning.

Berörda processer och förhållanden i berget

- Kopparkorrosion.
- Diffusiv transport av lösta korroderande ämnen genom bufferten (för intakt buffert).
- Advektiv transport i ett deponeringshål med en eroderad buffert.
- Grundvattenflöde.
- Koncentration av sulfid i grundvattnet.
- Potentiell nedträngning av syre.

Berörda externa förhållanden

- Glaciala förhållanden som leder till förhöjt grundvattenflöde.
- Glaciala förhållanden som leder till att grundvattnets sammansättning förändras (syre och sulfid).

12.6.2 Kvantitativ utvärdering av korrosion

Återstående osäkerheter för de faktorer som nämns ovan behandlas nedan. Därefter följer korrosionsberäkningar som grundar sig på de ytterligare osäkerheter som identifierats för en buffert med advektiva förhållanden.

Initial koppartjocklek

Den initiala koppartjockleken utvärderades utförligt i **Produktionsrapporten för kapseln**. Utvärderingen gav de värden för initialtillståndet som redovisas i tabell 5-9 i avsnitt 5.4.3. Härledningen av initialtillståndet grundar sig på referensutformningen samt på de produktions- och kontrollrutiner som beskrivs i **Produktionsrapporten för kapseln** och sammanfattas i avsnitt 5.4.2. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare här.

Enligt tabell 5-9 är den minsta koppartjockleken 47,5 mm för mer än 99 procent av kapslarna. Något lägre värden kan förekomma för den återstående lilla andelen. Enligt de korrosionsanalyser som redovisas i det här avsnittet utsätts bara en begränsad del av kapselytan för det korroderande ämnet. För en eroderad buffert, där advektion är den dominerande transportprocessen, antas att kapseln korroderar längs en sträcka i höjddled som motsvarar tjockleken på bufferten runt kapseln (35 cm). För en intakt buffert, där diffusion är den övervägande transportprocessen, kommer koncentrationsprofilen i bufferten för lösta ämnen som kommer in genom en spricka i deponeringshålet att ha en maximi-punkt som täcker ett ännu mindre område. Sannolikheten för att det område runt förslutningarna där koppartjockleken (pessimistiskt) antas vara reducerad i realiteten kommer att utsättas för korrosion är således liten. Därför görs i korrosionsanalyserna antagandet att tjockleken är 47 mm, se avsnitt 4.1 i **Datarapporten**. Det är inte motiverat att utföra mer sofistikerade analyser mot bakgrund av de betydande osäkerheter som är förbundna med många andra faktorer i korrosionsberäkningarna, i jämförelse med det relativt begränsade urval av värden för initial koppartjocklek som diskuteras här.

En minskning av koppartjockleken i form av en liten kavitet på utsidan, säg i millimeterstorlek, skulle dessutom inte proportionellt minska den tid som krävs för att kapseln ska korrodera sönder, på grund av att den yttre kopparytan skulle jämnas ut allt eftersom korrosionen fortskrider. Bara hålrum på de inre ytorna skulle kunna orsaka en proportionell minskning av tiden för genombrott.

Som nämnts i avsnitt 10.2.5, i underavsnittet ”Kapselkorrosion”, förväntas initial korrosion från atmosfäriskt syre före deponering och från initialt inneslutet syre orsaka korrosionsdjup av som mest 500 µm, och kommer således att ha en försumbar inverkan på kapselns minsta koppartjocklek.

Alternativa designval vad gäller koppartjocklek utvärderas som en del av BAT-analyserna i avsnitt 14.3.

Sovringskriterier för deponeringshål

I referensutvecklingen sovräs deponeringshål enligt EFPC. Detta är ett konstruktionsbeslut och att använda EFPC betraktas som fullt möjligt, se avsnitt 5.2.3. Även i korrosionsscenarioet antas därför att sovring av deponeringshål sker enligt EFPC. Alternativa sovringskriterier för deponeringshål utvärderas som en del av BAT-analyserna i avsnitt 14.3.

Föroreningar i buffert och återfyllning

Analysen av referensutvecklingen visar att ämnen som initialt förekommer i buffert och återfyllning, dvs inneslutet syre och föroreningar (pyrit, organiskt material) såväl som andra källor för organiskt material (biofilm på berget) samt väte från korroderande bergbultar och andra järnkomponenter ger ett försumbart bidrag till kopparkorrosionen, se avsnitt 10.3.13. Utgående från massbalanser dras slutsatsen att korrosionsdjupet som orsakas av dessa beståndsdelar skulle bli mindre än några få millimeter. Dessutom krävs tidsperioder jämförbara med den en miljon år långa analysperioden för att hela mängden av dessa ämnen ska nå kapseln. Eftersom det initiala innehållet av dessa ämnen på ett grundläggande sätt begränsar omfattningen av den korrosion de kan orsaka och eftersom denna omfattning är försumbar, tas frågan inte upp fortsättningsvis i detta scenario.

Kopparkorrosion

Vid analysen av referensutvecklingen utvärderas korrosion orsakad av syre (atmosfäriskt och initialt inneslutet), sulfid (transporterad via grundvattnet eller bildad av sulfatreducerande bakterier, såsom nämns ovan) såväl som av korroderande ämnen som bildats genom radiolys av vatten eller bestrålning av kväve i luften. I avsnitt 10.3.13 anges att omfattningen av denna korrosion är begränsad till några få millimeter under analysens tidsperspektiv på en miljon år. Med dessa marginaler och eftersom de flesta av processerna är begränsade av massbalans (annars av masstransport), behandlas dessa korrosionsmekanismer inte vidare i detta scenario. Det finns emellertid ett behov av att se över diskussionen avseende korrosion av koppar med vatten under vätgasbildning, både vid förhållanden med låga pH-värden och genom den mekanism som föreslås av /Szakálos et al. 2007/.

I avsnitt 8.3.4 konstateras att korrosion av koppar med hjälp av klorid kan uteslutas för kombinationen $\text{pH} > 4$ och $[\text{Cl}^-] < 2 \text{ M}$. Det finns därför ett behov av att analysera ytterligare utvecklingsvägar för att utesluta förhållanden med ogynnsamma pH-värden och höga jonstyrkor. Under tempererade förhållanden är grundvattnets surhetsgrad som högst i bergets övre delar, där inströmning av meteoriskt vatten dominerar. Regnvatten är mättat med atmosfäriskt CO_2 , som är en syra, och flera biologiska processer bildar CO_2 i jordlagren. När detta vatten tränger längre ned i berget sker en neutralisering genom flera reaktioner mellan vatten och berg. Vanliga pH-värden för vattnet vid Forsmark visas i figur 10-45. Förutom den ökade infiltrationen av meteoriskt sötvatten kan även uppträngning av djupt salt grundvatten (upconing) bidra till låga pH-värden i grundvattnet vilket ger blandningar med söta grundvatten. Om blandningen blir övermättad med kalcit ökar blandningens surhetsgrad när kalciten faller ut: $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$. Effekten blir större när vatten med meteoriskt ursprung, som är rikt på HCO_3^- , blandas med djupt Ca-rikt grundvatten i stället för med glacialt smältvatten. Data avseende grundvattnet i Forsmark i dag visar – tillsammans med resultat från känslighetsanalyser för blandningsberäkningar – att det lägsta pH-värde som kan uppnås ligger omkring 6,3. Detta stämmer överens med den analys som presenteras i avsnitt 10.3.7. I avsnitt 10.6.3 behandlas en transient ökning av koncentrationer av atmosfäriskt CO_2 . Så länge de förhöjda nivåerna av CO_2 är begränsade till en period på några hundratals till några tusentals år kommer detta inte att påverka surhetsgraden på grundvattnet på förvarsnivå. Regleringen av CO_2 -koncentrationen i atmosfären efter en minskning av utsläppen från fossila bränslen pekar på att även om förhöjda CO_2 -koncentrationer skulle bestå under sådana tidsskalor skulle dessa vara lägre än det maximala värdet, se avsnitten 5.1 och 5.2 i **Klimatrapporten**.

Data avseende grundvattnet vid Forsmark tyder på att salthalten varit stabil i bergvolymer utanför sprickzonerna under Weichsel. Stora svängningar hos grundvattnets salthalt förväntas därför inte i framtiden. De analyser av olika tänkbara klimategisoder som presenteras i avsnitten 10.3.7 och 10.4.7 visar att salthalten kan öka på grund av uppträngning av djupare grundvatten under den korta tid då isfronten passerar ovanför förvarsområdet. De analyser som redovisas i avsnitten 10.4.6 och 10.4.7 visar att följderna av uppträngning är måttliga. De jonstyrkor som uppstår i förvarsvolymer ligger under 0,5 M. Eftersom den mest uttalade uppträngningen äger rum under isens framryckning, där isprofilen är som brantast, omfattar analysen av referensutvecklingen de högsta salthalter som kan förväntas vid Forsmark. Slutsatsen blir därför att det inte finns något behov av att analysera konsekvenser av kopparkorrosion i närvaro av klorid.

I **Processrapporten för bränslet och kapseln** (se avsnitt 3.5.4, underavsnittet ”Korrosion i frånvaro av syre”) diskuteras en reaktion mellan koppar och vatten som ger en inte entydigt identifierad korrosionsprodukt och vätgas. Den vetenskapliga grunden för den föreslagna reaktionen är omdiskuterad, men konsekvenserna för kapseln i förvaret kan uppskattas, utifrån publicerade data avseende jämviktstryck för vätgas /Szakálos et al. 2007/ och genom att beakta masstransport, se vidare /SKB 2010d/. Beräkningar för dessa hypotetiska fall visar att marginalen till korrosionsgenombrott i kopparhöljet är mycket stor, till och med för en analysperiod på 10^6 år. Enbart i fallet med en eroderad buffert – och då bara för det deponeringshål som har den högsta flödes hastigheten – är korrosionsdjupet i storleksordningen några millimeter efter 10^6 år.

Diffusion i intakt buffert

Enligt /SKB 2010d/ bestäms transporthastigheten av specier från berget till kapseln av det flödes hastighetsstyrda transportmotståndet i gränssytan mellan buffert och berg, medan transportmotståndet på grund av diffusion i själva bufferten är jämförelsevis försumbart. Det finns därför ingen anledning att ytterligare hantera diffusion i korrosionsscenarioet för den intakta bufferten. I händelse av advektiva förhållanden i bufferten är diffusion av lösta ämnen i buffertens porvatten per definition irrelevant.

Korrosionsgeometri

För fallet med diffusion där bufferten finns kvar ges korrosionsgeometrin av dimensionerna på förvarskomponenterna i närområdet. Det finns inga betydande osäkerheter som behöver utvärderas i detta fall.

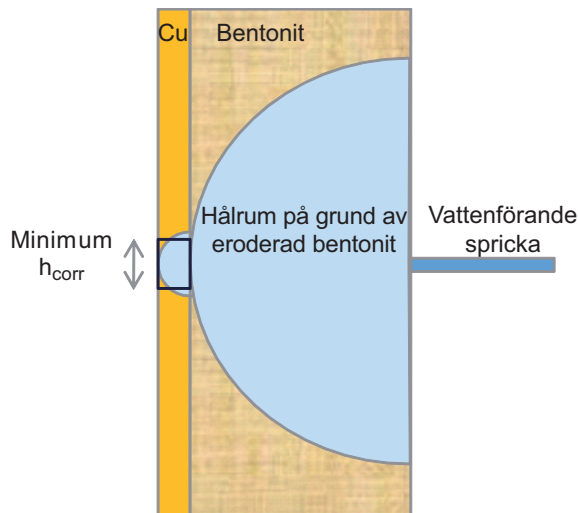
Enligt avsnitt 10.4.9 om referensutvecklingen är korrosionsgeometrin för fallet med advektiva förhållanden i deponeringshålet osäker, varierar i tiden och är svår att kvantifiera. I avsnitt 10.4.9 användes en försiktigt vald geometri i beräkningsexemplen. En extrem, gränssättande geometri utvärderas nedan som en känslighetsberäkning.

Kapseln exponeras först längs en linje runt halva dess omkrets och denna situation förändras inte med tiden, se figur 12-15. Korrosionen fortskrider då radiellt i kopparmaterialet, vilket motsvarar en korroderad area med en ekvivalent höjd, h_{corr} , av $\pi \cdot d_{can} / 2$, där d_{can} är kopparhöljets tjocklek. Detta ger en exponerad area av

$$A_{corr} = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot r_{can} \cdot d_{can}$$

Detta extremvärde är ungefär en faktor fem mindre än det försiktigt valda värdet i referensutvecklingen. (Mindre area ger högre korrosionshastighet eftersom all inträngande sulfid antas reagera med den exponerade kapselytan.)

I korrosionsscenarioet används den försiktigt valda geometrin, eftersom det betraktas som orealistiskt och överdrivet pessimistiskt att basera beräkningarna i korrosionsscenarioet på den extrema geometrin ovan. För att denna extrema geometri ska uppkomma och bestå krävs att erosionen först pågår under en lång tid (hundratusentals år) och sedan plötsligt avbryts på grund av förändrade grundvattenförhållanden precis vid denna eroderade position, och sedan förblir i detta tillstånd under ytterligare en lång tid (återigen hundratusentals år). Korrosionsresultatets känslighet för den extrema korrosionsgeometrin analyseras emellertid nedan.



Figur 12-15. Illustration av erosions- och korrosionsgeometrin i modellen för erosion och korrosion. Den korroderade kopparkroppen är modellerad med en konstant höjd, med ett extremt minimivärde som härletts från ett växande, halvcirkulärt tvärsnitt in i kopparmaterialet.

Grundvattenflöde och glaciala förhållanden som leder till förhöjt grundvattenflöde

Grundvattenflödet är en av de faktorer som avgör de ekvivalenta flödena runt deponeringshålen. För fallet med advektion utvärderades i referensutvecklingen konceptuella osäkerheter med avseende på grundvattenflödet för tempererade förhållanden, se avsnitt 10.4.9, genom beaktande av de tre korrelationsfunktioner för sprickstorlek/transmissivitet som behandlas i Forsmarks hydrogeologiska DFN-modell i **Platsbeskrivning Forsmark** och som vidare tas upp i den osäkerhetsanalys som beskrivs i avsnitt 10.3.6. Dessa tre varianter av den hydrogeologiska DFN-modellen används i de följande fortsatta kvantitativa utvärderingarna av korrosionens omfattning.

Vad gäller varierande förhållanden för grundvattenflödet under en glaciationscykel visas det i avsnitt 10.4.6 att medelvärdena över tiden under referensglaciationscykeln av q (Darcyflöde), $q^{1/2}$ och $q^{0,41}$, vilka är relevanta för kopparkorrosion under advektiva förhållanden, kopparkorrosion under diffusiva förhållanden respektive buffererosion, samtliga ligger runt 80 procent av motsvarande storheter för tempererade förhållanden, se ML2-data i figur 10-147. Att använda värdena för tempererade förhållanden är alltså pessimistiskt och ger en viss marginal för andra utvecklingar än referensglaciationscykeln.

För att studera detta ytterligare är det värt att notera att ökat flöde, jämfört med det under tempererade förhållanden, inträffar när fronten hos en framryckande inlandsis når området över förvaret eller när fronten hos en retirerande inlandsis lämnar området, se avsnitt 10.4.6. Mer omfattande fall av ökat flöde skulle således kunna inträffa om isfronten stannar upp ovanpå förvaret. Detta hanteras enligt nedan.

Under avsmältningen av Weichselinlandsisen stannade det generella tillbakadragandet av isen upp tillfälligt ett flertal gånger. Detta kan utläsas av daterade israndsavlagringar i södra Sverige, till exempel från stadialen Yngre Dryas, se avsnitt 4.2.2 i **Klimatrapporten**. Under sådana uppehåll i avsmältningen pendlade isfronten antingen fram och tillbaka eller så förflyttade den sig långsamt inom ett område som kunde vara flera kilometer brett. Under Yngre Dryas var detta område tiotals kilometer brett. Enligt uppskattningar har isfronten befunnit sig i stabila lägen under upp till några få hundra år då individuella moränryggar har bildats, se avsnitt 4.2.2 i **Klimatrapporten**. Det måste antas att liknande typer av uppehåll kan inträffa även under faser då inlandsisen växer till.

Även om så inte var fallet under den senaste avsmältningen – och därmed inte heller är fallet i referensglaciationscykeln för SR-Site – skulle framtida perioder med stillastående isfronter kunna inträffa vid förvarsplatsen i Forsmark när inlandsisar rycker fram, vid maximala isutbredningar och när inlandsisar drar sig tillbaka, förutsatt att lämpliga klimatförhållanden råder. Ett extremfall när det gäller hydrauliska gradienter och åtföljande ökat grundvattenflöde skulle kunna inträffa om isfronten tillfälligt stannade upp med allra främsta delen av inlandsisen placerad ovanför förvaret. Enligt

/Vidstrand et al. 2010/ finns en cirka 2 km bred påverkansområde med ett markant ökat grundvattenflöde i samband med en isfront över Forsmark. Denna flödessituation kan inträffa om permafrost inte förekommer vid förvaringsplatsen i Forsmark. Om permafrost förekommer, vilket är fallet i referensutvecklingen och vilket även är mycket troligt under en framtida nedisning av förvaringsområdet i Forsmark, är en zon med ökat grundvattenflöde betydligt mindre uttalad /Vidstrand et al. 2010/. Att använda ett två kilometer brett område nära isfronten med ett markant ökat grundvattenflöde är därför ett pessimistiskt val för analysen av sannolikheten för en framtida situation med en isfront som står stilla över förvaret.

Med antagandet att framtida perioder med stillastående isfronter skulle vara lika de uppehåll som förekom under den senaste avsmältningen, vilka beskrivs kortfattat ovan och mer detaljerat i avsnitt 4.2.2 i **Klimatrapporten**, kan en uppskattning göras av sannolikheten för att en sådan situation skulle inträffa vid förvaringsplatsen i Forsmark. Genom att generalisera utvecklingen vid den senaste inlandsisavsmältningen kan tio tillfälliga uppehåll med kortare varaktighet och ett längre uppehåll, vilket motsvarar perioden Yngre Dryas, postuleras för avsmältning av en fullstor inlandsis (som motsvarar den vid senaste glaciationsmaximum). För de kortare uppehållen antas dessutom helt stabila förhållanden för fronten under 200 år, medan fronten för det längre uppehållet pessimistiskt antas ha ett helt stabilt läge under tusen år. Detta är något längre än den tidsperiod som isfronten befann sig någonstans inom den 20–25 km breda Yngre Dryas-zonen i Sverige, vilken varade omkring 900 år. I själva verket är det sannolikt att isfronten under så långa faser skulle förflytta sig långsamt och/eller pendla inom ett isfrontsområde, se avsnitt 4.2.2 i **Klimatrapporten**. För att hantera osäkerheter i beteendet hos framtida inlandsisar antas det likväl att isfronten under det längre uppehållet har ett helt stabilt läge under tusen år. På så sätt utgör det längre uppehållet ett pessimistiskt valt fall när det gäller varaktigheten av en kraftig hydraulisk gradient och tillhörande höga grundvattenflöden.

Avsmältningen av Weichselinlandsisen, från dess läge i Polen och Tyskland vid senaste glaciationsmaximum till den skandinaviska fjällkedjan, skedde längs en sträcka av cirka 2 500 km /Fredén 2002/. För vart och ett av de antagna uppehållen finns ett cirka 2 km brett område vid isfronten med markant ökade grundvattenflöden /Vidstrand et al. 2010/. För varje tillväxt- eller avsmältningssfas är därför sannolikheten för ett 200 år långt uppehåll vid Forsmark 0,008 (10⁻² km/2 500 km), medan sannolikheten för att det antagna tusen år långa uppehållet ska inträffa vid Forsmark är 0,0008 (2 km/2 500 km). För en fullständig glaciationscykel med två faser med istillväxt och två faser med avsmältning över Forsmark, dvs en glaciationscykel som liknar referensglaciationscykeln för SR-Site, blir sannolikheterna för att isfronten ska stå still vid Forsmark i 200 år eller i tusen år 0,03 (0,008·4) respektive 0,003 (0,0008·4). För hela den en miljon år långa analysperioden, vilken omfattar åtta upprepade identiska glaciationscykler, blir sannolikheterna i motsvarande grad högre. Sannolikheten för att isfrontsområdet med högt grundvattenflöde tillfälligt skulle stanna upp vid förvaret är således relativt låg, särskilt när det gäller de sällsynta längre uppehållen. Det noteras återigen att antagandet om en fullständigt stabil isfront över förvaret under tusen år är ett mycket pessimistiskt fall jämfört med vad som är känt från den senaste avsmältningen, se även avsnitt 4.2.2 i **Klimatrapporten**.

När det gäller frågan om ökat flöde under ett uppehåll bör hänsyn även tas till om det finns permafrost eller inte. I referensglaciationscykeln är den simulerade inlandsisen bottenfrusen och växer till över ett landskap dominerat av permafrost under de faser då inlandsisen rycker fram, medan inlandsisen är bottenmältande under avsmältningarna, se avsnitt 10.4.1. Enbart den sistnämnda situationen ger upphov till ökat flöde. Vid en uppskattning av sannolikheten för att en isfront ska stå stilla över Forsmark är det rimligt att ta med även denna aspekt. I linje med detta görs antagandet att isen vid hälften av uppehållen är bottenfrusen och vid andra hälften är bottenmältande. Den sannolikhet som då uppskattas för att ett 200 år långt uppehåll med bottenmältande förhållanden ovanför förvaret ska inträffa under en glaciationscykel är således 0,015 (0,03/2), medan sannolikheten för ett bottenmältande tusen år långt stillestånd uppskattas till 0,0015 (0,003/2). För den en miljon år långa analysperioden bör dessa siffror multipliceras med åtta, vilket ger sannolikheter på 0,12 och 0,012 för uppehåll under 200 år respektive tusen år.

Intakt buffert

För en intakt buffert är $q^{1/2}$ den storhet som är relevant att studera. Om man enligt figur 10-132 antar att q ökar med en faktor 100 under uppehållet, så ökar $q^{1/2}$ med en faktor 10. Ett uppehåll på tusen år påverkar då korrosionen på ett sätt som motsvarar 10 000 år med tempererat flöde, vilket bara utgör en procent av den en miljon år långa analysperioden. Med tanke på att sannolikheten för att detta ska inträffa en gång under en miljon år är 0,012, blir slutsatsen att denna inverkan är försumbar. Samma slutsats dras för ett uppehåll under 200 år.

Advektion i buffert

För en buffert med advektiva förhållanden är Darcyflödet, q , normalt den storhet som är viktig att studera. För de höga flöden som är aktuella i det här fallet är det emellertid $q^{1/2}$ som ger beroendet av Darcyflödet /Neretnieks et al. 2010/ och enligt ovan är inverkan således försumbar. Även med ett linjärt beroende av q skulle inverkan vara försumbar med tanke på de låga sannolikheter som gäller.

Sammanfattningsvis behöver fördelningen av Darcyflöden vid 2000 e Kr inte modifieras för de tre hydrogeologiska DFN-modellerna för att kompensera för varierande flödesförhållanden under en glaciationscykel.

Koncentration av sulfid i grundvattnet

För korrosionsberäkningarna i referensutvecklingen gjordes antagandet att fördelningen av koncentrationen av sulfid i grundvattnet över en glaciationscykel är lika med den för tempererade förhållanden, vilken beskrivs i avsnitt 10.3.7. Detta betraktas som ett pessimistiskt antagande, se avsnitt 10.4.7. Dessa koncentrationer omfattar även effekter av mikrobiell sulfatreduktion. I de korrosionsberäkningar som redovisades för referensutvecklingen gjordes dessutom det pessimistiska antagandet att sulfidkoncentrationerna vid en given position i förvaret inte varierar med tiden. Ett slumpvis utvalt värde i fördelningen av sulfidkoncentrationer antas råda under hela den en miljon år långa analysperioden. Av referensutvecklingen framgår även att konsekvenserna i form av kapselbrott efter en miljon år blir mindre om medelvärdet av fördelningen tilldelas alla deponeringshål.

Något behov av att gå vidare med detta pessimistiska angreppssätt har inte identifierats. Några enkla studier av hur känsliga korrosionsresultaten är för egenskaperna hos sulfidfördelningen beskrivs emellertid nedan. Fördelningen består av 46 datapunkter i intervallet från $1,2 \cdot 10^{-7}$ M, motsvarande detektionsgränsen, till ett högsta värde på $1,2 \cdot 10^{-4}$ M. Det bör noteras att det näst högsta värdet är $1,2 \cdot 10^{-5}$ M, dvs en storleksordning lägre än det högsta. Eftersom det bara är kombinationer av höga sulfidkoncentrationer och höga flödes hastigheter som ger korrosionsgenombrott, är det av intresse att studera hur känsliga korrosionsresultaten är för detaljer i den högre änden av sulfidfördelningen. (Motsvarande beroende av den högre änden av flödesfördelningen hanteras genom det flertal realiseringar av flödesmodellerna som gjorts.)

Följande känslighetsfall analyseras:

- Den högsta punkten i fördelningen, dvs $[\text{HS}^-] = 1,2 \cdot 10^{-4}$ M, tas bort från fördelningen.
- En punkt med två gånger det högsta värdet, dvs $[\text{HS}^-] = 2,4 \cdot 10^{-4}$ M, läggs till i fördelningen.
- Medelvärdet av $[\text{HS}^-]$ används för alla deponeringspositioner. Detta är likvärdigt med att säga att $[\text{HS}^-]$ i en given position kommer att variera över tiden med ett medelvärde som är lika med medelvärdet av fördelningen av $[\text{HS}^-]$, dvs $5 \cdot 10^{-6}$ M.

Nedträngning av syre

Nedträngning av syresatt grundvatten till deponeringshålen uteslöts i referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.7. Frågan måste emellertid analyseras även för situationer med förhöjt flöde orsakat av att en isfront står stilla över ett förvar under längre perioder än vad som förväntas i referensutvecklingen.

Förståelsen av nedträngning av syre behandlas i avsnitt 10.4.7. Där visas att graden av syrenedträngning under förhållanden med stationära flödestillstånd styrs av:

- varaktigheten för perioden med stationärt tillstånd,
- koncentrationen av syre vid flödesvägarnas inlopp,
- i vilken omfattning mikrobiella processer bidrar till syreförbrukningen,
- den reaktiva ytan hos de reducerande mineralerna i berget och kinetiken för deras reaktion med syre,
- F -faktorerna för de inströmningsvägar som förbinder ytan med deponeringshålen.

Nedan behandlas och kvantifieras var och en av dessa faktorer i syfte att komma fram till en kvantitativ utvärdering av syrenedträngningens omfattning och möjliga konsekvenser med avseende på korrosion.

Varaktighet

Enligt avsnittet ovan om glaciala förhållanden som leder till förhöjt grundvattenflöde kan situationer med uppehåll under 200 år och tusen år beaktas. Sannolikheten för att de ska inträffa i kombination med bottenmältande inlandsisar är 0,12 respektive 0,012.

Koncentration av syre

Enligt avsnitt 10.4.7 samt /Sidborn et al. 2010/ finns en teoretisk övre gräns på 1,5 M för syrekoncentrationen i nedträngande glacialt smältvatten. Denna koncentration antas pessimistiskt nedan.

Mikrobiell aktivitet nära ytan

Enligt avsnitt 10.4.7 är mängden nedbrytbara organiska ämnen osäker under en period med nedisning, även om mikrobiell aktivitet kan iaktas på ytan av de flesta inlandsisar och i glacialt smältvatten /Hallbeck 2009/. Mikrobiell aktivitet beaktas pessimistiskt inte här.

Mineralyta och reaktionskinetik

Samma data som i avsnitt 10.4.7 används här. Ett försiktigt valt värde för den specifika reaktiva ytan används. Detta baseras på storleken och den geometriska formen på biotitkorn i berget i Forsmark.

Vattnets pH-värde antas vara lika med 8. Högre pH-värden skulle ge ökade hastigheter för mineralupplösning och homogen oxidation och följaktligen en ökad syreförbrukningshastighet och en minskad nedträngning av syre både i bergmatrisen och längs med sprickan. Resultaten är inte särskilt beroende av pH-värdet inom intervallet 7 till 8, men inverkan börjar bli av betydelse redan vid pH 8,5. I /Salas et al. 2010/ anges det att grundvatten med stora andelar glacialt smältvatten kännetecknas av pH-värden omkring 9. Därför betraktas de pH-värden som antas här som försiktigt valda.

Den reducerande förmågan hos sprickmineral tas inte med i beräkningen. Längs med sprickan kommer de syrerika vattnen att träffa på mineraler med Fe(II). I Forsmark motsvarar dessa en koncentration av Fe(II) förhöjd med en faktor tre i ett 0,2 mm tjockt lager berg som gränsar till sprickans yta. Den förhöjda reducerande förmågan nära sprickans yta tas pessimistiskt inte med i beräkningarna, men effekten diskuteras i samband med de beräkningar som redovisas i /Sidborn et al. 2010/.

Diffusivitet och porositet

Nedträngningen av syre utvärderas för en bergmatris med samma egenskaper som intakt berg. Nära sprickans yta är porositeten högre och därför diffunderar syre och andra lösta ämnen snabbare. På grund av detta diffunderar syre djupare in i bergmatrisen än enligt nuvarande beräkningar, och nedträngningen längs med sprickan är kortare. På grund av svårigheten att ange pessimistiska värden för den effektiva diffusiviteten och porositeten i den omvandlade zonen nära sprickorna, används värden för huvuddelen av bergmatrisen i beräkningarna för basfallet i /Sidborn et al. 2010/. I rapporten ingår emellertid ett exempel med förhöjd D_e och porositet som en känslighetsanalys för parametrar. Bergets förhöjda porositet nära sprickytor beaktas pessimistiskt inte här.

F-faktorer

Värden på flödesrelaterat transportmotstånd för inströmning under stationära flödesförhållanden med isfronten rakt ovanför förvaret redovisades i avsnitt 10.4.6 och användes där för att utvärdera nedträngningen av utspätt vatten. Vid dessa beräkningar beskrivs flödessprickorna i den del av flödesdomänen där förvaret ligger med en speciell hydrogeologisk diskret spricknätverksmodell (DFN-modell). Denna del omges av två på varandra följande volymer. Närmast DFN-volymer modelleras det advektiva flödessystemet med hjälp av en modell som beskriver ett ekvivalent kontinuerligt poröst medium (ECPM-modell) baserad på en uppskalad DFN-representation. Utanför ECPM används en modell som beskriver ett kontinuerligt poröst medium (CPM-modell), där egenskaperna antas vara homogena. Vid beräkningen av nedträngning av utspätt vatten togs enbart den explicita DFN-delen med. Det finns dock ingen anledning att bortse från den del av flödesvägen som passerar genom de två kontinuumrepresentationerna av flödesdomänen. Den första delen av inströmningsvägarna, dvs nära markytan, kommer huvudsakligen att ligga i CPM-delen av domänen och det är önskvärt att fastställa syreförbrukningen längs med hela flödesvägen.

För att få en ECPM-representation av sprickorna i hela domänen skapades en alternativ representation av den modell för grundvattenflöde som beskrivs i avsnitt 10.3.6, nämligen *Fallet med utökad rumslig variabilitet*. I denna variant används en ECPM-representation som är baserad på uppskalning av en särskild DFN-representation, genomgående i den regionala modelldomänen. Förvarsområdet representeras dock fortfarande av en explicit DFN, se avsnitt 10.3.6 och /Joyce et al. 2010/ för fler detaljer. Partikelspårning vid inströmning utförs i denna modell, med randvillkor från den modell för inlandsisfallet som beskrivs i avsnitt 10.4.6. Isfrontsläge II och III, dvs när isfronten ligger nära förvaret, beaktas. Advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd beräknas längs med inströmningsvägarna och används vid beräkningarna av syrenedträngning.

Det bör noteras att de inströmningsvägar som beräknats med modellen enligt /Joyce et al. 2010/ ger en underskattning av flödesvägarnas längd på grund av den ändliga utbredningen av domänen som använts. I modellen i storregional skala enligt /Vidstrand et al. 2010/ erhålls, för motsvarande isfrontslägen, inströmningsvägar som sträcker sig väl bortom gränsen uppströms för den modelldomän som används i /Joyce et al. 2010/. De värden för flödesrelaterat transportmotstånd (F) som används i den aktuella utvärderingen är därför troligen underskattade.

Syrenedträngningens omfattning

Med hjälp av de F -värden som tas fram enligt metoden som beskrivs ovan – med hjälp av *Fallet med utökad rumslig variabilitet*, för isfrontsläge III och med användning av EFPC – erhålls syrekoncentrationer av mer än 10^{-7} M för 31 deponeringspositioner av 6 000. För sex av dessa positioner är syrekoncentrationen högre än cirka 1 mM. För isfrontsläge II har den mest påverkade deponeringspositionen (i en annan volym av förvaret som inte påverkas av isfrontsläge III) en syrekoncentration som ligger något under 0,15 mM.

Korrosion vid diffusiva förhållanden

En exponering under tusen år för 1,5 mM O_2 i en spricka som skär ett deponeringshål med en intakt buffert ger en korrosion på cirka 0,3 mm i det mest utsatta deponeringshålet i förvaret. Detta gäller för de flödesförhållanden som behandlas ovan och då spjälkning antas ske i alla deponeringshål. Notera att i) alla deponeringshål ingår i denna beräkning, inte bara de där en motsvarande F -faktor tyder på syrenedträngning och ii) den teoretiskt maximala syrekoncentrationen antas.

Slutsatsen är att korrosion på grund av syrenedträngning vid diffusiva förhållanden i deponeringshålet kan försummas.

Korrosion vid advektiva förhållanden

Samma korrosionsmodell som utnyttjades för sulfidkorrosion vid antagna advektiva förhållanden i deponeringshålet användes för de deponeringspositioner som enligt beräkningarna ovan skulle kunna utsättas för nedträngande syre. De förhöjda flöden som beräknats för dessa positioner användes vid korrosionsberäkningarna.

Beräkningarna ger en korrosionshastighet som är något lägre än 6 $\mu\text{m}/\text{år}$ för de deponeringspositioner som med isfrontsläge III påverkas mest av den höga syrekoncentrationen. De tre närmast mest påverkade positionerna har korrosionshastigheter på 3,6, 1,7 respektive 0,9 $\mu\text{m}/\text{år}$. Detta ger korrosionsdjup av högst 6 mm efter tusen år. En stillastående isfront under 200 år skulle ge ett korrosionsdjup på cirka 1,2 mm för den position som påverkas mest. Dessa korrosionsdjup omfattar inte den ojämnhetsytan som orsakas av lokal korrosion, se nedan.

Följande noteras:

- Den specifika position där höga syrekoncentrationer förekommer är inte en av dem som förutsägs uppvisa advektiva förhållanden vid de erosionsberäkningar som utförts med samma hydrogeologiska DFN-modell (samma DFN-realiserings av det semikorrelerade basfallet). Detta beror på att de hydrogeologiska randvillkoren för de två situationerna är olika.
- Bara isfrontsläge III ger en betydande syrenedträngning. Avståndet mellan isfrontsläge II och III är 1,7 km. Det antas här att under de tusen år som isfronten står stilla så förflyttar den sig inte fram och tillbaka över sträckor i storleksordningen flera hundra meter. Om isfronten skulle pendla runt sitt frontläge skulle de hydrogeologiska förhållandena förändras så att inte någon deponeringsposition skulle påverkas av syrenedträngning under längre tidsperioder.

- All lokal korrosion i samband med syrekorrosion under glaciala förhållanden skulle uppträda i form av ojämn allmänkorrosion (snarare än i form av punktkorrosion). Enligt avsnitt 3.5.4 i **Processrapporten för bränslet och kapseln** kan omfattningen av denna ojämnhet uppskattas till några hundra µm för korrosionsdjup i millimeterskalan.

Slutsats

De beräknade korrosionsdjupen är i storleksordningen några millimeter trots ett pessimistiskt angreppssätt som innebär att i) en teoretisk övre gräns för syrekonscentrationen används, ii) den reducerande förmågan hos sprickmineral och mikrobiella processer försummas, iii) ingen hänsyn tas till det faktum att det är olika deponeringspositioner som är mest utsatta för erosion respektive korrosion och iv) ingen hänsyn tas till att isfronten pendlar något under det tusen år långa uppehållet. Dessutom har sannolikheterna för att isfronten ska stå still under tusen år och 200 år under den en miljon år långa analysperioden beräknats till 0,012 respektive 0,12. Därför dras slutsatsen att följderna av syrenedträngning kan uteslutas från korrosionsscenarioet.

Händelseföljder

De händelseföljder som beaktas i detta scenario avser ordningsföljden för olika klimattillstånd tillsammans med tillhörande variationer i grundvattenflöde och geokemiska förhållanden. Eftersom medelvärden över glaciationscykler används för dessa storheter, vilket motiveras av det faktum att det i allmänhet tar flera glaciationscykler att utveckla korrosionsgenombrott, är den detaljerade händelseföljden av underordnad betydelse vid uppskattningen av antalet korrosionsgenombrott och när dessa inträffar. En viktig aspekt av myndighetsföreskrifternas krav på att alternativa klimatutvecklingar ska behandlas har på så sätt hanterats.

Kvantitativ känslighetsanalys av kapselkorrosion

Intakt buffert

För en intakt buffert gav analysen av ytterligare osäkerheter inte några situationer som talar mot slutsatsen från referensutvecklingen att marginalen till kapselgenombrott är betydande. Därför görs inga fler korrosionsberäkningar för fallet med en intakt buffert.

Advektion i buffert

I scenariot med advektion i bufferten, se avsnitt 12.2, identifierades tre fall som förs vidare till korrosionsscenarioet:

- Ett fall där advektiva förhållanden förekommer i den omfattning som ges av referensutvecklingen som behandlas i kapitel 10.
- Ett gränssättande fall där advektiva förhållanden råder i varje deponeringshål under hela analysperioden.
- Ett fall där diffusiva förhållanden bibehålls i varje deponeringshål under hela analysperioden.

Det tredje fallet motsvarar en intakt buffert och har behandlats ovan. Det fallet motsvarar inte en situation med advektiva förhållanden i bufferten, men tas med för att representera den konceptuella osäkerheten vad gäller frigörelse av buffertkolloider och bufferterrosion. Ytterligare kunskap om den processen skulle kunna leda till att kolloidfrigörelse kan uteslutas från framtida analyser. Förutom dessa tre fall studeras nedan med avseende på korrosion även de känslighetsfall som är baserade på *erosionsrelaterade faktorer* som identifierats i scenariot för bufferterrosion.

Osäkerhetsanalyserna av faktorer som bidrar till korrosion som beskrivs ovan, har lett till följande slutsatser avseende basfallsantaganden och känslighetsfall för *korrosionsrelaterade faktorer*.

- Den initiala koppartjockleken antas vara 47 mm liksom i referensutvecklingen.
- Sovring av deponeringspositioner görs med hjälp av EFPC.
- Korrosion till följd av ämnen i bufferten och återfyllningen försummas.
- Diffusion i bufferten är irrelevant för fallet med advektion. Innan advektiva förhållanden uppstår förekommer emellertid diffusionsstyrd sulfidkorrosion vid en delvis eroderad buffert. Det är svårt

att kvantifiera omfattningen av denna korrosion. Fallet med initial advektion i alla deponeringshåll ger en gräns även för omfattningen av korrosion vid en delvis eroderad buffert som följs av korrosion under advektiva förhållanden.

- Den försiktigt valda korrosionsgeometrin från referensutvecklingen används, med den begränsande extrema geometrin som ett känslighetsfall.
- När det gäller flödesförhållanden förs de tre fallen med okorrelerade, semikorrelerade och helt korrelerade förhållanden mellan spricklängd och transmissivitet vidare till korrosionsberäkningarna. Det antas pessimistiskt att tempererade flödesförhållanden råder, medan stillastående inlandsisar inte beaktas för sulfidkorrosion eftersom de ger försumbara ytterligare bidrag.
- Liksom i referensutvecklingen antas pessimistiskt samma sulfidkoncentrationer som i dag och, likaså pessimistiskt, antas det att en deponeringsposition utsätts för samma, slumpvis utvalda sulfidkoncentration under hela analysperioden. Tre känslighetsfall har definierats för att studera känsligheten för sulfidfördelningens egenskaper.
- Korrosionsbidrag från syrenedträngning beaktas inte, eftersom de är osannolika och har en begränsad omfattning, även med ett antal pessimistiska antaganden.

Ett basfall där alla tio realiseringarna av den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen används, den platsspecifika sulfidfördelningen och basfallsantaganden vad gäller buffererosion ger ett medelvärde på 0,12 kapselbrott på en miljon år, vilket redan beskrivits i referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.9.

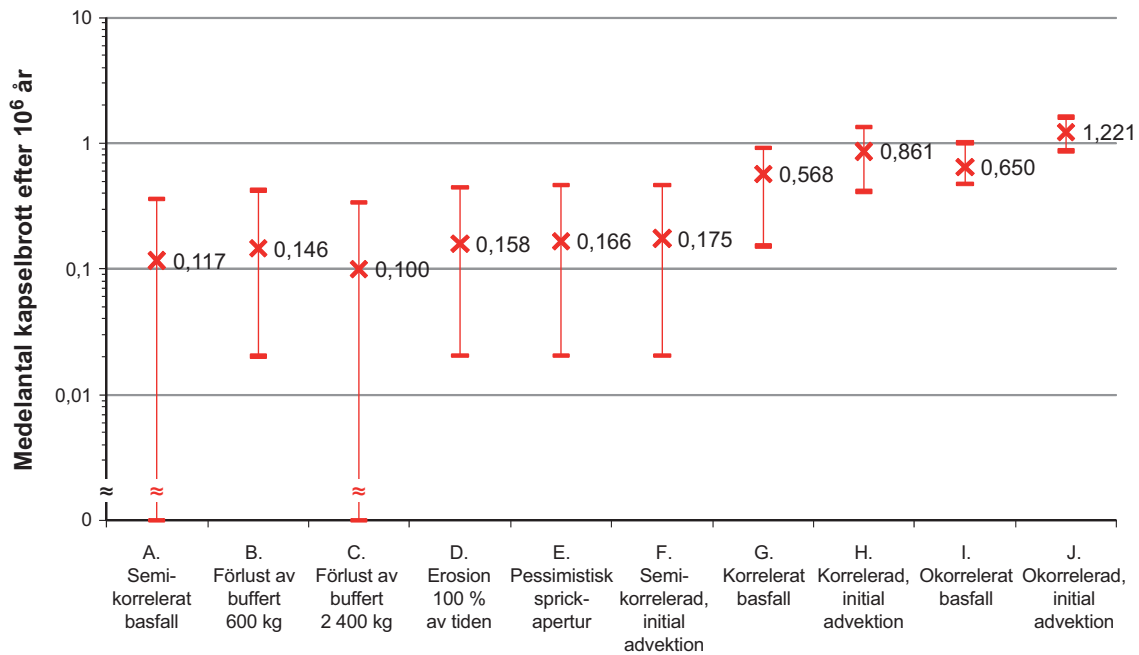
Känsligheten för osäkerheter avseende *erosionsrelaterade faktorer* studeras genom att antalet kapselbrott beräknas för de känslighetsfall avseende buffererosion som studerats i scenariot med advektion i bufferten, avsnitt 12.2.2. Resultaten visas i figur 12-16, och motsvarar således erosionsfallen i figur 12-3 i avsnitt 12.2.2, men där fallen F, H och J med initial advektion har lagts till.

Enligt figuren är känsligheten begränsad för samtliga antaganden avseende buffererosion. De olika hydrogeologiska DFN-modellerna ger den största påverkan. Det är anmärkningsvärt att även antagandet om initiala advektiva förhållanden i samtliga deponeringshåll har en begränsad inverkan på korrosionens omfattning för en given variant av den hydrogeologiska modellen. Detta resultat motiverar förenklingen att bara basfallet och de två gränssättande fallen förs vidare från analysen av buffererosion.

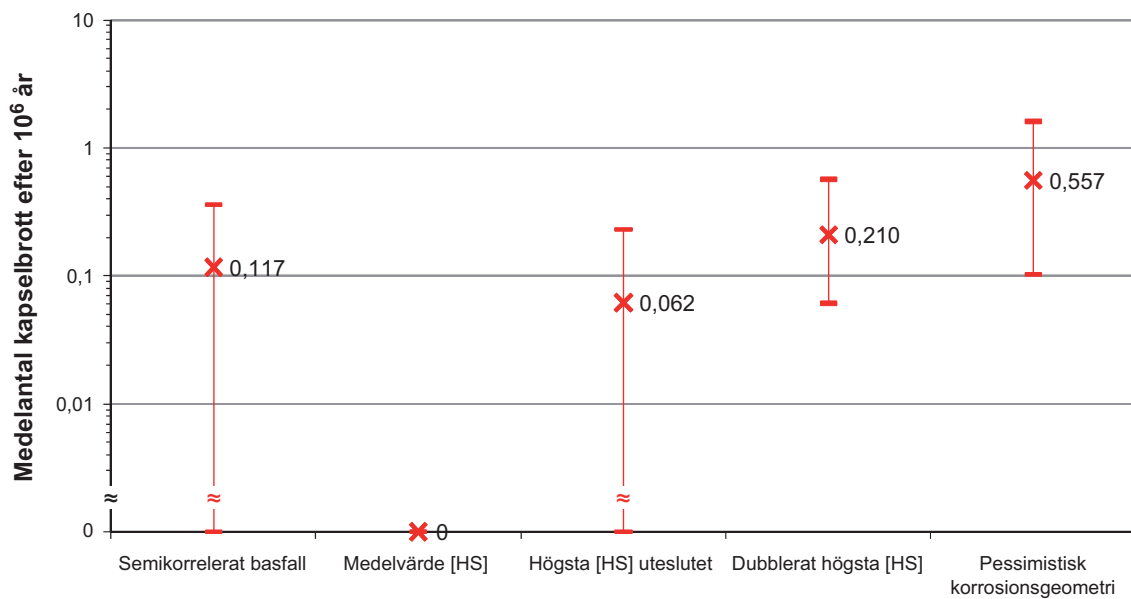
I figur 12-17 visas resultaten av de känslighetsfall som utgår från osäkerheter i *korrosionsrelaterade faktorer* som identifierats ovan, dvs känsligheter som är relaterade till fördelningen av sulfidkoncentrationer och till korrosionsgeometrin. De olika fallen visar följande:

- Med antagandet att medelvärdet av $[HS^-]$ gäller för alla deponeringspositioner, vilket är detsamma som att anta att $[HS^-]$ vid ett givet läge kommer att variera över tiden med ett genomsnittligt värde som är lika med medelvärdet för hela fördelningen av $[HS^-]$, dvs $5 \cdot 10^{-6}$ M, erhålls inga korrosionsgenombrott för den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Samma resultat uppnås med den okorrelerade och den helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modellen (inte visat i figuren). Detta är ett signifikant resultat. Även om antagandet av en tidsmässig variabilitet som representeras av den givna sulfidfördelningen inte kan motiveras, är det inte orimligt att anta att sulfidkoncentrationerna skulle kunna variera över tiden och således i hög grad minska det förväntade antalet kapselbrott. Resultatet återspeglar det faktum att kapselbrott bara inträffar när de högsta flödena förekommer i kombination med de högsta sulfidkoncentrationerna, och när båda dessa storheter för en given deponeringsposition pessimistiskt antas vara konstanta över tiden under hela den en miljon år långa analysperioden.
- Att ta bort eller lägga till ytterligare en datapunkt med den högsta sulfidkoncentrationen, dvs 0,12 mM, har en betydande inverkan på resultatet. Som redan nämnts är denna punkt ungefär en storleksordning högre än den näst högsta punkten i fördelningen.
- Att anta den realistiska, pessimistiska korrosionsgeometrin ger en ökning av det genomsnittliga antalet kapselgenombrott med ungefär en faktor fem, vilket innebär att beroendet i detta fall är i stort sett omvänt proportionellt mot den exponerade kapselytan.

Fullständig dokumentation av alla beräkningar avseende buffererosion/kolloidfrigörelse och kapselkorrosion finns i /SKB 2010d/.



Figur 12-16. Beräknat medelvärde för antalet kapselgenombrott efter en miljon år för de känslighetsfall som identifieras i scenariot med advektion i bufferten, se figur 12-3 i avsnitt 12.2.2, och med basfallsantaganden för korrosion. Kryssen anger medelvärden och staplarna anger variabiliteten över de olika realiseringarna av de hydrogeologiska DFN-modellerna.



Figur 12-17. Beräknat medelvärde för antalet kapselgenombrott efter en miljon år för de känslighetsfall som identifieras i korrosionsscenarioet och med basfallsantaganden för erosion. Kryssen anger medelvärden och staplarna anger variabiliteten över de olika realiseringarna av de hydrogeologiska DFN-modellerna.

12.6.3 Slutsatser

Scenariot med kapselbrott till följd av korrosion är ett mindre sannolikt scenario, eftersom denna typ av kapselbrott inte kan uteslutas under den en miljon år långa analysperioden.

För att utvärdera konsekvenserna vad gäller dos och risk måste de tre buffertfallen (ingen advektion, erosion enligt modellen för SR-Site, initial advektion) kombineras med de tre hydrogeologiska DFN-modellerna, med de basfallsantaganden som används ovan för andra parametrar relaterade till erosion och korrosion. Det gränssättande fall där advektiva förhållanden råder i alla deponeringshål under hela analysperioden är uppenbarligen orealistiskt, men fallet behålls ändå i scenariot för att belysa inverkan av de osäkerheter som hanteras genom detta fall.

I figur 12-18 visas de fall som har formulerats för korrosionsscenarioet. De tre varianterna av den hydrogeologiska DFN-modellen för förvaringsplatsen vid Forsmark tas med för att hantera osäkerheter i korrelationsstrukturen (blå objekt). Nästa förgrening beskriver de tre fallen med advektion i buffert (röda) som förs vidare från scenariot med advektion i bufferten. Till sist anges med orange färg det genomsnittliga antalet kapselbrott som beräknats för vart och ett av fallen.

Fallet med den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska DFN-modellen i kombination med SR-Site-modellen för bufferterrosion betraktas som en *central korrosionsvariant*, för vilken analyser av radionuklidtransport och dos i första hand bör göras. Detta grundar sig på följande överväganden.

- Den semikorrelerade DFN-modellen är mer kompatibel med platsdata än de andra två varianterna, eftersom dess beskrivning av förhållandet mellan sprickstorlek och transmissivitet stämmer bäst överens med de observationer som gjorts.
- SR-Site-modellen för bufferterrosion är den bästa representationen av nuvarande kunskap om denna process som finns att tillgå, även om konceptuella osäkerheter är förbundna med modellen.

De återstående kombinationerna av hydrogeologiska DFN-modeller och erosionsfall betraktas som illustrativa fall som gränssätter osäkerheter med avseende på de aspekter av korrosion som de representerar.

De fall som behandlats ovan förs vidare till analyser av fördröjningspotentialen för korrosionsscenarioet, se avsnitt 13.5.

Hydrogeologisk DFN-modell		Medelantal advektiva positioner		Medelantal otäta kapslar	
		(efter 10 ⁵ år)	efter 10 ⁶ år	(efter 10 ⁵ år)	efter 10 ⁶ år
Okorrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000	(0,055)	1,2
	Erosionsmodell för SR-Site	(1,2)	280	(0,004)	0,65
	Ingen advektion	(0)	0	(0)	0
Semikorrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000	(0,013)	0,18
	Erosionsmodell för SR-Site	(0,6)	19	(0)	0,12
	Ingen advektion	(0)	0	(0)	0
Helt korrelerad	Initial advektion	(6 000)	6 000	(0,043)	0,86
	Erosionsmodell för SR-Site	(1,2)	19	(0,005)	0,57
	Ingen advektion	(0)	0	(0)	0

Figur 12-18. Genomsnittligt antal advektiva deponeringspositioner och genomsnittligt antal kapselbrott för de beräkningsfall som identifierats som relevanta för korrosionsscenarioet.

Variant med global uppvärmning och övriga klimatfall

De slutsatser som dras ovan gäller även med avseende på varianten med global uppvärmning i referensutvecklingen. En sådan variant skulle möjligen kunna ge en negativ påverkan på omfattningen av erosionen under den inledande tempererade perioden. Under den en miljon år långa analysperioden är denna inverkan mycket begränsad och hanteras genom fallet med initial advektion i alla deponeringshål. Inte heller har något av de övriga klimatfall som beskrivs i avsnitt 12.1.3 någon relevans för korrosionsscenarioet.

12.7 Kapselbrott till följd av isostatisk last

12.7.1 Inledning

Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)

Detta scenario berör den säkerhetsfunktion som är relaterad till kapselns förmåga att motstå isostatisk last, dvs säkerhetsfunktionen Can2.

Denna säkerhetsfunktion står i direkt samband med inneslutning, eftersom inneslutningen antas brytas om säkerhetsfunktionen inte upprätthålls.

Hantering av denna fråga i referensutvecklingen

Kapselbrott till följd av isostatisk last förekommer inte i referensutvecklingen, eftersom de maximala lasterna i referensutvecklingen (43,5 MPa) understiger kapselns dimensionerande last (45 MPa).

Buffertförhållanden som förs vidare

Enligt avsnitt 12.5 förs tre olika buffertförhållanden vidare till kapselns scenarierna. Två av dessa rör advektiva förhållanden i bufferten och det tredje behandlar en intakt buffert. Eftersom advektiva förhållanden är relaterade till en eroderad buffert med ett lägre svälltryck än en intakt buffert, är det mindre sannolikt att sådana förhållanden orsakar isostatisk kollaps.

I avsnitt 12.3 drogs dessutom slutsatsen att varken en intakt buffert eller grundvatten i eventuella hålrum i en eroderad buffert kommer att frysa, inte ens med pessimistiska antaganden avseende framtida klimatförhållanden vid förvarsplatsen i Forsmark.

Utgående från ovanstående behandlas endast den intakta bufferten i den fortsatta analysen av eventuella kapselbrott till följd av isostatisk belastning.

Kvalitativ beskrivning av förlopp som leder till kapselbrott till följd av isostatisk last (inklusive aspekter av initialtillståndet samt externa förhållanden)

Utvecklingen i detta scenario antas vara identisk med den i varianten av referensutvecklingen med referensglaciationscykeln, med undantag för faktorer som är relaterade till isostatisk kapselkollaps.

Enligt FEP-diagrammet skulle denna säkerhetsfunktion äventyras om den isostatiska lasten på kapseln – vilken bestäms av grundvattentrycket (som är lika med porvattentrycket i bufferten) samt av buffertens svälltryck – överskrider den dimensionerande lasten på 45 MPa.

Grundvattentrycket bestäms av förvarsdjupet vid icke-glaciala förhållanden. Vid förvarsplatsen i Forsmark innebär detta ett tryck på omkring 4,5 MPa. Vid glaciala förhållanden adderas förändringen av det hydrostatiska trycket som orsakas av inlandsisen. I referensutvecklingen antas detta tryck motsvara den största istjockleken på platsen, eftersom det inte kan vara markant större. Vid Forsmark är det tillkommande hydrostatiska trycket 26 MPa, se avsnitt 10.4.1.

Buffertens svälltryck bestäms av buffertens densitet och kemiska sammansättning, inklusive typen av adsorberad katjon. I referensutvecklingen bestämdes buffertens maximala svälltryck till 13 MPa, vilket motsvarar en oförändrad buffert på 2 050 kg/m³ (referensdensitetsintervallens övre gräns).

Följande faktorer som är av betydelse för om kapselbrott till följd av isostatisk last kommer att inträffa har – med utgångspunkt från diskussionen ovan – identifierats utifrån tabell 10-27 som beskriver osäkerheter som identifierats i referensutvecklingen och utifrån FEP-diagrammet, se figur 8-4.

Berörda initialtillståndsfaktorer

- Kapselns hållfasthet.
- Buffertens densitet.
- Förvarsdjupet (som bestämmer grundvattentrycket om ingen glacial last förekommer).

Berörda processer

- Buffertens svällning.
- Buffertens kemiska förändringar och densitetsförluster.
- Deponeringshålens konvergens.

Berörda externa förhållanden

- Inlandsisens mäktighet och hydrologi.

Dessa faktorer behandlas kvantitativt nedan under de tre rubrikerna glacial last, buffertens svälltryck och kapselns hållfasthet.

12.7.2 Glacial last

Inledning

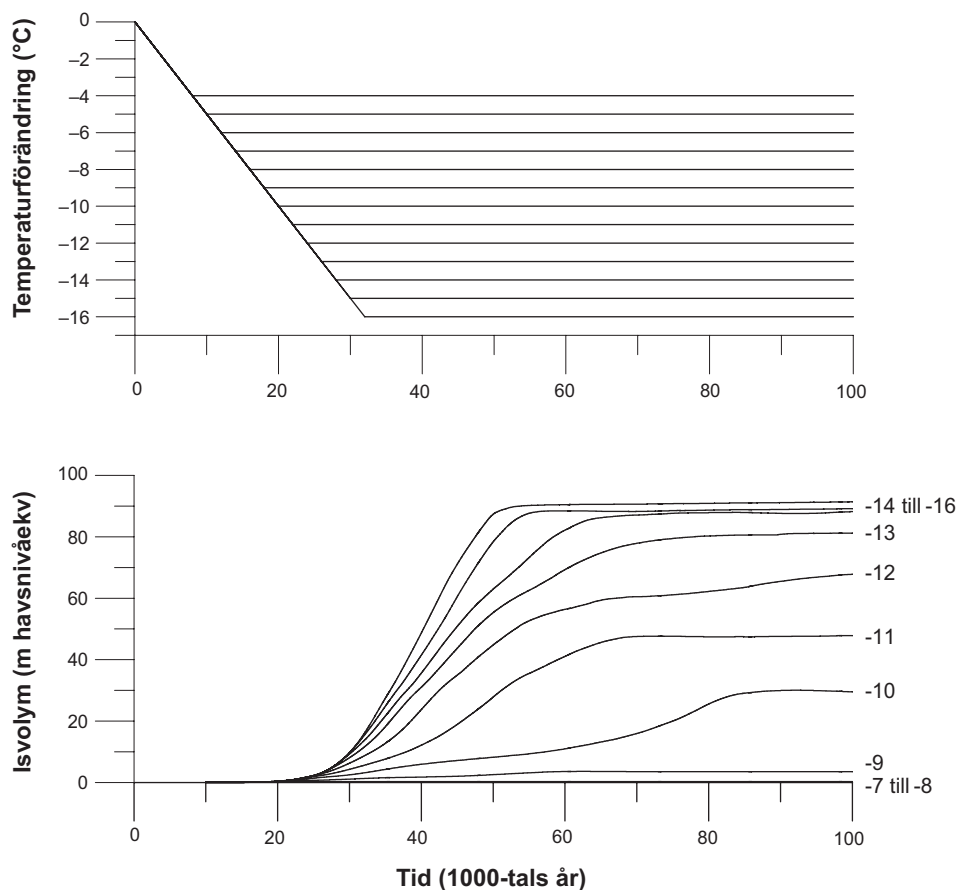
Som nämnts i avsnitt 10.4.1 adderas vid glaciala förhållanden ett extra hydrostatiskt tryck, relaterat till inlandsisens mäktighet, till det hydrostatiska trycket för isfria förhållanden. Extremfallen vad gäller hydrostatiskt tryck vid det glaciala klimattillståndet beror på inlandsisens konfiguration och dess hydrauliska system. Under den antarktiska inlandsisen har subglaciala sjöar observerats. Det hydrostatiska trycket i dessa sjöar antas vanligtvis motsvara isövertrycket. En hydro-termo-mekanisk balans antas, där tillförseln av vatten från bottenmältning, återfrysning och isdeformation resulterar i en hydrostatisk jämvikt där inlandsisen vilar, eller flyter, på vattenytan, se exempelvis /Pattyn et al. 2004/. Även för den fennoskandiska inlandsisen är det rimligt att anta att den största mäktigheten hos inlandsisen sätter en gräns för det högsta hydrostatiska tryck som kan uppstå i gränsytan mellan inlandsisen och underlaget. Ytterligare motivering till detta ges nedan.

Känslighet för klimatförändringar

För att undersöka hur mäktiga inlandsisar som kan förekomma i Fennoskandia användes den inlandsismodell som beskrivs i avsnitt 10.4.1 med en uppsättning temperaturvariationer där den lokala årsmedeltemperaturen i luften minskades linjärt med 1 °C per 2 000 år, från nuvarande temperaturer ned till olika konstanta nivåer. Vid dessa känslighetsanalyser sänktes temperaturerna mellan 4 och 16 °C, se figur 12-19 och avsnitt 5.4 i **Klimatrapporten**. Vid beräkningarna bildas inlandsisar vid temperatursänkningar av 7 °C eller mer, se figur 12-19. I samtliga fall simulerade inlandsismodellen en total tidsperiod av 100 000 år, efter vilken i stort sett stationära förhållanden uppnåddes med mycket små ytterligare förändringar av isens volym och area. De resulterande värdena för inlandsisens maximala mäktighet visas i figur 12-20.

Som förväntat ökar den maximala istjockleken om klimatet är kallare (svart linje i figur 12-20). Graden av ökning av istjocklek då temperaturen sänks avtar emellertid allt eftersom kallare fall beaktas. För temperatursänkningar större än ungefär 13 °C ger kallare klimat inte mäktigare inlandsisar. Modellresultatet som visar att det finns en sådan gräns för den maximala istjockleken stämmer överens med det som är känt avseende förändringar av antarktiska inlandsisar, se nedan.

Dessa simulerade temperaturfall är extrema i och med att de är så långvariga. Temperaturförändringar av den här storleksordningen har inträffat tidigare, se exempelvis /Dansggard et al. 1993/, men aldrig under så lång tid utan avbrott, se avsnitt 4.3.4 i **Klimatrapporten**. Dessa känslighetsfalls extrema natur återspeglas även i de isutbredningar som blir resultatet för de kallare fallen. Här täcker inlandsisen hela norra och centrala Europa och sträcker sig i sydlig riktning hela vägen till Alperna. Geologiska observationer av spår från fennoskandiska inlandsisar visar att så stora isutbredningar aldrig har förekommit under kvartärperioden, och de kan därför betraktas som orealistiska.

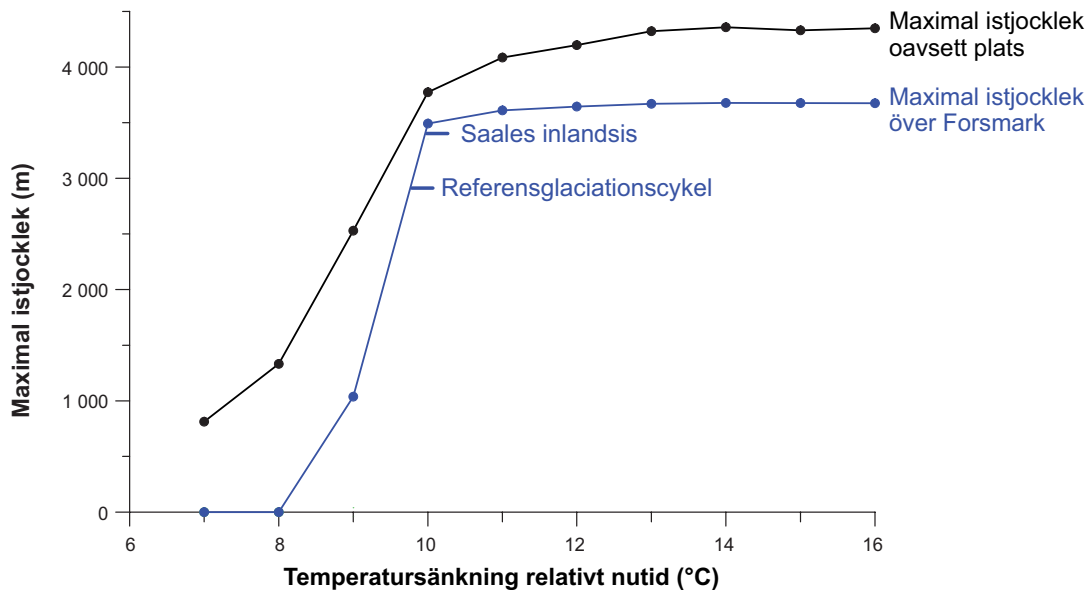


Figur 12-19. *Temperatursänkningar (övre diagrammet) och den resulterande utvecklingen av den fennoskandiska/eurasiska inlandsisens volym (nedre diagrammet).*

I referensglaciationscykeln var den maximala istjockleken över Forsmark 2 920 m, se figur 12-20. I de aktuella känslighetsanalyserna var den maximala istjocklek som utvecklades vid Forsmark 3 670 m. De enhetliga och höga värdena återspeglar att försvarsplatsen ligger i de inre delarna av dessa orealistiskt stora inlandsisar. Mer information om dessa simuleringar och en motivering till varför dessa extrema inlandsisar bör betraktas som orealistiska finns i avsnitt 5.4 i **Klimatrapporten**.

Uppskattning av maximal istjocklek vid Forsmark under de senaste två miljoner åren

Utifrån geologisk information är det känt att den största utbredningen hos en fennoskandisk inlandsis under Pleistocen (dvs under de senaste cirka två miljoner åren) var större än den under Weichselperioden. Den största inlandsisen förekom under Saaleglaciationen, se exempelvis /Svendsen et al. 1999, 2004, Lambeck et al. 2006, Colleoni et al. 2009/. Då Saaleglaciationen var som intensivast, för cirka 140 000 år sedan, nådde inlandsisen upp till cirka 200 km längre söderut och mer än 1 000 km längre österut än Weichselinlandsisen under sitt maximala skede. Modeller av inlandsisens maximala utbredning under Saaleglaciationen visade att den maximala istjockleken uppgick till cirka 3 200 m över Forsmarksområdet, se avsnitt 5.4 i **Klimatrapporten**. Enligt /Lambeck et al. 2006/ var den största istjockleken under Saaleglaciationen, för 140 000 år sedan, ungefär 3 400 m över Forsmarksområdet. Liknande värden kan härledas från /Colleoni et al. 2009/. Utifrån denna information bestäms den maximala förväntade mäktigheten på inlandsisen i Forsmark till 3 400 m. Från resultaten av extremfallen i känslighetsanalysen (se figur 12-20) är det osannolikt att istjockleken vid Forsmark under några omständigheter skulle kunna överstiga 3 700 m. Resultaten från känslighetsanalyserna kan betraktas som höga värden, eftersom det är osannolikt att en fennoskandisk inlandsis i realiteten någonsin skulle nå sin maximala jämviktsstorlek, dvs de storlekar som simulerats fram i dessa experiment. En beskrivning av osäkerheter i modellsimuleringarna finns i avsnitten 3.1.4, 3.1.7, och 5.4.2 i **Klimatrapporten**.



Figur 12-20. Maximal modellerad mäktighet hos inlandsisen för de schematiska klimatutvecklingarna i figur 12-19. Kurvorna visar den maximala istjockleken för Forsmarksområdet (blå) och den totalt sett största mäktigheten hos inlandsisen, oavsett var den förekommer, (svart). Det korta strecket markerat med Referensglaciationscykel visar den maximala tjocklek på inlandsisen som uppnås för det fallet. Det korta strecket markerat med Saale visar den uppskattade maximala istjockleken för den största inlandsisutbredningen som skett under de senaste två miljoner åren, enligt tolkningar från geologiska observationer; se avsnitt 5.4 i Klimatrapporten.

Uppskattning av maximal istjocklek för hela inlandsisen under de senaste två miljoner åren

I känslighetsanalyserna för kallare klimat, se figur 12-20, är den maximala simulerade istjockleken för hela inlandsisen 4 360 m. Det är 1 000 m mer än den maximala istjockleken för hela inlandsisen i referensglaciationscykeln, vilken är 3 300 m. En uppskattning av den maximala mäktigheten för den största inlandsisen under Pleistocen, dvs den under Saaleglaciationen, ger en maximal istjocklek på 3 600 m för hela inlandsisen. Andra simuleringar av inlandsisen under Saale ger en maximal istjocklek av 4 500 m, och då över Karahavet i Arktis /Lambeck et al. 2006/.

Som en jämförelse är den maximala istjocklek som förekommer på jorden i dag cirka 4 500 m för delar av den östantarktiska inlandsisen /Lythe et al. 2001/. Den grönländska inlandsisen har en maximal mäktighet av cirka 3 400 m /Bamber et al. 2001/. Med ett kallare glacialt klimat skulle den antarktiska inlandsisens maximala tjocklek troligen inte ändras markant. I ett sådant kallare klimat växer de yttre delarna av den antarktiska inlandsisen mycket, medan de inre delarna samtidigt behåller samma tjocklek eller till och med blir tunnare på grund av minskad nederbörd /Huybrechts 1990, Näslund et al. 2000/. Det är därför sannolikt att den antarktiska inlandsisens maximala tjocklek är ungefär 4 500 m även under en fullständig glaciationscykel. Detta värde ligger nära den totalt sett största istjockleken som uppnåddes vid känslighetsanalyserna, 4 360 m (se figur 12-20). Dessa resultat är även i linje med den maximala istjockleken hos den Laurentiska inlandsisen (4 300 m) /Tarasov och Peltier 2004/. Dessa observationer och resultat tyder på att inlandsisar under Pleistocen fram till i dag inte har vuxit sig tjockare än runt 4 500 m, vilket skulle kunna anses ge en övre gräns för inlandsisars mäktighet.

Hydrostatiska tryck som överstiger isövertrycket

Hydrostatiska tryck som överstiger isövertrycket kan förekomma i vissa situationer, till exempel i samband med jökellopp, dvs stora plötsliga utflöden av glacialt smältvatten från isdämda subglaciala eller supraglaciala sjöar /Roberts et al. 2000/. I några få fall har högre tryck, som inte härrör från jökellopp, registrerats även i mindre glaciärers avsmältningssområden. Dessa högre tryck är av artesisk karaktär, där storleken på trycket ytterst bestäms av glaciärisens mäktighet uppströms och av förekomsten av smältvatten. Detta fenomen kan även förekomma vid inlandsisar nära isfronten

/Roberts 2005/. Under tidsperioder med maximal tjocklek på inlandsisen över Forsmark, till exempel under det senaste glaciala maximumet, är dock förvarsplatsen lokaliserad under de inre delarna av inlandsisen, långt från ablationsområdet och isfronten. I en sådan situation är ytavsmältningen på inlandsisen obefintlig eller försumbar ovanför och uppströms förvarsplatsen vid Forsmark, på grund av isytans höga altitud och därmed följande låga lufttemperaturer. Dessutom är klimatet som kallast under denna period av glaciationscykeln, vilket ytterligare talar emot ytavsmältning i dessa högpolar delar av inlandsisen. Det är därför rimligt att anta att det maximala hydrostatiska trycket orsakat av inlandsis vid Forsmark enbart beror på den lokala istjockleken under perioder med maximal istjocklek, och inte på istjockleken och ytavsmältning uppströms förvarsplatsen.

Slutsatser

För referensglaciationscykeln är det extra hydrostatiska tryck som orsakas av istjockleken över Forsmark 26 MPa, se tabell 12-2. Det *maximala* förväntade extra hydrostatiska trycket, vilket pessimistiskt härleds från den största inlandsisen under de senaste två miljoner åren, är 30 MPa. När det hydrostatiska trycket för isfria förhållanden, 4,5 MPa, läggs till erhålls ett totalt maximalt hydrostatiskt tryck vid Forsmark av 34,5 MPa. Maximala istjocklekar för de mer extrema och orealistiska inlandsiskonfigurationer som diskuterats ovan, med sina tillhörande hydrostatiska tryck, återges även de i tabell 12-2.

Tabell 12-2. Maximal mäktighet hos inlandsisen och resulterande glacialt bidrag till hydrostatiskt tryck vid Forsmark för olika utbredningar hos den fennoskandiska inlandsisen.

	Maximal istjocklek (m)	Bidrag till hydrostatiskt tryck (MPa)
Referensglaciationscykeln	2 920	26
Största fennoskandiska inlandsisen under de senaste två miljoner åren (inlandsisen under Saale-perioden)	3 400	30
Extrema inlandsisar från känslighetsanalyser	3 670	32

12.7.3 Buffertens svälltryck

Buffertens initiala densitet

Buffertens mättade densitet enligt referensutförningen är 1 950–2 050 kg/m³. Deponeringshålets initiala diameter kan rimligtvis inte vara mindre än referensvärdet på 1,75 m, eftersom den avgörs av bormaskinens diameter. Dessutom kommer hålets diameter att kontrolleras innan det godkänns för deponering, enligt ytterligare beskrivning i **Berglinjerapporten**.

Referensdensitetens övre gräns på 2 050 kg/m³ ger ett svälltryck på ungefär 13 MPa för MX-80 och Ibeco RWC enligt figur 5-14. För maximalt tillåtet montmorillonitnehåll skulle detta orsaka ett svälltryck på ungefär 15 MPa /Karland 2010/. Det noteras dessutom att en mättad lera med en densitet av 2 100 kg/m³ ger ett både beräknat och experimentellt observerat svälltryck av ungefär 21 MPa.

Enligt avsnitt 5.5.3 kommer den maximala mättade densiteten runt kapseln att uppgå till 2 022 kg/m³ om ingen spjälkning förekommer (spjälkning leder till en lägre densitet). Den övre gränsen på 2 050 kg/m³ betraktas därför som pessimistisk.

Det noteras även att den totala påfrestning som kapseln utsätts för inte är summan av bentonitens svälltryck och det hydrostatiska trycket. Enligt /Harrington och Birchall 2007/ kan den totala påfrestningen σ uttryckas som:

$$\sigma = \Pi + \alpha p_w$$

där Π är det ursprungliga svälltrycket, p_w är porvattentrycket och α är en proportionalitetskonstant. Experimentellt har α befunnits ligga i intervallet 0,86–0,92. I de experiment som utförts av /Harrington och Birchall 2007/ med MX-80 med ett ursprungligt svälltryck av cirka 8 MPa, behåller bentoniten en del av sin ursprungliga svällning i intervallet 48 till 67 procent vid ett porvattentryck av 46 MPa. Det finns tecken på en minskning av hur mycket svälltrycket avtar då mottrycket ökar, vilket tyder på ökade α -värden vid höga vattentryck. Linjär regression ger att $\alpha = 1$ vid ett porvattentryck av ungefär 64 MPa.

Utgående från de slutsatser som dragits av /Harrington och Birchall 2007/ uppskattas det totala trycket, med ett hydrostatiskt tryck av 34,5 MPa och ett svälltryck av 15 MPa, till ungefär 46,7 MPa ($15 \text{ MPa} + 0,92 \cdot 34,5 \text{ MPa}$).

Kompaktering av bufferten

Bufferten kommer att ha ett högre svälltryck än återfyllningen vid ett mättat tillstånd. Därför förväntas ingen kompaktering av bufferten från svällningen av återfyllningen. Det finns emellertid en möjlighet att återfyllningen mätts och utvecklar sitt svälltryck innan bufferten gör detsamma. Denna situation har inte utvärderats direkt i SR-Site, men behandlas kortfattat i /Börgesson och Hernelind 2009/. Där anges det att fallet inte är av primärt intresse, eftersom det förekommer mycket lite kompression av buffertblock och buffertringar och blockens enaxliga kompressionshållfasthet ligger i samma område som det fullständigt utvecklade svälltrycket från återfyllningen.

Buffertens kemiska omvandlingar och densitetsförluster

Buffertens svälltryck bestäms av buffertens densitet och kemiska sammansättning, inklusive den adsorberade katjonen. Alla identifierade kemiska förändringar (jonbyte, osmos och mineralomvandling, se avsnitt 10.3.10) i bufferten ger ett oförändrat eller minskat svälltryck (möjligen med undantag av en marginell effekt för Ca-bentonit med hög densitet). Det antas därför pessimistiskt att inga sådana omvandlingar äger rum.

Enligt FEP-diagrammet kan buffertmaterial förloras genom mekanismerna kanalbildning, erosion och svällning in i deponeringstunneln. Det antas pessimistiskt att inget buffertmaterial förloras över tiden på grund av dessa processer.

Konceptuella osäkerheter

Ingen process har identifierats som skulle kunna öka buffertens svällning till ett värde som är högre än det ursprungliga startvärdet. Trycket förväntas bli enligt vad som anges ovan eller lägre för alla tänkbara förhållanden.

Deponeringshålens konvergens

Ett möjligt problem är deponeringshålens konvergens. Ingen återstående osäkerhet har identifierats som skulle kunna tala mot slutsatsen från referensutvecklingen, det vill säga att effekterna av konvergens är försumbara, se avsnitt 10.3.5.

12.7.4 Kapselns hållfasthet

Enligt avsnitt 5.4.3 har omfattande utvärderingar av kapselns förmåga att motstå isostatisk last utförts som en del av designanalysen för kapseln /Raiko et al. 2010/. Dessa analyser var inriktade på att påvisa att kapseln kan motstå den dimensionerande lasten av 45 MPa. Det har visats att detta uppnås med stor marginal, både avseende att undvika lokal plastisk kollaps av insatsen till följd av variation i materialegenskaperna samt avseende tillåtna defektstorlekar i förhållande till förväntade och detekterbara defekter. Det är sannolikt att det går att visa att kapseln kan motstå avsevärt högre last om insatsen har dessa lokala egenskaper, men gränsen har inte kvantifierats. Det har även visats att insatsen kan tillverkas med en fullt tillräcklig noggrannhet med avseende på de kritiska mått som är relaterade till isostatisk last.

Dessutom har lasten för total kollaps för den cylindriska delen av en kapsel (utan defekter) beräknats till 99 MPa och 128 MPa för BWR- respektive PWR-insatser /Raiko et al. 2010/. Resultat från trycktester av verkliga kapslar visar att kollapslasten för kapseln är ungefär 100 MPa eller högre /Raiko et al. 2010/.

Därför dras slutsatserna att:

- *Total kollaps* av insatsen, dvs kriteriet för kapselbrott, inte förväntas inträffa för laster under åtminstone 90 MPa, både enligt modellberäkningar och laborietester.
- *Lokal kollaps* utesluts med stor marginal för laster upp till 45 MPa.

12.7.5 Kombinerad analys

Enligt avsnitt 12.7.3 kan ett maximalt svälltryck av 15 MPa uppstå i bufferten.

Grundvattentrycket vid Forsmark är ungefär 4,5 MPa under isfria förhållanden. Enligt avsnitt 12.7.2 kan ett ytterligare grundvattentryck av högst 30 MPa förekomma som en följd av en maximal glacial last, vilket det finns geologiska belägg för.

Detta skulle vid Forsmark ge en maximal möjlig isostatisk last av 49,5 MPa på kapseln om det hydrostatiska trycket och svälltrycket adderas. Om ett α -värde på 0,92 enligt avsnitt 12.7.3 används vid summeringen, blir resultatet ett totalt tryck av ungefär 46,5 MPa.

Enligt avsnitt 12.7.4 undviks lokal kollaps med stor marginal vid 45 MPa, vilket indikerar att lokal kollaps undviks även vid 49,5 MPa. Marginalen till total kollaps (90 MPa), dvs till kriteriet för kapselbrott, är avsevärd.

Generellt kan följande slutsatser dras:

- Total kollaps är det relevanta brottkriteriet, eftersom bara denna typ av brott leder till utsläpp av radionuklider från kapseln.
- Marginalen för att kapselbrott ska förhindras till följd av isostatisk last är fullt tillräcklig, även vid de mest extrema lastsituationerna.

Olika händelseföljder

Det finns inga alternativa händelseföljder att ta hänsyn till vid hanteringen av detta scenario, eftersom pessimistiska antaganden görs och maximala konsekvenser eftersträvas för alla inblandade faktorer. Under den en miljon år långa analysperioden kommer kapseln att utsättas för omkring åtta glaciationer, vilket ger upprepade lastcykler. Det är emellertid alldeles för få händelser för att ge någon utmattningseffekt på segjärninsatsens mekaniska stabilitet.

Kombination av isostatisk last och skjuvrörelser

Se skjuvlastscenariot, avsnitt 12.8.2, där slutsatsen dras att det kombinerade fallet inte behöver beaktas.

Variant med global uppvärmning och övriga klimatfall

Förekomsten av höga grundvattentryck står i direkt samband med glaciala förhållanden. Den fördröjning av glaciala förhållanden som sker i varianten med global uppvärmning, skulle därför i detta avseende gynna förvarets säkerhet. Denna fråga behandlas därför inte ytterligare för varianten med global uppvärmning.

Eftersom klimatfallet med *maximal inlandsisutbredning* (se avsnitt 12.1.3) har använts vid analysen ovan och eftersom detta fall definierades för att maximera den isostatiska lasten på kapseln, behöver inga ytterligare klimatfall beaktas.

Kategorisering som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”

Med utgångspunkt från analysen ovan betraktas detta scenario, dvs kapselbrott till följd av isostatisk last, som ett ”restscenario”, vilket innebär att dess följder inte tas med i risksummeringen.

Konsekvenser vad gäller radionuklidtransport och årlig effektivdos för en antagen isostatisk kollaps behandlas i avsnitt 13.7.1.

12.8 Kapselbrott till följd av skjuvlast

12.8.1 Inledning

Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)

Detta scenario gäller främst den säkerhetsfunktion som rör skjuvlast på kapseln. Om skjuvlasten på kapseln blir för stor antas det att kapseln förlorar sin inneslutningsförmåga (säkerhetsfunktion Can3).

Säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier som är relevanta för utvärderingen av denna typ av kapselbrott är i) skjuvningen över deponeringshålet ska vara mindre än 0,05 m (R3b) och ii) densiteten hos den mättade bufferten får inte överstiga 2 050 kg/m³ för att R3b-kriteriet ska vara tillämpligt (Buff 3).

Denna säkerhetsfunktion är direkt relaterad till inneslutning, eftersom inneslutningen antas brytas om kriteriet för säkerhetsfunktionen R3b inte upprätthålls. Om detta skulle inträffa påverkas också systemets fördröjningsförmåga, eftersom skjuvning i berget påverkar buffertens och bergets fördröjningsegenskaper negativt.

Behandling av kapselbrott till följd av skjuvlast i referensutvecklingen

Sannolikheten för att kapselbrott ska uppstå till följd av skjuvlast är låg och därför har denna brotttyp uteslutits från referensutvecklingen, se avsnitt 12.1.2. Detta motiveras av resultaten från analysen av referensutvecklingen som beskrivs i avsnitt 10.4.5.

Analysen nedan utvärderar om alla osäkerheter beaktades på ett tillbörligt sätt i referensutvecklingen och ger också en övre gräns för sannolikheten att kapselbrott ska uppstå till följd av skjuvlast.

Denna övre gräns är kopplad till de resultat för den pessimistiskt härledda frekvensen av kapselbrott till följd av skjuvlast som beskrivs i avsnitt 10.4.5 och som illustreras i figur 10-124.

Kvalitativ beskrivning av förlopp som leder till kapselbrott till följd av skjuvlast

Utvecklingen i detta scenario antas vara identiskt med den för referensutvecklingens basfall, förutom för faktorer som är kopplade till kapselbrott till följd av skjuvlast.

Som framgår av FEP-diagrammet avgörs segjärnsinsatsens förmåga att stå emot skjuvlast av kapselns konstruktion samt av produktionens och den oförstörande provningens kvalitet. Skjuvspänningen på kapseln avgörs av beskaffenheten hos förskjutningen längs med den spricka som skär deponeringshålet samt av sättet med vilket skjuvlasten fortplantas genom bufferten. Buffertens densitet påverkar denna fortplantning, vilket betyder att den initiala buffertdensiteten måste utvärderas. Skjuvlasten avgörs av sannolikheten för att en spricka av en viss storlek skär deponeringshålet, vilket i sin tur beror på egenskaperna hos spricknätverket i omgivande berg och på sannolikheten för att kunna hitta och undvika olämpliga sprickor i deponeringshålen.

Även sannolikheten för att tillräckligt stora jordskalv ska inträffa under analysperioden måste utvärderas.

Följande faktorer som är av betydelse för om kapselbrott till följd av skjuvlast kommer att inträffa har – med utgångspunkt från diskussionen ovan – identifierats utifrån tabell 10-27, som beskriver de osäkerheter som identifierats för referensutvecklingen, och utifrån FEP-diagrammet i figur 8-4.

Berörda initialtillståndsfaktorer

- Insatsens hållfasthet och förekomsten av defekter (gjutningskvalitet).
- Kopparhöljets mekaniska egenskaper.
- Buffertdensitet.
- Buffertmaterialets egenskaper.
- Spricknätverkets egenskaper.
- Effektiviteten hos systemet som används för att sovra deponeringshål.

Berörda processer

- Kapsel: Deformation av kopparkapseln; kryp.
- Kapsel: Deformation av segjärnsinsatsen.
- Buffert: Svällning/massomfördelning.
- Buffertomvandling.
- Geosfär: Reaktivering av sprickor som en följd av jordskalv.

Berörda externa förhållanden

- Jordskalv.

Buffertförhållanden som förs vidare

Enligt avsnitt 12.5 förs tre olika buffertförhållanden vidare till kapselscenarierna. Två av dessa rör advektiva förhållanden i bufferten och det tredje avser den intakta bufferten. Eftersom advektiva förhållanden är kopplade till en eroderad buffert, som har ett lägre svälltryck än en intakt buffert, är sådana förhållanden av mindre betydelse när kapselbrott till följd av skjuvning ska utvärderas. Därför är det endast den intakta bufferten som behandlas ytterligare i analysen av kapselbrott till följd av skjuvlast. Utvärderingen belyser då om den intakta bufferten under några omständigheter kan ha en högre densitet än vad som specificeras för initialtillståndet. (Dessutom diskuteras den omvandlade bufferten som ett restfall nedan.)

12.8.2 Kvantitativ analys av förlopp som leder till kapselbrott till följd av skjuvlast

I designanalysen av kapseln har det gjorts omfattande studier av hur systemet kapsel-buffert reagerar på skjuvlast /Raiko et al. 2010/. Dessa utgör en viktig grund för **Produktionsrapporten för kapseln**. Syftet med dessa studier är att fastställa att kapseln uppfyller de konstruktionsförutsättningar som anger att barriären för kopparkorrosion ska vara intakt efter en 5 cm lång skjuvrörelse med en hastighet av 1 m/s för buffertmaterialegenskaper hos en Ca-bentonit med en densitet av 2 050 kg/m³. Detta gäller för alla positioner och vinklar för skjuvsprickan i deponeringshålet och för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatiska laster efter sådana skjuvrörelser.

I designanalysen måste flera av de faktorer som anges ovan tas hänsyn till och utvärderas. Detta gäller följande faktorer relaterade till initialtillståndet: insatsens hållfasthet, kopparhöljets mekaniska egenskaper, buffertens densitet och buffertmaterialets egenskaper. I designanalysen beaktas också deformation av kopparkapseln och segjärnsinsatsen, inklusive kryp i kopparn.

Den övergripande slutsatsen från designanalysen är att kapseln uppfyller de konstruktionsförutsättningar som avser skjuvlast, såsom diskuteras ytterligare i avsnitt 5.4.3. I designanalysrapporten dras dessa slutsatser efter en diskussion av alla relevanta osäkerheter hos de fenomen som ingår i analysen, dvs osäkerheter som avser ovan nämnda initialtillståndsfaktorer och processer har beaktats. Dessa diskuteras därför inte här.

Vid designanalysen beaktas materialegenskaper ned till 0 °C i enlighet med konstruktionsförutsättningarna. Som visades för buffertfrysningsscenarioet, se avsnitt 12.3, har temperaturer under 0 °C uteslutits för Forsmark, vilket betyder att resultaten från designanalysen gäller för samtliga relevanta temperaturer i förvaret.

Följder av omvandlingar i bufferten diskuteras i avsnitt 10.4.5 och det hävdas att omvandlingarna inte utgör ett problem i ett stiliserat beräkningsfall där en väsentlig del av bufferten antas vara cementerad. Detta, i kombination med det faktum att buffertomvandling betraktas som ett restscenario i avsnitt 12.4, ger slutsatsen att buffertomvandlingar inte har någon betydelse för skjuvlastscenariot.

I referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.5, hävdas att det finns marginal i de resultat som erhöles vid designanalysen. I många av de skjuvningsfall som analyserats, exempelvis för olika vinklar hos de skärande sprickorna och olika angreppspunkter, finns stöd för att kapseln i själva verket skulle stå emot lasten från en 10 cm lång skjuvrörelse. Detta får ytterligare stöd av det faktum att det

initialtillstånd för bufferten, som erhöles från en analys av referensmetoderna för tillverkning och installation av bufferten, ger en övre gräns för buffertdensiteten på 2 022 kg/m³, vilket är lägre än den övre gränsen på 2 050 kg/m³ i konstruktionsförutsättningarna. Dessutom utgöres kriteriet för kapselbrott av den tillåtna defektstorleken för ytdefekter i insatsen. Penetration av kopparhöljet antas ske i samma ögonblick som kriteriet överskrids. Spänningarna i kopparhöljet är låga (med undantag för modellsingulariteter) jämfört med kraven på kopparmaterialets duktilitet. Det noteras att koppartjocklekar som understiger 50 mm något inte utvärderats.

Nedan följer en diskussion om osäkerheter som rör faktorer kopplade till geosfären.

Spricknätverk

Osäkerheter i beskrivningen av spricknätverket hanteras med hjälp av alternativa diskreta spricknätverksmodeller (DFN), som tillsammans täcker in ett brett spektrum av osäkerheter (se **Datarapporten** för detaljer). I referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.5, utfördes alla beräkningar med alla tre DFN-modeller som föreslagits för förvarsplatsen i Forsmark, vilket gav ett intervall (minimum-maximum) för antalet potentiellt skadade kapslar. Då frekvensen för kapselbrott som funktion av tid härleddes i avsnitt 10.4.5 valdes det maximala värdet för detta intervall.

För de analyser som sammanfattas i avsnitt 10.4.5 gjordes dessutom det pessimistiska antagandet att alla jordskalv inträffar i den deformationszon (A2) som påverkar flest kapslar. Som hävdas i /Munier 2010/ minskar dessutom användningen av FPI-kriterierna avsevärt den påverkan DFN-osäkerheter har på antalet kapslar som skärs av potentiellt kritiska sprickor.

Effektiviteten i systemet som används för att sovra deponeringshål

Antalet kapslar som kan gå sönder till följd av skjuvlast under analysperioden beror på hur väl man kan hitta och undvika stora sprickor i deponeringshålen. EFPC för sovring av deponeringshål har visat sig vara effektivt för att hitta kritiska strukturer och gör det möjligt att hitta mer än 97 procent av de kritiska deponeringspositionerna, oavsett vilken DFN-modell som används /Munier 2010/. De återstående positionerna förs vidare till analysen av jordskalvsinducerade kapselskador, se avsnitt 10.4.5. För att förenkla beräkningarna baseras EFPC-simuleringarna på idealiseringar av sprickor i form av perfekt plana, oändligt tunna diskar. De flesta verkliga sprickor uppvisar många egenskaper som kan användas som representationer av storlek /Cosgrove et al. 2006/. Som hävdas i /Munier 2010/ är det därför troligt att kritiska sprickor, som inte upptäcks med de simuleringar som används som indata vid denna analys, kommer att hittas med ett noggrant utformat undersökningsprogram /SKB 2010b/. Det är således troligt att antalet potentiellt skadade kapslar kommer att vara lägre än det som förutses i denna analys.

Jordskalv – i synnerhet av postglacialt ursprung

Den största osäkerheten rör frågan om hur ofta jordskalv inträffar under olika tidsperioder. I referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.5, beaktades samtliga relevanta uppskattningar av långsiktiga jordskalvfrekvenser, vilket därmed gjorde det möjligt att definiera ett frekvensintervall. Detta frekvensintervall kombinerades sedan med intervallet för kritiskt placerade kapslar för att slutligen få ett intervall för antalet potentiellt skadade kapslar.

Frekvensen för kapselbrott som funktion av tid härleddes i avsnitt 10.4.5 och i samband med detta valdes även det maximala värdet för detta intervall.

Reaktivering av sprickor till följd av jordskalv

Osäkerheter som rör reaktivering av sprickor till följd av jordskalv diskuteras i referensutvecklingen, se avsnitt 10.4.5. Flera pessimistiska tillvägagångssätt används för att kvantifiera reaktivering av sprickor och dessa upprepas inte här.

Kombination med isostatisk last

Som diskuterades i avsnitt 10.4.5 ökar stabiliteten hos sprickorna i berggrunden under perioder med hög isostatisk last. Detta är en konsekvens av hur spänningar i den övre delen av jordskorpan förväntas

utvecklas som en följd av en typisk framtida glaciationscykel i enlighet med analyser av storskaliga interaktioner mellan is, jordskorpa och mantel /Lund et al. 2009/. Således behöver de kombinerade effekterna av höga isostatiska tryck och skjuvlast över kapslarna inte beaktas ytterligare.

Kumulativa effekter av flera jordskalv

Den förskjutning som induceras på stora sprickor vid ett jordskalv kan vara mindre än kapselbrottskriteriet på grund av sprickans läge, riktning, lokala spänningsfält och andra faktorer. Det är emellertid möjligt att förskjutningar längs en viss spricka ackumuleras så att kriteriet överskrids om flera upprepade stora jordskalv skulle inträffa.

Det är tveksamt om stora jordskalv kan behandlas som oberoende händelser, på så sätt som antyds av ovanstående tidsberoende, frekvensbaserade resonemang. I själva verket är stora jordskalv som inträffar under en glaciationscykel troligen *beroende* händelser, eftersom frigörelsen av elastisk energi minskar spänningen i förkastningen, så att ett annat stort jordskalv längs med samma förkastning inte är lika trolig. På motsvarande sätt, men i en annan skala, minskar förskjutningar spänningen i den aktuella sprickan så att ännu en förskjutning är mindre trolig – i synnerhet en förskjutning med samma storlek och riktning.

Genom att ta hänsyn till töjningshastigheten uppskattades i avsnitt 10.4.5 den tid som behövs för att en förkastning ska ackumulera tillräckligt med spänning för att ett nytt jordskalv ska inträffa. Utifrån antagandena i avsnitt 10.4.5 gjordes uppskattningen att det maximalt kan inträffa två stora seismiska händelser längs med samma förkastning under den en miljon år långa analysperioden. Förskjutningsvektorer för de sprickor som skär kapslarna antogs sedan försiktigt vara helt parallella, vilket underförstått förutsätter att samma zon reaktiveras och att jordskalvmekanismen (förskjutningshastighet, spänningsminskning, skjuvning, etc) är identisk. Någon hänsyn togs inte till den positiva effekten av att bufferten återställs mellan de seismiska händelserna. Vidare antogs en konstant förskjutningshastighet (1 m/s) oavsett förskjutningsbeloppet längs de aktuella sprickorna. Sammantaget bedöms därför att den kumulativa effekten av upprepade jordskalv som behandlades i avsnitt 10.4.5 ger en övre, pessimistisk uppskattning av antalet kapselbrott.

Variant med global uppvärmning och övriga klimatfall

De externa förhållanden som är relevanta för att stora jordskalv ska inträffa har redan beaktats i ovanstående analys.

12.8.3 Slutsatser

Kategorisering som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”

Utifrån ovanstående analys kan detta scenario betraktas som ”mindre sannolikt”, vilket betyder att dess följder ska tas med i risksummeringen.

Ovanstående analys visar att osäkerheter för detta scenario behandlades uttömmande i referensutvecklingen. Därför används de sannolikheter för kapselbrott som uppskattades i avsnitt 10.4.5, se figur 10-124, för konsekvensberäkningarna i avsnitt 13.6 och betraktas som gränssättande för riskbidraget från skjuvlastscenariot.

12.9 Sammanfattning och kombinationer av analyserade scenarier

12.9.1 Sammanfattning av analysresultaten

Sammanfattningsvis drogs följande slutsatser när de utvalda scenarierna analyserades enligt beskrivningen ovan.

- Advektion i bufferten: Situationen kan uppträda i referensutvecklingen. De ytterligare analyserna i avsnitt 12.2, rörande konceptuella osäkerheter och ytterligare tolkningar av platsens hydrauliska egenskaper, ger ett intervall för buffertadvektionens möjliga omfattning. *Dessa konsekvenser fördes vidare till kapselkorrosionsscenariot.*

(Kapselsjunkning till botten av deponeringshålen utgör, med avseende på konsekvenser, ett specialfall av advektion i bufferten. De ytterligare analyserna i avsnitt 12.2.4 leder till slutsatsen att kapselsjunkning – om det inträffar – föregås av advektiva förhållanden i bufferten till följd av bufferterrosion. Konsekvenserna av en möjlig kapselsjunkning täcks därför in av den allmänna behandlingen av advektion i bufferten.)

- Buffertfrysning: Buffertfrysning utesluts i referensutvecklingen, även för en eroderad buffert. De ytterligare analyserna i avsnitt 12.3 leder också till slutsatsen att frysning av en intakt buffert kan uteslutas och att detta därmed ska betraktas som ett restscenario. Detta gäller även frysning av vatten i hålrum hos en delvis eroderad buffert. *Fallet buffertfrysning förs därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Buffertomvandling: Analyserna av en hög bufferttemperatur, eller andra omständigheter som leder till omvandling av buffertmaterialet i avsnitt 12.4, leder till slutsatsen att detta bör betraktas som ett restscenario. *Fallet buffertomvandling förs därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Kapselbrott till följd av korrosion: Denna typ av kapselbrott ingår i referensutvecklingen, där den inträffar i fallet med advektiv transport genom en eroderad buffert. De ytterligare analyserna i avsnitt 12.6, med indata från scenariot med advektion i bufferten, se avsnitt 12.2, leder till slutsatsen att advektion i bufferten verkligen är den huvudsakliga potentiella orsaken till korrosionsbrott. Utvärdering av alla advektiva situationer och andra osäkerheter relaterade till korrosion ger ett intervall för möjliga omfattningar av korrosionsbrott. *Dessa förs vidare till analysen av konsekvenser för korrosionsscenarioet i avsnitt 13.5.*
- Kapselbrott till följd av isostatisk last: Den här typen av kapselbrott utesluts i referensutvecklingen och analysen i avsnitt 12.7 leder till slutsatsen att den bör behandlas som ett restscenario. Konsekvenser för ett hypotetiskt fall med kapselbrott till följd av isostatisk last analyseras i avsnitt 13.7.1.
- Kapselbrott till följd av skjuvlast: Den här typen av kapselbrott analyseras i referensutvecklingen, där sannolikheten för att den ska inträffa är låg även med ett flertal pessimistiska antaganden, se avsnitt 10.4.5. Denna slutsats kvarstår efter de ytterligare analyserna i avsnitt 12.8. *Den pessimistiskt uppskattade frekvensen av kapselbrott till följd av skjuvlast förs vidare till analyserna av konsekvenser för skjuvlastscenariot i avsnitt 13.6.*

12.9.2 Bedömning av inneslutningspotential för huvudscenariot

Som nämns i avsnitt 12.1.2 görs bedömningen av inneslutningspotentialen i huvudscenariot efter analysen av de ytterligare scenarierna, så att bedömningen även kan baseras på utvärderingen av osäkerheter som utförts i analysen av ytterligare scenarier. Eftersom endast två av de ytterligare scenarierna ledde till slutsatsen att kapselbrott inte kunde uteslutas, och eftersom osäkerhetsspannet för de ytterligare scenarierna är bredare än det för huvudscenariot, behöver endast dessa två typer av kapselbrott beaktas vid utvärderingen av inneslutningspotentialen i huvudscenariot.

Baserat på analyserna i korrosionsscenarioet i avsnitt 12.6.2 ses den centrala korrosionsvarianten som representativ för huvudscenariot, eftersom den har en viss sannolikhet för att inträffa mot bakgrund av de försiktiga antaganden som ligger till grund för den och eftersom den är förenlig med förvarets referensutveckling.

Med avseende på kapselbrott till följd av skjuvlast i huvudscenariot är sannolikheten för skjuvbrott i referensutvecklingen låg; i medeltal 0,078 kapslar under en miljon år, även med ett flertal pessimistiska antaganden om sannolikheten för jordskalv, jordskalvens läge i förhållande till sprickzoner, omfattningen av sekundära rörelser för en given sprickstorlek, valet av geologisk DFN-modell, antaganden om inverkan av skjuvsprickors infallsposition och vinkel på buffert-kapselsystemet, hanteringen av multipla jordskalv, etc. Därför anses det motiverat att utesluta den här typen av kapselbrott från huvudscenariot. Observera dock att detta inte minskar den beräknade risken, eftersom skjuvlastscenariot är baserat på alla nämnda pessimistiska antaganden och att dessa pessimistiska antaganden inte medför att sannolikheten för skjuvlastscenariot minskar när det förs vidare till konsekvensberäkningarna.

Sammanfattningsvis bedöms inneslutningspotentialen för huvudscenariot representeras av den för den centrala korrosionsvarianten i avsnitt 12.6.2.

12.9.3 Kombinationer av analyserade scenarier och fenomen

Kombinationer av de analyserade scenarierna måste beaktas. Emellertid är det viktigt att notera att flera sådana kombinationer redan har behandlats, eftersom buffertscenarierna var de första som analyserades i den använda metodiken för scenarioanalys. Resultat från de buffertscenarier som inte bedömdes som restscenarier fördes sedan vidare till analyserna av kapselscenarierna. Likaså måste fenomen som utvecklas gradvis beaktas.

Enligt ovanstående sammanfattning visar scenarieanalyserna i det här kapitlet att de enda betydelsefulla säkerhetsrelaterade försämringarna av det tekniska barriärsystemet som inte kan uteslutas är förlust av buffert till följd av erosion, korrosion av kopparkapseln när bufferterrosionen har pågått till stadiet då advektiva förhållanden har uppkommit och kapselbrott till följd av skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålet. Därtill kan kapseln utsättas för betydande isostatiska laster, fastän inte till den grad att kapselbrott sker. Buffertfrysning och buffertomvandling utesluts.

I den följande diskussionen om kombinationer ligger tyngdpunkten på kombinationer av fysikaliska fenomen snarare än på kombinationer av de formella scenarierna. För att rikta in diskussionen mot en redovisning av kombinationer av potentiellt skadliga fenomen behandlas termisk, hydraulisk, mekanisk och kemisk påverkan på bufferten och på kapseln i ljuset av resultaten av analyserna av referensutvecklingen och scenarierna.

- Den termiska påverkan på kapseln och bufferten utgörs initialt av förhöjda temperaturer och under permafrostförhållanden av de lägsta temperaturerna. Som redovisas i avsnitt 10.3.4 är de säkerhetsrelaterade termiska kraven på förvaret uppfyllda och i scenarieanalyserna har ingenting som strider mot den slutsatsen framkommit, i synnerhet vad gäller buffertomvandling, se avsnitt 12.4. Som också nämns ovan utesluts buffertfrysning i analysen av buffertfrysningsscenarioet. Termiska aspekter behandlas därför inte vidare i det följande.
- Två mekaniska fenomen av betydelse för långsiktig säkerhet har identifierats: kapselbrott till följd av skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålet och kapselbrott till följd av isostatisk last. Dessutom inkluderas termiskt inducerad spjälkning i de transportanalyser den påverkar. Ett flertal ytterligare mekaniska fenomen, huvudsakligen relaterade till berget, har uteslutits antingen i referensutvecklingen eller i sållningen i **Processrapporten för geosfären**.
- Den hydrauliska påverkan på bufferten och kapseln sker indirekt som en del av bufferterrosions- och kapselkorrosionsprocesserna som behandlas i det följande. Grundvattentransport av lösta ämnen kan också bidra till försämringen av bufferten, men den processen anses vara försumbar i analysen av buffertomvandlingsscenarioet.
- Även den kemiska påverkan på bufferten och kapseln ingår som en del av bufferterrosions- och kapselkorrosionsprocesserna som behandlas i det följande.

Fenomen som har uteslutits i **Processrapporterna**, referensutvecklingen eller scenarieanalyserna behandlas därför inte vidare här. Uteslutningen av dem styrks emellertid ytterligare i avsnitt 14.4, där det verifieras att FEP som uteslutits i tidigare delar av utvärderingen är försumbara i ljuset av den slutförda scenario- och riskanalysen.

Efter analyserna av referensutvecklingen och scenarierna kvarstår följande processer, vars kombinationer måste beaktas:

- förlust av buffert till följd av erosion,
- korrosion av kopparkapseln när bufferterrosion har fortgått till stadiet då advektiva förhållanden har uppkommit,
- kapselbrott till följd av skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålet,
- isostatiska laster på kapseln.

Förlust av buffert till följd av erosion och kapselkorrosion under advektiva förhållanden har redan kombinerats i korrosionsscenarioet och behandlas därför tillsammans i fortsättningen. Därmed kvarstår tre fenomen för vilka kombinationer och gradvis utveckling måste behandlas.

Buffererosion och kapselkorrosion i kombination med skjuvrörelse

Erosionens inverkan på effekter av skjuvrörelser: Om bufferten är eroderad är sannolikheten för brott till följd av skjuvrörelser väsentligt reducerad på grund av den minskade buffertstyvheten, i synnerhet nära en potentiell skjvspricka. Kombinationen är därför gynnsam för säkerheten och det är pessimistiskt att bortse från den.

Erosionens betydelse för radiologiska konsekvenser av skjuvrörelseinducerade brott: Brott till följd av en skjuvrörelse i ett deponeringshål med en intakt buffert som därefter eroderas behandlas i konsekvensanalyserna i skjuvsceariot, se avsnitt 13.6. Sannolikheterna för att dessa två fenomen ska inträffa är inte oberoende av varandra, eftersom båda är positivt korrelerade till sprickstorlek.

Korrosionens betydelse för kapselns reaktion på skjuvrörelser: Det måste beaktas om en delvis korroderad kapsel är känsligare för påverkan från skjuvrörelser. Först noteras att kapselinsatsen är den lastbärande komponenten och att insatsen inte påverkas av kopparkorrosion. Dessutom tål ett intakt kopparhölje en 5 cm skjuvrörelse med god marginal. Det har visats att korrosion reducerar kopparhöljets tjocklek med som mest några få millimeter för en intakt buffert. Under beaktande av de stora marginalerna för en intakt 50 mm kapsel är det därmed orimligt att ett sådant korrosionsdjup skulle utgöra en risk för integriteten hos kopparhöljet i händelse av en skjuvrörelse. Betydande korrosion kan inträffa om bufferten eroderar. Erosion av bufferten är emellertid gynnsam vad beträffar den mekaniska påverkan av skjuvrörelser på kapseln, se ovan. Därför motverkas den tänkbara ökade känsligheten för skjuvrörelser hos en korroderad kapsel av det faktum att spänningarna minskar, i synnerhet i det korroderade område där bufferten förlorats. Det noteras att skjuvanalyserna utförs för 50 mm koppar, eftersom den resulterande koppartjockleken efter tillverkning ännu inte hade utvärderats när analysen gjordes. En koppartäckning på 47 mm används däremot vid korrosionsanalyserna för advektiva förhållanden. Detta betraktas vara en försumbar skillnad.

Korrosionens betydelse för radiologiska konsekvenser av skjuvrörelseinducerade brott: Eftersom en kapsel som utsatts för ett skjuvrörelseinducerat brott inte tillskrivs något transportmotstånd för radionuklider får korrosion i analysen inte någon negativ inverkan på konsekvenserna av ett skjuvrörelseinducerat brott.

Inverkan av skjuvrörelser på buffererosion: Skjuvrörelser som inte leder till brott har en utsträckning som är mindre än 5 cm, eftersom kapseln är utformad för att motstå 5 cm långa rörelser. Sådana mindre rörelser har en begränsad påverkan på buffertjockleken och därmed även på den tid som krävs för att advektiva förhållanden ska uppnås enligt känslighetsanalyserna i avsnitt 12.2.2. En skjuvrörelse kan även leda till ett kraftigare flöde i skjvsprickan. Medelantalet deponeringshål som beräknas utsättas för skjuvrörelser på 5 cm eller mer under den en miljon år långa analysperioden är dock omkring 0,08, medan minst flera tiotal hål beräknas utsättas för kraftig erosion under en miljon år vid de antaganden som gjorts i SR-Site, se figur 12-3. Även med antagandet att mycket mindre skjuvrörelser leder till förhöjt flöde skulle därför den samlade påverkan på omfattningen av buffererosion i förvaret vara liten.

Skjuvrörelsers inverkan på korrosion: Skjuvrörelser kommer att ge upphov till spänningar i kopparhöljet, även om rörelsen inte leder till kapselbrott. För att spänningar ska ha en påverkan på korrosionen (på grund av sprickbildning genom spänningskorrosion) måste det finnas höga koncentrationer av skadliga anjoner (såväl som oxiderande förhållanden). Sådana förhållanden förväntas inte råda i förvarsmiljön, se avsnitt 10.2.5, och det finns ingen anledning till att skjuvrörelser skulle ge upphov till en dylik miljö.

Buffererosion och kapselkorrosion i kombination med isostatisk last

Erosionens inverkan på isostatisk last: Erosion av bufferten leder till en minskad isostatisk last på kapseln. Den här kombinationen är därför gynnsam för säkerheten och det är pessimistiskt att bortse från den.

Korrosionens inverkan på tålighet mot isostatisk last: En delvis korroderad kapselyta har ingen negativ inverkan på kapselns tålighet mot isostatiska laster, eftersom det är insatsen som bär upp lasten.

Inverkan av isostatisk last på erosion och korrosion: Det finns inget skäl att anta att en större isostatisk last har en negativ påverkan på buffererosions- och kapselkorrosionsprocesserna, förutom att detta i en del situationer är förknippat med ett större grundvattenflöde. Detta senare fenomen ingår vid analyserna av buffererosions- och kapselkorrosionsscenarierna.

Skjuvrörelse i kombination med isostatisk last

Inverkan av isostatisk last på skjuvrörelser: I avsnitt 10.4.5, i delavsnittet ”Kombinerade isostatiska laster och skjuvlaster”, dras slutsatsen att en isostatisk last under en skjuvförskjutning inte resulterar i en kraftigare påverkan på kapseln än motsvarande fall utan isostatisk last. En ytterligare slutsats är att detta fall är orealistiskt, eftersom kraftiga jordskalv inte inträffar i samband med höga isostatiska laster.

Inverkan av skjuvrörelse på förmågan att stå emot isostatisk last: Som konstateras i avsnitt 10.4.5, i underavsnittet ”Kombinerade isostatiska laster och skjuvlaster”, förväntas kapseln bibehålla sin förmåga att stå emot isostatiska laster efter att ha utsatts för en 5 cm skjuvrörelse, i enlighet med konstruktionsförutsättningarna för kapseln.

Gradvis utvecklande fenomen

Erosion och korrosion är till sin natur fenomen som gradvis utvecklas och har analyserats som sådana. Korrosion behandlas dock i detalj för en intakt buffert eller då bufferten saknas. Därför måste även korrosion för en eroderande buffert beaktas, se nedan. Skjuvrörelser uppträder som distinkta händelser. Emellertid kan den ackumulerade effekten av flera mindre skjuvrörelser ses som en gradvis utvecklande last på kapseln. Detta har redan behandlats i analyserna av skjuvrörelser, se avsnitt 10.4.5, underavsnitt ”Fall med skjuvlast att beakta”. Isostatiska laster tilltar gradvis då bufferten sväller och i synnerhet då inlandsisar växer till, vilket resulterar i förhöjda grundvattentryck. Dessa förändringar är emellertid långsamma och det är de största lasterna som måste beaktas, vilket har gjorts i de analyser som redan redovisats. Det finns därför inget behov av att ytterligare behandla gradvisa utvecklingar av isostatisk last.

Korrosion för en eroderande buffert: Korrosion vid en eroderande buffert är pessimistiskt begränsat av fallet där bufferten antas ha förlorats initialt. Konsekvenserna vad beträffar korrosion skiljer sig inte i avsevärd grad från det fall där bufferten eroderar enligt den antagna erosionsmodellen. Båda fallen förs vidare till konsekvensanalysen för korrosionsscenarioet i avsnitt 13.5.

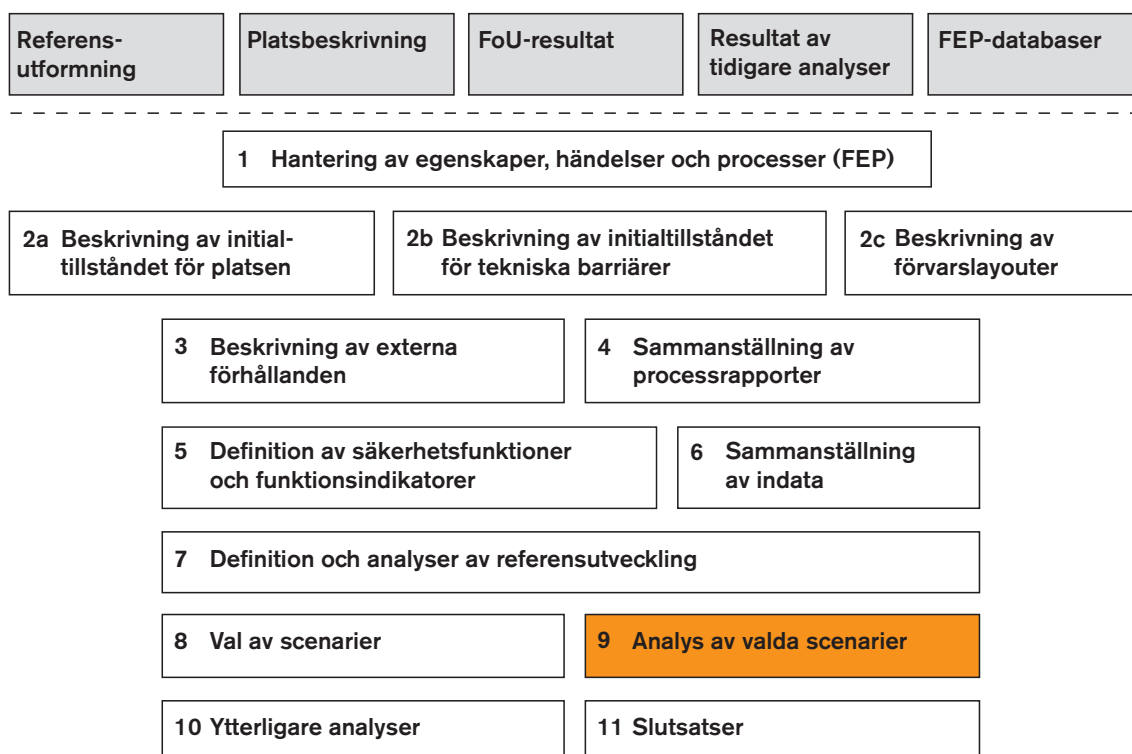
Scenariernas fullständighet

Kombinationer av scenarier och fenomen utgör en betydelsefull aspekt av diskussionen om scenariers fullständighet. Den här diskussionen ingår som en del av slutsatserna av säkerhetsanalysen, se avsnitt 15.3.6.

Slutsats

Ovanstående redovisning visar att relevanta kombinationer och gradvisa utvecklingar av olika företeelser antingen har behandlats i tidigare delar av utvärderingen, och i en del fall förts vidare till konsekvensberäkningar, eller så har det med jämförelsevis enkla kompletterande argument visats att de inte ger upphov till ytterligare fall som bör beaktas vidare. Det enda undantaget gäller ett fall med kapselbrott på grund av skjuvlast där bufferten därefter eroderas. Detta fall fördes vidare till konsekvensberäkningarna.

13 Analys av de valda scenariernas fördröjningspotential



Figur 13-1. SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat. I detta kapitel behandlas analysen av förvarets fördröjningspotential.

13.1 Inledning

Detta kapitel behandlar analyser av utsläpp och transport av radionuklider samt dospåverkan för de scenarier som valdes i kapitel 11 och för vilka inneslutningspotentialen analyserades i kapitel 12. Uttryckt i termer av säkerhetsfunktioner innehåller detta kapitel analyser av förvarets fördröjningspotential.

Två frågor som gäller radionuklidtransport och dosberäkningar och som väsentligen kan hanteras oberoende av scenario eller typ av kapselbrott behandlas först i detta kapitel:

- Modelleringen av radionuklidtransport och uppskattning av dos i biosfären beskrivs översiktligt i avsnitt 13.2.
- Frågan om potentiell kriticitet för en otät kapsel behandlas i avsnitt 13.3.

De modeller som används för radionuklidtransport i vattenfas för närområdet och geosfären beskrivs därefter i avsnitt 13.4.

Analyserna av de två scenarier som är baserade på säkerhetsfunktioner för vilka kapselbrott inte kan uteslutas, dvs scenarierna ”kapselbrott till följd av korrosion” och ”kapselbrott till följd av skjuvlast” beskrivs i avsnitten 13.5 respektive 13.6. I fortsättningen kallas dessa två scenarier kortfattat för korrosionsscenarioet respektive skjuvlastscenarioet.

I huvudscenarioet sker kapselbrott enligt den centrala korrosionsvarianten av korrosionsscenarioet och täcks därmed in av analysen av denna variant i avsnitt 13.5.

Analysen av hypotetiska restsценarier avsedda att illustrera barriärfunktioner presenteras i avsnitt 13.7. Detta avsnitt innehåller även scenarioet ”kapselbrott till följd av isostatisk last”. Radionuklidtransport i gasfas analyseras i avsnitt 13.8 och är gemensam för alla scenarier där den kan ske.

Slutligen ges en risksummering i avsnitt 13.9.

All modellering och alla modelleringsresultat för närområdet och fjärrområdet diskuteras mer utförligt i **Radionuklidtransportrapporten** i SR-Site. Mer detaljerad beskrivning av biosfärsmodellering finns i de referenser som ges i avsnitt 13.2.

13.2 Biosfärsanalyser och beräkning av landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer för en glaciationscykel

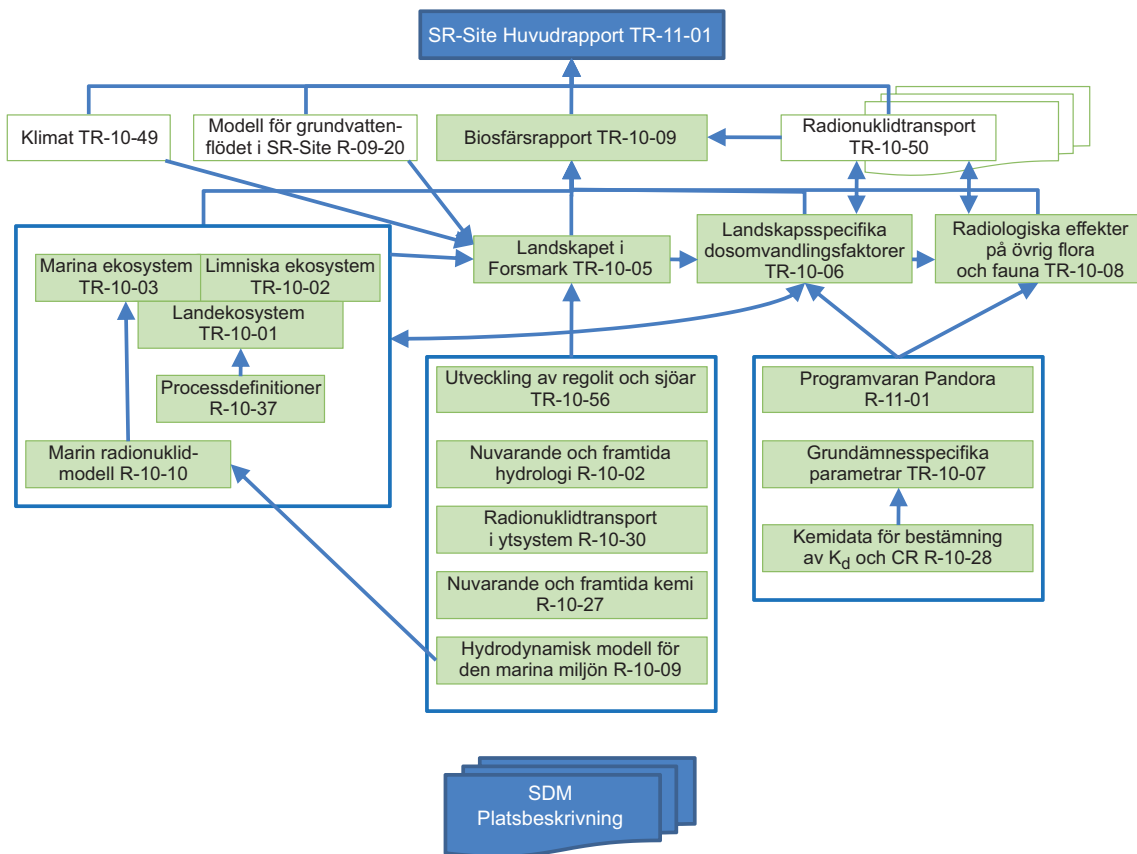
Enligt svenska myndighetsföreskrifter ska människors hälsa och miljön skyddas mot skadliga effekter från joniserande strålning, både under drift och efter förslutning av förvaret, se avsnitt 1.4. För att bedöma om detta kommer att uppfyllas bör, enligt regelverket, skadliga effekter på människor analyseras som medelårsrisken under en livstid för en representativ individ i den mest exponerade gruppen, se vidare avsnitt 2.6.2. För den här analysen beräknas årsdoserna till framtida invånare i Forsmarksområdet för ett kontinuerligt enhetsutsläpp eller ett pulsenhetsutsläpp till potentiella utsläppsområden (biosfärsobjekt) för varje radionuklid. Dessa doser kallas *landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer* (LDF). För att bedöma om det föreskrivna riskkriteriet uppfyllts skattas medelårsrisken genom att maximala LDF-värden för alla biosfärsobjekt och tidpunkter multipliceras med modellerade utsläppsmängder från geosfären under olika utsläppsscenarioer. Resultaten från sådana beräkningar redovisas för ett antal utsläppsscenarioer senare i detta kapitel, se avsnitt 13.5 till 13.8. För analysen av miljöeffekter beräknas dosen till enskilda organismer och jämförs med en doshastighet motsvarande icke mätbar effekt. Om skadliga effekter på organismnivå kan utslutas, anses det att även populationers långsiktiga överlevnad och ekosystemets funktioner är säkerställda.

I de tidsskalor som är relevanta för säkerhetsanalysen kommer biosfären att genomgå betydande förändringar, framför allt beroende på den långsiktiga klimatvariation som resulterar i återkommande glaciationscykler med åtföljande strandlinjeförskjutning, se kapitel 10. När förvarsplatsen höjer sig ur havet kan den potentiella koncentrationen av radionuklider från förvaret förväntas öka i ytvattnet. Radionuklider som eventuellt har ackumulerats i avlagringar under havsfasen kan tas upp i den terrestra näringskedjan i befintliga eller för jordbruk omvandlade våtmarker. Det innebär att den potentiellt högsta exponeringen av människor och andra organismer för radionuklider från förvaret kan förväntas när förvarsplatsen åtminstone delvis har höjt sig ur havet. I vilken del av landskapet och när i ekosystemsuccesionen en viss radionuklid kommer att orsaka maximal exponering kommer dock att variera beroende på den enskilda radionuklidens egenskaper och det potentiella utsläppsområdet.

I följande avsnitt kommer tillvägagångssätt och metoder för biosfärsanalysen att presenteras tillsammans med huvudresultaten från analysen. En mer omfattande redovisning av biosfärsanalysen finns i **Biosfärsrapporten** och detaljer om arbetet lämnas i ett antal underlagsrapporter. I avsnitt 13.2.4 presenteras tillvägagångssätten och de centrala begreppen för biosfärsanalysen. De metoder som används för att identifiera och avgränsa biosfärsobjekt beskrivs i avsnitt 13.2.1. I det avsnittet redovisas också hur biosfärsobjekten är kopplade till varandra och hur *Modellen för landskapsutveckling* används för att beskriva biosfärsobjektens utveckling under en referensglaciationscykel, med betoning på den första interglaciala perioden. Det arbete som rör biosfärsobjekten och *Modellen för landskapsutveckling* beskrivs närmare i /Lindborg 2010/. Avsnitt 13.2.2 innehåller en översikt av *Radionuklidmodellen för biosfären*, vilken beskrivs närmare i /Andersson 2010/. Där presenteras också metoderna för beräkning av *landskapsspecifika dosomvandlingsfaktorer* (LDF). I avsnitt 13.2.3 presenteras de resulterande LDF-värdena för en hel glaciationscykel. I avsnitt 13.2.4 ges en översikt över de metoder som används för skattning av doser till biota /Torudd et al. 2010/ och i avsnitt 13.2.5 redovisas osäkerheterna i riskskattningarna.

13.2.1 Tillvägagångssätt och centrala begrepp i biosfärsanalyserna

Syftet med biosfärsanalyserna i SR-Site är att ta fram värden på landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer, vilka gör det möjligt att översätta ett potentiellt utsläpp från ett framtida förvar till exponering av människor som i framtiden kan bebo Forsmarksområdet, samt att uppskatta vilken exponering andra organismer i området kommer att utsättas för. De landskapsspecifika doskonverteringsfaktorerna används i säkerhetsanalysen för att beräkna doser till människor. Dessa doser används i sin tur för att visa att det planerade förvaret uppfyller de krav som ställs av myndigheterna.



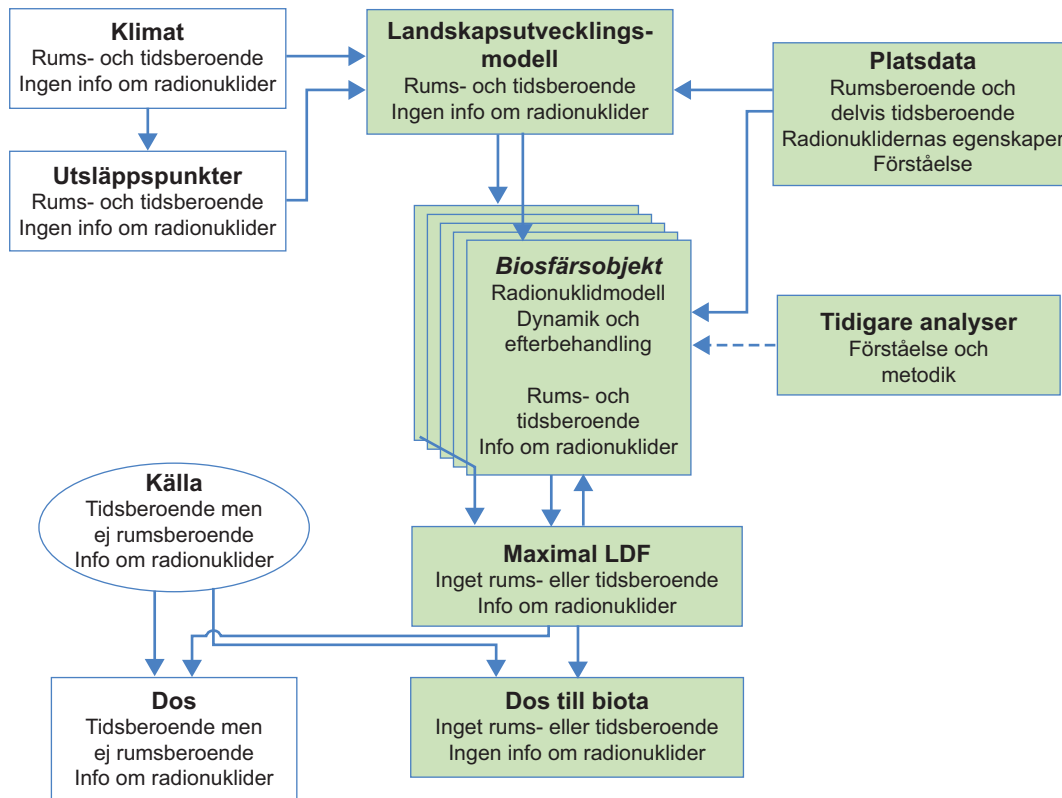
Figur 13-2. Schematisk illustration av den hierarkiska uppbyggnaden av biosfärsrapporter (grå rutor) och deras beroende av information från andra rapporter inom SR-Site. Pilarna visar de viktigaste interaktionerna under projektarbetet, men varje enskild rapport är oftast beroende av information från de flesta övriga rapporter och informationsframtagningen har varit en iterativ process. Se **Biosfärsrapporten** för en kort beskrivning av innehållet i respektive rapport.

För att möjliggöra detta identifierades och avgränsades sådana områden som kan komma att beröras av utströmmande grundvatten från förvaret och den långsiktiga utvecklingen av dessa områden modellerades. Dessa utströmningsområden kallas i SR-Site för *biosfärsobjekt* och definieras som en yta i landskapet som någon gång under en glaciationscykel kan komma att beröras av grundvatten från förvaret, antingen genom direkt utströmning av djupt grundvatten från förvaret eller av kontaminerat ytvatten. I SR-Site representeras biosfären i Forsmark av ett antal hydrologiskt sammankopplade biosfärsobjekt (se avsnitt 13.2.2 och **Biosfärsrapporten** för en översiktlig beskrivning och /Lindborg et al. 2010/ för detaljer).

Transport och ackumulation av radionuklider i biosfärsobjekten under en hel glaciationscykel har sedan beskrivits med hjälp av radionuklidmodellen för biosfären. Det biologiska upptaget av radionuklider hos olika organismer, av vilka en del utgör potentiell föda för människor, har beräknats från modellerade aktivitetskoncentrationer i miljön (luft, jord, vatten och föda). Slutligen har antaganden om människors framtida markanvändning och levnadssätt använts i kombination med modellerade aktivitetskoncentrationer i miljön för att beräkna landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer för de människor som kan komma att leva i Forsmarksområdet i framtiden. De modellerade aktivitetskoncentrationerna har också använts för att beräkna potentiell framtida exponering av andra organismer på platsen.

Principer för biosfärsanalyser i SR-Site

En grundläggande tanke bakom biosfärsanalyserna i SR-Site har varit att de bedömningar av radiologisk risk för människor och andra organismer som görs ska vara så realistiska som möjligt, baserat på kunskapen om dagens förhållanden och om den tidigare och den förmodade framtida utvecklingen av Forsmarksområdet. För dagens situation har detta ofta gått ganska enkelt att uppnå eftersom kunskapen om platsen varit god och osäkerheten ofta varit relativt begränsad, exempelvis när det gäller



Figur 13-3. Samband mellan de biofärsmodeller som används i SR-Site (grå rutor), samt deras rumsliga och tidsmässiga dimensioner. Klimatscenarioer och utströmningspunkter ger information om de tidsmässiga och rumsliga dimensioner som används i Modellen för landskapsutveckling (där finns dock ingen information om radionuklider). Radionuklidmodellen ger information om varje enskild radionuklid, uppdelad i tid och rum. Den maximala dosen per enhetsutsläpp över alla objekt och tidssteg (LDF) är en faktor som beräknas för varje radionuklid och som saknar utbredning i tid eller rum. Den används i beräkningskedjan i SR-Site (se avsnitt 13.4) för att beräkna doser till människor genom att multiplicera med källtermen (som har en tidsmässig, men ingen rumslig dimension). När det gäller doser till biota används källan direkt för att beräkna effekterna.

välundersökta biosfärsprocesser och förhållande som kan observeras på platsen i dag, se avsnitt 4.10. Det är dock mycket svårare att bedöma realismen i antaganden som rör framtida scenarier, mänskliga vanor och biosfärsförhållanden och det är därför oundvikligt att införa vissa försiktiga eller konservativa antaganden i analyserna.

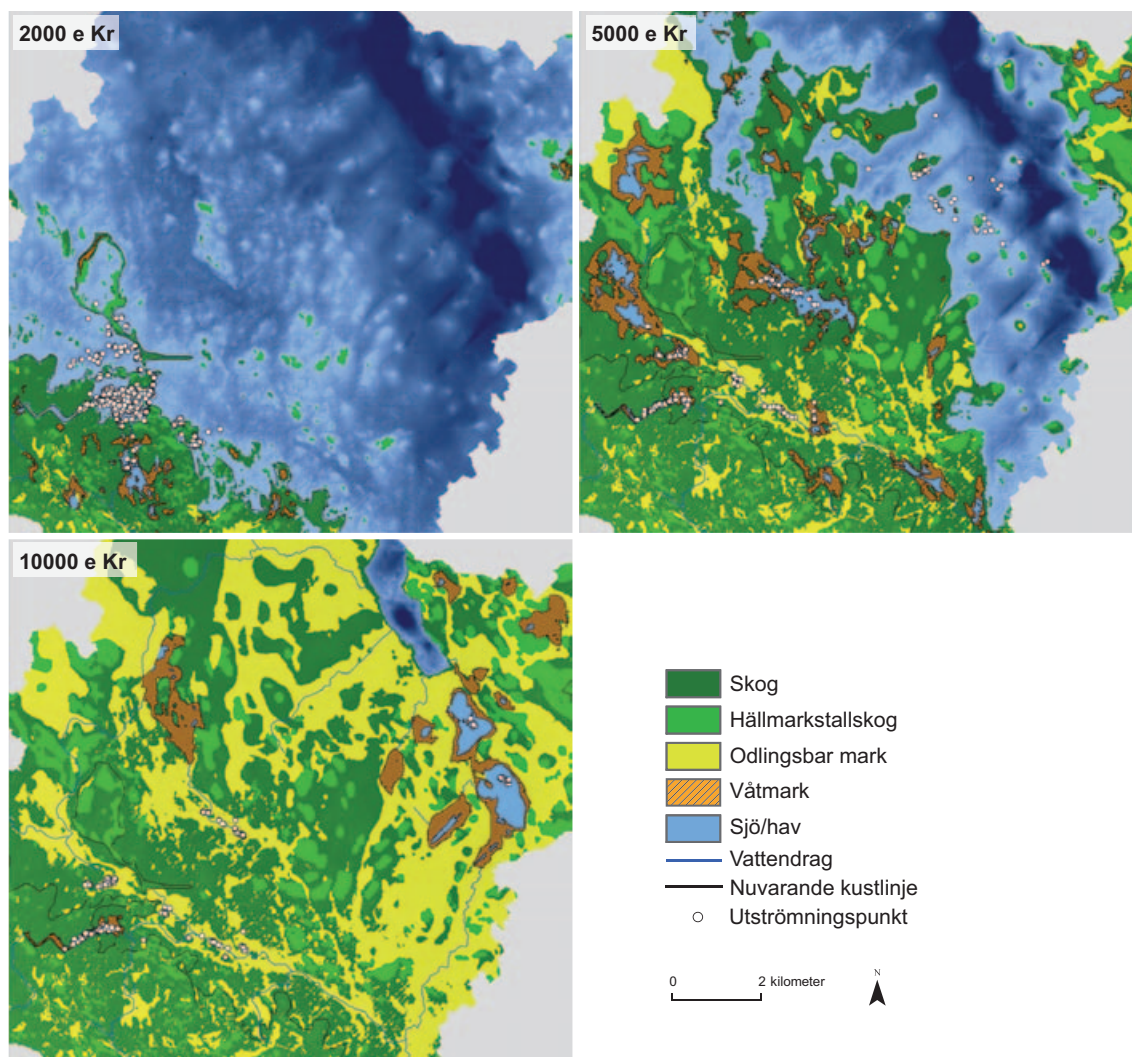
De LDF-värden som tagits fram i biosfärsanalyserna utgör den bästa skattningen för den mest exponerade gruppen, baserat på deterministiska simuleringar. Dessa deterministiska simuleringar baseras på en grundlig processförståelse, de bästa beskrivningar som finns av platsen och på relevanta och realistiska antaganden om hur framtida människor kan utnyttja platsen. Som ett komplement till de deterministiska simuleringarna har effekter av parameterosäkerheter och konceptuella osäkerheter, liksom av olika antaganden om människors vanor, på de beräknade LDF-värdena, undersökts med hjälp av probabilistiska simuleringar och genom att använda alternativa modeller och antaganden. Detta tillvägagångssätt ligger i linje med rekommendationer från ICRP /ICRP 2007/ och med riktlinjerna från Strålsäkerhetsmyndigheten /SSM 2008/.

För att kunna före beräkningskedjan i SR-Site (vilken presenteras i avsnitt 13.4) med en på förhand bestämd doskonverteringsfaktor beräknades LDF-värden för enhetsutsläpp, dvs 1 Bq/år av varje beaktad radionuklid till varje biosfärsobjekt. Eftersom de LDF-värden som används i beräkningskedjan inte har någon tids- eller rumsupplösning valdes för varje radionuklid det högsta värdet över alla tidpunkter och biosfärsobjekt. Dessa värden användes sedan för att beräkna dos till människor, se figur 13-3. Följaktligen medför användandet av dessa maximala LDF-värden utan tids- och rumsupplösning med säkerhet en överskattning av dosen. För att möjliggöra en detaljerad analys eller tolkning, exempelvis när det gäller analys av utsläpp som varierar över tiden beroende på transienta hydrologiska förhållanden, måste de tids- och rumsmässiga dimensionerna hos ytsystemet beaktas, se vidare diskussion i **Biosfärsrapporten**.

13.2.2 Identifiering av biosfärsobjekt och deras utveckling över tiden

Identifieringen av biosfärsobjekt i Forsmarksområdet baseras på modellering av flödesvägar från förvaret till markytan, se figur 13-4 och även avsnitt 4.2 i /Joyce et al. 2010/). I arbetet med att lokalisera möjliga utströmningsområden relaterades flödesvägarnas utströmningspunkter, erhållna från partikelspårning i simuleringarna, till nuvarande och framtida företeelser i landskapet, såsom sjöar och ytliga delar av havsbotten. Enligt /Joyce et al. 2010/ bestäms avrinningsmönstret huvudsakligen av den lokala topografin och deterministiska deformationszoner, och de olika modellrealiseringarnas mönster skiljer sig inte avsevärt från varandra. Med några få undantag koncentreras utströmningspunkterna både i tid och i rum till ett begränsat antal områden. Vid identifieringen av sådana områden antogs det att läget för dessa ansamlingar indikerar områden som med hög sannolikhet kommer att påverkas av utströmmande djupt grundvatten från förvaret.

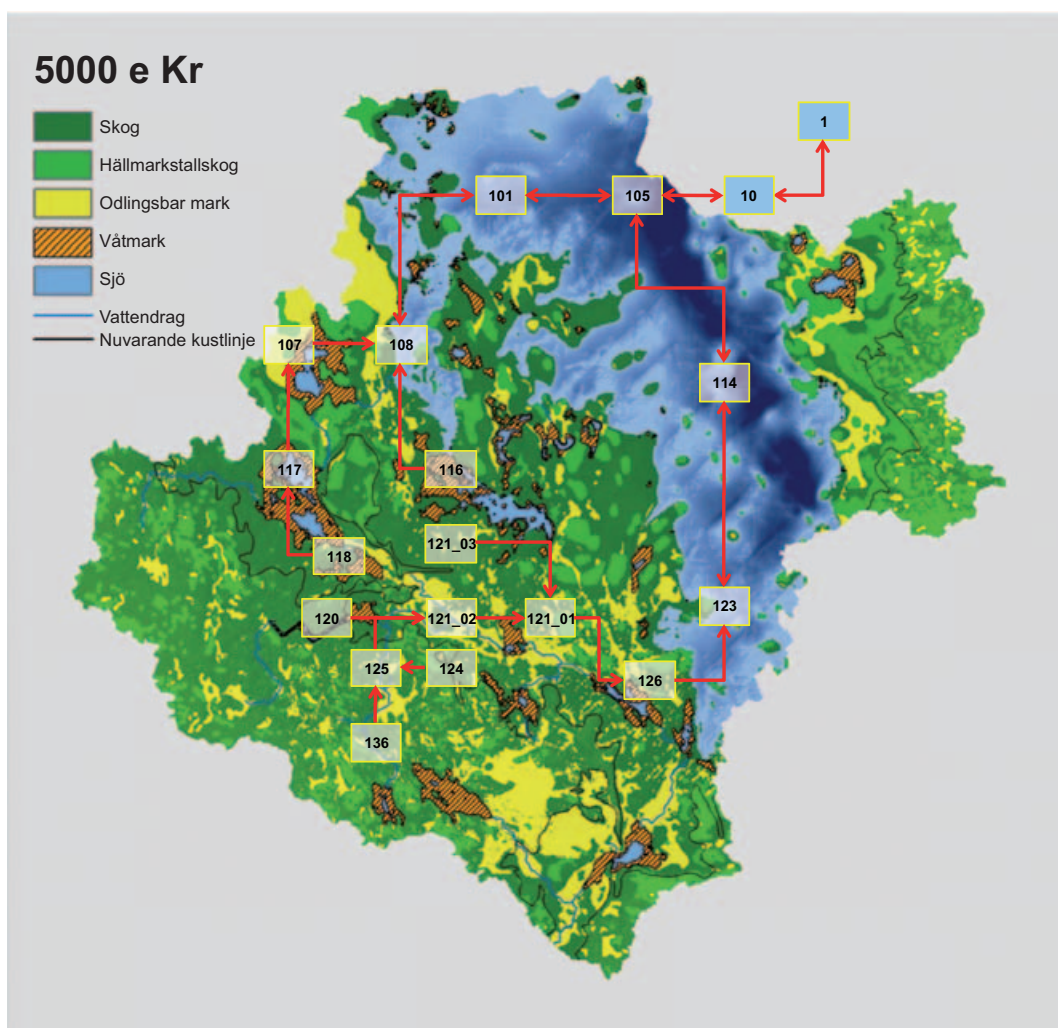
Lokaliseringen av utströmningspunkterna i landskapet i Forsmark visar att: 1) utströmning av djupt grundvatten från förvaret sker huvudsakligen i lågt belägna punkter i landskapet, till exempel grunda delar av havet, längs strandlinjen och i sjöar, vattendrag och våtmarker, 2) utströmningsområden som täcks av havet tenderar att vara relativt stora, medan utströmningsområden som är belägna över havsnivån är mindre och huvudsakligen belägna i sjöbassänger (som kan vara öppna eller igenvuxna), 3) utströmningsområden finns i ett begränsat antal avrinningsområden i landskapet i Forsmark, se figur 13-5 samt även **Biosfärsrapporten** och kapitel 5 i /Lindborg 2010/).



Figur 13-4. Utströmningspunkter från partikelspåringsbaserade simuleringar/avsnitt 4.2 i /Joyce et al. 2010/ vid tre olika tidpunkter, redovisade på kartor över landskapet i Forsmark vid motsvarande tidpunkter. Kartorna över det framtida landskapet i Forsmark baseras på modellen för landskapsutveckling (jfr /Lindborg 2010/).

Den långsiktiga utvecklingen av Forsmarksområdet bestäms huvudsakligen av klimatvariationer, dels direkt men även indirekt genom den resulterande strandlinjeförskjutningen, se avsnitt 10.3.3 och även **Biosfärsrapporten**. Strandlinjeförskjutningen påverkar det potentiella utströmningsområdets storlek och läge på två viktiga sätt. För det första minskar storleken hos ett utströmningsområde som tar emot grundvatten från förvaret under långa tidsperioder väsentligt när området höjer sig ur havet (det gäller exempelvis de utströmningsområden som är belägna ovanför förvaret). För det andra kommer strandlinjeförskjutningen att förändra de hydrologiska drivkrafterna och därmed direkt påverka utströmningen av djupt grundvatten på så sätt att utströmningen i landområden kommer att minska med tiden, medan nya utströmningsområden kommer att uppträda i det nybildade landskapet och i grunda delar av havet längs den nya kustlinjen, se figur 13-4. Mer information finns i kapitel 5 i /Lindborg 2010/.

Som beskrivits ovan användes koncentrationer av utströmningspunkter för att identifiera biosfärsobjektens läge i Forsmarksområdet. Under den period som ett biosfärsobjekt ligger under havsnivån bestämdes objektets yttre gräns från det framtida delavrinningsområdet (kallas bäcken), medan sjöns strandlinje vid den tidpunkt då den isolerades från havet användes för att avgränsa objektet under sjö- och landskedena. Viktiga geometriska egenskaper hos objekten bestämdes från den lokala topografin (dvs från respektive objekts havs- eller sjöbäcken), medan landskapets särdrag, till exempel hydrologiska kopplingar mellan biosfärsobjekt och avrinningsområdets storlek, definierades från den regionala geometrin. Sammanlagt identifierades 17 biosfärsobjekt, se figur 13-5. Merparten av dessa objekt innehåller ett utströmningsområde under någon period i den holocena interglacialen. Ytterligare några biosfärsobjekt, belägna nedströms de objekt som berörs direkt av utströmmande grundvatten från förvaret, identifierades också, se diskussion i **Biosfärsrapporten**, mer information finns i /Lindborg 2010/.



Figur 13-5. Biosfärsobjektens läge och deras hydrologiska kopplingar i SR-Site-analysen kan här ses på en karta över landskapet i Forsmark vid 5000 e Kr.

De huvudsakliga kännetecknen i Forsmarksområdets landskapsrelief, såsom var höjdområden och låglänta områden är belägna, bestäms främst av berggrundens topografi. De småskaliga ojämnheterna i berggrundens yta jämnas ut av glaciala och postglaciala avlagringar, vilka i begränsad omfattning omfördelas genom vågerosion när strandlinjen förflyttar sig över området, se avsnitt 10.3.3. Eftersom berggrundens topografi påverkas endast marginellt av vittring, och eftersom strandlinjeförskjutningen förväntas återkomma under framtida glaciationscykler, bedöms landskapets utveckling under den nuvarande isfria perioden att ge en rimlig återgivning även av landskapets utveckling under framtida isfria perioder i återkommande glaciationscykler /Lindborg 2010/.

Eftersom varje biosfärsobjekt är knutet till den lokala topografin hos ett havs-/sjöbäcken avspeglar objektets fysiska avgränsningar berggrundens geometri och de överliggande moränsedimenten och glaciala sedimenten, vilka endast ändras marginellt under den modellerade interglaciala perioden. Däremot ändras biosfärsobjektens egenskaper kontinuerligt, till exempel på grund av strandlinjeförskjutning, vågerosion och sedimentation, igenväxning av sjöar och ekosystemsucceSSION, se avsnitt 10.3.3.

Den sammantagna effekten av den pågående strandlinjeförskjutningen, omfördelningen av marina sediment, igenväxning av sjöar och klimatvariationer innebär att landskapets egenskaper och kännetecken kommer att ändras kontinuerligt på åtminstone delvis förutsägbara sätt. Genom att kombinera information från dagens digitala höjdmödel ("*Digital elevation model*") /Strömgren och Brydsten 2008/, med den framtida strandlinjeförskjutningen enligt **Klimatrapporten**, utdata från modellen för kopplad utveckling av avlagringar och sjöar ("*Coupled regolith-lake development model*") /Brydsten och Strömgren 2010/ (se även avsnitt 10.3.3) och biotisk information från ekosystemmodelleringen /Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010/, har *Modellen för landskapsutveckling* utvecklats. Modellen beskriver den långsiktiga utvecklingen av Forsmarksområdet på landskapsnivå. Modellen för landskapsutveckling ger en detaljerad rumslig beskrivning (20-20 m) över tiden av landskapets egenskaper och kännetecken, inklusive topografi, strandlinjens läge, jorddjup, nuvarande och framtida sjö- och havsbäckens ytor och djup, nätverk av vattendrag, samt vegetation och möjlig markanvändning. Med hjälp av denna beskrivning tas tidsberoende egenskaper hos biosfärsobjekten fram, vilka sedan används som indata till radionuklidmodellen för biosfären, se nästa avsnitt.

Vid den kvantitativa modelleringen av transport och ackumulation av radionuklider i biosfären, se avsnitt 13.2.3, görs antagandet att landskapets utveckling under kommande glaciationscykler kommer att vara likadan som för den nuvarande cykeln /Lindborg 2010/. Framtida havs- och sötvattenssystem antas ha liknande egenskaper som de akvatiska ekosystem som finns i Forsmark i dag. De våtmarker som kommer att utvecklas omkring de framtida sjöarna antas motsvara de rikkärr som för närvarande finns i området. Om dessa våtmarker torrläggas kommer de att utgöra en organisk jord rik på näringsämnen som kan vara lämplig för odling, åtminstone under en begränsad tid.

13.2.3 Radionuklidmodellen för biosfären

Radionuklidmodellen för biosfären kan hantera olika typer av källor och egenskaper för radionuklider. Modellen har utvecklats för att användas på ett kontinuerligt utsläpp av radionuklider, där ett jämviktstillstånd sannolikt uppnås inom analysens tidsramar och parametervärden har tilldelats i enlighet med detta. Detta förenklade tillvägagångssätt är möjligt eftersom utsläppen från bränslematrisen och från korroderade metaller i förvaret i de flesta fall är nästan konstanta över biosfärsanalysens tidsskala (dvs 20 000–70 000 år), vilket visas i senare avsnitt av detta kapitel. I syfte att bestämma de potentiella doserna till människor för utsläppsscenarioer med ungefärligen konstanta utsläppshastigheter användes radionuklidmodellen för att beräkna LDF-värden, se nedan. Dessutom beräknades en modifierad version av LDF som kan tillämpas på utsläpp som når biosfären i en puls.

Radionuklidmodellen användes även för att visa konsekvenserna av ett antal hypotetiska utsläppsscenarioer där barriärförluster hos förvaret antas inträffa redan vid deponeringen, se avsnitt 13.7.3. För dessa simuleringar, som beskrivs mer utförligt i /Avila et al. 2010/, tillämpades följande två tillvägagångssätt:

1. Utsläpp multiplicerades med LDF-värden som erhöles då ett konstant utsläpp fördelades till biosfärsobjekten i enlighet med den tidsberoende fördelningen av utsläppspunkter under en interglacial. Detta är lämpligare än att använda "vanliga" LDF-värden för dessa utsläppsscenarioer, eftersom de rör situationer där alla deponeringspositioner påverkas av en hypotetisk barriärförlust och därmed orsakar utsläpp.

2. Eftersom dessa situationer leder till transienta utsläpp som varierar betydligt under en interglacial, utfördes även tidsberoende dosmodellering i biosfären. I det här fallet användes tidsberoende utsläpp från fjärrområdet som indata till radionuklidmodellen för att beräkna dosen till den mest exponerade gruppen Även i detta fall fördelades utsläppet över samtliga biosfärsobjekt i enlighet med utströmningspunkternas täthet i landskapet.

Dessutom hanteras doskonsekvenser av utsläpp från sällsynta tidiga kapselbrott som orsakas av jordskalv, dvs tidiga kapselbrott i skjuvlastscenariot, se avsnitt 13.6.2, med tidsberoende modellering på samma sätt som i ovanstående fall 2. Här utgjorde dock hela utsläppet indata för varje landskapsobjekt för att fånga upp det landskapsobjekt där de största konsekvenserna uppstår.

I radionuklidmodellen görs antagandet att radionuklider som släpps ut från förvaret transporteras med grundvattnet till de djupare delarna av avlagringarna i ett biosfärsobjekt. Dessutom antas att de utsläppta radionukliderna även når en hypotetisk brunn som borrar i berggrunden, så snart som ett biosfärsobjekt har höjt sig ur havet. Aktivitetskoncentrationen i brunnsvattnet (Bq/m^3) beräknades genom att dividera utsläppshastigheten ($\text{Bq}/\text{år}$) med brunnskapaciteten ($\text{m}^3/\text{år}$). Brunnskapaciteten valdes så att den skulle motsvara den hos borrade brunnar i den centrala delen av platsundersökningsområdet, där de skulle kunna ta emot radionuklidutsläpp från förvaret /Avila et al. 2010/.

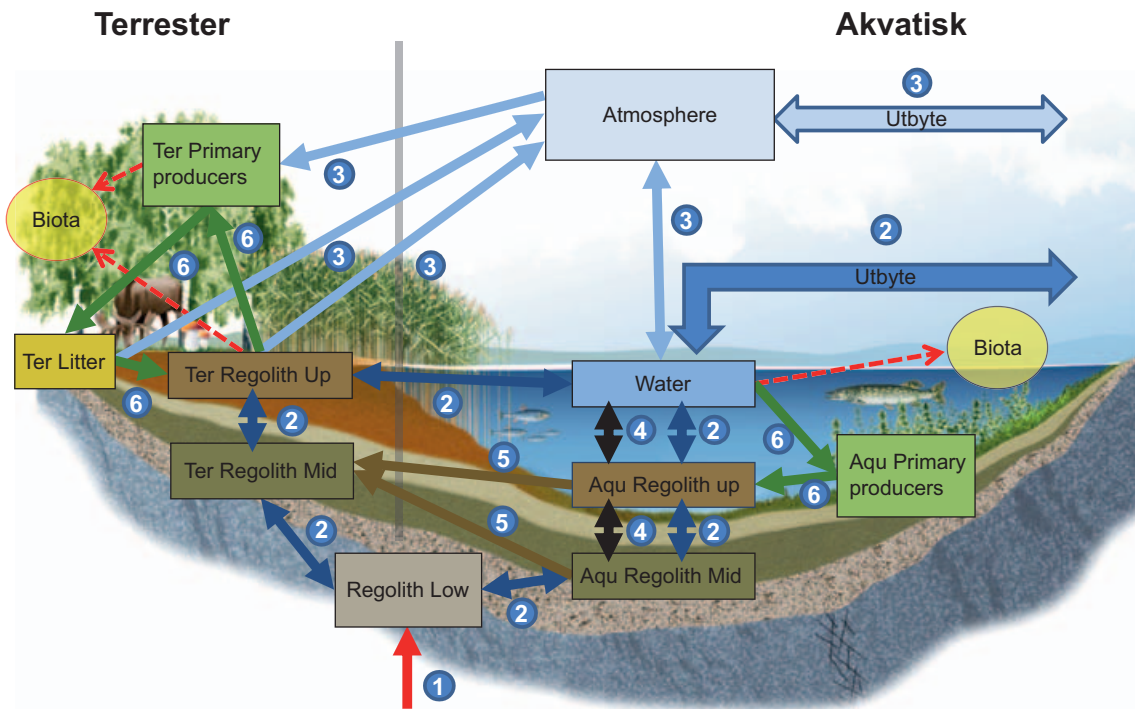
Modellering av radionuklidtransport och ackumulation av radionuklider i biosfärsobjekt

Radionuklidmodellen för biosfären är en så kallad kompartmentmodell, där systemkomponenter som anses vara internt homogena med avseende på sina egenskaper motsvaras av distinkta reservoarer (compartments). En grafisk representation av modellkonceptet visas i figur 13-6, där varje ruta motsvarar en reservoar. Definitionerna av reservoarerna presenteras i tabell 13-1.

Pilarna i figur 13-6 representerar flöden av radionuklider mellan reservoarer och flöden in i och ut ur systemet. Radionuklidflöden är kopplade till de huvudsakliga flödena av material i biosfären, dvs vattenflöden, partikelflöden och gasflöden. Flöden som förmedlas av biota, som exempelvis primärproducenters upptag och avgivande av radionuklider i gasform, har också beaktats. Pilen som pekar upp mot den nedre avlagringsreservoaren representerar radionuklidutsläpp från geosfären till biosfärsobjekten. Dessa utsläpp är riktade mot de djupare delarna av avlagringarna, vilka i Forsmark vanligen består av glacial morän som avlagrats på berggrunden (se avsnitt 4.10.2 och **Biosfärsrapporten**).

Radionuklider som släpps ut i den nedre avlagringsreservoaren fördelas till ekosystemens övre skikt genom advektion och diffusion. Den vattenburna transporten av radionuklider mellan reservoarer baseras på detaljerad hydrologisk modellering med MIKE-SHE /Bosson et al. 2010/. Effekten av radionuklidsorption på den advektiva och diffusiva transporten beaktas genom att jämvikt antas råda mellan porvattnet och den fasta fasen i de olika reservoarerna. Modellen tar även hänsyn till transporten av radionuklider absorberade på suspenderade partiklar. Transporten av dessa partiklar drivs av ytvattenflöden och av sedimentations- och resuspensionsprocesser (se **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/).

Den radionuklidtransport som involverar levande organismer beskrivs i modellen som flöden som drivs av nettoprimärproduktionen i både terrestra och akvatiska ekosystem. Det antas att jämvikt uppnåtts mellan aktivitetskoncentrationerna av radionuklider i den nyproducerade biomassan och i motsvarande omgivningsmedium (övre avlagringar för terrestra ekosystem och vatten för akvatiska ekosystem). För att undvika en underskattning av dos till människor och andra organismer tas förluster från de övre avlagringarna och från ytvatten på grund av gasbildning inte med i beräkningarna, med undantag för C-14. Anledningen till att C-14 behandlas annorlunda än övriga radionuklider är att upptaget från luften vid fotosyntes är den helt dominerande vägen för assimilation av C-14 i terrestra primärproducenter, och att bortse från gasbildning skulle därför kunna leda till en underskattning av doser från C-14 (se **Biosfärsrapporten** och /Andersson 2010/).



Figur 13-6. Konceptuell bild av radionuklidmodellen för biosfären. Rutorna motsvarar reservoarer, fyllda pilar flöden och streckade pilar koncentrationsberäkningar för organismer (dessa ingår inte i massbalansen). Modellen representerar ett objekt som alltid innehåller en akvatisk del (till höger) och en terrester del (till vänster), med ett gemensamt nedre avlagringsskikt och en gemensam atmosfär. Källflödet (1 Bq/år) motsvaras av en röd pil. Radionuklidtransporten drivs av olika huvudprocesser, vilka anges med mörkblå pilar för vatten, ljusblå för gas, svarta för sedimentation/resuspension, mörkbruna för igenväxning och gröna för biologiskt upptag/biologisk nedbrytning. Import från och export till omgivande objekt i landskapet motsvaras av pilar märkta "utbyte". En mer detaljerad förklaring finns i /Andersson 2010/ och en förklaring till reservoarerna ges i tabell 13-1.

Tabell 13-1. Reservoarer i radionuklidmodellen för biosfären som beskrivs i figur 13-5 (se /Andersson 2010/ för en mer detaljerad beskrivning).

Reservoar	Beskrivning
Regolith Low	Den nedre delen av avlagringarna (regoliten) som täcker berggrunden och som till största delen består av morän. Den är gemensam för de terrestra och akvatiska delarna och avlagrades huvudsakligen under den senaste istiden.
Aqu Regolith Mid	Den mellersta delen av avlagringarna som finns i den akvatiska delen av biosfärsobjekten och vanligen består av glaciala och postglaciala leror, gyttja och finare sediment som huvudsakligen kommer från perioden efter avsmältningen av inlandsisen eller från senare resuspenderat material blandat med organiska sediment.
Aqu Regolith Up	Den del av avlagringarna i akvatiska system som har den högsta biologiska aktiviteten och som omfattar ca 5–10 cm av de övre sedimenten där resuspension och bioturbation kan upprätthålla en oxiderande miljö.
Ter Regolith Mid	Den mellersta delen av avlagringarna i terrestra system som innehåller glacialt och postglacialt finkornigt material, dvs sediment från tidigare havs- och sjöbottnar.
Ter Regolith Up	Den övre delen av avlagringarna i terrestra system som har den högsta biologiska aktiviteten, t ex torv i ett kärr eller plogsulan i jordbruksmark.
Ter Litter	Dött växtmaterial som täcker avlagringarna.
Water	Ytvattnet (flod, sjö- eller havsvatten).
Aqu Primary producers	Det biotiska samhället i akvatiska miljöer, omfattande både primärproducenter och konsumenter.
Ter Primary producers	Terrestra primärproducenter.
Atmosphere	Den nedre delen av atmosfären där det antas att det sker en total utblandning av utsläppta radionuklider.

Förutom ett utsläpp till de nedre avlagringarna kan biosfärsobjekt ta emot radionuklider med ytvatten från förorenade biosfärsobjekt belägna uppströms eller i angränsande havsvikar (se utbytespilarna i figur 13-6). I initiala simuleringar användes radionuklidmodellen för varje identifierat biosfärsobjekt i ett nätverk som baseras på ytvattenflödet i landskapet, se figur 13-5. Dessa simuleringar visade att den maximala dosen per enhetsutsläpp alltid förekom i ett biosfärsobjekt som mottog ett direktutsläpp från geosfären och att den dos som kom från ett indirekt utsläpp till samma objekt via ett angränsande objekt vanligen var minst en storleksordning lägre /Avila et al. 2010/. Eftersom biosfärsanalysens syfte är att uppskatta dos till den mest exponerade gruppen sett över alla biosfärsobjekt beaktades inte indirekt kontamination i analysen, för att därmed förenkla analysen med separata simuleringar för varje objekt, se **Biosfärsrapporten**.

Biosfärsobjektens utveckling över tiden i radionuklidmodellen

Radionuklidmodellen består alltid av en akvatisk och en terrester del när den tillämpas på ett biosfärsobjekt. Den tidsmässiga utvecklingen av ett objekt hanteras genom att storleken och egenskaperna hos dessa delar varieras i enlighet med den simulerade naturliga utvecklingen av det särskilda biosfärsobjektet, se /Lindborg 2010/ för mer information. De flesta biosfärsobjekt förväntas genomgå följande fyra huvudstadier:

- Havsstadium – biosfärsobjektet är en havsvik som, allt eftersom landskapet höjer sig ur havet, minskar kontinuerligt i storlek. Under denna period domineras objektet helt av den akvatiska delen och flödena från de djupa avlagringarna är genomgående riktade mot de akvatiska sedimenten (mellan- och övre avlagringar).
- Övergångsstadium – havsviken isoleras och omvandlas till en sjö eller ett vattendrag (akvatisk del) omgiven av våtmark (terrester del). Isoleringen av en sjö i Forsmarksområdet tar vanligen omkring 500 år /Lindborg 2010/. Under denna period kommer området periodvis att påverkas av saltvatteninträngning. Flöden från de djupa avlagringarna fördelas i modellen mellan de akvatiska och terrestra delarna enligt deras relativa storlek. Under övergångstadiet ändras parametervärdena för modellens akvatiska del linjärt från havs- till sjövärdet.
- Sjöstadium – den omgivande våtmarken expanderar till en sjö och i samband med igenväxning täcks de akvatiska sedimenten gradvis över med ett torvlager. Denna process representeras av ett flöde av radionuklider bundna till avlagringar som är riktat från de akvatiska till de terrestra avlagringarna. Sjöstadiet avslutas när sjön helt har omvandlats till våtmark, genomkorsad av ett vattendrag.
- Landstadiet – biosfärsobjektet har uppnått ett slutstadium och ingen ytterligare naturlig utveckling sker. Slutstadiet utgörs av en våtmark med ett vattendrag. Om våtmarken har en storlek och avlagringar som gör den lämplig för jordbruk, se /Lindborg 2010/, kan den potentiellt användas som odlingsmark någon gång i framtiden. Detta är inkluderat i modellen på så sätt att uppodling antas ske vid den tidpunkt då detta ger upphov till högst dos.

Definition av den mest exponerade gruppen

Den mest exponerade gruppen definieras som den grupp individer som utsätts för den högsta exponeringen över alla potentiella utsläppsområden (dvs biosfärsobjekt) i landskapet. En representativ individ i den mest exponerade gruppen antas tillbringa all sin tid i det kontaminerade området och vara beroende av detta biosfärsobjekt för hela sitt födo- och vattenintag.

Antagande om mänskligt beteende och markanvändning

När våtmarken i ett biosfärsobjekt har uppnått en tillräcklig höjd över havsnivån för att undgå regelbundna havsvattenöversvämningar kan det dräneras och användas för jordbruksändamål. Det antas i analysen att människor som bor i området kommer att dränera och därefter använda våtmarker som är belägna två meter ovanför havsnivån för odling av grödor (spannmål, rotfrukter och grönsaker) och för boskap, se **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/. De organiska lagren (torv och gyttja) på dränerade och odlade våtmarker kommer snabbt att syresättas och kompakteras, vilket resulterar i en jordbruksjord som utgör en blandning av potentiellt kontaminerat organiskt material och djupare minerallager (glaciala och postglaciala avlagringar), där radionuklider kan ha ackumulerats sedan det tidiga havsstadiet, se kapitel 4 i /Lindborg 2010/).

Förmågan att producera mänsklig föda i ett biosfärsobjekt bestäms direkt av det kontaminerade objektets storlek och hållbara avkastning i form av naturlig föda och jordbruksprodukter. Antalet individer som kan försörjas i ett biosfärsobjekt är således proportionell mot objektets yta. Det antas att alla tillgängliga källor för födoämnen från både de akvatiska och terrestra delarna av biosfärsobjektet utnyttjas av människor. Dessutom antas det att våtmarker åtminstone delvis kommer att omvandlas till jordbruksmark närhelst det är möjligt. Det görs inga antagande om framtida individers preferenser när det gäller födan. I stället bestäms den mänskliga kosten direkt av den potentiella produktionen av olika typer av föda i objektet. Biosfärsobjekt som kan dräneras och uppodlas kan vanligen föda en population i intervallet 100–1 000 personer, medan biosfärsobjekt som inte kan odlas upp kan försörja cirka tio individer under havsstadiet och bara en eller några få individer under sjö- och landstadierna, se vidare **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/.

När en våtmark en gång har dränerats förväntas inte längre kontamination av jord via grundvatten vara av kvantitativ betydelse. Ytterligare kontamination kommer endast att nå jorden via bevattning med ytvatten. De högsta aktivitetskoncentrationerna av radionuklider i jordbruksjord förväntas därför förekomma under perioden direkt efter dränering. Försiktigtvis används de 50 år som följer omedelbart på dräneringen till att beräkna den genomsnittliga årsdosen från användningen av kontaminerad jordbruksjord under en människas livstid. Omvandlingen av våtmarken till jordbruksmark antas ske vid den tidpunkt när den ger upphov till den högsta genomsnittliga årsdosen (se **Biosfärsrapporten** för en närmare förklaring).

Människan antas i framtiden täcka sitt dricksvattenbehov med lika stora tillskott från en brunn som borrhats i berggrunden och från ytvattnet i den sjö eller det vattendrag som finns i objektet. Boskap förväntas inta sitt vatten från samma källor. Exponering från kontaminerat dricksvatten beräknas från och med den tidpunkt när ett biosfärsobjekt har höjt sig ur havet. Exponering som uppstår från bevattning med kontaminerat ytvatten beräknas för grönsaker. Ytvatten för bevattning av jordbruksjord kommer att vara lättåtkomligt i samtliga biosfärsobjekt i Forsmarksområdet och bevattning med vatten från en borrhad brunn har följaktligen bedömts som osannolik (se **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/).

Matematisk implementering

Radionuklidmodellen består av ett system av ordinära differentialekvationer (ODE) som representerar förändringshastigheten hos radionuklidinnehållet (Bq) i en modellreservoar, se figur 13-6 och tabell 13-1, som funktion av aktivitetsflödena (Bq/år) in och ut ur reservoaren och av radioaktivt sönderfall /Andersson 2010/. Modellen har samma matematiska formulering för alla biosfärsobjekt. Skillnaderna mellan biosfärsobjekt utgörs av objektspecifika parametervärden som beskriver biosfärsobjektets geometri, avlagringarnas djup, samt hastigheten och tidpunkten för övergångarna mellan havs-, sjö- och landstadierna.

Aktivitetsflödena modelleras på samma sätt för alla radionuklider. Grundämnesspecifika värden beskriver exempelvis retention (distributionskoefficienter, K_d) och biologiskt upptag (koncentrationskvoter, CR). För C-14 används kvoten mellan C-12 och C-14 ("specifik aktivitet") för att modellera upptaget i växter /Avila och Pröhl 2008/. Dessutom beaktas för C-14 även gasutbytet mellan den övre avlagrings-/ytvattenreservoaren och atmosfären.

Radionuklidmodellen har implementerats i programvaran Pandora /Åstrand et al. 2005/ och /Ekström 2010/ vilken bygger på programmen Matlab and Simulink /www: The Mathworks Inc/. En kortfattad beskrivning av Pandoraverktygets utveckling, funktionalitet och egenskaper finns i **Biosfärsrapporten** och verktyget beskrivs utförligt i /Ekström 2010/.

Skattning av aktivitetskoncentrationer

Radionuklidmodellen användes för dynamisk modellering av de tio reservoarerna i biosfärsobjekten, se figur 13-6. Aktivitetskoncentrationerna i övre avlagringar, atmosfär och ytvatten användes för att beräkna exponering av människor (se nedan) och av andra organismer (se avsnitt 13.5.7). Aktivitetskoncentrationer i mänsklig föda (Bq/kg C) beräknades från koncentrationer i omgivningsmedier (övre avlagringar och ytvatten), varvid jämvikt antogs råda mellan koncentrationerna i föda och i det omgivande mediet, se **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/.

Analys av människors exponering

Medelexponeringen under en individs livstid analyserades genom att beräkna den genomsnittliga årsdosen per enhetsutsläpp under en period av 50 år. Det ansågs att användningen av vuxna individer för beräkningen ger en tillräckligt bra approximation av medelexponeringen under en livstid, se diskussion i /Avila et al. 2010/. Bidragen till människors exponering från alla exponeringsvägar summerades enligt beskrivning i /Avila och Bergström 2006/. En kort beskrivning av antagandena och beräkningarna av människors exponering från inandning, extern exponering samt intag av kontaminerad föda och kontaminerat vatten finns i **Biosfärsrapporten**. Detaljer redovisas i /Avila et al. 2010/ och /Nordén et al. 2010/.

Landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer

Potentiella doser till människor analyserades genom att utsläppsmängderna för olika radionuklider till biosfären multiplicerades med en radionuklidspecifik LDF (*landskapsspecifik doskonverteringsfaktor*). För varje radionuklid beräknades LDF-värden över tiden för varje biosfärsobjekt. För att inte underskatta doser valdes det högsta värdet över tiden bland alla objekt ut för att representera den mest exponerade gruppen. De grundläggande LDF-värdena är beräknade för att kunna tillämpas på kontinuerliga långtidsutsläpp. Förutom det grundläggande LDF-värdet beräknades för varje radionuklid en modifierad konverteringsfaktor för pulsutsläpp som pågår under en period av några år upp till hundratals år.

LDF-värdet för varje potentiellt utsläppt radionuklid definieras som medelårsdosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen vid en konstant utsläppshastighet på 1 Bq/år för denna radionuklid. Det modifierade LDF-värdet för ett pulsutsläpp av varje potentiellt utsläppt radionuklid definieras som medelårsdosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen vid ett pulsenhetsutsläpp. För båda faktorerna beräknades medelvärdet av exponeringen under en livstid för en individ. Enheten är Sv/år per Bq/år för de grundläggande LDF-värdena och Sv/år per Bq för de modifierade LDF-värdena. LDF-konceptet diskuteras vidare i **Biosfärsrapporten** och ytterligare detaljer finns i /Avila et al. 2010/.

LDF för olika klimathållanden

LDF-värden beräknades för tre olika perioder i referensglaciationscykeln; en period med vattentäckta förhållanden direkt efter deglaciationen, hela den interglaciala perioden och en långvarig period med periglaciala förhållanden. Dessutom beräknades LDF-värden för klimatfallet med global uppvärmning. De modifierade LDF-värdena för ett pulsutsläpp beräknades endast för den interglaciala perioden.

Beräkningsperioden börjar i samband med deglaciationen omkring 9000 f Kr, då landskapet var helt täckt av havsvatten. Den första perioden omfattar *vattentäckta förhållanden*, dvs perioden fram tills de första delarna av biosfärsobjektet höjer sig ur havet. Längden på den vattentäckta perioden skiljer sig åt mellan biosfärsobjekten, eftersom det tar nästan 10 000 år från det att det första biosfärsobjektet höjer sig ur havet tills strandlinjen har flyttats över hela modellområdet.

Den *interglaciala perioden*, dvs perioden från deglaciationen fram till det första inträdet av periglaciala förhållanden, se **Klimatrapporten**, representeras av klimathållanden som liknar dem som råder i dag och förväntas, i enlighet med referensglaciationscykeln, råda under 18 400 år (dvs från 9000 f Kr till 9400 e Kr). Perioden omfattar alltså för de flesta objekt både ett vattentäckt och ett terrester stadium i det tempererade klimattillståndet. Allt eftersom land har höjt sig tillräckligt ur havet antas våtmarker omvandlas till odlingsbar mark. Dricksvatten för människor och boskap under denna periods landstadium antas komma till lika stora delar från ytvatten och från en kontaminerad brunn som borrats i berggrunden (se kapitel 8 i **Biosfärsrapporten**).

Den inledande perioden av tempererade klimathållanden följs av en period med *periglaciala förhållanden* i referensglaciationscykeln. Under denna period är klimatet kallare än i dag, med episoder av djup permafrost. För LDF-beräkningen antas periglaciala förhållanden råda från det att biosfärsobjektet höjer sig ur havet fram tills nästa glaciation inträffar omkring 59 600 e Kr. Det antas att det inte är möjligt att bedriva jordbruk under denna period och att det inte finns tillgång till dricksvatten från en kontaminerad djupborrad brunn (se kapitel 8 i **Biosfärsrapporten**).

Exponering av människor under *glaciala förhållanden*, när förvarsplatsen är täckt av en inlandsis, är osannolik. Om utsläpp förekommer finns det dock en möjlighet att människor kommer att exponeras för radionuklider via intag av föda från havet när isfronten befinner sig ovanför eller i närheten av förvaret.

Som en försiktig skattning av exponeringen för utsläpp under glaciala förhållanden används LDF-värdena från stadiet med öppet hav under ett tempererat klimat (dvs vattentäckta förhållanden) i analysen.

I klimatfallet med *global uppvärmning* i SR-Site antas det att det tempererade klimattillståndet är ungefär 50 000 år längre än vad som är fallet i referensglaciationscykeln (dvs det tempererade klimattillståndet varar fram till 59 600 e Kr, se **Klimatrapporten**, avsnitt 5.1). De antaganden som görs angående människors användning av landskapet under denna period är desamma som för den interglaciala perioden, dvs våtmarker omvandlas till odlingsbar mark i det fall det är möjligt och dricksvatten för människor och boskap kommer i lika stora delar från ytvatten och vatten från en kontaminerad brunn som borrats i berggrunden.

Osäkerhetsanalyser

Osäkerhets- och känslighetsanalyser med avseende på LDF-värden genomfördes för de radionuklider som ger det största dosbidraget. Både effekten av parameterosäkerheter och effekten av konceptuella osäkerheter kvantifierades. Resultaten från ett urval av dessa analyser summeras i avsnitt 13.2.5. Resultaten diskuteras vidare i **Biosfärsrapporten** och ytterligare detaljer ges i /Avila et al. 2010/.

För varje parameterskattning användes platsspecifika data vid behov kombinerat med litteratordata och expertbedömningar, för att få den bästa skattningen och för att karakterisera osäkerheten i parameterskattningen genom att ange en sannolikhetsfördelning. Parameterosäkerheten omfattar förväntad naturlig variation mellan olika år vid förvarsplatsen under den interglaciala perioden och mätosäkerheter. För varje radionuklid utfördes sedan probabilistiska Monte Carlo-simuleringar för de landskapsobjekt som uppvisade det högsta LDF-värdet i de deterministiska simuleringarna.

Vissa parametrar, som förekommer i modellen som tidsserier, uppvisar ingen oberoende variation (exempelvis utveckling av de övre avlagringarna och vattenproduktion) och uteslöts därför från de probabilistiska simuleringarna. I stället varierades dessa parametrar systematiskt som en grupp, utan att förhållandet mellan dem förändrades.

Ett antal konceptuella osäkerheter behandlades med alternativa modeller. I dessa analyser ingick till exempel utvärdering av mönstret för grundvattenutströmning med hjälp av partikelspårning i hydrogeologiska modeller /Bosson et al. 2010/. Andra analyser omfattade utvärdering av vilka effekter en finare uppdelning av de nedre avlagringarna har på LDF-värdena, utvärdering av effekterna av periglaciala förhållanden med hjälp av en alternativ parameteruppsättning, utvärdering av effekterna av bevattning och utvärdering av hur antaganden om markanvändning och människors kostintag påverkar LDF-värden /Avila et al. 2010/.

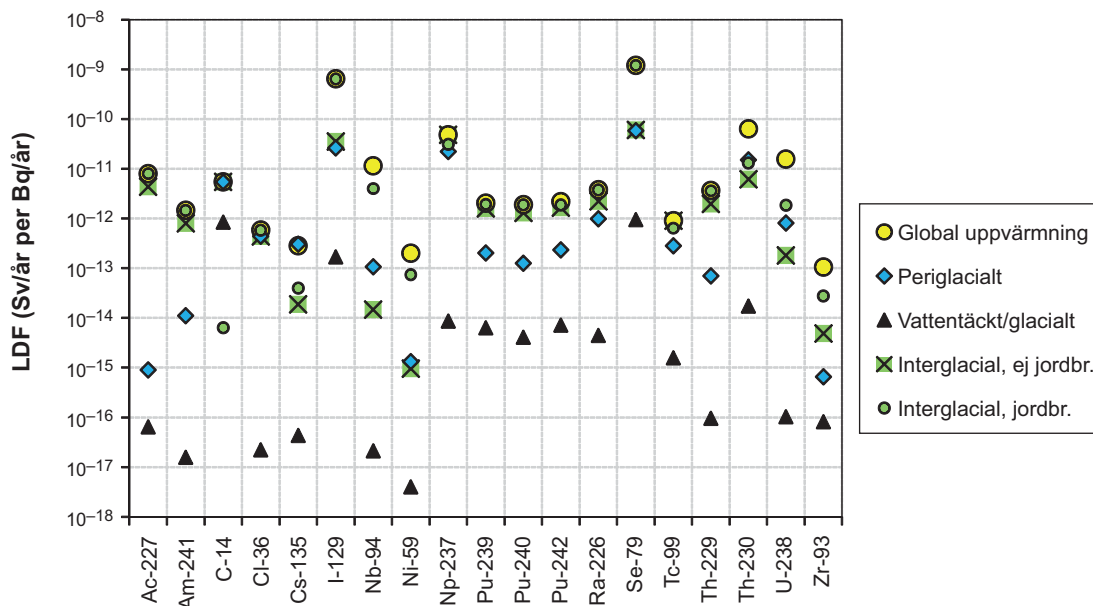
Indata

Radionuklidmodellen för biosfären stödjer sig på cirka 140 indataparametrar, varav en tredjedel representerar radionuklid- eller grundämnesspecifika egenskaper. Indata omfattar fysikaliska konstanter och parametrar som beskriver utvecklingen av de individuella biosfärsobjekten. Andra parametrar beskriver förhållanden i de ekosystem där radionuklider kan komma att ackumuleras, de hydrologiska förhållanden som driver transporten inom och mellan biosfärsobjekt, grundämnesfördelning mellan fasta faser och vattenfaser, samt kvoter för jämviktskoncentrationer i organismer, se vidare **Biosfärsrapporten**.

De flesta parametervärden har uppskattats från fältmätningar som utförts i Forsmarksområdet vid platsundersökningarna, eller också har de modellerats baserat på den sannolika utvecklingen av platsen. De parametervärden som väljs som typiska för platsen innehåller osäkerheter som beror på naturlig variation och även på de metoder som används för att mäta och modellera parametervärdena. Det finns också parametrar som beskriver de exponerade individerna och doskoefficienterna för extern exponering, inandning och intag av föda och dricksvatten. För dessa parametrar har tidigare fastställda, något pessimistiska värden valts, i enlighet med internationella rekommendationer /ICRP 2006/.

13.2.4 Resultande LDF-värden och värden för LDF-puls

Maximala LDF-värden för ett konstant utsläpp av radionuklider (1 Bq/år) beräknades för interglaciala och periglaciala förhållanden, samt för klimatfallet med *global uppvärmning*. Maximala LDF-värden för perioder då biosfärsobjekten är vattentäckta användes som skattning av doser per enhetsutsläpp under det glaciala klimattillståndet. Resultaten för de 19 radionuklider som bidrog



Figur 13-7. Resulterade LDF-värden (dvs de högsta LDF-värdena över tiden bland alla biosfärsobjekt) för olika klimattillstånd. LDF-värdena för den inledande vattentäckta perioden användes för att representera glaciala förhållanden i analysen. Effekten på LDF-värden av ett maximalt utnyttjande av biosfärsobjekten som jordbruksmark återges genom att föda från odlingsbar mark under den interglaciala perioden antingen inkluderas eller exkluderas.

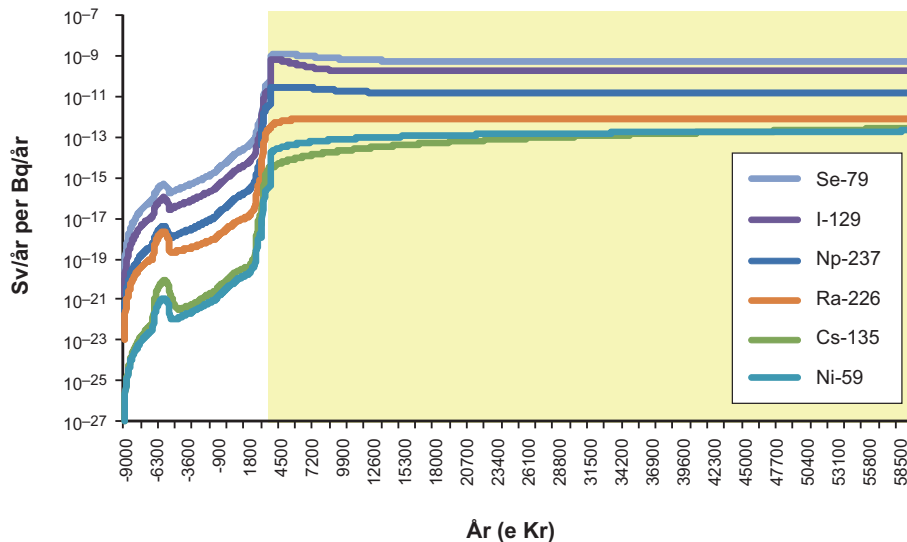
mest till människors exponering presenteras i figur 13-7. I /Avila et al. 2010/ och i **Datarapporten** presenteras LDF-värdena för alla 40 analyserade radionuklider.

LDF-värdena är genomgående högre för den interglaciala perioden än för något av de andra klimattillstånden i referensglaciationscykeln, se figur 13-7. För glaciala förhållanden är exempelvis LDF-värdena två eller fler storleksordningar lägre än värdena för interglaciala förhållanden medan LDF-värdena för periglaciala förhållanden är mindre uttalat lägre än motsvarande värden för den interglaciala perioden.

För de flesta radionuklider skiljer sig LDF-värdena för den interglaciala perioden enbart marginellt mellan situationerna med och utan jordbruk, se figur 13-7. För ett fåtal radionuklider (C-14, I-129, Nb-54, Ni-59, U-238) skiljer sig dock LDF-värdena med mer än en storleksordning mellan dessa två situationer. Det är endast för C-14 som LDF-värdet är högre under den period när jordbruk inte är möjligt, se även **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/).

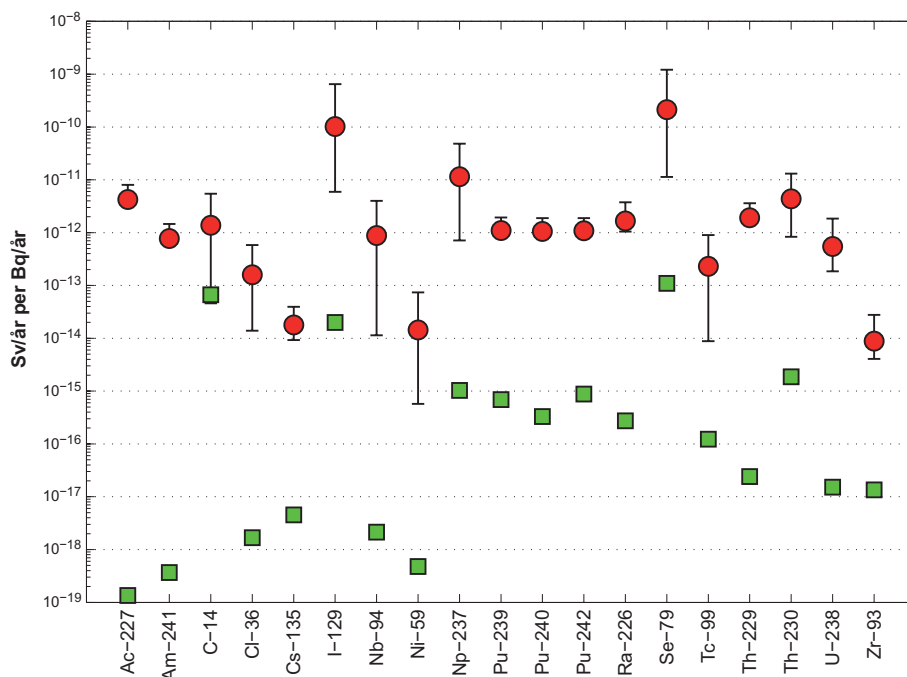
De högsta doserna från ett konstant utsläpp från förvaret förväntas därför förekomma under tempererade förhållanden i en situation när människor exponeras för radionuklider som har ackumulerats i en våtmark som har omvandlats till odlingsbart land, och när kontaminerat brunnsvatten används av människor och boskap. Således uppnås de högsta LDF-värdena för referensglaciationscykeln under den interglaciala perioden och dessa värden har använts för dosbestämningar i t ex korrosionsscenarioet (se avsnitt 13.5).

I biosfärsanalysen representeras klimatfallet med global uppvärmning av en 50 000 år lång period med tempererade förhållanden än under referensglaciationscykeln. Radionuklider som ackumuleras, men som inte uppnår stabila aktivitetskoncentrationer i någon av modellreservoarerna under den inledande tempererade perioden (9000 f Kr till 9400 e Kr), fortsätter därmed att ackumuleras under den förlängda tempererade perioden. De flesta radionuklider har emellertid uppnått stationärt tillstånd vid 9400 e Kr. Ytterligare ackumulering och åtföljande ökning av LDF-värden är marginell för dosdominerande radionuklider (ett exempel ges för biosfärsobjekt 121-3 i figur 13-8). Endast när det gällde två radionuklider, Cs-135 och U-238, var LDF-värdena uppemot en storleksordning högre i klimatfallet med global uppvärmning än under referensglaciationscykeln. Detta kan förklaras av flera faktorer enligt diskussionen i /Avila et al. 2010/. På grund av det blygsamma bidraget från Cs-135 och U-238 till den totala riskskattningen för ett långvarigt utsläpp (se avsnitt 13.5.4) skulle dock en ökning av dessa nuklidens LDF-värden med en faktor tio inte medföra någon nämnvärd påverkan på de slutliga riskskattningarna.



Figur 13-8. Utveckling av LDF-värden för ett antal radionuklider i biosfärsobjekt 121-3 i klimatfallet med global uppvärmning. Den gula färgen visar när jordbruk är möjligt /Avila et al. 2010/.

LDF-värdena varierar påtagligt mellan olika biosfärsobjekt, och graden av variation beror på de olika radionuklidernas egenskaper, se figur 13-9. När det gäller radionuklider för vilka födointag är den dominerande exponeringsvägen (dvs C-14, Cl-35, I-129, Nb-94, Np-237, Se-79, Sn-126 och Tc-99) varierar LDF-värdena vanligen med två eller tre storleksordningar mellan de olika objekten (exklusive objekt 105). När det gäller radionuklider för vilka dricksvattnet är en betydande exponeringsväg (till exempel Am-241, Pa-231, Pu-231, Pu-239, Pu-242, Ra-226 och Th-229) varierar dock LDF-värdena vanligen med mindre än en faktor tre mellan objekten. För de flesta radionuklider är rangordningen mellan objekten med avseende på LDF-värden ungefär densamma. Biosfärsobjekt 121-3 ger upphov till de högsta LDF-värdena för huvudparten av de undersökta radionukliderna, medan biosfärsobjekt 105, som befinner sig i havsstadiet under hela interglacialen, genomgående har LDF-värden som är tre eller fler storleksordningar lägre för alla radionuklider /Avila et al. 2010/.



Figur 13-9. Genomsnittliga (röda cirklar) samt lägsta och högsta LDF-värden för ett urval av radionuklider som förekommer i biosfärsobjekten (exklusive objekt 105). LDF-värden för objekt 105, som står under vatten under hela interglacialen, visas separat (gröna fyrkanter) /Avila et al. 2010/.

I exempelvis det centrala korrosionsfallet görs antagandet att en viss del av kapselinnehållet omedelbart frigörs från bränslet vid kontakt med vatten och släpps ut till biosfären som en puls som varar från några år upp till hundratals år, se avsnitt 13.5.2. De modifierade LDF-värdena för radionuklider som kan förekomma i pulsutsläpp visas i tabell 13-2. Värdena motsvarar de maximala årsdoser som erhöles i en simulering med ett pulsutsläpp som varar ett år och som sker vid en godtycklig tidpunkt under en period med tempererade förhållanden.

Jämförelse av LDF-värden i SR-Site med resultat från tidigare säkerhetsanalyser

Den metod som används för att beräkna landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer i SR-Site har uppdaterats på flera sätt efter de senaste två biosfärsanalyserna av ett slutförvar (dvs SR-Can /SKB 2006a/ och SR 97 /SKB 1999a/). Dessutom har information från förvarsplatsen använts för att bestämma parametrar för nyckelprocesser i mycket högre grad i den nuvarande analysen. Ändringarna av metoder och parametervärden, samt vilka följder detta får för människornas exponering enligt modellerna, diskuteras mer utförligt i /Avila et al. 2010/.

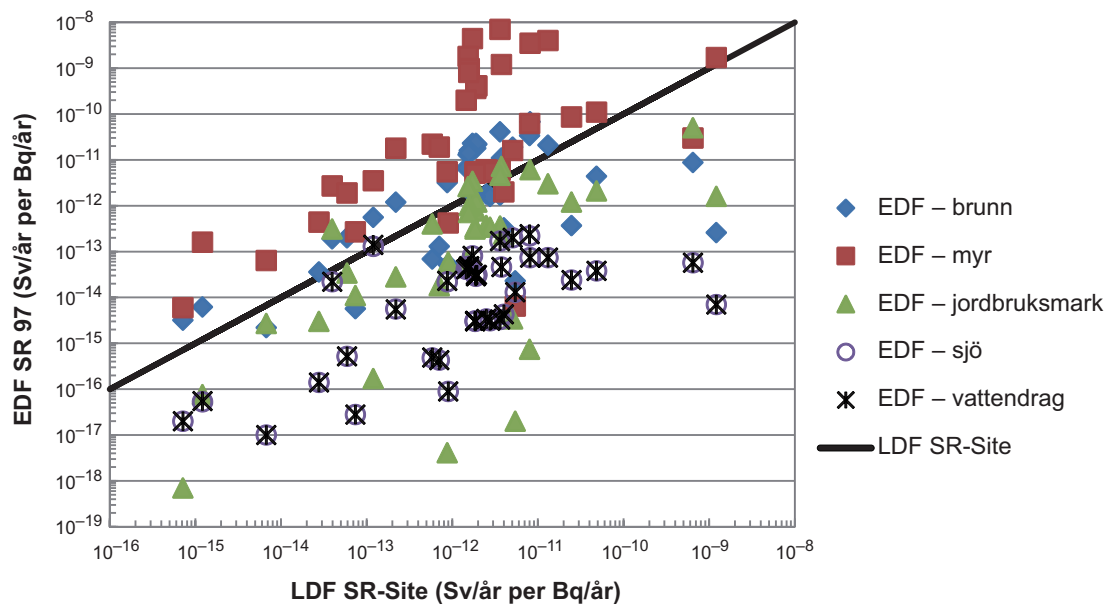
Maximivärdena för de ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorer (EDF) som användes i SR 97 /Bergström et al. 1999/ var systematiskt högre än de LDF-värden som beräknades i SR-Site, med undantag av ett par radionuklider (exempelvis C-14), se figur 13-10. Det finns flera betydande skillnader mellan de två analyserna när det gäller metoder för att beräkna doskonverteringsfaktorer. Några viktiga skillnader är till exempel metoden för att avgränsa delavrinningsområden och antaganden om var ett utsläpp kommer att nå utströmningsområden och komma in i ekosystemen. Det finns också skillnader i de data som används för att ta fram parametrar för brunnen /Avila et al. 2010/. I SR 97 användes i de flesta fall dessutom litteraturdata för att bestämma parametervärden, medan platspecifika data från platsundersökningsprogrammen har använts i stor utsträckning i SR-Site-analysen.

13.2.5 Metoder för att analysera strålningseffekter på miljön

För att bedöma risken för strålningseffekter på miljön i Forsmarksområdet vid ett potentiellt radionuklidutsläpp beräknades dosen till andra organismer än människor, mer information finns i /Torudd 2010/. Analysen utfördes i enlighet med den metodik som utvecklats inom de europeiska projekten FASSET /FASSET 2004/, ERICA /Beresford 2007/ och PROTECT /Howard et al. 2010/ och som rekommenderas av ICRP /ICRP 2007/. Det innebär att de möjliga effekterna av ett radionuklidutsläpp på enskilda exemplar av ett antal olika organismer som förekommer på förvarsplatsen undersöktes. Den logiska grunden för detta tillvägagångssätt är antagandet att om det inte finns några skadliga effekter på individnivå kan också negativa följder på populations- eller ekosystemnivå uteslutas, se /Torudd 2010/.

Tabell 13-2. Modifierade doskonverteringsfaktorer (LDF-puls) beräknade för ett pulsutsläpp som varar under ett år /från Avila et al. 2010/. Asterisken betecknar de radionuklider som ger det största dosbidraget till pulsutsläppet (jämför avsnitt 13.5.4).

Radionuklid	LDF-puls Sv/år per Bq
Se-79*	$9,7 \cdot 10^{-14}$
I-129*	$5,6 \cdot 10^{-14}$
Cl-36	$4,3 \cdot 10^{-15}$
Tc-99	$2,8 \cdot 10^{-15}$
Sn-126	$2,3 \cdot 10^{-15}$
Ag-108m	$5,1 \cdot 10^{-16}$
Nb-94	$3,2 \cdot 10^{-16}$
Cs-135	$1,8 \cdot 10^{-16}$
Ni-59	$9,7 \cdot 10^{-18}$



Figur 13-10. Jämförelse av LDF-värden i SR-Site med motsvarande doskonverteringsfaktorer (EDF) som redovisades i SR 97 /SKB 1999/. Den heldragna linjen motsvarar likhet mellan doskonverteringsfaktorer i SR-Site och i SR 97 /Avila et al. 2010/.

Analysen inriktades i första hand på arter som finns i Forsmarksområdet i dag och som förekommer i miljöer som kan exponeras för utsläpp från förvaret. Dessutom undersöktes ett antal referensorganismer som definieras i ERICA-verktyget se /Brown et al. 2008/. I stället för att använda LDF-värden baserade på enhetsutsläpp på samma sätt som i analysen av doser till människor, användes här de beräknade radionuklidutsläppen till ytan från den probabilistiska simuleringen av det centrala korrosionsfallet under interglacialen (se avsnitt 13.5.4) som utgångspunkt för beräkningen. Därigenom var det möjligt att direkt bedöma den maximala potentiella påverkan på miljön över alla tidsperioder.

De aktivitetskoncentrationer i vatten och övre avlagringar som beräknats med hjälp av radionuklidmodellen för biosfären användes som startvärden i ERICA-verktyget för att bestämma aktivitetskoncentrationer i olika typer av organismer. Med hjälp av ERICA-verktyget uppskattades sedan de totala absorptionsdoserna, både internt och externt. Summan av de absorberade doshastigheterna utvärderades mot en doshastighet som har antagits motsvara nolleffekt ($10 \mu\text{Gy}^{-1}$) /Andersson et al. 2009/. Analysresultaten sammanfattas i avsnitt 13.5.7. Metoderna och resultaten presenteras mer utförligt i **Biosfärsrapporten**. Dessutom finns en detaljerad beskrivning av analysen i /Torudd 2010/.

13.2.6 Osäkerheter i riskskattningar

Det finns två huvudsakliga typer av osäkerheter knutna till de slutliga LDF-värdena. Den första typen gäller numeriska osäkerheter vid bestämningen av parametervärden. Effekten av dessa osäkerheter på de slutliga resultaten kan utvärderas med systematiskt och/eller slumpvist varierade parametervärden, se /Avila et al. 2010/ och /Ekström 2011/. Den andra typen, konceptuella osäkerheter, är knuten till modellantaganden eller till konceptuella beskrivningar som i sin tur grundar sig på kännedomen om systemet och på förenklingar av det. Konceptuella osäkerheter måste utvärderas med hjälp av alternativa modeller, antaganden och simuleringar eller genom att diskutera möjliga utfall av felaktiga antaganden.

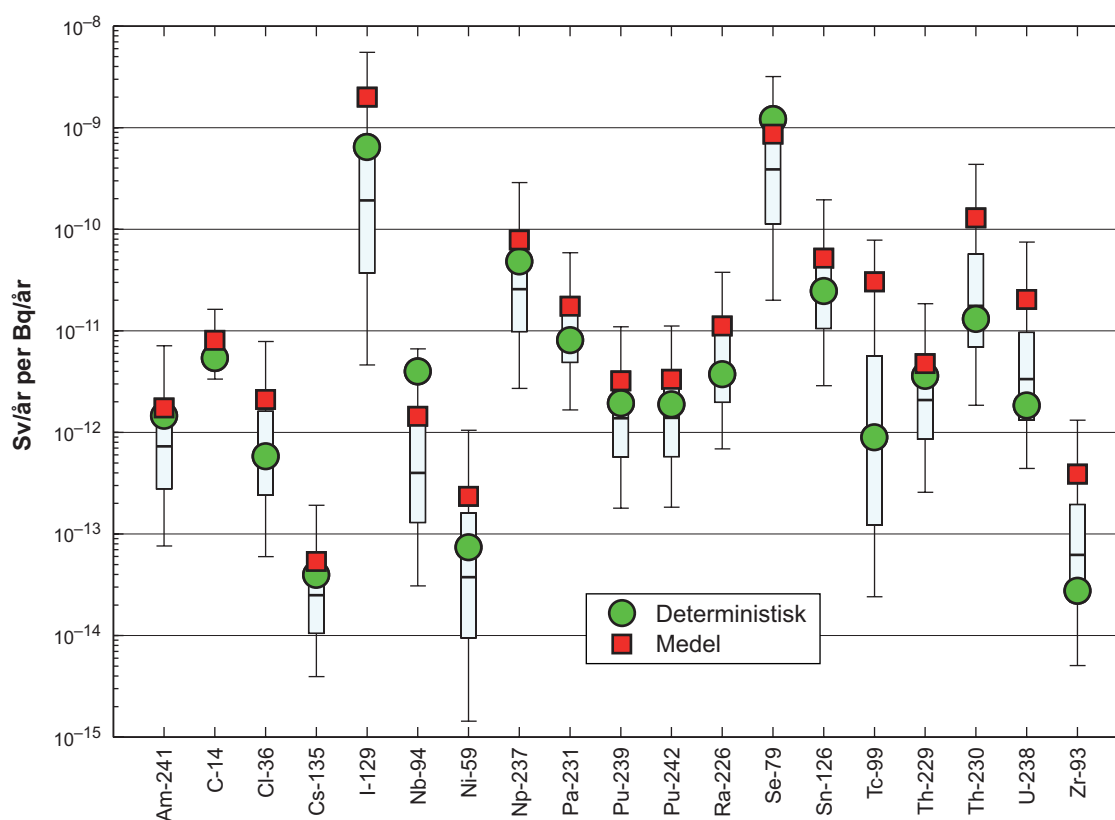
Följande diskussion är baserad på modelleringen av ett kontinuerligt utsläpp i det centrala korrosionsfallet. Den är inriktad på de mest relevanta parametrarna med utgångspunkt från en känslighetsanalys /Avila et al. 2010/ och på de radionuklider som ger det största dosbidraget, nämligen Ra-226, I-129, Se-79 och Cs-135, se avsnitt 13.5.4. En mer utförlig diskussion om osäkerheter vid LDF-modelleringen finns i **Biosfärsrapporten**.

Inverkan av parameterosäkerheter på LDF-beräkningar

Vid beräkning av de deterministiska LDF som användes i de slutliga dosberäkningarna togs parametervärdena fram genom sammanvägning av alla tillgängliga data med hjälp av ämnesexperter. Intentionen vid denna sammanvägning var att LDF-värdena skulle vara så realistiska som möjligt och alltså varken över- eller underskatta dosen. För att ta reda på i vilken grad parameterosäkerheter inverkar på LDF-skattningarna användes probabilistiska simuleringar. LDF-värdena från de probabilistiska simuleringarna var ungefärligen log-normalfördelade med ett 90-procentigt konfidensintervall som för de flesta nuklider spände över cirka två storleksordningar, se figur 13-11.

Centralvärdet för fördelningar som omfattar flera storleksordningar kan representeras av antingen medianen eller medelvärdet för fördelningen. Beroende på log-normalfördelning av LDF-värdena var det aritmetiska medelvärdet systematiskt högre än medianvärdet. Vid bestämning av vilka parameterfördelningar som skulle användas vid de probabilistiska simuleringarna användes ofta platsdata i kombination med generiska data. Det är därför ofta svårt att avgöra i vilken utsträckning en vald fördelning verkligen representerar platsen och i många fall ger den mera en återspeglning av variationen i generiska data. Detta kan medföra att beräknade fördelningar av LDF-värden ibland täcker ett överdrivet brett intervall och det kan också leda till skeva fördelningar, med medelvärden förskjutna mot överdrivet höga värden. Trots detta låg skillnaden mellan det deterministiska LDF-värdet och det aritmetiska medelvärdet inom en faktor tre för de flesta radionuklider. Detta gäller även för de nuklider som ger det största dosbidraget.

För några få radionuklider skulle medelvärdet från de probabilistiska LDF-skattningarna ha resulterat i värden som var en storleksordning högre än de LDF-värden som används i säkerhetsanalysen (till exempel Tc-99, Th-230 och U-238). Det möjliga utsläppet av dessa nuklider till biosfären förväntas dock vara obetydligt, se avsnitt 13.5.4. Man kan därför dra slutsatsen att effekterna av parameterosäkerheter på de deterministiska LDF-skattningarna är så små att de inte har betydelse för analysen av förvarssäkerheten. Detta diskuteras mer utförligt i **Biosfärsrapporten** och i /Avila et al. 2010/.



Figur 13-11. Variation hos LDF-värden för den interglaciala perioden vid probabilistiska simuleringar, redovisade för ett urval av de analyserade radionukliderna. Värdena gäller för den tidpunkt när medianen för det probabilistiska utfallet var maximal. Figuren visar medelvärde, median, 5- och 95-percentil från probabilistiska simuleringar och som jämförelse visas även deterministiska LDF-värden /från Avila et al. 2010/.

Radionuklidutsläpp i biosfären

De hydrogeologiska modellerna /Joyce et al. 2010, Bosson et al. 2010/ visar att utströmning av djupt grundvatten i första hand kommer att ske till lågt belägna punkter i landskapet, såsom sjöar, våtmarker och grunda delar av havsbotten. Enligt /Joyce et al. 2010/ bestäms avrinningsmönstret huvudsakligen av den lokala topografin och deterministiska deformationszoner. De olika modellrealiseringarnas mönster skiljer sig inte avsevärt från varandra. Med hjälp av den yhydrologiska modellen /Bosson et al. 2010/ bekräftades det övergripande mönstret för utströmningsområdenas lägen i Forsmark. Identifieringen av de potentiella utströmningsområdena för djupt grundvatten fastställer egenskaperna hos de områden som kan komma att påverkas av radionuklider från förvaret.

Flera av biosfärsobjektens egenskaper (inklusive delavrinningsområde, tidpunkt då området höjer sig ur havet och avlagringarnas tjocklek) påverkar transporten och ackumuleringen av radionuklider. Dessa egenskaper är inte oberoende, utan de varierar tillsammans alltefter landskapets topografi och geometri. Det finns osäkerheter i lokalisering och storlek hos de biosfärsobjekt som är belägna under vatten i dag, och dessa osäkerheter är i huvudsak knutna till havsbottens batymetri och avlagringarnas egenskaper. De identifierade biosfärsobjekten spänner emellertid över ett brett spektrum av olika förhållanden, såsom topografiskt läge, geometriska kännetecken och avlagringarnas tjocklek. Biosfärsobjekten antas därför kunna representera både det nuvarande och det framtida landskapet.

Även om många förhållanden påverkar den modellerade utvecklingen av aktivitetskoncentrationer i ett utströmningsområde, bestäms aktivitetskoncentrationerna i jord och vatten vid jämvikt i första hand av vattendelarens och delavrinningsområdets storlek. De biosfärsobjekt som ger upphov till de högsta aktivitetskoncentrationerna i omgivningen är objekt med ett litet delavrinningsområde och utan inflöde av ytvatten från ett uppströms beläget avrinningsområde. Dessa objekt kan vanligen försörja 80 individer och det mest extrema objektet har ett lokalt avrinningsområde som bara är tre gånger större än sjö-/våtmarksområdet (24 ha). Teoretiskt sett skulle ännu mindre biosfärsobjekt med små avrinningsområden hållbart kunna försörja en grupp på 10–20 individer. En noggrann analys av landskapet i Forsmark har dock visat att det inte kommer att förekomma utströmningsområden med ett mindre avrinningsområde än 24 ha och en rimlig sannolikhet för ett långvarigt utsläpp från förvaret /Lindborg 2010/.

Det maximala LDF-värde som används i beräkningskedjan (se figur 13-2) tar ingen hänsyn till det faktum att ett och samma utsläpp kan påverka flera olika objekt, eller att olika radionuklider kommer att ge upphov till maximala LDF under olika successionsstadier i biosfären. Detta innebär att de maximala LDF-värden som används i säkerhetsanalysen överskattar den potentiella risken.

I LDF-beräkningarna används ett enhetsutsläpp på 1 Bq/år (se avsnitt 13.2.2). Genom detta sätt att räkna överskattas LDF-värdena under förhållanden med liten utströmning av grundvatten, till exempel när ett biosfärsobjekt är täckt av hav, jämfört med perioder med större utströmning, eftersom källtermen till biosfären inte är konstant utan varierar alltefter flödesförhållandena. Flödesförhållandena kan påverka flöden från förvaret med upp till en storleksordning, vilket visas i figur 13-33. Det maximala LDF-värdet påverkas inte av denna variation i flödesförhållandena, men den måste beaktas i tolkningen av LDF-värdets utveckling över tiden, se figur 13-8.

En slutsats som kan dras när det gäller de biosfärsobjekt som används för att representera det framtida Forsmarkslandskapet är att de ger en rimlig representation av det spektrum av utströmningsområden som i framtiden kan komma att ta emot kontaminerat grundvatten från förvaret. Eftersom de representerar ett så pass brett spektrum när det gäller storlek och egenskaper har osäkerheter angående de framtida utsläppsområdenas egenskaper tagits med i de LDF-värden som används i säkerhetsanalysen. En annan slutsats som kan dras av osäkerhetsanalysen är att konceptet enhetsutsläpp och tillämpningen av maximala LDF-värden i riskanalysen innebär att risken är överskattad, se även /Avila et al. 2010/.

Ackumulation av radionuklider i avlagringar

Osäkerheter i de parametrar som beskriver radionuklidens retention i avlagringarna inverkar på LDF-resultatets övergripande osäkerhet. För Ra-226, som ger det största dosbidraget, förklarade fördelningskoefficienten mellan fasta och flytande faser (dvs K_d) för den nedre delen av avlagringarna ungefär 60 procent av den övergripande osäkerheten, och ytterligare sju procent förklarades av K_d för den övre och mellersta av avlagringarna, se **Biosfärsrapporten**. Huvudorsaken till den stora variationen hos K_d för Ra-226 var att man med befintliga platsdata inte kunde ge en tillförlitlig skattning av den naturliga variationen. I stället uppskattades K_d för Ra-226 från litteraturdata /EMRAS 2008/, vilka spänner över ett brett spektrum av geografiska förhållanden och jordarter.

Tillgängliga platsdata är emellertid i samma storleksordning som den bästa skattningen från litteraturen, vilket tyder på att de skattningar som används i analysen sannolikt inte avviker med storleksordningar från det värde som används i analysen, se **Biosfärsrapporten**. För att validera de LDF-värden för Ra-226 som används i SR-Site, och för att uppskatta effekten av ett rimligt osäkerhetsintervall för skattningen, omräknades LDF-värdena för Ra-226 med användning av nyligen (hösten 2010) insamlade platsdata, se /Avila et al. 2010/ och ingående referenser.

Analysen visar att de LDF-värden för Ra-226 som används i SR-Site avviker med mindre än en faktor två från de LDF-värden som beräknades med hjälp av K_d -värden baserade på platsdata. Resultatet var inte förvånande, eftersom K_d för organiska sediment baserade på platsdata överensstämde mycket bra med litteraturvärdet på 2,5 och K_d för oorganiska sediment var inom en storleksordning från litteraturvärdet. Litteraturdata på K_d för Ra-226 spänner dock över ett mycket stort intervall och överdriver därför osäkerheten i retentionen av Ra-226 på förvarsplatsen. För att undvika att denna orealistiskt stora osäkerhet fördes vidare till analysen av osäkerhet i LDF-beräkningarna användes sent insamlade platsdata för Ra-226 i de probabilistiska simuleringarna som syftade till att undersöka effekten av parameterosäkerhet. På grundval av dessa analyser dras slutsatsen att de K_d -värden för Ra-226 som används i SR-Site är typiska för platsen och att LDF-värdet för Ra-226 är rimligt med tanke på osäkerheten hos K_d -värdena för Ra-226 på förvarsplatsen.

Indelning av avlagringsreservoarerna

I radionuklidmodellen representeras den nedre delen av avlagringarna av en enda reservoar. En enreservoarsmodell tenderar att ge upphov till ett tidigare genombrott och större spridning av radionuklider som ackumuleras i avlagringarna än en modell med en finare indelning. För att undersöka effekten av indelning på utspädning och spridning gjordes en horisontell indelning av de nedre avlagringarna i ett varierande antal reservoarer staplade på varandra /Avila et al. 2010/. Analysen visade att en finare indelning av de nedre avlagringarna kommer att öka retentionen i djupare jordlager, men att detta har en begränsad effekt på de beräknade LDF-värdena för de flesta radionuklider (inklusive radionukliderna som ger det största dosbidraget). För radionuklider som påverkas av diskretisering leder dessutom enkompartmentsvarianten som används i SR-Site till försiktiga LDF-skattningar jämfört med skattningar som är baserade på finare indelning av den nedre regoliten, se **Biosfärsrapporten** och /Avila et al. 2010/.

Framtida människors beteende och nyttjande av landskapet

Ett potentiellt utsläpp av radionuklider från förvaret kommer att nå biosfären i rumsligt begränsade utströmningsområden (dvs biosfärsobjekt). Över tiden kommer följaktligen de högsta aktivitetskoncentrationerna i landskapet att återfinnas i biosfärsobjekt som tar emot direkta utsläpp av radionuklider från geosfären /Avila et al. 2010/.

I analysen antas att en representativ individ från den mest exponerade gruppen tillbringar all sin tid i det kontaminerade området och får sin fulla försörjning av föda och vatten från biosfärsobjektet. Vidare antas att en kontaminerad våtmark kommer att dräneras och användas för jordbruksändamål vid den tidpunkt som resulterar i maximal dos per enhetsutsläpp. Dessa antaganden är dock osannolika ur ett kulturellt eller landskapsutnyttjandeperspektiv. Hållbar jordbruksanvändning av de dränerade organiska jordar som är typiska för biosfärsobjekten är till exempel endast möjlig under en period av 50–100 år /Lindborg 2010/. Däremot kan de tjocka och delvis kontinuerliga lagren av lera och sand i de mellersta delarna av Öregrundsgrepen odlas på ett uthålligt sätt under tusentals år.

Ett mer realistiskt scenario för ett framtida självförsörjande samhälle i området är därför att det är de huvudsakligen lågkontaminerade mellersta delarna av Öregrundsgrepen som kommer att omfattas av intensivt jordbruk och bidra med huvuddelen av den föda som intas, även till den mest exponerade gruppen. Några av de mindre biosfärsobjekten kan odlas periodvis och då komplettera den föda som produceras i de mer lämpade odlingsområdena i Öregrundsgrepen. Troligen kommer dock biosfärsobjekten att i första hand användas för extensiv insamling av naturligt producerad föda. Det är därför mycket försiktigt att anta att en representativ individ från den mest exponerade gruppen tillbringar all sin tid i det kontaminerade området och får sin fulla försörjning av föda och vatten från biosfärsobjektet. Effekten av osäkerheter som rör sammansättningen av mänsklig kost undersöktes i en separat probabilistisk simulering. Resultaten visar att osäkerheter i kostsammansättningen påverkar LDF-värden mindre än en faktor två (se även /Avila et al. 2010/).

För LDF-beräkningarna antogs det att grönsaker bevattnas med kontaminerat ytvatten. Effekterna av bevattningsmedel med brunnsvattnen och långvarig bevattningsundersöktes i separata simuleringar. Bevattningsmedel med brunnsvattnen ökade aktivitetskoncentrationer hos grönsaker något för de flesta nuklider som undersöktes, men effekterna av de radionuklider som ger det största dosbidraget var vanligen lägre än en faktor två. Långvarig bevattningsmedel av icke-kontaminerad mineraljord med kontaminerat ytvatten ledde inte till högre koncentrationer i grönsaker än de som erhöles efter dränering och odling av en våtmark i ett närliggande kontaminerat utströmningsområde /Avila et al. 2010/. Från dessa simuleringar drogs slutsatsen att antaganden om det kontaminerade bevattningsvattnets ursprung inte inverkar på något avgörande sätt på de beräknade LDF-värdena och att långvarig bevattningsmedel med kontaminerat ytvatten inte bör leda till signifikant högre doser än de som förekommer vid initial odling av kontaminerad organisk jord /Avila et al. 2010/.

Sammanfattning och slutsatser

Biosfärsanalysen bygger på kunskap och resultat från omfattande undersökningar av Forsmarksområdet. Platsundersökningarna har legat till grund för den konceptuella beskrivningen av platsen och de har också bidragit till en systematisk kartläggning av processer som kan ha betydelse för transport och ackumulation av radionuklider i biosfären för att säkerställa att alla relevanta processer har tagits med i analysen. Undersökningarna har också gjort det möjligt att använda parameter-skattningar som motsvarar nutida och framtida platsförhållanden i de olika modelleringsstegen.

Ett antal olika biosfärsobjekt har identifierats som potentiella utsläppsområden för radionuklider från förvaret. Objekten är belägna i ett föränderligt landskap, alltifrån ett som är helt täckt av vatten till ett helt landbaserat, och de uppvisar en betydande variation vad gäller storlek, tidpunkt då de växlar mellan olika successionsstadier och objektspecifika egenskaper. Även om det är svårt att förutsäga den exakta framtida landskapsutvecklingen kan den modellerade landskapsutvecklingen ses som en systematisk utvärdering av möjliga utvecklingslinjer, baserad på kännedomen om hur nuvarande geometrier har utvecklats och på en förväntad strandlinjeförskjutning.

Ett ekosystembaserat tillvägagångssätt har använts för att dynamiskt modellera transport och ackumulation av radionuklider i biosfärsobjekt under en 70 000 år lång isfri period i referensglaciationscykeln. Modelleringen har även omfattat analyser av effekterna av olika klimatförhållanden. Mänskligt nyttjande av naturresurser baseras i analysen på den potentiella produktionen av naturliga och odlade födoämnen i biosfärsobjekten. Årsdosen för framtida invånare i Forsmarksområdet vid ett konstant utsläpp av 1 Bq per år av varje radionuklid och till varje biosfärsobjekt beräknades för samtliga radionuklider. Därefter valdes, för varje radionuklid, LDF-värdet från det biosfärsobjekt och vid den tidpunkt som gav den högsta dosen per enhetsutsläpp. Följaktligen behöver inte LDF-värden från olika nuklider överensstämma med samma grupp exponerade individer vad gäller tidpunkt eller lokalisering i landskapet.

Ytterligare simuleringar och alternativa modeller har använts för att undersöka inverkan av osäkerheter och olika antaganden på de slutliga LDF-skattningarna. Från dessa analyser dras slutsatsen att varken diskretisering av objekt, parametersäkerheter eller antaganden om människors nyttjande av naturresurser har någon betydande effekt på de beräknade LDF-värdena. När det gäller parametersäkerheter visar analyserna att en stor andel av LDF-osäkerheten kan tillskrivas de parametrar som beskriver fördelningen av radionuklider mellan fasta och flytande faser (dvs K_d) och det biologiska upptaget (dvs CR). Följaktligen skulle modellprecisionen kunna ökas, antingen genom bättre skattningar av dessa platsparametrar eller också genom utveckling av alternativa modelleringsmetoder för sorption och upptag av radionuklider som är mindre känsliga för parametersäkerheter, se vidare diskussionen i **Biosfärsrapporten**.

Även om intentionen i biosfärsmodelleringen har varit att göra en så realistisk analys som möjligt ingår fortfarande ett stort antal försiktiga antaganden i analysen, se **Biosfärsrapporten**. Användningen av platsdata, ofta med kvantifierad osäkerhet, gjorde att platsanpassade och realistiska parametervärden kunde väljas till radionuklidmodellen. Analyserna visar också att effekten av de kvantifierade osäkerheterna på slutliga LDF-värden var begränsad. Flera av de antaganden som gjordes i definitionen av mest exponerad grupp måste däremot betraktas som mer eller mindre överdrivet försiktiga. Sammantaget innebär det att tilltron är stor till att de slutliga LDF-värdena utgör robusta och försiktiga indikatorer som kan användas i SR-Site-analysen för att påvisa att myndighetskraven upprätthålls.

13.3 Kriticitet

Om ett kapselbrott sker måste risken för kärnkriticitet beaktas, eftersom det i förekommande fall skulle ha en kraftig inverkan på den fortsatta utvecklingen av den otäta kapseln.

Risken för att kärnkriticitet uppstår i kapselns inre (process F3 Inducerad fission (kriticitet) i process-tabellen för bränslet i avsnitt 7.4.1) har avfärdats i flera studier, se exempelvis SR-Can-rapporten /SKB 2006a/. Frågan har senast analyserats av Agrenius /SKBdoc 1193244/.

I förvaret måste standardkriterier mot kriticitet för använt kärnbränsle vara uppfyllda. Det innebär att den effektiva neutronmultiplikationskonstanten, k_{eff} , inte får överskrida 0,95 med hänsyn tagen också till osäkerheter. Agrenius /SKBdoc 1193244/ har beräknat den effektiva neutronmultiplikationskonstanten k_{eff} efter deponering. Hänsyn togs till osäkerheter i parametrar såsom bränsleelementens placering i kapseln, toleranserna vid tillverkning, storleken på insatsens bränslekanaler, temperaturen samt variation i anrikning. Beräkningarna utfördes för färskt bränsle med en anrikning på fem procent U-235. För en fylld och försluten kapsel med argonatmosfär är k_{eff} mindre än 0,4 och systemet är starkt underkritiskt.

Om det antas att kapseln läcker och att kapselns bränslekanaler och bränsleelement är vattenfyllda kommer reaktiviteten att öka. Med alla bränslekanaler fyllda i en deponerad kapsel i förvaret, och där kapseln är omgiven av 35 cm bentonit och fylld med vatten, erhålls följande resultat:

BWR: $k_{\text{eff}} = 0,9959 \pm 0,0002$

PWR: $k_{\text{eff}} = 1,0888 \pm 0,002$

Med det pessimistiska antagandet att bränslet är färskt är slutsatsen att reaktivitetskriteriet inte kunde uppfyllas för en otät kapsel. Ett mer realistiskt antagande skulle vara att ta hänsyn till bränslets utbränning, vilket kommer att minska reaktiviteten. Agrenius /SKBdoc 1193244/ beräknade även neutronmultiplikationskonstanten för bestrålat bränsle med olika ursprungliga anrikningar med isotopkoncentrationerna för två isotopuppsättningar. Dessa beräkningar visade, med hjälp av metoder som bygger på de senaste rönen och en rimlig bedömning av osäkerheterna, att om hänsyn tas till bränslets utbränningsgrad kan $k_{\text{eff}} \leq 0,95$ uppfyllas för både BWR- och PWR-bränsle med en given utbränningsgrad. Resultaten diskuteras utförligare i avsnitt 2.1.3 i **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Acceptanskriteriet för inkapsling av bränsleelement är definierat för att säkerställa att bränsleelement inte under några omständigheter ska kapslas in om inte kriticitetskriteriet kan uppfyllas, se vidare i avsnitt 5.3.4.

Risken för kriticitet till följd av omfördelning av material har analyserats av /Behrenz och Hannerz 1978/ och av /Oversby 1996, 1998/. Slutsatsen var att kriticitet utanför kapseln har en försvinnande låg sannolikhet och kräver flera högst osannolika händelser för att den ska uppstå. Efter rapporten om möjlig kriticitet utanför kapseln av /Bowman och Venneri 1994/, som avvisades i en granskning av /Van Konynenburg 1995/, har ett flertal studier konstaterat att kriticitet i ett geologiskt förvar till följd av omfördelning av klyvbart material är en högst osannolik händelse.

Risken för kärnkriticitet i närheten av det föreslagna förvaret i Yucca Mountain undersöktes nyligen av /Nicot 2008/. Slutsatsen drogs att extern kärnkriticitet inte utgör något problem vid det föreslagna förvaret i Yucca Mountain för någon av de deponerade avfallstyperna. En del av det avfall som är avsett för Yucca Mountain innehåller högre nivåer av klyvbart material än vad som är avsett att deponeras i ett svenskt förvar.

Sammanfattningsvis måste utbränningsgraden beaktas om man vill visa att kapseln förblir underkritisk i förvaret för alla rimligt tänkbara scenarier, se tabell 2-3 i **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Sannolikheten för kriticitet inuti och utanför kapseln anses vara försumbart låg utgående från de resultat som redovisas i /SKBdoc 1193244/ och i /Van Konynenburg 1995, Oversby 1996, 1998, Nicot 2008/.

13.4 Modeller för att beräkna radionuklidtransport och dos

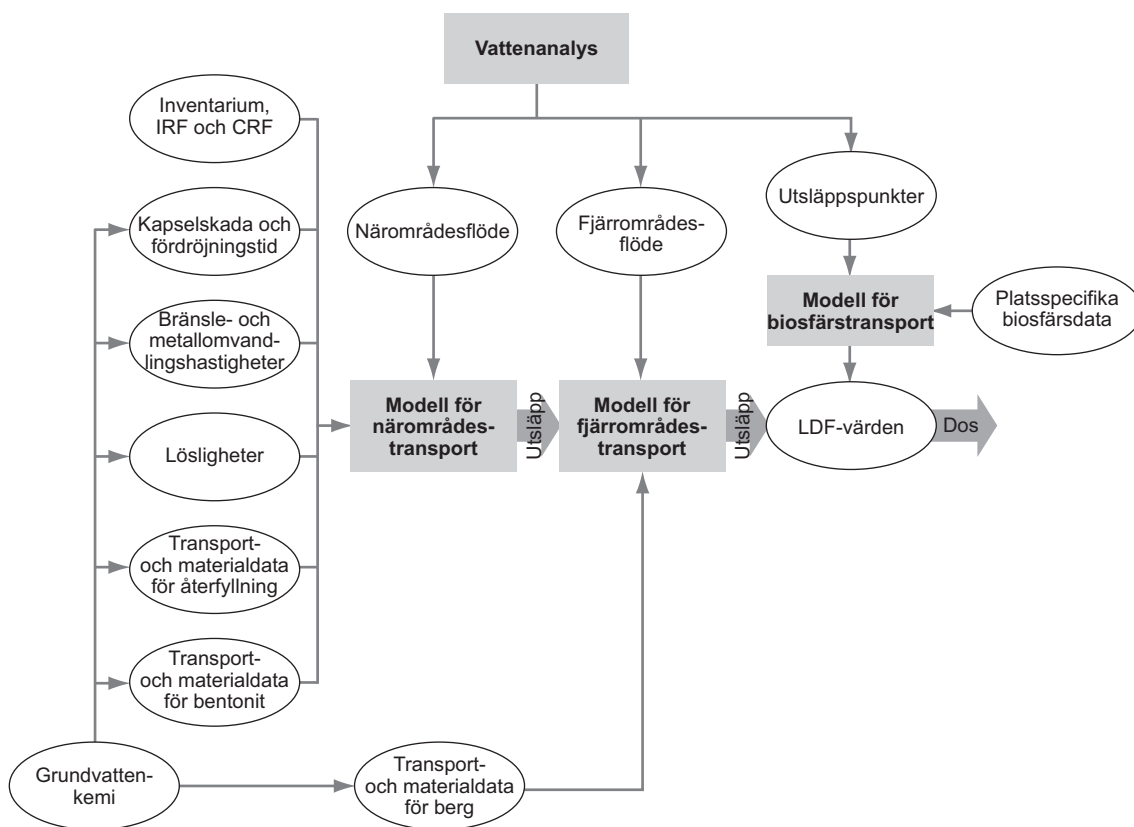
I figur 13-12 visas de modeller och data som används vid beräkningar av radionuklidtransport och dos. I det följande ges en kort beskrivning av närområdesmodellen COMP23 i avsnitt 13.4.1, och av fjärrområdesmodellen FARF31 i avsnitt 13.4.2. Det sistnämnda avsnittet innehåller även en beskrivning av en separat modell, MARFA, för att modellera varierande flöden och kolloidbefrämjad transport i geosfären.

Radionuklidtransporten och doskonsekvenserna har för några fall beräknats med förenklade, analytiska modeller vilka ger resultat som är jämförbara med dem från de numeriska modellerna. En kort beskrivning av de analytiska modellerna ges i avsnitt 13.4.4.

13.4.1 Närområdesmodellen COMP23

Närområdesmodellen för radionuklidtransport som används i SR-Site för att hantera radionuklidtransport i vattenfas är COMP 23 /Cliffe och Kelly 2006, Kelly och Cliffe 2006/. Det är en uppdaterad version av den kompartimentmodell som användes i SR 97-analysen och som ursprungligen utvecklats från NUCTRAN-programmet /Romero 1995, Romero et al. 1999, Cliffe 2004/. I SR-Site löses COMP23-modellen med hjälp av en implementering i Matlab/Simulink /Vahlund och Hermansson 2006b/ i stället för den ursprungliga implementeringen i Fortran.

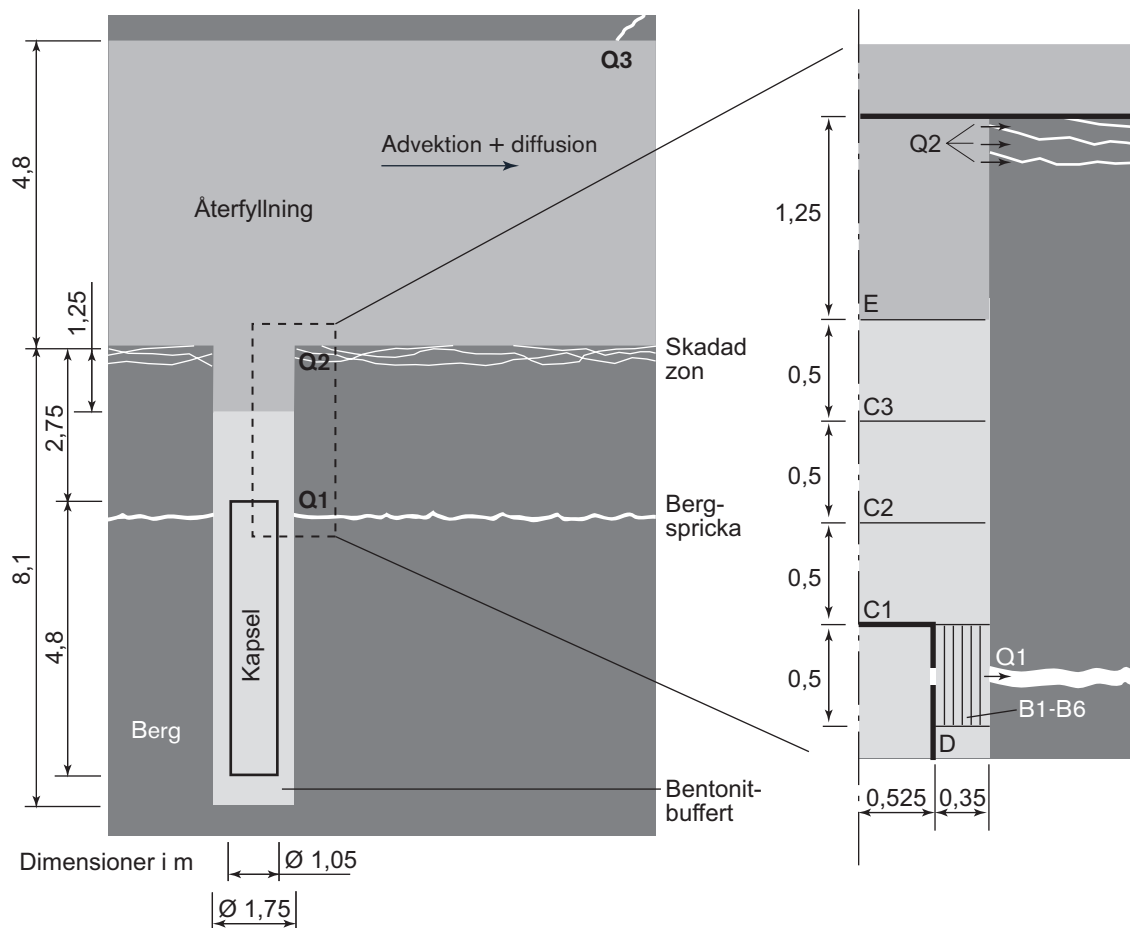
COMP23 används för att modellera processer som rör utsläpp och transport av radionuklider i kapselns inre, bufferten och deponeringstunnelns återfyllning, dvs de sammanfattade processerna F17, Bu25 respektive BfT21 i processtabellerna i avsnitt 7.4. Dessa omfattar processerna som rör radioaktivt sönderfall (F1), metallkorrosion (modelleras som konstant metallkorrosionshastighet, F11), bränsleupplösning (F12), upplösning av gapinventarium (modelleras som omedelbart utsläpp, F13), speciering av radionuklider (dvs upplösning/utfällning av nuklider med delade lösligheter för grundämnen, F14), diffusion (Bu11) och sorption (Bu12) i bufferten samt advektion (BfT9), diffusion (BfT10) och sorption (BfT11) i deponeringstunnelns återfyllning. Modellen hanterar även utsläppet av radionuklider till utsläppsvägar från närområdet enligt nedan.



Figur 13-12. Modeller och data för konsekvensberäkningar.

COMP23 beräknar transient nuklidtransport i ett förvars närområde med hjälp av ett nätverk av kopplade motstånd och kapacitanser i analogi med nätverket i en elektrisk krets. För att öka beräkningshastigheten har analytiska lösningar lagts in i stället för fin diskretisering vid känsliga zoner, som vid utsläppspunkten från ett litet kapselhål och vid sprickingångar.

Figur 13-13 visar kapseln, deponeringshålet och deponeringstunnelns återfyllning samt hur de modelleras med COMP23 i SR-Site. Det finns tre utsläppspunkter från närområdet. Den första utsläppspunkten benämns Q1 och representerar en horisontell spricka som skär deponeringshålet i höjd med kapsellocket i vertikalled. Den andra utsläppspunkten benämns Q2 och representerar en skadad zon, EDZ, i deponeringstunnelns sula – om en sådan zon antas förekomma. Den tredje utsläppspunkten benämns Q3 och representerar en spricka som skär deponeringstunneln. Antalet sprickor som skär ett deponeringshål och egenskaperna hos dessa sprickor bestäms statistiskt utgående från DFN-beskrivningen av berget i den hydrogeologiska modelleringen, se även avsnitt 6.6 i **Datarapporten**. Om mer än en spricka skär ett deponeringshål summeras transportförmågan hos samtliga sprickor och tilldelas pessimistiskt den enskilda spricka som modelleras med COMP23. Det ekvivalenta flödet genom Q2 beräknas också som en del i den hydrogeologiska modelleringen. Data avseende transportegenskaperna hos den skadade zon som används i dessa beräkningar anges i avsnitt 6.5 i



Figur 13-13. Närområdet och detaljer i modellrepresentationen i form av kompartimenten B1–B6, C1–C3, D och E i modellen COMP23. Dessutom visas transportvägarna Q1, Q2 och Q3 till en spricka som skär deponeringshålet, till den skadade zonen respektive till en spricka som skär deponeringstunneln. (Eventuellt skulle en mindre EDZ omkring deponeringshålet kunna förekomma, men enligt **Berglinjerapporten** skulle en sådan zon ha mycket låg – om ens någon – sammanhängande hydraulisk konduktivitet och tas därför inte med i modellen). Den uppdelning i kompartiment som visas i denna figur gäller för scenariot med pinnhålsbrott i en kapsel. Alla andra analyserade typer av kapselbrott kräver en mindre differentierad uppdelning av närområdet.

Datarapporten. Flödet i deponeringstunneln och avståndet till närmaste Q3-spricka genom vilken radionuklider släpps ut till geosfären från tunneln bestäms i den hydrogeologiska modelleringen. Transport via advektion/diffusion i tunneln inkluderas i närområdessimuleringarna och modellens utsträckning i riktning nedströms anpassas så att den omfattar Q3-sprickan.

Effekter av spjälkning i deponeringshål hanteras genom att ingångsvärdena för de ekvivalenta flödena för transportväg Q1 modifieras, enligt beskrivning i avsnitt 10.3.6 och även i avsnitt 6.6 i **Datarapporten**. För att hantera spjälkning krävs inte någon modifiering av den numeriska modellen.

Advektiva förhållanden i bufferten behandlas genom att utflödet från kompartiment i kapselns inre likställs med utsläppet till Q1. Utsläppsvägarna Q2 och Q3 modelleras inte när advektiva förhållanden antas råda i bufferten, eftersom utsläppen till Q1 dominerar fullständigt över dem till Q2 och Q3 i dessa fall.

13.4.2 Fjärrområdesmodellerna FARF31 och MARFA

De fjärrområdesmodeller för radionuklidtransport som används i SR-Site för att hantera radionuklidtransport i vattenfas är FARF31 /Norman och Kjellbert, 1990, Elert et al. 2004/ samt MARFA /Painter och Mancillas 2009/.

FARF31 har använts i tidigare analyser, till exempel SR 97 /SKB 1999a/ och SR-Can /SKB 2006a/, medan MARFA har tagits fram för att användas inom SR-Site. Utvecklingen av MARFA pågår fortfarande, vilket beskrivs utförligare nedan. I SR-Site används MARFA huvudsakligen för beräkningar som kräver sådana funktioner som inte finns i FARF31. De två modellerna används också parallellt inom SR-Site för att visa att de ger överensstämmande resultat.

De två modellerna löser migration längs endimensionella flödesvägar och hanterar, om man använder nomenklaturen i processtabellerna i avsnitt 7.4, processen Ge24 ”Transport av radionuklider i vattenfas” och som består av delprocesserna advektion (en aspekt av processen Ge11), dispersion, matrisdiffusion med sorptionsjämvikt (Ge12 och Ge13) och radioaktivt sönderfall (F1, inklusive sönderfallskedjor). MARFA kan även hantera sorptionsjämvikt i den flödande fasen, dvs inte bara inom matrisens stillastående vatten.

I FARF31 löses ekvationerna analytiskt i Laplace-rymden och inverteras därefter numeriskt för att genombrottskurvorna ska erhållas. Ekvationerna uttrycks i termer av ackumulerad gångtid och inte i termer av avstånd längs flödesvägen. Denna egenskap gör det enkelt att beräkna gångtider i en fristående modell för grundvattenflöde, se avsnitt 10.3.6, och att därefter frikopplat beräkna radionuklidtransport.

FARF31 utvecklades ursprungligen för att användas tillsammans med en modell för grundvattenflöde, där en kontinuerlig, så kallad kontinuumrepresentation av berget används. I SR-Site modelleras grundvattenflödet huvudsakligen genom ett diskret spricknätverk (DFN), där enskilda sprickor representeras explicit. I det här fallet skiljer sig konceptualiseringen av en migrationsväg i viss mån från en kontinuummodell för grundvattenflöde. Till skillnad från makroskopiska strömningsrör som omfattar både berg och flödesvägar beskriver nu ekvationen flödesvägar genom det faktiska öppna porutrymmet, dvs via det konnekterade spricknätverket /RETROCK 2005/. Likväl är de styrande ekvationerna identiska för de två konceptualiseringarna. De storheter som beräknas i den DFN-baserade modellen för grundvattenflöde är den advektiva gångtiden (t_w) och det flödesrelaterade transportmotståndet (F) längs flödesvägarna. FARF31 har modifierats så att dessa indata kan användas direkt.

MARFA (Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field) använder en partikelbaserad Monte Carlo-metod för att simulera transporten av radionuklider i ett geologiskt medium med låg sprickighet. MARFA använder sig av en algoritm med slumpvandring i tidsdomänen (Time-Domain Random Walk) /Painter et al. 2008/, där icke samverkande partiklar, som representerar paket med radionuklidmassa, förflyttas genom systemet enligt regler som efterliknar de underliggande fysikaliska transport- och retentionsprocesserna. MARFA är speciellt utformad för att hantera utdata från DFN-flödesmodeller, CPM-flödesmodeller eller nästlade DFN/CPM-flödesmodeller.

Den största fördelen med MARFA jämfört med FARF31 är att den gör det möjligt att specificera olika retentionsmodeller för olika delar av systemet, till exempel olika modeller för hydrauliskt berg, hydraulisk ledare (deformationszon) och hydrauliska markzoner. Dessutom kan även de konstruerade delarna av systemet, dvs tunnlar, beskrivas retention. Slutligen kan flödets storlek, men inte riktning, ändras längs flödeslinjerna. Det ger en möjlighet att, åtminstone på ett ungefärligt sätt, behandla bland annat glaciala förhållanden där flödet kan vara nästan stillastående när förvaret är täckt av is, men mycket kraftigt när isfronten passerar över förvaret.

Immobiliseringsprocesser som det är känt förekommer i geosfären är inte lätta att kvantifiera och finns inte med i programmen. Dessa processer utvärderas dock genom överslagsberäkningar i **Radionuklidtransportrapporten**. Där diskuteras även deras konsekvenser för säkerhetsanalysen i detalj. Att utesluta dessa processer i programmen för beräkning av radionuklidtransport bedöms som ett försiktigt förhållningssätt vad gäller resulterande doser för de flesta relevanta situationer, möjligen med undantag av det fall som omfattar utfällning med efterföljande upplösning orsakad av exempelvis förändrade kemiska förhållanden /RETROCK 2005/. Radionuklider som är känsliga för redoxförhållanden påverkas mest av dessa processer med tanke på att de kan övergå från att vara huvudsakligen orörliga till att vara mycket mobila på en mycket kort sträcka i närheten av en redoxfront. Några situationer där detta skulle kunna äventyra förvarets säkerhetsfunktioner bedöms dock vara osannolikt på grund av de okarakteristiska redoxrandvillkor som en sådan ackumulations- och mobiliseringsprocess skulle kräva.

En begränsning som ligger i det flödesvägs-koncept som används i FARF31 är att endast stationära hastighetsfält kan behandlas (genom användning av metoder med ögonblicksbilder vid transportmodellering), medan flödesområdet förväntas utvecklas med tiden på grund av strandlinjeförskjutning. I MARFA är det möjligt att hantera ändringar i flödets storlek.

Kolloidbefrämd transport finns inte med i FARF31. Ett uttryck för snabb reversibel sorption/desorption på kolloider som modifierar de av MARFA:s indataparametrar som kvantifierar retention av radionuklider i bergets matris har härletts. I princip skulle samma modifiering kunna utföras i FARF31, men man har valt att hantera kolloidbefrämd transport i MARFA, eftersom detta fall är kombinerat med förändringar i flödesförhållandena.

13.4.3 Representation av biosfären

Biosfären representeras genom att radionuklidutsläppen från närområdet eller från geosfären multipliceras med en lämplig dosomvandlingsfaktor, dvs LDF-värdet, vars härledning förklaras i avsnitt 13.2.3.

De doser som erhålls på detta sätt eller, när det gäller närområdet, utsläpp uttryckta som dos, är de huvudsakliga målen för konsekvensberäkningarna som presenteras i detta kapitel. Syftet med dosomvandlingen är att få ett lämpligt mått på utsläppen, varigenom också ett totalmått erhålls i form av summerad dos.

I vissa situationer sker utsläppet i form av ett hastigt pulsutsläpp till biosfären och i det fallet är inte LDF-värdet, som härletts för ett stationärt utsläpp, en lämplig omvandlingsfaktor. I sådana fall används de LDF-värden som härletts för pulsutsläpp och som beskrivs i avsnitt 13.2.3.

I några få fall med relativt tidiga utsläpp skulle LDF-värdena representera en överskattning av doskonsekvenserna, eftersom utsläppet som tidigare nämnts långt ifrån uppnått något stationärt tillstånd. I ett par av dessa fall överförs tidsberoende utsläpp till samma biosfärsmodell som används för att härleda LDF-värden, varigenom en tidsberoende dos erhålls. Denna tar hänsyn till både den tidsmässiga variationen av utsläppet och utvecklingen av landskapet, se avsnitt 13.2.3.

Det finns också några få fall som beräknas för illustrativa ändamål, där ett stort antal kapslar antas skadas. I sådana fall används LDF-värden som beräknats för ett utsläpp som spritts ut över landskapsobjekten i enlighet med fördelningen av utsläppspunkter över tiden under den modellerade interglaciala perioden, i stället för de normala LDF-värdena där man pessimistiskt väljer det landskapsobjekt som får den högsta dosen som representant för biosfären, se avsnitt 13.2.2.

13.4.4 Förenklade analytiska modeller

Förenklade analytiska versioner av transportmodellerna för när- och fjärrområde har utvecklats /Hedin 2002b/. Dessa modeller använder sig av samma indata som motsvarande numeriska modeller och doserna beräknas med samma LDF-värden som i den numeriska metoden. Modelleringen kan genomföras probabilistiskt och ger resultat som stämmer väl överens med de deterministiska och probabilistiska beräkningsfallen i SR 97-analysen /Hedin 2002b, SKB 2004b/. I SR-Can-analysen påvisades att resultaten överensstämde väl för korrosionsscenarioet, skjuvlastscenariot och för utsläpp som uppstår vid pinnhålsbrott hos kapseln /SKB 2006a/. En enstaka realisering som utförs med de analytiska modellerna genomförs på omkring 0,1 sekunder med en 2 GHz persondator, vilket gör dem väl lämpade för probabilistiska beräkningar. Motsvarande beräkningstid för de numeriska modellerna är i storleksordningen 10 sekunder.

Den analytiska modellen har utvärderats gentemot de numeriska modellerna för flera beräkningsfall i detta kapitel. De analytiska modellernas funktion är att i) snabbt och preliminärt utvärdera beräkningsfall som ska användas vid planeringen av transportberäkningar, ii) fungera som ett av flera kvalitetssäkringsmått för de numeriska beräkningarna genom att identifiera möjliga skillnader i resultaten från de analytiska och numeriska modellerna samt leta efter förklaringar till dessa (beror de på modelleringsfel eller på skillnader i modellerna?) och iii) ge en förståelse för modellerna baserat på de analytiska modellernas enkla karaktär.

De analytiska modellerna har inte kvalitetssäkrats enligt de rutiner som används för de numeriska modellerna för radionuklidtransport, eftersom de inte är ett formellt godkänt verktyg för transportberäkningar i SR-Site.

Dessa modeller används parallellt med de numeriska modellerna för väsentliga fall av korrosionsscenarioet, avsnitt 13.5.10, och skjuvlastscenariot, avsnitt 13.6.5.

13.4.5 Val av radionuklider

Valet av radionuklider grundar sig på nuklidernas radiotoxicitet, inventarium, halveringstid och delade löslighet. Valet beskrivs ytterligare i **Radionuklidtransportrapporten**. Vissa av de valda, kortlivade nukliderna utelämnades i fall där de skulle ha sönderfallit till obetydliga nivåer vid starttidpunkten för beräkningen, se **Radionuklidtransportrapporten**.

Följande fissions- och aktiveringsprodukter valdes ut: Ag-108m, C-14, Cd-113m, Cl-36, Cs-135, Cs-137, Eu-152, H-3, Ho-166m, I-129, Mo-93, Nb-93m, Nb-94, Ni-59, Ni-63, Pd-107, Se-79, Sm-151, Sn-121m, Sn-126, Sr-90, Tc-99 och Zr-93.

Följande kedjenuklider (sorterade efter kedjor) valdes ut: Pu-240, U-236, Th-232, Cm-245, Am-241, Np-237, U-233, Th-229, Cm-246, Am-242m, Pu-242, Pu-238, U-238, U-234, Th-230, Ra-226, Pb-210, Am-243, Pu-239, U-235, Pa-231 och Ac-227. Vissa nuklider som har kortare halveringstider än sina döttrar togs endast med genom att deras initiala radionuklidinventarium adderades till döttrarnas inventarium. Detta gäller exempelvis Cm-244, Pu-241, Cm-243 och Pa-233.

13.5 Kapselbrott till följd av korrosion

13.5.1 Inledning

Som redovisats i avsnitt 12.6, i scenariot ”kapselbrott till följd av korrosion” (benämns kortfattat korrosionsscenarioet nedan) skadas kapslar till följd av ökad korrosion beroende på att det råder advektiva förhållanden i deponeringshålet efter förlust av buffertmaterial genom erosion.

För den här typen av kapselbrott blir både kapseln och bufferten förbikopplade, och retention i berget sker i liten utsträckning eftersom betydande kopparkorrosion efter bufferterosion endast uppträder i deponeringshål med höga flödes hastigheter, som i allmänhet är förknippade med flödesvägar till ytan med låg grad av retention i geosfären.

Sex varianter med varierande omfattning av korrosionsskador identifierades i korrosionsscenarioet, se figur 12-18 i avsnitt 12.6.3. För dessa redovisas beräkningar av radionuklidtransport och dos nedan. En *central korrosionsvariant* identifierades som den variant för vilken bedömningar av radionuklidtransport och dos i första hand ska göras.

Nedan redovisas konceptualiseringen av transportförhållandena inklusive hanteringen av pulsutsläpp för den omedelbart frigjorda fraktionen av inventariet i avsnitt 13.5.2 och indata för dessa *basfalls-antaganden om transport* ges i avsnitt 13.5.3. Data från den centrala korrosionsvarianten från korrosionsanalysen används tillsammans med transportdata för basfallet, vilket ger ett *centralt korrosionsfall* som analyseras i avsnitt 13.5.4.

I avsnitt 13.5.5 undersöks anledningar att beakta alternativa transportdata. Den analysen motsvarar analysen av inneslutningsförhållanden i avsnitt 12.6.2. I avsnitt 13.5.6 presenteras beräkningar för alternativa fall, vad gäller både antaganden och data rörande transport, inklusive iakttagelser i avsnitt 13.5.5 och alternativa korrosionsvarianter som identifierats i avsnitt 12.6.2. Vissa fall i avsnitt 13.5.6 analyseras med fjärrområdesmodellen MARFA.

Resultat av dosberäkningar för biota för det centrala korrosionsfallet ges i avsnitt 13.5.7. Alternativa säkerhetsindikatorer för det centrala korrosionsfallet ges i avsnitt 13.5.8. Avsnitt 13.5.9 ger en sammanfattning av resultaten för korrosionsscenarioet.

13.5.2 Konceptualisering av transportförhållanden

Utveckling av kapseln efter kapselbrott

Enligt analysen av kopparkorrosion under advektiva förhållanden, avsnitt 10.4.9, antas ett band som är 0,35 m högt och som täcker halva kapselperiferin vara jämnt korroderat. Detta betyder att då penetration sker måste det antas att kopparkapseln har omfattande skador.

Pessimistiskt försummas tiden som krävs för att penetrera segjärnsinsatsen, eftersom det är svårt att uppskatta en rimlig utveckling för processen för den här typen av kapselbrott. Eftersom genomgående skador i kopparkapseln i allmänhet uppkommer efter flera hundra tusen år för de få kapslar som utsätts för de högsta korrosionshastigheterna är den ytterligare tid som det tar att penetrera segjärnsinsatsen av mindre betydelse.

När kopparkapseln och segjärnsinsatsen väl har skadats antas det att hålrummet i insatsen snabbt fylls med vatten till följd av den höga flödes hastigheten och avsaknaden av transportmotstånd när bufferten är borta, samt till följd av att det även finns stora skador på segjärnsinsatsen.

Radionuklidutsläpp

Advektiva förhållanden i bufferten måste antas råda även i konsekvensberäkningarna för korrosionsscenarioet. Det finns ingen buffert som hindrar den utgående transporten av radionuklider, vilket betyder att denna styrs av flödet genom deponeringshålet, q . Följande tre bidrag till den utgående transporten kan urskiljas.

- Den omedelbart frigjorda fraktionen av radionuklider (Instant Release Fraction, IRF) som antas lösas upp snabbt i vattnet i hålrumsvolymen och som därefter sköljs ut från kapseln. Detta ger upphov till en puls av obestämd längd, beroende på till exempel osäkerheten i detaljerna i utvecklingen av kapselbrotten genom vilken IRF görs tillgänglig.
- Ett bidrag från korrosion av metalldelar i bränselelementen och det samtidiga utsläppet av radionuklider som finns inlagrade i metalldelarna. Dessa beståndsdelar benämns sammantaget för den korrosivt frigjorda fraktionen, förkortat CRF (Corrosion Release Fraction).
- Ett bidrag från upplösningen av bränsle och det därav orsakade utsläppet av radionuklider som finns inlagrade i bränselelementen.

I de fall där bufferten är kraftigt eroderad kan kolloidfiltrering (buffertfunktionsindikator Buff7) inte garanteras. Detta betyder att användningen av grundämnens lösligheter som gränssättande för radionuklidutsläpp kan ifrågasättas eftersom det inte kan uteslutas att fasta partiklar bildas av olika radionuklider som når mättnad skulle kunna lämna kapseln och migrera vidare. Dock är detta av

mindre betydelse i det här fallet, eftersom flödet genom deponeringshålet ofta är för högt för att fasta faser ska fällas ut (med uran som undantag). Detta visas i avsnitt 13.5.6 genom analys av ett fall där löslighetsgränser inkluderats.

Utsläppet till sprickan styrs således av korrosionshastigheten och bränsleupplösningshastigheten med två undantag:

1. För uran utgör en koncentrationsgräns likväl en effektiv begränsning av utsläppet på grund av den stora mängden U-238 som finns i bränslet. Detta begränsar utsläpp av uranisotoper i närområdet, men leder även till förhöjda utsläpp av Th-230, Th-229 och Pa-231 som alstras av de sekundärt utfällda isotoperna U-234, U-233 respektive U-235.
2. Det kan inte uteslutas att medfällningsprocesser och sorption/immobilisering i den kvarvarande bentoniten i deponeringshålet kan hålla kvar Th-230 i närområdet. Om detta är fallet kan dess dotternuklid Ra-226, som är betydligt rörligare, frigöras. Man antar att den på så sätt alstrade Ra-226 frigörs till det flödande grundvattnet i sprickan som skär deponeringshålet. Detta leder till större utsläpp av Ra-226, eftersom det finns ett bidrag som inte endast kommer direkt från bränsleupplösning utan även från de kvarhållna Th-230-nukliderna. Eftersom Ra-226 ofta står för huvudbidraget till dos, leder detta även till högre totala doser. Därför antas det att Th sorberas i närområdet. Följden av att försumma Th-sorption analyseras som ett separat beräkningsfall.

Eftersom flödes hastigheten i den skärande sprickan är hög, är dessutom retentionen i berget i allmänhet begränsad för dessa deponeringshål.

Utsläpp av aktiveringsprodukter

Inventariet av aktiveringsprodukter i metalldelarna i bränsleelementen har ofta ansatts tillhöra den omedelbart frigjorda fraktionen då det har ansetts onödigt att utveckla en modell för metalldelarna eftersom nukliderna i dessa sprids ut och fördröjs vid transport genom bufferten. I korrosionsscenarioet skulle det här antagandet emellertid leda till orälistiskt höga utsläpp av t ex Ni-59 och Nb-94. Därför tas korrosion av bränsleelementens metalldelar med i närområdesmodellen, med korrosionshastigheter enligt **Datarapporten**. Transporten i geosfären och omvandlingen från utsläpp till dos i biosfären görs på samma sätt som för huvuddelen av nukliderna, dvs med fjärrområdesmodellen FARF31 och med LDF-värden. Den andel av inventariet för vilken korrosion av metalldelar bestämmer utsläppshastigheten kallas för den korrosivt frigjorda fraktionen, CRF (Corrosion Release Fraction). CRF-fraktionen anges i **Datarapporten**, på samma sätt som andra fraktioner av inventariet.

Utsläpp av omedelbart frigjord fraktion

Den andel av inventariet som antas frigöras omedelbart från bränslet vid vattenkontakt förväntas komma ut i geosfären inom några år i korrosionsscenarioet, eftersom flödes hastigheterna i de deponeringspositioner som har en eroderad buffert och otät kapsel är höga, se vidare i tabell 13-4. Eftersom dessa nuklider i allmänhet är icke-sorberande och eftersom de flödesrelaterade retentionsegenskaperna i geosfären är ogynnsamma för de flödesvägar som är förknippade med de aktuella deponeringspositionerna, frigörs de i allmänhet som tiotals år långa pulser från geosfären till biosfären. I det här fallet skulle LDF-värdena ge alltför pessimistiska dosuppskattningar, som diskuteras i avsnitt 13.2.3. Därför används LDF-pulsvärdena i tabell 13-2 för hela IRF-inventariet vid tidpunkten för kapselbrott för Cl-36, Ni-59, Se-79, Nb-94, Tc-99, Sn-126, I-129 och Cs-135. Ett antal nuklider med en IRF-fraktion och med halveringstider upp till 10 000 år (exempelvis Sr-90, Cs-137 and C-14) uteslöts från analysen eftersom de sönderfaller till obetydliga nivåer innan någon skada inträffar i korrosionsscenarioet.

Observera att det är pessimistiskt att använda LDF-pulsvärden trots att några av substanserna i vissa realiseringar av en probabilistisk transportberäkning för geosfären skulle resultera i utsläpp till biosfären med längre varaktighet. Detta beror på att den maximala dosen för en given utsläppt massa till biosfären uppnås när hela massan frigörs på en gång, varvid det noteras att LDF-pulsvärdena per definition tas från den tidpunkt i landskapsutvecklingen då konsekvenserna är maximala.

Observera även att det pessimistiskt antas att utvecklingen av kapselbrottet är sådan att alla bränslestavar blir tillgängliga samtidigt, dvs en plötslig kollaps av alla bränslestavarnas kapslingsrör antas.

I hanteringen av pulsutsläpp antas det att om flera kapslar skadas så kommer aldrig två kapslar att påverka samma objekt i biosfären samtidigt. Detta motiveras av det faktum att i medeltal skadas färre än en kapsel till följd av advektion/korrosion, och dessutom av att beräknade genombrottsstider är fördelade över hundratusentals år.

13.5.3 Indata till transportmodeller

Indata till transportmodellerna för korrosionsscenarioet summeras i tabell 13-3. Alla data har kvalificerats i **Datarapporten**, förutom genombrottsstiderna, vilka erhålls som utdata från de erosions/korrosionsberäkningar som redovisas i avsnitt 12.6.2 och i detalj i /SKB 2010d/. Indata till dessa senare beräkningar har dock kvalificerats i **Datarapporten**.

Tabell 13-3. Indata för korrosionsfallen.

Storhet	Nuklider/ Grund- ämnes- specifikt	Data	Avsnitt i Data- rapporten
Antal otäta kapslar	–	Enligt beräkning med korrosionsmodell, se avsnitt 12.6.2.	–
Genombrottsstider	–	Enligt beräkning med korrosionsmodell, se avsnitt 12.6.2.	–
Radionuklidinventarium	N	Medelinventarium beräknat över alla bränsletyper.	3.1
Omedelbart frigjord fraktion av inventariet	N	Fördelningar enligt Datarapporten .	3.2
Korrosivt frigjord fraktion av inventariet	N	Fördelningar enligt Datarapporten .	3.2
Hastighet för korrosiv frigörelse	–	Log-triangulär (10^{-4} /år, 10^{-3} /år, 10^{-2} /år)	3.2
Bränsleupplösningshastighet	–	Log-triangulär (10^{-8} /år, 10^{-7} /år, 10^{-6} /år)	3.3
Koncentrationsgränser	G	Beräknad fördelning baserad på fördelning av flera sammansättningar av grundvatten*	3.4
Porositet i berget	–	Konstant = 0,0018	6.8
Diffusivitet i berget	–	Log-normalfördelningar; medelvärden: Katjoner: $6,6 \cdot 10^{-7}$ m ² /år Anjoner: $2,1 \cdot 10^{-7}$ m ² /år	6.8
Fördelningskoefficienter för berget	G	Trunkerade log-normalfördelningar	6.8
Hydrogeologiska data relaterade till flöde och transport	–	Korrelerade fördelningar från flera DFN-modellberäkningar som förts vidare från hydrogeologiska analyser:	6.7
Darcyflöde i deponeringshål (U_0)		Okorrelerad modell	
Bergets transportmotstånd, F , för vägar som utgår från utsläppspunkt Q1		Basfall och fem ytterligare realiseringar	
Advektiv gångtid i berget, t_w , för vägar som utgår från utsläppspunkt Q1		Semikorrelerad modell Basfall och tio ytterligare realiseringar	
		Helt korrelerad modell Basfall och fem ytterligare realiseringar. Endast deponeringshål där kapselbrott inträffar har inkluderats.	
Peclet-tal i berget	–	Konstant = 10	6.7
Maximalt inträngningsdjup i bergmatris	–	Konstant = 12,5 m	6.7
LDF-faktorer för biosfären	N	Beräknade LDF-värden, se avsnitt 13.2	7.2

*Som påpekats ovan används inte koncentrationsgränser i det centrala korrosionsfallet, med undantag för U. Koncentrationsgränser för U, och för andra grundämnen som ska användas i andra beräkningsfall, beräknas probabilistiskt med fördelningar av grundvattensammansättningar för antingen tempererade, permafrost, glaciala eller vattentäckta förhållanden, och genom att de beräknade fördelningarna kombineras till en fördelning som används i transportberäkningen. Se vidare **Radionuklidtransportrapporten**, i vilken även känslighet för olika grundvattentyper, termodynamiska data etc analyseras.

Hydrogeologiska data relaterade till flöde och transport

Hydrogeologiska data från modelleringen som beskrivs i avsnitt 10.3.6 används. Som beskrivs i avsnitt 10.3.6 behandlas tre korrelationsfunktioner för sprickstorlek/transmissivitet, vilket ger tre varianter av den hydrogeologiska DFN-modellen. Flera realiseringar av var och en av dessa tre varianter förs vidare till korrosionsscenarioet, se tabell 13-3. I ett probabilistiskt centralt korrosionsfall används data från alla tio ytterligare realiseringar med den semikorrelerade DFN-modellen. I alla beräkningar för detta scenario utesluts deponeringspositioner i enlighet med EFPC (se avsnitt 5.2.2) i utdata från den hydrogeologiska modelleringen.

Det är endast data för de få deponeringshål för vilka kapselbrott till följd av korrosion sker som används för detta korrosionsfall. Detta innebär att alla deponeringshål av betydelse har en hög flödes hastighet och i allmänhet även ett lågt transportmotstånd i geosfären, eftersom dessa egenskaper är starkt korrelerade.

Data för de fyra deponeringshålen av betydelse för basfallsrealiseringarna av den semikorrelerade DFN-modellen ges som ett exempel i tabell 13-4. Det advektiva flödet genom deponeringshålet, q , erhålls från den hydrogeologiska beräkningen och multipliceras med en faktor två för att ta hänsyn till det lokalt ökade flödet beroende på hålrummet från den eroderade bufferten.

Observera att de beräknade hydrauliska egenskaperna och transportegenskaperna för dessa deponeringshål är extremer i ändarna, svansar, av fördelningar som härletts från en komplex hydrogeologisk modell med stokastiska komponenter (det genererade spricknätverket). Alla tio ytterligare realiseringar med den semikorrelerade modellvarianten används för att få mer tillförlitliga representationer av svansarna. (För de okorrelerade och helt korrelerade DFN-modellvarianterna, för vilka konsekvenser analyseras i avsnitt 13.5.6, används alla fem tillgängliga realiseringar.)

Figur 13-14 är en grafisk representation av genombrotts tid som funktion av F -värde för de deponeringspositioner där kapselbrott sker i tre av de fall som förts vidare från analysen av inneslutningspotential för korrosionsscenarioet. Figuren visar resultat från basfallsrealiseringarna av de semikorrelerade, okorrelerade respektive helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modellerna.

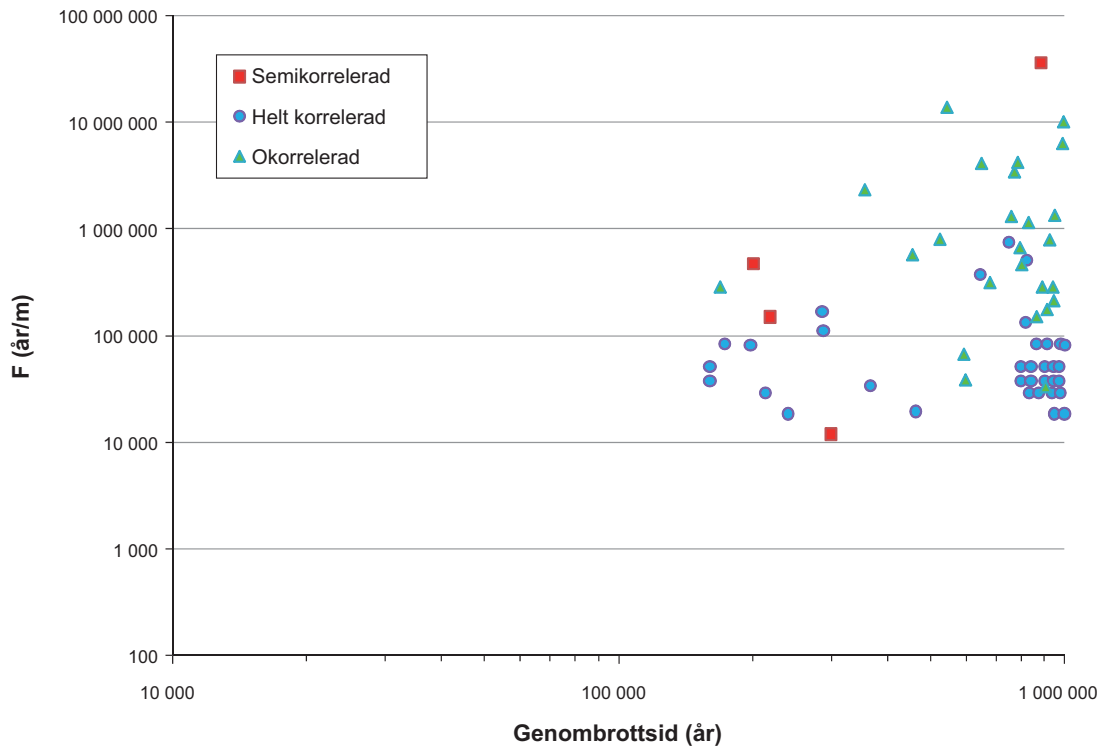
13.5.4 Beräkning av det centrala korrosionsfallet

Deterministiska beräkningar

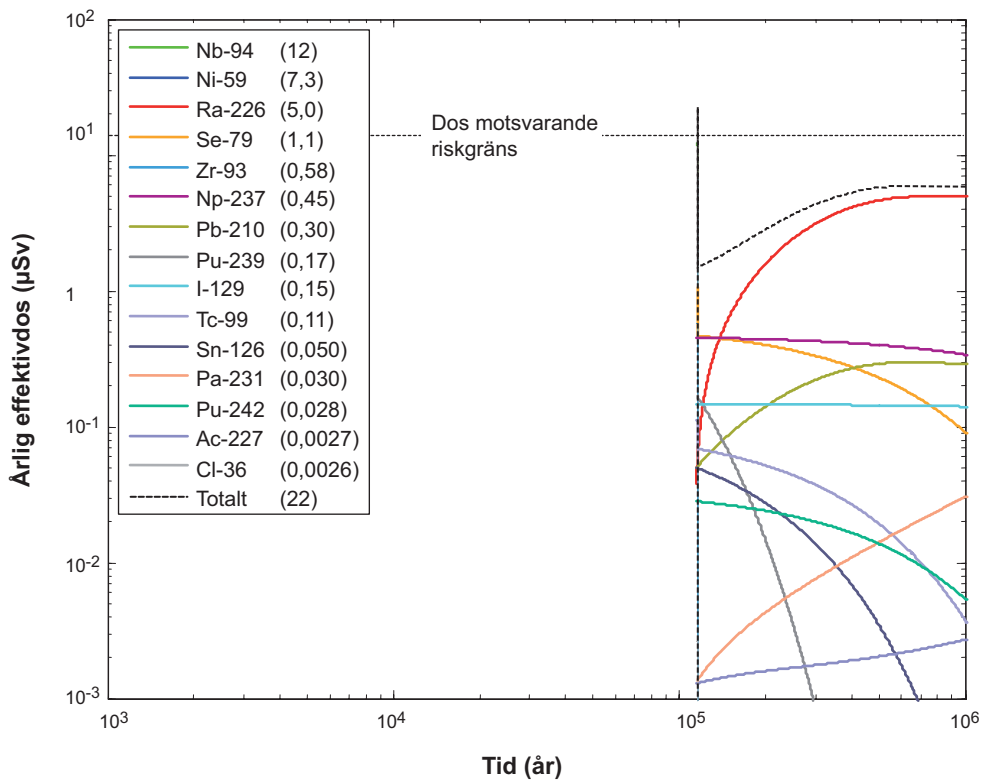
Figur 13-15 visar närområdesutsläpp som omräknats till dosekvivalentutsläpp genom att utsläppshastigheten multipliceras med LDF-värdet för varje nuklid i ett stiliserat, deterministiskt fall där en kapsel antas gå sönder 114 000 år efter deponering (den tidigaste genombrotts tiden i de analyserade realiseringarna). Som nämnts i avsnitt 13.4.3 räknas aktiviteter om till dos för att få ett praktiskt mått på utsläppen, där även ett totalt mått erhålls som den summerade dosen. Advektion förekommer i buffertens hålrum och de dosekvivalenta utsläppen bestäms främst av bränsleupplösningshastigheten som är satt till 10^{-7} /år. Bidragen från den omedelbart frigjorda fraktionen av nuklider, IRF, har inte tagits med i figuren eftersom det är lämpligare att visa dessa separat.

Tabell 13-4. Data för de fyra deponeringshålen där kapslar skadas till följd av advektion/korrosion för basfallsrealiseringarna med den semikorrelerade DFN-modellen. De tio ytterligare realiseringarna används i de probabilistiska beräkningarna nedan.

Genombrotts tid (år)	Bergets transportmotstånd, F (år/m)	Advektiv gångtid, t_w (år)	Advektivt flöde genom deponeringshål, q ($m^3/år$)
200 786	471 800	122,6	0,144
218 215	149 800	27,54	0,166
299 149	11 970	23,14	0,084
886 073	35 890 000	1 968	0,026



Figur 13-14. Grafisk representation av par av genombrottsider och F-värden för basfallsrealiseringar med de semikorrelerade, okorrelerade och helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modeller som förts vidare från analysen av inneslutningspotential för korrosionsscenarioet.



Figur 13-15. Utsläpp från närområdet uttryckt som årlig effektivdos för en deterministisk beräkning av det centrala korrosionsfallet. Teckenförklaringen är ordnad efter avtagande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (anges inom parentes i μSv). Kurvorna för Nb-94 och Ni-59 döljs av kurvan som visar den totala dosen.

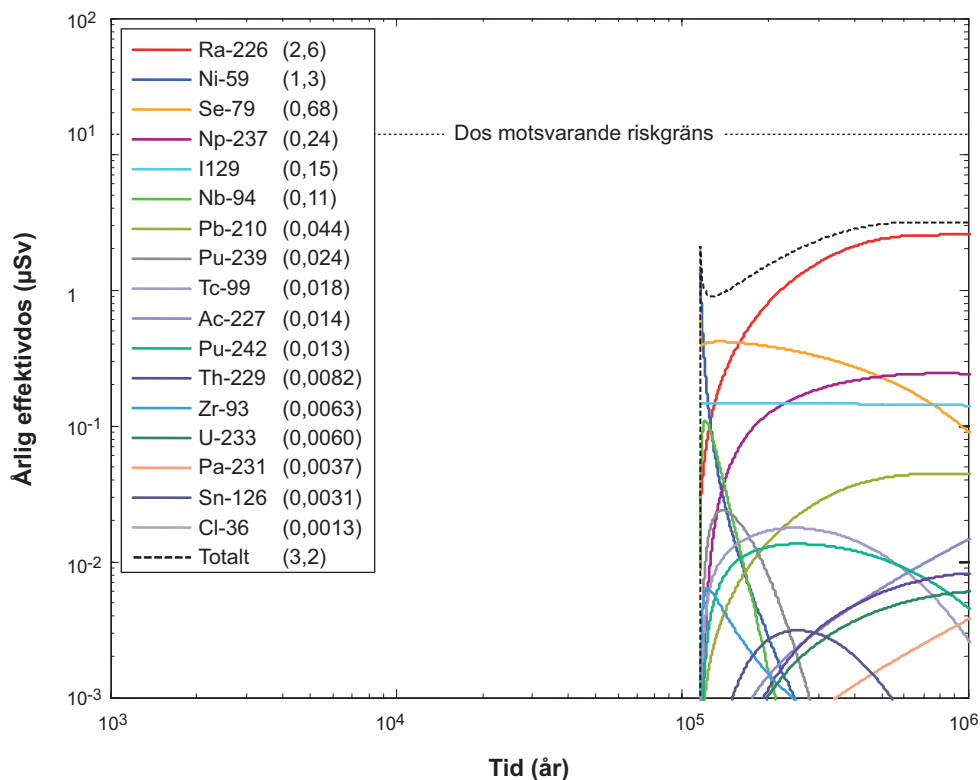
De dosekvivalenta utsläppen till följd av utsläpp från närområdet domineras av Nb-94, Ni-59 och Ra-226. Huvuddelen av uranet som frigörs från bränslet faller ut igen inuti kapseln, eftersom koncentrationsgränsen för uran alltid är tillämplig på grund av den stora mängden U-238 som finns närvarande, se avsnitt 13.5.2. De utfällda uranisotoperna U-234, U-233 och U-235 genererar dotternukliderna Th-230, Th-229 respektive Pa-231.

Utsläppen uttryckta som dos från geosfären för samma beräkningsfall visas i figur 13-16. Doserna som orsakas av utsläpp från fjärrområdet domineras av Ra-226, Ni-59, Se-79, Np-237 och I-129. Observera att den maximala dosen infaller i slutet av analysperioden i figur 13-16, vilket indikerar att tidpunkten för maximidosen inte står i starkt samband med tidpunkten för kapselbrott. Detta antyder även att en fördelning av genombrottsstider inte kommer att leda till riskutspädning, ett problem som behandlas mer i detalj i avsnitt 13.9.4.

Resultaten av de numeriska beräkningarna har jämförts med resultat som erhållits med analytiska modeller och överensstämmelsen är god. Detta var enligt förväntningarna, eftersom situationen som ska modelleras är okomplicerad och utsläppshastigheterna är enkla att beskriva analytiskt, se vidare i avsnitt 13.5.9.

Tabell 13-5 visar maximala årsdoser från pulsutsläppen från den omedelbart frigjorda fraktionen, IRF, för den deterministiska beräkningen. IRF-inventariet vid 100 000 år har multiplicerats med de LDF-pulsvärden som anges i tabell 13-2.

Observera att de här doserna för vissa nuklider är högre än maximidoserna från de kontinuerliga utsläppen i figur 13-16.



Figur 13-16. Årlig effektivdos från fjärrområdet för en deterministisk beräkning av det centrala korrosionsfallet. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).

Tabell 13-5. Maximal årsdos från pulsutsläppen från den omedelbart frigjorda fraktionen, IRF.

Nuklid	Maximal årsdos (μSv)	Nuklid	Maximal årsdos (μSv)
Cl-36	0,12	Tc-99 ^a	6,8
Ni-59	0,012	Sn-126	0,019
Se-79	1,72	I-129	3,82
Nb-94	0,026	Cs-135	0,21

^aDetta värde gäller endast utsläpp från närområdet uttryckt som dos. Pulsutsläppet från fjärrområdet modelleras med transportmodellen för fjärrområdet eftersom sorption i geosfären är betydande för Tc-99. Pulsutsläppet av Tc-99 är således inkluderat i de resultat som visas i figur 13-16.

Probabilistisk beräkning

Figur 13-17 visar utsläpp från närområdet uttryckt som dos för en probabilistisk beräkning som omfattar 2 800 realiseringar med indatafördelningar enligt tabell 13-3. Indatafördelningar för genombrottstider och transportdata för geosfären kommer från de tio realiseringarna med den semi-korrelerade DFN-modellen, som var och en ger data för alla 6 000 kapslarna. Figur 13-18 visar motsvarande fjärrområdesutsläpp. De första utsläppen äger rum efter omkring 114 000 år när det första kapselbrottet inträffar. Medelantalet otäta kapslar i den probabilistiska beräkningen av genombrottstider är 0,12, se avsnitt 12.6.2. Detta återspeglas i de föreliggande beräkningsresultaten.

Dosekvivalentutsläppen från närområdet och dosen efter transport genom geosfären domineras båda av Ra-226. En stor del av de Ra-226-nuklider som frigörs från närområdet transporteras genom geosfären eftersom de otäta kapslarna finns i deponeringshål som skärs av stora, högtransmissiva sprickor med liten retention. Utsläppen av Ra-226 från geosfären beror nästan uteslutande på Ra som frigörs från närområdet och inte på inväxt i geosfären. Detta är i sin tur beroende på att modernukliden Th-230 antas hållas kvar i närområdet.

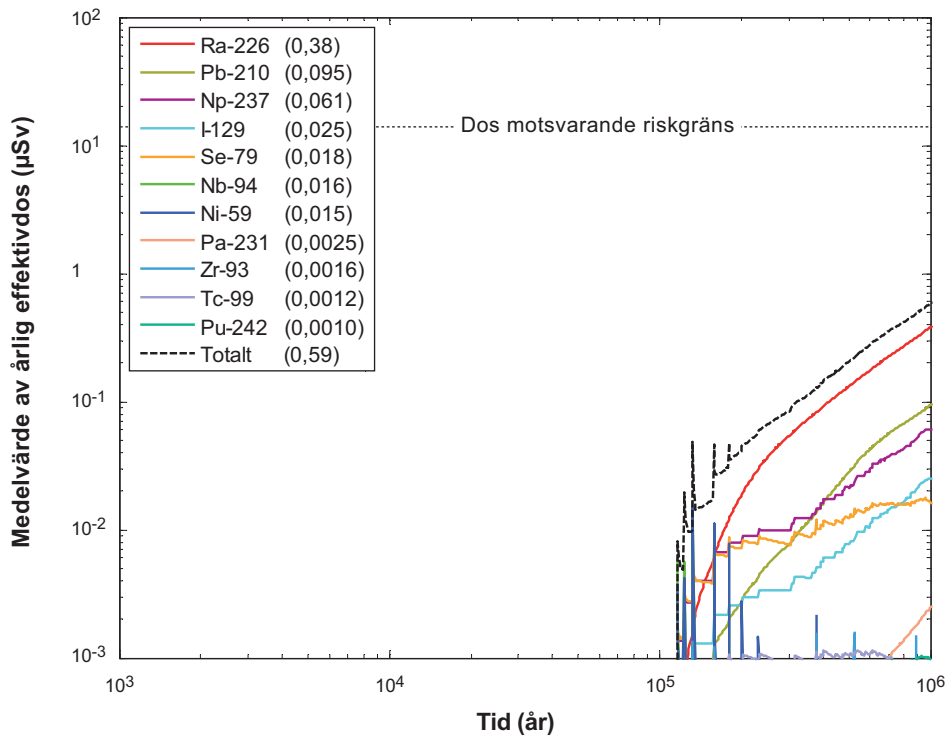
Genombrottstiderna visar sig som distinkta pulser i utsläppskurvorna, i synnerhet för närområdet. Pulserna beror på utsläpp som styrs av korrosion av metalldelarna i bränsleelementen (exempelvis Ni-59 och Nb-94). Korrosionstiderna (mellan 100 och 10 000 år, se tabell 13-3) är av sådan längd att utsläppen visar sig som pulser på doskurvornas tidsskala.

Statistiska mått för fjärrområdesutsläppet visas i figur 13-19. Observera att dessa resultat härletts endast från de realiseringar av genombrottstiderna då kapselbrott faktiskt inträffar i korrosionsberäkningarna. Eftersom medelantalet otäta kapslar är cirka 0,12 är det mest sannolika resultatet av korrosionsberäkningarna noll kapselbrott. Detta återspeglas inte i percentilerna i figur 13-19 annat än för medelvärdet. Om hänsyn tas till detta skulle 99:e och 95:e percentilerna komma närmare medelvärdet.

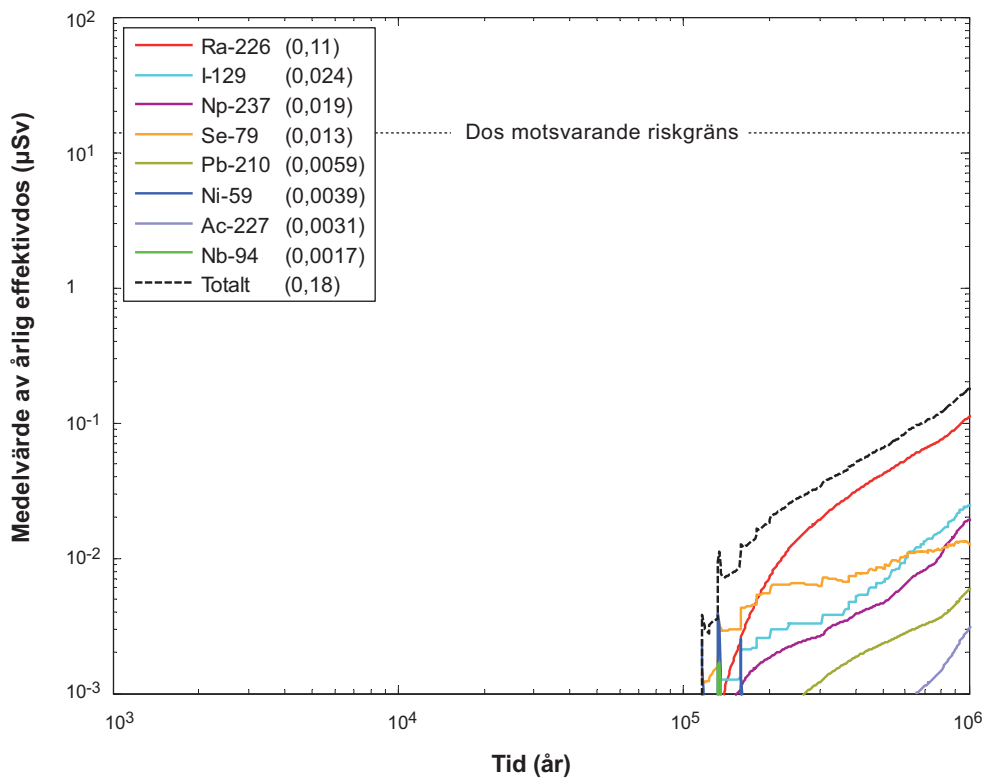
Bidrag från IRF-pulsen

Bidraget från IRF-pulsen till den probabilistiskt beräknade genomsnittliga dosen behandlas på följande sätt: Sannolikheten för kapselbrott, p_{Fail} , bestäms för varje period på 100 000 år från den beräknade fördelningen av genombrottstider för det centrala korrosionsfallet. Bredden av doskurvorna i biosfären är typiskt tusen år. Sannolikheten för att exponering till följd av ett pulsutsläpp, p_{Expo} , föreligger vid en given tidpunkt under perioden på 100 000 år är således $10^{-2} \cdot p_{\text{Fail}}$. (Sannolikheten för överlappning mellan pulser är mycket liten på grund av de låga sannolikheterna.) Den totala dosen som är förknippad med ett pulsutsläpp D_{TotPulse} bestäms i början av varje period på 100 000 år. Den probabilistiskt beräknade genomsnittliga dosen erhålls sedan som produkten $D_{\text{TotPulse}} \cdot p_{\text{Expo}}$. Resultatet av det här förfarandet för det centrala korrosionsfallet visas i tabell 13-6. Enligt tabellen ligger den högsta medeldosen kring $1,0 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}$, dvs mer än fyra storleksordningar under den dos som motsvarar riskgränsen. Således ger pulsutsläpp försumbara bidrag till den probabilistiskt beräknade genomsnittliga dosen. Dock måste de behandlas med avseende på riskutspädning vilket görs i avsnitt 13.9. Observera även att det i denna hantering antas att tempererade förhållanden råder. Att inkludera sannolikheter för periglaciala och glaciala klimatförhållanden skulle reducera medeldosen ytterligare.

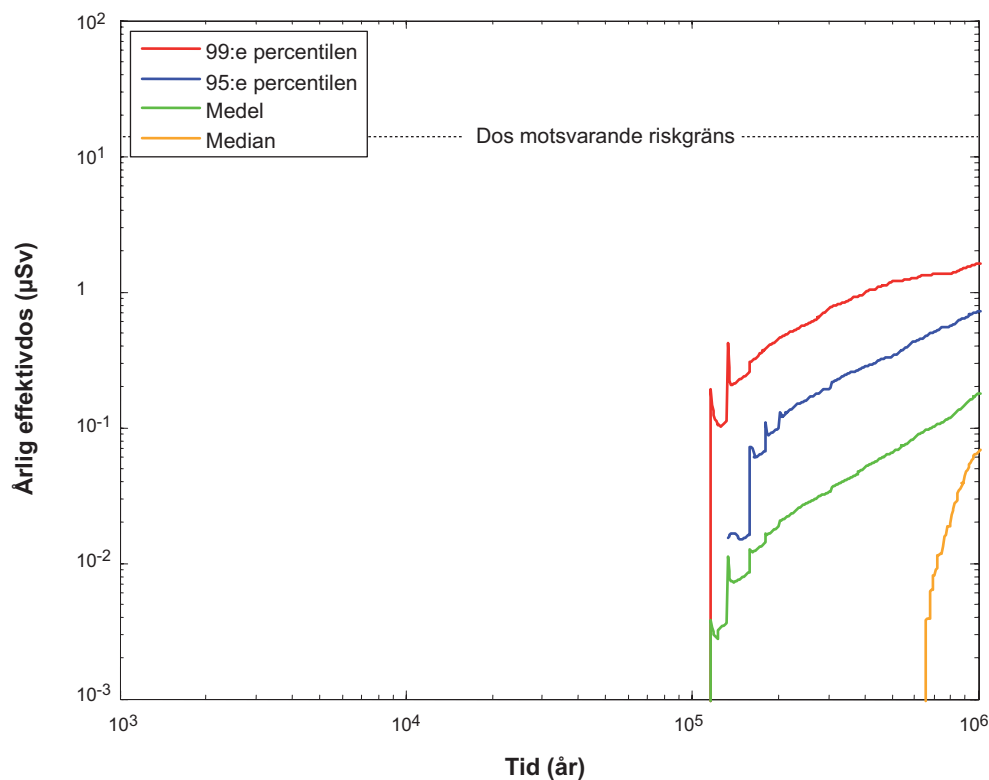
För andra beräkningsfall av korrosionsscenarioet beräknas inte pulsbidraget till den genomsnittliga dosen. Alla fall tas dock upp i behandlingen av riskutspädning i kapitel 13.9.4.



Figur 13-17. Utsläpp från närområdet uttryckt som medelvärde av årlig effektivdos för en probabilistisk beräkning av det centrala korrosionsfallet. Medelantalet otäta kapslar är 0,12. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (anges inom parentes i µSv).



Figur 13-18. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för samma fall som i figur 13-17. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-19. Årlig effektivdos (medelvärde, medianvärde, 95:e och 99:e percentilen) från fjärrområdet för den probabilistiska beräkningen av det centrala korrosionsfallet.

Tabell 13-6. Bidrag från pulsutsläpp för den probabilistiskt beräknade genomsnittliga dosen för det centrala korrosionsfallet.

Tidsperiod [år]	p_{Fail}	p_{Expo}	$D_{\text{TotPulse}} [\mu\text{Sv}]$	Medeldos [μSv]
0–100 000	0	0	0	0
100 000–200 000	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	5,92	$7,4 \cdot 10^{-4}$
200 000–300 000	$4,17 \cdot 10^{-3}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	5,54	$2,3 \cdot 10^{-4}$
300 000–400 000	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	5,25	$5,5 \cdot 10^{-4}$
400 000–500 000	$8,33 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$	5,01	$4,2 \cdot 10^{-4}$
500 000–600 000	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	4,81	$7,0 \cdot 10^{-4}$
600 000–700 000	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	4,64	$6,8 \cdot 10^{-4}$
700 000–800 000	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	4,49	$5,6 \cdot 10^{-4}$
800 000–900 000	$2,29 \cdot 10^{-2}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$	4,37	$1,0 \cdot 10^{-3}$
900 000–1 000 000	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	4,26	$7,1 \cdot 10^{-4}$

13.5.5 Analys av möjliga alternativa transportförhållanden/transportdata

De transportdata som används i beräkningen av det probabilistiska centrala korrosionsfallet är de som ges i **Datarapporten** och som presenteras i tabell 13-3. Dessa data har valts ut för särskilda förhållanden och nedan genomförs en analys av i) om utvecklingen i korrosionsscenarioet är förenlig med dessa förhållanden och ii) om några alternativa utvecklingar av systemet, som skulle kunna medföra mindre gynnsamma transportförhållanden, måste beaktas.

Den här analysen motsvarar analysen av möjliga förlopp som leder till alternativa inneslutningsförhållanden i avsnitt 12.6, men har förenklats baserat på de analyser som redan genomförts vid härledningen av data i **Datarapporten**.

Antal otäta kapslar och genombrottstider

Antalet otäta kapslar är ett resultat från analysen av inneslutningspotentialen för korrosionsscenarioet, och har därmed analyserats uttömmande i avsnitt 12.6.2. Detta ledde till flera korrosionsvarianter för vilka konsekvenserna analyseras i avsnitt 13.5.6.

Radionuklidinventarium, IRF och CRF

Dessa faktorer är inte relevanta att inkludera eftersom de inte påverkas av externa faktorer, utan av förhållanden som styr initialtillståndet. Osäkerheter relaterade till initialtillståndet undersöks fullt ut i **Datarapporten**.

Bränsleupplösningshastighet

Inledning

Vid den tidpunkt då vatten tränger in i en otät kapsel förväntas upplösningen av bränslet börja. Baserat på en litteraturstudie av de experimentella data som då fanns tillgängliga föreslog Werme et al. 2004/ en konstant upplösningshastighet med en triangulär sannolikhetsfördelning i det logaritmiska rummet med undre gräns, typvärde och övre gräns av 10^{-8} , 10^{-7} respektive 10^{-6} per år. En litteraturöversikt av senare experimentella data, som diskuteras i **Bränslerapporten** och i avsnitt 3.3 av **Datarapporten**, stödjer dessa tidigare data och den nämnda fördelningen är kvalificerad för användning i SR-Site, även om stöd finns för ännu lägre värden. Motiven för den föreslagna fördelningen presenteras i **Bränslerapporten** och **Datarapporten** och sammanfattas kort nedan, som en introduktion till den efterföljande diskussionen om hur robust fördelningen är under de förhållanden som leder till de analyserade kapselbrottfallen.

Bränsleupplösning har implementerats i transportmodellen för närområdet som två komponenter. En komponent representerar bränsle som löses upp med en hastighet som motsvarar korrosionshastigheten för bränslet (dvs den oxidativa upplösningen av bränslet). I modellen ges bränslets upplösningshastighet av den ovannämnda fördelningen, samt är konstant och oberoende av koncentrationen av uranspecier i vattnet som tränger in i kapseln. Den andra komponenten representerar bränsleupplösning som orsakas av att koncentrationen av U(IV) upprätthålls vid löslighetsgränsen, vilken försiktigtvis antas vara hög. Generellt är det i SR-Site den förstnämnda oxidativa komponenten som dominerar över den sistnämnda icke-oxidativa komponenten när det gäller data för bränslekorrosionshastighet, grundvattenflöde och löslighet av uran.

Den föreslagna fördelningen motsvarar bränsleupplösningshastigheter som beräknats utifrån resultat av laboratorieförsök vilka pågått under mer än fyra års tid. Eftersom miljön i förvaret förväntas vara reducerande, måste den upplösningshastighet som används vid analysen motsvara en upplösningshastighet i syrefri miljö och i närvaro av järn och dess anoxiska korrosionsprodukter. Oxidanter bildas emellertid även vid radiolys. De experimentella data som används vid analysen bygger därför både på data från relativt färskt bränsle och på data från α -dopad UO_2 ($UO_2(s)$) dopad med α -strålarna U-233 eller Pu-238.

Färskt använt bränsle återspeglar bränslematrisens egenskaper på ett bra sätt, men har ett orealistiskt kraftigt strålningsfält, med stora inslag av β - och γ -strålning. På grund av detta görs försöken vid höga vätgaskoncentrationer (> 1 mM). Å andra sidan återspeglas strålningsfältet hos det bränsle som antas komma i kontakt med vatten bättre av alfadopad UO_2 . Urandioxiden ger dock ingen representativ bild av bränslematrisens övriga egenskaper. I det här fallet har data erhållits vid antingen låga koncentrationer av reducerande ämnen eller utan närvaro av reducerande ämnen. I alla studier av bränsleupplösning som utförts i närvaro av vätgas eller av korroderande järn ligger koncentrationerna av oxidanter i lösningen eller gasen under detektionsgränsen. Detsamma gäller koncentrationerna av alla redoxkänsliga radionuklider i alla oxidationstillstånd. Upplösningshastigheten för sådana fissionsprodukter som inte är känsliga för redox, till exempel Cs och Sr, minskade med mer än två storleksordningar under ett år. Trots att strålningsfältet var så kraftigt att det motsvarade det från färskt bränsle, kunde inga oxiderade specier detekteras i lösningen. Detta visar att radiolytiska oxidanter antingen har konsumerats genom att de själva oxiderat bränsleytan eller genom rekombination med vätgas under bildning av vatten. Spektroskopiska analyser av bränslets yta efter lakning visar inga tecken på att ytan oxiderats.

Laboratorieförsök med UO_2 , som har dopats med alfastrålarna U-233 eller Pu-238, har genomförts i närvaro av låga koncentrationer av löst vätgas, sulfidjoner eller korroderande järn. Experimenten med alfadopad $\text{UO}_2(\text{s})$ visar tydligt att närvaron av en liten mängd sulfid under strikt syrefria förhållanden är tillräckligt för att hämma all oxiderande inverkan från alfaradiolys motsvarande ett några tusen år gammalt bränsle. I de flesta försöken med U-233-dopad UO_2 (noll, fem respektive tio procent) – i närvaro av inert N_2 och under sådana förhållanden att $\text{Fe}(\text{s})$ reduceras – var de urankoncentrationer som mättes upp mycket låga, speciellt i närvaro av ett järnband. Uppskattningar av bränsleupplösningshastigheten bekräftar de tidigare uppmätta låga värdena.

En UO_2 -kuts med en hög dopningsgrad (385 MBq/g motsvarande 50 år gammalt bränsle) undersöktes nyligen /Muzeau et al. 2009/. En tydlig inverkan av alfaradiolys, där koncentrationerna av U i karbonatlösning snabbt steg med tiden, observerades i Ar-atmosfär. När samma system undersöktes under 1 bar H_2 , kunde däremot en liten minskning i koncentrationen av U noteras. Vätgasens undertryckande inverkan tyder på att hastigheten för oxidativ bränsleupplösning (bränslekorrosion) kommer att vara mycket låg – om den över huvud taget inträffar – i en sådan miljö som förväntas inuti en otät kapsel.

Enligt **Processrapporten för bränslet och kapseln** kan liknande och lägre hastigheter uppskattas från en elektrokemisk modell, från experimentella data från ett EU-projekt samt från en steady-state-modell för bränsleupplösning som använder sig av experimentellt bestämda kinetiska parametrar och som tar hänsyn till inverkan från närvaron av både $\text{Fe}(\text{II})$ och vätgas.

Drivkraften för den oxidativa upplösningen (eller korrosionen) av använt kärnbränsle är dess strålningsfält, som minskar med tiden på grund av radioaktivt sönderfall. Strålningsminskningen ingår i de modeller för bränsleupplösning som har använts vid andra studier av geologisk förvaring och leder till att bildningshastigheten för radiolytiska oxidanter avtar med tiden. Detta medför i sin tur att även bränsleupplösningshastigheten minskar med tiden. Även om det knappast finns några osäkerheter om att upplösningshastigheten för använt bränsle verkligen minskar med tiden bortses från detta faktum i den pessimistiska modell som används i SR-Site. Modellen förutsätter i stället en konstant upplösningshastighet, som varierar inom vida gränser för att täcka in både konceptuella och andra typer av osäkerheter. Nedan ges en sammanfattning av förhållanden under vilka de bränsleupplösningshastigheter som ges i **Datarapporten** är tillämpliga. För varje typ av förhållanden diskuteras kort huruvida de kan betraktas gälla för de möjliga utvecklingar som diskuteras i SR-Site.

Redoxförhållanden

Intervall inom vilket bränsleupplösningshastigheten är tillämplig enligt Datarapporten: I korrosions-scenariot inträffar kapselbrott typiskt efter hundratusentals år. I det tidsperspektivet förväntas alfastrålningen från det använda bränslet ha avklingat till så låga nivåer att det inte kommer att finnas någon mätbar effekt på bränsleupplösningen från alfaradiolys, se **Processrapporten för bränsle och kapsel**. Efter ett kapselbrott kommer den vätgasproducerande järnkorrosionen av insatsen att fortsätta under tiotusentals år. Så länge som det finns korroderande järn kommer både väte- och $\text{Fe}(\text{II})$ -koncentrationerna att vara tillräckliga för att säkerställa reducerande förhållanden. Om grundvattnet som tränger in i den otäta kapseln innehåller sulfat, kan mikrobiell sulfatreduktion leda till utfällning av $\text{Fe}(\text{II})$ -sulfid. På lång sikt kommer $\text{Fe}(\text{II})$ -koncentrationerna och redoxpotentialen hos grundvatten inuti kapseln att bestämmas av jämvikt med magnetit eller möjligen järnsulfider, medan vätekoncentrationerna kan gå ned till sådana nivåer som erhålls genom vattenradiolys när allt metalliskt järn har korroderat.

Om de reducerande förhållandena i de flödande grundvattnen störs genom nedträngning av oxiderande glacialt smältvatten till förvaringsdjup, kan bränslet lösas upp med högre hastigheter. Dock måste den reducerande förmågan hos kapselkomponenterna beaktas eftersom en kontinuerlig tillförsel av oxidanter behövs för att upprätthålla en högre upplösningshastighet. Omkring $4 \cdot 10^{-3}$ mol syre/år behövs för att upprätthålla en bränslekorrosionshastighet på 10^{-6} /år (då eventuell syreförbrukning genom växelverkan med magnetit, sulfider eller koppar försummas). Detta betyder att både grundvattnets redoxpotential och massbalansen för syre måste beaktas. Under oxiderande förhållanden med P_{O_2} upp till 0,2 bar, dvs luftmättnad, kan de hastigheter som uppmäts långsiktigt i pH-intervallet 7 till 9 /Forsyth och Werme 1992, Forsyth 1997/ användas, och upplösningshastigheten för det använda bränslet ligger då i intervallet 10^{-4} till 10^{-5} /år. Alla andra omgivningsparametrar (temperatur, pH etc) påverkar upplösningshastigheten i olika grad under oxiderande förhållanden, men de diskuteras nedan endast i för reducerande förhållanden eftersom gränssättande hastigheter har definierats för oxiderande förhållanden, som nämnts ovan.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: Möjligheten till oxiderande förhållanden har undersökts utförligt eftersom detta även skulle påverka kapselkorrosionen negativt, se i synnerhet avsnitt 12.6.2. Slutsatsen är att oxiderande förhållanden kan uteslutas.

Behov av att utvärdera ytterligare utvecklingar: Analysen av en glacial episod i avsnitt 12.6.2 visar att nedträngningen av syrerikt glacialt smältvatten är en händelse med låg sannolikhet som bedöms vara möjlig enbart om ett flertal extrema antaganden görs. Även om dessa extrema antaganden skulle göras, och under förutsättning att syre når fram till en otät kapsel, så skulle den stora reducerande förmågan hos de kvarvarande delarna av den otäta kopparkapseln och järninsatsen medföra att anoxiska förhållanden skulle råda inuti kapseln. Även om massöverföringen av syre till kapseln skulle vara större än $4 \cdot 10^{-3}$ mol/år är det orimligt att allt syre skulle reagera med bränslet. Den kvarvarande kopparn och järn/järnkorrosionsprodukterna skulle fungera som en sänka och följaktligen behöver inga ytterligare utvecklingar utvärderas.

pH

Intervall inom vilket bränsleupplösningshastigheten är tillämplig enligt Datarapporten: $4 < \text{pH} < 11$.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: Möjligheten till förhållanden med höga pH-värden har undersökts utförligt i buffertomvandlingsscenarioet, eftersom det även skulle påverka bufferten negativt, se avsnitt 12.4. Där drogs slutsatsen att pH-värden över 11 kan uteslutas. Möjligheten till förhållanden med låga pH-värden har studerats i korrosionsscenarioet, eftersom det i kombination med höga kloridkoncentrationer även skulle kunna påverka kapselkorrosionen negativt, se avsnitt 12.6. I det fallet drogs slutsatsen att pH-värden under 6,3 kan uteslutas.

Behov av studier av ytterligare utvecklingar för att utesluta ogynnsamma pH-förhållanden: Inget behov eftersom utförliga sådana studier redan har genomförts.

Temperatur

Intervall inom vilket bränsleupplösningshastigheten är tillämplig enligt Datarapporten: $< 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: Förhöjda temperaturer förekommer endast tidigt i förvarsutvecklingen, se avsnitt 10.3.4, medan kapselbrott i korrosionsscenarioet typiskt inträffar efter hundratusentals år. I det tidsperspektivet ligger bränsletemperaturen nära bakgrundstemperaturen i berget, dvs med god marginal under $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Behov av studier av ytterligare utvecklingar för att utesluta ogynnsamma temperaturförhållanden: Inget behov enligt ovanstående.

Jonstyrka

Intervall inom vilket bränsleupplösningshastigheten är tillämplig enligt Datarapporten: Jonstyrkor på upp till 1 M och det finns inget som tyder på ökade bränsleupplösningshastigheter vid ännu högre jonstyrkor.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: De jonstyrkor för grundvattnet som förväntas råda under hela förvarsutvecklingstiden är lägre än 0,5 M.

Behov av studier av ytterligare utvecklingar för att utesluta ogynnsamma jonstyrkor: Grundvattensdata för Forsmark tyder på att salthalten har legat på en stabil nivå under Weichselglacialen, och därför förväntas inga stora svängningar i salthalten i grundvatten i framtiden. Analysen av olika möjliga klimatiser som presenteras i avsnitt 10.3.7 och 10.4.7 visar att salthalten kan stiga på grund av uppträngning under den korta isfrontspassagen ovanför förvarsområdet. De analyser som beskrivs i avsnitt 10.4.6 och 10.4.7 visar att uppträngningseffekten är måttlig och att de resulterande jonstyrkorna i förvarsvolymen är lägre än 0,5 M. Eftersom den mest uttalade uppträngningen äger rum då isen rycker fram, där isprofilen är brantast, omfattar analysen av referensutvecklingen de högsta salthalterna som kan förväntas i Forsmark, och inga ytterligare analyser krävs.

Kemisk påverkan från dominerande och underordnade grundvattenkomponenter

Intervall inom vilket bränsleupplösningshastigheten är tillämplig enligt Datarapporten: $\text{HCO}_3^- < 0,01 \text{ M}$. Den fördelaktiga effekten av molekylärt väte i homogen radiolys grundas på dess reaktion med OH-radikalen, vid vilken den kraftigt oxiderande radikalen ($\text{OH}\cdot$) omvandlas till vatten och en kraftigt reducerande radikal ($\text{H}\cdot$). Bromidjoner är ett kraftigt reduktionsmedel och reagerar cirka 250 gånger snabbare med OH-radikalen än vad H_2 -molekylen gör. Det påstås att bromid inhiberar OH-radikalen, och därmed minskar den fördelaktiga påverkan som väte har på homogen vattenradiolys. Den rika förekomsten av radikaler till följd av beta- och gammastrålning förväntas ha avtagit till försumbara nivåer vid tidpunkten för kapselbrott i korrosionsscenarioet. Detta tillsammans med frånvaron av mycket salt vatten under förvarsutvecklingen och den mycket låga alfaaktiviteten gör påverkan från bromid på bränsleupplösningen högst osannolik.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: Karbonatkoncentrationerna förväntas vara lägre än 0,01 M under hela förvarsutvecklingen.

Behov av studier av ytterligare utvecklingar för att utesluta ogynnsamma förhållanden: Den totala koncentrationen av oorganiskt kol, som vid pH-värden nära neutralt är ungefär lika stor som koncentrationen av HCO_3^- , är högst i de övre delarna av berget där tillrinning av meteoriskt vatten dominerar eftersom flera biologiska processer producerar CO_2 i jorden. I djupare liggande salt vatten, som är rikt på Ca^{2+} , hålls karbonatkoncentrationen på en låg nivå på grund av jämvikt med kalcit. Typiska karbonatkoncentrationer för vatten i Forsmark åskådliggörs i figur 10-45. Således är den enda process som kan öka bikarbonatkoncentrationer i grundvatten den ökade infiltrationen av färskt meteoriskt vatten. Datavärdena för Forsmark visar att vatten med stor påverkan från tillrinning av meteoriskt vatten alla har karbonatkoncentrationer som är ungefär lika med eller lägre än 0,01 M, och slutsatsen är därför att det inte finns något behov av att analysera bränsleupplösningshastigheten med avseende på högre totala karbonatkoncentrationer.

Ytterligare faktor som identifierats: Transport av uran med lerkolloider i grundvattnet

När bufferten är delvis eller helt eroderad kan ett hålrum fyllt med en suspension (gel/sol) av vatten med kolloidala lerpartiklar finnas i deponeringshålet. Skulle kapseln bli otät under sådana omständigheter förväntas lerpartiklarna i sig inte påverka den oxidativa bränsleupplösningshastigheten. Upplöst U(IV) förväntas emellertid sorbera starkt på lerpartiklarna. Den här sorptionen ökar mängden frigjord löst U(IV) från återutfälld $\text{UO}_2(\text{s})$ eller från bränslematrisen. I det här fallet kan mängden U(IV) som sorberats på lerpartiklar beräknas som K_d för U(IV) på lerpartiklar multiplicerat med U(IV)-koncentrationen i lösningen, som bestäms av lösligheten för $\text{UO}_2(\text{s})$. Därmed sätts ingen begränsning av hastigheten för frigörelse av U(IV) från $\text{UO}_2(\text{s})$ av att löslighetsgränserna för U(IV) i kapselns hålrum ska vara uppfyllda. I det här fallet, när all återutfälld $\text{UO}_2(\text{s})$ har lösts upp till följd av sorption på lerpartiklar, frigörs ytterligare U(IV) som behövs för att mätta lerpartiklarna från bränslematrisen, vilket leder till en ökning av bränsleupplösningshastigheten. För att beräkna den förhöjda U-frigörelsen tas värdena för löslighet av $\text{UO}_2(\text{s})$ och K_d för U(IV) på lerpartiklar från **Datarapporten**. Hastigheten med vilken lerpartiklarna med sorberad uran transporteras bort bestäms av koncentrationen av lerpartiklar och vattenflödet. Dessa faktorer beror på vilket scenario som analyseras.

Behov av studier av ytterligare utvecklingar för att utesluta ogynnsamma förhållanden:

Bränsleupplösning i närvaro av en lersuspension måste beaktas. Detta görs enligt beskrivningen nedan:

Den eroderade hålrumsvolymen i deponeringshålet antas vara fylld med lerpartiklar som ökar upplösningshastigheten av UO_2 -bränslematrisen. Den utgående transporthastigheten för U, R_U (mol/år), erhålls sedan enligt

$$R_U = C_{\text{Sol}}U \cdot q \cdot (1 + C_{\text{Clay}} \cdot K_d)$$

där

$C_{\text{Sol}}U$ är lösligheten för U(IV) (mol/m³),

q är flödehastigheten i deponeringshålet (m³/år),

C_{Clay} är koncentrationen av lera (kg/m³),

K_d är fördelningskoefficienten mellan fast fas och lösning för U i en lersuspension (m³/kg).

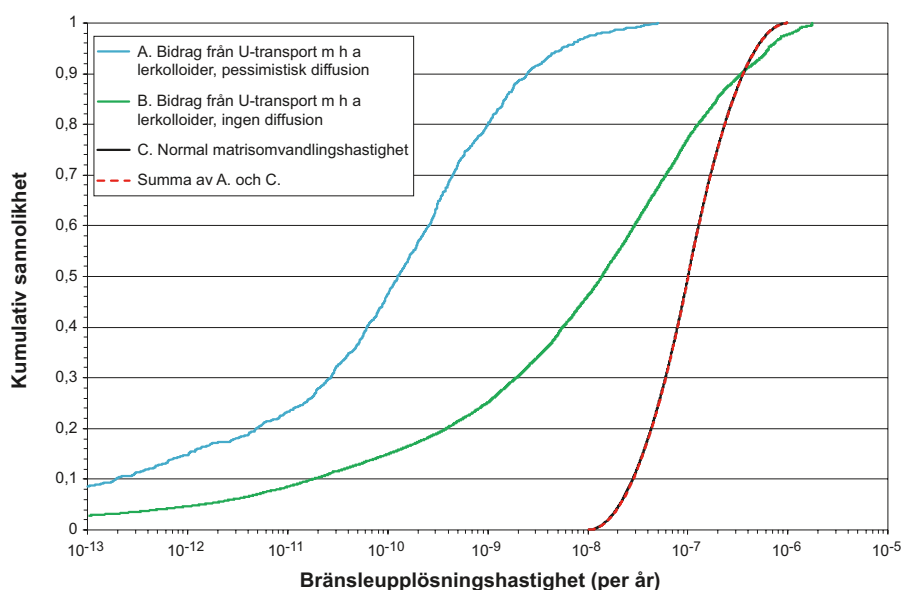
I /Birgersson et al. 2009/ fastställs portalet när transporten av bentonit utgörs av kolloidal dispersion till 73, vilket motsvarar en torrdensitet på 37,6 kg/m³. Den här koncentrationen upprätthålls inte i ett stort hålrum i deponeringshålet eftersom det kommer att finnas en koncentrationsgradient från källan av kolloiderna till bränslet. Källan kan vara kvarvarande bentonit i deponeringshålet, återfyllningen i tunneln eller en spricka från ett annat deponeringshål eller en annan deponeringstunnel i förvaret.

Eftersom det är omöjligt att bestämma källans plats, och eftersom den kan förändras i tiden, kan inte värdet för C_{clay} beräknas. I stället väljs ett fixt värde på 10 kg/m^3 som bedöms vara en rimlig uppskattning av en övre begränsning för medelvärdet över hela hålrumsvolymen.

Med $C_{\text{clay}} = 10 \text{ kg/m}^3$ och fördelningar för K_d , $C_{\text{sol}U}$ och q för det centrala korrosionsfallet beräknas bidraget till bränsleupplösningshastigheten från U-transport på lerpartiklar probabilistiskt och jämförs med den probabilistiskt samplade normala bränsleupplösningshastigheten för det centrala korrosionsfallet.

Följande gäller också för modelleringen:

- Den här processen är endast aktiv under de relativt begränsade perioder när deponeringshålet exponeras för så utspädd grundvatten att lerkolloider kan bildas. Detta tas inte hänsyn till i beräkningen.
- Tillflödande grundvatten kan ha U-koncentrationer som överskrider 10^{-9} mol/l , men påverkan från att sorptionsplatser på lerpartiklarna är upptagna av uran som förekommer naturligt i grundvattnet har pessimistiskt försumats.
- Skulle sorption på lerkolloider modelleras som en irreversibel process och under antagandet att alla sorptionsplatser upptas av U kan en transporthastighet av storleksordningen $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol/år}$ beräknas för en densitet av sorptionsplatser av $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ mol/g}$ /Bradbury och Baeyens, 2005/, citerad i /Ochs och Talerico 2004/, $q = 100 \text{ l/år}$ och $C_{\text{clay}} = 10 \text{ g/l}$. Detta motsvarar i sin tur en bränsleupplösningshastighet på ungefär $3 \cdot 10^{-7} \text{ /år}$, dvs något lägre än maximivärdet för den ”normala” fördelningen. En övre gräns för transporthastigheten, bestämd av produkten av tätheten av sorptionsplatser, q och C_{clay} har påtvingats beräkningen av fördelningen i Figur 13-20, kurva B. (Irreversibel sorption, såväl som att U upptar alla tillgängliga platser, kan emellertid uteslutas för de förhållanden som råder i deponeringshålet, baserat på beskrivningen av sorptionsprocessen i **Processrapporten för buffert, återfyllning och förslutning**.)
- Även om adektiva förhållanden antas råda i deponeringshålet kommer transporten längs delar av sträckan mellan de antaget skadade bränsleelementen och kapselns yttre att kontrolleras av diffusion. Ett visst kontinuerligt lerassisterat utflöde av UO_2 medför då ett motsvarande flöde av UO_2 över den diffusionskontrollerade sträckan. Geometrin för denna sträcka är svårbedömd, men en övre gräns kan uppskattas enligt följande: Antag en pessimistiskt hög tvärsnittsytta om $0,1 \text{ m}^2$ och en pessimistiskt kort diffusionssträcka om 1 mm . Med den högsta uranlösligheten från fördelningen som används i SR-Site, nämligen $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^3$, och med en diffusivitet för uran i vatten (vid $11 \text{ }^\circ\text{C}$) av $0,01 \text{ m}^2/\text{år}$ fås ett maximalt flöde av U på $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ mol/år}$ med antagandet att koncentrationen är noll 1 mm bort från bränslet. Med $8\,400 \text{ mol U/kapsel}$ svarar detta mot en bränsleupplösningshastighet av omkring $5 \cdot 10^{-8}/\text{år}$. Denna pessimistiska gräns tyder på att effekten av urantransport med lerpartiklar är försumbar vid beräkningarna av radionuklidtransport. En gräns med dessa diffusionsdata i kombination med fördelningen av uranlösligheter är påtvingad i kurva A i Figur 13-20.



Figur 13-20. Kumulativa fördelningar av bränsleupplösningshastighet. Bidraget från U-transport med hjälp av lerkolloider har en försumbar påverkan på fördelningen för den normala matrisomvandlingshastigheten. Se texten för vidare förklaringar.

Som framgår av Figur 13-20 är den lerassisterade bränsleupplösningshastigheten (kurva B) betydligt lägre än den ”vanliga” upplösningshastigheten (kurva C) upp till fördelningarnas 90-percentiler, medan den är jämförbar eller något högre ovanför 90-percentilerna. Om också den pessimistiska diffusionsbegränsningen påtvingas i beräkningen (kurva A), är den lerassisterade bränsleupplösningshastigheten väl under den ”vanliga” hastigheten över hela intervallet. Därför dras slutsatsen att urantransport med lerpartiklar ger ett försumbart bidrag till bränsleupplösningshastigheten.

Inre förhållanden

Följande inre förhållanden/processer har beaktats i **Processrapporten för bränsle och kapsel**, och utgjorde grunden för härledningen av bränsleupplösningsdata i **Datarapporten**: Ökad diffusion till följd av egenalstrad alfastrålning (Alpha Self Irradiation Enhanced Diffusion, ASIED), helium-uppbyggnad och påverkan av hög utbränning.

Slutsats

Slutsatsen av ovanstående redovisning är att fördelningen av bränsleupplösningshastigheter som ges i **Datarapporten** är tillämplig för alla utvecklingar som måste beaktas i SR-Site, även för grundvattenförhållanden där en lersuspension kan bidra till den utgående transporten av uran.

Metallkorrosionshastighet

Intervall i vilket utsläppshastigheterna är tillämpliga: De utsläppshastigheter för aktiveringsprodukterna från metalldelar som ges i **Datarapporten** är baserade på ett intervall av korrosionshastigheter för rostfritt stål under anoxiska förhållanden. Dessa korrosionshastigheter uppskattades från ett antal relevanta studier som utförts vid temperaturer på upp till 140 °C och salthalter på upp till nivåer för anoxiska havsvatten. De viktiga parametrarna är således salthalt (speciellt kloridkoncentration) och redoxförhållanden.

Intervall i undersökta utvecklingsfall: I korrosionsscenarioet inträffar kapselbrott typiskt efter hundratals år. I det tidsperspektivet ligger bränsletemperaturen nära bergets bakgrundstemperatur, dvs ingen ökning av korrosionshastigheterna till följd av höga temperaturer förväntas. De högsta kloridkoncentrationer som förväntas under hela förvarsutvecklingstiden är i storleksordningen 0,35 mol/l, dvs mycket lägre än i anoxiskt havsvatten. Därför är korrosionshastigheterna som används i **Datarapporten** tillämpliga (med stor marginal) för korrosionsscenarioet.

Behov av analyser av ytterligare utvecklingar: De viktiga parametrarna för metallkorrosionshastigheten är kloridkoncentrationer och redoxförhållanden. Som har angetts i föregående avsnitt om bränsleupplösning omfattar analysen av referensutvecklingen de högsta salthalterna som kan förväntas i Forsmark. Analysen av redoxförhållandena för referensutvecklingen uppvisar en variation av redoxpotentialer, alltid med anoxiska förhållanden. Endast nedträngningen av syrerikt glacialt smältvatten kan möjligtvis leda till en avvikelse. Enligt avsnitt 10.4.7 är detta en händelse med mycket låg sannolikhet som endast bedöms kunna ske om ett flertal extrema antaganden görs. Även om dessa extrema antaganden skulle göras och förutsatt att syre når fram till en otät kapsel, så skulle den stora reducerande förmågan hos de kvarvarande delarna av den otäta kopparkapseln och järninsatsen medföra att anoxiska förhållanden skulle råda inuti kapseln. Därför dras slutsatsen att det inte finns ytterligare utvecklingar som behöver utvärderas.

Porositet, diffusivitet och sorptionskoefficienter i berget

Porositet och effektiv diffusivitet i berget

Porositeten och den effektiva diffusiviteten i berget som ges i avsnitt 6.8 i **Datarapporten** gäller för alla förhållanden i berget under förvarsutvecklingen. De förhållanden i berget som diskuteras i **Datarapporten** är sammansättning av grundvatten, samt temperatur och spänningar *in situ*. Det hävdas även att den effektiva diffusiviteten och i synnerhet porositeten är relativt okänsliga för förhållandena i berget.

Vad gäller grundvattnets sammansättning, vilken påverkar porvattnets sammansättning, kan salthalten påverka graden av anjonexklusion i porsystemet. Detta bedöms ha en obetydlig inverkan på porositeten men viss effekt på den effektiva diffusiviteten. I **Datarapporten** behandlas detta som dataosäkerhet, och de data som anges omfattar rimliga grundvattensammansättningar under förvarsutvecklingen, men även en mängd olika grundvatten som observeras i kristallint berg. Dessutom transporteras anjoner genom geosfären praktiskt taget utan retention i korrosionsscenarioet, dvs det är inte befogat att utforska ännu mindre gynnsamma fall med anjonexklusion.

Temperaturen *in situ* påverkar diffusiviteten i fri lösning, enligt välkända samband, och således även den effektiva diffusiviteten. De data som anges gäller för temperaturer som varierar från något förhöjda temperaturer, jämfört med aktuella dagsförhållanden, till temperaturer något högre än frystemperatur. Inom detta temperaturintervall är variationen i den effektiva diffusiviteten liten. Exempelvis är diffusiviteten vid rumstemperatur omkring en faktor två större än vid temperaturer något högre än frystemperatur. Detta behandlas som dataosäkerheter i **Datarapporten**. Eftersom temperaturer under fryspunkten är irrelevanta och eftersom temperaturer över aktuella dagsvärden är gynnsamma finns det inget skäl att utforska mer extrema fall än de som täcks in av **Datarapporten**.

Den porositet som ges i **Datarapporten** är baserad på laboratoriemätningar vid atmosfärstryck korrigerade så att de data som ges i rapporten representerar spänningsförhållanden *in situ* på platsen. Den givna effektiva diffusiviteten är baserad på mätningar *i*, och bör representera, spänningsförhållanden *in situ*. Spänningen kommer att förändras under glaciationscykeln, primärt till följd av den extra lasten från en inlandsis under en glaciation. Den här extra spänningen bedöms emellertid ha en mycket liten effekt på porositeten och liten effekt på effektiv diffusivitet, och behandlas som dataosäkerhet i **Datarapporten**. I scenariot ”Kapselbrott till följd av isostatisk last”, se avsnitt 12.7, befinner dessutom de maximala istjocklekarna ligga inom det intervall som täcks in av indata till bestämningen av porositetsdata i **Datarapporten**.

Slutligen ses det som osannolikt att potentiella erosionsprodukter från bufferten skulle fungera som diffusionsmotstånd i gränssytan mellan spricka och berg, och därmed förhindra radionuklider från att komma in i det mikroporösa systemet.

Sammanfattningsvis finns det inget behov av ytterligare studier, eftersom ämnet har studerats uttömmande och data ges i **Datarapporten**.

Porkonnektivitet

En storhet som är nära relaterad till den effektiva diffusiviteten är porkonnektiviteten. I **Datarapporten** föreslås det att porkonnektiviteten *in situ* är obegränsad i alla skalor som är relevanta för säkerhetsanalysberäkningar (det vill säga i skalan minst flera tiotal meter). Under glaciation kan det mikroporösa systemet påverkas av den extra spänningen *in situ* som orsakas av inlandsisen. Den effekten ingår emellertid i utvärderingen av dataosäkerheter för den effektiva diffusiviteten och även under en glaciation förväntas det att porkonnektiviteten är obegränsad.

Även för transportförhållandena i korrosionsscenarioet skulle porkonnektiviteten behöva minskas till centimeterskalan innan den påverkar retentionen i geosfären på ett betydande sätt.

Sorptionsfördelningskoefficient

Sorptionsfördelningskoefficienten, K_d , är för många radionuklider känslig för förhållanden i berget. I **Datarapporten** framkommer det att grundvattensammansättningen är den mest betydelsefulla faktorn, medan temperatur och spänning *in situ* är underordnade faktorer med liten eller till och med mycket liten påverkan. För radionuklider som sorberas genom ytkomplexbildning är pH, karbonatkoncentrationen och koncentrationerna av diverse andra ligander, som direkt kan konkurrera om att binda radionuklider på bekostnad av sorptionen, betydelsefulla. För radionuklider som sorberas genom katjonbyte är koncentrationerna av konkurrerande katjoner betydelsefulla.

För många nuklider är K_d känsligt för redoxförhållandena, vilka bestäms av närvaron av redoxkontrollerande par såsom $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}(\text{OH})_3$ eller $\text{SO}_4^{2-}/\text{FeS}_{(\text{am})}$. K_d är även relaterad till pH och koncentrationen av löst karbonat. Redoxförhållandena för berget diskuteras i avsnitt 6.1 i **Datarapporten**.

I fallet med nuklider som sorberas genom katjonutbyte har K_d -värden korrigerats så att de omfattar variationen i grundvattnets sammansättning under förvarsutvecklingen. Indata för denna korrektion har utgjorts av modellerade grundvattensammansättningar från ett stort antal platser i förvaret, som anges i avsnitt 6.1 i **Datarapporten**. Detta har resulterat i fördelningar av K_d där den lägre änden av fördelningarna återspeglar ogynnsamma grundvattenförhållanden. För nuklider som sorberas genom ytkomplexbildning har sorptionsmekanismens komplexa natur utgjort ett hinder för sådana detaljerade korrektioner. Baserat på expertbedömningar har sammanställda data klassificerats som att de är (rimligt) representativa för berget i Forsmark eller som att de inte är det. Data som inte är representativa har i möjligaste mån uteslutits.

Sammanfattningsvis finns det stora osäkerheter förknippade med K_d -värden, vilket även återspeglas i de breda K_d -intervall som ges i **Datarapporten**. Eftersom de nedre ändarna av fördelningarna indikerar att retention av i synnerhet den dosdominerande nukliden Ra-226 i geosfären inte sker i korrosionsscenarioet och eftersom en stor mängd olika förhållanden täcks in av de data som ges i **Datarapporten**, bedöms det inte vara befogat att undersöka ytterligare intervall av K_d -värden. Utöver transportförhållanden för det centrala korrosionsfallet, där hela omfånget av K_d -värden för reducerande förhållanden används, undersöks även ett fall där K_d -värden för oxiderande förhållanden används när en inlandsis passerar ovanför förvaret med flödes hastigheter som också varierar i enlighet med de föränderliga yttre förhållandena, se avsnitt 13.5.6.

Hydrogeologiska data relaterade till flöde och transport

De hydrogeologiska flödesrelaterade migrationsdata presenteras i **Datarapporten** i avsnitt 6.7. De olika datauppsättningar som är av betydelse för korrosionsscenarioet är:

- Ekvivalent flödes hastighet (Q_{eq}) och Darcyflöde (U_0) för utsläppsvägen Q1.
- Flödesrelaterat transportmotstånd (F).
- Advektiv gångtid (t_w).
- Peclets tal (Pe).
- Maximalt inträngningsdjup i bergmatris (x_0).

Kapselbrott i korrosionsscenarioet inträffar när bufferten förloras i deponeringshålet. Återfyllningsmaterial från tunnlar kommer också att gå förlorat, men bedömningen görs att denna förlust blir liten i jämförelse med den totala mängden återfyllningsmaterial, se avsnitt 10.3.11, och att flödesförhållandena i tunnarna därför inte kommer att förändras. Flöde i sprickor som skär deponeringshål kan emellertid förändras lokalt på grund av de förändrade egenskaperna hos sprickorna. Specifikt kan eroderad buffert från deponeringshålen fylla ut sprickhålrummet och härigenom förändra flödesegenskaperna.

Ekvivalent flödes hastighet och Darcyflöde

Om den eroderade bufferten blir kvar i sprickan nära deponeringshålet är det troligt att grundvattenflödet (och den därmed förknippade ekvivalenta flödes hastigheten och Darcyflöde) kommer att minska. Dessutom är hastigheten för radionuklidutsläpp från närområdet praktiskt sett oberoende av flödes hastigheten för transportförhållandena i korrosionsscenarioet. Flödes hastigheten är tillräckligt hög för att föra bort alla radionuklider som frigörs från de använda bränslet, och det finns därför inget behov att beakta högre flödes hastigheter ur den aspekten. All reduktion av flödes hastigheten beroende på kvarvarande buffertmaterial i sprickorna har pessimistiskt försumrats.

Flödesrelaterat transportmotstånd och advektiv gångtid

Det antas att flödesvägarna genom geosfären inte påverkas av de förändrade egenskaperna som den eroderade bufferten ger upphov till. Darcyflödet i deponeringspositionerna är omvänt korrelerat till det flödesrelaterade transportmotståndet och den advektiva gångtiden. Således kommer det flödesrelaterade transportmotståndet och den advektiva gångtiden att öka om det eroderade materialet medför ett minskat flöde i deponeringspositionen. Förvarsutvecklingar som leder till ökade flödes hastigheter utforskades i analysen av inneslutning för korrosionsscenarioet, se avsnitt 12.6. Slutsatsen är att inga ytterligare fall behöver analyseras med hänseende till korrosion, där väsentligen flödes hastigheter för tempererade förhållanden användes. För analysen av radionuklidtransport är det emellertid befogat att undersöka effekterna av flödesvariationer enligt de föränderliga förhållandena under en glaciationscykel. Detta görs som ett särskilt beräkningsfall, se avsnitt 13.5.6.

Peclets tal och maximalt inträngningsdjup i bergmatris

Inträngningsdjupet i bergmatrisen bedöms inte påverkas av närvaron av buffertmaterial i sprickorna, se även diskussion om porkonnektivitet ovan. Likaså bedöms Peclettalet inte påverkas av förekomsten av en viss mängd buffertmaterial i spricknätverket.

Inga andra frågor relaterade till korrosionsscenarioet har identifierats. De data som presenterats i **Datarapporten** bedöms därmed vara relevanta för korrosionsscenarioet. Dessutom har inga andra förvarsutvecklingar, som skulle kunna medföra mindre gynnsamma flödes- och transportförhållanden och som är förenliga med korrosionsscenarioet identifierats.

LDF-faktorer för biosfären

Alla klimatförhållanden som kommer från analyserna av systemets utveckling täcks in av de olika uppsättningar LDF-faktorer som finns tillgängliga. LDF-faktorer för den interglaciala perioden används i det centrala korrosionsfallet.

Enligt avsnitt 13.2.4 förväntas de högsta doserna från ett oavbrutet utsläpp från förvaret under tempererade förhållanden, när människor exponeras för radionuklider som har ackumulerats i en våtmark som har omvandlats till odlingsbart land och när kontaminerat brunnsvatten används av människor och boskap. Således är de LDF-värden för den interglaciala perioden som används i beräkningarna maximala värden under referensglaciationscykeln. För klimatfallet med global uppvärmning var LDF-värdena märkbart (omkring en faktor tio) större än under referensglaciationscykeln endast för Cs-135 och U-238, se figur 13-7. Eftersom ingen av dessa nuklider bidrar nämnvärt till den totala årliga dosen i korrosionsscenarioet finns det inget behov av att använda andra LDF-faktorer än de som används i det centrala korrosionsfallet för att täcka in osäkerheter i biosfären.

Övergripande slutsats avseende analys av ytterligare fall

Analyserna i det här avsnittet visar att i) utvecklingen i korrosionsscenarioet är förenlig med de förhållanden för vilka data i **Datarapporten** har bestämts och ii) inga alternativa utvecklingar av systemet, som skulle kunna medföra mindre gynnsamma transportförhållanden, måste beaktas. Dock behöver ett fall med förhållanden i berget som varierar i enlighet med de föränderliga förhållandena under en glaciationscykel undersökas.

13.5.6 Beräkning av alternativa fall

Översikt av fallen

Figur 13-21 ger en översikt av beräkningsfall för korrosionsscenarioet. De tre hydrogeologiska DFN-modellerna (blått) kombineras med tre erosionsfall (rött) vilket ger nio korrosionsvarianter att beakta i härledningen av beräkningsfall för radionuklidtransport och dos. Av dessa behandlas de tre varianterna ”utan advektion” inte vidare eftersom de inte leder till kapselbrott.

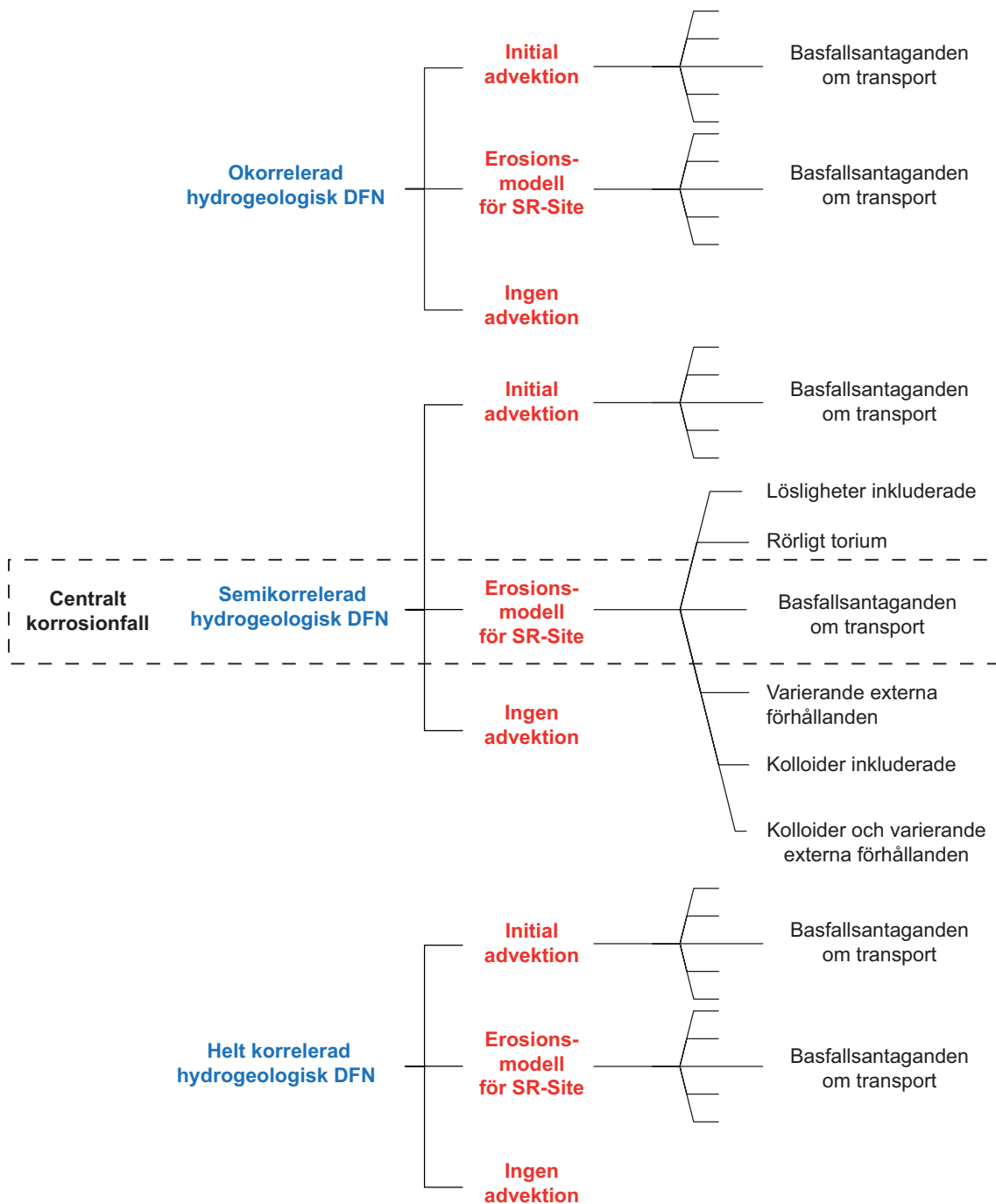
Det centrala korrosionsfallet utgörs av den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen, erosionsmodellen för SR-site samt transportantaganden och data för basfallet som presenterats ovan. Fem fall av alternativa transportförhållanden analyseras för den centrala korrosionsvarianten:

- Ett fall med lösligheter inkluderade.
- Ett fall där torium antas vara rörligt i närområdet.
- Ett fall med varierande klimatförhållanden.
- Ett fall med kolloidbefrämjad transport i geosfären.
- Ett fall med varierande klimatförhållanden och kolloider i geosfären.

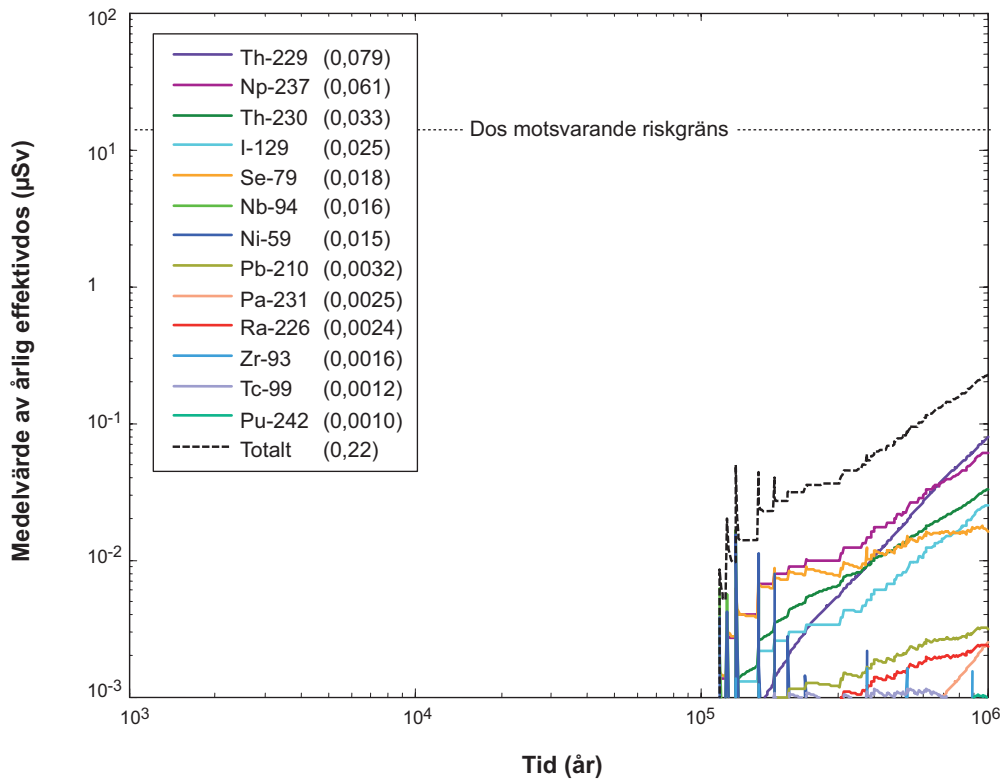
(Fallet som beskrivs i den fjärde punkten redovisas endast i **Radionuklidtransportrapporten**). De andra fyra relevanta korrosionsvarianterna analyseras för transportförhållanden i enlighet med basfallet. Ytterligare korrosionsvarianter redovisas i **Radionuklidtransportrapporten**.

Mobilt torium i närområdet

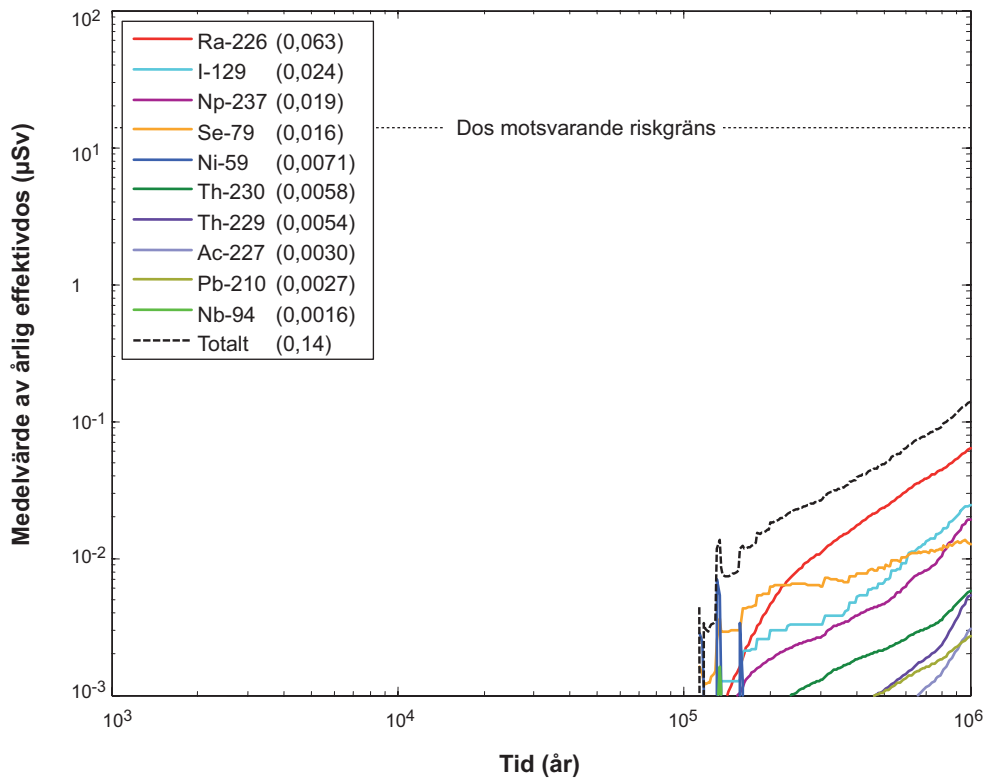
Figurena 13-22 och 13-23 visar dosekvivalent utsläpp från närområdet respektive dos från fjärrområdet för det centrala korrosionsfallet när hänsyn inte tas till sorption av torium i närområdet. Både doser till följd av utsläpp av Ra-226 och den totala dosen är lägre än i det centrala fallet, vilket visar att det antagande om toriumsorption i närområdet som görs i det centrala korrosionsfallet är pessimistiskt. Observera även att en betydligt mindre mängd Ra-226 frigörs från närområdet jämfört med det centrala korrosionsfallet (0,0024 relativt 0,38 μSv), men att fjärrområdesutsläppen är mer lika (0,063 relativt 0,11 μSv). Detta beror på att, i fallet då hänsyn inte tas till toriumsorption i närområdet, släpps Th-230 ut från närområdet och alstrar Ra-226 i geosfären i stället för i närområdet.



Figur 13-21. Översikt av beräkningsfall för korrosionsscenarioet.



Figur 13-22. Utsläpp från närområdet uttryckt som medelvärde av årlig effektivdos för det probabilistiska centrala korrosionsfallet, där hänsyn inte tagits till Th-sorption i närområdet. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i μSv).



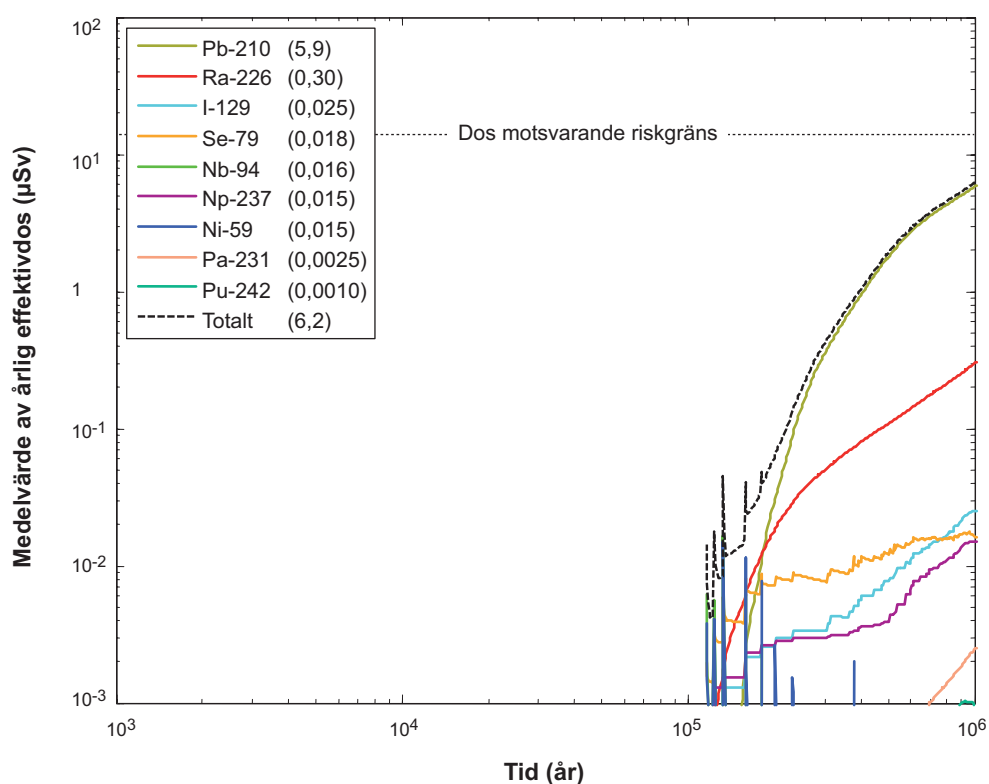
Figur 13-23. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för det probabilistiska centrala korrosionsfallet, där hänsyn inte tagits till Th-sorption i närområdet. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i μSv).

Lösligheter inkluderade i närområdet

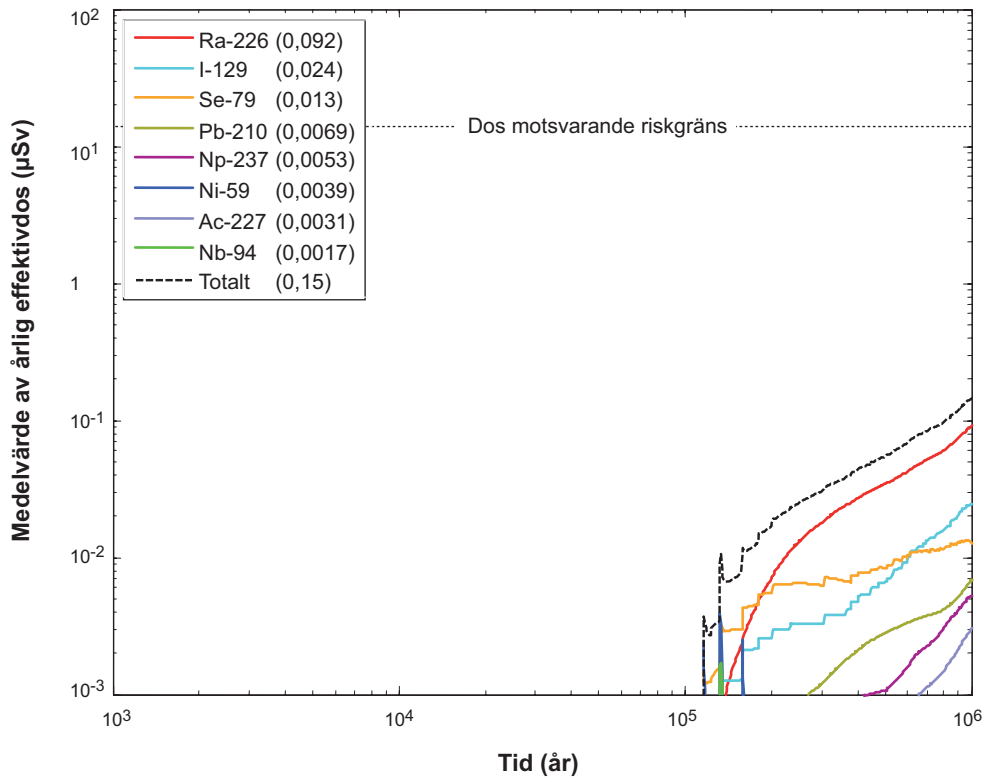
Figurerna 13-24 och 13-25 visar dosekvivalent utsläpp från närområdet respektive dos från fjärrområdet för det centrala korrosionsfallet när lösligheter inkluderas i närområdet. Dosen från närområdet som orsakas av utsläpp av Pb-210 är betydligt högre än för det centrala korrosionsfallet, eftersom förekomsten av Ra-226 är begränsad till kapselns inre delar där den alstrar Pb-210. Doser från fjärrområdet är emellertid liknande dem i det centrala korrosionsfallet. Pb-210 sönderfaller betydligt i geosfären, framför allt beroende på sin korta halveringstid.

Okorrelerad och helt korrelerad hydrogeologisk DFN-modell

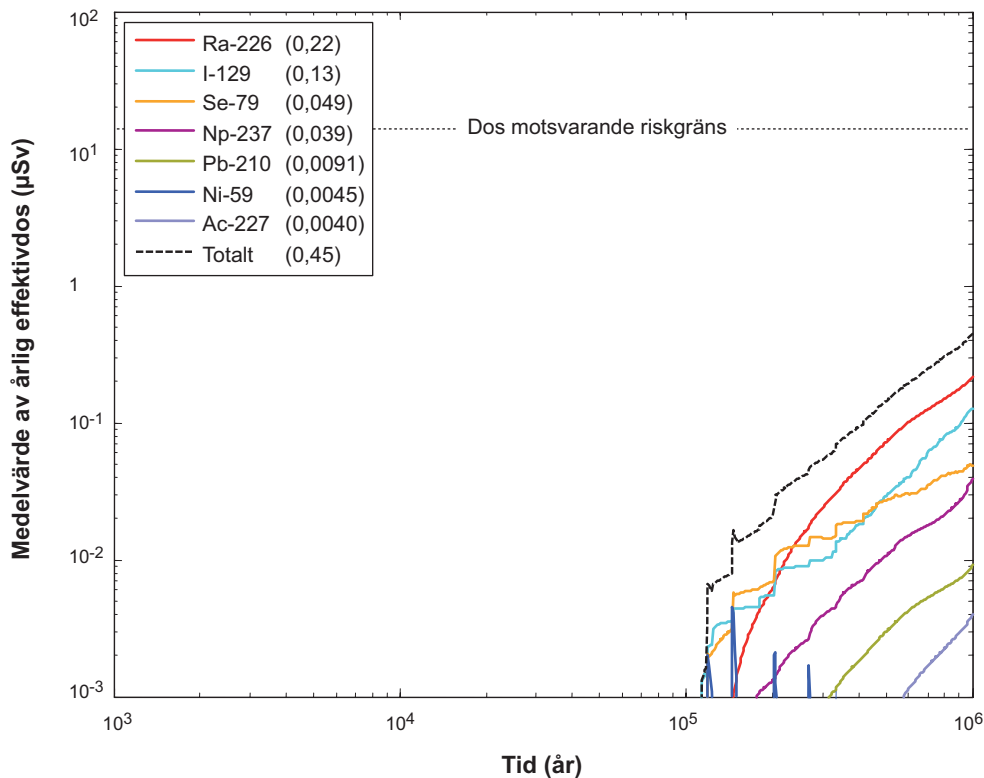
Doser från fjärrområdet för det centrala korrosionsfallet, men med hydrogeologiska data för det okorrelerade sambandet mellan sprickstorlek och transmissivitet i DFN-modellen som används i beräkningen av kapselbrottstider och radionuklidtransport, visas i figur 13-26. Motsvarande doser från fjärrområdet för den helt korrelerade DFN-modellen visas i figur 13-27. Medelvärdena för antalet otäta kapslar är 0,65 respektive 0,57, och de första utsläppen inträffar efter omkring 100 000 år.



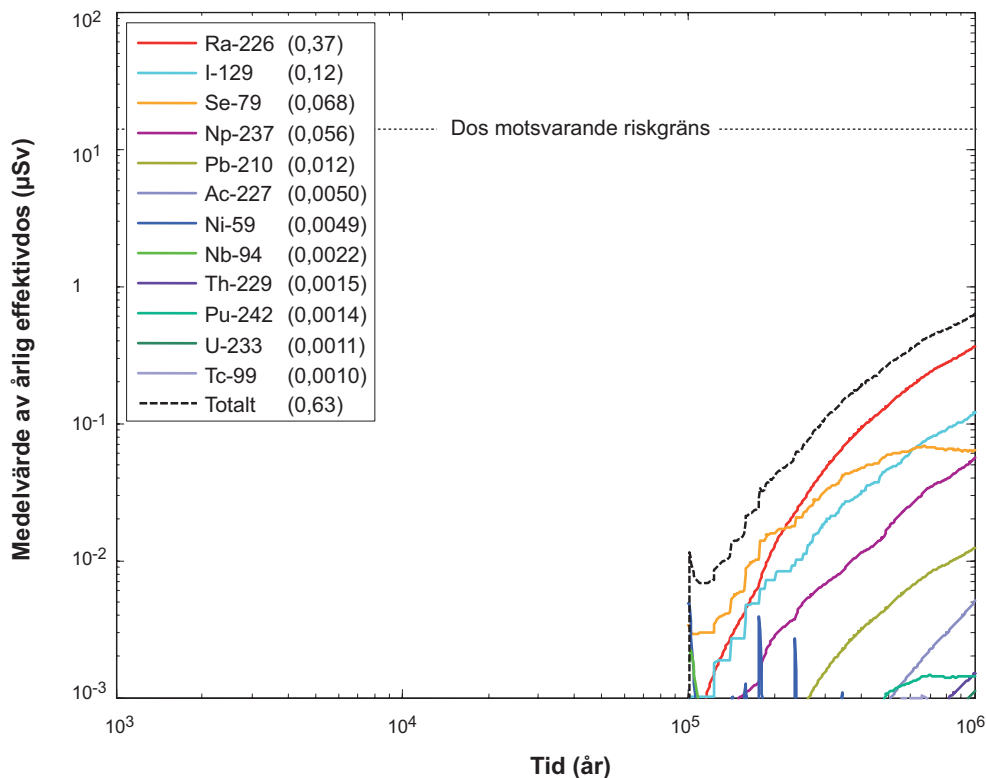
Figur 13-24. Utsläpp från närområdet uttryckt som medelvärde av årlig effektivdos för det probabilistiska centrala korrosionsfallet, där löslighetsgränser i närområdet inkluderats. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-25. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för det probabilistiska centrala korrosionsfallet, där löslighetsgränser i närområdet inkluderats. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i μSv).



Figur 13-26. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för en probabilistisk beräkning för kapselbrott på grund av korrosion med den okorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i μSv).



Figur 13-27. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för en probabilistisk beräkning för kapselbrott på grund av korrosion med den helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).

Fall med initial advektion i alla deponeringshål

Konsekvenser för extremfallet där initial advektion antas i alla deponeringshål visas för närområdet och fjärrområdet i figurerna 13-28 respektive 13-29. Det genomsnittliga antalet otäta kapslar uppgår till 0,17.

De första utsläppen sker något före 50 000 år. De dosekvivalenta utsläppen från närområdet domineras av pulsläpp från metallkorrosion av Nb-94 och det mer kontinuerliga utsläppet av Ra-226. De doser som orsakas av utsläpp från fjärrområdet domineras totalt av pulsläppet från Nb-94 och det mer kontinuerliga utsläppet av Se-79 och Ra-226.

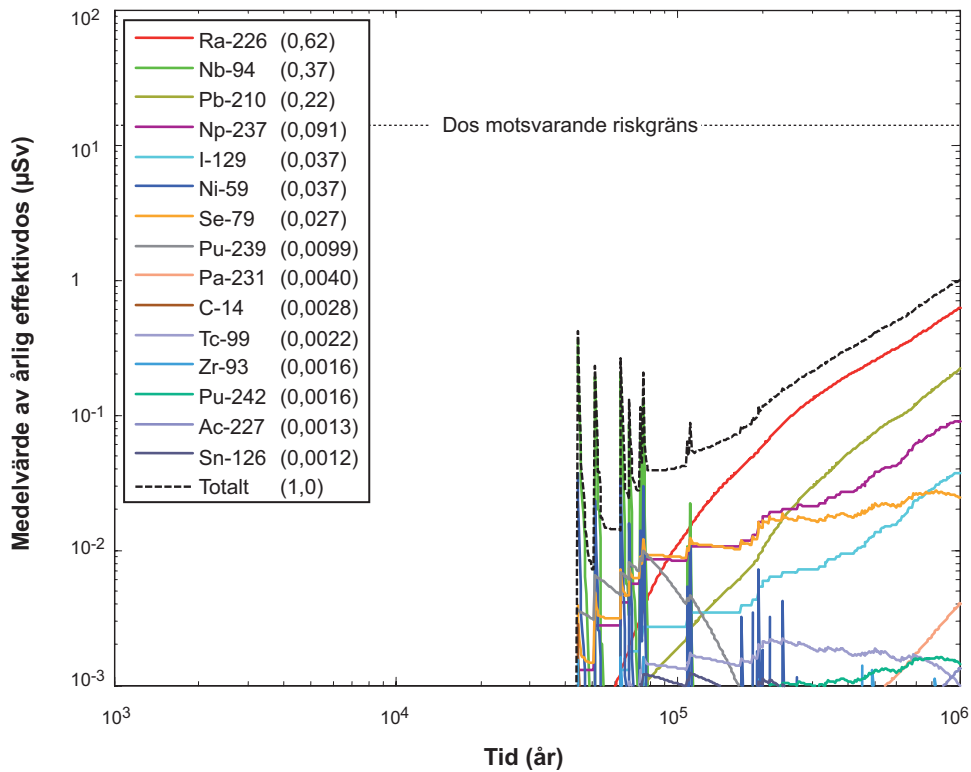
Den relativt lilla skillnaden mellan det här fallet och det centrala korrosionsfallet beror på att de flesta kapslar inte kommer att bli otäta även om bufferten saknas, eftersom tiden som krävs för att korrodera igenom kapseln överskrider den en miljon år långa analysperioden för flertalet av kapslarna.

Motsvarande fall för de okorrelerade och helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modellerna ger liknande resultat, se **Radionuklidtransportrapporten**. Totala doser för dessa fall ingår också i sammanfattningen av fall i figurerna 13-39 och 13-40 i avsnitt 13.5.9.

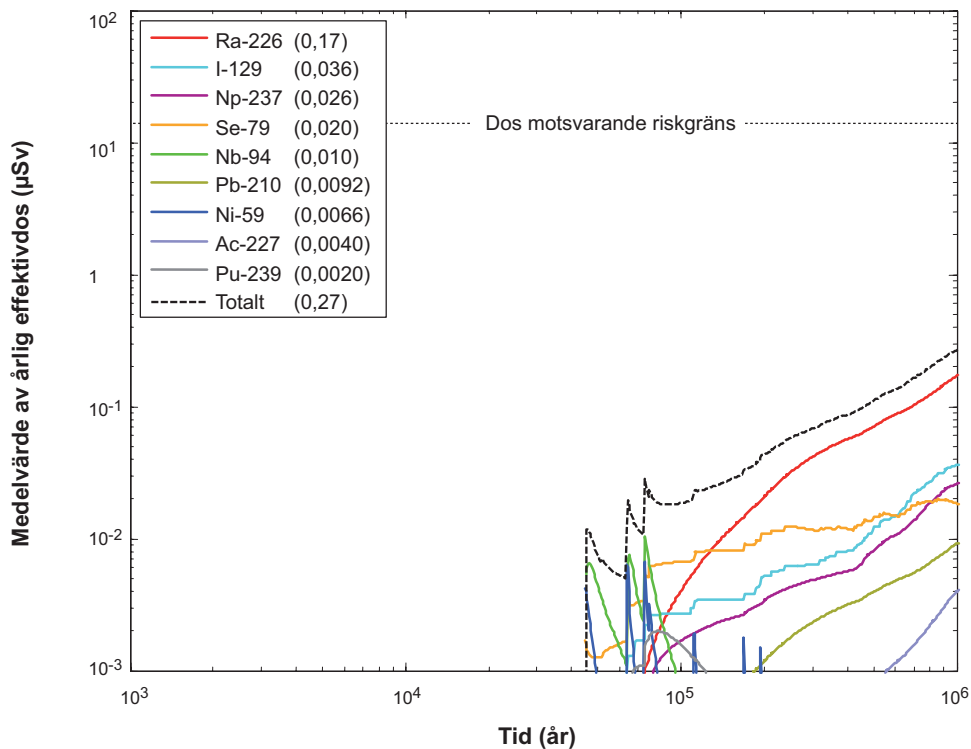
Varierande externa förhållanden

Flödesrelaterade transportdata för tempererade klimatförhållanden används i de ovanstående fallen. Effekten av varierande flödesförhållanden och andra klimatrelaterade geosfärdata analyseras med MARFA-modellen.

Framtida klimatutveckling för förvaringsplatsen i Forsmark beskrivs i detalj i **Klimatrapporten** och sammanfattas i avsnitt 10.4.1. Framtida glaciationscykler kommer att få en betydande effekt på grundvattnets flöde och kemiska förhållanden. En pessimistisk abstraktion av utvecklingen av grundvattenflödesfältet tas fram för att utvärdera inverkan av framtida glaciationscykler på radionuklidtransport i korrosionsscenarioet.



Figur 13-28. Utsläpp från närområdet uttryckt som medelvärde av årlig effektivdos för en probabilistisk beräkning för kapselbrott till följd av korrosion med initial advektion i bufferten och för övrigt som det centrala korrosionsfallet. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-29. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet för en probabilistisk beräkning för kapselbrott på grund av korrosion med initial advektion i bufferten och för övrigt som det centrala korrosionsfallet. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximalt medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).

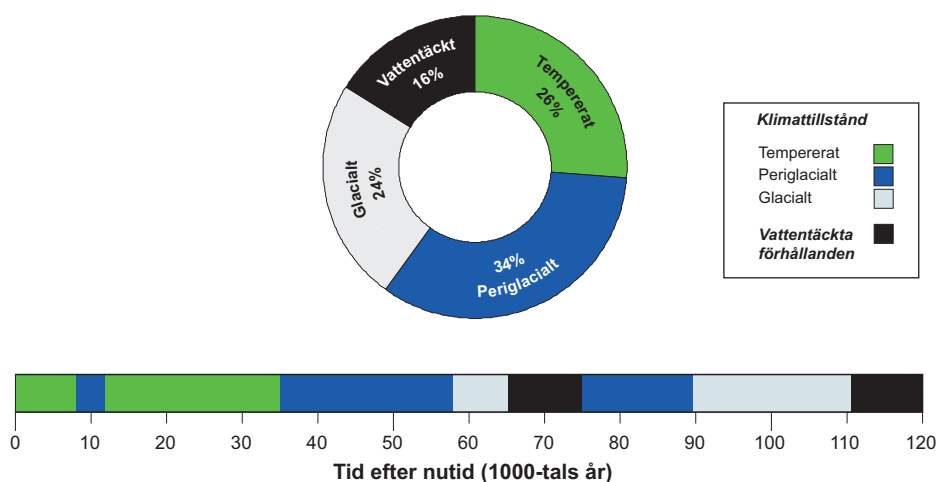
En förenklad glaciationscykel tas fram i avsnitt 4.5.4 i **Klimatrapporten** för att ge stöd för abstraktionen, se figur 13-30. Den förenklade cykeln har två tempererade perioder, tre periglaciala perioder, två glaciala perioder och två vattentäckta perioder under den 120 000 år långa cykeln. Observera att de summerade procentuella andelarna för varje klimatperiod sammanfaller med motsvarande procentandelar för den ursprungliga icke förenklade cykeln. I abstraktionen upprepas cykeln åtta gånger under den en miljon år långa analysperioden. Tabell 13-7 ger tider för varje flödesändring i den första 120 000 år långa cykeln.

Detaljerade simuleringar av transient flöde under en glaciationscykel har genomförts /Vidstrand et al. 2010/ och sammanfattas i avsnitt 10.4.6. Dessa simuleringar visar att både riktning och storlek på grundvattenflödet påverkas av glaciationscykeln. Som ett alternativ till att återge de fullständiga detaljerna för transienta grundvattenflödesfält i transportsimuleringarna utvecklas en pessimistiskt gränssättande abstraktion.

Abstraktionen innefattar förändringar i flödesstorlek, men flödesvägar från den tempererade perioden används /Joyce et al. 2010/ och ändringar i flödesriktning utesluts. Den här abstraktionen är pessimistisk, eftersom den grovt överskattar den vertikala komponenten av flödeshastigheten jämfört med detaljerade simuleringar /Vidstrand et al. 2010/ och eftersom den dessutom inte tar hänsyn till förlängning av flödesvägarna som kan inträffa under vissa av klimatperioderna.

Tabell 13-7. Varaktighet för varje klimatperiod i den förenklade 120 000 år långa cykeln. Procentuella andelen för varje ackumulerad period anges också.

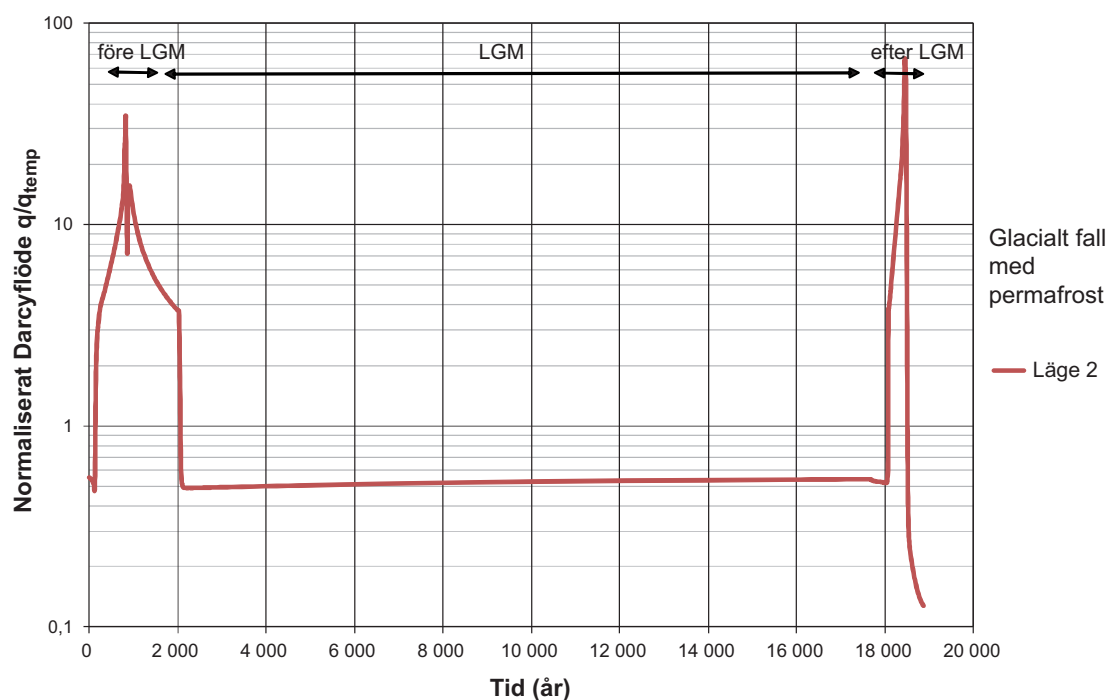
Period	Kalendertid (tusentals år)	Varaktighet (tusentals år)	Ackumulerad varaktighet (tusentals år)
Tempererad period	0–8	8	8
Periglacial period	8–12	4	4
Tempererad period	12–35	23	8+23=31 (26 %)
Periglacial period	35–58	23	4+23=27
Glacial period	58–65	7	7
Vattentäckt period	65–75	10	10
Periglacial period	75–89	14	27+14=41 (34 %)
Glacial period	89–111	22	7+22=29 (24 %)
Vattentäckt period	111–120	9	10+9=19 (16 %)



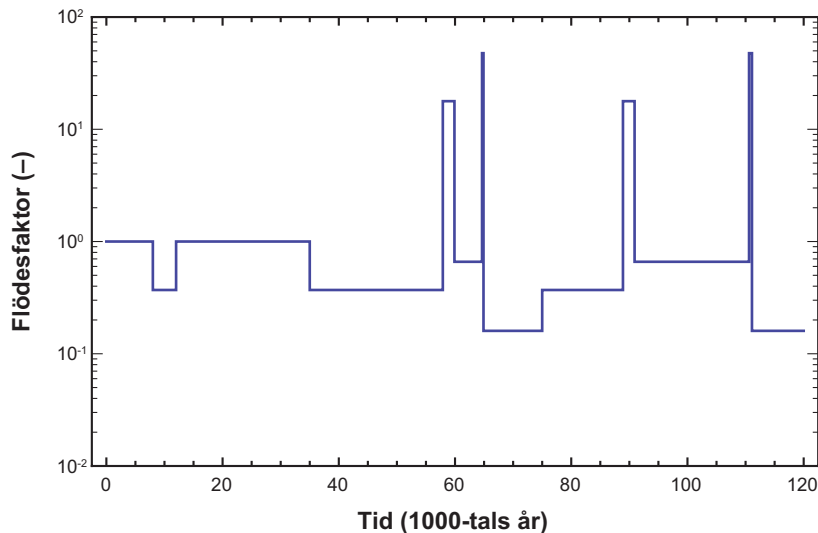
Figur 13-30. Förenklad glaciationscykel för användning i utvärderingen av geosfärtransporten, se vidare avsnitt 4.5.4 i **Klimatrapporten.**

De glaciala perioderna som sammanfattas i figur 13-30 och tabell 13-7 måste delas in ytterligare i faser med framryckning, glacialt maximum och tillbakadragande eftersom grundvattenhastigheten kommer att skilja sig väsentligt under dessa tre faser. För den framryckande inlandsisen tar det 366 år att förflytta sig mellan isfrontslägena I och IV, se avsnitt 10.4.6 och /Vidstrand et al. 2010/ för mer information. För den tillbakadragande inlandsisen tar det 61 år att förflytta sig mellan isfrontsläge IV och I. Som en approximation görs bedömningen att när isfronten befinner sig bortom dessa isfrontslägen är påverkan från isfronten på förvaret liten, dvs förhållanden som liknar periglaciala eller vattentäckta förhållanden kommer att råda. Men även längre fram än vid dessa tidpunkter förekommer viss påverkan, även om den inte är jämförbar med den maximala påverkan, se figur 13-31 som visar Darcyflödet på förvarsdjup inom förvarets projektion på markytan (mätposition 2 i /Vidstrand et al. 2010/). Specifikt varar ökningen i Darcyflöde jämfört med tempererade förhållanden i ungefär 2 000 år under isens framryckande. Den glaciala framryckande perioden representeras som om den pågår i 1 800 år, vilket är avsevärt längre än tiden det tar för förflyttning mellan läge I och IV, men något kortare än tiden 2 000 år. Den snabbare tillbakadragande fasen modelleras som om den pågår i 300 år, dvs förhållandet i varaktighet mellan faserna med framryckning och tillbakadragande bibehålls. Ökningen i Darcyflöde under den framryckande fasen är mindre än under den tillbakadragande fasen. Detta beror på att den framryckande fasen kännetecknas av att det finns permafrost framför inlandsisen, medan tillbakadragandet av inlandsisen sker under bottenmältande förhållanden så att permafrost inte förekommer, se avsnitt 10.4.6 och /Vidstrand et al. 2010/ för detaljer.

Flödesskalningsfaktorer för varje klimatregim erhålls från de beräknade fördelningarna av Darcyflöde i deponeringspositioner i den stora regionala grundvattenflödesmodellen av /Vidstrand et al. 2010/ som sammanfattas i avsnitt 10.4.6. I figur 10-146 visas fördelningar av Darcyflöden som maximivärden, medianvärden och minimivärden. Medianvärdena från figur 10-146 och varaktigheten av varje flödesperiod från tabell 13-7 används för att ta fram tidsberoende skalfaktorer, se figur 13-32. Vid framtagningen av de tidsberoende skalfaktorerna antas det glaciala tillståndet med en 2 km lång tunga med permafrost för fasen då isen drar sig tillbaka. Detta antagande bedöms som något pessimistiskt eftersom flödet för en glacial period utan permafrost bestämdes för en framryckande is /Vidstrand et al. 2010/ men användes här för en inlandsis som drar sig tillbaka. I fjärrområdesberäkningarna med MARFA skalades värdena för den tempererade perioden för advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd omvänt mot värdena i figur 13-32 för att få motsvarande värden för andra perioder i den glaciala cykeln.



Figur 13-31. Förändring i Darcyflöde jämfört med den tempererade perioden då inlandsisen rycker fram och drar sig tillbaka över förvarsplatsen. Modifierad version av figur G-12 i /Vidstrand et al. 2010/.



Figur 13-32. Flödesskalningsfaktorer för en glaciationscykel (av åtta) för användning i simuleringar av radionuklidtransport i fjärrområdet. De skarpa topparna i slutet av varje glacial period varar under 300 år, men är inte upplösta på skalan i den här figuren. Skalningsfaktorn definieras relativt Darcyflödet under den tempererade perioden.

Transportsimuleringarna är identiska med basfallet för den tempererade perioden som beskrivs i avsnitt 13.5.4 förutom flödesförändringarna som visas i figur 13-32 och användningen av K_d -värden för oxiderande förhållanden för de redoxkänsliga elementen under isfrontspassager (dvs under tidsperioderna när flödesskalningsfaktorerna är 20 respektive 50). Dessutom används olika landskaps-specifika dosomvandlingsfaktorer (LDF-faktorer) för olika perioder i glaciationscykeln. I de beräkningar av närområdesutsläpp som används som indata till MARFA-simuleringarna tas inte hänsyn till flödesförändringar. Denna förenkling baseras på det faktum att utsläpp av radioaktiva grundämnen som inte är löslighetsbegränsade kommer att begränsas av bränsleupplösningshastigheten, vilken är oberoende av flödeshastigheten. Observera även att omedelbart frigjorda fraktioner inte ingår i den här simuleringen.

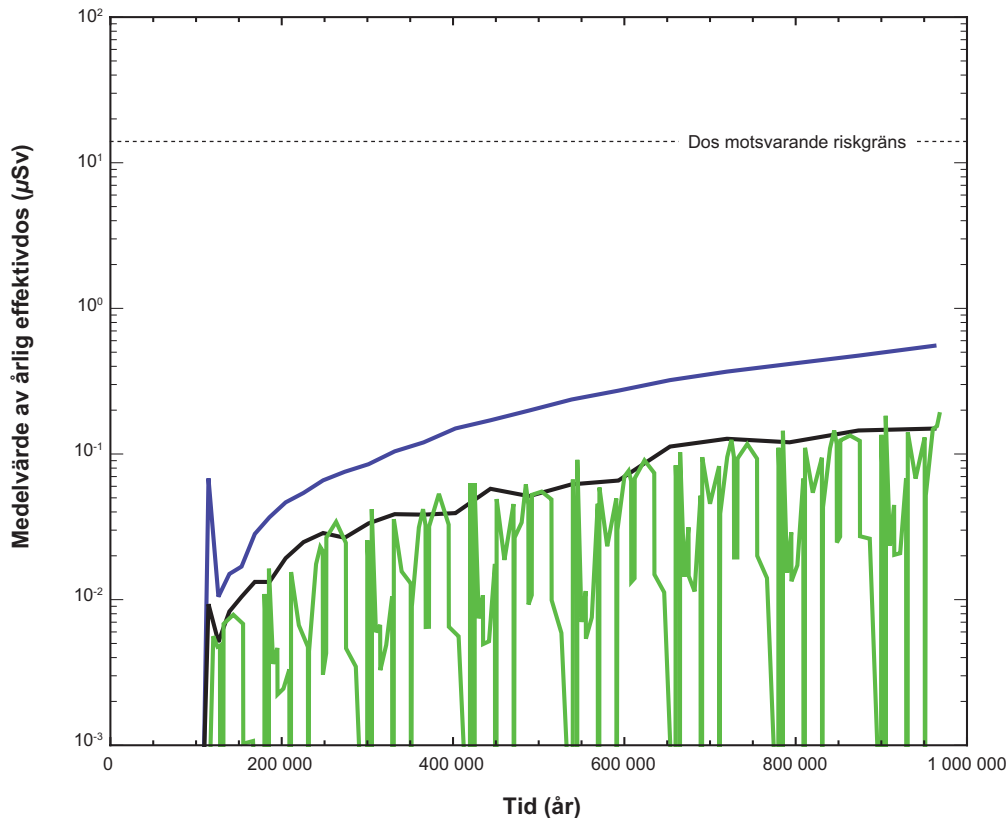
I figur 13-33 visas förväntad årsdos som funktion av tid för det här fallet. Även fallet utan flödesändringar, dvs med tempererat flöde genomgående under analysperioden, visas. Resultaten grundas på 2 800 realiseringar av det centrala korrosionsfallet där både närområdes- och fjärrområdesparametrar följer fördelningar som ges i **Datarapporten**.

Resultaten i figur 13-33 tyder på att förändringar i flödet, K_d och LDF gemensamt inte leder till någon betydande ökning av maximal dos. Den primära effekten är de skarpa nedåtgående spikarna i dos under tiden för glacialt framryckande och tillbakadragande. Fastän utsläppet av radionuklidmassa till biosfären ökar abrupt under dessa perioder till följd av förändringar i flöde och, mer betydelsefullt, förändringar i K_d för redoxkänsliga radionuklider, kompenseras denna ökning mer än väl av de kraftigt reducerade LDF-värdena under dessa perioder.

Resultaten utan flödesändringar kan även jämföras med motsvarande fall som beräknats med FARF31, se figur 13-18 i avsnitt 13.5.4, som visar mycket liknande resultat för total dos.

Kolloidbefrämjad transport

Förekomsten av bentonitmaterial i återfyllningen i deponeringstunnlar och i bufferten i deponeringshåll förväntas leda till förekomst av bentonitkolloider i grundvatten nära deponeringshåll och utefter transportvägar i geosfären. Radionuklider som har stark affinitet till bentonit kommer att sorbera på bentonitkolloider och kan transporteras genom geosfären med reducerad växelverkan med bergmatrisen, dvs med reducerad retention. Kolloidbefrämjad transport omfattar en komplicerad kombination av processer, av vilka många kan verka hämmande på transporten. Hämmande processer omfattar kolloidfördrojning i sprickor, fysikalisk filtrering (silning) av kolloider i sprickor, kolloidal flockning och sedimentation, desorption av radionuklider från kolloider, mättnad av sorptionsplatser på kolloider och konkurrens om

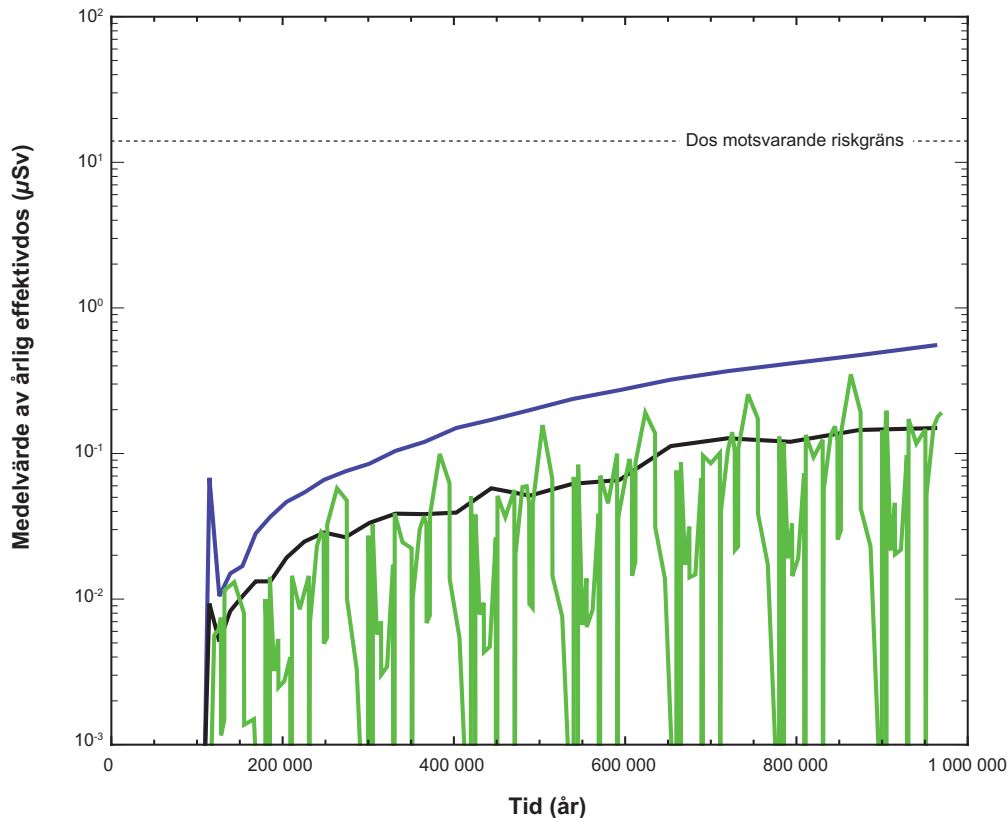


Figur 13-33. Förväntade doser med och utan flödesändringar. Den blå heldragna kurvan är närområdesutsläppet uttryckt som en årlig effektivdos. De svarta och gröna kurvorna är årsdos från fjärrområdet utan respektive med flödesförändringar.

sorptionsplatser på kolloider. Dessa processer är osäkra eller beskrivs av osäkra parametrar som är svåra att kvantifiera i kortvariga experiment. I stället för att försöka utveckla detaljerade processmodeller för kolloidbefrämjad transport utesluts hämmande processer för att sätta en övre gräns för den möjliga effekten. Om dessa potentiellt hämmande processer utesluts och hänsyn tas till att sorption av radionuklider på bentonit anses vara en reversibel process i tidsskalan för transport i geosfären, se **Processrapporten för buffert, återfyllning och förslutning**, kan effekterna av kolloidbefrämjad transport modelleras genom att införa effektiva transportparametrar, vilket beskrivs i bilaga I i **Radionuklidtransportrapporten**.

Vilka kolloidkoncentrationer som kan upprätthållas stabilt är starkt avhängigt de kemiska förhållandena i grundvattnet. Det har fastställts i en genomgång av laboratorie- och fältdata /Wold 2010/ att 10 mg/l är ett rimligt pessimistiskt värde för kolloidkoncentrationer för kemiska förhållanden som normalt råder i grundvatten. Emellertid kan detta värde vara mycket högre under korta perioder när kraftigt utspätt glacialt smältvatten kommer in i geosfären. Den maximala koncentrationen av lerkolloider i kraftigt utspätt vatten har fastställts vara cirka 40 g/l i gränsskiktet mellan buffert och grundvatten /Birgersson et al. 2009/ och **Processrapporten för geosfären**. Det är dock orimligt att anta att den här koncentrationen kan upprätthållas i hela geosfären. För beräkningarna av radionuklidtransport har ett värde på 10 g/l valts som ett pessimistiskt värde för kolloidkoncentrationer i mycket utspätt vatten. Det pessimistiska värdet för utspätt vatten (dvs 10 g/l) används under perioder med tillbakadragande/framryckande av inlandsis och under de senare halvorna av det glaciala maximumet och de tempererade perioderna, för att åskådliggöra konsekvenser av perioder med eventuell nedträngning av utspätt vatten i enlighet med analyserna i kapitel 10. Det lägre värdet 10 mg/l används för övriga perioder.

Fördelningskoefficienten för sorption på bentonitkolloider K_c kan relateras till samma parameter för sorption på bentonitbuffertmaterial K_d som $K_c = \gamma K_d$ där γ är ett förhållande mellan specifika yta för kolloidal bentonit och bentonit i bulkform. Givet att bentonit är ett finkornigt material och att jämviktsfördelningskoefficienterna för bentonit typiskt mäts med kolloidala suspensioner med partikelstorlekar mindre än 1 µm, är $\gamma \approx 1$ ett rimligt antagande. Således användes K_d -fördelningar från avsnitt 5.3 i **Datarapporten** för K_c .



Figur 13-34. Förväntad dos med instabilt flöde och kolloidbefrämjad transport. Den blå heldragna kurvan är närområdesutsläppet uttryckt som en årlig effektivdos. Den gröna kurvan är årsdos från fjärrområdet med flödesändringar och kolloidbefrämjad transport. Fallet utan flödesförändringar och utan kolloidbefrämjad transport visas i jämförande syfte (svart kurva).

Resultat för 2 800 realiseringar av det centrala korrosionsfallet visas i figur 13-34. Genom jämförelse med figur 13-33 framgår det att kolloider ökar den genomsnittliga årsdosen med en ringa faktor (< 3) och endast under de senare halvorna av de tempererade perioderna. Under samtliga perioder är den genomsnittliga årsdosen mindre än närområdesutsläppet uttryckt som dos. Att den genomsnittliga årsdosen skulle vara begränsad av närområdesutsläppet uttryckt som dos är inte självklart *a priori* på grund av möjligheten till en kolloidinducerad puls (dvs uppbyggnad av radionuklidmassa i geosfären under perioder med låg mobilitet, vilken sedan frigörs under perioder med hög mobilitet). Resultaten i figur 13-34 visar tydligt att kolloidinducerad puls inte utgör ett problem och att närområdesutsläpp uttryckt som dos kan användas som en övre gräns för den genomsnittliga årsdosen.

13.5.7 Doser till andra organismer än människa för korrosionsscenarioet

Doser till andra organismer än människa för det centrala korrosionsfallet har beräknats i enlighet med metodiken som beskrivs i avsnitt 13.2.5. De totala doshastigheterna i organismer i havsvattens-, sötvattens- och landekosystem i Forsmark presenteras i tabell 13-8 och mer detaljerad presentation av resultaten finns i **Biosfärsrapporten** och /Torudd 2010/. Alla totala doshastigheter ligger långt under den jämförelsedoshastighet ($10 \mu\text{Gy h}^{-1}$) som rekommenderas i ERICA Integrated Approach /Beresford 2007/. Slutsatsen är därför att radionuklidutsläpp som förutsägs för det här fallet inte kommer att leda till några skadliga biologiska effekter på enskilda individer hos arter som återfinns på den tilltänkta förvaringsplatsen. Som diskuterats i avsnitt 13.2.5, antas avsaknaden av skadliga biologiska effekter på individer betyda att även populationer som utgörs av dessa individer är skyddade.

Resultaten kan enkelt appliceras på andra korrosionsfall genom skalning av utsläppen av nukliderna i fråga, vilka som mest ligger omkring en storleksordning högre än nivåerna för det centrala korrosionsfallet. Detta betyder att slutsatsen för det centrala korrosionsfallet gäller även för alla andra korrosionsfall som beaktas i SR-Site.

Tabell 13-8. Beräknade doshastigheter (helkropp) för land-, sjö- och havslevande organismer i Forsmark, baserade på det centrala korrosionsfallet. Resultaten från deterministiska dosberäkningar presenteras tillsammans med 95 percentilen från probabilistiska beräkningar (från /Torudd 2010/).

Referensorganism	Doshastighet ($\mu\text{Gy h}^{-1}$)	
	Deterministiskt	95-percentil
Landmiljö		
Groddjur	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Fågel	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Detritusätande ryggradslöst djur	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Flygande insekt	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Snäcka	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Gräs och örter	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Däggdjur, stort	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Däggdjur, litet	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
Mossor och lavar	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Reptil	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
Buske	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Jordlevande ryggradslöst djur	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Träd	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Sötvatten		
Fågel	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Mussla	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$
Kräftdjur	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Snäcka	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
Insektslarv	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Däggdjur	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Pelagisk fisk	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Växtplankton	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$
Kärlväxt	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Djurplankton	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
Hav		
Bottenlevande fisk	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Bottenlevande blötdjur	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Fågel	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$
Kräftdjur	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Makroalg	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Däggdjur	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Pelagisk fisk	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Växtplankton	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Havsborstmask	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$
Kärlväxt	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
Djurplankton	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$

13.5.8 Alternativa säkerhetsindikatorer för korrosionsscenario

Som nämnts i avsnitt 2.6.3 används fyra alternativa indikatorer för risk i SR-Site: aktivitetsutsläpp från geosfären, radiotoxicitetsflöde från geosfären, koncentrationer av radionuklider i ekosystem och flöden av radionuklider i geosfären. Följande referensvärden används när dessa indikatorer utvärderas:

- De finska aktivitetsbegränsningarna. Dessa begränsningar kan i strikt mening endast tillämpas i sammanhang som berörs av den finska lagstiftningen, men bedöms ändå vara användbara som referensvärden för SR-Site.
- Referensvärdet för radiotoxicitetsflöde från geosfären som framkommit från EU-projektet SPIN.
- Uppmätta koncentrationer av naturligt förekommande radionuklider i ekosystemen vid platsen för Forsmarkförvaret eller andra jämförbara platser.
- Naturligt förekommande flöden av radionuklider på platsen, i synnerhet U-238 och Ra-226.

Aktivitetsutsläpp från geosfären

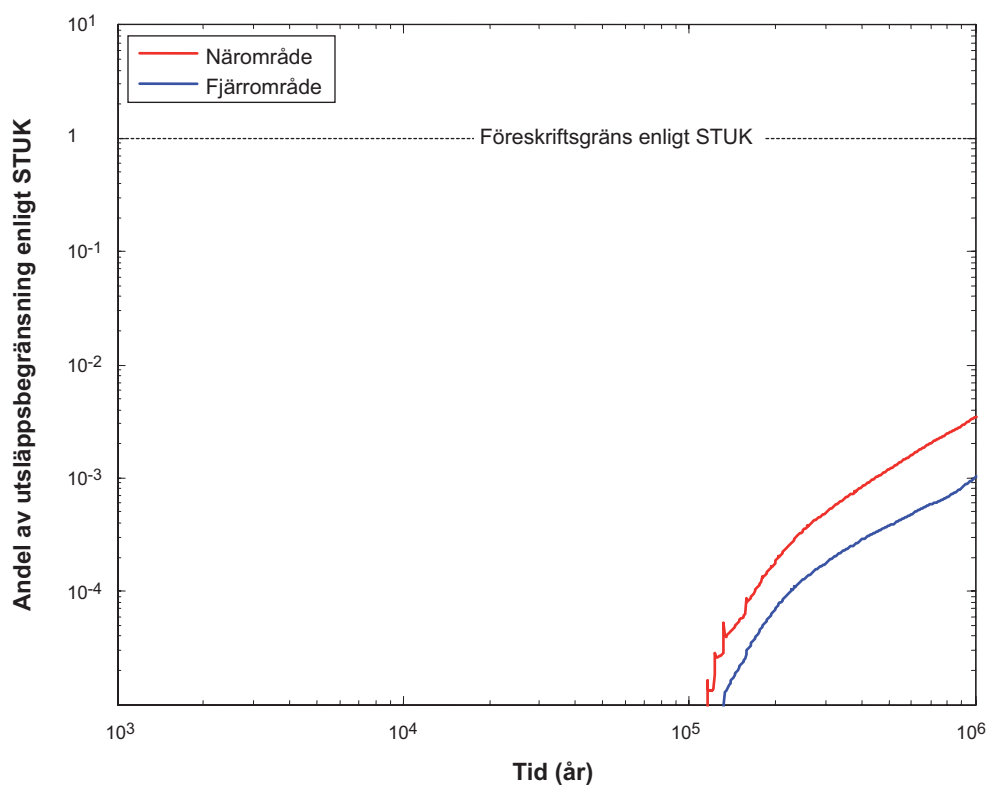
De gränsvärden för aktivitetsutsläpp från geosfären som utfärdats av den finska myndigheten STUK ger ett index som beräknas enligt beskrivningen i avsnitt 2.6.3. Figur 13-35 visar resultat då detta aktivitetsgränsvärde tillämpas för medelutsläpp beräknade för det probabilistiska centrala korrosionsfallet, se **Radionuklidtransportrapporten** för detaljer. Utsläppen från geosfären ligger omkring tre storleksordningar lägre än STUK-gränsvärdet.

Radiotoxicitetsflöde från geosfären

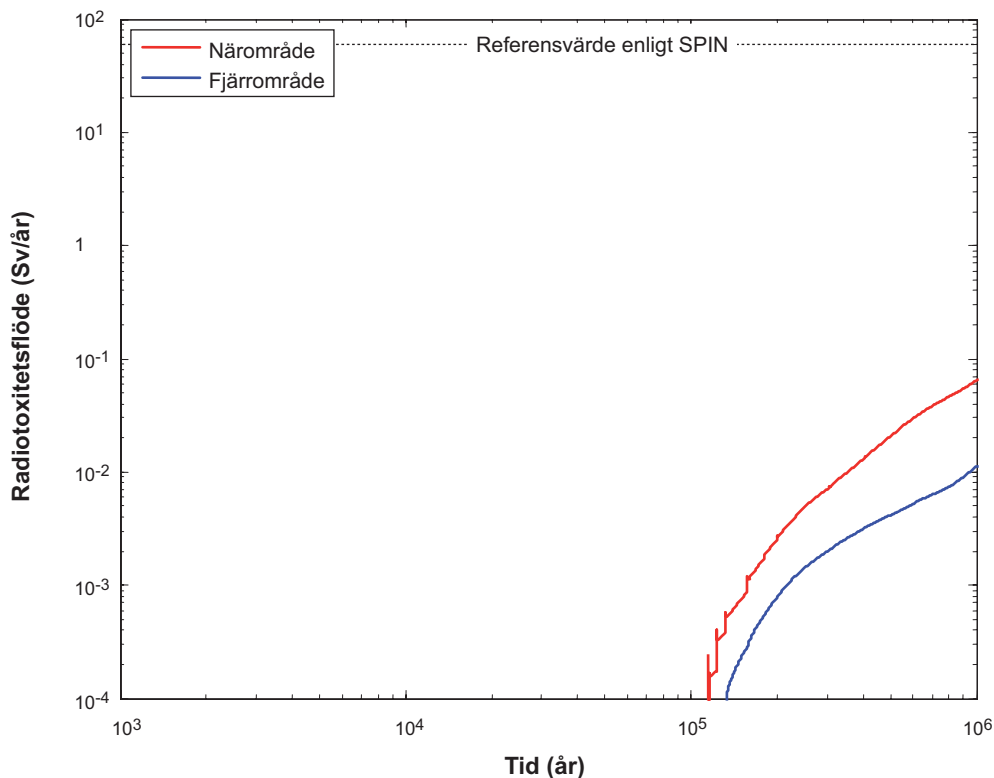
Som nämnts i avsnitt 2.6.3 kan radiotoxicitetsflödet från geosfären användas som en alternativ indikator för senare tidsskeden. I ett EU-projekt /EU 2002/ förslås ett referensvärde på 60 Sv/år för ett typiskt område på 200 km² som hypotetiskt kan användas för jämförelser med beräknade flöden av radionuklider från förvaret.

För det probabilistiska centrala korrosionsfallet räknades medelaktivitetsutsläppet för varje nuklid om till dos med doskoefficienter för födointag, se vidare **Radionuklidtransportrapporten**. Detta gav resultatet som visas i figur 13-36. Det maximala utsläppet från geosfären ligger kring 10⁻² Sv/år, dvs mer än tre storleksordningar under det föreslagna referensvärdet. IRF-pulserna är inte inkluderade i den här beräkningen.

Relevansen av referensvärdet kan diskuteras. Det ses som mer betydelsefullt att för en fullständig hypotetisk situation, där en individ ensam skulle inta alla radionuklider som härrör från förvaret och som släpps ut från geosfären i det centrala korrosionsfallet, blir den maximalt upptagna dosen över en miljon år endast omkring en storleksordning högre än vad som orsaks av normala nivåer för bakgrundsstrålning i Sverige. Observera att resultatet grundas på den probabilistiska beräkningen i det centrala korrosionsfallet, medan en deterministisk beräkning som inte tar hänsyn till sannolikheten på 0,12 för det här fallet skulle ge omkring en storleksordning högre dos.



Figur 13-35. Utsläpp uttryckta som andel av det gränsvärde för aktivitetsutsläpp som antagits av den finska myndigheten.



Figur 13-36. Radiotoxicitetsflöden från närområdet och geosfären för det centrala korrosionsfallet.

Koncentrationer i ekosystem

En annan alternativ indikator är den beräknade koncentrationen av radionuklider i biosfären, som kan jämföras med det naturliga innehållet av radionuklider i jord, sediment, grundvatten och ytvatten. Denna jämförelse görs här för Ra-226, den radionuklid som i störst utsträckning bidrar till dosen. Jämförelsen har utförts för alla isotoper med uppmätta aktivitetskoncentrationer och diskuteras och beskrivs mer ingående i **Biosfärsrapporten**.

I utvärderingen av biosfären beräknas maximala aktivitetskoncentrationer för radionuklider för olika medier i miljön med radionuklidtransportmodellen för biosfären, givet ett konstant enhetsutsläpp per år för varje radionuklid, se avsnitt 13.2.4. Dessa koncentrationsfaktorer (dvs koncentration per Bq/år) multiplicerades här med den maximala aktivitetsutsläppet (Bq/år) från geosfären enligt medelvärdet från det probabilistiska centrala korrosionsfallet för att få maximala aktivitetskoncentrationer i olika medier i miljön. Den maximala koncentrationsfaktorn och det maximala aktivitetsutsläppet var inte tidsmässigt kopplade, vilket gör förhållningssättet försiktigt.

Biosfärsobjekt 136, se figur 13-5, valdes som ett representativt objekt för förvarsplatsen i Forsmark för jämförelsen, eftersom de beräknade aktivitetskoncentrationerna för det här objektet kan jämföras med det naturliga innehållet av Ra-226 i olika medier (jord, sediment, grundvatten, sjövattnen och havsvattnen) som uppmätts i bassängen och dess omgivning som en del av platsundersökningarna. De beräknade aktivitetskoncentrationerna för Ra-226 i olika medier i det här objektet var i samma storleksordning som de högsta beräknade koncentrationerna i alla biosfärsobjekt. Skillnaden var som mest 1,6 gånger lägre i objekt 136 (för sediment). Enligt tabell 13-9 är de beräknade aktivitetskoncentrationerna för Ra-226 från ett utsläpp åtminstone tre storleksordningar lägre än de uppmätta bakgrundsaktivitetskoncentrationerna för alla jämförda medier i miljön.

Tabell 13-9. Jämförelse av beräknad aktivitetskoncentration för Ra-226 i biosfärsobjekt 136 och uppmätta bakgrunds nivåer i Forsmark och Laxemar. N representerar antalet prov.

	Beräknad aktivitetskoncentration	Uppmätt aktivitetskoncentration Forsmark (N)	Uppmätt aktivitetskoncentration Laxemar (N)	Referensplatser
Sjövatten (Bq/l)	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$ (4)		$4,6 \cdot 10^{-4}$ ¹⁾
Havsvatten (Bq/l)	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$ (1)		$1,1 \cdot 10^{-3}$ ¹⁾
Ytnära grundvatten (Bq/l)	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$ (11)	$5,9 \cdot 10^{-2}$ (10)	$4,2 \cdot 10^{-3}$ ²⁾
Sjösediment (Bq/kg TS)	$2,9 \cdot 10^{-3}$	36 (2)	70 (1)	
Havssediment (Bq/kg TS)	$3,5 \cdot 10^{-4}$	8,5 (1)	8,5 (1)	
Övre jordlager (Bq/kg TS)	$2,2 \cdot 10^{-3}$	39 (4)	16 (1)	2–1 000 ³⁾

¹⁾ /Aastrup 1981/

²⁾ /Porcelli et al. 2001/

³⁾ /UNSCEAR 2008/

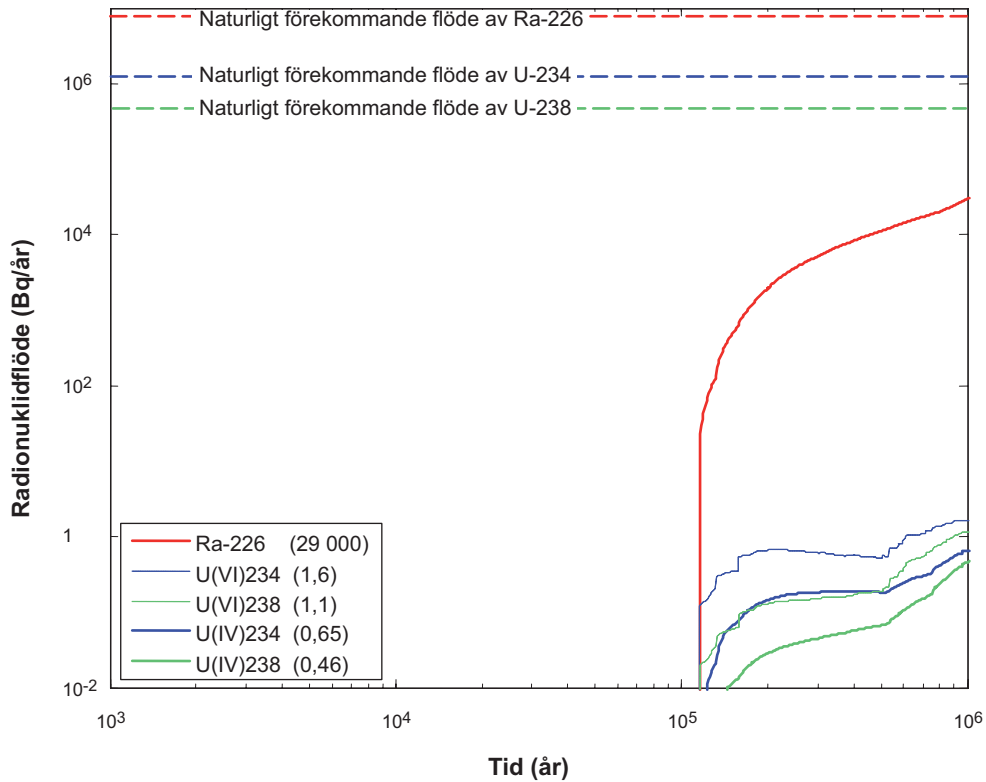
Flöden av radionuklider i geosfären

De naturligt förekommande flödena av U-238, U-234 och Ra-226 uppskattas baserat på i) uppmätta aktiviteter i grundvattnet under platsundersökningarna, ii) en uppskattning av den yta till vilken hypotetiska utsläpp från uppsättningen av deponeringspositioner i förvaret skulle ske för dagens förhållanden och iii) en uppskattning av andelen av grundvattnet som i genomsnitt kommer från förvaringsdjup. Se vidare avsnitt 2.3 i **Radionuklidtransportrapporten**. De resulterande naturliga flödena är $4,7 \cdot 10^5$ Bq/år U-238, $1,2 \cdot 10^6$ Bq/år U-234 och $7,6 \cdot 10^6$ Bq/år Ra-226.

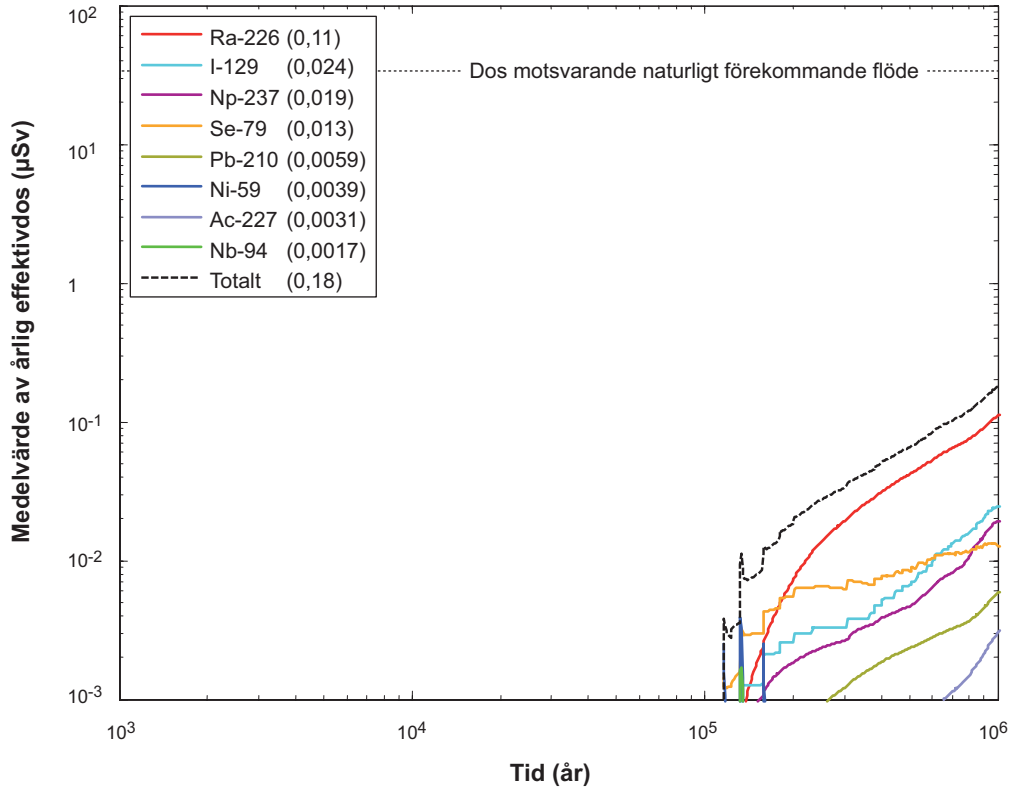
Figur 13-37 visar utsläppshastigheterna från fjärrområdet för U-238, U-234 och Ra-226 för det probabilistiska centrala korrosionsfallet jämfört med de uppskattade naturligt förekommande flödena i Forsmark. Flöde av Ra-226 som kommer från förvaret för det centrala korrosionsfallet ligger omkring två storleksordningar under det naturligt förekommande flödet för Ra-226. För U-isotoperna är flödena från förvaret omkring sex storleksordningar under de naturliga flödena, oberoende av om K_d -fördelningar för U(IV) eller U(VI) i berg används.

Observera att utsläpp från förvaret kan vara koncentrerat till ett eller några få landskapsobjekt i utsläppsområdet. Det finns omkring tio objekt i området som används vid framtagningen av de naturligt förekommande flödena, vilket antyder att de naturliga flödena skulle överskrida de från förvaret, även om allt utsläpp från förvaret skulle ske i ett enda landskapsobjekt.

De naturligt förekommande flödena av U-238, U-234 och Ra-226 har omvandlats till effektivdos med de normala LDF-värdena. Resultatet visas tillsammans med den årliga effektivdosen från fjärrområdet i det centrala korrosionsfallet i figur 13-38. Resultatet liknar det i figur 13-37, eftersom dosen domineras av Ra-226 i det centrala korrosionsfallet.



Figur 13-37. Utsläppshastigheter (Bq/år) från fjärrområdet av U-238, U-234 och Ra-226 i det centrala korrosionsfallet jämfört med de naturligt förekommande flödena i Forsmark.



Figur 13-38. Medelvärde av årlig effektivdos från fjärrområdet i det centrala korrosionsfallet jämfört med de naturligt förekommande flödena av U-238, U-234 och Ra-226 i Forsmark omvandlade till årlig effektivdos med de normala LDF-värdena.

Slutsatser

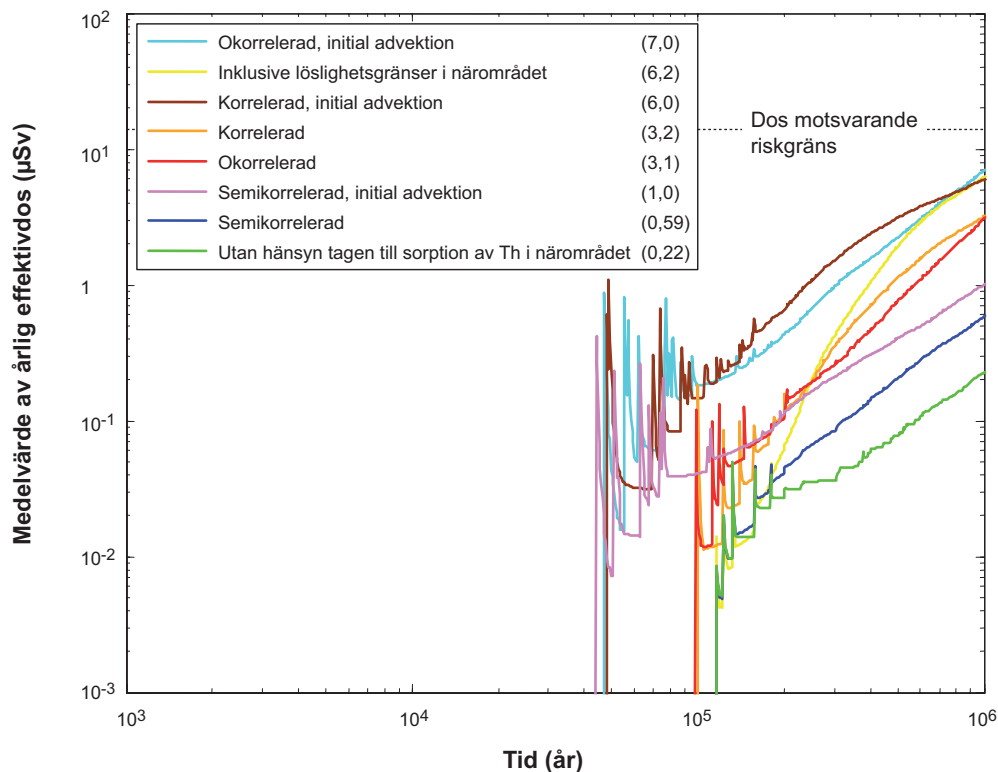
Fyra alternativa indikatorer för risk används i SR-Site, vilket ger följande resultat för det centrala korrosionsfallet:

- Maximala utsläpp av aktivitet från geosfären är omkring tre storleksordningar lägre än de aktivitetsgränsvärden som utfärdats av den finska myndigheten STUK.
- Maximala radiotoxicitetsflödet från geosfären är mer än tre storleksordningar lägre än det referensvärde för radiotoxicitetsflödet från geosfären som föreslagits i EU-projektet SPIN.
- Beräknade maximala koncentrationer i ekosystem i Forsmark från förvarsutsläpp av Ra-226 är omkring tre storleksordningar lägre än uppmätta koncentrationer av naturligt förekommande Ra-226 i Forsmark.
- Maximala flöden i geosfären som orsakas av utsläpp av Ra-226 från förvaret är omkring två storleksordningar lägre än naturligt förekommande flöden av Ra-226 på platsen, som uppskattats från platsdata. Skillnaden är större för U-234 och U-238. Det totala utsläppet för alla nuklider som härrör från förvaret omräknat till dos ligger också omkring två storleksordningar lägre än den summerade dosen från utsläpp av de tre nämnda naturligt förekommande nukliderna.

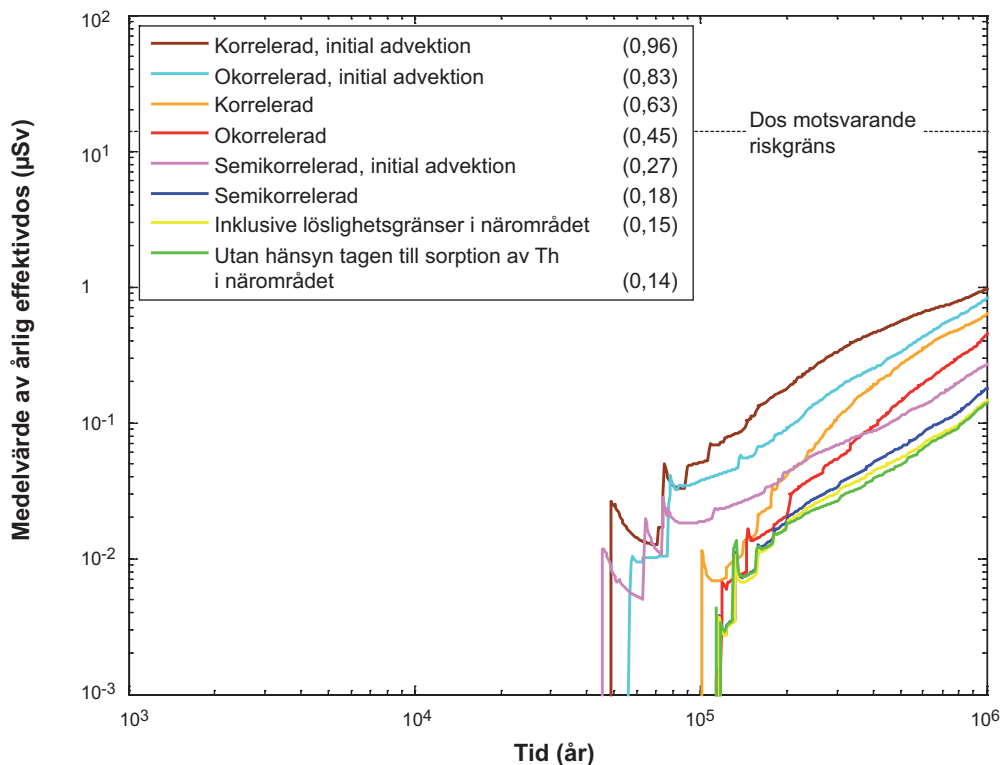
Resultaten kan enkelt tillämpas på andra korrosionsfall, för de flesta indikatorer, genom att helt enkelt skala med utsläppet av Ra-226, vilket som mest ligger omkring en storleksordning högre än för det centrala korrosionsfallet.

13.5.9 Sammanfattning av resultat från beräkningsfall för korrosionsscenario

Figurena 13-39 (närområde) och 13-40 (fjälrområde) sammanfattar de probabilistiska beräkningarna som gjorts med COMP23/FARF31 för korrosionsscenario. Maximala medelårsdoser varierar grovt räknat med högst en storleksordning mellan fallen.



Figur 13-39. Sammanfattning av utsläpp från närområdet uttryckt som genomsnittlig årlig effektivdos för alla probabilistiska beräkningar som utförts med COMP23 för korrosionsscenario.



Figur 13-40. Sammanfattning av genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet för alla probabilistiska beräkningar som utförts med COMP23/FARF31 för korrosionsscenarioet. De maximala doserna anges inom parentes i µSv.

13.5.10 Beräkningar med analytiska modeller

Som nämnts i avsnitt 13.4.4 finns analytiska modeller tillgängliga för att modellera radionuklidtransport i närområdet och fjärrområdet.

De analytiska modellerna har tillämpats på de sex korrosionsvarianterna av korrosionsscenarioet.

Angående tillämpningen av modellerna på korrosionsscenarioet noteras följande, ytterligare förenklande, förhållanden. Närområdesutsläppet bestäms av hastigheten av radionuklidutsläpp till vatten i hålrummet eftersom flödes hastigheten i Q1-sprickan inte utgör en begränsning (kapselbrott till följd av korrosion inträffar endast i deponeringshålen med de högsta flödes hastigheterna). Därför modelleras utsläppshastigheten från närområdet enkelt som bränsleupplösningshastigheten, alternativt som korrosionshastigheten för metalldelarna, i båda fallen multiplicerat med inventariet. Liksom i de numeriska modellerna tas inte IRF-fraktionen med utan hanteras separat.

Utsläppshastigheten från fjärrområdet beräknas i de flesta fall vara utsläppshastigheten från närområdet multiplicerat med en transmissionsfaktor för geosfären /Hedin 2002b/. Detta ger en god approximation i fall med kontinuerligt utsläpp över långa tidsperioder.

I vissa fall med relativt kort varaktighet, för utsläpp orsakade av korrosion av metalldelarna av bränslet, är hanteringen dock överdrivet pessimistisk. I sådana fall beaktas även utsläppet av hela inventariet i metalldelarna, M_0 , som en puls till geosfären. Detta ger en maximal utsläppshastighet från geosfären på M_0/τ där τ hämtas från /SKB 2006a, bilaga B/. Hydrodynamisk och molekylär dispersion i flödes-sprickan försummas pessimistiskt när detta uttryck används. Dessutom försummas radioaktivt sönderfall i uttrycket, eftersom inget sönderfall av betydelse sker under de korta transienta förlopp som är av intresse här.

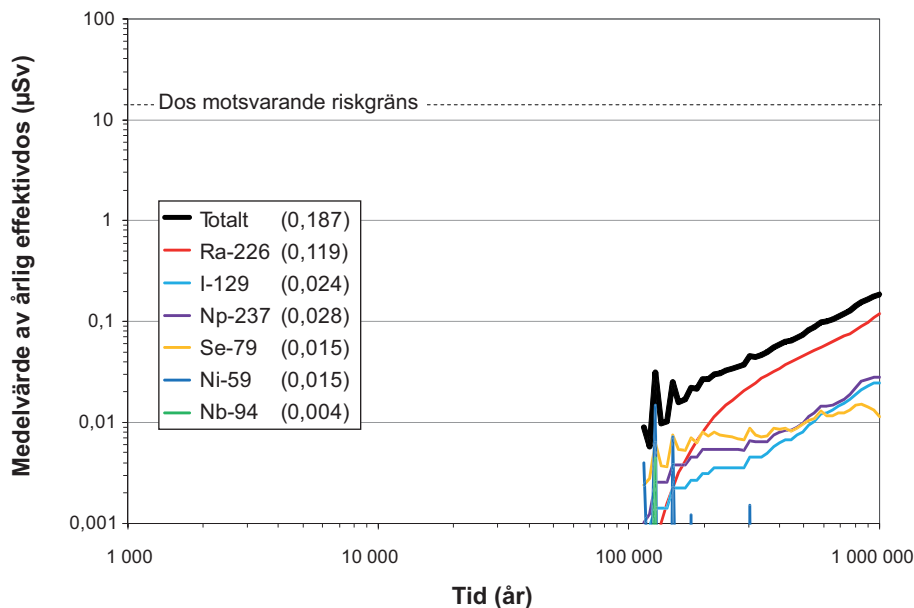
Eftersom båda ovanstående tillvägagångssätten överskattar utsläppshastigheten från fjärrområdet, väljs den lägre av de två i varje realisering.

Ytterligare en anmärkning är att hänsyn inte tas till kedjesönderfallet i geosfären när transmissionsfaktorerna för fördröjning i geosfären används. Teorin för en fullständig analytisk behandling av kedjesönderfall i transmissionsfaktorer har utvecklats, men har ännu inte införts i den analytiska modellen. Med de numeriska modellerna har det visats att kedjesönderfall av modernuklider till Ra-226 i fjärrområdet har en obetydlig påverkan på utsläppen av Ra-226 i korrosionsscenarioet.

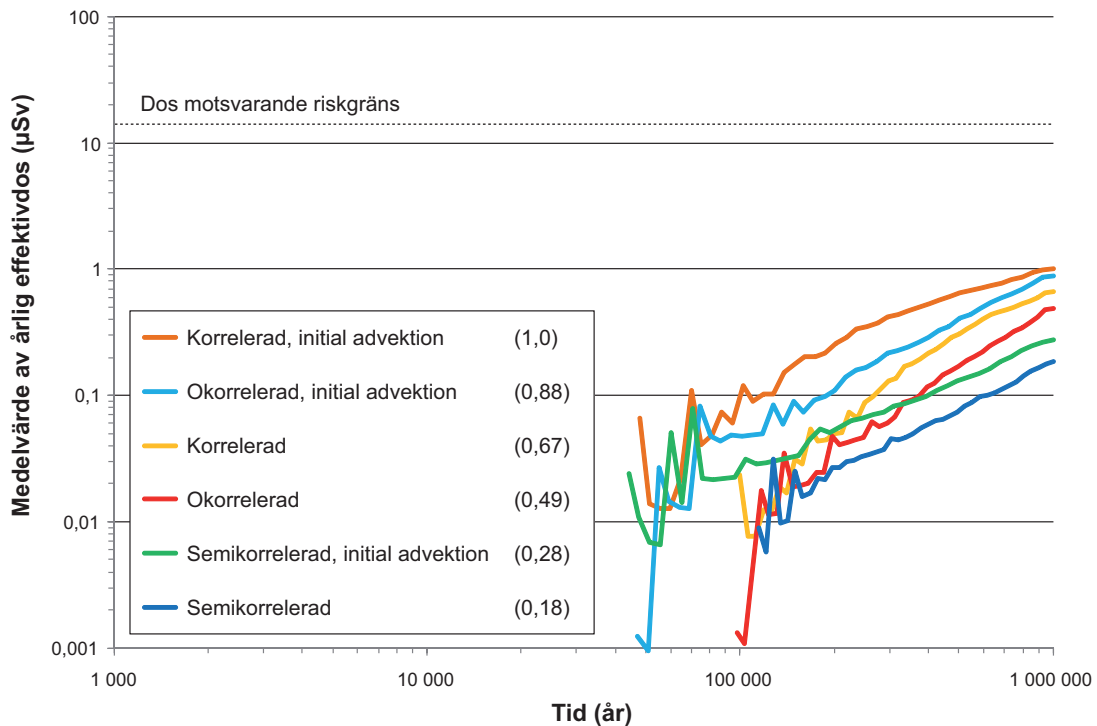
Resultatet av den analytiska modelleringen av det probabilistiska centrala korrosionsfallet visas i figur 13-41. Som framgår genom att jämföra resultaten i figur 13-41 med de för motsvarande numeriska fall i figur 13-18 är överensstämmelsen mellan de maximala doserna mycket god för nuklider som kommer från bränslematrisen, medan doser från nuklider som är inbäddade i metalldelarna (Ni-59 och Nb-94) överskattas något med den analytiska modellen. Detta beror på den pessimistiska modelleringen av nuklider som släpps ut till följd av korrosion av metalldelar, vilket diskuterats tidigare.

Modelleringsresultaten för de sex korrosionsvarianterna visas i figur 13-42. Varje fall modellerades med 20 000 realiseringar med Latin Hypercube sampling. Som framgår genom att jämföra resultaten i figur 13-42 med dem i figur 13-40, som visar årlig effektivdos från fjärrområdet för alla korrosionsfall beräknade med FARF31, är överensstämmelsen god mellan resultat från de två modelluppsättningarna. Alla maximala doser inom en miljon år är, med en avvikelse på mindre än 10 procent, lika stora.

Det faktum att de numeriska beräkningarna stämmer väl överens med de analytiska ökar tilltron till de dosekvivalenta utsläpp som ges här och i **Radionuklidtransportrapporten** av två skäl. För det första ger jämförelsen en kvalitetskontroll av den numeriska modelleringen av dosekvivalenta utsläpp. Denna kontroll gäller inte bara de numeriska beräkningarna utan även överföringen av data/parametrar, eftersom data för de analytiska beräkningarna togs direkt från **Datarapporten** oberoende av de numeriska beräkningarna. För det andra visar den att de dosekvivalenta utsläppen för korrosionsfallen styrs av relativt enkla processer som är lätta att förstå och modellera.



Figur 13-41. Genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet för det centrala korrosionsfallet erhållen med analytiska modeller. Teckenförklaringen är ordnad efter fallande maximal genomsnittlig årlig effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-42. Sammanfattning av genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet för probabilistiska analytiska beräkningar för de sex korrosionsvarianterna av korrosionsscenarioet. De maximala doserna anges inom parentes i µSv. Dessa resultat kan jämföras med motsvarande resultat erhållna med numeriska modeller i figur 13-40.

13.5.11 Känslighetsanalyser

Inledning

I det här avsnittet presenteras känslighetsanalyser för resultaten av dosberäkningarna, dvs känsligheten hos osäkerheten i beräknad dos för osäkerheter i de ingående parametrarna analyseras. Alla analyser gäller den probabilistiska beräkningen för det centrala korrosionsfallet, se avsnitt 13.5.4.

Det är intressant att fastställa i) de variabler som korrelerar med dosen över hela dosintervallet och ii) de parametervärden som är relaterade till höga och låga doser. Bidraget från Ra-226 dominerar dosen i de flesta av realiseringarna i det centrala korrosionsfallet och det är därför speciellt intressant att klargöra känsligheterna för Ra-226-dosen av de ingående parametrarna.

Global känslighetsanalys

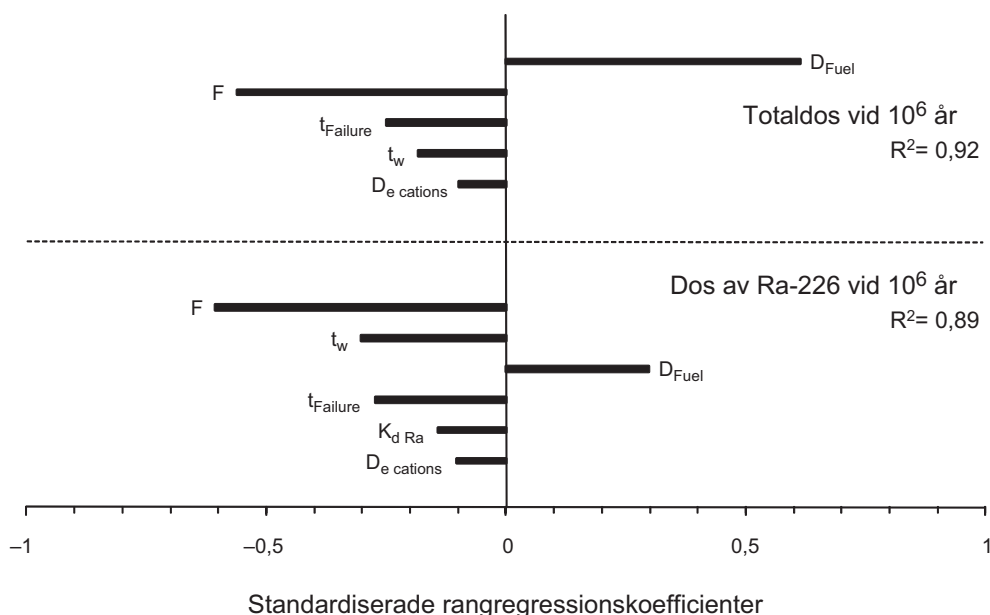
Det första syftet är därför att genomföra en så kallad global känslighetsanalys, dvs att identifiera de ingående parametrar som har störst påverkan på spridningen av resultaten. Bidraget till spridningen i resultatet beror både på spridningen hos de ingående parametrarna och på modellens känslighet för variationer hos den specifika inparametern. Det finns ett flertal metoder för den här typen av känslighetsanalys /Saltelli et al. 2000/. Flera studier och granskningar har visat att standardiserad rangregression är en lämplig metod för känslighetsanalys av ickelinjära system där beräkningens slutpunkt är en monoton funktion av de ingående variablerna /Saltelli et al. 1993, Helton 1993, Hamby 1994, Iman och Conover 1979/. Detta gäller även för det aktuella ickelinjära och monotona systemet /Hedin 2003/. Den standardiserade rangregressionskoefficienten (Standardised Rank Regression Coefficient, SRRC) används därför för att identifiera de mest betydelsefulla variablerna som bidrar till dososäkerhet.

En standardiserad rangregressionsanalys av den totala dosen vid 10^6 år på de ingående variablerna ger, i fallande betydelseordning, bränsleupplösningshastigheten D_{Fuel} , det flödesrelaterade transportmotståndet i geosfären, F , och tiden för kapselbrott $t_{Failure}$ som de ingående parametrar som i störst utsträckning påverkar dosresultaten, se figur 13-43. Regressionsanalys av dos från Ra-226 vid 10^6 år ger ett liknande resultat på grund av det dominerande bidraget från Ra-226. Rangordningen mellan de två mest betydelsefulla variablerna har kastats om, och detta är konsistent med det faktum att bränsleupplösningshastigheten, D_{Fuel} , påverkar alla nuklider medan F-parametern endast påverkar sorberande nuklider, och därför är jämförelsevis mer betydelsefull för dosen från Ra-226 än för den totala dos som i en del av realiseringarna domineras av den icke-sorberande I-129. Observera även att de tre variablerna F , t_w och $t_{Failure}$ är korrelerade, vilket innebär att deras betydelse inte nödvändigtvis är lika hög som SRRC-metoden antyder. Detta undersöktes ytterligare med en anpassad regressionsmodell enligt beskrivning nedan. Standardiserad rangregressionsanalys på maximal total dos över tid ger ett i det närmaste identiskt resultat som regression på total dos vid en miljon år (visas inte i figuren). Vid regression på exempelvis det maximala dosekvivalenta utsläppet för Ni-59 från närområdet (visas inte i figuren) identifieras även korrosionshastigheten, CCR , som en känslig ingående variabel. Detta överensstämmer med det faktum att i en del realiseringar av det centrala korrosionsfallet infaller den maximala dosen för Ni-59 kort efter kapselbrottet och förorsakas av de utsläpp som sammanfaller med korrosionen av metalldelarna av bränslet.

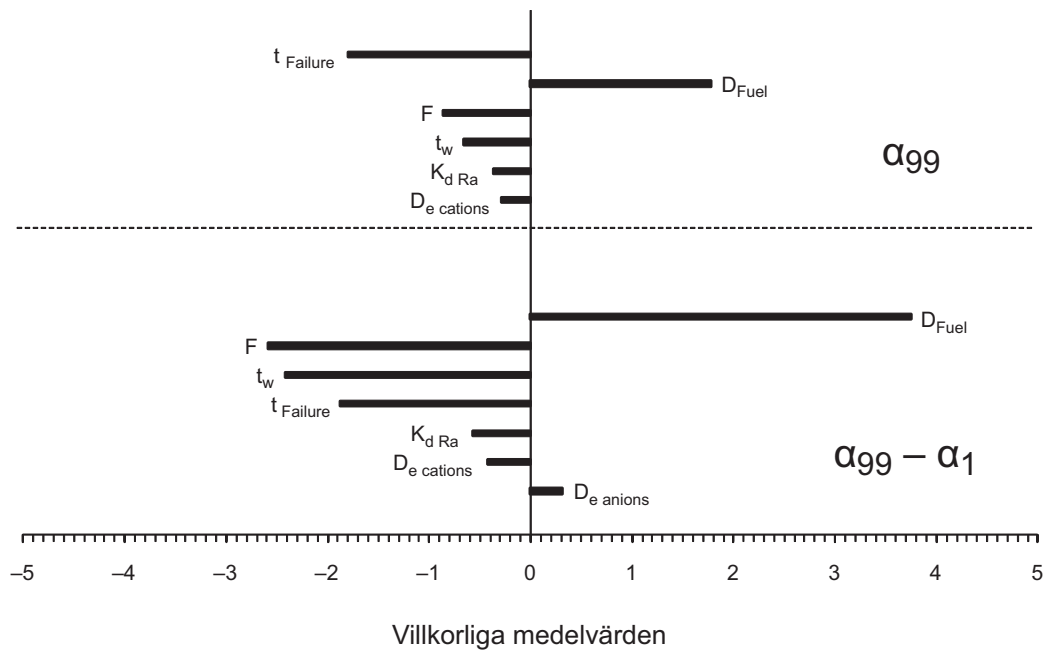
Primära bidrag till risk

Den standardiserade rangregressionsanalysen identifierar de variabler som samvarierar med den beroende variabeln, totaldosen, över hela dosintervallet. För att fastställa vilka variabler som är kopplade till de högsta doserna utfördes en villkorlig medelvärdesanalys /Hedin 2002a/. Här väljs de undergrupper av parametervärden som är relaterade till den övre percentilen av dosen. För varje sådan undergrupp fastställdes medelvärdet av de logaritmiskt transformerade datavärdena för varje parameter och jämfördes med motsvarande medelvärde för hela indatafördelningen. Ett dimensionslöst, normaliserat mått, α_{99} , erhålls genom att dividera skillnaden mellan de två medelvärdena med standardavvikelsen för hela fördelningen.

Det på så sätt fastställda villkorliga medelvärdet identifierar variabler som antar signifikant olika värden i realiseringarna för den övre percentilen jämfört med hela dosfördelningen. I fallande ordning identifierades parametrarna $t_{Failure}$, D_{Fuel} , F och t_w som mest betydelsefulla, se figur 13-44. Likaledes fastställdes α_1 -värden kopplade till den lägsta percentilen av dosfördelningen. Även värden för $\alpha_{99}-\alpha_1$ fastställdes för att särskilja extrema utfall från övriga. De högsta rankningsvariablerna var i det fallet, i fallande betydelseordning, D_{Fuel} , F , t_w (som är starkt korrelerad till F), och $t_{Failure}$.



Figur 13-43. Resultat för standardiserad rangregression. Regressionsanalys av total dos vid 10^6 år och av Ra-226-dos vid 10^6 år ger liknande resultat på grund av det dominerande bidraget från Ra-226.



Figur 13-44. Villkorliga medelvärden.

Anpassad regressionsmodell

Förståelsen och den matematiska beskrivningen av transportmodellerna som används i dosberäkningarna kan utnyttjas för att förklara resultaten mer utförligt. Utsläppshastigheten för Ra-226 bestäms av den mängd av dess modernuklid, Th-230, som frigörs från bränslematrisen och som därefter antas sorberas i närområdet. Den mängden är proportionell mot produkten av bränsleupplösningshastigheten, D_{Fuel} , och den tid, t , som förflutit mellan kapselbrottet och tidpunkten då dosen beräknas, dvs den är proportionell mot $D_{Fuel} \cdot t$. I det studerade fallet är $t = 10^6 - t_{Failure}$. Vidare kan det visas att utsläppt Ra-226 transporteras genom geosfären med en särskild transmissions-effektivitet, θ , som i sitt fullständiga uttryck på ett komplext sätt beror på alla de osäkra parametrar som är kopplade till transport i geosfären, se exempelvis /Hedin 2002b/. Det kan även visas att den övervägande delen av variationen för θ , beskrivs av det enklare uttrycket /Hedin 2003/:

$$\theta \propto \exp\left(-cF^{0.5} (K_d D_e)^{0.25}\right)$$

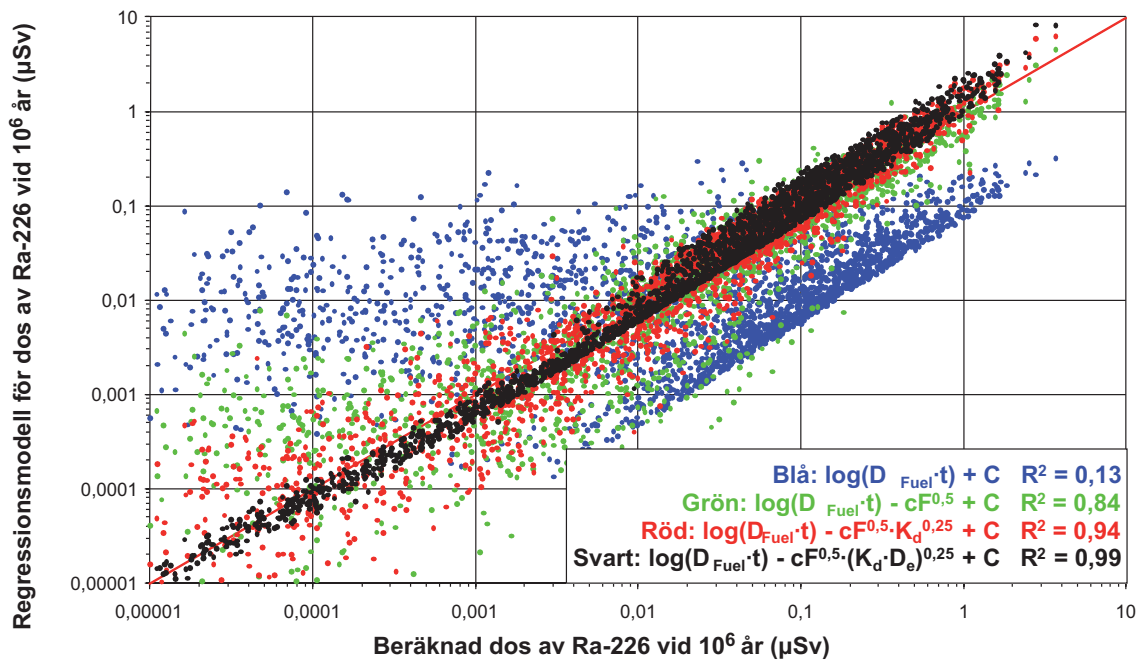
där c är en positiv konstant som bestäms baserat på väl kända egenskaper som bergets densitet och halveringstiden för Ra-226. Detta indikerar att Ra-226-dosen varierar enligt

$$\log(\text{DoseRa226}) = \text{Constant} + \log(D_{Fuel}t) - cF^{0.5} (K_d D_e)^{0.25}$$

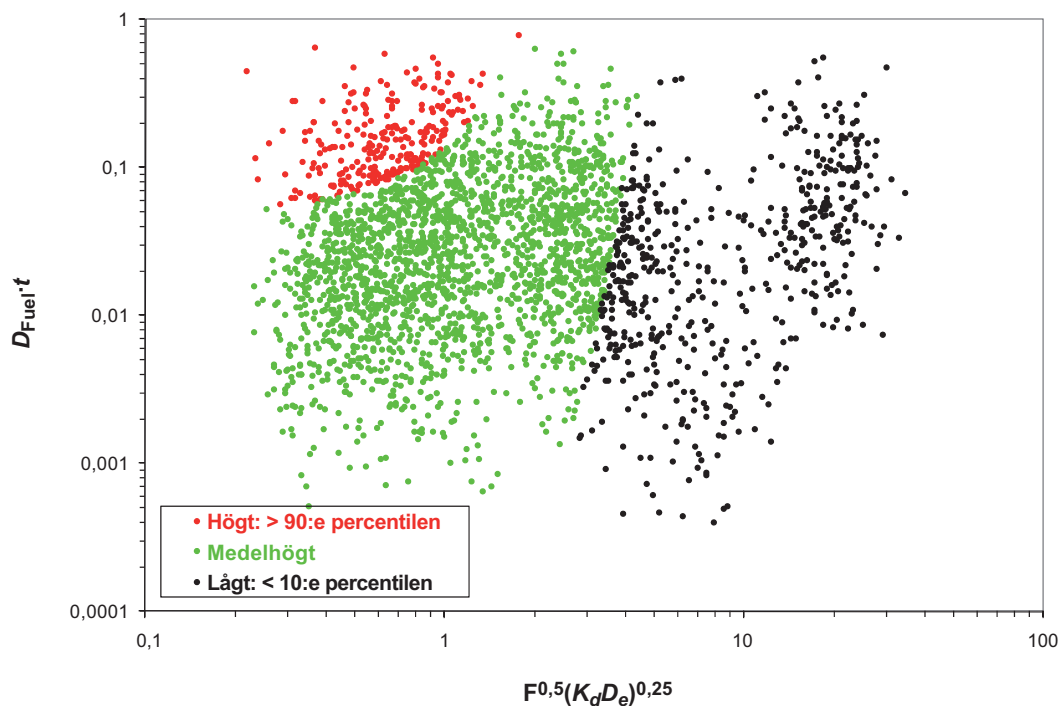
och att en anpassad regressionsmodell i enlighet med ovanstående uttryck kan förklara de beräknade resultaten. Figur 13-45 visar hur en sådan regressionsmodell kan förutsäga de beräknade resultaten när fler termer stegvis inkluderas i modellen. Som framgår av figuren är överensstämmelsen när alla termer inkluderas god, med ett R^2 -värde på 0,99.

Dessa uttryck avslöjar även betydelsefulla kombinationer av ingående variabler. Uppenbarligen främjar kombinationer av höga D_{Fuel} - och t -värden och kombinationer av låga värden för de tre faktorerna i exponenten i det första uttrycket höga doser. Detta resultat åskådliggör även att variabeln t_w , som identifierats som betydelsefull för Ra-226-dosen med SRRC-metoden ovan, inte behövs för att beskriva Ra-226-dosen. Slutsatsen är att t_w identifieras i SRRC-metoden endast på grund av att den är korrelerad med F -parametern. (Detta kan analyseras vidare med partiella rangkorrelationer i SRRC-metoden.)

Grafen i figur 13-46, visar hur höga och låga dosresultat kopplar till variabelgrupperna $D \cdot t$ och $F^{0.5} (K_d D_e)^{0.25}$, vilket verifierar att man får en god förklaringsgrad med dessa variabelgrupper.



Figur 13-45. Fyra anpassade regressionsmodeller, omfattande stegvis ökande antal termer, för Ra-226-dosen vid en miljon år.



Figur 13-46. Graf som visar hur de två grupperna av variabler på axlarna är kopplade till höga och låga dosresultat för Ra-226.

Slutsatser

Ovanstående analyser visar att det är möjligt att identifiera de osäkra inparametrar för vilka det probabilistiska resultatet är mest känsligt med jämförelsevis enkla metoder. Detta beror till viss del på konceptualiseringen av beräkningsfallen i korrosionsscenarioet, där bufferten utelämnas och närområdesutsläppet i huvudsak endast bestäms av bränsleupplösningshastigheten.

Bränsleupplösningshastigheten, D_{fuel} , och det flödesrelaterade transportmotståndet i geosfären, F , framstår generellt som de osäkra inparametrar för vilka resultatet är mest känsligt. Osäkerheten i korrosivt inducerad utsläppshastighet, CRR , har en betydande påverkan på resultatet för närområdesutsläpp omedelbart efter kapselbrott för nuklider som frigörs genom metallkorrosion.

Observera även att ett flertal olika antaganden om transportförhållanden analyserades i avsnitt 13.5.6, med resultatet att känsligheten för dessa antaganden är låg, se figurerna 13-39 och 13-40. Liknande resultat förväntas för alla korrosionsvarianter eftersom de endast skiljer sig från det centrala korrosionsfallet genom något förändrade indatafördelningar för genombrottsiderna och de hydrogeologiska transportparametrarna.

Slutligen noteras att tider och positioner för kapselskador i korrosionsscenarioet bestäms av fördelningen av advektivt flöde vid deponeringspositionerna och fördelningen av sulfidkoncentrationer. Som konstaterades i avsnitt 12.6.2 är det bara kombinationer av de högsta flödena och de högsta sulfidkoncentrationerna som kan leda till kapselskador.

13.6 Kapselbrott till följd av skjuvlast

13.6.1 Konceptualisering av transportförhållanden

Sannolikheten för kapselbrott till följd av skjuvrörelser i berget visades vara låg i referensutvecklingen. Den enda identifierade orsaken till denna typ av brott är vid stora jordskalv i närheten av förvaret, se även avsnitt 10.4.5.

Pessimistiska uppskattningar av omfattningen av denna typ av kapselbrott i avsnitt 10.4.5 indikerar att sannolikheten för att en av de 6 000 kapslarna har fått ett kapselbrott i slutet av den en miljon år långa analysperioden är 0,079. Kapselbrottsfrekvensen som funktion av tid anges också i avsnitt 10.4.5, se figur 10-124, och den används i den probabilistiska analysen av kapselbrott till följd av skjuvlast, hädanefter kortfattat benämnt skjuvlastscenariot.

Ett beräkningsfall formuleras som delvis baseras på de analyser som utförts i avsnitt 10.4.5. Följande data och antaganden används:

- I de påverkade deponeringshålen antas skjuvningen vara så stor att den orsakar ett massivt kapselbrott. En fördröjning med 100 år från kapselbrott till initiering av radionuklidtransport antas utifrån en pessimistisk uppskattning av den tid som krävs för att fylla kapseln med vatten, se även **Datarapporten**. Därefter tas ingen hänsyn till begränsande transportmotstånd i kapseln.
- Skjuvrörelsen kommer inte att påverka bufferten i sådan grad att dess skydd mot advektivt flöde försämras, men den effektiva mängden buffert mellan kapseln och skjuvsprickan antas minska från 35 cm till 25 cm. I avsnitt 10.4.5 görs ett försiktigt antagande att kapselbrott sker för skjuvrörelser som överskrider 5 cm i sprickor som skär deponeringshål. Minskningen i bufferttjocklek med 10 cm har valts så att det stämmer överens med detta kriterium.
- Kapselbrottets position antas vara densamma som skjuvsprickans position. Dessutom antas skjuvningen öka sprickornas transmissivitet avsevärt. Q_{eq} -värdet för den skärande sprickan antas därför vara så högt ($1 \text{ m}^3/\text{år}$) att det inte bidrar till transportmotståndet i närområdet. Inte heller antas det finnas transportmotstånd relaterat till den geometriska avgränsningen av sprickans skärning med bufferten, vilket betyder att flödet genom bufferten är det som erhålls när koncentrationen av radionuklider utanför bufferten är noll.
- Det är sannolikt att skjuvsprickan kommer att vara bland de större i det modellerade spricknätverket och dess egenskaper efter skjuvning är svåra att bedöma. Därför tas ingen hänsyn till radionuklidens retention i geosfären.
- Löslighetsgränser införs eftersom bufferten finns kvar i sitt ursprungliga läge i skjuvlastscenariot, vilket inte är fallet i korrosionsscenarioet.

Alla andra data och antaganden hanteras probabilistiskt, med data från **Datarapporten**. Detta gäller radionuklidinventariet, bränsleupplösningshastigheten, korrosionshastigheten för metaller, samt sorptions- och diffusionsdata för bufferten.

13.6.2 Konsekvensberäkningar

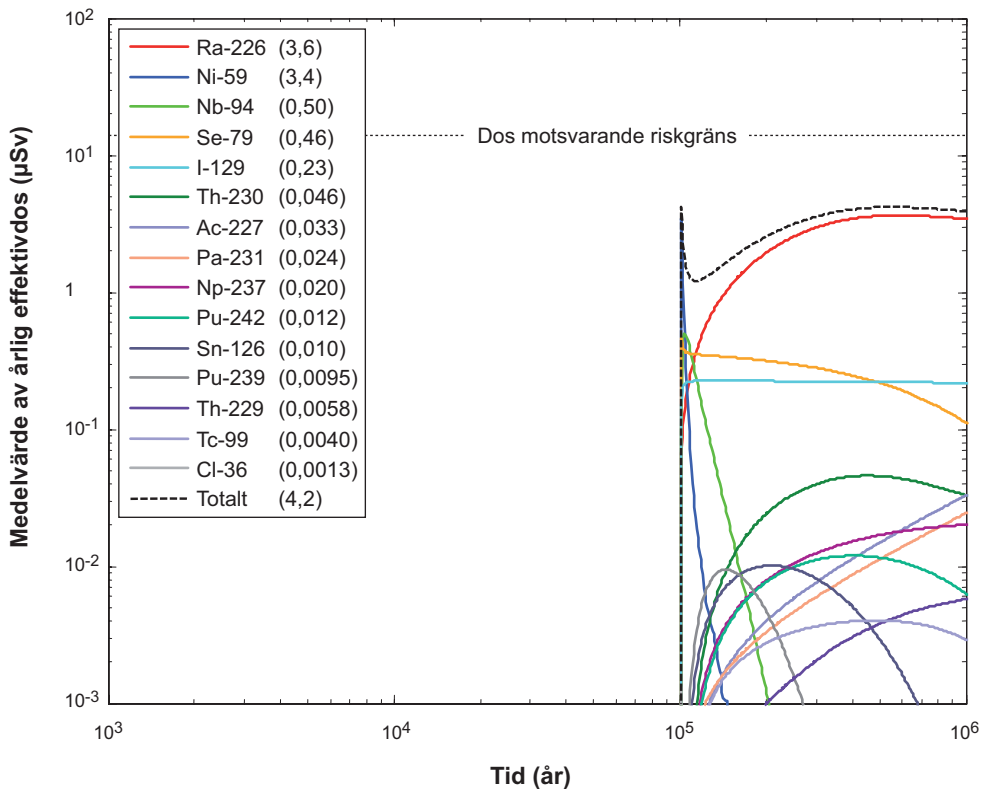
Postulerat kapselbrott vid 100 000 år efter förslutning

Figur 13-47 visar resultatet av en beräkning där det postuleras att ett kapselbrott sker efter 100 000 år. Liksom i korrosionsscenarioet inkluderas inte utsläppet av omedelbart frigjord fraktion, IRF, här. Observera att det dosekvivalenta utsläppet från närområdet och dosen från fjärrområdet är lika höga, eftersom det förutsätts att retention inte sker i fjärrområdet. Totaldosen domineras av Ra-226 som transporteras effektivt genom bufferten. Lösligheten för Ra-226 har en mycket begränsad inverkan på resultatet. Den ringa minskningen av dosen från Ra-226 i slutet av beräkningsperioden beror på minskningen av U-234-inventariet i bränslematrisen.

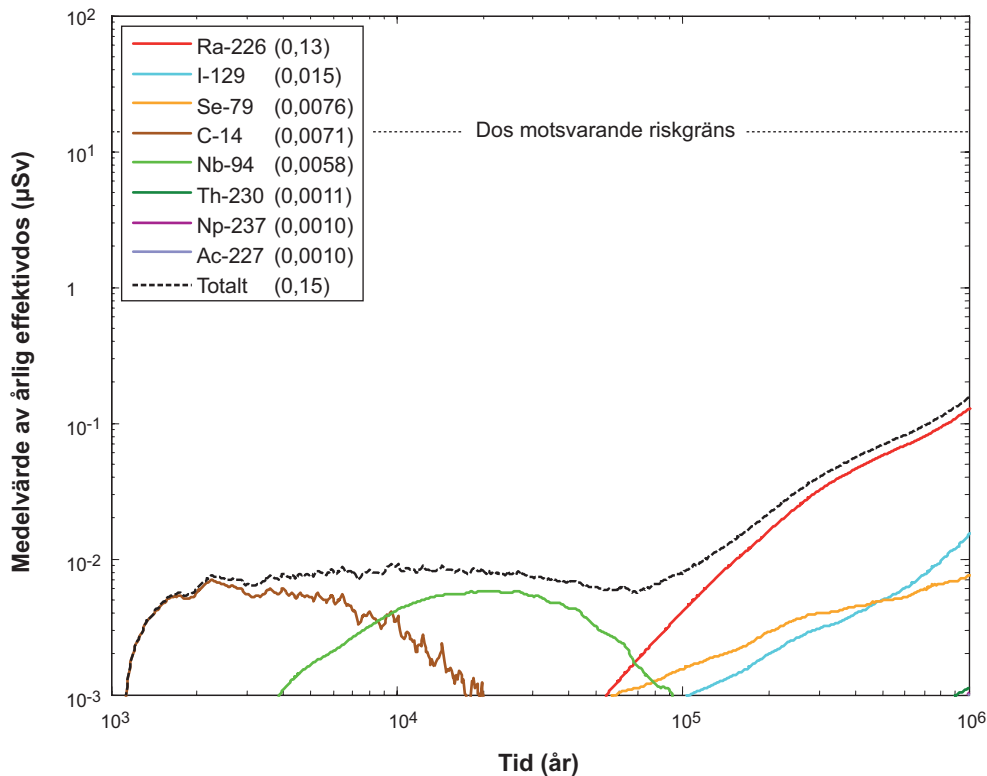
Fördelning av kapselbrott under perioden mellan tusen och en miljon år

Figur 13-48 visar resultatet av en probabilistisk beräkning av kapselbrott till följd av skjuvning för perioden mellan 1 000 och en miljon år och där den ovan nämnda frekvensen av kapselbrott till följd av skjuvlast från referensutveckling används. Doserna domineras av utsläpp av Ra-226 efter omkring 100 000 år. Före det dominerar utsläpp av Nb-94 och C-14. Av figuren framgår att den maximala årsdosen på 0,15 μSv , som infaller vid en miljon år, är omkring två storleksordningar lägre än den dos som motsvarar föreskrifternas riskgräns på 14 μSv .

På grund av den förväntade höga ekvivalenta flöde hastigheten Q1 i gränsytan mellan buffert och berg är den utåtgående transporkapaciteten för radionuklider från närområdet i allmänhet tillräckligt hög för att löslighetsgränser ska sakna betydelse. För att åskådliggöra detta beräknades ett probabilistiskt fall där medfällning av Ra/Ba inte beaktades, dvs där lösligheten av Ra ökade med en faktor 1 000. Detta ledde till att utsläppshastigheten för Ra endast ökade med ungefär en faktor 1,5, se även **Radionuklidtransportrapporten**.



Figur 13-47. Årlig effektivdos från fjärrområdet för en probabilistisk beräkning, där ett kapselbrott till följd av skjuvning postuleras inträffa efter 100 000 år.



Figur 13-48. Probabilistiskt beräknade konsekvenser av skjuvbrott för perioden mellan tusen år och en miljon år. Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdoser under en miljon år (anges inom parentes i µSv).

Fördelning av kapselbrott fram till tusen år

För tider kortare än tusen år efter förslutning bedöms jordskalvsfrekvensen vara lägre, med en sannolikhet på $2,4 \cdot 10^{-5}$ för att en kapsel av de 6 000 kapslarna ska ha blivit otät i slutet av den inledande tusenårsperioden, se även avsnitt 10.4.5. Dessutom leder användningen av LDF-värden till en överskattning av doserna i detta tidsperspektiv, eftersom i) LDF-värdet är en pessimistisk övre gräns för utsläpp som sker kontinuerligt under en hel interglacial period med hänsyn tagen till ackumulering, medan däremot en stor del av den interglaciala perioden redan har förflutit utan några utsläpp när förvaret försluts och ii) det inte är meningsfullt att använda LDF-konceptet för en radionuklid som sönderfaller till en obetydlig nivå under en interglacial period, eftersom konceptet är baserat på kontinuerliga konstanta utsläpp under perioden.

Därför gjordes en mer detaljerad beräkning av skjuvinducerade kapselbrott för de inledande tusen åren. I den här beräkningen bestämdes utsläpp från närområdet precis som i alla andra fall och dessutom inkluderades de omedelbart frigjorda fraktionerna (IRF). Eftersom det inte tas någon hänsyn till retention i geosfären i skjuvsenariot används närområdesutsläppen direkt som indata i biosfärsmodelleringen. Eftersom det inte är möjligt att bestämma en utsläppspunkt bland de identifierade möjliga landskapsobjekten tillförs medelutsläppet för alla realiseringar som funktion av tid till varje objekt, och den tidsberoende utvecklingen av radionuklidtransport och dos i landskapet beräknas för varje objekt. Det objekt som ger den högsta dosen bestämdes sedan för varje tidpunkt och för varje radionuklid. Denna definieras pessimistiskt som den beräknade doskonsekvensen i händelse av ett skjuvbrott under de inledande tusen åren. En brunn inkluderades i varje landskapsobjekt på samma sätt som för LDF-beräkningarna. Modelleringen av kapselbrott och av konsekvenser i form av utsläpp och doser utförs fram till 10 000 år för att underlätta jämförelsen med de LDF-resultat som redovisats ovan för den en miljon år långa tidsperioden.

Den maximala dosen är nästan fyra storleksordningar lägre än den som motsvarar föreskrifternas riskgräns, se figur 13-49. Under de inledande tusen åren dominerar utsläpp av Sr-90, Cs-137 och C-14. (Lägg märke till den utökade dosskalan, som krävs eftersom de flesta doskurvorna ligger under den skala som används för övriga figurer). Kurvformen för C-14 beror på utsläppsdynamiken och den tidsmässiga utvecklingen av landskapet, i synnerhet övergångarna från hav till sjö som inträffar vid olika tidpunkter för olika biosfärsobjekt. Modelleringen av doskonsekvenserna i de två tidsskedena jämförs i figur 13-50.

Liksom för korrosionsscenarioet utgör de beräknade konsekvenserna av skjuvlaster scenariot ett bidrag till de beräknade risker som är förenade med utsläpp från förvaret. Detta behandlas utförligare i avsnitt 13.9.

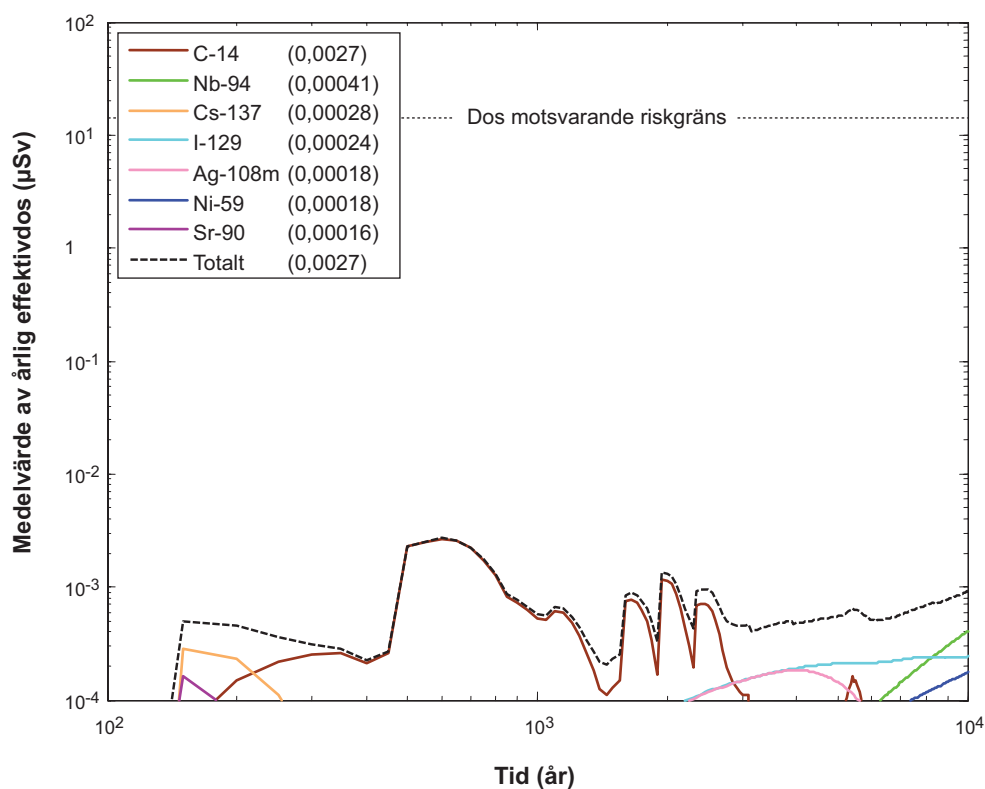
Riskutspädning

Riskutspädning för skjuvlaster scenariot behöver övervägas, eftersom kapselbrott sker vid probabilistiskt framräknade tidpunkter.

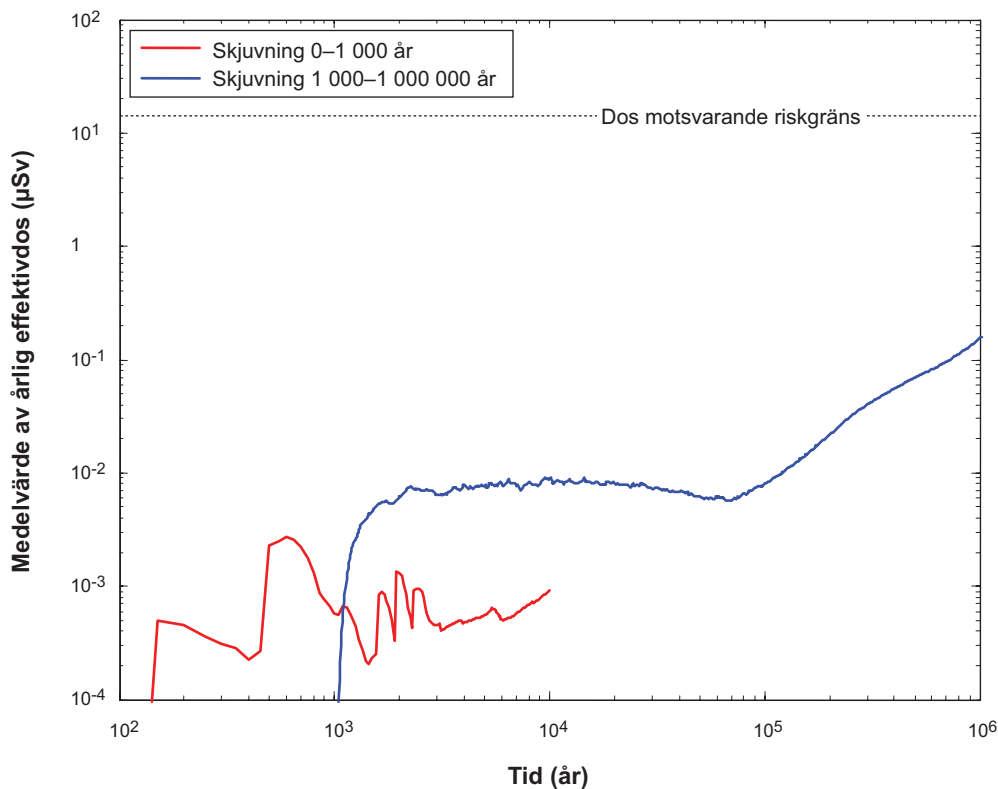
En illustration erhålls genom att jämföra resultaten i figur 13-47 (deterministisk postulerad tid för kapselbrott) med dem i figur 13-48 (fördelning av tider för kapselbrott). Om resultatet i figur 13-47 multipliceras med den totala sannolikheten för att händelsen inträffar under analysperioden, dvs 0,079, så är dosen vid en miljon år (0,28 μSv) ungefär lika hög som den som erhålls vid en miljon år i figur 13-48 (0,15 μSv).

Det beror på att konsekvenserna bestäms i) av inväxt av Ra-226 och ii) av uppbyggnaden av Th-230 som frigjorts från bränslet och fällts ut i kapselns inre eller sorberats i bufferten, och därmed i allmänhet förekommer långt efter tiden för kapselbrott. Inväxten av Ra-226 styrs väsentligen av uppbyggnaden av dess modernuklid Th-230, som sker under en tidsskala som kan jämföras med halveringstiden för Th-230 som är omkring 75 000 år. Uppbyggnaden av Th-230 sker under en tidsperiod som bestäms av bränsleupplösningshastigheten som är i storleksordningen en miljon år.

Riskutspädning, inklusive hanteringen av pulsutsläppen, redovisas mer utförligt i avsnitt 13.9.4.



Figur 13-49. Probabilistiskt framräknade konsekvenser av skjuvbrott som inträffar under tidsperioden upp till 10 000 år.



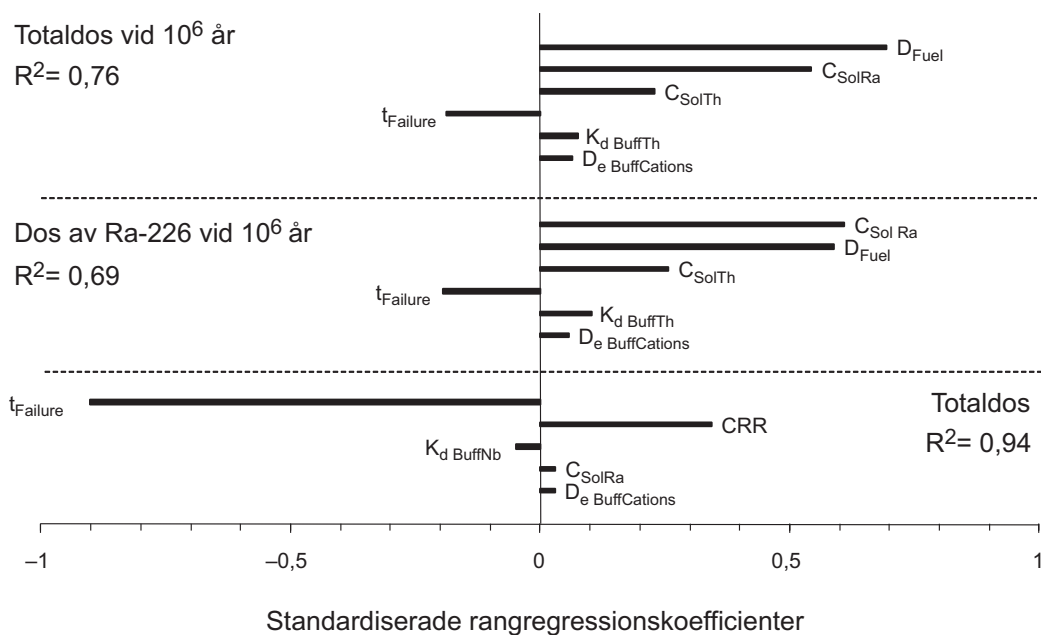
Figur 13-50. En jämförelse av genomsnittliga årliga effektivdoser för tidiga skjuvlastbrott som modelleras transient i biosfären och för kapselbrott under tidsskedet 10^3 – 10^6 år som modelleras med LDF-värden.

Global känslighetsanalys

En global känslighetsanalys av resultaten från det probabilistiska skjuvlastfallet med SRRC-metoden, liksom för centrala korrosionsfallet, ger resultat enligt figur 13-51.

Regressionsanalys av totala dosen vid 10^6 år som funktion av de ingående variablerna visar att, i fallande betydelseordning, bränsleupplösningshastigheten D_{Fuel} , lösligheterna för radium och torium samt tiden för kapselbrott $t_{Failure}$ är de ingående parametrar som har störst inverkan på dosresultatet. Regressionsanalys av dosen från Ra-226 vid 10^6 år ger ett liknande resultat på grund av det dominerande bidraget från Ra-226. Orsaken till den betydande påverkan från lösligheten hos torium är sönderfallet av Th-230 till Ra-226 i bufferten, där utsläppet av Th-230 till bufferten styrs av toriums löslighet. En ytterligare granskning av enskilda realiseringar visar att betydelsen av den begränsade lösligheten generellt sett beror på att det finns ett relativt begränsat antal realiseringar med låga lösligheter, medan den totala dosen domineras av det större antalet realiseringar med lösligheter som är tillräckligt höga för att utsläppet inte ska begränsas. Lösligheter för varken Th eller Ra, där hänsyn tas till samfällning med Ba, begränsar således den genomsnittliga utsläppshastigheten för Ra-226 påtagligt. Slutsatsen stöds av det faktum att man i fallet med utelämnad buffert, där varken sorption i bufferten eller löslighetsgränser är inkluderade, se avsnitt 13.6.3, endast erhåller en ökning av medeldosen från Ra-226 med en faktor två.

En regressionsanalys av den maximala totaldosen över tiden ger de signifikanta variablerna tiden för kapselbrott och korrosionshastigheten, CRR . Detta överensstämmer med det faktum att för tidiga kapselbrott uppkommer de högsta doserna på grund av utsläpp av exempelvis Ni-59 och Nb-94, som frigörs samtidigt med korrosionen av bränsleelementens strukturella delar.



Figur 13-51. Resultat från standardiserad rangregression. Regressionsanalys av totaldosen vid 10^6 år och av Ra-226-dosen vid 10^6 år ger liknande resultat beroende på dominansen av Ra-226. Regressionsanalys av maximal totaldos över tiden identifierar CRR som ytterligare en känslig ingående parameter.

13.6.3 Kombination av skjuvladdscenariot och scenariot med advektion i bufferten

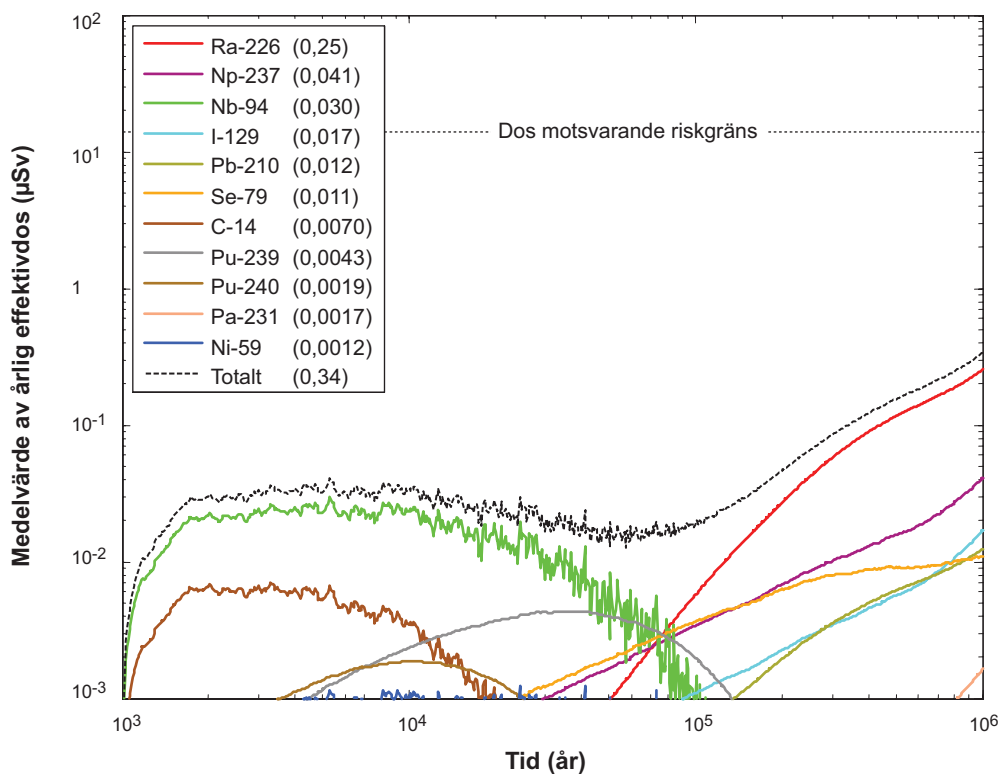
Som framgår av diskussionen om kombinationer av bufferterrosion och skjuvrörelser i avsnitt 12.9.3, behöver konsekvenserna av ett skjuvbrott följt av bufferterrosion beaktas, eftersom det är rimligt att anta att grundvattenflödet i en spricka som har utsatts för en större sekundär skjuvrörelse skulle kunna vara högt. Bufferterrosion kan sedan leda till förlust av buffertmaterial och ytterst till förlust av dess fördröjningsfunktion i deponeringshålet där kapselbrott skett på grund av skjuvning. En liknande situation kan uppstå om buffertmaterialet omvandlas genom interaktion med järnjoner från den skadade kapseln, vilket tas upp i buffertomvandlingsscenarioet i avsnitt 12.4.

För fallet med skjuvbrott fördelade mellan tusen och en miljon år gjordes därför även en beräkning för förhållanden i närområdet med avsaknad av buffert. Konceptualiseringen av närområdet är således densamma som i korrosionsscenarioet, men flödesdata i närområdet är stiliserade och retentionen i geosfären beaktas inte som i andra konsekvensberäkningar för skjuvladdscenariot. Resultaten visas i figur 13-52.

Resultatet liknar resultatet för fallet med bufferten närvarande i figur 13-48, särskilt för perioden bortom 100 000 år. Den största årliga effektivdosen från Ra-226 ökar med omkring en faktor två från $0,13 \mu\text{Sv}/\text{år}$ till $0,25 \mu\text{Sv}/\text{år}$. Fördröjningen i bufferten och den begränsade lösligheten av den dosdrivande nukliden Ra-226, som båda endast bidrar till fördröjning i närvaro av buffert, är således av mindre betydelse i skjuvladdscenariot. Detta resultat är även i överensstämmelse med den begränsade effekten av löslighetsbegränsningar som påvisades i ett variantfall i korrosionsscenarioet, där löslighetsbegränsningar annars inte införs på grund av frånvaron av bufferten.

Den största skillnaden för radionukliderna med störst dosbidrag erhålls för Nb-94, eftersom den fördröjs påtagligt i bufferten när denna är närvarande. Men Nb-94 ger huvudsakligen dosbidrag före 100 000 år. Ovanstående fall är endast relevant efter det att bufferten eroderat. Eftersom de hydrogeologiska förhållanden inom närområdet stiliseras med avseende på radionuklidtransporten i ovanstående fall är de inte nödvändigtvis relevanta när det gäller att uppskatta tiden fram till dess att bufferterrosionen har gett upphov till advektiva förhållanden i deponeringshålet. De första advektiva positionerna uppkommer efter flera tiotusentals år i buffertadvektionsscenarioet. Om hänsyn tas till de hydrauliska förhållandenas okända beskaffenhet i deponeringshålet efter ett skjuvbrott kan resultaten i figur 13-52 anses vara en försiktig representation för ett kombinerat scenario för tidsperioder bortom 10 000 år.

Detta kombinerade fall behandlas ytterligare i risksummeringen i avsnitt 13.9.



Figur 13-52. Probabilistiskt beräknade konsekvenser av skjuvbrott med advektiva förhållanden i deponeringshålet för perioden mellan tusen år och en miljon år. Teckenförklaringen visas i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årliga effektivdosen under en miljon år (angivet inom parentes i μSv).

13.6.4 Analys av möjliga alternativa transportförhållanden/transportdata

De transportdata som användes för beräkningen av det probabilistiska basfallet är de som ges i **Datarapporten**. Dessa data har valts ut för särskilda förhållanden och nedan genomförs en analys över i) om utvecklingen i skjuvlaster scenariot är förenlig med dessa förhållanden och ii) om några andra alternativa utvecklingar av systemet, som skulle kunna medföra mindre gynnsamma transportförhållanden, måste beaktas.

Denna analys motsvarar den analys av möjliga förlopp som leder till alternativa inneslutningsförhållanden i avsnitt 12.8.2, men som har förenklats baserat på de analyser som redan utförts i härledningen av data i **Datarapporten**.

Antal kapselbrott och brottider

Det här är resultatet av analysen av inneslutningspotentialen för skjuvlaster scenariot och har således analyserats uttömmande i avsnitt 10.4.5.

Radionuklidinventarium, IRF och CRF

Det är inte relevant att studera dessa storheter här eftersom de inte påverkas av yttre faktorer utan av förhållanden som bestämmer initialtillståndet. Osäkerheter som är knutna till initialtillståndet undersöks uttömmande i **Datarapporten**.

Korrosionshastighet för metaller

Även vid ett mycket tidigt skjuvbrott förväntas inte temperaturen för en vattenfylld kapsel överstiga 70 °C. Det innebär, liksom för korrosionsscenarioet, se avsnitt 13.5.4, att de korrosionshastigheter som används i **Datarapporten** även är tillämpliga (med stor marginal) för skjuvlaster scenariot.

Bränsleupplösningshastighet

I det här fallet är bufferten på plats och de förväntade vätekonzentrationerna är relativt höga, som behandlas senare i avsnitt 13.7.2. Å andra sidan kan bränslets radioaktivitet vara högre vid tiden för vattenkontakt. Järnkorrosionen kommer dock att fortsätta under tiotusentals år och under denna tid kommer bränsleaktiviteten att sjunka under tröskelvärde för alfaaktivitet /Muzeau et al. 2009/. Även vid ett mycket tidigt skjuvbrott förväntas inte temperaturen för en vattenfylld kapsel överstiga 70 °C.

Lösligheter

Redoxförhållanden

Lösligheten för flera av de viktigaste radionukliderna är starkt beroende av de rådande redoxförhållandena i förvarets närområde. Lösligheten hos teknetium ökar till exempel med flera storleksordningar för $p_e > 0$. Men eftersom redoxkemin inuti kapseln kommer att domineras av järnkorrosionsprodukter (magnetit) förväntas redoxpotentialen förbli låg under alla omständigheter.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma redoxförhållanden: Det finns inga sådana behov, eftersom det rikliga järninnehållet och dess anoxiska korrosionsprodukter kommer att buffra redoxförhållandena inuti en defekt kapsel.

pH

Naturligt grundvatten kommer att ha ett pH ungefär i intervallet 6–9. Upplösning av cement med lågt pH som används för injektering och pluggar skulle lokalt kunna ge upphov till pH runt 11.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma pH-förhållanden: Som konstateras i avsnitt 13.5.5 kan pH över 11 och under 6,3 uteslutas. Detta intervall har redan täckts in i analysen av lösligheter.

Temperatur

Den mest relevanta osäkerheten förenad med termodynamiska data är temperaturens effekt på stabiliteten hos ämnen som är lösta i vatten och fasta föreningar. I den databas som används ingår ett urval av entalpidata för reaktioner, även om det i några fall inte fanns tillgång till entalpidata. Sättet att korrigera jämviktskonstanterna för temperatureffekter följer van't Hoff's ekvation som relaterar temperaturändringen till ändringen av jämviktskonstanten, förutsatt att den molära standardentalpiändringen för reaktionen ($\Delta_r H^\circ$) anses konstant vid alla temperaturer /Allard et al. 1997, s. 434/. Beräkningarna i SR-Site är baserade på en konstant temperatur av 25 °C, eftersom man bedömer att de små temperaturvariationer som kan förväntas i förvaret när löslighetsgränser har betydelse kommer att ha en marginell effekt på de beräknade värdena.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma temperaturförhållanden: Löslighetsgränser har i allmänhet endast betydelse för den långsiktiga analysen. Det betyder att temperaturer över 25 °C har begränsad betydelse eller ingen betydelse alls. Till och med i händelse av ett tidigt kapselbrott kommer perioden med temperaturer > 25 °C att vara kort i jämförelse med säkerhetsanalysens tidsskala. Temperaturer från runt 0 °C till 25 °C kan å andra sidan ha betydelse för lösligheten. Eftersom det råder brist på entalpidata har några temperatureffekter inte inkluderats i löslighetsberäkningarna i SR-Site. I stället har en känslighetsstudie gjorts i dokumentationen av löslighetsanalysen /Grivé et al. 2010/. Slutsatsen är att effekten av en temperatur < 25 °C på grundämnens lösligheter är begränsad.

Jonstyrka hos grundvattnet

Behandlingen av *aktivitetskorrektioner* utgör också en osäkerhet för den aktuella löslighetsanalysen. Jonstyrkorna (I) i de undersökta grundvattensammansättningarna /Duro et al. 2006/ är från 10^{-3} till 2 mol/dm^3 . Den metod som är mest ändamålsenlig för att utföra aktivitetskorrektioner i detta intervall är den specifika interaktionsteori (Specific Interaction Theory, SIT) /Allard et al. 1997, s 331/. Den metoden är dock ännu inte implementerad i de geokemiska program som används och därför har den utökade Debye-Hückel-teorin /Allard et al. 1997, s 328–329/ använts för aktivitetskorrektioner.

De resultat som erhålls med hjälp av den utökade Debye-Hückel-teorin är jämförbara med dem som erhålls med hjälp av SIT i de fall en jämförelse är möjlig. En högre jonstyrka än 1 mol/dm^3 skulle leda till en större osäkerhet i de erhållna resultaten.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma jonstyrkeförhållanden: Som redovisades för bränsleupplösningen i avsnitt 13.5.5 omfattar referensutvecklingen de högsta salthalter som kan förväntas vid Forsmark, varför det inte krävs några ytterligare analyser.

Komponenter i grundvatten med låg förekomst

Bristen på data för fosfatföreningar och fasta faser är en stor nackdel när det gäller att förutsäga lösligheten för vissa ämnen, huvudsakligen för sällsynta jordartsmetaller och trevärda aktinider. Om fosfat beaktas i grundvattensammansättningen kan det leda till en ändring av de utvalda löslighetskontrollerande faserna såväl som de löslighetsgränser som rekommenderas för några av radionukliderna. Om fosfatfaser och fosfatföreningar inkluderas kan det potentiellt leda till antingen högre eller lägre lösligheter för de radioaktiva grundämnena.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma förhållanden: Det kommer att uppstå konkurrens om fosfatet mellan järnet tillsammans med dess korrosionsprodukter och komponenterna i det använda kärnbränslet. Totalkoncentrationerna av fosfat i Forsmarks grundvatten är i allmänhet låga och förväntas därför inte ha någon betydande inverkan på lösligheterna. Därför dras slutsatsen att det inte behövs några ytterligare studier av fosfats effekt på lösligheterna.

Slutsatser

Den föreslagna hanteringen av lösligheter och löslighetsdata i **Datarapporten** är tillräcklig för att täcka in skjuvlasts scenariot.

Buffertporositeter

I det här fallet förekommer inte någon förlust av buffertmaterial. Den föreslagna hanteringen av porositet och porositetsdata i **Datarapporten** är därför tillräcklig för att täcka in skjuvlasts scenariot. Dessutom har skjuvbrott följt av förlust av buffert, som visas i avsnitt 13.6.3, en begränsad inverkan på konsekvenserna.

Diffusiviteter och fördelningskoefficienter i bufferten

Fall som leder till minskad fördröjning av radionuklidtransport kan uttryckas genom förändringar av de parametrar som påverkar radionuklidens interaktion med bentonit. Dessa kan indelas i följande parametertyper:

Interna eller strukturella parametrar:

- Bentonitsammansättning.
- (Antagen) täthet med avseende på CO_2 -utbyte med bergsformationer.

Yttre parametrar eller miljöparametrar, såsom:

- Ändringar i antagen grundvattensammansättning eller pCO_2 som bestäms av bergsformationer och som leder till ändringar av porvattnets sammansättning (mycket högt eller mycket lågt pH, hög jonstyrka, hög koncentration av konkurrerande katjoner/komplexbildande ligander).
- Temperatur.

Effekterna av olika faktorer kommer att vara olika för varje radionuklid (eller grupp av radionuklider). Giltighetsintervallet för sorptions- och diffusionskoefficienter beror av de osäkerheter som antas vara kopplade till varje parameter i databestämningen i **Datarapporten**. Olika antaganden rörande dessa osäkerheter skulle ha lett till ett annat giltighetsintervall.

Lägre buffertdensitet svarar mot högre diffusionskoefficienter. Sorption kommer endast att påverkas av densiteten om porvattnets kemi ändras betydligt till följd av ett högre andel vatten relativt andelen

fast ämne, men effekten av detta förhållande är av ringa betydelse jämfört med sammansättningen av bentonit och grundvatten. Smektit (montmorillonit) är den huvudsakliga källan till sorptionspositioner, vars innehåll bestämmer sorptionens omfattning. K_d -värden väljs för ett CEC-värde på 85 mekv/100 g i **Datarapporten**. Om denna interna faktor ändras till ett lägre värde kommer det att leda till ett lägre K_d -värde, men effekten är liten med tanke på intervallet för K_d -värden. Ett lägre CEC kompenseras enkelt med exempelvis en mindre förändring av pH inom det givna osäkerhetsintervallet. Bentonitens innehåll av accessoriska mineraler påverkar porvattensammansättningen. Kalcit som ingår i bentonit behövs för att generera karbonatbuffring. Frånvaron av kalcit skulle öka beroendet av grundvattensammansättningen. Motsvarande effekter på porvattensammansättningen kvantifierades inte i /Ochs och Talerico 2004/. Frånvaron av salter ger porvattenresultat som ligger inom den parameterrymd som redan beaktats. Ett högre saltinnehåll är endast relevant om det leder till en saltkoncentration i porvattnet som är högre än vad som täcks in av den beaktade parameterrymden (jonstyrka upp till omkring 0,76 M /Ochs och Talerico 2004/). Täthet med avseende på CO₂ är relevant eftersom CO₂-utbyte inverkar på porvattnets pH. Helt öppna eller slutna system beaktas i härledningen av data och är därmed redan inkluderade i det utvalda intervallet för sorptionparametrar.

Salthalten i grundvatten upp till den i havsvatten beaktades i /Ochs and Talerico 2004/. Högre salthalt kan leda till lägre K_d -värden, i synnerhet för Cs/Sr/Ra. Ökad kloridkoncentration kommer att leda till mindre omfattande sorption av de flesta radionuklider på grund av komplexbildning, men den effekten kommer i de flesta fall att vara inom det intervall som redan beaktats. Dubbellagereffekter minskar och därmed kommer effekter till följd av anjonexklusion att få mindre betydelse vid hög salthalt. D_e kan öka för anjoner vid hög salthalt. Lägsta pH i porvattnet som beaktats för sorption var 6,6 /Ochs och Talerico 2004/. Ett lägre pH i porvattnet kan leda till en annan fördelning av K_d -värden.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma förhållanden: Förlust av buffertdensitet eller förändring i montmorillonitinnehåll förutses inte direkt i skjuvlastscenariot, utan den frågan diskuteras mer utförligt i det delavsnitt som följer omedelbart på detta avsnitt. Utvecklingen av pH och jonstyrka i grundvattnet diskuteras i avsnitt 13.5.5. Intervallet för möjlig jonstyrka har redan beaktats i data för diffusiviteter och K_d -värden som finns i **Datarapporten**. Som framgår av den känslighetsundersökning som redovisas i tabell 10-8 kan dock en kombination av högt grundvattenflöde, MX-80-bentonit och ett lågt pH hos grundvattnet leda till porvatten med ett pH-värde som är något lägre än det pH-värde på 6,6 som användes som undre gräns för härledningen av K_d -värden i **Datarapporten**. Det betyder att det skulle kunna finnas fall där de valda K_d -värdena inte är tillämpliga. Detta fall kräver ett högt flöde, vilket är fallet i skjuvlastscenariot, men ett högt flöde betyder också att buffertsorptionen i mycket liten grad bidrar till fördröjningen av radionuklider. Även de begränsade ytterligare konsekvenserna av detta fall begränsas av konsekvenserna av kombinationen av skjuvlast- och buffertadvektionsscenarioet, se nedan.

Buffertens hydrauliska konduktivitet och svälltryck

För att säkerställa att diffusion är den dominerande transportmekanismen i bufferten bör de kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer som rör hydraulisk konduktivitet och svälltryck vara upprätthållna, se avsnitt 8.3.2. Möjligheten till att dessa kriterier är uppfyllda är huvudsakligen beroende av buffertens densitet och montmorillonitinnehåll. Ingen av dessa förväntas påverkas direkt av ett skjuvbrott hos kapseln. Däremot kan det förekomma indirekta effekter:

1. Som beskrivs i avsnitt 12.4 kan det inte uteslutas att metalliskt järn kommer att ha en påverkan på montmorilloniten. För närvarande finns det ingen tillförlitlig metod för att kvantifiera denna effekt.
2. En kombination av kapselbrott till följd av skjuvlastscenariot och buffertadvektionsscenarioet skulle leda till ett fall med advektiva förhållanden i deponeringshålet.

En omfattande omvandling av bufferten orsakad av metalliskt järn från kapselinsatsen enligt 1 ovan skulle leda till en liknande situation som i 2.

Behov av att undersöka ytterligare utvecklingar för att kunna utesluta ogynnsamma förhållanden: Ett kapselbrott till följd av skjuvlast i kombination med advektiva förhållanden i deponeringshålet måste beaktas. Detta kan representera båda fallen som beskrivs ovan. Konsekvenserna av ett sådant fall redovisas i avsnitt 13.6.3.

Data för berget

Data för berget är antingen stiliserade och pessimistiska (gäller Q_{eq}) eller irrelevanta eftersom retentionen i geosfären pessimistiskt utelämnas (gäller alla övriga data för berget).

LDF-faktorer för biosfären

Som för korrosionsscenarioet täcks alla de klimatförhållanden som framkommer i analyserna av systemets utveckling av de olika LDF-värden som finns tillgängliga.

Övergripande slutsats avseende ytterligare fall att analysera

De transportdata som anges i **Datarapporten** och som används i beräkningen av det probabilistiska basfallet i skjuvlaster scenariot ger en tillräcklig täckning av transportförhållandena för skjuvlaster scenariot.

13.6.5 Doser till biota, alternativa säkerhetsindikatorer, analytiska beräkningar och kollektivdos

Doser till biota

Utsläpp för skjuvlaster scenariot har inte analyserats med avseende på doser till biota (andra organismer än människa) i SR-Site. Eftersom utsläppen i allmänhet är lägre för detta scenario jämfört med korrosionsscenarioet och eftersom marginalen till referensvärdet, i enlighet med avsnitt 13.5.7, är flera storleksordningar i det senare, dras slutsatsen att skjuvlaster scenariots påverkan på miljön är försumbar.

Alternativa säkerhetsindikatorer

Samma alternativa säkerhetsindikatorer som för korrosionsscenarioet, se avsnitt 13.5.8, har tillämpats på de beräknade utsläppen för skjuvlaster scenariot, se **Radionuklidtransportrapporten**. Eftersom utsläppen i allmänhet är lägre för detta scenario jämfört med korrosionsscenarioet är marginalerna till referensvärdena flera storleksordningar även för skjuvlaster scenariot.

Analytiska beräkningar

Det probabilistiska fallet med skjuvbrott med advektiva förhållanden i deponeringshålet, för perioden mellan tusen år och en miljon år (se figur 13-52), har även beräknats med de analytiska modellerna, se **Radionuklidtransportrapporten**. Överensstämmelsen är god och den maximala dos som uppstår vid en miljon år är 0,36 μSv , jämfört med 0,34 μSv i figur 13-52 för den numeriska modellen.

Kollektivdos

Föreskriften SSMFS 2008: 37 anger följande: ”Kollektivdos på grund av förväntat utläckage av radioaktiva ämnen under tusen år efter förslutningen av ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska beräknas som summan över 10 000 år av den årliga kollektivdosen.”

I skjuvlaster scenariot inträffar utsläpp före tusen år och därför beräknas kollektivdosen för detta scenario. Utsläppet under de första tusen åren domineras av C-14 och den är också det viktigaste bidraget till kollektivdosen. Den kompletta, dvs integrerade över 50 000 år, kollektivdosinteckningens bidrag från utsläppet av C-14 under de första tusen åren beräknas genom att multiplicera det integrerade utsläppet av C-14 under den inledande tusenårsperioden med en omräkningsfaktor på 109 000 manSv/PBq. Denna omräkningsfaktor har rekommenderats av UNSCEAR /UNSCEAR 2000, Annex A/ för att uppskatta den kompletta kollektivdosinteckningen på världens befolkning från utsläpp av C-14 till atmosfären. Den har beräknats under antagandet att världens framtida befolkning stabiliseras på 10^{10} människor, och att det globala inventariet av stabilt kol inte ökar från sitt nuvarande värde. Uppskattningar av kollektivdosinteckningen från utsläpp av C-14 som gjorts med flera olika modeller har gett mycket likartade resultat /UNSCEAR 2000/. Denna överensstämmelse mellan modellprognoser har tillskrivits den långa halveringstiden för C-14, i förhållande till dess transporthastighet i miljön, vilket gör den beräknade dosinteckningen okänslig för den detaljerade strukturen i modellerna och värdena för de parametrar som används i dem. Det konstateras också att doser till följd av ett utsläpp till mark eller ytligt i hav är ungefär desamma som för utsläpp till atmosfären /UNSCEAR 2000/.

Enligt /UNSCEAR 2000/ ger ett enstaka utsläpp upphov till 75 procent av den kompletta dosinteckningen under 10 000 år. För att uppskatta den ofullständiga kollektivdosinteckningen, dvs kollektivdosen integrerad över 10 000 år, multipliceras den kompletta kollektivdosinteckningen med 0,75.

Det integrerade utsläppet av C-14 under de första tusen åren är cirka 0,5 MBq. Detta ger en kollektivdos summerad över 10 000 år för skjuvlastscenariot med cirka $4 \cdot 10^{-5}$ manSv.

13.7 Hypotetiska restscenarier för att illustrera barriärfunktioner

I det här avsnittet analyseras hypotetiska restscenarier för att illustrera barriärfunktioner. De omfattar i) scenariot ”kapselbrott till följd av isostatisk last”, bedömt som ett restscenario enligt analysen i avsnitt 12.7, ii) kapselbrott där en hypotetisk initial defekt i form av ett genomgående pinnhål i kopparhöljet växer till en större defekt och iii) ett antal hypotetiska fall där olika barriärer antas vara fullständigt borta. Scenariot kapselbrott till följd av isostatisk last analyseras i avsnitt 13.7.1. Pinnhålsfallet utreds i avsnitt 13.7.2 med användning av COMP23-modellen för närområdet och både FARF31- och MARFA-modellerna för transport i fjärrområdet. Hypotetiska fall som visar på konsekvenserna av antagna barriärförluster förutom pinnhålsfallet analyseras i avsnitt 13.7.3.

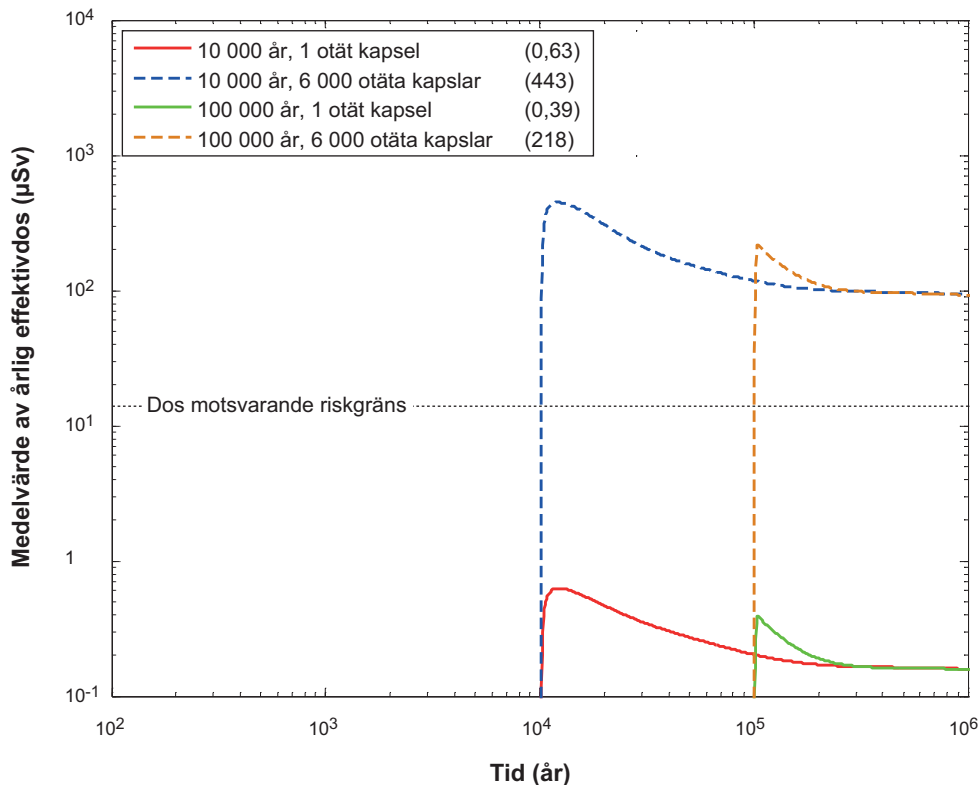
13.7.1 Kapselbrott till följd av isostatisk last

Det här avsnittet analyserar konsekvenserna av scenariot som behandlar kapselbrott till följd av isostatisk last, analyserat i avsnitt 12.7. Detta scenario klassificerades som ett restscenario i avsnitt 12.7.5, eftersom inga förlopp som ledde fram till den här typen av kapselbrott kunde identifieras. Behandlingen nedan avser därför en hypotetisk typ av kapselbrott.

För denna typ av kapselbrott förbikopplas kapseln (både segjärnsinsatsen och kopparhöljet), medan bufferten och geosfären antas ha intakta retentionsegenskaper. Kapselbrott till följd av isostatisk last skulle förmodligen betyda att insatsen delvis bucklas inåt, och att kopparhöljet följer med och öppnas upp nära locket. Dimensionsförändringarna förväntas emellertid vara små.

Tre vägar ut från närområdet modelleras: en horisontell spricka som skär deponeringshålet i nivå med kapsellocket i vertikalled, betecknad Q1, en skadad zon, EDZ, i deponeringstunnelns sula, Q2, och en spricka som skär deponeringstunneln, Q3, se figur 13-13 i avsnitt 13.4.1. Transportdata för geosfären är från basfallet för den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Termiskt inducerad spjälkning förmodas ha inträffat i deponeringshålets vägg, vilket innebär att transportmotståndet i gränsytan till Q1 har minskat.

Konsekvenserna av postulerat kapselbrott i en enda kapsel till följd av isostatisk kollaps 10 000 respektive 100 000 år efter förslutning av förvaret visas i figur 13-53. Eftersom både hypotetiska globala orsaker (islast) och lokala orsaker (bristfälliga materialegenskaper och högre buffertdensitet än avsett) kan tänkas för denna typ av kapselbrott, behöver samtida brott hos fler än en kapsel övervägas, vilket skulle leda till konsekvenser i proportion till antalet kapselbrott, förutsatt att alla utsläpp sker till samma biosfärsobjekt. Om ett stort antal kapselbrott sker är det lämpligare att använda LDF-värdena för ett fördelat utsläpp (se avsnitt 13.2.3) när utsläpp omvandlas till dos. Illustrationer av konsekvenserna av extrema fall där kapselbrott sker i alla kapslar efter 10 000 respektive 100 000 år visas också i figur 13-53. Det noteras att fallet med ett kapselbrott ger lägre doskonsekvens vid en miljon år i jämförelse med andra fall med ett kapselbrott på grund av antingen korrosion (där bufferten har eroderat, se figur 13-16) eller skjuvning (där geosfärsretentionen försummas, se figur 13-47). Ytterligare fall redovisas i **Radionuklidtransportrapporten**.



Figur 13-53. Postulerade brott i en kapsel och i alla de 6 000 kapslarna efter 10 000 och 100 000 år. De defekta kapslarna antas inte erbjuda något motstånd mot radionuklidtransport. De enskilda kapselbrotten beräknas med vanliga LDF-värden. För fallen med samtliga kapslar tillämpas LDF-värden för ett fördelat utsläpp.

13.7.2 Växande pinnhål

Som nämnt i inledningen är denna typ av kapselbrott hypotetisk, eftersom kapslarnas initialtillstånd innebär att det inte finns några genomgående pinnhålsdefekter i kopparhöljet.

En analys av denna typ av kapselbrott är emellertid relevant för att belysa viktiga aspekter av den interna utvecklingen av kapseln. För kapselbrott med pinnhål kommer pinnhållet i kapselväggen initialt att erbjuda ett betydande transportmotstånd som sedan försvinner när defekten förstoras över tiden, medan bufferten och geosfären har intakta retentionsegenskaper. Det är därför också ett passande fall för att påvisa den fördröjande förmågan hos bufferten och geosfären och för att utforska osäkerheter som har att göra med dessa komponenter i förvaret. Dessutom förväntas den inledningsvis lilla defekten så småningom att utvecklas till en stor defekt, vilket liknar fallet med kapselbrott orsakat av allmän kapselkorrosion medan bufferten fortfarande är intakt. Även om sannolikheten för den senare typen av kapselbrott befanns försumbar i analysen av korrosionsscenarioet, se avsnitt 12.6, är det av intresse att förstå dess konsekvenser.

Utvecklingen av närområdet (kapsel och buffert) efter kapselbrott i pinnhålsfallet samt indata till transportmodellerna giltiga för pinnhålsfallet beskrivs i **Radionuklidtransportrapporten**, som även innehåller ett antal beräkningsfall som inte visas här.

En enda kapsel postuleras ha en initial genomgående defekt. Vatten tränger in i kapseln genom defekten, och tiden för att etablera en kontinuerlig vattenflödesväg mellan bränslet och kapselns utsida antas pessimistiskt vara tusen år. Efter ytterligare pessimistiskt uppskattade 9 000 år växer sig pinnhållet så stort att allt transportmotstånd är borta. Tre vägar ut från närområdet modelleras: en horisontell spricka som skär deponeringshålet i nivå med den antagna pinnhålsdefekten (nära kapsellocket) i vertikal-led, betecknad Q1, en skadad zon, EDZ, i deponeringstunnelns sula, Q2, och en spricka som skär deponeringstunneln, Q3, se figur 13-13 i avsnitt 13.4.1. Transportdata för geosfären är från basfallet med den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen.

Beräkningar med COMP23 och FARF31

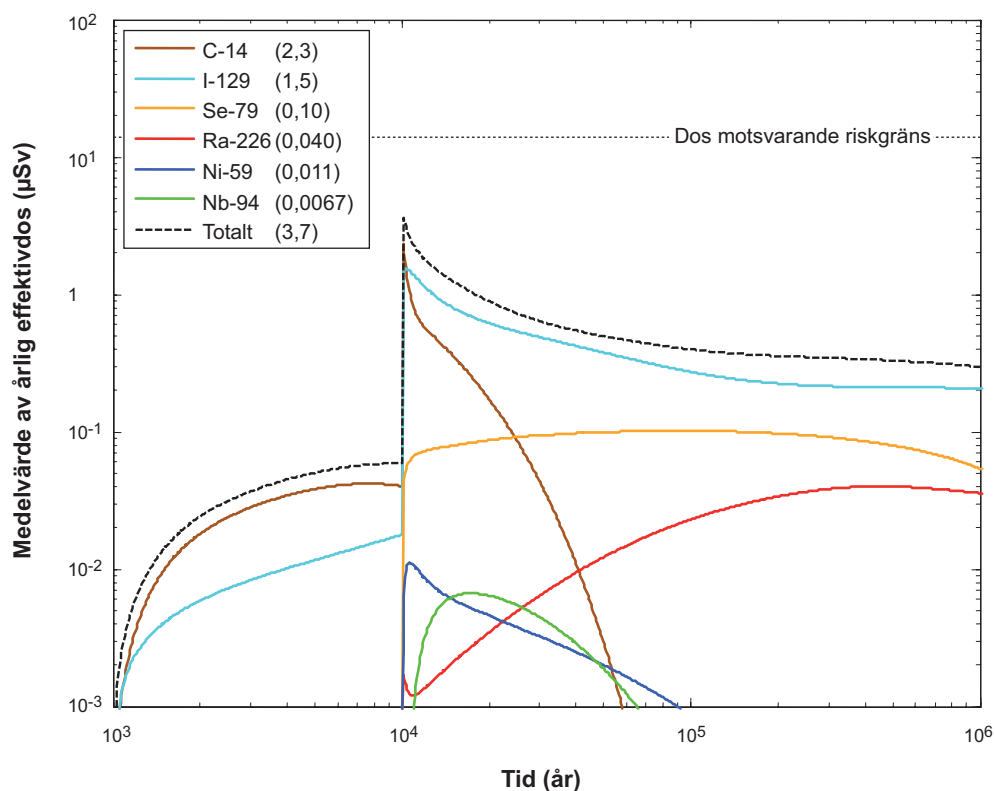
Figurerna 13-54 till 13-57 visar resultat i form av dosekvivalenta utsläppet för närområdet och fjärrområdesdos i form av summerad dos och uppdelat på de tre utsläppsvägarna för en probabilistisk beräkning av basfallet.

Närområdets dosekvivalenta utsläpp domineras av de icke-sorberande nukliderna I-129 och C-14, se figur 13-54. De högsta värden som uppträder efter 10 000 år när kapseln antas ha förlorat hela sitt transportmotstånd beror av IRF och/eller CRF för dessa nuklider. Utsläppsvägen Q1 dominerar de inledande utsläppen och dem direkt efter 10 000 år, medan de tre utsläppsvägarna ger mer likvärdigt bidrag längre tid efter kapselbrotten, se figur 13-55.

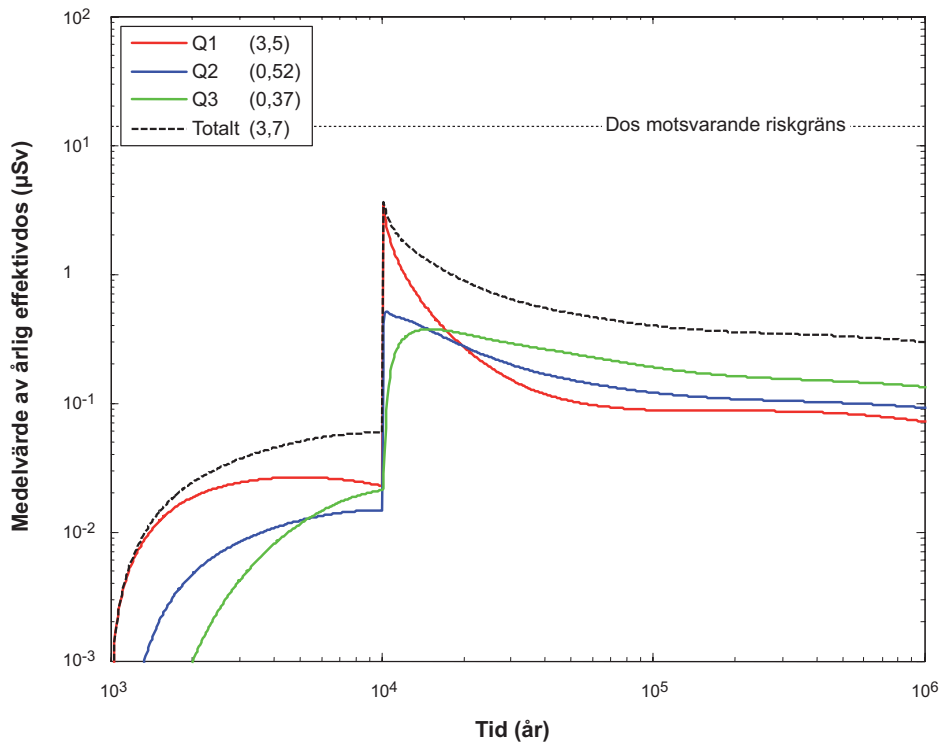
Den största totaldosen för fjärrområdet, se figur 13-56, reduceras med ungefär en faktor fem i jämförelse med den för närområdet. Icke-sorberande nuklider dominerar också fjärrområdesdosen. Minskningen av dosen mellan närområdet och fjärrområdet är större för sorberande nuklider. Den inledande dominansen för Q1 är mindre uttalad för fjärrområdet, se figur 13-57, och här dominerar utsläppsvägarna Q2 och Q3 på lång sikt.

Flera ytterligare fall har beräknats för att undersöka känsligheten för olika transportförhållanden. Resultaten summeras i texten nedan och i figur 13-58, och detaljer ges i **Radionuklidtransportrapporten**.

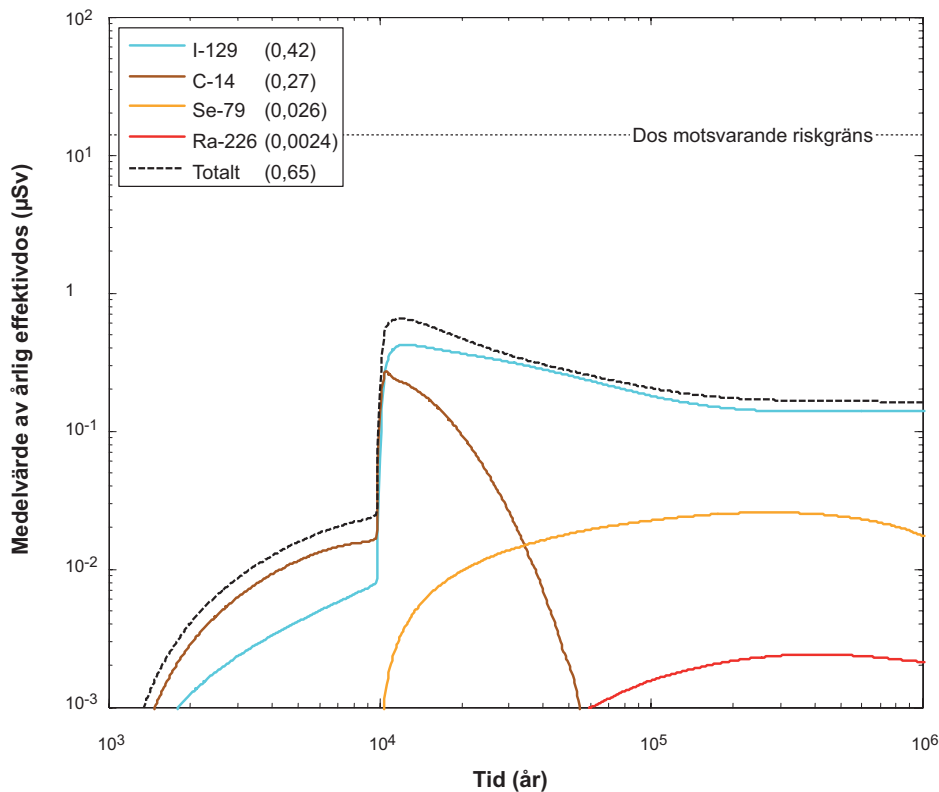
Termiskt inducerad spjälkning kan uppträda i deponeringshålens väggar och minska transportmotståndet i gränssytan mellan buffert och berg, se avsnitt 10.3.5. För basfallsberäkningen antas det pessimistiskt att alla deponeringshålarna utsätts för spjälkning. Därför analyseras även ett annat probabilistiskt fall utan spjälkning. Detta ger en reduktion med ungefär en faktor 40 i totalt dosekvivalent utsläpp via Q1 från närområdet, medan effekterna på Q2 och Q3 är mycket begränsade. Den totala dosen från närområdet och fjärrområdet minskas med faktorer ungefär fyra respektive 1,5. Det noteras också att förekomsten av spjälkning inte påverkar transportförhållandena i korrosions- och skjuvlastscenarierna.



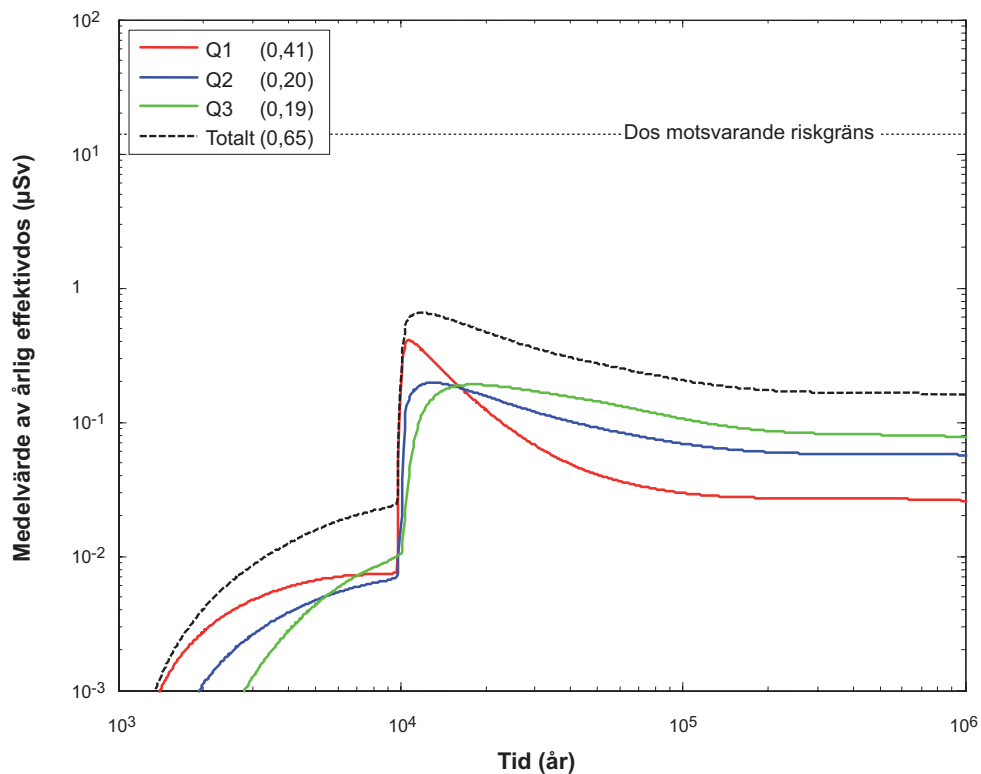
Figur 13-54. Utsläpp från närområdet uttryckt som genomsnittlig årlig effektivdos i en probabilistisk beräkning som avser basfallet för kapselbrott med pinnhål. Summerade doser för alla utsläppsvägar (Q1+Q2+Q3). Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



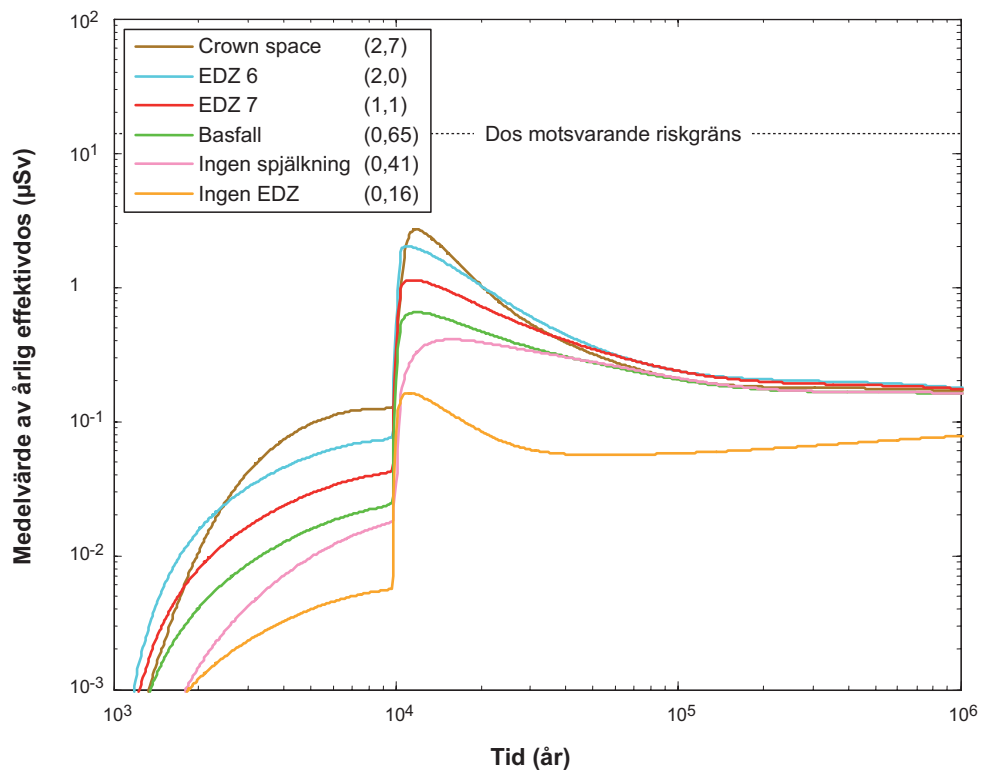
Figur 13-55. Utsläpp från närområdet uttryckt som genomsnittlig årlig effektivdos i en probabilistisk beräkning som avser basfallet för kapselbrott med pinnhål. Doser uppdelade i Q1, Q2 och Q3. Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-56. Genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet i en probabilistisk beräkning som avser basfallet för kapselbrott med pinnhål. Summerade doser för alla utsläppsvägar (Q1+Q2+Q3). Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-57. Genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet i en probabilistisk beräkning som avser basfallet för kapselbrott med pinnhål. Doser uppdelade i Q1, Q2 och Q3. Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdos under en miljon år (ges inom parentes i µSv).



Figur 13-58. Genomsnittlig årlig effektivdos från fjärrområdet från de probabilistiska beräkningar som avser basfallet för pinnhål och fall utan spjälkning, med olika antaganden beträffande EDZ samt med ett vattenförande utrymme direkt under taket på deponeringstunneln (crown space). Teckenförklaringen är sorterad i fallande ordning efter högsta genomsnittliga årsvärdet för effektivdos under en miljon år.

Basfallet inkluderar en skadad zon (EDZ) med transmissiviteten 10^{-8} m²/s. Effekterna av olika transmissiviteter i EDZ undersöks genom att probabilistiska variantfall utan EDZ respektive EDZ med transmissiviteter på 10^{-6} m²/s och 10^{-7} m²/s beräknas. De senare två fallen inkluderas för att klargöra vilka effekterna skulle bli av att använda en potentiellt mer destruktiv teknik för tunneldrivning än den enligt referensmetoden. Att eliminera EDZ har så gott som ingen påverkan på Q1-utsläppet, medan Q2-utsläppet per definition försvinner. Q3-utsläppet minskar något, och det är avhängigt det faktum att i basfallet är många av utsläppsvägarna från deponeringstunneln mindre sprickor som förbinder tunneln med EDZ. En ökning av transmissiviteten i EDZ över basfallsvärdet på 10^{-8} m²/s ökar inte Q1-utsläppet. För Q2 resulterar varje ökning av storleksordningen för transmissiviteten i en ökning med ungefär en faktor tre för närområdets och fjärrområdets största utsläpp. Utsläpp genom Q3 påverkas svagt. Ökningen av medelvärdet av den totala årliga effektivdosen vid en förändring från basfallets värde på 10^{-8} m²/s till 10^{-6} m²/s är något mindre än en storleksordning och effekten av att anta frånvaro av EDZ ger en minskning med något mindre än en storleksordning.

En variant av flödesmodellen, i vilken tunnelåterfyllningen kompakterats med ett resulterande vattenförande utrymme direkt under tunneltaket (crown space) analyseras också, se avsnitt 10.3.6. Tidiga utsläpp av C-14 från närområdet är ungefär tre gånger högre jämfört med pinnhålsfallet med intakt tunnelåterfyllning, och Q3 är den dominerande utsläppsvägen. I ett långsiktigt perspektiv bidrar Ra-226 i betydande utsträckning till den totala dosen. För fjärrområdet är tidiga utsläpp av C-14 ungefär åtta gånger högre jämfört med pinnhålsfallet med intakt tunnelåterfyllning, och också här bidrar Q3 mest till utsläppet. På lång sikt är den totala dosen från fjärrområdet jämförbar med den i pinnhålsfallet.

Beräkningar med MARFA

Flera olika fall med växande pinnhål har undersökts med MARFA för att förstå känsligheten för olika modellantaganden, potentialen för retention i tillverkade förvarsdelar och jordlager, samt bentonitkolloidens potentiella roll för att främja transport. MARFA användes för denna analys på grund av förmågan att fullt ut representera variabiliteten längs med transportvägarna, inklusive variabiliteten hos typen av retentionsmodell. MARFA kan till exempel använda en jämviktssorptionsmodell för jordlager och tunnlar i kombination med matrisdiffusionsmodeller för de delar av transportvägarna som utgörs av sprickigt berg.

Eftersom fokus här ligger på att förstå modelleringskänsligheter görs en förenklad osäkerhetsbehandling. Preliminära deterministiska värden används för initialt radionuklidinventarium, transportparametrar för närområdet och matrisparametrar. Detaljer återfinns i **Radionuklidtransportrapporten**. För flödesrelaterade transportparametrar ingår emellertid full variabilitet (ekvivalent flödes hastighet, advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd). MARFA använder sig av en segmenterad representation av transportvägarna i vilken advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd varierar från segment till segment. Inom DFN-regionerna utgör ett segment den del av en transportväg som ligger inom en enda spricka. Denna detaljerade representation av rumslig variabilitet står i kontrast till den i FARF, som använder integrerade värden för advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd för hela flödesvägen. Resultaten som diskuteras nedan avser årlig dos som förväntade värden där hänsyn tas till alla deponeringshål.

Referensfall

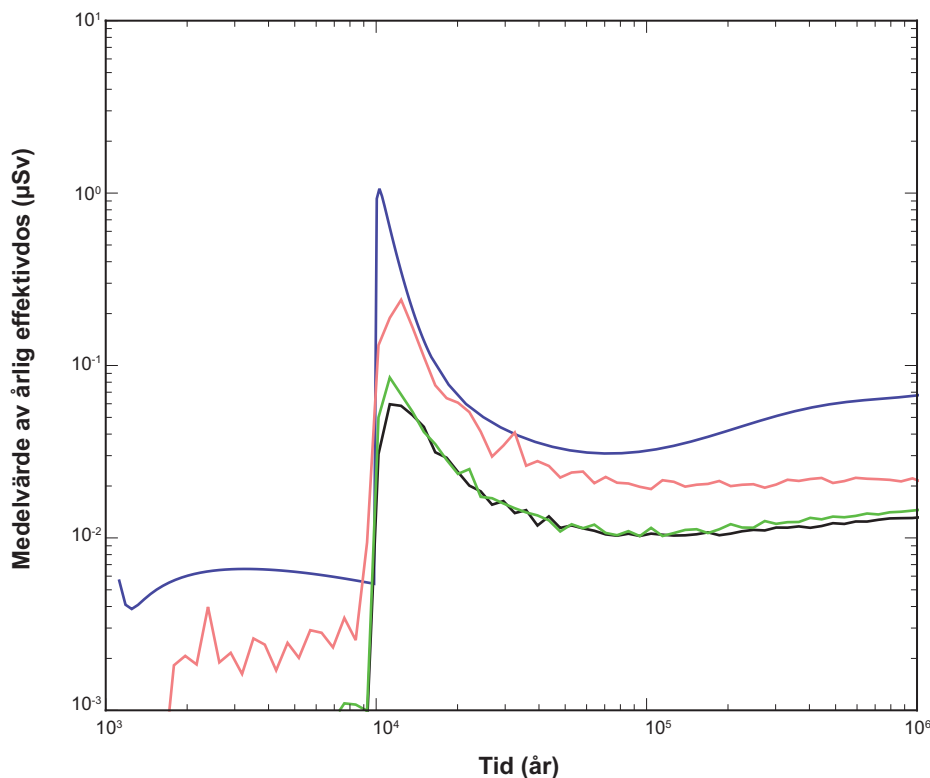
Pinnhålsreferensfallet analyserat med MARFA skiljer sig på två signifikanta sätt från basfallet som analyserats ovan med modellerna COMP23 och FARF31. De delar av gångvägen som går genom tunnlar och jordlager inräknas i gångtiden (utan antagande om sorption), och deterministiska värden används som beskrivet ovan. I synnerhet den första av dessa faktorer resulterar i en reduktion motsvarande ungefär en storleksordning när man jämför med de beräknade medeldoser som erhålls med COMP23/FARF31-modellerna. Fjärrområdets geosfär minskar den högsta totaldosen med en faktor på ungefär 20 för Q1-vägen, ungefär fem för Q2 och ungefär två för Q3. I-129, C-14 and Ra-226 svarar för nästan alla fjärr- och närområdesdoser för alla tre utsläppsvägarna.

Känslighet för antaganden om flöde och transport

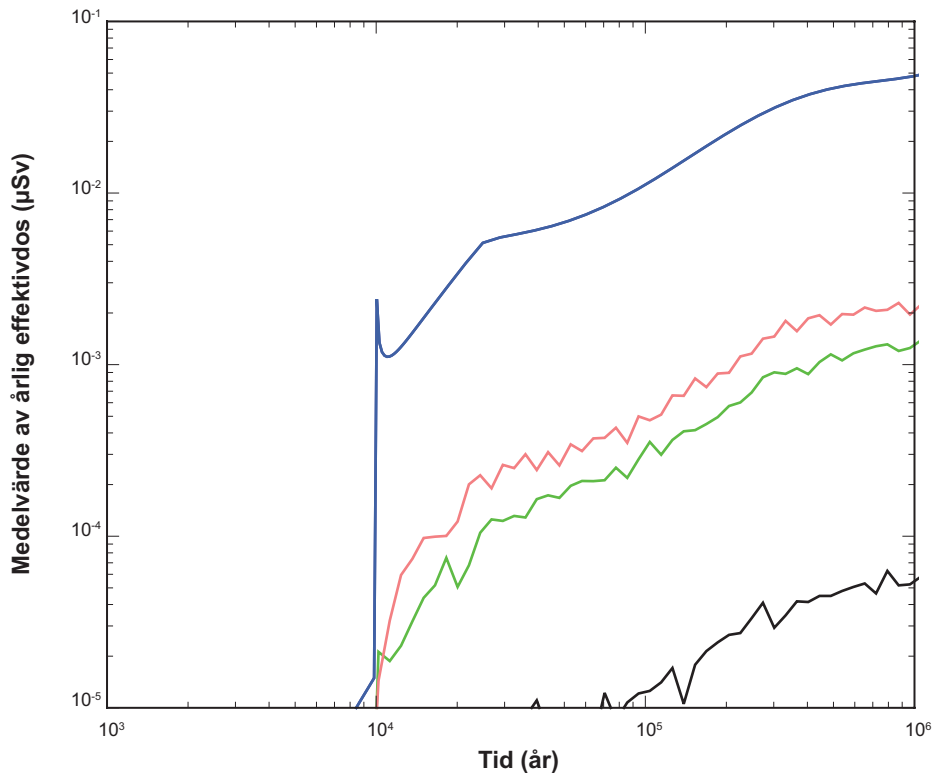
Referensfallet inkluderar jord- och tunnelsegment i transportvägen men utan hänsyn till sorption. Således beaktas den fördröjning som uppstår på grund av att gångtiden i grundvattnet genom jordlager och tunnlar är skild från noll, medan fördröjningen av sorberande grundämnen försummas. Påverkan från jordlager och tunnlar summeras i figur 13-59 för utsläppsväg Q1. Den blå kurvan representerar närområdesutsläpp och den gröna kurvan basfallet. Den rosa kurvan tar inte hänsyn till effekten av transport i tunnlar och jordlager. Den svarta kurvan inkluderar transport och sorption i tunnlar och jordlager. Det går att dra två huvudsakliga slutsatser. För det första minskar gångtiden i tunnlar och jordlager högsta dosen med ungefär en faktor fem (jämför rosa och gröna kurvor). Denna minskning orsakas främst av effekten på de icke-sorberande I-129 och C-14. För det andra har sorption i tunnlar och jordlager ingen signifikant effekt på totaldosen. Detta är en konsekvens av den dominant roll som de icke-sorberande I-129 och C-14 spelar när det gäller att bestämma totaldosen. En undersökning av utsläppen för enstaka nuklider i fjärrområdet, se figur 13-60, visar helt klart att utsläpp av sorberande radionuklider såsom Ra-226 minskar signifikant på grund av sorption i tunnlar och jordlager.

Fall med olika antaganden om transmissiviteten i EDZ och med antagandet om ett vattenförande utrymme direkt under deponeringstunnelns tak (crown space) har också analyserats, med likartade resultat som de som redovisas ovan för COMP23/FARF 31-modellerna, se **Radionuklidtransportrapporten** för detaljer.

Påverkan av att släppa en mångfald av partiklar per deponeringshål, se avsnitt 10.3.6 för detaljer om flödesfall, analyseras i **Radionuklidtransportrapporten**. Olika partiklar ger olika flödesvägar vilket gör det möjligt att undersöka spridningseffekterna för olika flödesvägar från en enstaka startpunkt. Det visas att påverkan av en mångfald partiklar (tio) per utsläppspunkt jämfört med fallet med en enda partikel innebär mycket små skillnader i slutliga doser. Alltså är spridning som erhålls av att en mångfald av partiklar binder samman en enstaka startpunkt med biosfären underordnad de övriga processer som sprider massan av radionuklider i tiden.



Figur 13-59. Förväntade värden för utsläpp av alla nuklider via Q1 i pinnhålsfallet, uttryckta som ekvivalenta doser. Den blå kurvan är närområdesutsläpp och de övriga kurvorna är fjärrområdesutsläpp som följer: rosa tar inte hänsyn till transport i tunnel och jord, grönt är referensfallet (tunnlar och jordlager ingår men utan sorption), och svart inkluderar sorption i tunnlar och jordlager.



Figur 13-60. Förväntade utsläpp av Ra-226 via Q1 i pinnhålsfallet med olika antaganden om vilken roll tunnlar och jordlager spelar. Den blå kurvan är närrområdesutsläpp och de övriga kurvorna är fjärrområdesutsläpp som följer: rosa har inga tunnel- eller jordsegment i gångvägen, grönt är referensfallet (tunnlar och jordlager ingår men utan sorption), och svart inkluderar sorption i tunnlar och jordlager.

Kolloidbefrämd transport

Kolloidbefrämd transport kan i MARFA representeras genom att två grupper av transportparametrar ersätts med ekvivalenta värden, se avsnitt 13.5.6, underavsnittet ”Kolloidbefrämd transport”. Kvoten mellan parametrar för kolloidfria förhållanden och de ekvivalenta värdena som representerar närvaro av kolloider beror bara på kolloidernas massdensitet och fördelningskoefficienten för sorption på kolloider, se **Radionuklidtransportrapporten** för detaljer. Med antagande om en massdensitet på 10 mg/l /Wold 2010/ för kolloider visar det sig att sorption på kolloider har försumbar effekt, se **Radionuklidtransportrapporten**. Huvudskälet till att kolloider inte ökar transporten signifikant är att radionukliderna I-129, C-14 och Ra-226 dominerar utsläppen i när- och fjärrområden, och att I, C och Ra inte har någon stark affinitet för bentonit, se **Datarapporten**. Grundämnen som har stark affinitet för bentonit och som möjligen kan transporteras av bentonitkolloider på något signifikant sätt frigörs inte från bentonitbufferten i tillräckliga kvantiteter för att påverka den totala dosen.

13.7.3 Ytterligare fall som illustrerar barriärfunktioner

Några slutsatser beträffande förlust av barriärfunktioner kan dras från de analyser som redan presenterats. För att ge en fullständigare behandling har följande fall med uteslutna barriäregenskaper postulerats:

- En initial avsaknad av så mycket buffert så att advektiva förhållanden råder i alla deponeringshåll.
- Ett initialt pinnhål i kopparhöljet i alla kapslar.
- En initial stor öppning i kopparhöljet och i segjärnsinsatsen i alla kapslar.
- En kombination av fallen A och C, dvs en initial stor öppning i alla kapslar och advektiva förhållanden till följd av avsaknad av buffert för alla deponeringshåll.
- En kombination av fall C med ett antagande om snabb bränsleupplösning och snabb korrosion av metalldelar. En initial stor öppning i varje kapsel kombineras med antagandet om fullständig bränsleupplösning och metallkorrosion på bara 100 år.

Förlorad geosfärsretention kombineras med vart och ett av de fem fallen, vilket ger upphov till totalt tio utsläppssituationer. Fallen utan retention i geosfären betecknas A* till E*.

I alla dessa fall antas det att återfyllningen och förslutningen är på plats och fungerar som förväntat. Dessutom antas alla aspekter av berget, förutom de relaterade till retention, vara intakta. Det gäller exempelvis grundvattenflödet i närområdet som generellt är lågt och med bara ungefär en sjättedel av deponeringshålen konnekterade med vattenförande sprickor, men också den stabila och gynnsamma grundvattensammansättningen i närområdet. För radionuklidkoncentrationerna i kapselns hålrumsvolym vägs bara lösligheter för grundämnen in om bufferten är på plats. Detta är samma angreppssätt som används i analyserna av korrosions- och skjuvladdscenarierna, se avsnitt 13.5 och 13.6.

Tabell 13-10 ger en överblick av statusen för de fördröjningsrelaterade säkerhetsfunktionerna för fallen, se figur 8-3.

Transport- och dosberäkningarna är probabilistiska, eftersom det är önskvärt att ta hänsyn till både osäkerheter på grund av bristande kunskap i allmänhet och den rumsliga variabiliteten hos deponeringshålens egenskaper och deras tillhörande transportvägar i geosfären. Den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen används för dessa stiliserade beräkningar. Förutom de fallspecifika antagandena som rör förlorade barriärfunktioner hämtas alla transportdata från **Datarapporten**. Detta gäller till exempel korrosionshastigheter, bränsleupplösningshastighet, sorptions- och diffusionsdata samt LDF-värden.

Tabell 13-10. Säkerhetsfunktionernas status med avseende på de tio utsläppssituationerna. I fall som betecknas med en asterisk saknas också retentionen i geosfären.

Grönt: Säkerhetsfunktion intakt

Gult: Säkerhetsfunktion som försvagas med tiden

Rött: Säkerhetsfunktion saknas initialt

	A Ingen buffert	A*	B Pinnhålsskada	B*	C Stor kapseldefekt	C*	D Stor kapseldefekt och ingen buffert	D*	E Stor kapseldefekt och snabb bränsle – och metallomvandling	E*
Begränsad bränsleupplösningshastighet	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Rött	Rött
Begränsad korrosionshastighet för metalldelar	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Rött	Rött
Begränsade lösligheter	Gult	Gult	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Rött	Rött	Grönt	Grönt
Högt transportmotstånd i gränsskiktet kapsel/buffert	Gult	Gult	Gult	Gult	Rött	Rött	Rött	Rött	Rött	Rött
Retardation i buffert	Rött	Rött	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Rött	Rött	Grönt	Grönt
Högt transportmotstånd i gränsskiktet buffert/berg ¹⁾	Rött	Rött	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Rött	Rött	Grönt	Grönt
Retardation i geosfären	Grönt	Rött	Grönt	Rött	Grönt	Rött	Grönt	Rött	Grönt	Rött

¹⁾ När denna säkerhetsfunktion är uppfyllt görs ändå ett pessimistiskt antagande om att spjälkning förekommer i alla deponeringshål. När denna säkerhetsfunktion inte är uppfyllt, dvs när bufferten saknas, begränsas fortfarande grundvattenomsättningen av bergets hydrauliska egenskaper.

Biosfären representeras här av de konstanta LDF-värden som erhålls när utsläppet fördelas i landskapet i enlighet med den tidsberoende fördelningen av utsläppspunkter från förvaret under en interglacial. Eftersom LDF-värden dessutom primärt är lämpliga för att hantera utsläpp som är konstanta under tidsperioder som är jämförbara med varaktigheten av en interglacial, dvs typiskt 10 000 år, görs även en alternativ utvärdering för dessa fall med en fullt tidsberoende modellering av biosfären. Det innebär att utsläppen fördelas i landskapet och att de tidsberoende doserna anges, i stället för ett tidsberoende utsläpp omräknat till dos med hjälp av ett konstant LDF-värde.

I det följande diskuteras varje fall kortfattat med hjälp av konstanta LDF-värden för fallet med spridning av utsläppspunkterna i landskapet. Avsnittet avslutas med sammanfattande redogörelser för alla fall både med LDF-värden och med tidsberoende modellering av biosfären.

Fallen A och A*, initial avsaknad av buffert

En 0,5 m hög sektion av bentonitbufferten antas vara borta, vilket lämnar ett hålrum i form av en ihålig cylinder mellan kapseln och deponeringshålets vägg. Q1-sprickan, om den finns, skär deponeringshålet vid platsen för hålrummet (se figur 13-13). Deponeringshålet är i övrigt fyllt med buffert, och deponeringstunnelns återfyllning antas vara intakt. Detta fall analyseras i avsnitt 13.5.6 som en variant av det centrala korrosionsfallet. För de flesta deponeringshålen är inte grundvattenflödet och sulfidkoncentrationerna tillräckliga för att orsaka kapselbrott under den en miljon år långa analysperioden. Korrosionsberäkningarna tar hänsyn till både den naturliga variabiliteten hos flödes hastigheterna för alla 6 000 deponeringshålen och fördelningen av sulfidkoncentrationen i grundvattnet. Detta gav upphov till ett beräknat genomsnittligt antal kapselbrott motsvarande 0,17 på en miljon år, vilket även används här. Bara deponeringshålen med de högsta flödes hastigheterna i Q1-sprickan bidrar. Detta betyder även att utsläpp till Q2- och Q3-sprickor, se figur 13-13, är försumbara för dessa positioner. Kapslar i positioner utan någon Q1-spricka blir inte otäta i detta beräkningsfall.

För ett kapselbrott modelleras transporten av radionuklider i när- och fjärrområde som följer:

- Den omedelbart frigjorda fraktionen av radionuklidinventariet löses upp i vattnet i hålrummet i kapseln och hålrummet efter den saknade bufferten.
- Nuklider som ligger inbäddade i bränsleelementens metalldelar frigörs till vattnet i hålrummen genom korrosionen av metallerna. Detta antas pessimistiskt ta i genomsnitt tusen år.
- Nuklider som ligger inbäddade i bränslematrisen frigörs till vattnet i hålrummen i takt med bränslematrisens upplösning. Detta antas pessimistiskt ta i genomsnitt 107 år.
- Inga löslighetsgränser är införda, eftersom bufferten inte finns på plats för att fungera som filter för bränslekolloider, vilket krävs för att upprätthålla lösligheter.
- Utsläpp sker från den vattenfyllda volymen till Q1-sprickan, som antas skära deponeringshålet där bufferten saknas. Bara de högsta flödes hastigheterna orsakar kapselbrott. Detta betyder också att utsläppet till geosfären för dessa positioner i grunden kontrolleras av nuklidutsläppet från metalldelarna och bränslematrisen, eftersom grundvattenflödet är tillräckligt stort för att föra bort alla frigjorda nuklider.
- Utvecklingen i fjärrområdet modelleras som i alla andra fall (se fall B nedan), men retentionen i fjärrområdet är i allmänhet liten, eftersom höga flöden vid en deponeringsposition är positivt korrelerade med låga F-värden i geosfären.

Konsekvenserna liknar dem som presenteras i avsnitt 13.5.6, se figurerna 13-28 och 13-29. Den enda skillnaden är att LDF-värden för fördelat utsläpp använts och resultaten visas i figur 13-67 längre fram i detta avsnitt. Många av radionukliderna har avklingat till obetydlig nivå när de första kapselbrotten uppträder efter nära 50 000 år. De dosekvivalenta utsläppen från närområdet domineras av Nb-94 från bränslets metalldelar och Ra-226, Pb-210 och Np-237 från bränslematrisen. Fjärrområdets doser domineras av Nb-94, Se-79, Ra-226 och I-129.

Fallen B och B*, initial genomgående pinnhålsdefekt i alla kapslar

Kapseldefekterna antas vara desamma som de som modellerats i fallet med växande pinnhål, se avsnitt 13.7.2, dvs ett initialt genomgående pinnhål som växer till ett stort hål efter 10 000 år men nu i alla kapslar. Deponeringshålets buffert och deponeringstunnelns återfyllning antas vara intakta. Doskonsekvenserna i biosfären beräknas med de fördelade LDF-värdena, eftersom detta är ett mer realistiskt angreppssätt när utsläpp äger rum från hela förvaret.

Närområdets utveckling i detta fall modelleras som följer:

- Varje kapsel postuleras ha en initial, genomgående defekt. Vatten tränger in i kapseln genom defekten, och fördröjningstiden för att etablera en kontinuerlig vattenväg mellan bränslet och kapselns utsida antas pessimistiskt vara tusen år.
- Den omedelbart frigjorda fraktionen av radionuklidinventariet löses upp i vattnet i hålrummet i kapseln.
- Nuklider som ligger inbäddade i bränsleelementens metalldelar frigörs till vattnet i hålrummet genom korrosionen av metallerna. Detta antas pessimistiskt ta i genomsnitt tusen år.
- Nuklider som ligger inbäddade i bränslematrisen frigörs till vattnet i hålrummet i takt med bränslematrisens upplösning. Detta antas ta i genomsnitt 107 år.
- Löslighetsgränser används eftersom bufferten finns på plats och fungerar som filter för bränslekolloider.
- Utsläpp från kapseln till bufferten inleds efter fördröjningstiden på tusen år, men den ringa storleken på pinnhålsdefekten dämpar i hög grad utsläppshastigheten jämfört med fallet med en stor skada. Efter ytterligare pessimistiskt uppskattade 9 000 år växer sig pinnhålet plötsligt så stort att allt transportmotstånd från kapseln är borta.
- Nukliderna sorberas med varierande effektivitet i bufferten och diffusions- och sorptionsegenskaperna avgör tiden för diffusion genom bufferten. Om tiden är kortare än några få halveringstider för nukliden passerar den till Q1-sprickan i berget. Termiskt inducerad spjälkning antas ha inträffat i alla deponeringshål, vilket betydligt minskar transportmotståndet i gränsskiktet buffert/berg. Utsläppshastigheten bestäms av nuklidkoncentrationen i den yttre delen av bufferten och flödes hastigheten i deponeringshålet. Flödet erhålls från basfallet med den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen.
- Utsläppshastigheten multipliceras med LDF-värdet för ett utsläpp som sprids i landskapet för att erhålla en utsläppshastighet för dosekvivalenter från närområdet.

Fjärrområdets utveckling i detta fall modelleras som för samtliga fall:

- I berget avgör nuklidens sorptionsegenskaper tillsammans med bergets transportegenskaper tiden för transport genom berget till biosfären. Halveringstiden för nukliden avgör om den passerar genom geosfären innan den avklingar i betydande utsträckning.
- Denna utsläppshastighet multipliceras med LDF-värdet för ett utsläpp som fördelas i landskapet för att erhålla en dos från fjärrområdet.

Konsekvenserna liknar dem i pinnhålsscenariot, se figurerna 13-54 och 13-56 för närområdet respektive fjärrområdet. Den enda skillnaden är att alla kapslar nu antas ha defekter, vilket betyder att de probabilistiska resultaten för en enskild kapsel ska multipliceras med 6 000 och att de fördelade LDF-värdena används, vilket leder till att konsekvenserna minskar med typiskt en storleksordning. Resultaten för fjärrområdet för alla 6 000 kapslarna visas i den sammanfattande figur 13-67 senare i det här avsnittet.

Fallen C och C*, initial stor öppning i alla kapslar

Kapseldefekterna antas vara i form av en stor öppning i kopparhöljet och segjämsinsatsen. Deponeringshålets buffert och deponeringstunnelns återfyllning antas vara intakta.

I referensutvecklingen är några av deponeringshålen påverkade av bufferterosion i en utsträckning som får advektiva förhållanden att råda i hålet. För det stiliserade fall som beaktas här antas emellertid ingen sådan erosion, för att mer tydligt påvisa kapselns roll om alla övriga barriärer är intakta. Kombinationer av kapsel- och buffertdefekter analyseras i ett av de fall som beskrivs nedan.

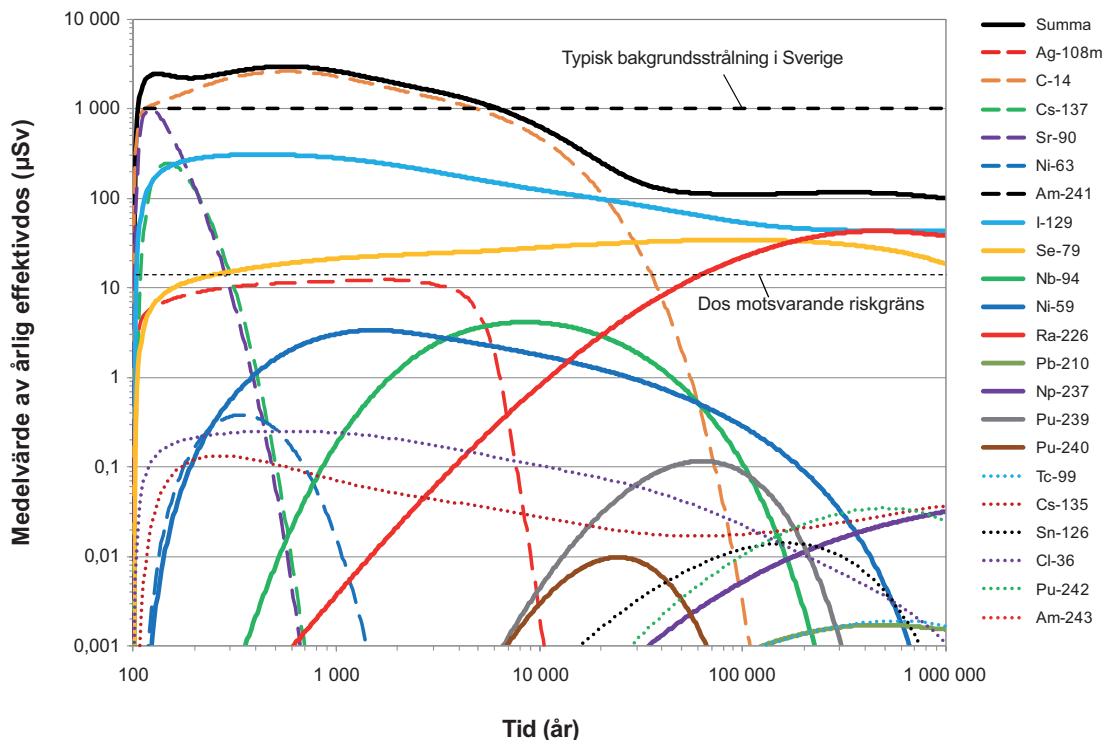
Beräkningsfallet liknar det probabilistiska fallet med isostatisk kollaps för den semikorrelerade DFN-modellen, tillämpat på alla kapslar i förvaret, med skillnaden att kapselbrottet antas existera redan vid deponeringen. Utsläpp från när- och fjärrområden beräknas med hjälp av de modeller för radionuklidtransport som används i scenariot med isostatisk last.

Utvecklingarna för när- och fjärrområden i detta fall är identiska med dem för fallet ovan med initiala pinnhålsdefekter i alla kapslar, med följande undantag:

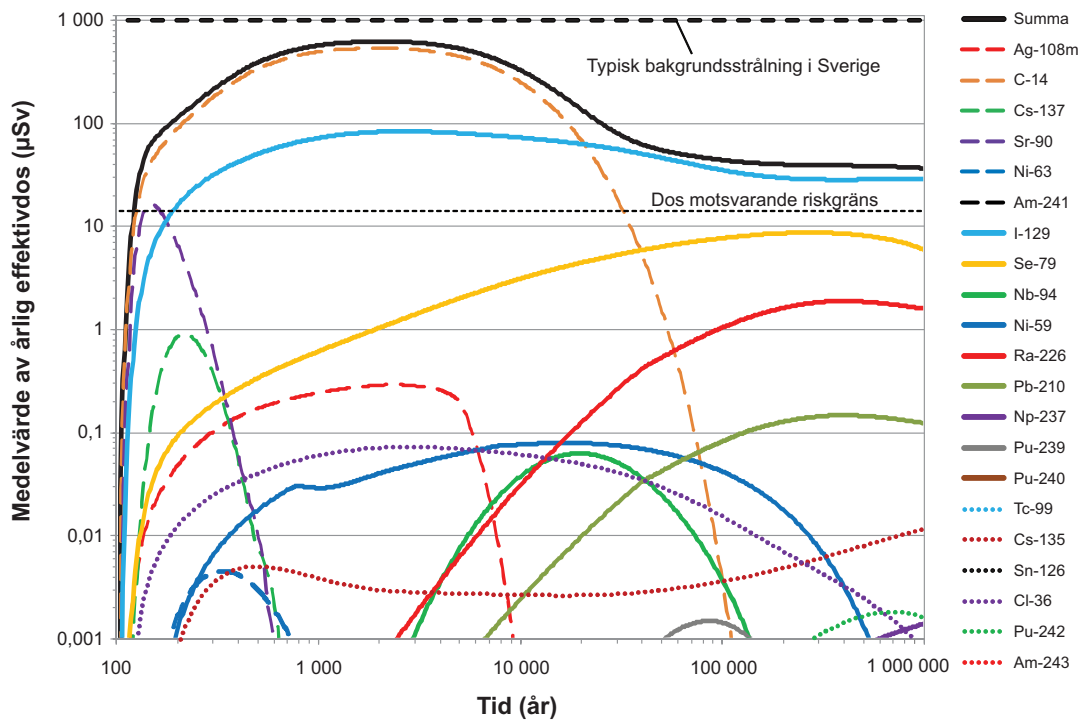
- Efter 100 år antas alla kapslar vara fyllda med vatten och en kontinuerlig vattenväg har etablerats mellan bränslet och kapselns utsida. 100 år är en grov uppskattning, motsvarande en inflödes-hastighet på 0,1 liter/år genom bufferten till kapseln i likhet med vad som antogs för kapselbrott till följd av skjuvning i avsnitt 13.6. Vattenmättnadstiden för närområdet är generellt sett längre än 100 år vid Forsmark.
- Utsläpp från kapseln till bufferten inleds efter 100 år, och de begränsas inte av kapseln, som en följd av antagandet om en stor skada.

Det dosekvivalenta utsläppet från närområdet visas i figur 13-61. Dosen domineras de första 10 000 åren av C-14, Cs-137, Sr-90, Ag-108m, I-129 och Se-79. Efter ungefär 10 000 år bidrar framför allt Se-79, C-14, Ra-226 och I-129 till den totala dosen. Utsläpp av nuklider som sorberar starkt i bufferten, till exempel Pu-238 och Pu-239, är starkt reducerade jämfört med fall D* nedan där även bufferten antas vara borta. Det är även ett betydligt mindre utsläpp av Cs-137, Sr-90 och Ag-180m jämfört med fallet när bufferten är borta.

Dosen från utsläppet från fjärrområdet framgår av figur 13-62. Den högsta totaldosen reduceras med mindre än en storleksordning jämfört med utsläppet från närområdet, medan doser från många av de kortlivade eller sorberande nukliderna reduceras i betydande utsträckning.



Figur 13-61. Dosekvivalent utsläpp från närområdet för fall C*, dvs alla kapslar har en initial stor defekt och bufferten är intakt.



Figur 13-62. Dos från fjärrområdet för fall C, dvs alla kapslar har en initial stor defekt och bufferten är intakt.

Det är anmärkningsvärt att detta helt orealistiska fall med initialt förlorad inneslutningsfunktion för alla kapslarna i förvaret ger utsläpp, omvandlade till doser, som aldrig överskrider bakgrundsstrålningen. Dock fördras inneslutningsfunktionen för en majoritet av kapslarna för att uppfylla föreskrifternas krav på risk vid Forsmark.

Den långsiktiga utsläppshastigheten för I-129 motsvarar med god approximation utsläppshastigheten för denna nuklid från bränslamatrixen. Detta orsakas av den antagna frånvaron av sorption av I-129 och dess långa halveringstid.

Fallen D och D*, initial stor öppning i alla kapslar och advektiva förhållanden till följd av buffertförlust för alla deponeringshål

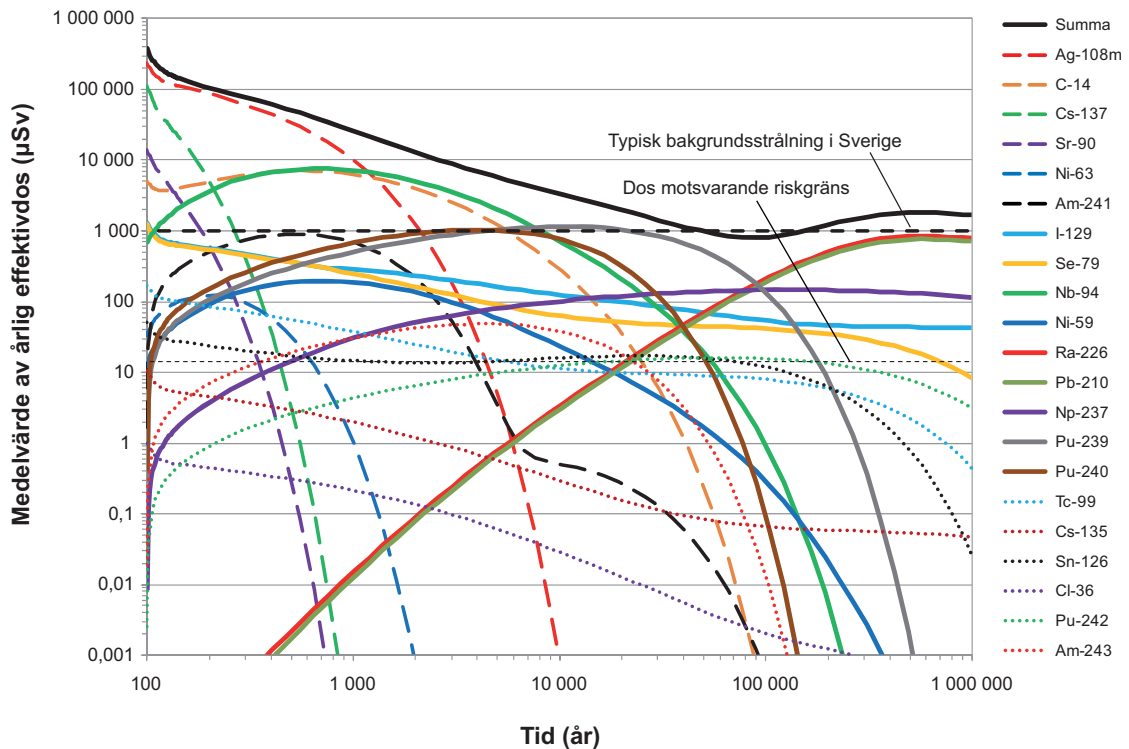
Defekterna antas vara desamma som de som modellerades i korrosionsscenarioet, dvs en stor öppning i kopparhöljet och segjärnsinsatsen och en sektion av bentonitbufferten som saknas där kapseln är otät, vilket lämnar ett hålrum mellan kapseln och deponeringshålets vägg i form av en ihålig cylinder. Deponeringshålet är i övrigt fyllt med buffert, och deponeringstunnelns återfyllning antas vara intakt. Detta betyder att utsläpp sker övervägande till Q1-sprickan om den existerar. Utsläppen från när- och fjärrområdet beräknas med hjälp av de modeller för radionuklidtransport som användes för korrosionsscenarioet tillämpade på alla deponeringshål.

Utvecklingen för när- och fjärrområdet i detta fall är identisk med den i ovan nämnda fall med initiala pinnhålsdefekter i alla kapslar, med följande undantag:

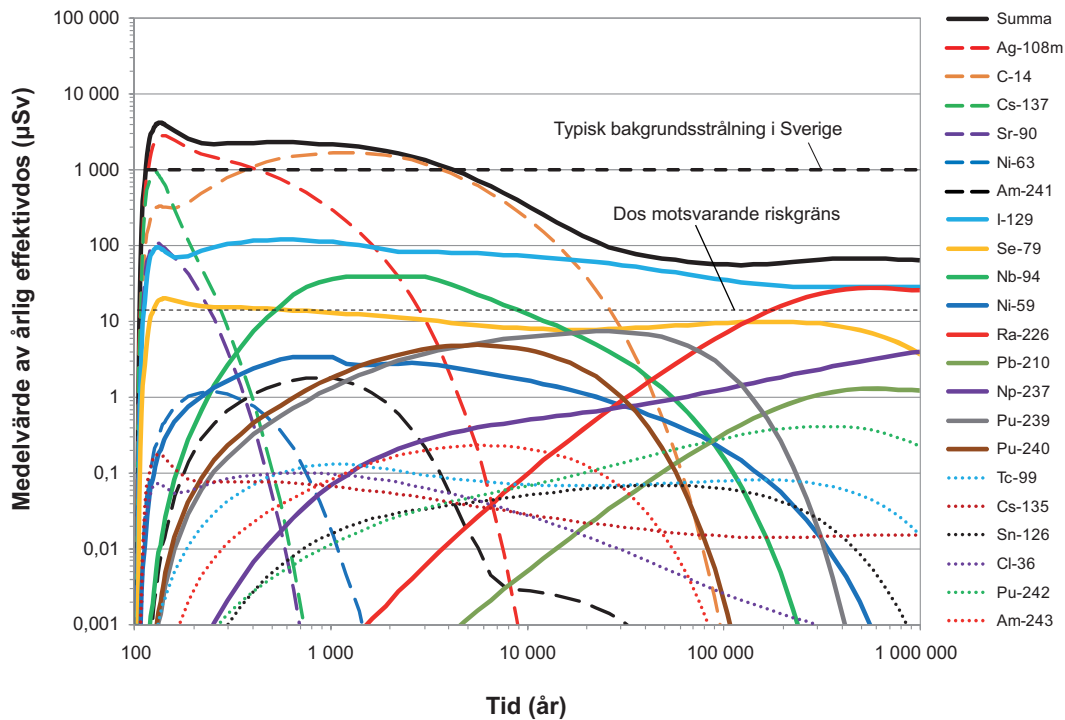
- Efter 100 år antas alla kapslar vara fyllda med vatten och en kontinuerlig vattenväg vara etablerad mellan bränslet och kapselns utsida. 100 år är en grov skattning, motsvarande en inflödes hastighet på 0,1 liter/år till kapseln. Vattenmättnadstiden för närområdet är generellt sett längre än 100 år vid Forsmark.
- Inga löslighetsgränser används eftersom bufferten inte finns på plats för att fungera som filter för bränslekolloider.
- För deponeringshål som har en Q1-spricka sker utsläpp från den vattenfyllda volymen till sprickan, som antas skära deponeringshålet där bufferten saknas. Utsläppshastigheten bestäms av flödes hastigheten i sprickan och storleken på dess skärning med deponeringshålet, vilken antas vara lika stor som deponeringshålets diameter. Flödet erhålls från den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen och multipliceras med en faktor två för att inbegripa det lokalt ökade flödet till följd av hålrummet efter den saknade bufferten.

Det dosekvivalenta utsläppet från närområdet visas i figur 13-63. Dosen domineras de första 10 000 åren av IRF och/eller CRF av Ag-108m, Cs-137, Sr-90, C-14 och Nb-94. Notera att endast den låga flödes hastigheten i Forsmark begränsar utsläppen för IRF/CRF. Efter omkring 10 000 år bidrar Nb-94, Pu-239, Pu-240, Np-237, Ra-226, Pb-210 och I-129 mest till den totala dosen.

Dosen från utsläppet från fjärrområdet visas i figur 13-64. Den högsta totala dosen reduceras med ungefär en faktor tio jämfört med utsläppet från närområdet. För de tidigaste utsläppen är detta en effekt av gångtiden i geosfären. På lång sikt fastläggs starkt sorberande nuklider som Pu-239 och Pu-240 i geosfären. Det är anmärkningsvärt att detta helt orealistiska fall med initial frånvaro av alla transportbegränsningar i de tekniska delarna av förvaret ger upphov till utsläpp från fjärrområdet, omvandlade till doser, som till en början överskrider bakgrundsstrålningen med cirka en faktor fem och långsiktigt ligger mindre än en faktor tio över riskgränsen.



Figur 13-63. Dosekvivalent utsläpp från närområdet för fall D*, dvs alla kapslar har en initial stor defekt och bufferten saknas mellan defekten i kapseln och deponeringshålets vägg.



Figur 13-64. Dos från fjärrområdet för fall D, dvs alla kapslar har en initial stor defekt och bufferten saknas mellan defekten i kapseln och deponeringshålets vägg.

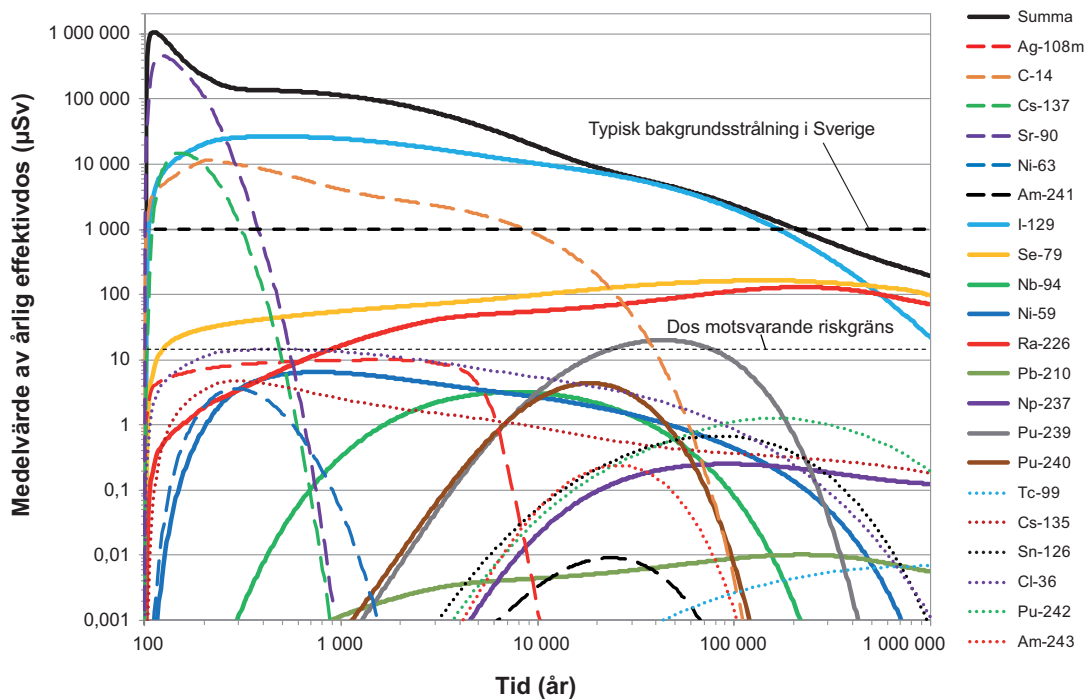
Fallen E och E*, initial stor öppning i alla kapslar samt snabb bränsleupplösning och metallkorrosion

Dessa fall är identiska med fallen C och C* (alla kapslar har en stor öppning i kopparhöljet och segjärnsinsatsen), utom det att i fallen E och E* antas fullständig bränsleupplösning och metallkorrosion äga rum inom 100 år efter det att vatten får kontakt med bränslet. Inneslutningsfunktionen inte bara för kapseln utan också för bränslematrisen och de strukturella delarna av bränslet antas därför vara frånvarande. Deponeringshålets buffert och deponeringstunnelns återfyllning antas vara intakta.

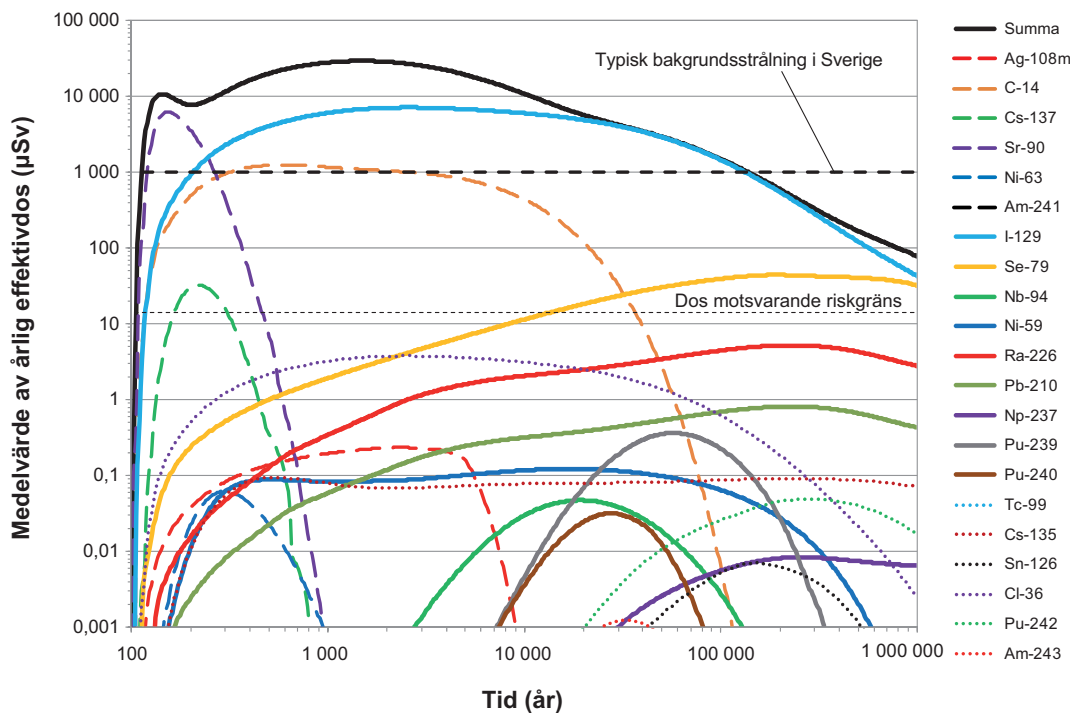
Utvecklingen för när- och fjärrområdet är i dessa fall identisk med den för fallen C och C* med undantag av den snabba bränsleupplösningen och metallkorrosionen.

Det dosekvivalenta utsläppet från närområdet illustreras i figur 13-65. Dosen domineras av C-14, Cs-137, Sr-90 och I-129 i mer än 10 000 år. På längre sikt bidrar Ra-226 och Se-79 tillsammans med I-129 mest till den totala dosen. Notera att utsläppet av Ag-108m är identiskt med det i fall C*, eftersom detta utsläpp styrs av lösligheten för Ag och inte av korrosion i modellen. De tidiga utsläppen av Sr-90, Cs-137 och I-129 har ökat i omvänt förhållande till dessa nuklidens IRF-värden; fallen E och E* motsvarar ett antagande om 100 procent IRF för alla nuklider. Minskningen av I-129 över mycket lång tid orsakas inte genom avklingning utan av att förvaret och berget töms på I-129 genom uttransport.

Dosen från utsläppet från fjärrområdet visas i figur 13-66. Den högsta totaldosen reduceras med mer än en storleksordning jämfört med utsläppet från närområdet och doser från många av de kortlivade eller sorberande nukliderna reduceras åtskilligt mer.



Figur 13-65. Dosekvivalent utsläpp från närområdet för fall E*, dvs alla kapslar har en initial stor defekt i kombination med en snabb bränsleomvandling och metallkorrosion, medan bufferten är intakt.



Figur 13-66. Dos från fjärrområdet för fall E, dvs alla kapslar har en initial stor defekt i kombination med en snabb bränsleomvandling och metallkorrosion, medan bufferten är intakt.

Sammanfattning av resultaten med fördelade LDF-värden

Den summerade dosen för varje fall som diskuterats ovan anges i figur 13-67.

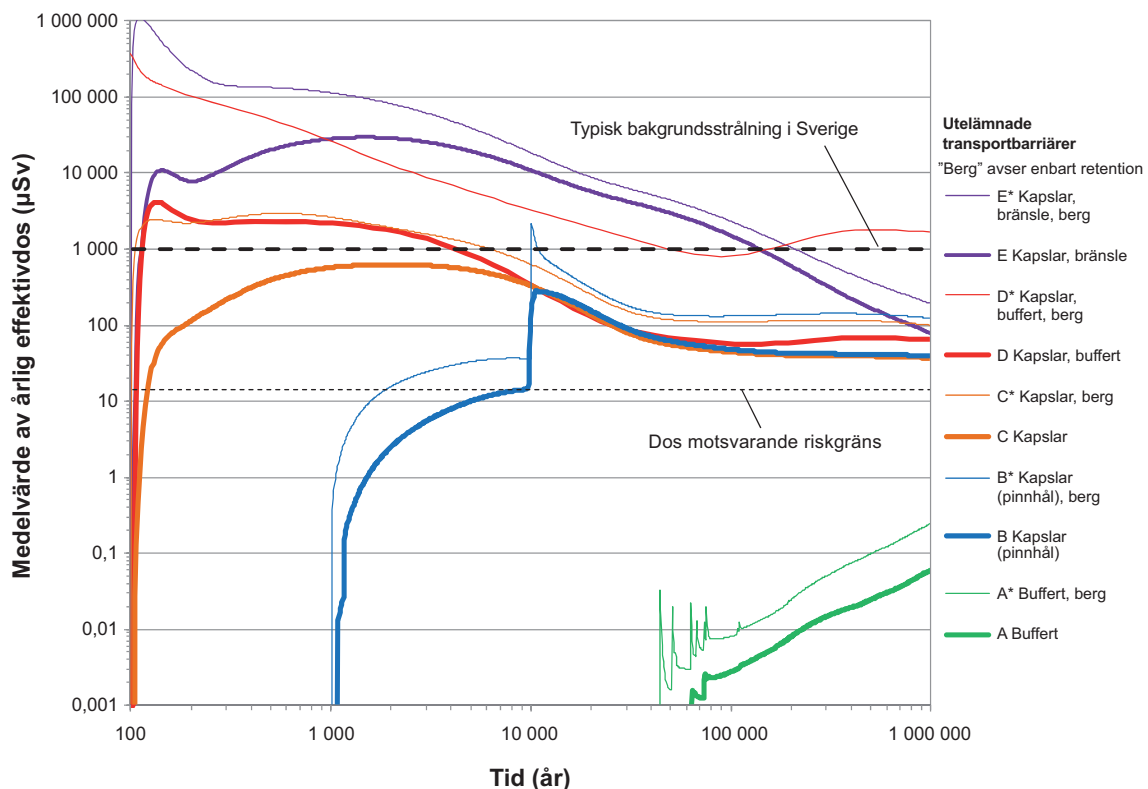
Följande noteras:

Efter ungefär 10 000 år befinner sig dosen från alla fallen under den dos som orsakas av typisk bakgrundsstrålning i Sverige, utom i det fall där retentionsegenskaper hos både kapslar, buffert och berg försummas (fall D*) och det fall där snabb bränsleupplösning kombineras med defekta kapslar (fallen E och E*). Bergets låga flöde och gynnsamma grundvattenkemi samt närvaron av återfyllning och förslutning av förvarstunneln erbjuder således väsentligt skydd mot ett kärnbränsle med oförändrad upplösningshastighet.

Om alla kapslar har stora defekter initialt medan barriärsystemet i övrigt är intakt, dvs fall C, överskrider inte den högsta årsdosen för de mest exponerade individerna i landskapet den som orsakas av typisk bakgrundsstrålning i Sverige, dvs 1 mSv. Efter längre tid än 10 000 år är den årliga dosen mindre än en storleksordning över riskgränsen 0,014 mSv.

Om alla kapslar har stora defekter initialt, och om också bufferten antas vara borta mellan kapselskadan och deponeringshålets vägg, dvs fall D, är dosen ungefär tio gånger bakgrundsstrålningen de första hundratalen år, men är efter tusen år ganska likartad den för fallet där bufferten finns på plats, fall C. Detta antyder att bufferten inte är viktig som retentionsbarriär i detta tidsperspektiv om man ser till totaldos. En jämförelse mellan figurena 13-63 och 13-61 visar emellertid att bufferten har en betydande inverkan på utsläppen från närområdet av många sorberande nuklider som inte dominerar dosen.

Med stora skador på kapslarna, ingen buffert och ingen retention i berget, fall D*, pekar beräkningsresultaten på årliga doser på Sievertnivå under de första tusen åren. Detta visar på nödvändigheten av att på rätt sätt skydda människor och miljön från det använda kärnbränslet, speciellt inom ett



Figur 13-67. Resultat av stiliserade fall för att illustrera förlust av barriärfunktioner. Notera att försummandet av den barriär som "berget" utgör i dessa fall bara syftar på retentionen av radionuklider i sprickor, medan hänsyn fortfarande tas till den gynnsamma låga flödes hastigheten på förvarsdjup och de gynnsamma geokemiska förhållandena.

tusenårsperspektiv. Det noteras att en mer realistisk behandling av korrosion hos AgInCd-legeringen i PWR-styrstavarna sannolikt skulle minska den totala dosen, som domineras av Ag-108m, med åtminstone en faktor tio de första hundra åren och mer mellan hundra och tusen år. Korrosionsdata för styrstavarna diskuteras i avsnitt 3.2.7 i **Datarapporten**.

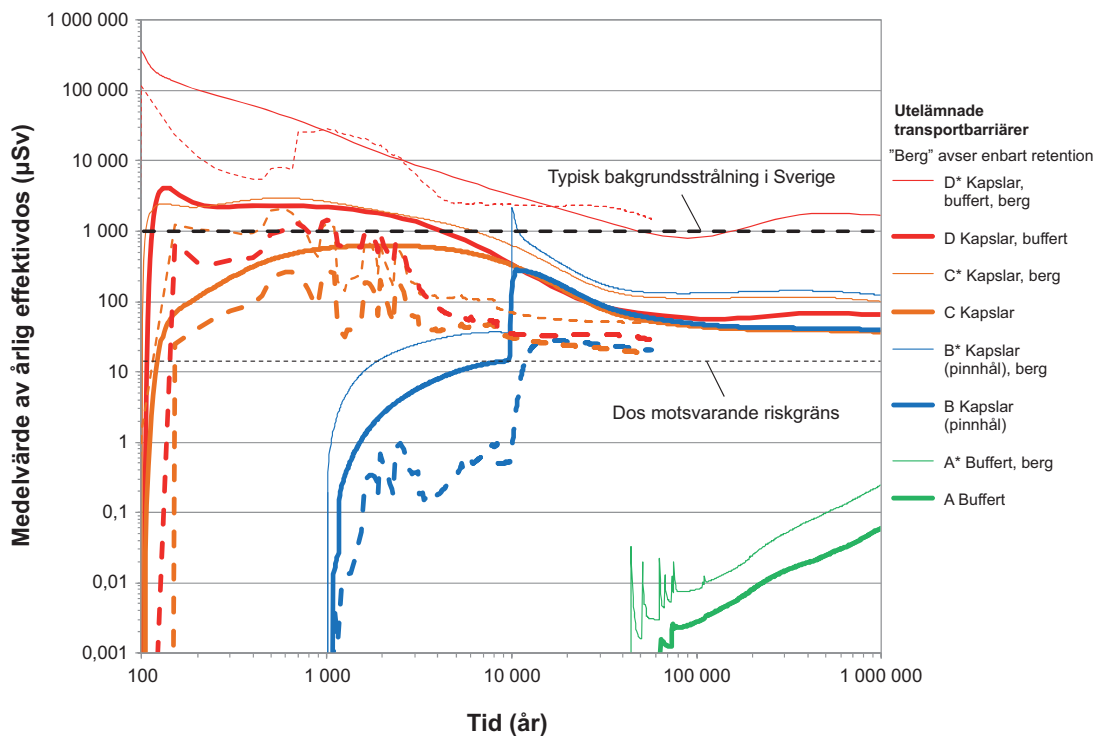
Bortom 10 000 år är den totala dosen jämförbar med den som orsakas av bakgrundsstrålningen även om man bortser från retentionsegenskaperna hos alla tre barriärerna, fall D*.

Som förväntat är fallen med initiala pinnhålsdefekter, fall B, och det med stor initial defekt, fall C, ganska likartade bortom 10 000 år när pinnhålsdefekterna antas ha växt till stora defekter. Det noteras också att retentionen i berget inte påverkar den totala dosen mycket för dessa fall efter ungefär tusen år. En jämförelse mellan figurerna 13-62 och 13-61 visar emellertid att berget har en betydande inverkan på fjärrområdesutsläppen av många sorberande nuklider som inte dominerar dosen.

En jämförelse mellan fallen C och E visar den avsevärda inneslutningsförmågan som det använda kärnbränslet i sig har under ett tidsspänn av mer än 100 000 år.

Sammanfattning av resultaten med tidsberoende modellering av biosfären

Som nämndes i inledningen är LDF-värdena primärt anpassade för att hantera utsläpp som är konstanta över tidsperioder jämförbara med varaktigheten av en interglacial, dvs typiskt 10 000 år. Därför utvärderades utsläppen för de flesta av de ovannämnda fallen även med en fullständig tidsberoende modellering av biosfären. Det innebär att utsläppen fördelas i landskapet i överensstämmelse med den tidsberoende rumsliga fördelningen av utsläppspunkter från förvaret, och att tidsberoende doser presenteras, snarare än ett tidsberoende utsläpp omräknat till dos med hjälp av ett konstant LDF-värde. Denna modellering gällde för antagna tempererade förhållanden i 60 000 år. Resultaten framgår av figur 13-68. De heldragna kurvorna utgör doser som erhållits genom fördelade LDF-värden (dvs samma kurvor som i figur 13-67). De streckade kurvorna är motsvarande doser erhållna genom tidsberoende modellering av biosfären.



Figur 13-68. Resultat av stiliserade fall för att illustrera förlust av barriärfunktioner. Heldragna linjer: Samma som i figur 13-67 (dosomvandling genom fördelade LDF-värden). Streckade linjer: Motsvarande fall med tidsberoende dosmodellering.

De tidsberoende streckade kurvorna ligger i allmänhet en storleksordning lägre än kurvorna framställda med LDF-värden. Det enda undantaget är fallet när retentionsegenskaperna hos kapsel, buffert och berg försummas, fall D*. Här överskrider de tidsberoende doserna de dosvärden som erhållits genom användning av LDF efter omkring tusen år för Ag-108m och efter omkring 20 000 år för C-14. Detta förorsakas av ackumulation och fördröjningseffekter i biosfären. Utsläppet av Ag-108m från närområdet minskar snabbt under de initiala hundratals åren och således även utsläppet multiplicerat med LDF-värdet. I det tidsberoende fallet ackumuleras en del Ag-108m i landskapet och detta leder i kombination med utvecklingen av landskapsobjekt till ett fördröjt utsläpp som överskrider utsläppet erhållet genom LDF-värden.

13.8 Radionuklidtransport i gasfas

I det här avsnittet behandlas radionuklidtransport i gasfas som den beskrivs av processerna Bu26, BfT22 och Ge25 för bufferten, återfyllningen i deponeringstunneln och geosfären.

Bildandet av en gasfas är inte möjligt i korrosionsscenarioet, eftersom det inte finns någon buffert som kan innehålla gasen i det fallet och vätgas är tillräckligt löslig i vatten för att föras bort med det advektiva flödet, dvs gas kan bara ackumuleras om bufferten är intakt. Vätgasens löslighet beror av både gasbildningshastigheten och tillgången på vatten. Följande beskrivning gäller för skjuvlastscenariot och de hypotetiska fall som tar upp initiala pinnhålsdefekter och kapselbrott till följd av isostatisk last.

Tätningsegenskaperna hos bufferten möjliggör uppbyggnad av ett gastryck och ett pulsutsläpp av vätgas från en otät kapsel som resultat av korrosion i järninsatsen. Några radionuklider kan potentiellt övergå till gasfasen och på så vis transporteras till ytan mycket snabbare än som vore fallet för vattenvägen. I praktiken är det sannolikt bara C-14 och Rn-222 som övergår till gasfas i någon betydande utsträckning. (H-3 förväntas ha avklingat till obetydlig nivå innan gasutsläpp kan ske.)

Det antas att om gasproduktionen överstiger förmågan hos det omgivande grundvattnet att lösa upp gasen och transportera iväg den från kapseln så kommer ett tryck att byggas upp inuti och i närheten av kapseln. Baserat på belägg från försök /Harrington och Horseman 2003/ antas bentoniten till slut öppnas genom sprickbildning och släppa ut gas när det interna trycket överstiger 20 MPa. Ett snabbt utflöde skulle kunna förväntas tills trycket faller till värden under cirka 10 MPa, då bufferten skulle täta och ytterligare gastransport skulle ske genom diffusion (se emellertid också nedan). Detta betyder att hälften av den gas, som bildas genom korrosion inne i kapseln, skulle frigöras omedelbart tillsammans med de radionuklider som denna gasmängd innehåller. Varken bufferten eller geosfären förväntas avsevärt fördröja transporten till biosfären.

Efter den initiala genombrottpulsen antas transportvägen förbli öppen så länge som det finns betydande gasproduktion i kapseln. Efter genombrottpulsen förväntas gasen frigöras med samma hastighet som den produceras genom korrosion. Bufferten kommer bara att stänga till om gasproduktionen faller till nivåer där gasen kan upplösas och diffundera iväg. Detta innebär att antingen kommer vägen ut att förbli öppen så länge som det finns en gaskälla eller kommer vägen att öppnas och stängas så det leder till upprepade gascykler.

På grund av osäkerheterna kring den kemiska formen för kol i det använda kärnbränslet antas det pessimistiskt att allt C-14 kan övergå till gasfasen. Hela inventariet av Rn-222 förutsätts också ingå i gasfasen.

Tiden för gasgenombrott bestäms av tiden för brottet i kapselns kopparhölj och av korrosionshastigheten hos kapselinsatsen, se avsnitt 13.5.2. Vid tidpunkten för genombrott antas halva inventariet av C-14 och Rn-222 avgå omedelbart till biosfären. Det återstående gasinventariet (och det Rn-222 som alstras) antas sedan avgå tillsammans med den gas som produceras kontinuerligt. Detta utsläpp bortses emellertid ifrån, eftersom det kommer att vara obetydligt i jämförelse med pulsutsläppet. Om utsläppet äger rum inom de första 10 000 åren (osannolikt) skulle utsläppet av C-14 utgöra ungefär 25 GBq. Ett utsläpp av Rn-222 skulle motsvara ungefär 45 GBq om utsläppet inträffade efter 100 000 år.

I /SKB 2006g, a/ presenteras de beräknade exponeringarna från pulsutsläpp av C-14 och Rn-222. C-14 kan frigöras som metan (CH₄) eller koldioxid (CO₂). Det antas att om C-14 frigörs från förvaret som metan kommer det att oxideras till koldioxid av markorganismer. Det finns flera alternativ vad gäller metanets öde på dess väg mot ytan:

1. Ingenting händer och det kommer att släppas som gas i atmosfären.
2. Mikroorganismer införlivar metan i biosyntesen av andra organiska ämnen (dvs inte en oxidation). Slutligen kommer detta organiska kol att frigöras som CO₂ genom respiration. Detta kan inträffa i berget likväl som i avlagringarna.
3. Andra mikroorganismer utnyttjar kolkällan och producerar CO₂ (dvs en oxidation). Detta kan inträffa i berget likväl som i avlagringarna.
4. Den producerade CO₂ kommer antingen avgå som gas till atmosfären eller användas i fotosyntesen av akvatiska eller terrestra alger/växter. Detta kan ske i ytliga ekosystem.

Således kommer, med ett pessimistisk synsätt, utsläppet i form av CO₂ åtminstone att hanteras i biosfärsmodellen innan det släpps ut i atmosfären. Metan som släpps ut i atmosfären kommer sannolikt inte att utnyttjas. Dock beaktas inte den potentiellt ökade rörligheten för en gas i geosfären.

Radon är en ädelgas och genomgår inte kemiska omvandlingar. Två exponeringsfall beaktas, ett utomhus där radionuklider kan inhaleras eller konsumeras via växtupptag inom ett område på 10 000 m² som utsätts för en vindhastighet på 2 m/s med en blandningshöjd på 20 m, och det andra inandning av radionuklider inomhus i ett hus med en volym på 1 000 m³ och en ventilationshastighet på 2 h⁻¹. För C-14 kan exponering ske genom inandning eller intag, och för Rn-222 behöver hänsyn enbart tas till inandning av Rn-222 och dess radioaktiva döttrar. Resultaten sammanfattas i tabell 13-11. Det är värt att notera att ingen hänsyn tas till avklingning under övergången från förvar till yta, vilket gör resultaten ifråga än mer pessimistiska med en halveringstid på bara 3,8 dagar för Rn-222.

Om gastrycket byggs upp under en period med nedisning måste det hydrostatiska trycket från isen adderas till gasgenombrottsstrycket. Detta kan leda till inre tryck på ungefär 50 MPa inne i kapseln. Om isen drar sig tillbaka hastigt kan detta resultera i tryckfall på ungefär 40 MPa och som en följd skulle 80 procent av gasinnehållet frigöras som en puls.

Den högsta dosen från en gaspuls med Rn-222 uppträder i byggnader. Den ligger under de föreskrivna gränserna för en årlig genomsnittlig livstidsrisk för ett förvar och är betydligt lägre än konsekvenserna av dagens gränsvärde på 200 Bq/m³ för radon i byggnader i Sverige, som motsvarar ungefär 2 mSv/år.

Tabell 13-11. Beräknad genomsnittlig årlig livstidsrisk för pulsutsläpp av C-14 och Rn-222 /SKB 2006g/, uppdaterat med de inventarsdata som använts i SR-Site.

Exponeringsväg	C-14 (µSv) (25 GBq-utsläpp)	Rn-222 (µSv) (45 GBq-utsläpp)
Intag	0,033	–
Inandning utomhus	5,5 · 10 ⁻⁵	0,20
Inandning inomhus	0,0035	8,3

13.9 Risksummering

13.9.1 Inledning

Den beräknade risken som funktion av tid är en avgörande storhet när det gäller att visa att slutförvarets uppfyller ställda krav. Det här avsnittet innehåller en summering av riskbidragen från de analyserade scenarierna.

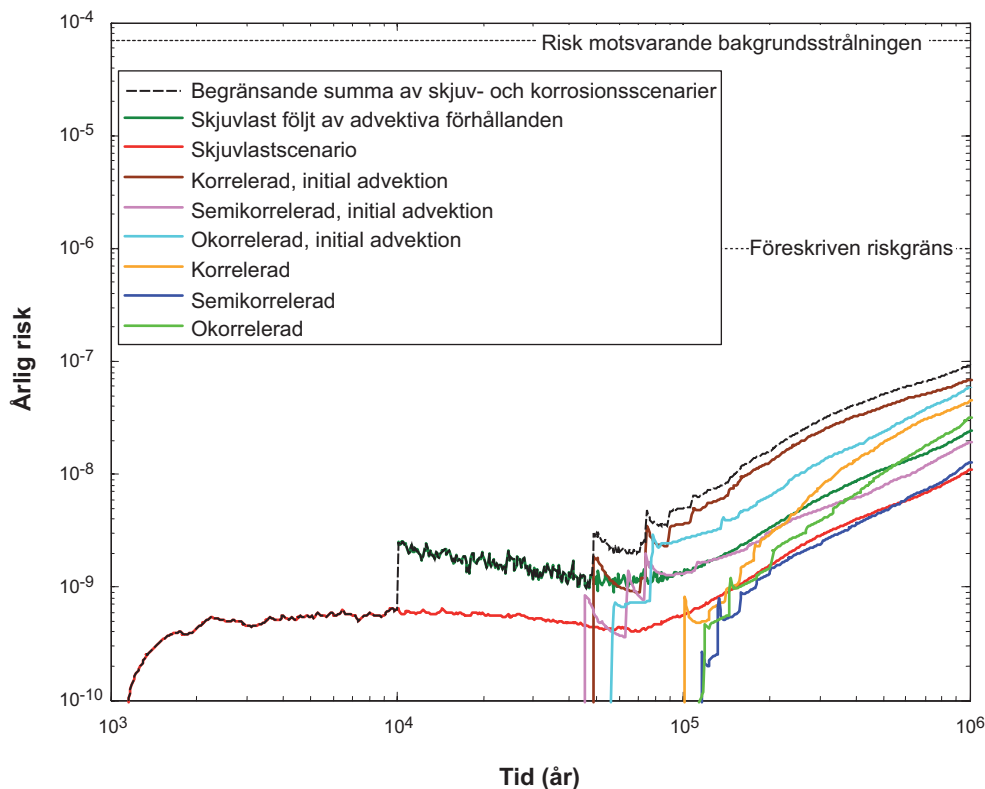
Som framgår av de föregående avsnitten i detta kapitel kan det uppstå radiologiska konsekvenser för scenarierna med kapselbrott till följd av kopparkorrosion och till följd av skjuvlast. I det följande beaktas vart och ett av dessa för sig, och sedan diskuteras den totala risken förknippad med förvaret.

Det är värt att notera att också huvudscenariot ger upphov till konsekvenser och att dessa bedöms som likvärdiga med det centrala korrosionsfallet och inordnas i korrosionsscenarioet.

Som underlag för diskussionen omräknas ett antal doskurvor framtagna i analyserna av korrosions- och skjuvlastscenarierna till risk och visas i figur 13-69. Faktorn för omvandling från effektiv dos till risk på $0,073 \text{ Sv}^{-1}$ har använts i överensstämmelse med föreskrifterna från SSM, se bilaga A.

13.9.2 Risker förknippade med korrosionsscenarioet

Konsekvenser har beräknats för de sex korrosionsvarianter som identifierats i korrosionsscenarioet, var och en med transportdata och förhållanden som hänförs till basfallet. För den centrala korrosionsvarianten har fem ytterligare fall beräknats för att undersöka alternativa transportförhållanden och data.



Figur 13-69. Riskkurvor uttryckta som årlig individrisk. Flera alternativ för korrosionsscenarioet och två för skjuvlastscenarioet visas. Den gränssättande, streckade kurvan utgör summan av kurvan för skjuvlastbrottet följt av advektiva förhållanden (mörkgrön) och kurvan för den variant av korrosionsscenarioet som ger högst risk (brun). Risker förknippade med huvudscenariot inberäknas i korrosionsscenarioet, eftersom den är likvärdig med det semikorrelerade fallet (blå).

Beaktande av de sex korrosionsvarianterna

De osäkerheter som bottenar i erosionsprocessen illustreras genom skillnaderna mellan fallet med erosionsmodellen i SR-Site och fallet med det mycket pessimistiska antagandet om initial advektion, detta för en given hydrogeologisk DFN-modell. Fallen med initial advektion sätter en övre gräns för de möjliga konsekvenserna av buffertens erosionsprocess, uttryckt i termer av korrosion. Detta begränsar den påverkan på risken som kommer av osäkerheter rörande buffererosionsprocessen och omfattar effekter av gradvis försämrade funktioner hos bufferten. Detta är emellertid en högst pessimistisk övre gräns för konsekvenserna. Det hävdas därför att de centrala korrosionsfallen är rimliga och försiktiga representationer av risken förknippade med korrosionsscenarioet. Eftersom det emellertid inte är möjligt att kvantifiera flera av de osäkerheter som är förknippade med erosionsprocessen inkluderas också de pessimistiskt begränsande fallen med initial advektion som alternativ i risksummeringen, under beaktande att detta fall är klart orealistiskt med avseende på erosionsprocessen.

Det noteras också att det finns tre korrosionsvarianter där advektiva förhållanden inte uppträder i några deponeringshål och där inga kapselbrott orsakade av korrosion inträffar. Riskerna förknippade med dessa varianter är därför noll.

Osäkerheterna förknippade med den hydrogeologiska DFN-modellen illustreras av skillnaderna mellan fallen med de tre olika hydrogeologiska DFN-modellerna utifrån ett givet antagande om buffererosion. Den semikorrelerade DFN-modellen stämmer bättre med förståelsen av de transmissiva egenskaperna hos sprickor i kristallint berg. De okorrelerade och helt korrelerade modellerna är extrema varianter av korrelationen mellan sprickstorlek och transmissivitet, och betraktas båda som orealistiska. Eftersom den semikorrelerade modellen emellertid ger de minsta konsekvenserna, och eftersom det är omöjligt att kvantifiera graden av korrelation i strikt mening, inkluderas också de okorrelerade och helt korrelerade modellerna som alternativ i risksummeringen.

Beaktande av de fem alternativa transportfallen

Ifråga om andra transportförhållanden har fem alternativ till det centrala korrosionsfallet beräknats för den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen (ingår inte i figur 13-69). De två fallen med rörligt torium i närområdet respektive hänsyn till löslighetsbegränsningar ger något mindre doskonsekvenser än det centrala korrosionsfallet. De tre beräkningarna med tidsberoende flöde och kolloidbefrämd transport i geosfären pekar på att doskonsekvenserna minskar om grundvattenflödet, K_r -värden i berg och LDF-värdena tillåts variera i överensstämmelse med en förenklad klimatförändring för referensutvecklingen. Vidare kan doskonsekvenserna tillfälligt öka med en faktor mindre än tre vid kolloidbefrämd transport med ett högst pessimistiskt antagande om en kolloidkoncentration på 10 g/liter längs med hela transportvägen i geosfären under 30 procent av både de tempererade och de glaciala klimatperioderna, se figur 13-34.

Baserat på dessa resultat betraktas det centrala korrosionsfallet, med transportförhållanden enligt basfallet, som en rimlig, försiktig representation av risken förknippad med korrosionsscenarioet för den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen, då hänsyn tas till osäkerheter i transportförhållandena. Detta antyder också att de fem andra korrosionsvarianterna, som bara beräknats med transportförhållanden enligt basfallet, utgör lämpliga representationer med avseende på antaganden beträffande radionuklidtransport.

Bidrag från IRF-pulsen

Den årliga risken förknippad med bidraget från IRF-pulsen erhålls genom att multiplicera dess bidrag till den årliga genomsnittliga dosen (beräknad som för det centrala korrosionsfallet, se tabell 13-6 i avsnitt 13.5.4) med $0,073 \text{ Sv}^{-1}$. Resultatet av denna procedur visas i tabell 13-12 för fallet som ger den största risken, dvs det med den helt korrelerade hydrogeologiska DFN-modellen och med antagande om initial advektion. Som framgår av tabellen är den högsta årliga risken $4,7 \cdot 10^{-10}$, dvs mer än tre storleksordningar under riskgränsen. Genom att i varje tidsintervall jämföra pulsriskerna med riskkurvan kan slutsatsen dras att pulsutsläppen ger försumbara bidrag till den beräknade risken. De måste emellertid beaktas i samband med redovisningen av riskutspädning, se nedan. Det är också värt att notera att denna behandling bygger på att tempererade förhållanden råder. Att inkludera sannolikheter för periglaciala och glaciala klimatförhållanden skulle reducera den beräknade risken ytterligare.

Tabell 13-12. Risk förknippad med pulsutsläppet i fallet med den korrelerade hydrogeologiska modellen och initial advektion, se vidare avsnitt 13.5.4.

Tidsintervall [år]	P_{Fail}	P_{Expo}	$D_{TotPulse}$ [μSv]	Arlig risk
0–100 000	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	6.3 ^{a)}	$2.0 \cdot 10^{-10}$
100 000–200 000	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	5.9	$4.7 \cdot 10^{-10}$
200 000–300 000	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	5.5	$4.7 \cdot 10^{-10}$
300 000–400 000	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$9.0 \cdot 10^{-4}$	5.3	$3.5 \cdot 10^{-10}$
400 000–500 000	$8.2 \cdot 10^{-2}$	$8.2 \cdot 10^{-4}$	5.0	$3.0 \cdot 10^{-10}$
500 000–600 000	$7.3 \cdot 10^{-2}$	$7.3 \cdot 10^{-4}$	4.8	$2.6 \cdot 10^{-10}$
600 000–700 000	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$	4.6	$2.0 \cdot 10^{-10}$
700 000–800 000	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$9.0 \cdot 10^{-4}$	4.5	$3.0 \cdot 10^{-10}$
800 000–900 000	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	4.4	$3.7 \cdot 10^{-10}$
900 000–1 000 000	$8.2 \cdot 10^{-2}$	$8.2 \cdot 10^{-4}$	4.3	$2.5 \cdot 10^{-10}$

a) Detta värde bestämdes för tidpunkten för det första kapselbrottet, 48 000 år.

13.9.3 Risk förknippad med skjuvlastscenariot

De två riskkurvor som förknippas med det skjuvlastscenariot som visas i figur 13-69 erhålls från den beräknade årliga genomsnittliga dosen för fallet med intakt buffert i enlighet med figur 13-48 och fallet med advektiva förhållanden i deponeringshålet, se figur 13-52, tillämpat efter pessimistiskt valda 10 000 år för att uppnå advektiva förhållanden genom buffererosion. Dessa fall är båda begränsande med avseende på den pessimistiska behandlingen av sannolikheten för jordskalv, av transportförhållandena i närområdet och på försummandet av retention i geosfären. Vid en jämförelse mellan dem är det fallet med advektiva förhållanden som är begränsande.

Eftersom förekomsten av jordskalv är en stokastisk process kan det inte heller uteslutas att ett jordskalv med skadeverkningar skulle kunna inträffa under de inledande tusen åren. Sannolikheten att en av de 6 000 kapslarna har gått sönder i slutet av den första tusenårsperioden uppskattas till $2,4 \cdot 10^{-5}$, se avsnitt 10.4.5, dvs det skulle behöva byggas 40 000 förvar med 6 000 kapslar vardera för att det statistiskt skulle förväntas uppstå ett kapselbrott under de första tusen åren. Trots denna extremt låga sannolikhet beräknades ett riskbidrag för de första tusen åren med resultatet att dosen hamnar under $0,001 \mu Sv/\text{år}$, se figur 13-49 i avsnitt 13.6. Detta motsvarar en årlig risk på $10^{-10}/\text{år}$, dvs under riskskalan för figur 13-69.

Riskbidraget från IRF-pulsen kan behandlas på ett liknande sätt som ovan, där bara p_{Fail} -värdena skulle skilja sig. Då dessa värden är lägre för skjuvlastscenariot (den totala sannolikheten för kapselbrott över hela den en miljon år långa analysperioden är 0,079), och risken för korrosionsscenarioet är mycket liten, görs ingen sådan redovisning.

13.9.4 Riskutspädning

Frågan om riskutspädning diskuteras i metodikavsnittet 2.6.2 och måste tas med både för korrosionsscenarioet och för skjuvlastscenariot. Doser i båda dessa scenarier består av ett kontinuerligt bidrag och ett relativt kort pulsbidrag.

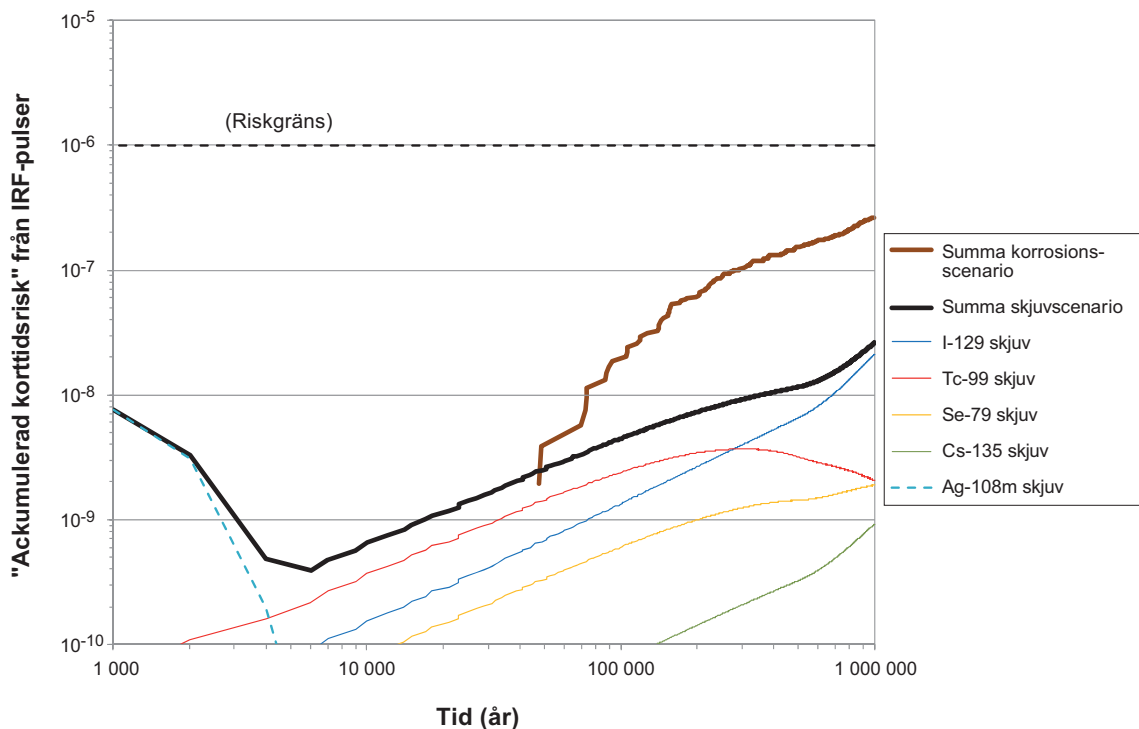
Den totala dosen från de kontinuerliga bidragen har för en bestämd brottid ett initialt högsta värde med begränsad varaktighet, åtföljt av en stigande kurva som generellt växer förbi det initiala högsta värdet. Eftersom detta betyder att den maximala dosen uppträder vid slutet av analysperioden på en miljon år är riskutspädning inget problem för de kontinuerliga bidragen. Den maximala risken upplevs av samma hypotetiska generation som lever vid slutet av analysperioden, oberoende av brottid. Detta bekräftas genom att det maximala medelvärdet ($0,177 \mu Sv/\text{år}$) jämförs med medelvärdet av de maximala värdena i varje realisering ($0,179 \mu Sv/\text{år}$) för det centrala korrosionsfallet; se avsnitt 2.6.2 för en förklaring av dessa begrepp. För skjuvlastscenariot är det maximala medelvärdet $0,15 \mu Sv/\text{år}$ och medelvärdet av de maximala värdena i varje realisering $0,28 \mu Sv/\text{år}$.

Beträffande pulsbidragen är situationen annorlunda. Doser inträffar omedelbart efter kapselbrottet och pågår under korta tidsintervaller jämfört med analysperioden. Den probabilistiska behandlingen av den årliga medeldosen i enlighet med tabell 13-12 leder till riskutspädning som en följd av fördelningen av brottider. De högsta värdena som ges i tabell 13-5 för det centrala korrosionsfallet illustrerar sådana doser. För att hantera riskutspädning för sådana kortvariga utsläpp föreslås det i bilaga 1 till SSMFS 2008:37, återgiven i bilaga A till den här rapporten, att riskutspädning kan hanteras genom att beräkna en ”ackumulerad korttidsrisk” (SKB:s terminologi) enligt

$$D_{\text{TotPuls}}(T) \cdot \int_{T_0}^T f(\tau) d\tau \cdot 0,073 \text{ Sv}^{-1}$$

och jämföra med riskgränsen. I detta uttryck utgör T_0 tidpunkten för förvarets förslutning och f är den tidsberoende frekvensen för kapselbrott. Resultatet av en sådan beräkning för korrosions- (korrelerat fall och initial advektion) och skjuvlastscenarierna framgår av figur 13-70. Resultatet visar den maximala risk som framtida individer skulle kunna exponeras för vid ett tillfälle under analysperioden på en miljon år. Det som beräknats i figuren är inte jämförbart med riskkurvorna för de kontinuerliga utsläppen och kan inte sägas representera en sann risk i samma mening som de kontinuerliga utsläppen. De representerar snarare ett formellt sätt att hantera frågan om riskutspädning för kortvariga utsläpp. Summakurvorna i figur 13-70 och deras totalvärde om de skulle adderas ligger under riskgränsen. Därmed uppfylls riskkriteriet också för denna gränssättande hantering av riskutspädning.

Det är också värt att notera att både LDF-värdena som används för kontinuerliga utsläpp och LDF-värdena för pulser har härletts genom att anta att alla utsläpp sker till varje biosfärsobjekt, och de värden som erhålls för det objekt som ger de högsta doserna används sedan som LDF-värden och LDF-pulsvärden. Det finns således ingen riskutspädning till följd av osäkerhet när det gäller till vilket biosfärsobjekt som ett utsläpp kommer att äga rum.



Figur 13-70. Akkumulerad korttidsrisk baserad på IRF-pulser i korrosionsfallet (tjock, brun kurva) och skjuvlastfallet (tjock, svart kurva). Även bidrag från enskilda nuklider framgår för skjuvscenariot. Fördelningen av tidpunkter för kapselbrott för korrosionsscenarioet hämtas från det helt korrelerade fallet med antagande om initial advektion.

13.9.5 Utvidgad diskussion om risk under de inledande tusen åren

Inledning

Enligt SSMFS 2008:37 krävs det en mer detaljerad redogörelse för förvarets skyddsförmåga under de första tusen åren efter förslutning. Då den radiologiska farligheten hos avfallet är högst under denna tidsperiod är det speciellt viktigt att beskriva förvarets utveckling, säkerhetsfunktioner och risk i detta tidsperspektiv. En sådan redogörelse tillhandahålls i det följande, och den är i stort baserad på material från tidigare delar av den här huvudrapporten.

Initialtillståndet

Alla kapslar bedöms vara täta vid deponeringen. Den koppartäckning som finns från start diskuteras i redogörelsen för kapselns initialtillstånd i avsnitt 5.4.3. Den initialt minsta koppartjockleken anges som 47,5 mm i tabell 5-9. Om hänsyn också tas till förekomsten av lokala interna defekter i kopparhöljet bedöms inga kapslar ha lokala reduktioner som överskrider 20 mm. Detta är den tillverkade och kontrollerade tjockleken hos korrosionsbarriären efter den slutliga bearbetningen av kapselkomponenterna.

Enligt avsnitt 5.5.3 förväntas dessutom bufferten bli inplacerad i överensstämmelse med referensutförningen, vilket leder till en initial situation där bufferten kommer att uppnå sina långsiktiga säkerhetsrelaterade egenskaper efter vattenmättnad.

Modellering av den allmänna utvecklingen av förvaret

Som SSM:s föreskrifter kräver har många aspekter av förvarsutvecklingen modellerats i detalj för de inledande tusen åren. Detta gäller de termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska utvecklingarna likaväl som effekter på bufferten och kapseln. Detaljerade redogörelser ges i avsnitten 10.2 (bygg- och driftsskedet) och 10.3 (den inledande perioden med tempererat klimat efter förslutning). Även biosfärsutvecklingen modelleras i detalj för denna tidsperiod.

Enligt avsnitten 10.2.5 och 10.3.13 förväntas inga kapselbrott till följd av korrosion under bygg- och driftsskedet eller under referensutvecklingens inledande tusen år. Enligt slutsatserna i avsnitt 10.3.13 kan kopparkorrosionens totala omfattning under bygg- och driftsskedena och den första tusenårsperioden uppskattas till mindre än 1 mm, med hänsyn tagen till bidragen från kvarvarande syre i förvaret och eventuell mikrobiell sulfatreduktion liksom till bidraget från sulfider i bentoniten och återfyllningen. Givet initialtillståndet för kopparhöljet enligt ovan är marginalen för kapselbrott till följd av korrosion därför mycket stor. Det framkom inget som strider mot denna slutsats i analysen av korrosionsscenarioet i avsnitt 12.6.

Samma sak gäller kapselbrott till följd av isostatiska laster på kapslarna, översiktligt behandlade i referensutvecklingen i avsnitt 10.3.13 och vidare i scenariot som hanterar denna typ av kapselbrott i avsnitt 12.7. De isostatiska trycken under de inledande tusen åren är betydligt lägre än de som kan tänkas uppträda under senare, glaciala förhållanden vilka kapseln är utformad för att tåla. Tryck beroende på ojämn svällning hos bentonitbufferten har beaktats i designanalysen för kapseln, se avsnitt 5.4, med slutsatsen att sannolikheten för att kapseln inte ska stå emot lasterna är försumbar.

Skjuvlaster på kapseln kan uppträda som en följd av stora jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen. Fastän sannolikheten för stora jordskalv är högre under glacial avlastning kan det inte helt och hållet uteslutas att ett jordskalv med skadeverkningar skulle kunna äga rum under de inledande tusen åren.

Sannolikheten för ett brott på en av de 6 000 kapslarna har inträffat i slutet av den första tusenårsperioden uppskattas till $2,4 \cdot 10^{-5}$, se vidare i avsnitt 10.4.5, dvs hypotetiskt skulle det behöva byggas 40 000 förvar med 6 000 kapslar vardera för att det statistiskt skulle förväntas att ett kapselbrott skulle ske under de första tusen åren.

Beräknad risk för de inledande tusen åren

Av de tre identifierade typerna av kapselbrott, dvs kapselbrott till följd av korrosion, skjuvlast och isostatisk last, går det således att med stora marginaler utesluta kapselbrott till följd av korrosion och isostatisk last under de inledande tusen åren.

Enligt vad som framgår ovan är kapselbrott till följd av skjuvlast extremt osannolika. Eftersom ingen sannolikhetsgräns för att utesluta en risk har satts i SR-Site beräknades, som rapporterats enligt avsnitt 13.6.2, ett riskbidrag för de inledande tusen åren. Resultatet visade att den årliga genomsnittliga dosen som högst ligger omkring 0,001 $\mu\text{Sv}/\text{år}$, vilket motsvarar en risk på $10^{-10}/\text{år}$, se figur 13-49. Denna analys bygger på detaljerad modellering av biosfärsutvecklingen och radionuklidtransporten i det framväxande landskapet under de första tusen åren, i enlighet med vad föreskrifterna från SSM kräver.

Det är värt att notera att detta beräkningsfall utgår från flera pessimistiska antaganden beträffande sannolikheten för skjuvbrott, modelleringen av närområdet och i försummandet av retention i geosfären, se tabell 13-13. Ytterligare pessimistiska antaganden av relevans för de inledande tusen åren gäller tiden för att etablera vattenkontakt med bränslet, pessimistiskt förutsatt till hundra år utan hänsyn till uppbyggnaden av ett mottryck i kapselns inre när vattnet kommer in i kapseln och utan hänsyn till inneslutningsfunktionen hos Zircaloykapslingen.

Baserat på ovanstående blir slutsatsen att det analyserade förvaret i Forsmark med avsevärd marginal uppfyller föreskrifternas riskkriterium för de inledande tusen åren efter förslutning.

Diskussion om barriärsystemet för de inledande tusen åren

Enligt utförliga analyser i korrosionsscenarioet leder inte ens en hypotetisk initial frånvaro av buffert i alla deponeringshål till kapselbrott under en tidsrymd av tiotusentals år. Det är därför inte relevant att fortsätta diskutera en hypotetisk felfunktion hos bufferten i ett perspektiv på tusen år. Av samma skäl diskuteras inte retentionsegenskaperna i berget ytterligare här.

Beträffande kapseln bedöms, enligt ovan, alla kapslar vara täta vid deponeringen. För att diskutera barriärsystemet i ett tusenårsperspektiv kan ett hypotetiskt fall där en kapsel inte är tät från början betraktas. I ett sådant fall finns det flera faktorer som bidrar till säkerheten i enlighet med det följande.

- För bränslet:
 - Inneslutningsfunktionen hos bränslematrisen.
 - Inneslutningsfunktionen hos de strukturella delarna av bränsleelementen.
- För kapseln:
 - Tiden som krävs för att vattenfylla kapseln.
 - Inneslutningsfunktionen hos Zircaloykapslingen.
- För bufferten:
 - Dess bidrag till att fördröja vattenmättnad och begränsa den hastighet med vilken kapseln vattenfylls.
 - Retention av radionuklider.
- För berget:
 - Dess gynnsamma hydrogeologiska egenskaper, som bidrar till långsam vattenmättnad och begränsade utsläppshastigheter.
 - Retention av radionuklider.

I det följande diskuteras helt kort var och en av dessa faktorer.

De inneslutande funktionerna hos bränslematrisen och de strukturella delarna av bränsleelementen

Dessa faktorer diskuterades i analyserna av fall med antagen fullständig förlust av barriärfunktioner i avsnitt 13.7.3. Där drogs slutsatsen att det använda kärnbränslet i sig har en betydande inneslutningsfunktion i mer än 100 000 år.

Tiden som krävs för att vattenfylla kapseln

I **Datarapporten** visas det att för en hypotetisk, cirkulär genomgående skada med en radie på 2 mm kommer det att ta mer än 20 000 år att vattenfylla kapseln. För att täcka in vilken form som helst på skadan uppskattas fördröjningstiden pessimistiskt till att vara åtminstone tusen år, vilket används som pessimistisk fördröjningstid i det hypotetiska pinnhålsfallet som analyseras i avsnitt 13.7.2.

I härledningen av alla dessa fördröjningstider har det bortsetts från effekten av gas som uppstår genom korrosion av insatsen när vatten kommer in, vilken skulle kunna leda till avsevärt längre fördröjningstider /Bond et al. 1997/.

Buffertens bidrag till att fördröja vattenmättnad och begränsa den hastighet med vilken kapseln vattenfylls

En förutsättning för att vatten ska tränga in i kapseln är en helt vattenmättad buffert. Mättnadstiderna för både återfyllning och buffert faller sannolikt inom ett intervall på några få tiotal år till flera tusentals år, vilket beror på bergets egenskaper (bergmatrisens hydrauliska konduktivitet samt förekomst och karakteristik av sprickor) i Forsmark. I många deponeringshål förväntas följaktligen inget vatten komma i kontakt med avfallet under de första tusen åren, även om det skulle finnas en initial skada på kapseln.

Inneslutningsfunktionen hos Zircaloykapslingen

I enlighet med **Processrapporten för bränsle och kapsel** pekar tillgängliga data på en hållbarhetstid för kapslingsrören på åtminstone 100 000 år. Även om Zircaloy är högst motståndskraftigt mot allmän korrosion, antas inte kapslingen utgöra en barriär mot radionuklidutsläpp från bränslet i SR-Site. Det beror på dess möjliga känslighet för lokal korrosion i grundvatten och väteinducerad sprickbildning. Även en kapsling med små sprickor eller korrosionsdefekter skulle emellertid erbjuda ett stort masstransportmotstånd för vatten att komma i kontakt med bränslet och för radionuklider att frigöras till kapselutrymmet.

Retention av radionuklider i bufferten

Retentionsegenskaperna hos bufferten exemplifieras i beräkningsfallen med antagna, fullständiga förluster av barriärfunktioner i avsnitt 13.7.3. En jämförelse mellan figurerna 13-63 och 13-61 visar att bufferten har en betydande inverkan på utsläppet från närområdet för många sorberande nuklider.

Bergets gynnsamma hydrogeologiska egenskaper

Förutom att bidra till de långa vattenmättnadstider som omnämns ovan begränsar den låga flödes-hastigheten vid deponeringspositionerna utsläppshastigheten för radionuklider från närområdet ifall utsläpp sker från kapseln.

Retention av radionuklider i berget

Retentionsegenskaperna hos berget exemplifieras i beräkningsfallen med antagna, fullständiga förluster av barriärfunktioner i avsnitt 13.7.3. En jämförelse mellan figurerna 13-62 och 13-61 visar att berget har betydande inverkan på utsläppet från fjärrområdet för många sorberande nuklider.

13.9.6 Slutsatser

Den gränssättande, streckade kurvan i figur 13-69 utgör summan av risken förknippad med skjuvlastscenariot och den förknippad med korrosionsscenarioet. Den förra representeras av fallet med advektiva förhållanden och den senare av det korrelerade fallet med initial advektion, vilka båda ger de högsta riskerna inom sina scenarier. (Inom scenarierna är fallen ömsesidigt uteslutande, vilket innebär att endast ett fall från varje scenario ska användas vid summeringen. Då huvudscenariot representeras av den centrala korrosionsvarianten är hänsyn tagen också till huvudscenariot i det gränssättande korrosionsfallet.)

Övriga scenarier gav inte några bidrag till den beräknade risken. I redogörelsen för kombinationer av scenarier och fenomen i avsnitt 12.9.3 drogs slutsatsen att konsekvenserna av ett skjuvlastbrott följt av buffererosion behöver analyseras och det görs i det gränssättande fallet för skjuvlastscenariot. Alla relevanta riskbidrag bedöms därför vara inkluderade i figur 13-69.

Eftersom den gränssättande kurvan i figur 13-69 ligger under riskgränsen under analysperiodens en miljon år är bedömningen att det analyserade KBS-3-förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium. Det har också visats att riskutspädning inte strider mot denna slutsats.

Dessutom dras slutsatsen att en mer realistisk risk kan ligga var som helst i området under den gränssättande kurvan, ända ner till nollrisk baserat på nollresultaten för de tre fallen utan erosion och en situation då inga kapslar skulle bli otäta till följd av skjuvrörelser orsakade av stora jordskalv. Det senare skulle kunna uppnås om något mindre pessimistiska antaganden kunde försvaras för skjuvlastscenariot.

Det är också värt att notera att genom användandet av LDF-faktorer för att omvandla utsläpp till doser antas det implicit i riskanalysen att landskapet till vilket utsläppen sker alltid är fullt bebott, inklusive det objekt där den högsta dosen beräknas uppträda och vid den tidpunkt då detta händer. Dessutom förväntas långa perioder av glaciala och vattentäckta förhållanden då inga doser drabbar människor eftersom platsen inte är beboelig. Någon hänsyn till detta har inte tagits i risksummeringen. Snarare antas tempererade förhållanden råda hela tiden vilket ger de högsta doserna.

Faktorer som har störst påverkan på den totala risken identifieras i känslighetsanalyserna, exempelvis i avsnitt 12.2.2 (buffererosion), 12.6.2 (kapselkorrosion) och 13.5.11 (konsekvenser för korrosionsscenarioet). Dessa sammanfattas i nästa avsnitt där det också ges hänvisningar till avsnitt som diskuterar de steg som skulle kunna tas för att reducera eller mildra dessa effekter.

Det är även värt att notera att den beräknade risken är en av flera indikatorer på förvarets säkerhet för avlägsna tidsramar. Fyra alternativa indikatorer har tillämpats i avsnitt 13.5.8 med resultatet att de beräknade konsekvenserna ligger betydligt under de referensvärden med vilka de jämförs. Detta berörs ytterligare i slutsatserna för analysen, se avsnitt 15.3.

Ett KBS-3-förvar i Forsmark bedöms med betydande marginal uppfylla föreskrifternas riskkriterium för de inledande tusen åren. Barriärsystemet har ett antal funktioner som bidrar till säkerheten i ett hypotetiskt fall där kapseln antas vara defekt från start. Med försiktiga antaganden skulle flera av faktorerna ensamma förhindra alla utsläpp under de inledande tusen åren för en initialt defekt kapsel. Detta gäller speciellt den tid som det tar för vatten att komma i kontakt med bränsleelementen samt Zircaloykapslingens integritet.

Slutligen kan det noteras att riskerna till följd av både korrosionsscenarioet och skjuvlastscenariot ökar vid en miljon år. Detta orsakas främst av den ökande sannolikheten för att barriärerna förlorar sin funktion under den senare delen av analysperioden, medan radioaktivt sönderfall spelar en mindre roll för utvecklingen eftersom de dosdominerande nukliderna, i synnerhet modernuklider till Ra-226, är mycket långlivade. Det ses inte som meningsfullt att fortsätta med beräkningar bortom en miljon år (se vidare avsnitt 14.5), men en redogörelse för konsekvenserna för ett antal hypotetiska fall där kapselbrott sker tidigt i analysperioden för alla kapslar ges i avsnitt 13.7.3. För det hypotetiska fallet att kapselbrott sker för alla kapslar, där bufferten är frånvarande och där retention i berget försummas är den beräknade risken vid en miljon år jämförbar med den som orsakas av bakgrundsstrålning. Detta indikerar en gräns för utvecklingen av riskkurvan bortom en miljon år, när omfattningen av barriärernas felfunktioner kan förväntas öka.

13.10 Sammanfattning av osäkerheter som påverkar den beräknade risken

13.10.1 Sammanfattning av viktiga osäkerheter som påverkar den beräknade risken

Ett antal frågor av betydelse för den långsiktiga säkerheten är förknippade med betydande osäkerheter. Detta är oundvikligt vid en analys av situationer som ligger långt in i framtiden och där delar av systemet inte är fullständigt kända. Det följande utgör en redogörelse för hur viktiga osäkerheter som påverkar den beräknade risken behandlas i SR-Site. I denna ingår, genom hänvisning till de återkopplande avsnitten 15.4 till 15.7, indikationer på möjligheten att minska dessa osäkerheter i senare stadier av förvarsprogrammet. Redogörelsen tar upp faktorer som påverkar de två scenarier som bidrar till den beräknade risken, dvs korrosionsscenarioet och skjuvlastscenariot. En diskussion om huruvida formella expertutfrågningar kunde vara ett sätt att reducera dessa osäkerheter ges i avsnitt 13.10.2.

I korrosionsscenarioet inträffar kapselbrott, och därmed riskbidrag, bara i de fall då bufferten har eroderats i sådan utsträckning att advektiva förhållanden råder i delar av deponeringshålet, vilket leder till förhöjda korrosionshastigheter. Tabell 13-13 anger viktiga osäkerhetsfaktorer som identifierades i känslighetsanalysen av buffererosionens omfattning i avsnitt 12.2.2, av kapselkorrosion under advektiva förhållanden i avsnitt 12.6.2 och av doskonsekvenser för kapselbrott till följd av korrosion i avsnitt 13.5.11. Sätt att minska dessa osäkerheter och den potentiella riskpåverkan som detta kan ha redovisas också i tabellen. Beträffande skjuvlastscenariot är många av osäkerhetsfaktorerna förknippade med bedömningen av sannolikheten för skjuvbrott till följd av jordskalv i avsnitt 10.4.5 och med utvärderingen av konsekvenser av sådana kapselbrott i avsnitt 13.6. Även dessa redovisas i tabell 13-13.

Det noteras att förutom de faktorer som nämns i tabellen har till exempel mer utvecklade kriterier för sovring av deponeringspositioner en stor potential att reducera risken. Detta är emellertid en designfråga snarare än en osäkerhetsfaktor vid riskberäkningarna i SR-Site, se vidare i avsnitt 14.3 och 15.3.5.

Tabell 13-13. Viktiga osäkerhetsfaktorer som påverkar den beräknade risken och planering för att i framtiden minska dem.

Faktor	Typ av osäkerhet	Hantering i riskberäkningar för SR-Site	Sätt att minska osäkerhet	Potentiell påverkan på beräknad risk	Planering i avsnitt
Mekanistisk förståelse av buffererosion.	Konceptuell	Pessimistisk. Användningen av en modell som bygger på bästa kunskap som centralt fall. Liten negativ påverkan på korrosion påvisas för ett gränssättande fall med initial advektion. Gränssättande fall med initial advektion inkluderat i risksammanfattning och använt för att påvisa uppfyllelse av riskkraven.	Fortsatt forskning.	Kan bara minska risken, eftersom det Gränssättande fallet inkluderas i risksammanfattningen. Potential att leda till att buffererosion utesluts från korrosionsscenarioet, vilket skulle leda till att kapselbrott utesluts från korrosionsscenarioet i enlighet med analyser i SR-Site.	15.7.3
Salthalt i grundvatten; låg salthalt krävs för att buffererosion ska äga rum.	Platsdata, konceptuell förståelse	Pessimistisk. Försiktigt angreppssätt i modelleringen av salthalt i deponeringspositioner med högt flöde. Påvisande av begränsad negativ påverkan på erosion och korrosion för ett gränssättande fall med utspädda förhållanden 100 procent av tiden. Påverkan av osäkerheter beträffande utspädda förhållanden i riskberäkningar gränssätts av fall med initiala advektiva förhållanden.	Ytterligare grundvatten-provtagningar. Se också grundvattenflöde eftersom salthaltens utveckling är starkt relaterad till grundvattenflöde.	Kan bara minska risken, eftersom gränssättande fall inkluderas i risksammanfattningen. Potential att leda till att buffererosion utesluts från korrosionsscenarioet, vilket skulle leda till att kapselbrott utesluts från korrosionsscenarioet i enlighet med analyser i SR-Site.	15.6.9
Grundvattenflöde. Flöde vid deponeringspositioner påverkar erosion och korrosion. Flöde i berget påverkar radionuklidtransport.	Konceptuell såväl som rumslig och tidsmässig variabilitet.	Probabilistisk modellering. Indata från omfattande hydrogeologisk modellering av flera modellkoncept (korrelationsstrukturer), som i sin tur byggt på utvärdering av konceptuell osäkerhet i platsmodellering. Varje modell ger upphov till en indatafördelning som täcker in rumslig variabilitet. Varje fördelning har överfört till riskberäkningar. Fördelningen som ger högst risk används för att påvisa uppfyllelse av riskkraven.	Fortsatt utveckling av modeller baserade på data från framtida karakterisering av områden under markytan. (Känslighet för rumslig variabilitet svår att minska annat än genom sovringskriterier för deponeringshål.)	Begränsad, om den utvecklade modellen håller sig inom ramarna för konceptuella modeller som används i SR-Site.	15.6.4 15.6.5
Sulfidkoncentrationer över tiden; påverkar korrosion.	Ofullständig förståelse av orsaker bakom intervallet för platsdata; både rumslig variabilitet och konceptuell osäkerhet. Ofullständig förståelse av utveckling med tiden.	Probabilistisk. Användning av uppmätt intervall för platsdata i Forsmark, kombinerat med fördelning av grundvattenflöde i deponeringspositioner, för att erhålla medelantalet kapselbrott. Ofullständig förståelse av utveckling med tiden; pessimistiskt behandlad.	Ytterligare platsdata Fortsatt forskning.	Potentiellt ansevärd riskreduktion om rumslig variabilitet kunde minskas och/eller visas spegla variabilitet över tid i en deponeringsposition (se avsnitt 10.6.2 "Sulfidkoncentrationer i grundvatten").	15.6.9 15.7.4
Sannolikhet för jordskalv; påverkar sannolikheten för skjuvbrott.	Konceptuell; ofullständig förståelse.	Pessimistisk. Frekvensintervall (flera uppskattningar) bestämt och övre gräns för detta valt i riskberäkningar.	Fortsatt forskning.	Kan minska risken ytterligare.	15.7.4

Faktor	Typ av osäkerhet	Hantering i riskberäkningar för SR-Site	Sätt att minska osäkerhet	Potentiell påverkan på beräknad risk	Planering i avsnitt
Sannolikhet att en zon hyser ett jordskalv; påverkar sannolikheten för skjuvbrott.	Konceptuell osäkerhet.	Pessimistisk. i) Alla zoner som påverkar förvaret antas hysa det största jordskalv som är möjligt med hänsyn till deras storlek. ii) Zon med störst påverkan på förvaret vald för riskberäkning.	Fortsatt forskning.	Kan minska risken ytterligare.	15.6.1 15.6.7 15.7.4
Sannolikheten för att en deponeringsposition skärs av en stor spricka.	Konceptuell osäkerhet, rumslig variabilitet, otillräcklig information.	Pessimistisk. Utvärdering av alla DFN-modeller som identifierats i platsmodelleringen. Den variant som ger högsta sannolikheten för skärning använd för riskberäkning.	Fortsatt forskning, metodikutveckling, data från undersökningar under markytan.	Kan minska risken ytterligare.	15.6.2 15.6.3 15.7.4
Effektiviteten hos sovningsskriterier för deponeringspositioner.	Mättekniker som inte testats tillräckligt för detta sammanhang.	Alla EFPC-sprickor antas funna. Ingen hänsyn har tagits till fler tecken på stora sprickor; det är möjligt att dessa kan vara effektivare än EFPC för att identifiera deponeringshål som ska uteslutas.	Fortsatt utveckling av metoder för att identifiera kritiska strukturer.	Kan minska risken ytterligare.	15.6.2
Risken för skada om skjuvning är större än 5 cm; påverkar sannolikheten för skjuvskada	Konceptuell såväl som rumslig och tidsmässig variabilitet.	Pessimistisk. i) Fall med skärningsvinkel och träffpunkt som har maximal effekt på kapseln utgör bas för riskberäkning. ii) Övre gräns för buffertdensitet i den använda konstruktionsförutsättningen; ingen hänsyn har tagits till påvisad lägre maximal densitet i referensutformningen eller till densitetsfördelning.	Fler mekaniska analyser för att täcka in fall där vinkeln och buffertdensiteten är mer gynnsamma. Probabilistisk hantering av angreppspunkt, skärningsvinkel och buffertdensitet. Reviderade konstruktionsförutsättningar för buffertdensitet.	Skulle minska risken ytterligare.	15.7.2 15.5.3, 15.5.7
Kriterier för kapselbrott i analysen av kapselns respons på skjuvlaster; påverkar sannolikheten för skjuvskada.	Konceptuell	Pessimistisk. i) Pessimistiskt valt, lokalt kriterium för segjärnsinsats i designanalys av kapseln använt som kriterium för total kollaps. ii) Ingen hänsyn tagen till inneslutningspotential för kopparhölje när insatsen går sönder lokalt.	Fortsatt utveckling av kriterier för total kollaps. Fortsatt utveckling av modeller för koppars krypbeteende. Implementering i modellering av respons på skjuvning.	Skulle minska risken ytterligare.	15.7.2
Hydrauliska egenskaper hos skjuvspricka och retention i migrationsväg; påverkar retention.	Ofullständig förståelse av hydrauliska egenskaper för en spricka efter skjuvning.	Pessimistisk. Närområde: i) Kapselbrottets lokalisering antas sammanfalla helt med skjuvsprickans lokalisering; ii) Skjuvning antas öka transmissiviteten hos en skärande spricka så att dess Qeq-värde är för högt för att bidra till transportmotstånd i närområdet; iii) Geometriskt transportmotstånd mellan spricka/buffert bortses ifrån. Fjärrområde: Ingen hänsyn tagen till radionuklidens retention i geosfären.	Analys av påverkan på flödessystemet om bara skjuvsprickorna skulle vara påverkade.	Potentiellt sett minskad risk eftersom bara skjuvsprickan, och inte sprickorna den är konnekterade till, skulle påverkas. En lokal ökning av transmissiviteten i ett spricknätverk skulle inte nödvändigtvis öka flödet eller minska retentionen.	

Faktor	Typ av osäkerhet	Hantering i riskberäkningar för SR-Site	Sätt att minska osäkerhet	Potentiell påverkan på beräknad risk	Planering i avsnitt
Bränsleupplösnings-hastigheten.	Ofullständiga kunskaper	Probabilistisk. Pessimistiskt framtagen fördelning med utgångspunkt i försök.	Fortsatt forskning.	Minskad risk om en mer gynnsam fördelning kan försvaras.	15.7.1
Utsläppshastighet vid korrosion.	Ofullständiga kunskaper	Probabilistisk. Pessimistiskt framtagen hastighetsfördelning för korrosion med utgångspunkt i försök och dimensioner. Omedelbar korrosion av Ag-legering i styrtavarna från PWR.	Fortsatt forskning, i synnerhet om korrosionshastigheten för Ag-legering i styrtavarna från PWR.	Betydande minskning av korrosionsrelaterade toppar för enskilda nuklider om en mer gynnsam fördelning kan försvaras. Begränsad påverkan på den övergripande risken.	15.7.1
Flödesrelaterade transportparametrar.	Se grundvattenflöde. (Osäkerheter i transportparametrar beror främst på osäkerheter i flöde. Konceptuell förståelse av kanalbildning utgör en ytterligare osäkerhetsfaktor.)	Se grundvattenflöde.	Se grundvattenflöde. (Mer data påverkar kunskapen om flöde som inverkar på transportparametrar.)	Begränsad, om den utvecklade modellen håller sig inom ramarna för de konceptuella modeller som används i SR-Site.	15.7.4
Landskapsspecifika dosomvandlingsfaktorer.	Konceptuell	Deterministiska värden, med pessimistisk behandling av flera osäkerheter, se vidare i avsnitt 13.2.6.	Fortsatt forskning och modellutveckling.	Potential för riskreduktion med flera storleksordningar för specifika nuklider.	15.7.5

13.10.2 Kandidatfrågor för expertutfrågning

Under planeringen av SR-Site genomfördes en utvärdering av frågor att överväga för expertutfrågningar. Följande kriterier användes för att fastställa om en fråga skulle kunna vara aktuell för utfrågning:

- Frågan ska vara förknippad med stora osäkerheter som har betydande påverkan på den analyserade säkerhetsnivån.
- En formell expertutfrågning kan anses bidra till att reducera dessa osäkerheter utöver vad som uppnås med andra medel som fastställts i analysmetodik (utvärdering av konceptuella osäkerheter i **Processrapporterna**, av dataosäkerhet i **Datarapporten**, genom kvalitetssäkrad modellering osv, vilket sammantaget leder till en välgrundad och ofta pessimistisk hantering av frågan i säkerhetsanalysen).

Som påpekas i avsnitt 2.8.5 var slutsatsen av utvärderingen att trots att ett stort antal osäkerheter i princip kunde underkastas en formell expertförfrågning gick det inte att hitta någon fråga för vilken båda kriterierna ovan är tillämpbara. Utvärderingen av frågor som övervägs för expertutfrågning kan uppdateras utifrån de känslighetsanalyser av den beräknade risken i SR-Site som presenteras i det här kapitlet. Liksom i SR-Can är det scenarierna för korrosion och skjuvlast som bidrar till risken. Följaktligen skulle bara osäkerheter relaterade till dessa scenarier vara av intresse för formella expertutfrågningar. I synnerhet de frågor som listas i tabell 13-13 är av intresse att utvärdera. I allmänhet finns det ingen fråga i tabell 13-13 som inte var känd redan när SR-Can färdigställdes.

Frågor för korrosionsscenario

Som framgår av tabell 13-13 handlar frågor som förknippas med korrosionsscenario främst om mekanistisk förståelse av buffertens erosionsprocess, grundvattenflödet, utvecklingen av grundvattnets salthalter och sulfidhalter, utsläppshastigheterna från det använda kärnbränslet och de flödesrelaterade transportparametrarna. Dessa frågor bedöms som följer.

Mekanistisk förståelse av buffertens erosionsprocess: Denna fråga har varit föremål för intensiv forskning sedan den identifierades som avgörande för säkerhetsutvärderingen i SR-Can-projektet. En grupp experter som rekryterats internationellt har studerat processen experimentellt och teoretiskt. Flera expertrapporter och en sammanfattande rapport har tagits fram i projektet, och det har hållits regelbundna seminarier, där hela expertgruppen har diskuterat underhandsresultat och möjliga vägar framåt. Projekts rapporter har också granskats internationellt. Det är svårt att föreställa sig någon ytterligare expertgruppering som inom begränsad tid skulle kunna bedöma dessa rön på ett sådant sätt att de är av insatser som gjorts av denna expertgrupp skulle gå att förfina mer eller kvalificera bättre för säkerhetsanalysens räkning. Även om detta är en viktig fråga för säkerheten anses den på ovanstående grunder inte som lämplig för en expertutfrågning.

Varken osäkerheterna i förhållande till den del av en glaciationscykel under vilken erosionen är aktiv eller den förlust av buffertmaterial som krävs för att uppnå advektiva förhållanden i ett deponeringshål, eller den starkt relaterade korrosionsgeometrin, är tillräckligt viktiga för att den övergripande säkerhetsvärderingen ska meritiera dessa frågor som aktuella för en formell expertutfrågning. Dessutom är de båda bedömda genom försiktig uttolkning av resultaten från direkt modellering och går därmed att behandla med hjälp av säkerhetsanalysens standardmetodik. Liknande argument kan framföras beträffande koncentrationen av kapselkorroderande ämnen under en glaciationscykel.

Fördelningarna av den ekvivalenta flödes hastigheten, Darcyflödet och de flödesrelaterade transportparametrarna för alla deponeringshål påverkas av både konceptuella osäkerheter och rumslig variabilitet. I synnerhet Darcyflödet har en avsevärd påverkan på säkerhetsanalysen genom dess betydelse för erosions- och korrosionsprocesserna. Dessa faktorer har utvärderats i flera steg inklusive insamlandet av platsdata, utförlig modellering av platsens hydrauliska egenskaper inklusive beaktandet av flera konceptuella modeller och dataosäkerheter, modelleringen av den hydrauliska utvecklingen inom säkerhetsanalysen och en noggrann utvärdering av de resulterande fördelningarna i **Datarapporten**. Alla dessa steg har genomförts av flera expertgrupper med delvis gemensamma deltagare. Resultaten har granskats externt. Det anses inte fruktbart att genom formell expertutfrågning försöka att ytterligare bekräfta dessa rön, uppnådda under årtal av granskade insatser.

Alla data relaterade till beräkningen av radionuklidtransport och dos för de otäta kapslarna utvärderas grundligt i **Datarapporten**. En dominerande faktor, bränsleupplösningshastigheten, bedöms i en speciell rapport från en grupp internationella experter som bildar det allra viktigaste bidraget till utvärderingen i **Datarapporten**. Expertrapporten har också varit föremål för extern granskning (peer review). Det är svårt att föreställa sig ännu en expertgruppering som inom begränsad tid skulle lyckas uppnå bättre understödda slutsatser.

Frågor för skjuvlaster scenariot

Enligt tabell 13-13 berör frågor relaterade till skjuvlaster scenariot framför allt sannolikheten för jordskalv, sannolikheten att ett jordskalv inträffar i en zon, sannolikheten att en deponeringsposition skärs av en stor spricka, effektiviteten hos sovringskriterier för deponeringshål, risken för kapselbrott om skjuvningen är större än 5 cm, brottkriterierna vid analys av kapselns respons på skjuvlaster samt de hydrauliska egenskaperna hos en skjvspricka och retention längs migrationsvägen. Som tabellen visar hanteras dessa frågor i allmänhet genom att göra pessimistiska antaganden, kombinerat med eller utvärderat genom försiktig uttolkning av resultat från direkt modellering och är därför tillgängliga genom säkerhetsanalysens standardmetodologi. Till exempel:

- Sannolikheten för jordskalv hanteras genom att tillämpa ett pessimistiskt frekvensintervall byggt på uppskattningar utifrån brett expertkunnande och indata där en övre gräns för intervallet väljs för riskberäkningarna.
- Sannolikheten för att ett jordskalv inträffar i en zon och de resulterande sekundära rörelserna i stora sprickor har analyserats genom omfattande modellering och slutliga uppskattningar. Det är zonen med störst påverkan som väljs ut för riskberäkningar.
- Sannolikheten för att en deponeringsposition skärs av en stor spricka hanteras genom att använda den variant som ger den största sannolikheten för genomskärning i riskberäkningen och en pessimistisk bedömning av möjligheten att upptäcka stora sprickor i samband med detaljerade undersökningar.
- Risken för skada om skjuvningen är större än 5 cm har analyserats genom omfattande modellering. Ytterligare modelleringsinsatser förefaller som ett framkomligt tillvägagångssätt ifall rådande pessimistiska antaganden om kapselbrott skulle ersättas av ett mer differentierat sätt att hantera frågan.

I korthet är påverkan på risk av återstående osäkerheter begränsad. Ifall det finns behov av att reducera den uppskattade risken genom mer kunskap förefaller andra verktyg än formell expertutfrågning mer lovande.

Slutsatser

Sammanfattningsvis kan det konstateras att trots att ett flertal osäkerheter i princip skulle kunna underkastas en formell expertutfrågning, har ingen fråga identifierats i den här preliminära utvärderingen för vilken både i) den beräknade risken är mycket känslig för osäkerheten och ii) osäkerheten kan förväntas minska betydligt genom en formell expertutfrågning.

De fastställda förfarandena för kvalificering av processer och data i SR-Site, de avsevärda och samordnade forskningsaktiviteterna om kritiska frågeställningar, den omfattande platsmodelleringen utförd av expertgrupper inklusive grundlig utvärdering av osäkerheter och formulerandet av ett utlåtande om tilltron, granskningen av externa experter samt den pessimistiska hanteringen av många faktorer i analysen bidrar alla till denna slutsats. Också det faktum att den pessimistiskt beräknade totala risken i SR-Site ligger väl under föreskrifternas gräns för hela den en miljon år långa analysperioden har påverkat synen att det inte finns behov av ytterligare minskade osäkerheter genom expertutfrågningar.

13.11 Slutsatser

De analyser av fördröjningspotentialen för förvaret som rapporteras i detta kapitel har lett till följande slutsatser.

För korrosionsscenarioet är de beräknade genomsnittliga doserna åtminstone en storleksordning under den dos som motsvarar föreskrifternas riskgräns. I de mest pessimistiska varianterna av detta scenario inträffar de första kapselbrotten och därmed de första utsläppen efter omkring 50 000 år. I dessa varianter ligger den genomsnittliga dosen ungefär två storleksordningar under vad som föreskrivs vid 100 000 år och ungefär en storleksordning under vad som föreskrivs vid en miljon år.

Olika omfattning av antalet kapselbrott i korrosionsscenarioet, som överförts från analysen av inneslutningspotentialen, ledde till variationer för beräknade genomsnittliga doser som låg inom en storleksordning. Även osäkerheter i konceptualiseringen av transportförhållanden i närområdet har liknande begränsad påverkan på beräkningsresultaten.

För skjuvlaster scenarioet är den beräknade genomsnittliga dosen för de inledande tusen åren försumbar i jämförelse med den dos som motsvarar föreskrifternas riskgräns. Mellan tusen och 100 000 år ligger den beräknade medeldosen ungefär tre storleksordningar under gränsen och ökar sedan så att den hamnar ungefär två storleksordningar under gränsen vid en miljon år.

Den övergripande summeringen av riskerna visar att ett KBS-3-förvar i Forsmark bedöms uppfylla föreskrifternas riskkriterium för hela den en miljon år långa analysperioden. Marginalen till att uppfylla föreskrifternas krav är ungefär en storleksordning när ett antal osäkerheter i riskberäkningen hanterats pessimistiskt. Riskutspädning har analyserats och inte befunnits motsäga den slutsats som gjorts om uppfyllelse.

I korrosionsscenarioet ger geosfären endast en blygsam reduktion av det dosekvivalenta utsläppet från närområdet. Geosfärens viktiga roll för säkerheten är här snarare i) dess bidrag till förvarets inneslutningsförmåga genom gynnsamma geokemiska och hydrologiska förhållanden vilket begränsar antalet kapselbrott och ii) genom sitt bidrag till att begränsa utsläppen från närområdet genom att tillhandahålla reducerande förhållanden och därmed begränsa bränsleupplösningshastigheten.

I skjuvlaster scenarioet bidrar geosfären till inneslutning genom gynnsamma mekaniska förhållanden och, som i korrosionsscenarioet, att begränsa bränsleupplösningshastigheten genom att tillhandahålla reducerande förhållanden.

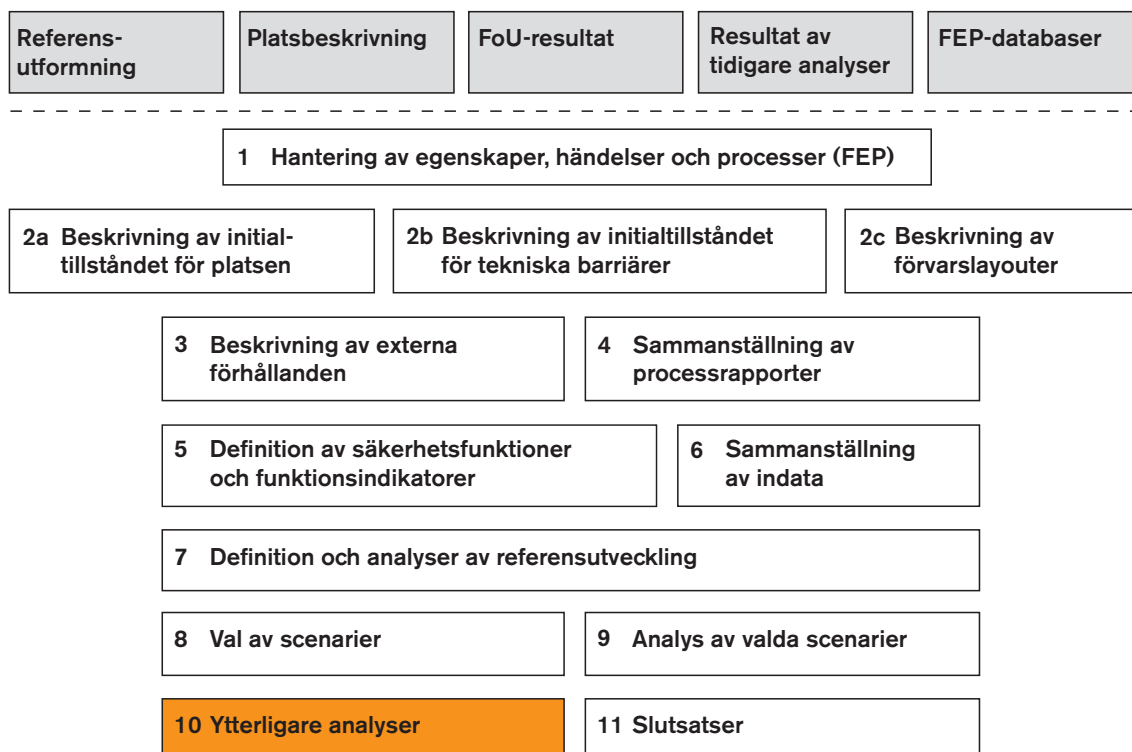
Känslighetsanalyser av de probabilistiska beräkningsresultaten visar att osäkerheterna hos indata vad beträffar bränsleupplösningshastigheten, tiden för kapselbrott och det flödesrelaterade transportmotståndet i geosfären står för det mesta av osäkerheten kring den beräknade dosen. Ytterligare osäkerheter beaktas genom formuleringen av varianter av beräkningsfall som avser exempelvis olika konceptuella hydrogeologiska modeller eller genom pessimistiska antaganden som exempelvis rör sannolikheten för kapselbrott till följd av skjuvlaster. Inverkan av alla viktiga osäkerheter på den beräknade risken utvärderas utifrån utfallet av risksummeringen. Möjligheter att minska osäkerheterna diskuteras som en återkoppling från analysen.

För det centrala korrosionsfallet visar tillämpningen av fyra alternativa riskindikatorer att utsläppshastigheterna ligger ungefär tre storleksordningar under de aktivitetsbegränsningar som utfärdats av den finska tillsynsmyndigheten STUK, att de beräknade koncentrationerna av utsläpp av Ra-226 från förvaret till ekosystem i Forsmark ligger ungefär tre storleksordningar under uppmätta koncentrationer av naturligt förekommande Ra-226 i Forsmark, samt att flöden i geosfären orsakade av utsläpp av Ra-226 från förvaret ligger ungefär två storleksordningar under de naturligt förekommande flödena av Ra-226 på platsen, såsom de uppskattats från platsdata. Liknande slutsatser dras för andra relevanta beräkningsfall.

Doserna till icke-mänsklig biota ligger väl under de gränssättande doshastigheter som rekommenderas i ERICA Integrated Approach, vilket betyder att de beräknade utsläppen av radionuklider inte förväntas leda till några skadliga biologiska effekter på individer hos arter som återfunnits på platsen. Det är således säkerställt att populationer, samhällen och ekosystem skyddas tillräckligt.

Förenklade analytiska modeller tillämpade på centrala varianter av scenarierna för korrosion och skjuvlaster stämmer väl överens med de numeriska resultaten. Detta ökar tilltron för de beräknade resultaten i) genom att de erbjuder en kontroll som kvalitetssäkrar den numeriska modelleringen av utsläpp uttryckta i dos och ii) genom att de påvisar att utsläpp i de aktuella fallen styrs av relativt enkla processer som är som är lätta att förstå och modellera.

14 Ytterligare analyser och stödande argument



Figur 14-1. SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.

14.1 Inledning

I detta kapitel redovisas de ytterligare analyser som krävs för att slutföra säkerhetsanalysen enligt den metodik som beskrivs i kapitel 2. Kapitlet innehåller följande:

I avsnitt 14.2 redovisas metodiken som används för analysen av scenarier som är relaterade till framtida mänskliga handlingar. Därefter sammanfattas analyserna och resultaten av dem.

I avsnitt 14.3 redovisas de ytterligare analyser som krävs för att visa på optimering och att bästa tillgängliga teknik används.

I avsnitt 14.4 verifieras det att FEP som uteslutits i tidigare delar av analysen är försumbara mot bakgrund av den slutförda scenarie- och riskanalysen.

I avsnitt 14.5 ges en kortfattad redovisning av tidsperioden bortom en miljon år.

Slutligen ges i avsnitt 14.6 en redovisning av hur naturliga analogier ger stöd för analyserna och slutsatserna i säkerhetsanalysen.

14.2 Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar

14.2.1 Inledning

Enligt valet av scenarier som beskrivs i avsnitt 2.5.8 och tabell 11-1 kunde två huvudkategorier av scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar (Future Human Actions, FHA) urskiljas: scenarier relaterade till ett förslutet förvar och scenarier relaterade till ett förvar som inte alls eller bara delvis förslutits. Dessa kategorier av FHA-scenarier har tidigare identifierats i SR-Can /SKB 2006a/, men endast den förra kategorin analyserades ytterligare. I SR-Site hanteras båda kategorierna och analyserna presenteras i **FHA-rapporten** och sammanfattas i följande underavsnitt.

En tänkbar exponering för stora mängder av det radiotoxiska materialet är en ofrånkomlig konsekvens av att använt kärnbränsle deponeras i ett slutförvar. Följaktligen måste intrång i förvaret beaktas vid förvarsutformningen och vid säkerhetsanalysen. För att minska sannolikheten för oavsiktligt intrång och därav följande exponering för använt kärnbränsle har, i linje med riktlinjer från ICRP /ICRP 2000/, följande förebyggande åtgärder vidtagits vad gäller platsens lokalisering och utformning:

- Förvaret lokaliseras till en plats där det inte finns naturresurser som kan exploateras.
- Förvarsdjupet väljs så att det ligger väsentligt längre ner än det djup som är av intresse för vattentillförsel och mer allmänt förekommande underjordiska anläggningar.
- Förvaret försluts så att det blir svårt att tränga in i det efteråt.
- Åtgärder kommer att vidtas för att upprätthålla övervakning av och bevara information om förvaret så länge som möjligt.

Intrång efter förslutning under fasen med övervakning och därefter förhindras huvudsakligen genom förvarets utformning. Utöver detta kommer förmodligen även fortsättningsvis förvaret att övervakas, information bevaras och möjligtvis någon form av markeringar göras på förvarsplatsen. Under perioden med övervakning måste aktiviteter på förvarsplatsen begränsas eller styras om det finns risk för att de stör övervakningen av platsen. Detta utesluter dock inte nödvändigtvis alla former av åtkomst till området. Åtgärder och begränsad markanvändning under perioden med övervakning exemplifieras och behandlas mer i detalj i **FHA-rapporten**.

Det faktum att förvaret innehåller klyvbart material är en viktig aspekt. När det gäller dagens situation kommer tillsyn av åtgärder för kärnämneskontroll högst sannolikt att hanteras av både nationella och internationella organ (SSM, IEAE och Euroatom) /Fritzell 2006, s 11–14/. Dessutom vidhåller myndigheterna vid granskningen av SR-Can /Dverstorp och Strömberg 2008/ att staten, snarare än SKB, förväntas ha ansvaret för tillsynen och övervakningen av förvaret efter förslutningen /SKI 2007/.

14.2.2 Principer och metodik för att hantera FHA-scenarier

Människan är beroende av och påverkar miljön hon lever i. Efter förvarets förslutning ska framtida generationer ha möjlighet att utnyttja förvarsplatsen efter behov utan att deras hälsa äventyras. I fallet med ett slutförvar av KBS-3-typ finns det emellertid exempel på aktiviteter som kan leda till exponering för radiotoxiska grundämnen, om aktiviteterna utförs vårdslöst eller utan kännedom om förvaret. Exempel på sådana aktiviteter är borrhning av djupa hål och uppförande av tunnlar, schakt eller berganläggningar på stora djup inom förvarsområdet. Globalt förekommande mänskliga handlingar, som utsläpp av växthusgaser eller föroreningar, kan också påverka förvaret. Det finns därför ett internationellt samförstånd om att framtida mänskliga handlingar ska beaktas vid säkerhetsanalyser av djupt liggande geologiska slutförvar /NEA 1995, ICRP 2000/.

Mänskliga handlingar av betydelse är sådana som har potentiell inverkan på förvarets säkerhetsfunktioner. Mänskliga handlingar kan delas in i olika kategorier, exempelvis ”nyligen utförda eller pågående” eller ”framtida”, ”globala” eller ”lokala” /Wilmot et al. 1999/ och ”oavsiktliga” eller ”avsiktliga” /NEA 1995, ICRP 2000/. Nyligen utförda eller pågående, lokala, avsiktliga handlingar behandlas i beskrivningen av de lokala ekosystemen, se avsnitt 4.10 och 10.3.3. Missöden kan betraktas som lokala, oavsiktliga handlingar. De missöden som sker under bygg- och driftskedet hanteras i den allmänna behandlingen av osäkerheter i huvudscenariot och de ytterligare scenarierna. De globala utsläppen av växthusgaser – som skett nyligen och som sker i dag – har ingen direkt inverkan på förvaret, men kan påverka klimatet och beaktas i referensutvecklingsvarianten med global uppvärmning, se avsnitt 10.6. Vad som återstår att analysera är därmed global förorening av annan typ än utsläpp av växthusgaser och lokala framtida handlingar.

Om människor i framtiden av något skäl avsiktligt tar sig in i förvaret är de ansvariga för konsekvenserna av sina handlingar. Dagens samhälle kan inte skydda kommande samhällen från deras egna handlingar om de som utför handlingarna är medvetna om konsekvenserna /NEA 1995, ICRP 2000/. Vid utvecklingen av ett system för slutförvar av använt kärnbränsle ska däremot största möjliga hänsyn tas till kommande generationer. Baserat på dessa allmänt accepterade principer och Strålsäkerhetsmyndighetens (SSM:s) föreskrifter om säkerhet i samband med deponering av nukleärt material och kärnavfall /SSM 2008a/

samt om skyddet av människors hälsa och miljön i samband med den slutliga hanteringen av använt kärnbränsle och kärnavfall /SSM 2008b/, begränsas de framtida mänskliga handlingar som beaktas i den här delen av säkerhetsanalysen till global förorening och handlingar som:

- Utförs efter förslutningen av förvaret.
- Sker vid eller i närheten av förvarsplatsen.
- Är oavsiktliga, dvs utförs när förvarets plats inte är känd, dess ändamål bortglömt eller konsekvenserna av handlingen är okända.
- Skadar säkerhetsfunktionerna hos förvarets barriärer.

Ett problem när framtida mänskliga handlingar diskuteras är att människans och samhällets framtid inte går att förutsäga. I tidsskalor av minst några tiotal år är det bästa som kan göras att identifiera vissa viktiga parametrar eller faktorer och kombinera dessa för att utforska möjliga utfall. I tidsskalor av minst några hundra år är dock människans och samhällets framtid oförutsägbar och osäkerheterna obestämbara eller ospecificerade, dvs utfallsrummet är inte känt och kan inte beskrivas. Det är till exempel omöjligt att fastställa vilka vetenskapliga upptäckter som kommer att göras under de kommande tusen åren. En allmänt tillämpad metod för att hantera detta och undvika spekulationer om hur framtiden kommer att se ut är att anta att de framtida förhållandena vad gäller samhället och teknisk praxis väsentligen är desamma som dagens /NEA 1995/. Detta ger ett praktiskt och heltäckande förfarande för att åskådliggöra de potentiella faror som är relaterade till framtida mänskliga handlingar vid förvarsplatsen. Ett sådant förfarande tillämpas även vid den här utvärderingen.

I de allmänna råden till sina föreskrifter rekommenderar SSM att säkerhetsanalysen inkluderar direkt intrång genom borring samt aktiviteter som indirekt kan påverka säkerhetsfunktionerna /SSM 2008b/. SSM rekommenderar även att scenarierna för de framtida mänskliga handlingarna baseras på nuvarande levnadsvanor och teknisk praxis. Avseende konsekvenserna säger SSM i föreskrifterna SSMFS 2008:37 /SSM 2008b/ att endast doser till följd av skadorna på förvaret måste beräknas, medan konsekvenserna för de individer som genomför intrånget inte behöver analyseras. Detta överensstämmer inte med direktiven i SSMFS 2008:21 /SSM 2008a/. Dessa säger att fall med syfte att åskådliggöra skador på människor som tränger in i förvaret bör inkluderas. Att det finns behov av en stiliserad beräkning av skador på människor som tränger in i förvaret poängterades även av myndigheterna i deras granskning av SR-Can /Dverstorp och Strömberg 2008/, och det här direktivet har följts i analyserna av FHA-scenarier i SR-Site.

I enlighet med SSM:s allmänna råd /SSM 2008a/ utvärderas framtida mänskliga handlingar och deras inverkan på förvaret separat. De tas inte med i referensutvecklingen eller risksummeringen.

Metod

Människors handlingar kan komma att påverka förvaret på olika sätt. Handlingens inverkan på förvaret såväl som dess konsekvenser är resultatet av en kombination av tekniska faktorer och samhällsfaktorer. Exempel på sådana faktorer är den tekniska nivån och kunskapsnivån, förekomsten av övervakning, infrastruktur och bebyggelsemönster samt system för livsmedelsförsörjning. I syfte att ge en så heltäckande bild som möjligt av olika mänskliga handlingar som kan komma att påverka slutförvaret, samt deras bakgrund och syfte, har tillvägagångssättet nedan använts, se **FHA-rapporten**.

- Teknisk analys:
Identifierar mänskliga handlingar som kan påverka förvarets säkerhetsfunktioner, beskriver sådana handlingar och ger en teknisk motivering till att de kan förekomma.
- Analys av samhällsfaktorer:
Identifierar ramscenarier (ramförhållanden) som beskriver tänkbara samhälleliga sammanhang för framtida mänskliga handlingar som kan påverka ett slutförvars radiologiska säkerhet.
- Val av representativa fall:
Resultaten av de tekniska analyserna och samhällsanalyserna sammanställs och ett eller flera åskådliggörande fall av framtida mänskliga handlingar väljs.
- Scenariebeskrivning och konsekvensanalys av de valda fallen.

De tre första stegen är huvudsakligen baserade på arbete som utförts i samband med säkerhetsanalysen SR 97 /SKB 19991a/. Resultat från utvecklingen av SKB:s FEP-databas, se kapitel 3, och en översikt av viss relevant litteratur som publicerats efter SR 97 beaktas också, såväl som myndighetsgranskningen av SR-Can /Dverstorp och Strömberg 2008/. Det sista steget är en uppdatering och utvidgning av arbetet som utförts för SR-Can. Även i detta fall beaktas myndighetsgranskningen av SR-Can /Dverstorp och Strömberg 2008/. En sammanfattning av arbetet ges i följande underavsnitt.

14.2.3 Teknisk och samhällelig bakgrund

Teknisk analys

Den tekniska analysen baserades på resultaten från en workshop som genomfördes inom ramen för SR 97 /Morén et al. 1998/. För SR-Can granskades relevansen av resultaten från workshopen med avseende på nya tekniska framsteg efter samråd med tekniska experter från SKB. Dessutom ledde en kontroll mot NEA:s FEP-databas och relaterade nationella projekt till en del mindre ändringar och till att listan med handlingar utökades med ”bomba eller spränga under ytan” /SKB 2006e/. Det kompletterande FEP-arbetet som utfördes för SR-Site, se kapitel 3, ledde inte till några förändringar av den lista över mänskliga handlingar som tagits fram för SR-Can.

De mänskliga handlingar som identifierats för SR-Can och som även är tillämpliga för SR-Site listas i tabell 14-1. Baserat på deras huvudsakliga påverkan delas handlingarna in i kategorierna mänskliga handlingar med termisk (T), hydraulisk (H), mekanisk (M) och kemisk (C) påverkan. Från den tekniska analysen drogs slutsatsen att handlingar som omfattar borring och/eller bergguttar är de som har störst potentiell inverkan på förvaret. Dessutom ansågs förvarsplatsen vara mer gynnsam än andra platser för uppförandet av en värmelagrings- eller värmepumpsanläggning på grund av den värme som alstras av det använda kärnbränslet. För de övriga handlingarna ansågs förvarsplatsen vara likvärdig med, eller mindre gynnsam än, andra platser med likartad berggrund.

Tabell 14-1. Mänskliga handlingar som kan påverka förvarets säkerhet.

Kategori	Handling
Termisk påverkan	T1: Bygga värmelagringsanläggning* T2: Bygga värmepumpsystem* T3: Utvinna geotermisk energi (geotermi)* T4: Bygga anläggning som genererar värme/kyla på ytan ovanför förvaret
Hydrologisk påverkan	H1: Bygga brunn* H2: Bygga damm H3: Ändra riktningen eller storleken för ytvatten (vattendrag, sjöar, hav) och deras förbindelser med andra ytvatten H4: Bygga vattenkraftsanläggning* H5: Bygga dräneringssystem H6: Bygga infiltrationssystem H7: Bygga bevattningsystem* H8: Ändra förhållanden för grundvattentillrinning genom ändrad markanvändning
Mekanisk påverkan	M1: Borra i berget* M2: Bygga bergrum, tunnel, schakt etc.* M3: Anlägga dagbrott eller stedbrott* M4: Anlägga tipp eller avfallsupplag M5: Bomba eller spränga på ytan ovanför förvaret M6: Bomba eller spränga under ytan*
Kemisk påverkan	C1: Förvara/deponera riskavfall i berggrunden* C2: Anlägga avfallsupplag (soptipp) C3: Försura luft, jord och berggrund C4: Sterilisera jord C5: Orsaka olycka som leder till kemisk kontamination

* Omfattar, eller kan omfatta, borring och/eller byggande av bergrum.

Analys av samhällsfaktorer

Rådande samhällsförhållanden är av betydelse både för möjligheten att oavsiktliga mänskliga handlingar som försämrar förvarets säkerhet inträffar och för utvärderingen av deras konsekvenser. Viktiga frågeställningar rör varför den störande handlingen utförs och samtida samhällsförhållanden såsom den allmänna kunskapsnivån och regelverk. Dessa i grund och botten humanistiska och socioekonomiska frågor analyserades vid en workshop för SR 97 (se **FHA-rapporten** och /SKB 2006e, Morén et al. 1998, SKB 1999a/). Experter inom områdena kulturgeografi, vetenskaps- och teknikhistoria samt systemanalys deltog i workshopen. Så kallade ramsscenarier formulerades. Dessa beskriver tänkbara samhällsförhållanden som kan leda till framtida mänskliga handlingar med inverkan på slutförvarets radiologiska säkerhet. Ramsscenarierna utvecklades genom morfologisk analys /Morén et al. 1998, Ritchey 1997/, en grupp- och processororienterad interaktiv metod för att strukturera och analysera komplexa problemområden som inte går att kvantifiera, innehåller obestämbara osäkerheter och kräver ett kritiskt förhållningssätt.

Från studien av samhällsaspekter drogs slutsatsen att det är svårt att föreställa sig oavsiktligt intrång om samhället och den allmänna kunskapsnivån ständigt utvecklas. På grund av det långsiktiga tidsperspektivet går det dock inte att utesluta möjligheten att förvaret och syftet med det kommer att falla i glömska, även om både samhället och den allmänna kunskapsnivån utvecklas allt mer. Det går heller inte att garantera att övervakningen av förvarsplatsen kommer att upprätthållas i ett långsiktigt tidsperspektiv. Om samhället utvecklas diskontinuerligt, så att den samhälleliga och tekniska utvecklingen genomgår en plötslig, stor förändring, verkar det rimligt att kunskap kommer att gå förlorad och att institutioner kommer att förfalla. Det är också rimligt att anta att kunskap går förlorad om samhället förfaller.

14.2.4 Val av representativa fall

Förslutet förvar

Det är troligt att människor kommer att utnyttja förvarsplatsen i framtiden. Mänskliga handlingar som påverkar den radiologiska säkerheten och som sker utan kännedom om förvaret och/eller dess syfte kan inte uteslutas. De handlingar som påverkar inneslutningen eller inneslutningens funktionsindikatorer är allvarligast. Av övriga handlingar är de handlingar som påverkar fördröjningen eller fördröjningens funktionsindikatorer allvarligast. Förändringar i biosfären kan leda till en förhöjning av de doser som människor kan utsättas för om inneslutningen brutits och det finns läckande kapslar i förvaret.

Ett KBS-3-förvar kommer att vara beläget på minst 400 meters djup i berggrunden och det föreslagna förvarsdjupet i Forsmark är större än 450 m. Ett skäl till detta är att det är önskvärt att placera förvaret i en miljö där bränslets inneslutning bibehålls, även om det sker omfattande förändringar på ytan. Förändringar som beaktats när djupet för ett KBS-3-förvar bestämdes är naturliga förändringar och förändringar orsakade av människor. Exempel på naturliga förändringar är att förvarsplatsens läge i förhållande till havet ändras, samt förekomst av permafrost och inlandsisar, se vidare avsnitten 5.2.2 och 14.3.4. Dessa naturliga förändringar kommer även att påverka faktorer som har betydelse för framtida mänskliga handlingar på förvarsplatsen, exempelvis bosättning och samhällets och människans möjligheter att använda förvarsplatsen.

Stora osäkerheter är förknippade med teknikens och samhällets utveckling. För att minska det spekulativa inslaget föreslog NEA:s arbetsgrupp för analys av framtida mänskliga handlingar /NEA 1995/, såväl som SSM i sina allmänna råd till föreskrifterna /SSM 2008b/, ett förhållningssätt som bygger på den kunskap och erfarenhet som finns i dag. Men om detta förhållningssätt anammats bokstavigt eller konsekvent, skulle det inte förekomma några oavsiktliga mänskliga handlingar som leder till radiologiska konsekvenser. Dagens handlingar vid förvarsplatsen kommer inte att påverka säkerheten. Borrning till stora djup genomförs endast för att undersöka platsen inför byggandet av förvaret. Om detta skulle leda till riskfyllda förhållanden eller omständigheter, skulle åtgärder vidtas för att undvika eller minimera konsekvenserna för människor och miljön. Det finns ett annat dilemma vid utvärderingen av framtida mänskliga handlingar. För att kvantifiera konsekvenserna krävs det detaljerade beskrivningar av de mänskliga handlingarna. Sådana beskrivningar kommer oundvikligen att innehålla spekulationer om handlingsförlopp, vilka alltid kommer att kunna ifrågasättas. Både de tekniska analyserna och samhällsanalyserna kan emellertid sägas vara baserade på nuvarande praxis, även om de inte återger dagens förhållanden. Resultaten av analyserna kan användas för att välja representativa fall. När scenarier som är baserade på de valda fallen beskrivs undviks spekulativa inslag genom att anta att de mest allvarliga av de förenklade och tänkbara alternativen inträffar.

Samtliga handlingar i tabell 14-1 påverkar spridningen av radionuklider i biosfären. Handlingar som genomförs på eller nära ytan, ned till några tiotals meters djup, bedöms dock inte kunna ha en direkt inverkan på de tekniska barriärerna och bränslets inneslutning. Detta gäller sålunda handlingarna T4, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, M3, M4, C2, C3, C4 och C5 (fastän en del av dem kan omfatta borrhning av relativt djupa hål). Handlingar nära ytan som hör till kategorierna M och H bedöms ha mindre inverkan på förvaret än naturliga förändringar i samband med framtida klimatförändringar. Av de handlingar som leder till kemisk påverkan (C2–C5) har försurning av luft och mark (C3) studerats i störst utsträckning. I realistiska fall med försurning från svavel- och koldioxid i atmosfären påverkas inte miljön på förvarsdjup /Nebot och Bruno 1991, Wersin et al. 1994b/. Även mot andra kemiska föreningar bedöms jordlager och berggrund fungera effektivt som både filter och buffert.

Bombning eller sprängning på markytan ovanför förvaret (M5) kan inte påverka inneslutningen av det använda kärnbränslet, förutom i det fall då sprängningen sker med ett kraftigt kärnvapen. En sådan händelse innebär att det pågår kärnvapenkrig. Konsekvenserna av kriget och själva sprängningen skulle vara mycket större än konsekvensen av det hypotetiska läckaget från förvaret. Men underjordiska atombombsprov (M6) nära förvaret skulle kunna bryta inneslutningen på ett liknande sätt som ett jordskalv skulle kunna göra. Provet skulle då behöva utföras i närheten av de deponerade kapslarna. Provsprängning av bomber kan kombineras med identifierade samhällsförhållanden för att skapa ett rimligt scenario. Men provsprängning av atombomber kräver kunskap om kärnklyvning och de med detta förknippade riskerna och utförs under ytan för att undvika miljöpåverkan. Eftersom mätningar utförs i samband med testerna är det rimligt att anta att om det finns ett detekterbart läckage från förvaret, så kan det särskiljas från utsläppen från bomben och hanteras av ett samhälle som utför underjordiska vapenprov.

Några av handlingarna i tabell 14-1 kan – förutom att de påverkar radionuklidtransporten – indirekt påverka inneslutningen av det använda kärnbränslet om de även påverkar geosfärens förmåga att tillhandahålla gynnsamma hydrologiska eller kemiska förhållanden. Sådana handlingar skulle behöva utföras direkt ovanför eller mycket nära förvaret och omfatta borrhning och/eller bergguttag (M1, M2). Hit hör de handlingar som har att göra med värmeutvinning (T1, T2, T3), anläggning av brunn (H1) och deponering av miljöfarligt avfall i berget (C1). Eventuellt kan även vattenkraftsanläggningar (H5) samt dagbrott och stenbrott (M3) omfatta borrhning eller bergguttag på stort djup. Innan en berganläggning byggs genomförs borrhningar för att undersöka berget. Därför omfattar alla dessa fall borrhning i berget om nuvarande teknik används.

Av flera skäl bedöms större berganläggningar i anslutning till förvaret inte komma i fråga i ett kort tidsperspektiv, dvs inom några hundra år. Exempelvis är slutförvaret en stor berganläggning, den enda i Sverige i sitt slag, som med stor sannolikhet inte kommer att glömmas bort under en så kort tidsperiod. Övervakning kan förväntas finnas kvar i denna tidsskala. Utifrån dagens tekniska och ekonomiska förutsättningar är de uppräknade handlingar som omfattar större bergarbeten mindre sannolika på förvarsplatsen. I ett något längre tidsperspektiv, dvs några hundra år och längre, är det svårt att bedöma hur den allmänna kunskapsnivån, tekniken och samhället kommer att utvecklas. Därför är det också svårt att bedöma hur, var och varför berganläggningar kommer att uppföras. Grundat på nuvarande praxis kan berganläggningar på djup ner till omkring 50 m mycket väl förekomma och finns faktiskt i Forsmark (SFR-anläggningen, ett förvar för låg- och medelaktivt avfall). I en avlägsen framtid kan de potentiella malmfyndigheterna sydväst om det undersökta området i Forsmark komma att exploateras.

Av handlingarna i tabell 14-1 bedöms ”Borra i berget” vara den enda som direkt kan medföra att kopparkapseln penetreras och att inneslutningen av avfallet bryts. Detta samtidigt som handlingen kan tänkas ske oavsiktligt, är tekniskt möjlig, praktiskt genomförbar och trovärdig. ”Borra i berget” är dessutom en tänkbar handling mot bakgrund av resultaten av samhällsanalysen. Visserligen går det att bygga ett bergrum, en tunnel eller ett schakt, eller anlägga ett dagbrott som medför att kopparkapseln penetreras, men att göra det utan att ha undersökt berget så att förvaret upptäckts, dvs utan att känna till förvaret, bedöms inte vara tekniskt trovärdigt. En berganläggning på mindre djup eller en gruva i närheten av förvarsplatsen i Forsmark kan dock komma att byggas i framtiden. Därför har fallen ”Genomborrhning av kapsel”, ”Berganläggning i förvarets omgivning” och ”Gruva i närheten av förvarsplatsen vid Forsmark” valts som representativa fall för scenarier relaterade till ett förslutet förvar och som därför också ska beskrivas och analyseras ytterligare.

Oförslutet eller ofullständigt förslutet förvar

Enligt föreskrifterna är det även nödvändigt att definiera och analysera ett fall som åskådliggör konsekvenserna av ett oförslutet förvar /SSM 2008a/. Eftersom förvaret uppförs och tas i drift successivt, representerar det fall som valts ut för analys ett ofullständigt förslutet förvar snarare än ett oförslutet förvar. Strategin för deponering av kapslar innebär att deponeringstunnlar successivt fylls med kapslar och sedan återfylls och försluts så snart de har fyllts. Att förvaret skulle överges mitt under den här processen bedöms som relativt osannolikt, eftersom det skulle betyda att kapslar lämnas kvar på markytan där de skulle utgöra en större risk än om de placerades i förvaret. Det bedöms som rimligare att förvaret överges när alla kapslar har deponerats och alla deponeringstunnlar återfyllts och förslutits, medan alla övriga förvarsvolymer fortfarande är öppna. Orsaken till detta skulle kunna vara politiska beslut om att inte försluta förvaret fullständigt. Därför är detta det grundläggande antagandet i det fall som valts ut som representativt för scenarier som är relaterade till ett oförslutet eller ofullständigt förslutet förvar.

14.2.5 Utvärdering av borrhingsfallet

Inledning och beskrivning av det analyserade fallet

Endast borrhning som sker utan kännedom om förvarets läge och syfte beaktas. Olika förebyggande åtgärder för att minska sannolikheten för oavsiktligt intrång i förvaret har diskuterats /NEA 1995, Eng et al. 1996/. När förvaret försluts kommer de förebyggande åtgärder som då bedöms vara effektivast att utföras. Exempel på sådana förebyggande åtgärder är informationslagring i arkiv, utmärkning av platsen och olika typer av övervakning, exempelvis fysisk bevakning, begränsningar av äganderätt och begränsningar av hur marken kan användas. Alla dessa förebyggande åtgärder antas ha förlorat sin förebyggande och varnande effekt vid tidpunkten då borrhningen sker.

Enligt diskussionen i avsnitt 14.2.3 är det svårt att föreställa sig en samhällsutveckling som leder till att kännedomen om förvaret, dess syfte och innehåll går förlorade samtidigt som den allmänna kunskapsnivån, det tekniska kunnandet och samhället är på nuvarande nivå eller utvecklas. Det är troligt att ett samhälle som besitter den tekniska förmågan att borra ner till stora djup även har det kunnande som krävs för att analysera resultaten och möjligtvis kommer att verka för att förhindra skadliga effekter på människor och miljön. I borrhningsscenarioet antas det att tekniken finns för att borra till stora djup, att kännedomen om förvarets läge och syfte har gått förlorade, att de som gör intrång inte kan analysera och förstå vad de funnit och att samhället saknar regelverk för borrhning. Det antas att en utveckling som leder till den här situationen kommer att ta tid. Förebyggande åtgärder för att förhindra intrång antas i allmänhet finnas kvar mellan 100 och 500 år, medan fysiska markeringar kan vara verkningsfulla i ett längre tidsperspektiv – upp till ett par tusen år /NEA 1995, Wilmot et al. 1999/. Ett KBS-3-förvar är en stor industriell etablering som kommer att vara i drift under flera årtionden. Den här typen av anläggning har debatterats, undersökts och analyserats ända sedan de första kärnkraftverken togs i drift i Sverige. Det är rimligt att det kommer att ta viss tid innan kännedomen om förvaret går förlorad och likaså innan samhället och markägare upphör med övervakningen av handlingar som exempelvis borrhning vid förvarsplatsen. Baserat på detta görs antagandet att borrhningen kommer att ske 300 år eller senare efter förvarets förslutning.

Den tekniska praxisen antas vara lik den som finns för närvarande. I dag utförs borrhning för att anlägga brunnar, för att utvinna bergvärme och i undersökningssyfte. Bergbrunnar borrar normalt till djup mellan 50 och 100 m, men i vissa fall borrar brunnar ner till 130–150 m. Djupare brunnar än så är ovanligare. Anledningen är att det är dyrt att borra samt att sannolikheten att träffa på tjänligt vatten i tillräcklig mängd minskar med djupet. För värmeutvinning kan borrhning till djupare nivåer förekomma. Även om borrhning till djup på 500 m eller mer sker i dag för att utvinna värme, vilket kan bli vanligare i en nära framtid, sker borrhning till stora djup i allmänhet i undersökningssyfte, oftast för prospektering.

Prospektering innefattar i allmänhet undersökningar från ytan före borrhning. Resultat från modellering av den geofysiska responsen från ett förvar för använt kärnbränsle i Forsmark tyder på att förvaret kommer att utgöra en anomali som kan detekteras med seismiska reflektionsundersökningar, men inte med andra studerade geofysiska metoder (magnetism, gravitation, inducerad polarisation, resistivitet, transienta elektromagnetiska fält) /Isaksson et al. 2010/. Den seismiska responsen beror på skillnader i hastighet mellan bentoniten och det omgivande berget. Sannolikt skulle den här typen av anomali inte tolkas som mineralisering, men det kan inte uteslutas att anomalin skulle komma att bli föremål för fortsatta undersökningar. Mot bakgrund av detta antas det att borrhning genom förvaret genomförs i undersökningssyfte.

Diamant(kärn)borrning utnyttjas normalt vid borrning i undersökande syfte. Borrkärnan tas ut, placeras i lådor och besiktigas av en geolog. Utvalda prov kan analyseras mer grundligt. Borrkaxet (det pulveriserade berget blandat med borrens kylvatten) avlägsnas vanligen med vatten, som också kyler borren. Vattnet med borrkax sprids oftast ut på marken runt borrhålet. Då borrningen är klar skickas kärnorna till kärnkartering och borrhålet överges. Om hålet passerar någon zon med stort vattenflöde så att mycket vatten förs upp till ytan kan borrhålet fyllas igen. Det sker i allmänhet bara om flödet utgör ett problem för kringboende.

Borrhålets riktning varierar beroende på ändamålet och vad som är känt om den bergvolym man vill undersöka. I allmänhet lutar borren och vinkeln mot markplanet är vanligen 60–85°. Om det inte finns några kända hinder eller undermarksanläggningar försöker de personer som utför borrarbetet alltid att fortsätta borrarbetet, även om de stöter på problem. Om borren når bufferten och kapseln kan dessa mycket väl penetreras och borrarbetet fortgå utan att avbrytas förrän borrkärnan besiktigas eller då det tilltänkta djupet nås. Om den återfyllda deponeringstunneln penetreras kommer det att bli fullt med finkornigt material i det vatten som kyler borren och för borrkaxet till ytan. Standardförfarandet i det fallet är att försöka spola bort det finkorniga materialet. Om detta inte lyckas, vilket är troligt om man försöker borra genom återfyllningen, injekteras borrhålet ofta och borrarbetet genom betongen fortsätter.

Det antas att syftet med borrarbetet är att nå stora djup och att borrarutrustningen därför placeras i en lågt liggande punkt i terrängen. Borrinkeln antas vara 85° och det antas att borrkaxet sprids ut på marken. När den återfyllda tunneln nås antas det att borrhålet injekteras och att borrarbetet inte avbryts. Det antas även att bufferten injekteras, att borrarbetet fortsätter och att kapseln penetreras. När borrkärnan som innehåller kapselmateriell och använt kärnbränsle förs upp till ytan förutsätts det att den avvikande situationen uppmärksammas och att borrarbetet avbryts.

Eftersom utvärderingen inte endast ska inbegripa påverkan på den som utför intrånget, utan även utvärdera hur förvarets säkerhetsfunktioner kan skadas, görs följande antaganden: Platsen och borrhålet överges utan vidare åtgärder. Efter ungefär en månad flyttar en familj till platsen och driver där ett självförsörjande jordbruk. Det övergivna borrhålet används som brunn av familjen. Konsekvenserna för förvaret utvärderas liksom de årliga effektivdoser som familjen utsätts för samt dosen som borrarpersonalen utsätts för.

Beaktad(e) funktionsindikator(er)

Eftersom det i detta borrarfall förutsätts att en kapsel såväl som bufferten och återfyllningen ovanpå kapseln penetreras av ett borrhål, påverkas funktionsindikatorer relaterade till både inneslutnings- och fördröjningsegenskaper hos kapseln, bufferten och återfyllningen i deponeringstunnlarna. Dessutom kan de funktionsindikatorer som är relaterade till geosfärens förmåga att tillhandahålla gynnsamma hydrauliska och kemiska förhållanden påverkas. Därför beaktas följande funktionsindikatorer i detta borrarfall:

- Can1, Utgöra korrosionsbarriär; säkerställa inneslutning,
- Buff1, Begränsa advektiv transport i bufferten; säkerställa täthet och självläkning
- BF1, Motverka buffertexpansion; hög densitet och självläkning av återfyllning,
- R1, Tillhandahålla gynnsamma kemiska förhållanden; säkerställa reducerande förhållanden,
- R2, Tillhandahålla gynnsamma hydrologiska förhållanden och gynnsamma transportförhållanden; säkerställa stora transportmotstånd i sprickor och litet ekvivalent flöde i gränsytan mellan buffert och berg.

Dessutom kan säkerhetsfunktionen Buff5, Förhindra kapselsjunkning, påverkas om tillräckligt mycket buffertmaterial går förlorat. Om detta sker kommer emellertid buffertens andra säkerhetsfunktioner redan att ha satts ur spel.

Kvalitativ beskrivning av konsekvenserna av oavsiktlig penetration av en kapsel under borrhning

Det förutsätts att en kapsel har penetrerats genom kärnborrhning. Borrhålet ovanför den penetrerade kapseln antas vara injekterat. Vidare antas det att buffertens förmåga att förhindra advektiv transport, att självlåka och att förhindra kolloidtransport har gått förlorad i det injekterade området. En del buffert- och återfyllningsmaterial förloras, men förutom för de injekterade delarna antas det att säkerhetsfunktionerna hos både återfyllning och buffert upprätthålls. Vattnet som innehåller borrhåxet från borrhningen förs upp till ytan och sprids ut på marken i ett cirkelformat område.

Det injekterade borrhålet har lämnat kvar ett öppet rör från den penetrerade kapseln till ytan. Så länge injekteringsmedlet är intakt har borrhålets existens inte någon direkt inverkan på tunnelåterfyllningen i deponeringstunneln eller på bufferten i de övriga deponeringshål i deponeringstunnlarna. Det öppna borrhålet kan emellertid påverka grundvattnets flödesmönster, åtminstone lokalt. Detta kan i sin tur påverka de kemiska förhållandena i och omkring förvaret. Inverkan på grundvattnets flödesfält från ett öppet borrhål som går från ytan genom återfyllningen in i ett deponeringshål har därför analyserats.

Det är troligt att injekteringsmedlet bryts ner med tiden och att bufferten och återfyllningen ovanför den penetrerade kapseln expanderar så att den tomma borrhålsvolymen i dessa barriärer fylls ut. Med tanke på buffertens och återfyllningens självläkande förmåga, se avsnitt 10.2.4, och de ganska stora mängder buffert- och återfyllningsmaterial som kan förloras innan advektiva förhållanden uppstår, se avsnitt 10.3.9 och 10.3.11, verkar det troligt att denna expansion kommer att återställa de gynnsamma hydrauliska och mekaniska förhållandena i bufferten i deponeringshållet med den penetrerade kapseln och i återfyllningen ovanför detta deponeringshål. Även om så inte blir fallet kommer borrhålet högst sannolikt inte att påverka återfyllningen i andra delar av deponeringstunneln. Detta innebär att bufferten i andra deponeringshål i tunneln också bör vara opåverkad av borrhålet.

Kvantitativ bedömning av radionuklidutsläppet och doskonsekvenserna av penetration av en kapsel under borrhning

I analysen av doskonsekvenserna för detta borrhningsfall analyseras den dos som såväl borrhningspersonalen som en familj som bosätter sig på platsen utsätts för. Analysen beskrivs i avsnitt 6.3 i **FHA-rapporten** och sammanfattas nedan. De data som används i analysen har sammanställts i tabell 14-2.

Det antas att en kapsel penetreras genom borrhning och att detta tidigast sker 300 år efter förvarets förslutning. Vattnet som innehåller borrhåxet från borrhningen förs upp till ytan tillsammans med borrhkärnan som innehåller det förstörda eller oförstörda bränslet. Bränslet finns i form av bränslestavar i bränselement i kopparkapslarnas segjärnsinsatser. Baserat på geometrin och anordningen av bränslestavarna i kapseln, och under antagande av att borrhålets diameter är 0,056 m, sätts andelen av det bränsle i kapseln som når ytan till tre procent. Det antas vidare pessimistiskt att allt bränsle som förs upp till ytan blir kvar på platsen och att radionuklider i detta bränsle sprids ut på marken tillsammans med den omedelbart frigjorda fraktionen av radionuklidinventariet i den penetrerade kapseln. Detta förutsätts ske över ett cirkelformat område där radien av det kontaminerade området är tre meter och det kontaminerade jordlagret är 0,1 m tjockt. Borrhningspersonalen får stråldoser från dessa på marken utspridda radionuklider.

I detta borrhningsfall antas det dessutom att en familj bosätter sig på platsen en månad efter att platsen övergivits av borrharna. Det injekterade borrhålet har lämnat kvar en öppen rörförbindelse från den penetrerade kapseln till ytan och familjen utnyttjar borrhålet som en brunn. Dessutom används den kontaminerade jorden för odlingsändamål. Familjen utsätts för en stråldos från radionuklider i borrhålsvattnet såväl som från radionuklider i jordbruksprodukterna och luften, de senare med ursprung från radionuklider i den kontaminerade jorden. Antagandena i beräkningarna av den dos som erhålls genom användning av det övergivna borrhålet som brunn är desamma som i dosberäkningarna för andra scenarier som analyseras i SR-Site /Avila et al. 2010/. Det antas att vattnet från borrhålet används för bevattning och som dricksvatten för familjen och boskapen. I beräkningen av dos från radionuklider som är utspridda på marken antas det att familjen använder den kontaminerade jorden för att upprätta ett självhushåll för grönsaksodling. Trädgården antas vara stor nog för produktion av grönsaker för fem personer, vilket innebär att de radionuklider som förs upp till ytan sprids ut över ett större område. Familjemedlemmarna utsätts också för yttre strålning och för exponering genom inandning av damm under den tid de tillbringar i trädgården.

Frigörelsen av radionuklider från bränslet till vattnet i den penetrerade kapseln bestäms av bränslets upplösningshastighet och metalldelarnas korrosionshastighet. Löslighetsgränserna för grundämnen kan emellertid begränsa utsläppen av vissa radionuklider, beroende på hur stort vattenflödet är i det deponeringshål som innehåller den penetrerade kapseln. Grundat på resultat av den hydrogeologiska modelleringen /Joyce et al. 2010/ sätts vattenflödet i deponeringshålet till 0,1 m³/år. Med detta vattenflöde och grundämnens löslighetsgränser, som är representativa för de kemiska förhållanden som förväntas i grundvattnet mellan år 2000 och 3000 e Kr, blir utsläppet av Np-237, Tc-99, Zr-93 och uranisotoperna från det använda kärnbränslet löslighetsbegränsat.

Tabell 14-2. Sammanställning av data som används vid analysen av doskonsekvenser till följd av oavsiktlig penetration av en kapsel under borrning.

Parameter	Värde/antagande	Kommentar/hänvisning
Tidpunkt för borrning	300 år efter förslutning av förvaret eller senare	
Tid som den exponerade individen i familjen tillbringar i mitten av det kontaminerade området	365 timmar	En timme per dag varje dag under året
Radionuklidinnehåll	Medelkapsel	Datarapport , avsnitt 3.1
IRF-fraktion	Inkluderad i inventariet som finns kvar på marken	Medianvärden enligt Datarapporten , avsnitt 3.2
Andel bränsle i kapseln som förs till ytan	0,03	FHA-rapporten , bilaga B
Bränsleupplösningshastighet	10 ⁻⁷ per år	Datarapporten , avsnitt 3.3
Korrosionshastighet för metalldelar i bränslet	10 ⁻³ per år	Datarapporten , avsnitt 3.2
Vattenflöde genom deponeringshål	0,1 m ³ per år	FHA-rapporten , bilaga B
Löslighetsgränser för grundämnen	Representativa för platsförhållanden under perioden 2000 till 3000 e Kr	FHA-rapporten , avsnitt 6.3 och bilaga i Radionuklidtransportrapporten .
Volym av initialt kontaminerad jord	2,8 m ³ (radie 3 m, tjocklek 0,1 m)	–
Dosomvandlingsfaktorer för kontaminerad jord	Dosfaktorer för extern strålning, inandning och intag av föda som odlats på platsen	/Nordén et al. 2010/
Sorptionskoefficienter	Grundämnesspecifika sorptionskoefficienter för jord i det bevattnade området	/Nordén et al. 2010/
Den brukade jordens densitet	323 kg torrvikt/m ³	/Löfgren 2010/
Areal av mark som används för grönsaksodling	102 m ²	Stor nog för produktion av grönsaker för fem personer, om andelen grönsaker i kosten antas vara 2,5 %.
Produktivitet vid odling av grönsaker på bevattnad mark	0,135 kg C/m ² år	/Löfgren 2010/
Produktivitet vid odling av rotfrukter på bevattnad mark	0,127 kg C/m ² år	/Löfgren 2010/
Produktivitet vid odling av spannmål på bevattnad mark	0,114 kg C/m ² år	/Löfgren 2010/
Dammhalt i luften	5·10 ⁻⁸ kg torrvikt/m ³	/Nordén et al. 2010/
Inandningshastighet	1 m ³ /h	/Nordén et al. 2010/
Årsintag av kol	110 kg C/år	/Nordén et al. 2010/
Årsintag av vatten	0,6 m ³ /år	/Nordén et al. 2010/
Vattenvolym som används för bevattning varje år	0,15 m ³ /(m ² år)	/Nordén et al. 2010/
Antal bevattningstillfällen per år	5	/Nordén et al. 2010/
Avrinning	0,186 m/år	/Löfgren 2010/
Brunnskapacitet	82 502 m ³ /år	/Löfgren 2010/

Dos som borrhingspersonal utsätts för

Dosen som borrhingspersonalen utsätts för kommer från radionukliderna i borrhaxet, borrhvattnet och i bränsleledarna som är utspridda på marken kring borrhålet. Doshastigheten som en person i borrhingspersonalen skulle exponeras för under arbete i det mycket kontaminerade området 300 år

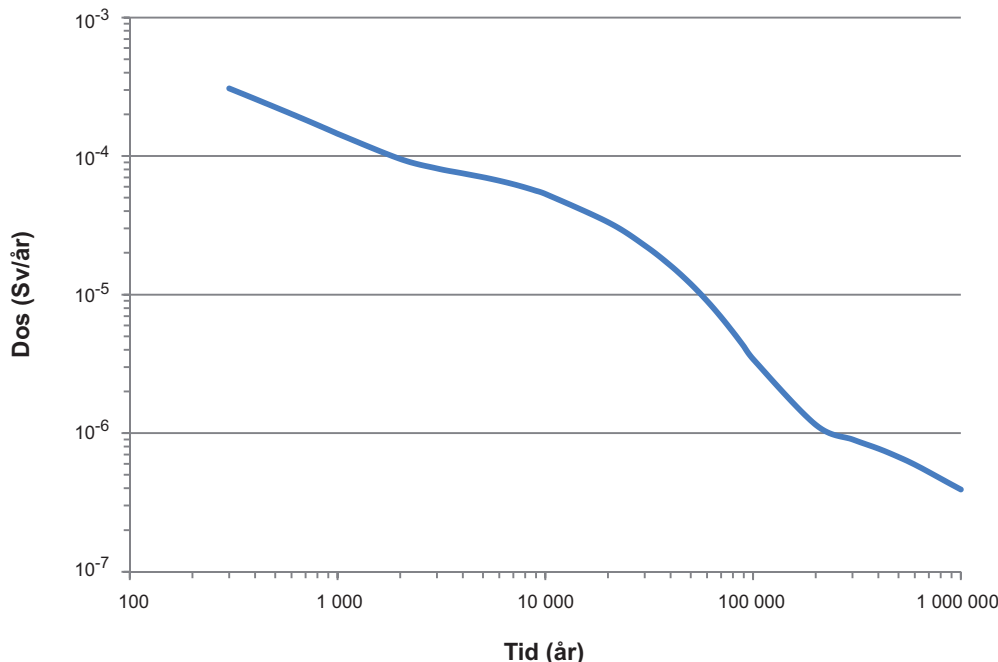
efter förvarets förslutning beräknas vara 130 mSv/timme och den domineras fullständigt av exponering för Ag-108m, se **FHA-rapporten**. Om borring sker omkring 5 000 år efter förslutningen av förvaret kommer doshastigheten att ha minskat till ett värde under 1 mSv/timme och domineras av exponering för Nb-94 och Sn-126.

Dessa beräknade doshastigheter är mycket höga. Detta är primärt ett resultat av de försiktiga antaganden som gjorts gällande mängden Ag-108m som förs upp till ytan under borring. I det använda kärnbränslet finns Ag-108m i legeringen Ag-In-Cd i styrstavarna, men i beräkningarna antas det att Ag-108m är en av de radionuklider som frigörs omedelbart när en kapsel penetreras. Därför förutsätts det att hela mängden förs till ytan. I fallet med borrhingsinträngning skulle Ag-108m inte frigöras omedelbart, varvid tre procent i stället för 100 procent av innehållet Ag-108m skulle föras upp till ytan vid borring. På grund av den fullständiga dominansen av Ag-108m vid bestämningen av doshastigheten skulle detta minska doshastigheten för arbetare till tre procent av värdet, dvs doshastigheten 300 år efter förvarets förslutning skulle vara omkring 4 mSv/timme.

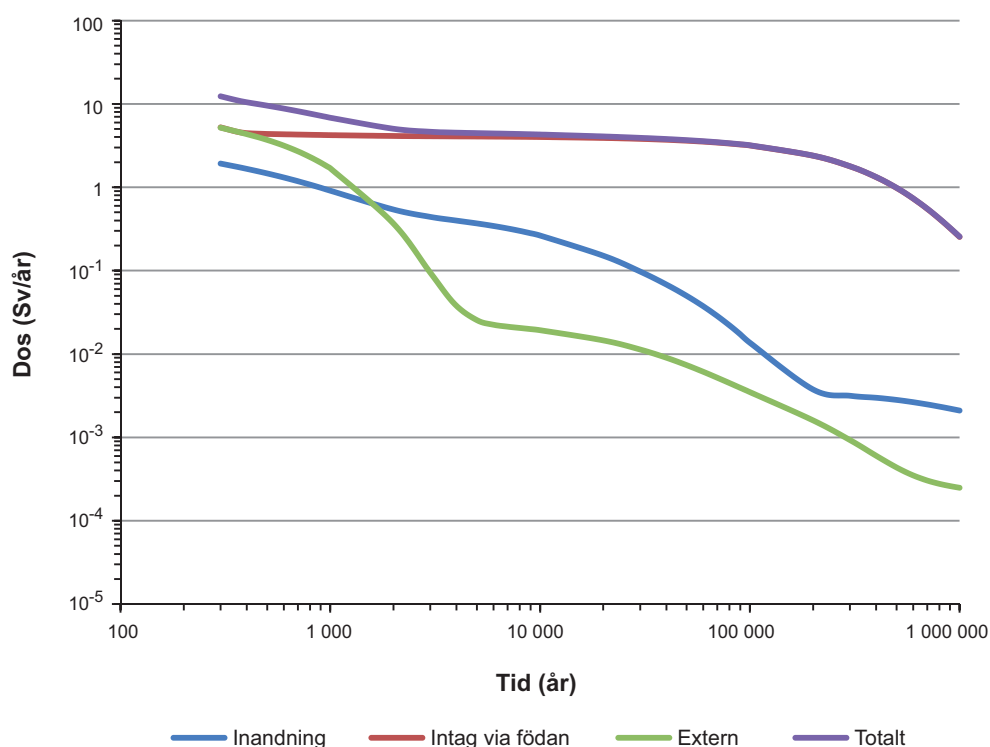
Dos som familjen som bosatt sig på platsen utsätts för

Doserna som familjen som bosätter sig på platsen utsätts för kommer från två källor: det övergivna borrhålet som används som brunn av familjen och borrhålet som innehåller den omedelbart frigjord fraktionen och de bränslepartiklar som spridits ut på marken. De beräknade årliga effektivdoser från användning av det övergivna borrhålet som brunn och från de radionuklider som spridits ut på marken visas i figurerna 14-2 respektive 14-3. Den beräknade årliga effektivdosen motsvarar den som en vuxen familjemedlem skulle bli utsatt för under det första året vid platsen.

Totaldosen från användning av borrhålet som brunn 300 år efter förvarets förslutning är 0,31 mSv/år, se figur 14-2, och domineras av bidraget från Am-241. Den här dosen är högre än det föreskrivna gränsvärdet på 0,014 mSv/år, men lägre än dosen på 1 mSv/år från bakgrundsstrålning. 2 000 år efter förvarets förslutning domineras dosen av Pu-240 och om borring sker vid ännu senare tidpunkter blir Pu-239 och Nb-94 mer betydelsefulla.



Figur 14-2. Beräknade årliga effektivdoser från användning av borrhålet som brunn för dricksvatten och bevattning vid Forsmark. Dosen är den dos som en vuxen familjemedlem skulle exponeras för under det första året på platsen och tiden är året efter förvarets förslutning när borring sker och familjen bosätter sig på platsen. Detta innebär att den enda förlusten av radionuklider som man tar hänsyn till är förlust genom radioaktivt sönderfall (figur 6-2 i **FHA-rapporten**).



Figur 14-3. Beräknade årliga effektivdoser från exponering för de radionuklider som förts upp till ytan som borrhax och bränsledelar (3 procent av innehållet i en kapsel) genom användning av den kontaminerade jorden för självhushåll och genom vistelse i det kontaminerade området. Dosen är den dos som en vuxen familjemedlem skulle utsättas för under det första året på platsen och tiden är året efter förvarets förslutning när borrhning sker och familjen bosätter sig på platsen. Detta innebär att den enda förlusten av radionuklider som man tar hänsyn till är förlust genom radioaktivt sönderfall (figur 6-3 i **FHA-rapporten**).

Den högsta totala årliga effektivdosen från användning av den kontaminerade jorden för jordbruksändamål är omkring 10 Sv/år och denna dos erhålls 300 år efter förvarets förslutning. Dosen domineras av intag av grönsaker som kontaminerats med Tc-99. Även yttre strålning från Ag-108m ger ett betydande dosbidrag. De beräknade årsdoserna är mycket höga, men det ska påpekas att flera försiktiga antaganden har gjorts i beräkningarna (se vidare i avsnittet om osäkerheter nedan).

Kvantitativ bedömning av effekterna på förvaret av oavsiktlig penetration av en kapsel under borrhning

Ett öppet borrhåls inverkan på grundvattenflödet i förvaret och det omgivande berget har studerats genom att införa borrhål på olika platser i den hydrogeologiska basfallsmodell som använts för analyserna av den tempererade perioden i SR-Site, se avsnitt 5.6 i /Joyce et al. 2010/. Resultaten visar att ett borrhål genom återfyllningen och bufferten ovanför en kapsel kommer att fungera som en sänka för många flödesvägar och att vattenflödet i borrhålet går uppåt. Även om flödesvägarna påverkas av borrhålet, visar resultaten att borrhålet endast har en mindre effekt på prestandamåtten i jämförelse med den hydrogeologiska basfallsmodellen, se avsnitt 10.3.6. Detta tyder på att flödesvägarna som uppkommit genom närvaron av borrhålet har liknande transportegenskaper som flödesvägarna utan borrhål. Dessutom innebär det uppåtriktade flödet i borrhålet att reducerande förhållanden kommer att råda inuti den penetrerade kapseln. Modelleringsresultaten visar inte uttryckligen var flödesvägarna fortsätter från borrhålet, men tolkningen är att vattnet i borrhålet rinner ut i de högtransmissiva sprickorna i den övre delen av berggrunden och fortsätter mot lägre punkter i terrängen.

Osäkerheter

Som uppgivits i **FHA-rapporten** finns det flera osäkerheter i det hypotetiska borrhningsfallet avseende inverkan på det deponeringshål som träffas vid borrhningen och vid beräkningarna av de doser som den här handlingen ger upphov till. En större osäkerhet rör den mängd av inventariet som förs upp till ytan

genom borrhningen, och speciellt mängden av den dosdominerande radionukliden Ag-108m. I beräkningarna antas det att hela innehållet av Ag-108m omedelbart frigörs från det använda kärnbränslet och förs upp till ytan genom borrhningen. Detta är ett pessimistiskt antagande eftersom Ag-108m finns i bränslets metalldelar och således skulle föras upp till ytan i en mängd som är proportionell mot den mängd bränsle som förs upp till ytan. Dessutom kommer Ag-108m från styrstavar. Dessa finns endast i kapslar med PWR-bränsle, dvs i omkring 25 procent av alla kapslar. Det antagna värdet för borrhålets radie kommer också att ha en inverkan på den mängd radionuklider som förs upp till ytan och på hur hanteringen av bränslet och borrhkaxet kommer att påverka utspridningen och utspädningen av dem i biosfären. Exempelvis kan bränslestavar som inte är sönderbrutna föras bort från platsen för fortsatt undersökning i stället för att lämnas på marken, vilket antas vid beräkningarna. Alla dessa faktorer kommer att påverka de beräknade doserna från bränslet och borrhkaxet som finns kvar på marken.

En annan större osäkerhet är kopplad till tillgången på, och förlusten av, radionuklider från den kontaminerade jorden. Hela radionuklidinventariet i det kontaminerade området antas finnas tillgängligt omedelbart för överföring till jordbruksproduktionen och till luften i form av kontaminerat damm. Detta antagande leder till ett pessimistiskt värde på den årliga effektivdosen, eftersom det är högst sannolikt att endast en bråkdel av inventariet kommer att finnas tillgängligt från början. Dessutom antas det att radionuklider inte försvinner från det kontaminerade området på andra sätt än genom radioaktivt sönderfall. I praktiken är det dock troligt att andra förlustprocesser, som utlakning med genomsippande vatten, har betydelse. Observera att den beräknade årliga effektivdosen från de radionuklider som förs upp till ytan endast gäller för det första året efter intrånget givet dessa förutsättningar och att marken antas vara uppodlad under det året.

Det är inte säkert att familjen hittar borrhålet och att de använder det som brunn. Enligt nuvarande praxis placeras pumpen precis ovanför brunnens borrhål. Icke manuella pumpar är oftast täckta och det finns visst utrymme runt dem för att möjliggöra underhåll. För pumpning med manuella pumpar krävs ett visst utrymme. Kombinationen av att använda borrhålet som brunn och den kontaminerade jorden från området runt det för odling verkar därför inte sannolik. Baserat på nuvarande praxis verkar den mest sannolika situationen vara antingen att det kontaminerade området används för odling eller att borrhålet används som brunn. Följaktligen kan det antas att personen antingen får dosen från användning av det kontaminerade området för jordbruksändamål eller från användning av borrhålet som brunn.

Osäkerheter i analyserna av borrhålets inverkan på andra förvarsdelar än det deponeringshål som direkt påverkas av borrhålet bedöms vara små, jämfört med de osäkerheter som är förknippade med beräkningarna av dos från den kapsel som penetreras under borrhningen. Slutsatsen att ett borrhål – genom återfyllningen ovanför, och genom bufferten i det deponeringshål som träffas vid borrhningen – inte påverkar återfyllningen och bufferten i ett intilliggande deponeringshål är grundad på resultat av analyser som redovisats av /Åkesson et al. 2010a, bilaga F/. Dessa analyser rör förlust av återfyllning ovanför ett deponeringshål eller mitt emellan två deponeringshål. Fastän resultaten som redovisats av /Åkesson et al. 2010a/ är förknippade med osäkerheter verkar det som att de, i kombination med situationen i detta fall där en potentiell förlust av återfyllning sker på ännu längre avstånd från ett deponeringshål, är tillräckligt säkra för den dragna slutsatsen. Det finns även osäkerheter i analyserna av inverkan av öppna borrhål på grundvattenflödet i och kring förvaret. Dessa osäkerheter bedöms dock inte ha en nämnvärd inverkan på resultaten, se **FHA-rapporten**.

Slutsatser

Om en kapsel penetreras och borrhålet används som brunn för dricksvatten och bevattning, kommer de årliga effektivdoserna för individer som är representativa för utsatta grupper att överstiga den individuella gränsen för årlig effektivdos hos allmänheten men inte den årliga effektivdosen från bakgrundsstrålning. Under antagande av att vattenutbytet från borrhålet är lika stort som det plats-specifika medianvattenutbytet från hammarborrhål som borrats i förvarsberget vid Forsmark, så överstigs den dos som motsvarar det föreskrivna gränsvärdet om intrånget sker under tidsperioden från förvarets förslutning till ungefär 35 000 år efter förslutningen.

Om den omedelbart frigjord nuklidfraktionen samt krossat material, samt även delar av eller obrutna bränslestavar från bränsleelementen förs upp till ytan genom borrhning, kommer de personer som utför borrhningen att få mycket höga doser. Efter ungefär åtta timmars exponering kommer gränsvärdet på 1 Sv för att drabbas av strålsjuka att ha överstigits. Om den kontaminerade jorden som omger borrh-

hållet används för jordbruksändamål kan dessutom de personer som exponerats i det åskådliggjorda fallet skadas allvarligt. Men som diskuterats ovan innehåller det analyserade fallet flera förenklade och försiktiga antaganden. Därför bör man betrakta de beräknade årliga effektivdoserna som exempel på möjliga konsekvenser snarare än som uppskattningar av vad konsekvenserna skulle bli.

Ett öppet borrhål kan påverka de långsiktiga egenskaperna hos återfyllningen i deponeringstunneln i borrhålets närhet, men effekten på återfyllningen ovanpå intilliggande deponeringshål bedöms vara försumbar. Detta innebär att den buffert som omger kapslar i intilliggande deponeringshål i deponeringstunneln inte heller påverkas av borrhålet. Ett öppet borrhål genom återfyllningen kommer även att förändra mönstret hos flödesvägarna i berget under de högtransmissiva sprickorna i den övre delen av berggrunden. De nybildade flödesvägarna har emellertid liknande transportegenskaper som de som redan finns, då det inte förekommer något öppet borrhål genom återfyllningen. Därför görs bedömningen att även om borring av ett hål som penetrerar en kapsel kraftigt kommer att påverka det deponeringshål som träffas, blir inverkan av borrhålet försumbar på såväl inneslutningspotentialen hos andra delar av förvaret som på fördröjningspotentialen hos geosfären. Inga signifikanta ytterligare doser skulle drabba andra människor, fränsett de som direkt använder det kontaminerade borrhålvattnet eller den mark som påverkats av kontaminerade borrhålskärnor.

14.2.6 Utvärdering av fallet med berguttag eller tunnel

Inledning och beskrivning av det analyserade fallet

Enligt avsnitt 14.2.3 och **FHA-rapporten** finns det flera rimliga skäl att bygga tunnlar eller andra typer av undermarksanläggningar i berggrunden. Bland befintliga och planerade undermarksanläggningar på försvarsdjup, 400 m eller djupare i marken, finns i dag gruvor, berglaboratorier och djupt liggande geologiska slutförvar för radioaktivt material. Att sådana här typer av anläggningar skulle kunna förekomma vid eller nära försvarsplatsen betraktas som orealistiskt. Gruvor utesluts från vidare analys, eftersom platser där det finns utvinningsbara naturresurser har uteslutits vid valet av plats. Berglaboratorier och djupt liggande geologiska förvar utesluts från vidare analys, eftersom det är sannolikt att samhällen som planerar att uppföra sådana anläggningar kommer att upptäcka och förstå att platsen redan används för liknande ändamål och därför antingen uppför sin anläggning så att den inte gör intrång på den existerande anläggningen eller väljer en annan plats. De andra typerna av anläggningar som nämns i tabell 14-1 är i allmänhet belägna så ytligt som möjligt med hänsyn till geologin och anläggningens syfte. I allmänhet uppförs tunnlar ner till ett djup av 50 m, vilket betraktas som rimligt även vid Forsmark. Detta är det djup som exempelvis slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) har. SFR ligger nära det planerade slutförvaret för använt kärnbränsle.

För de flesta syften försluts tunnlar eller berganläggningar för att förhindra vatteninflöde. Konstruktionerna förstärks även för att mekaniskt stabilisera tunneln och för att undvika nedfall av bergblock vid drift. I många fall täcks tunnelväggarna med betong. Om tunneln används för slutförvaring antas det att åtgärder vidtas för att förhindra att farliga mängder av det okända lagrade materialet kommer ut från tunneln.

Storleken på en tunnel eller berganläggning beror på dess syfte. Tunnlar kan ha tvärsnitt från cirka 4 m² upp till 100–200 m² och berganläggningar kan ha volymer från 10 000 m³ till 100 000 m³ och uppåt.

Baserat på dessa beaktanden analyseras följande fall:

- En tunnel som är anlagd på 50 meters djup med ett tvärsnitt på 100 m² och med en längd som motsvarar hela förvarets längd vid markytan utefter mittlinjen av deponeringsområdena beaktas. Motivet till detta antagande är att det är rimligt med tanke på nuvarande praxis och att den tänkbara inverkan på förvaret inte undervärderas.
- Syftet med tunneln eller berganläggningen anges inte.
- Driftskedet för tunneln och tiden som förslutningen och förstärkningen är fungerande antas vara ett par hundra år. Efter driftskedet antas det att tunneln överges och blir mättad med grundvatten.
- Liksom i borningssfallet antas det att förvarets existens faller i glömska och att tekniska standardförfaranden för att uppföra undermarksanläggningar kommer att likna de som används i dag. Dessutom antas det att uppförandet av berganläggningen (tunneln) inte påbörjas förrän tidigast 300 år efter förvarets förslutning.

Beaktad(e) funktionsindikator(er)

Den funktionsindikator som är relevant för detta fall är

- R2, Tillhandahålla gynnsamma hydrologiska och transportrelaterade förhållanden.

Under drift av tunneln kan de hydrauliska gradienterna i dess omgivning påverkas. Funktionsindikatorn R1, Tillhandahålla gynnsamma kemiska förhållanden, kan påverkas indirekt om inverkan på de hydrologiska förhållandena är betydande.

Utvärdering av konsekvenserna av uppförandet av en tunnel ovanför förvaret

Det berg i Forsmark som valts för slutförvaret för använt kärnbränsle är beläget i den nordvästligaste delen av en tektonisk lins, se avsnitt 4.3. Den övre delen av berggrunden (ner till omkring 150 meters djup) i den tilltänkta bergvolymen kännetecknas av stora horisontella sprickor och bankningssprickor /SKB 2008a/. På grund av dessa strukturer och den höga sprickfrekvensen nära bergytan är den övre delen av berggrunden mycket mer vattenförande än den nedre delen, speciellt på större djup än 400 m. Ett mått på den hydrauliska betydelsen av dessa bankningssprickor i den övre delen av berggrunden ges av de exceptionellt höga vattenutbytena i de hammarborrhål som borrats under platsundersökningen. Medianutbytet för de första 22 hammarborrhålen är ungefär 12 000 l/h, se avsnitt 8.4.4 i /SKB 2008a/. Detta är cirka 20 gånger högre än medianutbytet från brunnar som borrats utanför den tektoniska linsen, vilket inte skiljer sig från medianutbytet för alla bergborrade brunnar som är registrerade hos Sveriges Geologiska Undersökning, se avsnitt 8.4.4 i /SKB 2008a/. Det höga vattenutbytet på grunda djup i den tilltänkta volymen av berggrunden inom den tektoniska linsen beror inte endast på dessa stora horisontella strukturer i den övre delen av berggrunden och den stora sprickförekomsten nära bergytan, utan även på närheten till havet som fungerar som en outtömlig vattenkälla (positiv hydraulisk rand).

Om en tunnel anläggs på 50 meters djup, trots den höga konduktiviteten i den övre delen av berggrunden i den tilltänkta bergvolymen, kan detta medföra att byggmöjligheterna begränsas och att omfattande injektering behövs. Injektering begränsar i sin tur avsevärt tunnelns inverkan på de hydrogeologiska förhållandena i det omgivande ytligt belägna berget. Det finns inget skäl att anta att en öppen tunnel på 50 meters djup – som ligger ovanpå förvaret – skulle leda till uppträngning av grundvatten som betydligt mer påverkar de hydrogeologiska förhållandena i förvarsberget på 450 meters djup. Den här slutsatsen stöds av den markanta minskningen i förekomsten av vattenförande sprickor med ökat djup som har observerats vid platsundersökningarna. Inte ens slutförvaret för använt kärnbränsle förväntas leda till uppträngning under bygg- och driftskedet i någon nämnvärd omfattning, vilket visas av modelleringsresultat för ett öppet förvar som rapporterats i avsnitt 5.2 i /Svensson och Follin 2010/.

Den framtida landhöjningen vid Forsmark under de kommande tusen åren är av storleksordningen 7 m, se **Klimatrapporten**. Den här sänkningen av strandlinjenivån förväntas inte förändra betydelsen av de horisontella sprickorna och bankningssprickorna i den övre delen av berggrunden för det hydrogeologiska systemet i den del av berggrunden där förvaret ska byggas. Detta beror på att de horisontella sprickorna och bankningssprickorna i den övre delen av berggrunden också förekommer på större djup än 7 m. Att en tunnel ovanför förvaret hypotetiskt anläggs och drivs under de kommande tusen åren skulle därmed inte ha en negativ inverkan på förvarets funktion. Att tunneln överges under denna period skulle innebära att tunneln blir vattenfylld, eftersom injekteringsmedlet i tunneln bryts ned. Den övergivna tunneln kan fungera som ledare för yt nära flöden, men ingen betydande inverkan förväntas på storleken av vattenflödet i berget som omger deponeringshålen i förvaret. Detta baseras på resultaten från hydrogeologiska analyser av ett övergivet, delvis öppet förvar /Bockgård 2010/. Resultaten uppvisar mycket små förändringar av Darcyflödets storlek vid deponeringspositioner om man antar att alla utrymmen i förvaret, förutom deponeringstunnlar och deponeringshål, är öppna, jämfört med det förväntade fallet att förvaret är fullständigt återfyllt och förslutet, se även avsnitt 14.2.8. Följaktligen finns det mycket liten grund för att anta att en övergiven öppen tunnel på högst 50 m djup skulle inverka på vattenflödets storlek på förvarsdjup. Dessutom kan liknande argument framställas för tunnlar som ligger på djup ner till åtminstone 150 m.

Slutsatser

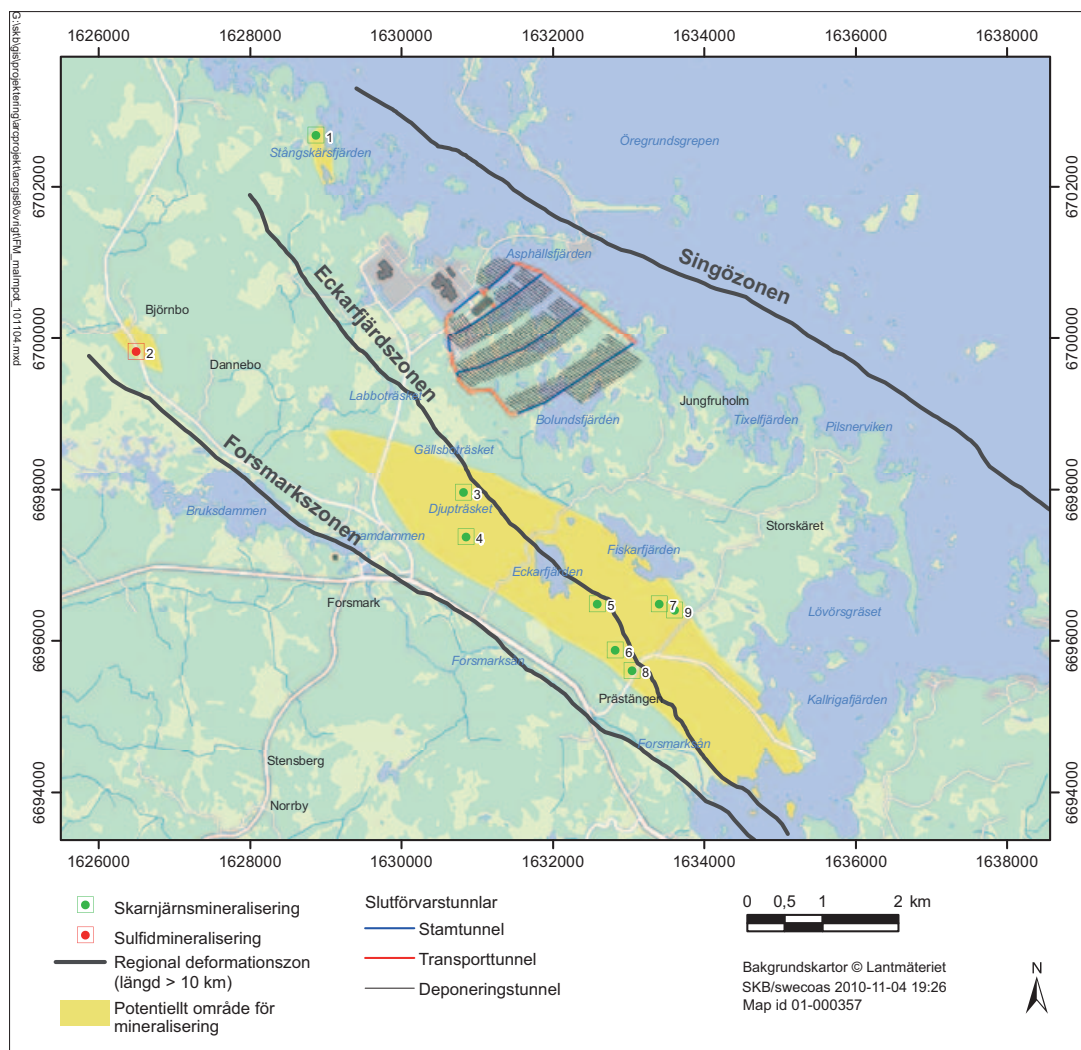
Utvärderingen ovan tyder på att de översta 150 metrarna av berggrunden ovanför förvaret utgör en ogynnsam plats för en tunnel från konstruktionsteknisk synpunkt, på grund av det exceptionellt höga vattenutbytet i den här delen av berggrunden. Dessa förhållanden medför även att en tunnel som byggs i den här delen av berggrunden inte skulle påverka grundvattenflödet på försvarsdjup i sådan omfattning att tunnelns existens skulle få slutförvarets säkerhetsfunktioner att sättas ur spel. Konstruktionskravet att förvaret placeras på ett djup som medger att platsen utnyttjas för allmänt förekommande framtida mänskliga verksamheter bör därför vara uppfyllt vid Forsmark.

14.2.7 Utvärdering av en gruva i närheten av försvarsplatsen vid Forsmark

Inledning och beskrivning av det analyserade fallet

Potentialen för malmfyndigheter vid Forsmark har analyserats vid platsundersökningarna. I ett område sydväst om försvarsplatsen har en felsitisk till metavulkanisk bergart identifierats och bedömts kunna utgöra en järnoxidfyndighet, /Lindroos et al. 2004/, se avsnitt 4.3.2 och figur 14-4. Mineralfyndigheterna har bedömts vara utan ekonomiskt värde. Eftersom denna bedömning av ekonomiska skäl kan revideras i framtiden, hanteras ändå frågan om en tänkbar exploatering av denna mineralfyndighet.

Eftersom mineralfyndigheten i dagsläget inte bedöms ha något värde är det omöjligt att beskriva utformningen av en gruva där mineralfyndigheten exploateras utifrån dagens standardförfaranden för gruvdrift. Den kan vara ett stenbrott eller en gruva och djupet kan vara från ett tiotal till ett hundratal meter, eller tusen meter eller större för en gruva.



Figur 14-4. Karta som visar områden på ytan som bedöms ha viss exploateringspotential för mineralfyndigheter (figur 6-5 i FHA-rapporten).

Beaktad(e) funktionsindikator(er)

Den funktionsindikator som är relevant för detta fall är:

- R2, Tillhandahålla gynnsamma hydrologiska och transportrelaterade förhållanden.

Under drift av gruvan kan de hydrauliska gradienterna i dess omgivning påverkas. Om inverkan på de hydrologiska förhållandena är betydande kan funktionsindikatorn R1, Tillhandahålla gynnsamma kemiska förhållanden, påverkas indirekt.

Utvärdering av konsekvenserna av en gruva i omgivningen av kandidatområdet vid Forsmark

Om en gruva eller någon annan form av undermarksanläggning skulle uppföras i närheten av förvarsp platsen i Forsmark, kan det antas att inverkan på förvaret för använt kärnbränsle skulle bli störst om anläggningen uppfördes på samma djup och i närheten av förvaret för använt kärnbränsle. Eftersom den sydvästligaste delen av förvaret ligger väster om sjön Bolundsfjärden, se figur 14-4, skulle det kortaste avståndet mellan förvaret och en hypotetisk gruva i det potentiella området med mineralfyndigheter, se figur 14-4, vara i storleksordningen 1 till 1,5 km.

För att utvärdera den eventuella inverkan på förvaret används resultat från analyser av den hydrauliska inverkan från ett öppet förvar. Beräkningar av effekterna av vatteninflöde till ett öppet förvar visar att avsänkningen i hydraulisk tryckhöjd är stor i berget nära förvaret på ett djup av 450 m /Mårtensson och Gustafsson 2010, figur 7-20 nedre bilden/. Sänkningen minskar dock snabbt med avståndet från det öppna förvaret i västlig riktning till omkring 50 m inom ett tiotal meter från förvaret. På ett avstånd av cirka 1 km från förvaret är sänkningen på 450 meters djup försumbart liten. Skälet till den lilla påverkansradien är den låga hydrauliska konduktiviteten hos bergmassan på djupet i närheten av förvaret. Detta begränsande hydrauliska villkor gäller även för en eventuell framtida gruva utanför den tektoniska linsen. Därför är det rimligt att anta en mycket begränsad hydraulisk påverkan från gruvan på förvaret på grund av den lågkonduktiva berggrunden i den tilltänkta bergvolymen.

Slutsatser

Utvärderingen tyder på att exploatering av de potentiella mineralresurserna i närheten av förvarsp platsen vid Forsmark inte påverkar förvarets säkerhetsfunktioner. Konstruktionskravet att förvaret förläggs till en plats utan naturresurser betraktas därför som uppfyllt.

14.2.8 Ofullständigt förslutet förvar

Inledning och beskrivning av det analyserade fallet

Enligt föreskrifterna är det även nödvändigt att definiera och analysera ett fall som åskådliggör konsekvenserna av ett oförslutet förvar /SSM 2008a/. Det grundläggande antagandet i det fall som valts som representativt för scenarier relaterade till oförslutna eller ofullständigt förslutna förvar är att förvaret överges när alla kapslar har deponerats och alla deponeringstunnlar återfyllts och förslutits, men att stam- och transporttunnlarna såväl som centralområdet, förvarstillfarten (ramp och schakt) och ventilationsschakten i deponeringsområdet, se figurerna 5-21 och 10-7, fortfarande är öppna på grund av exempelvis politiska beslut att inte försluta förvaret fullständigt. Det här antagandet baseras på strategin för deponering av kapslar, vilken innebär att deponeringstunnlar successivt fylls med kapslar och sedan återfylls och försluts så snart de har fyllts. Det bedöms som relativt osannolikt att förvaret skulle överges mitt under den här processen, eftersom det skulle betyda att kapslar lämnas på ytan där de skulle utgöra en större risk än om de placerades i förvaret.

Beaktad(e) funktionsindikator(er)

Detta fall är relaterat till följande funktionsindikatorer:

- Can1, Utgöra korrosionsbarriär; säkerställa inneslutning.
- Buff1, Begränsa advektiv transport i bufferten; säkerställa täthet och självläkning.
- Buff2, Reducera mikrobiell aktivitet.
- BF1, Motverka buffertexpansion; hög densitet och självförslutning av återfyllning.
- R1, Tillhandahålla gynnsamma kemiska förhållanden; säkerställa reducerande förhållanden.
- R2, Tillhandahålla gynnsamma hydrologiska och transportrelaterade förhållanden.

Kvalitativ beskrivning av konsekvenserna av ett ofullständigt förslutet förvar

Om förvaret överges när stam- och transporttunnlarna, centralområdet, tillfarten till förvaret och ventilationsschakten i deponeringsområdet fortfarande är öppna, kommer dessa öppna volymer successivt att vattenfyllas. Vatten kommer att strömma genom de öppna volymerna, varvid flödets storlek och riktning kommer att bero på den hydrauliska gradientens storlek och riktning. Dessutom kan de öppna volymerna påverka grundvattnets flödesmönster i förvarets berggrund.

Alla deponeringstunnlar kommer att pluggas igen mot stamtunnlarna när förvaret överges. När stamtunnlarna har vattenfyllts kan cement och andra komponenter i betongpluggarna lösas upp i vattnet och transporteras bort. I något skede kommer pluggarnas funktion att gå förlorad och återfyllningen i deponeringstunneln kommer att svälla ut in i stamtunnlarna. Expansionen in i stamtunnlarna kommer att minska återfyllningens densitet i deponeringstunnlarna. Hur långt in i deponeringstunneln densitetsminskningen når beror på mängden återfyllningsmaterial som går förlorad från deponeringstunneln. Om densiteten i återfyllningen ovanför ett deponeringshål blir avsevärt lägre kan bufferten i deponeringshålet expandera in i återfyllningen ovanför med följden att buffertens densitet också blir lägre.

Att överge förvaret utan att försluta tillfarten från ytan kan främja inströmning av syresatt vatten från ytan ner till centralområdet och stamtunnlarna. Dessutom kommer förvarets oförslutna delar att innehålla luft som löser sig i det vatten som successivt tränger in i de tomma ofyllda delarna av förvaret. Om löst syre når kapslarna via återfyllningen i deponeringstunnlarna och bentonitbufferten eller via sprickor i berget som skär deponeringstunneln och vidare genom bentonitbufferten, kommer syre att korrodera kopparkapslarna. Detta kan leda till korrosionsgenombrott i kapslarna och utsläpp av radionuklider från det använda kärnbränslet.

Om och när korrosionsgenombrott sker beror på syretillförseln till kapselytan. Grundvatten som rinner till från sprickor och sprickzoner som skär de ofyllda volymerna längre ner i berget kommer högst sannolikt inte att innehålla syre på grund av den stora reducerande förmågan hos både berggrunden och det jordlager som detta vatten har trängt in genom, se avsnitt 10.2.5. Den huvudsakliga syretillförseln från ytan ner i de öppna förvarsvolymer kommer sannolikt att äga rum under glaciala perioder när glacialt smältvatten kan tryckas ner på grund av de stora hydrauliska gradienter som uppstår till följd av inlandsisen. Löst syre i vattnet i de tomma förvarsvolymer kan också förbrukas av både biotiska och abiotiska processer. Till exempel kommer biologisk nedbrytning av organiskt material, som redan finns i de tomma volymerna och som även tillförs med det inkommande vattnet, att fortgå tills antingen syret eller det biologiskt nedbrytbara organiska materialet har förbrukats. Syre kan också reagera kemiskt med reducerande mineraler i berggrunden som klorit, biotit och pyrit /Sidborn et al. 2010/, samt även förbrukas genom aerobisk korrosion av byggmaterial av järn som finns kvar i de ofyllda förvarsvolymer.

Löst syre kommer att transporteras vidare från de ofyllda stamtunnlarna i förvaret till kapslarna i deponeringshålen genom advektion eller diffusion i deponeringstunnlarnas återfyllning och i den bentonit som omger kapslarna, beroende på dessa barriärers egenskaper. Alternativt kan löst syre transporteras med grundvatten som rinner i sprickor som skär deponeringshålen. Dessa sprickor kan vara förbundna med antingen den ofyllda stamtunneln eller deponeringstunneln i ett läge nära skärningen med stamtunneln, se exempelvis figur 5-21. Både i återfyllningen och i bufferten kan syre förbrukas genom kemiska reaktioner med accessoriska mineraler i bentoniten. Dessutom förväntas syre förbrukas genom mikrobiell aktivitet i återfyllningen, se avsnitt 10.2.5.

Enligt avsnitt 10.2.5 innehåller bentoniten organiskt material, som under anoxiska förhållanden eventuellt kan utnyttjas för mikrobiell reduktion av sulfat till sulfid. Så länge återfyllningen ovanför ett deponeringshål inte förlorar densitet i sådan omfattning att bufferten i deponeringshålet kan expandera uppåt in i återfyllningen, förväntas inte mikrobiell sulfatreduktion i bentonitbufferten ske i någon större omfattning, se avsnitt 10.2.5. Om återfyllningens densitet minskas i sådan grad att bufferten expanderar in i återfyllningen, kan buffertens densitet bli alltför låg för att mikrobiell aktivitet i bufferten ska kunna uteslutas. Även om mängden organiskt material i den bentonit som är tillgänglig för mikrobiell nedbrytning är mycket osäker, vilket påpekats i avsnitt 10.2.5, utgörs den huvudsakligen av humus- och fulvosyror vars molekyler är för stora för att kunna utnyttjas som kolkälla av bakterier.

Kvantitativ utvärdering av inneslutningspotentialen hos ett ofullständigt förslutet förvar

Utvärderingen av inneslutningspotentialen grundas på analys av expansionen av återfyllning i deponeringstunnlar in i öppna stamtunnlar, på resultat från grundvattensflödesmodellering av effekterna av öppna tunnlar och på uppskattningar av syretillförsel och kapselkorrosion, se avsnitt 6.6.3 i **FHA-rapporten**.

Expansion av återfyllning i deponeringstunnlar

Expansionen av återfyllningen i deponeringstunnlarna in i stamtunnlarna efter nedbrytning av pluggen har analyserats i avsnitt 22 i /Åkesson et al. 2010a/. Med antagandet att hela pluggen gått förlorad och att återfyllningen kan svälla ut fritt in i stamtunneln, tyder resultaten på att de deponeringshål som ligger närmare än 25 till 35 m från gränsskiktet mellan den nedbrutna pluggen och återfyllningen kommer att få en återfyllning med en torrdensitet som är lägre än acceptanskriteriet på 1 240 kg/m³. Eftersom inget deponeringshål kommer att ligga närmre än 20,6 m från deponeringstunnelns mynning /SKB 2009b/, innebär detta att förlusten av återfyllning från deponeringstunnlarna kan leda till en densitetsminskning hos bufferten i som mest fyra till fem av de deponeringshål som ligger närmast tunnelmynningen.

I det analyserade fallet förutsätts det att pluggen i intilliggande deponeringstunnel går förlorad och att omfattningen av svällningen från alla dessa tunnlar är ungefär lika stor. Detta innebär att återfyllningen som mest kan expandera 20 m utefter stamtunneln, eftersom avståndet mellan två deponeringstunnlar är 40 m. Konsekvenserna av fri svällning av återfyllningen i en deponeringstunnel, för ett fall där pluggen i en intilliggande deponeringstunnel är intakt och återfyllningen i denna tunnel finns kvar, har inte analyserats kvantitativt. Uppenbarligen kommer mer återfyllning att expandera in i stamtunneln. Det förutses därför att ytterligare några deponeringshål kommer att utsättas för en återfyllning med en densitet lägre än acceptanskriterierna, i jämförelse med fallet med expansion av tunnelåterfyllning in i två intilliggande deponeringstunnlar. Det exakta antalet sådana deponeringshål saknar emellertid betydelse för det tillvägagångssätt som valts vid analysen av doskonsekvenserna i detta fall.

Hydrogeologisk påverkan

För att undersöka den hydrauliska inverkan av ett övergivet, delvis öppet förvar i jämförelse med referensförslutningen av förvaret, har effekterna av öppna tunnlar studerats för två situationer med olika randvillkor: ett tempererat tillstånd med nuvarande randvillkor och ett allmänt framtida glacialt tillstånd där förvaret är täckt av en inlandsis /Bockgård 2010/. Randvillkoren i simuleringen av det glaciala tillståndet representerar ett fall med en framryckande isfront men utan permafrost, där isfronten är belägen ovanför förvaret vid isfrontsläge IFL II, enligt definition i figur 10-127.

Resultaten från beräkningarna tyder på att de öppna tunnlar kommer att leda till en avsänkning i det omgivande berget under tempererade förhållanden. Detta betyder att tunnlar kommer att fånga upp många flödesvägar från deponeringspositioner och därigenom fungera som flödesledare till ytan. Den generella flödesriktningen i tunnlar är inströmning genom ventilationsschakten i deponeringsområdena och utströmning genom rampen och schakten ovanför centralområdet (lägena för förvarets olika delar framgår av figur 10-7). Vattenflödet i det öppna systemet uppgår till 0,42 l/s (13 230 m³/år) av vilket cirka 60 procent (0,26 l/s) är inströmning från det transmissiva ytlagret och bankningssprickorna ovanför nivån -40 m. Inverkan av öppna tunnlar på Darcyflödet vid deponeringspositioner är emellertid liten, med en ökning på omkring 10 procent i medianvärdet jämfört med förslutningsfallet i referensutvecklingen. De öppna tunnlar minskar mediantransportmotståndet till omkring 30 procent av referensvärdet.

Konsekvenserna av öppna tunnlar vid de glaciala förhållanden som antagits vid beräkningarna är å andra sidan betydande. Den stora hydrauliska tryckhöjden till följd av inlandsisen kan leda till ett betydande flöde genom tunnelsystemet, omkring 250 m³/s, med inströmning genom rampen och schakten ovanför centralområdet och utströmning genom ventilationsschakten i deponeringsområdet. Den stora hydrauliska gradienten kommer att föras vidare av tunnlar till förvarsdjup och vatten kommer att tryckas in i berget. Darcyflödet vid deponeringspositionerna kommer generellt att öka, och det finns indikationer på att ökningen kan vara avsevärd i vissa deponeringspositioner. De öppna tunnlar minskar dock mediantransportmotståndet i berget med endast omkring 50 procent.

Syretillförsel och kapselkorrosion

För att åskådliggöra de möjliga konsekvenserna för kapselkorrosion då löst syre förekommer i vattnet i förvarets öppna tunnlar har några enkla beräkningar utförts, se avsnitt 6.6.3 och bilaga B i **FHA-rapporten**. I beräkningarna antas det att vattnet i de återfyllda deponeringstunnlarna ovanför ett deponeringshål är mättat med löst syre och att syre transporteras vidare med diffusion till kapsellocket genom den 1,5 m tjocka bentonitbufferten ovanför locket, se figur 5-11. För tempererade förhållanden anges syrekoncentrationen vid buffertens övre gränssyta till $0,3 \text{ mol/m}^3$, dvs i jämvikt med syre i atmosfären. En koncentration av $1,5 \text{ mol/m}^3$ antas för glaciala förhållanden, dvs motsvarande koncentrationen i glacialt smältvatten /Sidborn et al. 2010/.

Med en effektiv diffusivitet på $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ för löst syre, ett approximativt värde representativt för oladdade ämnen (se **Datarapporten**), och under antagande av endimensionell diffusion genom buffertens hela tvärsnittsarea (diameter 1,75 m, se figur 5-12) kan syreflödet efter diffusion genom 1,5 m buffert beräknas till $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol/år}$. Om man dessutom antar att detta syre omedelbart reagerar med kopparn enligt det stökiometriska förhållandet 4 mol Cu/mol O_2 , skulle det ta en miljon år innan korrosionsgenombrott sker i det 50 mm tjocka kopparlocket. Om diffusion genom bentoniten sker genom en tvärsnittsarea motsvarande kapsellockets area kommer tiden för korrosionsgenombrott att bli ungefär tre gånger så lång. Med en tio gånger högre diffusivitet, representativ för diffusion i fritt vatten, skulle det ändå ta i storleksordningen 100 000 till 300 000 år innan genombrott sker. Med den högre koncentrationen av löst syre, motsvarande glaciala förhållanden, skulle det ta i storleksordningen 200 000 till 600 000 år för att korrosionsgenombrott ska ske – förutsatt att buffertens egenskaper har bevarats – och omkring 20 000 till 60 000 år om bufferten ovanför kapseln gått förlorad och syrediffusion endast sker genom vatten.

Sulfid som korroderande ämne försummas i detta scenario, eftersom tiderna för korrosionsgenombrott förväntas vara avsevärt längre än de som uppskattats för syre. De huvudsakliga skälen till detta är att de förväntade naturliga koncentrationerna är som högst i storleksordningen 10^{-5} M /Tullborg et al. 2010/, vilket är flera storleksordningar lägre än syrekoncentrationen i de förenklade beräkningarna, och att korrosionsreaktionens stökiometri medför att mindre koppar förbrukas per mol sulfid (2 mol) jämfört med förbrukningen genom syre (4 mol). De organiska föreningar som finns i bentonitmaterialet i bufferten och återfyllningen, se avsnitt 10.2.5, förväntas inte bli utnyttjade för mikrobiell reduktion av sulfat i grundvattnet till sulfid så länge syre finns att tillgå – om de över huvud taget är biologiskt nedbrytbara.

Slutsats om isoleringspotential

Enligt utvecklingen av referensglaciationscykeln som beskrivs i avsnitt 10.4.1 och som visas i figur 10-107, förväntas inga omfattande glaciala förhållanden uppkomma under de närmaste cirka 58 000 åren. Även om buffertens densitet i deponeringshål nära korsningen mellan deponeringstunneln och stamtunneln blir avsevärt lägre, tyder de utförda beräkningarna på att korrosionsgenombrott inte förväntas inom de närmaste cirka 58 000 åren. Dessutom tyder resultaten av den hydrogeologiska analysen på att de hydrauliska gradienterna under tempererade förhållanden går i riktning mot de öppna tunnlar. De kommer därför att motverka syretransport från de öppna tunnlar till deponeringshålen. De hydrogeologiska resultaten för tempererade förhållanden tyder även på att de öppna tunnlaras effekter på Darcyflödet vid deponeringspositionerna blir små. Även om de öppna tunnlar förändrar flödesvägarna och leder till att bergets flödesrelaterade transportmotstånd blir något lägre, är dessa motstånd fortfarande höga. Det faktum att flödesvägarna fångas upp av de öppna tunnlar och strömmar ut genom schakten och rampen ovanför centralområdet betraktas också som ovidkommande. Detta beror på att det finns utströmningspunkter nära förvaret även i referensutvecklingen och även på att periglaciala förhållanden med permafrost i de övre delarna av rampen och schakten kommer att råda under stora delar av den 58 000 år långa tidsperioden. Detta innebär att de öppna tunnlaras inverkan på andra deponeringshål än de som direkt påverkas av den expanderande tunnelåterfyllningen är liten. Därför görs inga analyser av radionuklidutsläpp och doskonsekvenser för perioden före nästa glaciation.

I början av den glaciala perioden vid Forsmark (om cirka 58 000 år) förväntas det hydrogeologiska tillståndet vid förvarsplatsen förändras och stora grundvattenflöden i de öppna tunnlar kan inte uteslutas. Enligt referensutvecklingen, se figur 10-107, kommer den här glaciala perioden att pågå under cirka 8 000 år. Inga korrosionsgenombrott i kapslar förväntas ske under den 8 000 år långa perioden med glaciala förhållanden, så länge diffusion är den dominerande transportprocessen i

bufferten för korrosiva ämnen i grundvattnet. Emellertid kan återfyllning som har expanderat in i stamtunnlarna föras bort under perioder med stora grundvattenflöden i de öppna tunnlar. Detta kan i sin tur leda till att återfyllningen i deponeringstunnlar expanderar ytterligare in i stamtunnlarna, vilket gör att bufferten i deponeringshål nära korsningen med stamtunneln får ett allt lägre mottryck från den kvarvarande återfyllningen i deponeringstunnlarna. Detta skulle i sin tur kunna leda till att bufferten expanderar in i deponeringstunneln, vilket leder till att buffertdensiteten sjunker. Om deponeringshålet dessutom skärs av en spricka som är stor nog att kunna leda betydande flöden, skulle buffert- och återfyllningsmaterial kunna föras bort av grundvatten som strömmar genom deponeringshålet och deponeringstunneln. Sannolikheten för att den här situationen uppkommer under den 8 000 år långa glaciala perioden har inte utvärderats kvantitativt. Här antas det dock att så sker och att detta även innebär att grundvattenflödet genom deponeringshålet är stort nog för att kunna föra fram den mängd korrosiva substanser som krävs för att korrosionsgenombrott i kapseln ska kunna inträffa innan denna glaciala period upphör. Detta bör vara ett försiktigt antagande eftersom permafrost råder i den övre delen av berggrunden under hela perioden, åtminstone ner till cirka 70 meters djup, se figur 10-107, vilket bör begränsa vattenomsättningen i de öppna tunnlar i förvaret.

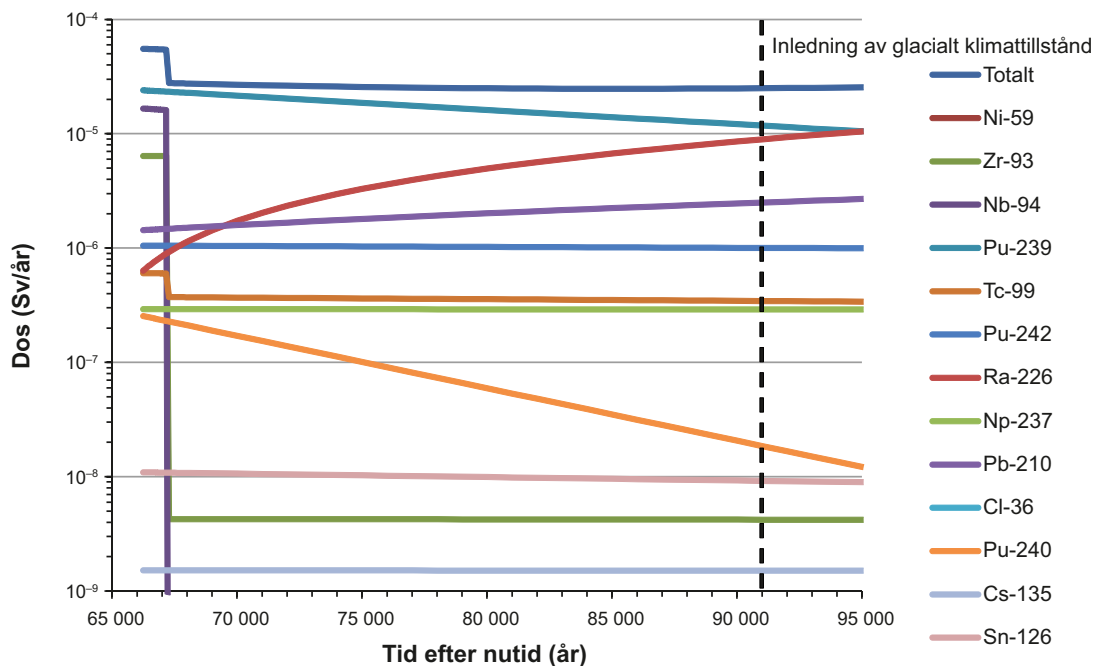
Kvantitativ bedömning av radionuklidutsläpp och doskonsekvenser för ett ofullständigt förslutet förvar

Enligt utvecklingen för referensglaciationscykeln, se figur 10-107, kommer isavsmältning att ske om 66 200 år vid förvarsplatsen. Därefter kommer förvarsplatsen att vara vattentäckt under den därpå följande tidsperioden av ungefär 8 000 år innan perioder med växlande periglaciala och tempererade förhållanden infaller. I analysen av radionuklidutsläpp och doskonsekvenser i detta fall, se **FHA-rapporten**, beaktas inte sekvensen av vattentäckta och omväxlande periglaciala och tempererade förhållanden. I stället antas det för enkelhets skull att tempererade förhållanden kommer att råda när radionuklidutsläppet från förvaret och den därpå följande dospåverkan beräknas. Ytterligare antaganden som görs i beräkningarna listas nedan och data som används i beräkningarna är desamma som de som anges i tabell 14-2, förutom för vattenflödet genom deponeringshålet, som sätts till värdet för stort vattenflöde i analyserna av scenariot ”kapselbrott till följd av korrosion” (0,73 m³/år).

- Inget korrosionsgenombrott i kapslar sker under den första perioden med tempererade förhållanden som sträcker sig cirka 58 000 år framåt i tiden.
- Under den efterföljande glaciala perioden, som avslutas om 66 200 år, sker korrosionsgenombrott i en kapsel i ett deponeringshål som skärs av en spricka med stort grundvattenflöde och som ligger nära korsningen mellan en deponeringstunnel och en öppen stamtunnel.
- Om 66 200 år släpps radionuklider ut från det använda kärnbränslet i den otäta kapseln med en hastighet som bestäms av det advektiva flödet i sprickan som skär deponeringshålet. De utsläppta radionukliderna transporteras med vattnet som strömmar från deponeringshålet till centralområdet och till tillfartsrampen och schakten ovanför centralområdet via deponeringstunneln samt via öppna stam- och transporttunnlar. Radionuklidkoncentrationen i vattnet i det öppna systemet bestäms av den grundvattenomsättning i de öppna tunnlar som uppskattas för tempererade förhållanden.
- Vattnet i tillfartsrampen och schakten utnyttjas av människor för jordbruksändamål och som dricksvatten.

Den beräknade totala effektivdosen, se figur 14-5, under de första tusen åren efter kapselbrott är 56 µSv/år. Dosen domineras av intag av föda och vatten som kontaminerats med Pu-239 och av extern strålning från Nb-94. Därefter ligger effektivdosen kvar på en ganska konstant nivå av omkring 25 µSv/år för den kvarvarande perioden tills glaciala förhållanden tar vid om omkring 90 000 år. Under den här perioden domineras dosen av intag av föda och vatten som kontaminerats med Pu-239 och Ra-226.

Den beräknade effektivdosen är högre än det föreskrivna gränsvärdet på 14 µSv/år under hela den analyserade tidsperioden, men lägre än dosen på 1 mSv/år från bakgrundsstrålningen. Den beräknade effektivdosen erhålls vid ett förutsatt brott på en kapsel i förvaret under den glaciala perioden som tar slut om 66 200 år. För att ge en effektivdos som är jämförbar med den från bakgrundsstrålning kan ungefär 20 kapslar gå sönder under den här perioden.



Figur 14-5. Beräknad effektivdos från användning av vatten i de öppna schakten och rampen som dricksvatten och för bevattning (figur 6-19 i FHA-rapporten).

Osäkerheter

Osäkerheterna i analyserna av expansion av återfyllning i deponeringstunnlarna är relativt stora. Friktionsvinkeln beror av svälltrycket och ökar med minskat svälltryck. Värdena vid låga svälltryck är inte väl kända, men laboratoriemätningar tyder på att friktionsvinkeln är större än 20 grader vid låg densitet och att de laterala spänningarna (motsvarande normalspänningar mot bergytan) är högre än spänningen i svällriktningen. Detta innebär att den motverkande friktionskraften troligtvis är större än vad som modellerats, vilket medför att resultaten troligtvis är pessimistiska vad gäller svällningen och därför borde densitetsförlusten vara mindre än vad som modellerats /Åkesson et al. 2010a/.

Det finns flera osäkerheter i analyserna av inverkan på grundvattenflödet från öppna tunnlar i förvaret, speciellt för simuleringarna med glaciala förhållanden. En viktig osäkerhet är relaterad till tillgången på vatten. I verkligheten kommer flödet i en öppen tunnel under isfronten troligtvis att vara begränsat av tillförseln av subglacialt smältvatten i det transmissiva subglaciala lagret vid isens undre gränssyta. Om vattentillförseln är otillräcklig kommer trycket att sjunka och flödet att minska. För att få ett så högt flöde som antagits ovan måste tunnelmynningarnas läge sammanfalla med en större smältvattentunnel under isen. Det bör även påpekas att det i beräkningarna antas att isfrontens läge är maximalt ogynnsamt med avseende på den hydrauliska gradienten. När förvaret är täckt av is kan den hydrauliska gradienten under isen vara ännu mindre än under de tempererade förhållandena /Vidstrand et al. 2010/.

Flera förenklande antaganden görs i beräkningarna av syretillförsel till kapselytan. Det enda transportmotståndet som hänsyn tas till är det i bufferten som omger kapseln, medan transportmotståndet i återfyllningen ovanpå bufferten i deponeringshålet och i deponeringstunneln – såväl som i sprickor i berget – försummas. Detta bedöms vara pessimistiskt, åtminstone för tempererade förhållanden. Även om tunnelåterfyllningen expanderar in i stamtunneln och återfyllningens densitet ovanför ett deponeringshål blir avsevärt lägre, bör transportmotståndet i deponeringstunneln fortfarande vara betydande. Detta stöds av resultaten av den hydrogeologiska modelleringen som tyder på att de hydrauliska gradienterna är riktade mot de öppna tunnlar i förvaret. All syretransport från de öppna tunnlar till deponeringshålen måste då ske i motsatt riktning jämfört med den hydrauliska gradienten. Andra pessimistiska antaganden rör syrekoncentrationen och att den förblir konstant under en lång tidsperiod. Det finns både biotiska och abiotiska processer som kan förbruka syre i förvarsmiljön.

Antagandet att tunnlarna kommer att förbli öppna efter det att en inlandsis avancerat och retirerat är också osäkert. Även om denudationen av ytan är relativt liten vid Forsmark, se avsnitt 4.5.7 i **Klimatrapporten**, verkar det troligt att eroderat material kommer att falla ner och åtminstone delvis fylla ut de öppna tunnlarna.

Antagandet att en kapsel går sönder till följd av korrosion under nästa glaciala period har inte stöd i några kvantitativa analyser, utan det förutsätts ske baserat på försiktiga antaganden och är därför förknippat med stora osäkerheter. Till exempel antas det att vattenflödet i en spricka som skär ett deponeringshål är stort nog för att föra bort buffert i deponeringshålet och återfyllningsmaterial ovanför deponeringshålet samt för att tillföra tillräckligt med korrosiva ämnen för att korrosionsgenombrott ska ske inom 8 000 år. Med tanke på att konstruktionsförutsättningarna för slutförvaret anger begränsningar för tillflödet av vatten till ett deponeringshål som ska godkännas för deponering av en kapsel /SKB 2009a/ bör risken vara liten för att det förekommer utnyttjade deponeringshål som skärs av sprickor med höga flödes hastigheter.

Slutsatser

De förenklade analyserna som utförts leder till slutsatsen att om förvaret överges utan att alla delar av det återfylls och försluts kan det innebära att återfyllningen i deponeringstunnlarna förloras och att säkerhetsfunktionerna för inneslutning sätts ur spel för de deponeringshål som ligger nära deponeringstunnlarnas mynning. Därför är den generella slutsatsen att förvaret inte bör överges innan det är fullständigt återfyllt och förslutet.

Analyserna av ett ofullständigt förslutet förvar visar dessutom att förvarssystemet som anpassats för förvarsplatsen vid Forsmark är robust under en lång tidsperiod. Även utan återfyllning i delar av systemet förväntas inga kapselbrott inträffa så länge diffusion dominerar transporten av korrosiva ämnen i återfyllningen i transporttunnlar och i bufferten i deponeringshål. De hydrogeologiska resultaten för tempererade förhållanden tyder även de på enbart små effekter av de öppna tunnlarna på Darcyflödet vid deponeringspositioner. Även om de öppna tunnlarna förändrar flödesvägarna och leder till att bergets flödesrelaterade transportmotstånd blir något lägre så är dessa motstånd fortfarande höga. Det faktum att flödesvägarna fångas upp av de öppna tunnlarna och strömmar ut genom schakten och rampen ovanför centralområdet betraktas också som ovidkommande. Detta eftersom det finns utströmningspunkter nära förvaret även i referensutvecklingen och även eftersom periglaciala förhållanden med permafrost i de övre delarna av rampen och schakten kommer att råda under stora delar av den 58 000 år långa tidsperioden. Detta innebär att de öppna tunnlarna får en liten inverkan på andra deponeringshål än de som direkt påverkas av den expanderande tunnelåterfyllningen.

Om korrosionsgenombrott i kapslar sker under nästa period med glaciala förhållanden, dvs från om 58 000 år till om 66 200 år enligt referensutvecklingen, kommer den årliga effektivdosen från radionuklider i de skadade kapslarna att överstiga det föreskrivna gränsvärdet. Så länge antalet kapselbrott är begränsat till färre än cirka 20, kommer effektivdosen från radionuklider i dessa kapslar att vara lägre än dosen från bakgrundsstrålningen. Med tanke på de stora osäkerheterna och försiktiga antagandena som gjorts i den här analysen ska den beräknade årliga effektivdosen betraktas som ett exempel på möjliga konsekvenser snarare än en uppskattning av vad konsekvenserna skulle bli om förvaret inte är fullständigt återfyllt och förslutet.

14.3 Analyser som krävs för att påvisa optimering och användning av bästa möjliga teknik

14.3.1 Inledning

Enligt avsnitt 2.7 måste vissa aspekter av påvisad bästa möjliga teknik (BAT) tas upp i den analys av långsiktig säkerhet som biläggs tillståndsansökan, dvs i SR-Site-rapporteringen. Eftersom en allmän redovisning av användandet av bästa möjliga teknik är en bred fråga, som spänner från valet av metod för att ta hand om kärnavfall till detaljer i den valda metoden, kan och ska endast en begränsad del av denna fråga beaktas i säkerhetsanalysen av den föreslagna metoden. Här har redovisningen av bästa möjliga teknik därför begränsats till KBS-3-metoden med vertikal deponering där koppar-/segjärns kapslar, buffert och återfyllning används på den valda platsen.

Slutgiltiga bedömningar beträffande bästa möjliga teknik kan inte göras inom SR-Site-analysen. Däremot kan en grund för sådana bedömningar ges. Som redan konstaterats i det inledande avsnittet 1.2 baseras SR-Site på en referensutformning av förvarets tekniska delar, inklusive referensmetoder för att åstadkomma den specificerade utformningen, där hänsyn tas till metoder för att kontrollera att referensutformningens specifikationer har uppnåtts. Återkoppling kan ges om förändringar i förhållande till denna referensutformning skulle kunna leda till minskad risk eller minska de osäkerheter som kan påverka risken. För aspekter av utformningen där man realistiskt sett inte kan uppnå någon sådan minskning av risk eller osäkerhet avseende upprätthållandet av säkerhetsfunktioner, kan lösningen hävdas vara optimal och motsvara BAT. SR-Site utgör emellertid ingen analys av alla tänkbara tekniska lösningar. SKB kommer att fortsätta den tekniska utvecklingen av flera aspekter av utformningen för att ytterligare förenkla byggandet och genomförandet, men kommer bara att införa dessa om de leder till en risk som är densamma som eller lägre än den risk som konstaterats i SR-Site.

Analysen som rör bästa möjliga teknik fokuserar på de scenarier, med tillhörande säkerhetsfunktioner, som bidrar till risken, dvs de scenarier som behandlar kapselbrott till följd av korrosion och skjuvning. För dessa scenarier analyseras de aspekter av utformningen som påverkar om respektive scenario kommer att inträffa och om realistiska förändringar av utformningen skulle leda till en betydligt lägre risk. Dessutom analyseras centrala delar av utformningen som inte bidrar direkt till risken, som återfyllningen, förslutningen och förvarsdjupet, för att klargöra om det finns aspekter av dessa delar som skulle kunna äventyra någon av säkerhetsfunktionerna och om förändringar av dem skulle kunna öka säkerheten.

Den analys av inneslutningspotentialen för de relevanta scenarierna som beskrevs i kapitel 12 och de analyser av fördröjningspotentialen och risk som presenterades i kapitel 13, med tillhörande känslighetsanalyser, utgör grunden för den BAT-relaterade analys som presenteras i följande underavsnitt. Analyserna pekar ut de viktigaste frågorna som måste beaktas vid BAT-diskussionen. För att kunna utvärdera resultaten för den beräknade risken från analysen av den långsiktiga säkerheten utifrån bästa möjliga teknik och optimering, har dessutom några ytterligare känslighetsanalyser av risken med avseende på viktiga barriärdimensioner och layoutregler utförts. Dessa analyser beskrivs nedan. Den övergripande bedömningen av huruvida den aktuella referensutformningen uppfyller denna aspekt av bästa möjliga teknik återfinns i avsnitt 15.3.5.

14.3.2 Kapselbrott till följd av korrosion

Kapselbrott till följd av korrosion, dvs då säkerhetsfunktionskriteriet Can1 som avser kopparhöljets tjocklek inte uppfylls, se figur 8-3, är den faktor som bidrar mest till den beräknade risken. Enligt det korrosionsscenario som behandlas i avsnitt 12.6 skulle kapselbrott till följd av korrosion endast kunna inträffa om det utvecklas advektiva förhållanden i bufferten. Faktorer i utformningen som påverkar möjligheten för att det ska uppstå advektiva förhållanden i bufferten är, se avsnitt 12.2:

- Buffertdensitet – mängd deponerat torrmaterial.
- Återfyllningsdensitet – mängd deponerat torrmaterial ovanför deponeringshålet.
- Typ av buffertmaterial som används.
- Geosfärsförhållanden som ger mycket höga eller låga jonstyrkor i grundvattnet.
- Geosfärsförhållanden som leder till ökat flöde.

Faktorer i utformningen som påverkar möjligheten för att korrosionsbrott ska inträffa i de fall bufferten har eroderat, se avsnitt 12.6, utgörs av:

- Kopparhöljets tjocklek.
- Acceptanskriterier för deponeringshål – eftersom dessa kan påverka grundvattnets Darcyflöde runt deponeringshålet.

Utifrån de resultat som redan presenterats i denna rapport, kompletterade med några ytterligare känslighetsanalyser, följer här en analys av huruvida realistiska förändringar av den befintliga referensutformningen skulle leda till sänkt risk.

Kopparhöljets tjocklek

Det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år i korrosionsscenarioet har beräknats för fall där referensutförningens koppartjocklek på 5 cm har ändrats till 10 cm och 2,5 cm. Övriga indata är desamma som för det centrala korrosionsfallet, se avsnitt 12.6.3, vilket exempelvis innebär att resultaten baseras på ett viktat genomsnitt av alla semikorrelerade hydrogeologiska DFN-realiseringar. Resultaten visar att då koppartjockleken ökas till 10 cm minskar det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år med en faktor omkring tre. Om tjockleken däremot minskas till 2,5 cm ökar antalet kapselbrott med en faktor omkring två, se figur 14-6.

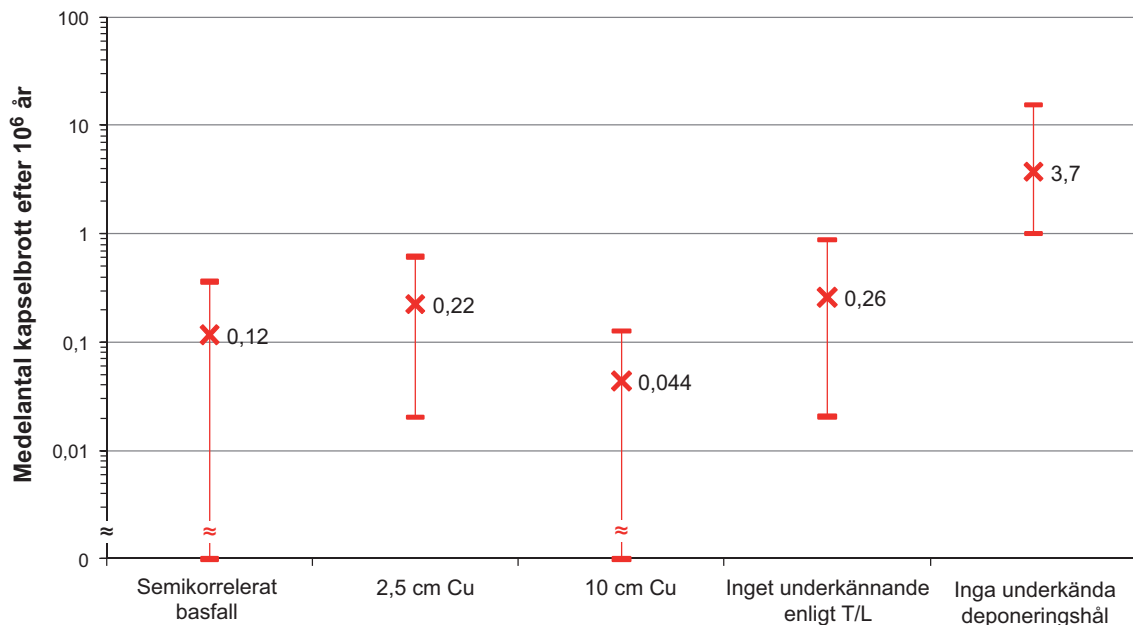
Den maximala dosen och således risken beror på kapseltjockleken på ett liknande sätt som det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år, se **Radionuklidtransportrapporten**.

Eftersom den risk som beräknats för referensutförningen är lägre än föreskrifternas gränsvärde, anses den valda koppartjockleken vara tillräcklig med avseende på bästa möjliga teknik. Problem som skulle kunna uppstå vid tillverkning och förslutning av en tjockare kapsel har inte beaktats i denna analys.

Buffertmaterial – möjlighet att undvika buffererosion

Analysen av buffererosion/kolloidfrigörelse, som sammanfattas i avsnitt 10.3.11, visar att detta fenomen inte kan uteslutas vid analysen av den långsiktiga säkerheten. Modelleringen av kolloidbildning och efterföljande erosion av buffertmaterialet är fortfarande osäker och angreppssättet för modelleringen tenderar därför att vara pessimistiskt. Det står också klart att med den kunskap som finns i dag kan detta fenomen inte minskas på ett försvarbart sätt, exempelvis genom att välja ett annat buffertmaterial. Det krävs ett fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete.

Det är dessutom möjligt att erosionsprocessen kommer att stoppas i ett tidigt skede på grund av att accessoriskt material i den eroderade bufferten fyller upp de sprickor där erosionen äger rum /Neretnieks et al. 2009/. Fortsatt forskning och utveckling krävs innan man kan ta hänsyn till ett sådant fenomen i säkerhetsanalysen.



Figur 14-6. Känslighetsfall för korrosionsscenarioet för att värdera bästa möjliga teknik. Här visas fall med en koppartjocklek på 2,5 och 10 cm samt även två fall där kriterierna för att utesluta deponeringshål (sovring) har lättats på respektive uteslutits. Kryssen visar medelvärden och staplarna variabiliteten för samtliga realiseringar med de hydrogeologiska DFN-modellerna.

Buffertmängd och tjocklek

En tjockare buffert, och således deponeringshål med större diameter, skulle i begränsad omfattning dämpa effekterna av buffererosion, eftersom större mängd buffertmaterial skulle tillåta större förlust innan advektiva förhållanden uppstår. Detta motverkas emellertid av deponeringshålets större diameter, vilken i viss utsträckning skulle öka erosionshastigheten /Moreno et al. 2010/ och även öka sannolikheten för att en vattenförande spricka skär deponeringshålet.

Sammanfattningsvis anses en större mängd buffertmaterial inte vara ett praktiskt sätt att minska effekterna av buffererosion. En större mängd buffertmaterial kan leda till att det tar något längre tid innan det uppstår advektiva förhållanden i deponeringshålet, men detta betraktas inte som en lösning på problemet. Det konstateras också att fortsatt forskning och utveckling med avseende på erosionsprocessen krävs. Det kan dessutom noteras att en förändrad buffertjocklek innebär att även förvarets termiska dimensionering måste ses över.

Återfyllningsdensitet – mängd torrmasa deponerad över deponeringshålet

Enligt avsnitt 10.3.9 kan maximalt 220 ton återfyllningsmaterial förloras i en sektion av en deponeringstunnel innan advektiva förhållanden måste beaktas i underliggande deponeringshål. Enligt slutsatsen i avsnitt 10.3.11 kommer inte någon av de enskilda sprickor som skär tunneln att ge upphov till erosion av återfyllningen i sådan omfattning. För ett fåtal positioner där tunneln skärs av en transmissiv deformationszon kan potentiellt mer än 220 ton förloras, men detta är inte relevant för kapselns integritet. En sådan lokal förlust av återfyllning till följd av erosion innebär inte att den hydrauliska konduktiviteten i hela tunneln kommer att påverkas och bedöms heller inte utgöra någon risk för säkerheten. Sammanfattningsvis bedöms den mängd torrmasa som enligt den befintliga utformningen deponeras ovanför deponeringshålet vara adekvat.

Acceptanskriterier för deponeringshål

Grundvattenflödet kring och genom deponeringshålen påverkar i hög grad både förlusten av bentonit, som potentiellt kan leda till advektiva förhållanden, och korrosionshastigheten till följd av sulfid i grundvattnet på så sätt som visas i figurerna 10-72 och 10-158. Dessa figurer visar också den betydelse EFPC har för att undvika deponeringshål med högt grundvattenflöde. Enligt avsnitt 5.2.3 utnyttjar man i förvarets referensutformning och i analyserna som utförs i SR-Site, utöver det ”rena” EFPC, även ett ytterligare kriterium för att utesluta deponeringshål. Detta kriterium är förknippat med kombinationen av hög transmissivitet och längden på den skärande sprickan (T/L-filtrering).

För att vidare undersöka betydelsen av acceptanskriterierna för deponeringshål har ytterligare några fall studerats.

Det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år i korrosionsscenariot har beräknats för fall där man i) inte använt något filter för transmissivitet/spricklängd (T/L) och ii) inte utesluter deponeringshål på något sätt, dvs varken T/L-filtrering eller det ”rena” EFPC tillämpas. Övriga indata är desamma som för det centrala korrosionsfallet, se avsnitt 12.6.3. Resultaten visar att då ett T/L-filter inte används ökar det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år med en faktor av omkring två. Om inte några sovringskriterier används över huvud taget ökar antalet kapselbrott med en faktor av omkring 30, se figur 14-6. Särskilt det senare resultatet visar att det är nödvändigt att tillämpa lämpliga sovringskriterier.

Den maximala dosen och således risken beror på sovringskriterierna på ett liknande sätt som det genomsnittliga antalet kapselbrott efter en miljon år, se **Radionuklidtransportrapporten**.

Med de antaganden som används i korrosionsberäkningarna för advektiva förhållanden i SR-Site tar det dessutom mer än 900 000 år efter det att bufferten har eroderat bort innan korrosionen helt har penetrerat en kapsel i ett deponeringshål. Detta gäller för ett Darcyflöde på 0,001 m/år och även med den högsta sulfidkoncentrationen som beaktas i korrosionsberäkningarna (0,00012 M). I ett sådant deponeringshål tar det dessutom omkring 100 000 år för bufferten att erodera om sprickaperturen till vilken bufferten förloras är 10^{-3} m och om man antar utspädda grundvattenförhållanden under 25 procent av tiden. Det betyder att risken förknippad med korrosionsscenariot över den en miljon år långa analysperioden skulle försvinna om deponeringspositioner med långvariga Darcyflöden på 0,001 m/år eller mer skulle kunna identifieras och uteslutas. Det är också värt att notera att en gräns

för Darcyflödet på 0,01 m/år inte skulle minska risken så mycket jämfört med den minskning man får genom att tillämpa EFPC. Detta eftersom nästan samtliga av de fåtal positioner som har sådana Darcyflöden redan har uteslutits. Normalt har mindre än en procent av deponeringspositionerna Darcyflöden som är högre än 0,001 m/år. Omkring ett av tusen har flöden över 0,01 m/år om inte någon sovring tillämpas. Det betyder att om man kunde ta fram ett effektivt kriterium som är mer direkt relaterat till Darcyflödet skulle den eventuella förlusten av deponeringspositioner vara liten.

Det bör noteras att eftersom EFPC (inklusive T/L-kriteriet) tillämpas i SR-Site, innebär det i praktiken att även hydrauliska hänsynstaganden görs. Eftersom det finns en korrelation – även om den är osäker – mellan sprickstorlek och transmissivitet, minskar i själva verket antalet deponeringshål med höga Darcyflöden betydligt då EFPC tillämpas. Denna observation understryker det faktum att det inte är EFPC i sig som är viktigt utan i stället identifieringen av en observerbar egenskap med vars hjälp det går att hitta potentiella transmissiva sprickor.

Ett mer direkt kriterium som ytterligare skulle minska den beräknade risken och som undersöks i SR-Site är att utnyttja ett inflödeskriterium. Detta eftersom det måste finnas en korrelation mellan höga inflöden under öppna förvarsförhållanden och höga framtida Darcyflöden. Enligt resonemanget i avsnitt 10.2.3, vilket vidareutvecklas i avsnitt 7.1 i /Selroos och Follin 2010/ finns det verkligen en sådan korrelation, åtminstone för de högre inflödena och Darcyflödena. Denna analys tyder till exempel på att det inte skulle förekomma högre Darcyflöden än 10^{-2} m/år under mättade tempererade förhållanden om man undviker inflöden som är högre än 0,1 l/min. För att ytterligare undersöka de möjliga effekterna av ett sådant kriterium uteslöts de deponeringspositioner där höga inflödes-hastigheter identifierades under öppna förvarsförhållanden. Detta gjordes vid en analys av det centrala korrosionsfallet i korrosionsscenarioet, för realiseringen av basfallet i den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Resultatet visade att det inte inträffade något kapselbrott i scenarioet, dvs alla olämpliga deponeringspositioner hade identifierats genom denna procedur.

Sammanfattningsvis verkar det finnas möjligheter att ytterligare höja säkerheten genom att undvika deponeringshål med höga inflöden, även om korrelationen inte är ett-till-ett mot bakgrund av skillnaderna i randvillkor. Inflödena kommer dessutom att påverkas av naturliga tätningseffekter (skin effects) och injektering och det kommer också att finnas en praktisk nedre detektionsgräns. Sådan påverkan kan delvis hanteras genom ett krav på att deponeringshål som skärs av sprickor som kan ge inflöden som är högre än ett angivet värde ska undvikas. Detta tyder på att de hydrauliska egenskaperna hos de sprickor som skär borrhålet bör testas i pilothålet innan det fullskaliga hålet borras. På så sätt kan naturliga tätningseffekter (skin effects) undvikas. Dessutom bör deponeringshål som skärs av sprickor som innehåller synlig mängd injekteringsmaterial uteslutas, eftersom förekomsten av injekteringsmaterial tyder på att sprickan var relativt transmissiv före injekteringen.

Acceptanskriterier för deponeringstunnlar – inklusive EDZ

Enligt de befintliga konstruktionsförutsättningarna bör sprängskador i deponeringstunnlar begränsas och inte leda till en konnekterad effektiv transmissivitet längs med en betydande del (dvs minst 20–30 m) av deponeringstunneln och beräknat som medelvärde över tunnelsulan, som är högre än 10^{-8} m²/s. De resultat som redovisas i **Berglinjerapporten** och som vidareutvecklas i **Datarapporten** och i avsnitt 10.2.2 tyder på att det finns omfattande belägg för att en potentiell skadad zon (EDZ) som bildas under berguttaget kommer att ha en transmissivitet som är lägre än den som maximalt tillåts i konstruktionsförutsättningarna. Data tyder också på att en kontinuerlig skadad zon inte kommer att utvecklas alls. Enligt **Berglinjerapporten** krävs det dock att den metod som utnyttjas för att kontrollera den skadade zonen vidareutvecklas och dessutom att denna metods tillförlitlighet påvisas.

Som framgår av tabell 14-3 är antalet korroderade kapslar identiskt för fallen utan en EDZ och med grundantagandet om en EDZ-transmissivitet på 10^{-8} m²/s.

Tabellen visar också att en EDZ med högre transmissivitet skulle kunna påverka risken, eftersom antalet kapselbrott ökar, om än måttligt, när transmissiviteten ökar. Därför dras slutsatsen att transmissivitetsgränsen på 10^{-8} m²/s är adekvat.

Den skadade zonen verkar till och med ha ännu mindre betydelse för radionuklidtransport. För pinnhålsscenarioet, se avsnitt 13.7.2, leder förekomsten av en skadad zon med en transmissivitet på 10^{-8} m²/s endast till en marginell ökning av dosen jämfört med fallet utan en skadad zon. Dosen ökar inte heller om transmissiviteten hos den skadade zonen ökar.

Tabell 14-3. Beräknat genomsnittligt antal kapselbrott efter en miljon år för olika antaganden beträffande den skadade zonens egenskaper och förekomsten av ett vattenförande utrymme direkt under tunneltaket (crown space).

	Genomsnittligt antal kapselbrott efter en miljon år
Semikorrelerad basfallsrealisering utan EDZ	0,083
Semikorrelerad basfallsrealisering med EDZ med $T = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	0,083
Semikorrelerad basfallsrealisering med EDZ med $T = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	0,19
Semikorrelerad basfallsrealisering med EDZ med $T = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	0,33
Semikorrelerad basfallsrealisering med "crown space" med EDZ med $T = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	0,25

14.3.3 Kapselbrott till följd av skjuvrörelser

Kapselbrott till följd av skjuvning, dvs då säkerhetsfunktionskriteriet Can 3 "Motstå skjuvlast" enligt figur 8-2 inte uppfylls, bidrar till den beräknade risken även om detta bidrag är litet. Enligt slutsatsen i avsnitt 10.4.5 tyder pessimistiska uppskattningar av kapselbrott till följd av skjuvrörelser i berget på att sannolikheten är 0,079 för att en av de 6 000 kapslarna som deponeras i Forsmark har drabbats av kapselbrott i slutet av den en miljon år långa analysperioden. Detta leder till en genomsnittlig maximidos på 0,15 μSv efter en miljon år, se avsnitt 13.6. Det kan hävdas att ytterligare minskningar av detta mycket låga riskbidrag inte är särskilt meningsfullt, men det är ändå värdefullt att beakta vilka faktorer i utformningen som påverkar risken associerad med skjuvbrott. Enligt analysen av scenariot för kapselskjuvning, se avsnitt 12.8, är dessa faktorer:

- Insatsens hållfasthet och förekomsten av defekter.
- Kopparhöljets mekaniska egenskaper.
- Buffertdensiteten och buffertmaterialets egenskaper.
- Effektiviteten i rutinerna för att utesluta deponeringshål.

Nedan följer en analys av dessa faktorer.

I analysen används i huvudsak resultaten från undersökningar av /Raiko et al. 2010/ om hur kapselbuffertsystemet reagerar på skjuvlast. Dessa undersökningar har utförts inom ramen för designanalysen av kapseln och utgör en viktig grund för **Produktionsrapporten för kapseln**. Enligt avsnitt 10.4.5 är de befintliga konstruktionsförutsättningarna resultatet av en avvägning mellan nåbara krav på kapseln och på förvarets layout, utifrån befintlig kunskap om jordskalv och sekundära skjuvrörelser å ena sidan, och reaktionerna hos buffert-kapselssystemet å den andra. Lägre tillåten skjuvrörelse i konstruktionsförutsättningarna skulle ge högre sannolikhet för skjuvning med givna layoutregler, men lägre krav på kapselutformning och kapselmateriell (i synnerhet på den oförstörande provningen av insatsen) och vice versa. De nämnda analyserna av buffert-kapselssystemets reaktioner på skjuvlast tyder också på att i många fall skulle inte ens en skjuvrörelse på 10 cm äventyra kapselns integritet om den verkliga variationen av buffertdensiteten, sprickorientering i berget samt angreppspunkt på kapseln beaktas. Denna slutsats styrks ytterligare av det faktum att kriterierna som används för att utvärdera modelleringsresultaten hänför sig till lokala egenskaper hos insatsen, och om dessa kriterier inte uppfylls skulle det i många fall inte leda till att kopparhöljets integritet går förlorad.

Insatsens hållfasthet och förekomsten av defekter

Segjärnsinsatsens förmåga att motstå skjuvlast beror främst på förekomsten av ytdefekter i segjärnet. Enligt de skadetålighetsanalyser /Raiko et al. 2010/ som diskuteras i avsnitt 10.4.5 och i avsnitt 5.4.3 är det maximalt tillåtna djupet hos sprickliknande ytdefekter med en halvelliptisk form relativt litet (4,5 mm). Större skjuvrörelser minskar det tillåtna djupet, medan minskad buffertdensitet ökar det tillåtna djupet.

Medan slutsatsen i **Produktionsrapporten för kapseln** är att den nuvarande referensutformningen för kapseln överensstämmer med de fastslagna konstruktionsförutsättningarna, noteras det även att det för insatsen behövs rigorösa krav på tillverkning och på den oförstörande provningen. En omarbetning av utformningen av systemet kapsel-buffert så att lasten på insatsen minskar, exempelvis genom att minska buffertdensiteten, skulle således sänka kraven på tillverkning och oförstörande provning av insatsen.

Det bör också noteras att initialtillståndet för fallet med skjuvlast inte inbegriper PWR-insatser, eftersom typiska materialdata för analys av hållfasthet och skadetålighet ännu inte finns att tillgå. Formellt kan SR-Site inte analysera PWR-insatsernas lämplighet. PWR-utformningen är emellertid robustare på grund av det tjockare materialet i segjärnsinsatsen.

Kopparhöljets mekaniska egenskaper

Resultaten från kontroller av tillverkade kapselkomponenter, som redovisas i **Produktionsrapporten för kapseln**, visar att de specificerade värdena för töjning och krypduktilitet i kopparhöljet överensstämmer med referensutformningen. Värdena från utformningen används i den efterföljande skadetålighetsanalysen /Raiko et al. 2010/ och har visat sig vara lämpliga. Även om inte några formella känslighetsanalyser av betydelsen av kopparhöljets mekaniska egenskaper utförts, görs bedömningen att det finns små möjligheter att ändra dessa egenskaper så att kapseln skulle kunna stå emot än större laster.

Buffertdensitet och buffertmaterialets egenskaper

Förändringar i buffertmaterialet till följd av cementering ger små effekter vid skjuvanalyserna. I de skjuvberäkningar som gjordes för SR-Can /Börgesson och Hernelind 2006b/ antogs att en 8,75 cm tjock zon av buffertmaterialet runt kapseln omvandlas till cementliknande material utan svälltryck och med 100 gånger högre elasticitetsmodul och fem gånger högre skjuvhållfasthet jämfört med den oförändrade bufferten. Det har inte gjorts några nya beräkningar av detta fall för SR-Site, eftersom sådana stora förändringar av bentonitens egenskaper är orealistiska, det omvandlade materialets egenskaper är okända och effekten relativt liten. Omvänt bedöms det inte heller som möjligt att ändra buffertens sammansättning så att elasticitetsmodulen och skjuvhållfastheten minskar avsevärt samtidigt som det svälltryck som krävs upprätthålls.

En sänkning av bentonitens densitet minskar både töjningen och spänningen på insatsen, vilket visades i tabell 10-22 i avsnitt 10.4.5. Med tanke på den erfarenhet som finns med avseende på att producera och kontrollera buffertdensiteten, som utvärderas i **Produktionsrapporten för bufferten**, skulle ett möjligt sätt att sänka kraven på kapseln vara att skärpa kraven på den maximalt tillåtna buffertdensiteten. Enligt diskussionen i avsnitt 5.5.3 medför det härledda initialtillståndet för bufferten en maximal bentonitdensitet på 2 022 kg/m³ runt kapseln, vilket skulle öka marginalerna för de effekter skjuvrörelser i berget har på kapseln. Ytterligare minskningar av den maximalt tillåtna buffertdensiteten, som i praktiken fortfarande är förenliga med kraven på minimal buffertdensitet, kan också vara möjliga, åtminstone i form av en statistisk fördelning. Således ger SR-Site denna återkoppling för att uppdatera konstruktionsförutsättningarna och för att revidera buffertens utformning, se avsnitt 15.5.7.

Effektiviteten i metoden för att utesluta deponeringshål

Enligt avsnitt 12.8.2 beror antalet kapslar som kan gå sönder till följd av skjuvlast under analysperioden på förmågan att detektera och undvika stora sprickor i deponeringshålen. FPI-kriterierna för att utesluta deponeringshål har visat sig vara effektiva för att hitta kritiska strukturer och gör det möjligt att hitta mer än 97 procent av de kritiska deponeringspositionerna, oavsett vilken DFN-modell som används /Munier 2010/. De återstående positionerna förs vidare till analysen av seismisk påverkan, se avsnitt 10.4.5. För att förenkla beräkningarna baseras emellertid FPI-simuleringarna på idealiseringar av sprickor i form av perfekt plana, oändligt tunna skivor. De flesta verkliga sprickor är emellertid inte anonyma och uppvisar många egenskaper som kan användas som representationer av storlek /Cosgrove et al. 2006/. Enligt /Munier 2010/ är det därför troligt att kritiska sprickor, som inte hittats i de simuleringar som användes som indata i denna analys, kommer att påträffas med ett noggrant utformat undersökningsprogram /SKB 2010b/. Det är således troligt att antalet potentiellt skadade kapslar kommer att vara lägre än det som förutses i denna analys. Med utgångspunkt från BAT kan det därför hävdas att medan det befintliga EFPC ger tillräckligt skydd mot skjuvbrott, finns det anledning att fortsätta de insatser som förutses i det detaljerade undersökningsprogrammet för att hitta kritiskt stora sprickor på andra sätt. Sådana insatser är troligen också ekonomiskt fördelaktiga, eftersom tillämpning av EFPC innebär att många deponeringshål utesluts, även om de inte skärs av sprickor som är tillräckligt stora för att utgöra ett problem.

14.3.4 Utformningsrelaterade faktorer som inte bidrar till risk

Kapselbrott till följd av isostatiskt övertryck

I analysen av scenariot ”Kapselbrott till följd av isostatisk last” som presenterades i avsnitt 12.7.5 drogs slutsatserna att ett maximalt svälltryck på 15 MPa skulle kunna uppstå i bufferten, att grundvattentrycket är omkring 4,5 MPa i Forsmark vid isfria förhållanden och att ett ytterligare grundvattentryck på som högst 30 MPa skulle kunna uppstå som en följd av den maximala glaciala lasten som det finns geologiska belägg för. Summan av dessa laster är 49,5 MPa. Men med tanke på att den kombinerade effekten av svälltryck och hydrostatisk last är något lägre än denna summa leder detta till ett totaltryck på omkring 46,5 MPa, vilket framgår av avsnitt 12.7.5.

Från analysen av kapselns hållfasthet dras slutsatsen att lokal kollaps undviks med väsentlig marginal för 45 MPa och att marginalen till total kollaps (90 MPa), dvs kriteriet för kapselbrott är avsevärd. För den befintliga referensutformningen finns god marginal till kapselbrott till följd av isostatisk last, även för de mest extrema lastsituationerna, och det förefaller inte finnas något behov av att ändra utformningen för att öka denna marginal.

Mått och materialegenskaper hos deponeringstunnelns återfyllning

Återfyllningens säkerhetsfunktioner BF1, se figur 8-3, är att hålla bufferten på plats och att ha tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet. Dessa säkerhetsfunktioner uppnås och upprätthålls med den befintliga utformningen av återfyllningen.

Enligt slutsatsen i avsnitt 10.3.9 kommer buffertens svälltryck och de därmed förknippade säkerhetsfunktionerna att upprätthållas under buffertens expansion in i återfyllningen för alla tänkbara kombinationer av buffert- och återfyllningsförhållanden. Dessutom görs flera troligen pessimistiska antaganden i denna analys. Dessa inkluderar antagandet att bufferten är helt vattenmättad och homogeniserad från start, antagandet att den mekaniska kontakten mellan återfyllningsblocken är svag, där den lokala krossningen av blocken som skulle kunna ske nära sulan inte tas med i beräkningen, och antagandet att återfyllningsblocken inte överlappar varandra.

Det är också viktigt att återfyllningen upprätthåller sitt svälltryck för att undvika att det exempelvis uppstår ett vattenförande utrymme (crown space) direkt under tunneltaket. Som framgår av den sista raden i tabell 14-3 skulle ett sådant utrymme kunna ändra flödessituationen, exempelvis så att den negativt påverkar antalet kapselbrott till följd av korrosion. Bedömningen är att svälltrycket verkligen kommer att upprätthållas med den befintliga utformningen.

- Enligt avsnitt 10.3.9 kommer det att finnas en kvarstående densitetsgradient i återfyllningen efter vattenmättnad. Den beräknade lägsta densiteten är $1\,370\text{ kg/m}^3$, vilket enligt figur 5-19 skulle ge ett svälltryck på ungefär 1 MPa. Detta är en storleksordning högre än det svälltryck som krävs för att uppfylla återfyllningens säkerhetsfunktion Bf2 (se figur 8-3). Återfyllningens självläkande förmåga bör därför vara tillräcklig.
- Som framgår av avsnitt 10.3.9 är erosion av återfyllning i en tunnel som skärs av en mycket konduktiv spricka av betydelse för buffertens egenskaper i deponeringshålet, men förväntas inte ha någon avgörande betydelse för själva transportegenskaperna. Det kommer lokalt att finnas en volym med lågt svälltryck och hög hydraulisk konduktivitet. Huvuddelen av tunnelns volym kommer emellertid inte att påverkas.
- Eftersom temperaturen är låg under alla förhållanden, kan förändringar i montmorilloniten i form av omvandling till illit försummas i återfyllningen. Det antas också att cementen i förvaret kommer att ha lågt pH och ha obetydlig inverkan på återfyllningens egenskaper, se avsnitt 4.4.7 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**.
- I avsnitt 10.4.8 visas att framtida förändringar av temperaturen och grundvattnets kemi kommer att ha begränsad eller ingen effekt på återfyllningsmaterialets hydromekaniska egenskaper.

För fallet med förlust av återfyllningsmaterial kan en maximal förlust av 220 ton i en sektion av en deponeringstunnel tillåtas innan advektiva förhållanden måste beaktas i ett deponeringshål. Som visades i avsnitt 10.3.11 kommer ingen av de enskilda sprickor som skär tunneln att ge upphov till erosion av återfyllningen i sådan omfattning att den förlorar så mycket svälltryck att advektiva förhållanden måste antas i de underliggande deponeringshålen. För ett fåtal positioner där tunneln skärs av en mycket transmissiv deformationszon kan eventuellt mer än 220 ton förloras, men detta är

inte relevant för kapselns integritet. En sådan lokal förlust av återfyllning till följd av erosion innebär inte att den hydrauliska konduktiviteten i hela tunneln kommer att påverkas och sådana händelser bedöms heller inte försämra säkerheten.

Sammanfattningsvis konstateras att även om det går att genomföra förbättringar av återfyllningens utformning om man ser till hur den installeras, förefaller det inte finnas något behov av att ändra utformningen för att ytterligare stärka dess säkerhetsfunktion.

Mått och materialegenskaper hos förslutningen

Det finns inga direkta säkerhetsfunktioner kopplade till förvarets förslutning, men dess inverkan har analyserats i SR-Site. Referensutformningen som redovisas i **Berglinjerapporten** och i **Produktionsrapporten för förslutningen** överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna och analyserna i SR-Site visar att en utformning som följer dessa regler skulle vara lämplig. Baserat på resultaten från analyser av varierande transmissivitet hos den skadade zonen, vilket diskuterades i avsnitt 14.3.2, är det heller inte uppenbart att reglerna kan mildras. Det är emellertid troligt att den direkta inverkan på risken endast skulle gälla den skadade zonen i deponeringstunnlarna, medan en högre transmissivitet troligen skulle kunna tillåtas i de övriga tunnlar. En sådan situation har emellertid inte analyserats i SR-Site.

Förvarsdjup

Som beskrivs i **Berglinjerapporten** och som diskuteras ytterligare i avsnitt 5.2.2 har förvarsdjupet huvudsakligen fastställts genom att ta hänsyn till de hydrauliska förhållandena i Forsmark, dvs frekvensen och förekomsten av transmissiva sprickor och deras beroende av djupet. Byggbarheten beror däremot i huvudsak på bergmekaniska faktorer, exempelvis sannolikheten för spjälkning och omfattningen av spjälkning i deponeringshålen före deponeringen. Återstående osäkerheter i den geologiska beskrivningen bedöms kunna hanteras i tillräckligt hög grad med hjälp av metoder och tekniker som infördes under platsundersökningarna och enbart smärre efterjusteringar av de tillgängliga områdena kommer att behövas. Osäkerheterna avseende riktningen för den största horisontella huvudspänningen kan bara minskas i betydande grad genom *in situ*-tester på djupet medan tillfarterna byggs. Resultatet kan göra det nödvändigt att ändra riktningen på deponeringstunnlarna, men bör inte påverka det fastställda djupets och förvarsområdenas allmänna lämplighet.

Kemisk stabilitet – salthalt, redox och sulfid

Faktorer som är förknippade med säkerhetsfunktion R1 ”Tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden” är i allmänhet gynnsamma på det valda djupet. De enda kvarvarande frågorna som rör kemisk stabilitet och som har betydelse för förvarssäkerheten är kopplade till risken att ett fåtal deponeringshål utsätts för grundvatten med för låg jonstyrka och förekomst av sulfid. Övriga indikatorkriterier för säkerhetsfunktion R1 som rör kemiskt gynnsamma förhållanden upprätthålls under hela analysperioden.

Slutsatserna i avsnitt 14.3.2 ger att jonstyrkan i grundvattnet, $\Sigma q[M^{qt}]$, kommer att sjunka till under 4 mM laddningsekvivalenter, dvs bryta mot säkerhetsindikatorkriterium R1c, för vissa deponeringshål under någon period av glaciationscykeln. Det kan i sin tur leda till att buffert förloras i några få deponeringshål och att några få (mellan noll och två) kapselbrott skulle ha inträffat till följd av korrosion i slutet av den en miljon år långa analysperioden. Som redan konstaterats skulle det senare problemet troligen kunna minskas ytterligare genom att tillämpa striktare sovringskriterier för inflöde när deponeringshålen ska väljas. I allmänhet minskar också risken för nedträngning av utspädda vatten med ökat förvarsdjup. Förekomsten av sådan potentiell nedträngning är emellertid liten och förknippad med de få förekommande migrationsvägarna med hög transmissivitet i det i allmänhet mycket täta berget. Det finns inga bevis för att en praktiskt realistisk ökning av djupet (dvs i storleksordningen 100 m) skulle leda till en markant minskning av förekomsten av sådana isolerade vägar – och det förefaller vara en bättre strategi att försöka undvika dem lokalt.

Sulfidinnehållet i grundvattnen vid Forsmark har undersökts av /Tullborg et al. 2010/. Data visar ingen indikation på att sulfidkoncentrationerna är korrelerade med djupet. Inget beroende mellan sulfidkoncentrationerna och transmissiviteten hos de sprickor i vilka grundvattnet testades har hittats. Andra parametrar som skulle kunna ha betydelse för den bakteriella sulfatreduktionen är koncentrationer av löst organiskt kol (DOC), metan och väte. Koncentrationerna av organiskt kol

är högre i bergets översta 100 m, men vid förvarsdjupet är värdena låga, lägre än $2 \cdot 10^{-4}$ mol/l. Någon djupberoende trend går inte att urskilja. Det finns bara enstaka data för metan och väte, men inte heller dessa visar på något djupberoende. Slutsatsen är därför att en förändring av förvarsdjupet inte skulle påverka antalet kapselbrott till följd av sulfidkorrosion.

Längder och transportmotstånd för hydrauliska transportvägar till och från förvaret

Säkerhetsfunktion R2a "Transportmotstånd i sprickor, F " påverkas av förvarsdjupet. Transportvägarna för lösta ämnen i grundvattnet blir längre med ökande djup, men den resulterande påverkan på transportmotståndet skulle endast vara marginell, dvs en ökning av djupet med 100 m skulle endast innebära en ökning av transportvägens längd med omkring 25 procent. Mer viktigt är att dessa vägars transportmotstånd skulle öka med djupet om den hydrauliska konduktiviteten minskar med djupet på förvarsplatsen, se vidare nedan.

Sprickfrekvens och spricktransmissivitet

Både säkerhetsfunktion R2a "Transportmotstånd i sprickor, F " och R2b "Ekvivalent flöde i gränssytan mellan buffert och berg, Q_{eq} " påverkas av förvarsdjupet, eftersom sprickfrekvensen och spricktransmissiviteten är djupberoende. Det valda förvarsdjupet är emellertid med god marginal större än det djup på cirka 400 m där den redan låga frekvensen av vattenförande sprickor minskar markant. Det finns inget i data som tyder på att denna extremt låga frekvens skulle vara ännu lägre vid de större djup man realistiskt sett skulle kunna nå. Sammanfattningsvis är det valda förvarsdjupet, dvs mer än 450 m, tillräckligt för att nå de volymer vid Forsmark som har låg sprickfrekvens och låg permeabilitet, och det förefaller inte finnas några fördelar med ett större djup än så.

Grundvattentryck

Grundvattentrycket, säkerhetsfunktion R3a, som bidrar till den isostatiska lasten på kapseln, ökar med djupet. Jämfört med buffertens svälltryck och det hydrostatiska trycket från den glaciala lasten är emellertid detta ökade tryck endast av marginell betydelse. Ett ökat tryck kommer också att öka inflödet i förvaret under byggnationen, såvida inte detta förhindras genom injektering – detta är emellertid huvudsakligen en förvarsteknisk fråga. Det kommer dessutom endast att finnas ett begränsat behov av injektering på förvarsdjup i Forsmark, eftersom frekvensen av vattenförande sprickor och deformationszoner är mycket låg.

Bergspänning

Bergspänningar påverkar indirekt säkerhetsfunktion R2b "Ekvivalent flöde i gränssytan mellan buffert och berg, Q_{eq} ", eftersom spänningen *in situ* avgör risken för spjälkning. Spänningen ökar i allmänhet med djupet, men som också konstateras i **Berglinjerapporten** (med tillhörande referenser) verkar det för större djup än 300 m endast finnas marginellt stöd för en markant ökning av storleken för den horisontella spänningen i sprickdomän FFM01 med djupet. En placering av förvaret på ett djup på 400 m eller 500 m ökar därmed inte påtagligt risken för spjälkning i deponeringshålen.

Initial temperatur

Temperaturen *in situ* är kopplad till säkerhetsfunktion R4 "Tillhandahålla gynnsamma termiska förhållanden". Temperaturen ökar med djupet även om den termiska gradienten är relativt liten i det djupintervall som beaktas. Detta måste man ta hänsyn till i layouten av förvaret då det nödvändiga avståndet mellan kapslarna bestäms, så att den maximala temperaturen i bufferten är lägre än de angivna gränsvärdena. Det betyder att avståndet mellan kapslarna måste ökas med djupet, vilket gör att förvarets projektion på markytan blir större för ett djupare förvar. Om detta beaktas i förvarsutformningen finns emellertid inga andra skadliga effekter av den med djupet ökande temperaturen *in situ*.

Frysning

Ett kallare framtida klimat kan i princip slutligen leda till frysning och är kopplat till säkerhetsfunktion R4 "Tillhandahålla gynnsamma termiska förhållanden" i bufferten och deponeringstunnelns återfyllning. Sådan frysning kan i sin tur påverka kapseln och berget i närområdet negativt. Sannolikheten för frysning minskar med ökande djup. Analyserna i SR-Site har emellertid visat att frysning av bufferten

kan betraktas som ett restskenario, dvs inget rimligt förlopp har identifierats som skulle kunna leda till detta för ett djup på 450 m i Forsmark. Fryspunkten är högre för en eroderad buffert än för en intakt buffert. Vid det valda djupet är frysning av en eroderad buffert osannolik, men kan inte helt uteslutas. Effekterna bedöms emellertid inte äventyra kapselns integritet. Enligt avsnitt 12.3 kan dessutom frysning av deponeringstunnelns återfyllning uteslutas vid dessa djup.

Ytererosion

Ytererosion av berget kommer att inträffa, och då i synnerhet genom glacial erosion. Detta betyder att förvarsdjupet kommer att minska något med varje glacialt skede. Omfattningen har uppskattats till 1–2 m per glaciationscykel för en förvarsplats belägen i en berggrund utan stora dalar och deformationszoner, se avsnitten 3.5.4 och 4.5.7 i **Klimatrapporten**. Erosion behöver därför inte beaktas när förvarsdjupet fastställs inom referensintervallet 400–700 m.

Oavsiktliga mänskliga intrång

Sannolikheten för oavsiktliga mänskliga intrång i förvaret minskar med ökande djup. Intrång kan få följder både för personerna som gör intrång och för förvarets långsiktiga funktion efter intrånget. Intrångsscenarioer utvärderas separat från andra scenarier i säkerhetsanalysen i enlighet med gällande föreskrifter. Det är därför inte okomplicerat att tilldela denna faktor en vikt som är jämförbar med övriga faktorer som diskuteras här. I allmänhet betraktas intrång ned till fler hundra meter i resursfattig berggrund som osannolikt.

Övriga layoutfrågor

I SR-Site har en särskild förvarslayout som är anpassad för Forsmark och som uppfyller konstruktionsförutsättningarna som anges för förvarsanpassning analyserats. För de scenarier som bidrar till risken (korrosionsbrott och skjuvbrott) visar analyserna att det väsentligen är layoutens detaljer som är av betydelse, till exempel den exakta placeringen av deponeringshålen och vilka positioner som skulle kunna godkännas. Dessa detaljer kan slutgiltigt fastställas först under byggnationen och driften av förvaret och genom att tillämpa observationsmetoden där resultat från de detaljerade undersökningarna under jord används, samt genom att tillämpa konstruktionsförutsättningarna för att utesluta deponeringshål enligt diskussionen i tidigare avsnitt. Därför kan frågan om huruvida förvarslayouten bygger på bästa möjliga teknik för närvarande endast analyseras utifrån dessa konstruktionsförutsättningar. En mer specifik återkoppling för dessa förutsättningar ges i avsnitt 15.5.

14.4 Verifiering av att FEP som uteslutits i tidigare delar av utvärderingen är försumbara mot bakgrund av den slutförda analysen av scenarier och risker

14.4.1 Inledning

FEP utesluts i olika steg under analysens gång. Vid upprättandet av FEP-katalogen i SR-Can och uppdateringen av den i SR-Site utfördes revisioner mot FEP i NEA:s FEP-databas, se kapitel 3. Första steget i denna process var att använda några fördefinierade utsällningskriterier för att sortera ut projektrelaterade FEP i NEA:s FEP-databas vilka bedömdes sakna relevans för SR-Can och SR-Site, se **FEP-rapporten**. En FEP kunde sorteras ut om ett eller flera av de kriterier som listas nedan uppfylls.

- denna FEP passar inte in på det avfall, den kapselutformning, förvarsutformning eller geologiska eller geografiska läge som gäller,
- denna FEP definieras av en rubrik utan beskrivning av vad rubriken betyder, men utifrån tolkningen av rubriken görs bedömningen att denna FEP täcks in av andra NEA-projektrelaterade FEP,
- denna FEP är mycket allmän och omfattas av andra mer specifika NEA-projektrelaterade FEP.

Utfallet av denna första utsortering av FEP dokumenteras i SKB:s FEP-databas och berörs inte mer här. Det är värt att notera att den allmänna strategin för att gå igenom relevansen för FEP i detta steg var att betrakta dem som relevanta hellre än att gallra ut dem om det inte stod fullständigt klart att de var irrelevanta.

Enligt beskrivning i avsnitt 3.3 och i **FEP-rapporten** hänfördes alla NEA-projektrelaterade FEP som fanns kvar efter den inledande utsorteringen till FEP i katalogerna för SR-Can och SR-Site. Resultatet användes för att skapa checklistor för uppdatering av processbeskrivningar och för beskrivningar av initialtillstånden för försvarssystemets komponenter. Dessutom användes FEP-listor från revisionen som checklistor för den valda hantering av externa faktorer som beskrivs i klimatrapporten i SR-Can /SKB 2006c/ och **Klimatrapporten** i SR-Site, FHA-rapporten i SR-Can /SKB 2006c/ och **FHA-rapporten** i SR-Site, såväl som för att fastställa SKB-FEP för vidare övervägande i valet av scenarier. I denna process uteslöts fler NEA-projektrelaterade FEP av de olika experter som var inblandade. Skälet för uteslutning dokumenterades för varje utesluten FEP tillsammans med hanteringen av de NEA-projektrelaterade FEP som bedömts vara relevanta. En allmän motivering för att inte ta med en NEA-projektrelaterad FEP eller en aspekt av den är att den inte är relevant för ett KBS-3-förvar i svenskt kristallint berg, dvs den motsvarar det första utsorteringskriteriet i listan ovan. Denna dokumentation ingår i SKB:s FEP-databas, länkad till katalogerna för SR-Can och SR-Site, och också som bilagor i **FEP-rapporten**, och berörs därför inte mer här.

Eftersom FEP-katalogen i SR-Site, som är en uppdatering av versionen i SR-Can, utgör en sammanställning av FEP som bedömts vara relevanta för ett KBS-3-förvar placerat vid Forsmark, ägnas återstoden av det här avsnittet åt att verifiera om det är berättigat att i förekommande fall utesluta FEP som ingår i FEP-katalogen för SR-Site. De FEP som övervägs utgör processer av betydelse för referensutvecklingen, medan FEP som inriktas på metodiken utelämnas, se avsnitt 3.3.

I de följande underavsnitten återbesöks processtabellerna i avsnitt 7.4, med syfte att mot bakgrund av den slutförda analysen av scenarier och risk verifiera om det är berättigat att utesluta alla processer som utpekats som ”icke relevanta” eller ”uteslutna”. Verifieringen av uteslutna processrelaterade FEP begränsas till systemkomponenter som är av primär betydelse för förvarets säkerhet, dvs bränslet, kapseln, bufferten, återfyllningen och geosfären. Processrelaterade FEP för återstoden av det tekniska barriärsystemet bedöms generellt vara av sekundär betydelse för säkerheten och beaktas därför inte. I synnerhet följande faktorer bedöms vara av mindre intresse:

- Bottenplattan i deponeringshålen kan brytas ned, se avsnitt 10.3.12, men inverkan är mindre än den av förmodad spjälkning i deponeringshålet och täcks därför in av analysens antagande att spjälkning förekommer i alla deponeringshål.
- Upplösning av tunnelpluggar kommer enbart att ge en lokal påverkan kring pluggen. Enligt bedömningen i avsnitt 10.3.12 kommer återfyllningen ovanför det närmaste deponeringshålet inte att påverkas.
- Den enda funktion som förslutningen av utrymmena i centralområdet har är att fylla utrymmet utan någon annan konstruktionsförutsättning än att förhindra omfattande konvergens och sättning hos det omgivande berget. De enda syftena med återfyllningen i den övre delen av rampen och schaktet är att hindra oavsiktligt intrång i förvaret och att hålla återfyllningen nedanför på plats. Bägge dessa områden är fyllda med krossat berg som antas ha en hög hydraulisk konduktivitet.
- För att säkerställa att undersökningsborrhålen inte fungerar som viktiga transportvägar måste ett antal hål som borrarats både från ytan och från bergutrymmen tätas vid förslutningen av slutförvaret. Enligt slutsatsen i avsnitt 10.3.6 är inverkan av otillräcklig tätning av borrhålen mycket måttlig. Dessutom kommer referensutformningen av borrhålstätningarna att fungera som avsett enligt den bedömning som presenteras i avsnitt 10.3.14.

Klimatrelaterade FEP av betydelse för säkerheten hos ett geologiskt förvar är de som påverkar förhållandena i biosfären och geosfären. Klimatfrågor som motsvarar klimatrelaterade FEP i FEP-katalogen i SR-Site och deras inverkan på geosfärens förhållanden liksom deras behandling i analysen dokumenteras i kapitel 3 i **Klimatrapporten**. Alla dessa frågor övervägs i analysen liksom kopplingar mellan dem. Ett undantag är inverkan av denudation av ytan på det uppskattade djupet för permafrost. Enligt diskussionen i avsnitt 6.1 är uppskattningen emellertid att denudation (erosion och vittring) av berget allmänt begränsas till ett fåtal meter eller mindre per glaciationscykel på den plats där Forsmarks förvar föreslås ligga och till några tiotal meter under en miljon år. Detta är av mindre betydelse för förvarssäkerheten med hänsyn till att analysen av permafrostdjupet, se avsnitt 10.4.1 och 10.4.3, visar att det går att bortse från frysning på förvarsdjupet. Ingen ytterligare behandling av klimatfrågor som spelar roll för förhållandena i geosfären sker här.

Klimatfrågor som är av vikt för biosfärens förhållanden såväl som biosfärens processer beskrivs och hanteras i processrapporten för biosfären /SKB 2010c/ och i rapporter om ekosystemen /Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010/. Dessa berörs inte vidare här, eftersom de LDF-värden som används i analysen utgör gränssättande värden över hela spannet av viktiga klimatförhållanden, och med antagandet om en hög utnyttjandegrad av utströmningsområden. Därför tenderar de flesta av biosfärens FEP att minska snarare än öka de analyserade doserna.

14.4.2 Bränslet

Enligt tabell 7-2 utesluts följande bränsleprocesser från analysen under delar av eller en hel glaciationscykel:

- F3 Inducerad fission (kriticitet).
- F7 Strukturell utveckling av bränslematrisen (otät kapsel).
- F9 Radiolys av restgaser samt syrabildning (intakt kapsel).
- F10 Radiolys av vatten (utom vid bränsleupplösning).
- F15 Heliumbildning (intakt kapsel).
- F16 Kemisk förändring av bränslematrisen (otät kapsel).

F3 Inducerad fission (kriticitet)

Acceptanskriterier för inkapsling av bränsleelement i kapslar definieras för att säkerställa att intakta kapslar är underkritiska, se avsnitt 5.3.4. Vidare visar analyser av risken för kriticitet i otäta kapslar såväl som utanför otäta kapslar att detta är högst osannolikt, se avsnitt 13.3. Därför bedöms det som försvarbart att utesluta denna process så länge acceptanskriterierna för bränsleinkapslingen uppfylls.

F7 Strukturell utveckling av bränslematrisen

Strukturell utveckling av bränslematrisen till följd av radioaktivt sönderfall, främst alfasönderfall, skulle möjligen kunna påverka fördelningen av radionuklider i bränslematrisen. Den största inverkan av denna process skulle vara på avskiljningen av fissionsprodukter till bränslematrisens korngränser. Rapporterade resultat tyder emellertid på att strålningsinducerad diffusion i bränslematrisen är alltför begränsad för att ha några effekter inom den tidsskala som är av intresse för säkerhetsanalysen. Därför görs bedömningen i **Processrapporten för bränslet och kapseln** att denna process går att försumma för de bränsletyper och den utbränning som har relevans för SR-Site. Det finns inga resultat från de slutförda analyserna av scenarier och risker som talar mot att detta försummas, även om det finns några osäkerheter i spaltinventariet för framtida BWR- och PWR-bränslen med högre grad av utbränning än det bränsle som producerats hitintills. Den försiktiga hanteringen av de omedelbart frigjorda fraktionerna av radionuklidinventariet, se avsnitt 13.5.2 i beräkningarna i säkerhetsanalysen bedöms emellertid täcka de återstående osäkerheterna i detta avseende. Ingen annan koppling än till den omedelbart frigjorda fraktionen har identifierats som relevant för denna process.

F9 Radiolys av restgaser samt syrabildning

Det finns restriktioner för den största mängd vatten och luft som en kapsel bör innehålla vid förslutning, se avsnitt 5.3.1. Dessa mängder av tillgängliga oxidanter leder till en allmän korrosion av insatsen som ger ett penetrationsdjup på i storleksordningen 10 µm, se **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Dessutom torde restriktionerna på innehållet av vatten och luft (kväve) och kravet på mer än 90 procent argon i kapseln begränsa bildningen av korrosiva gaser från bland annat salpetersyra och salpetersyrighet, vilket innebär att det inte är sannolikt att insatsen utsätts för sprickbildning genom spänningskorrosion, se **Processrapporten för bränslet och kapseln** och vidare i avsnitt 14.4.3. Eftersom de restriktioner som satts för vatten- och luftinnehåll bedöms vara uppfyllda i referensutformningen anses det vara verifierat att det är motiverat att utesluta denna process.

F10 Radiolys av vatten

Allt det vatten som finns från början i kapseln, som mest 600 g enligt konstruktionsförutsättningarna, förväntas gå åt till att bilda salpetersyra eller korrodera segjärn (se ovan). Radiolys av vatten som tränger in i en otät kapsel kommer att leda till att oxidanter och väte bildas. Bidraget till vätebildningen är av

försumbar omfattning jämfört med vätebildning till följd av att segjärnsinsatsen korroderar och försummas därför, se **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Att det bildas oxidanter genom radiolys av vatten beaktas när det fastställs vilket intervall för bränsleupplösningshastighet som ska beaktas vid analysen.

I analysberäkningarna antas det att det använda bränslet är åtkomligt för inträngande grundvatten så fort kopparkapseln har penetrerats, och då tas ingen hänsyn till något transportmotstånd i kapselns inre. Dessa försiktiga antaganden täcker därför indirekt effekter av att det bildas vätgas som skulle påverka segjärnsinsatsen och bränsleelementen mekaniskt och bortser ifrån alla fördelaktiga effekter av vätgasbildning som skulle kunna motverka grundvatteninträngning. Dessa antaganden motiverar också att det lilla bidraget från radiolys av vatten till vätebildningen utesluts.

F15 Heliumbildning

Helium bildas i det använda bränslet som ett resultat av aktinidernas alfasönderfall. Detta skulle kunna leda till att ett tryck byggs upp inuti bränslestavarna, vilket i sin tur skulle kunna orsaka att stavarna bryts mekaniskt. Baserat på uppskattningar av den mängd helium som kan bildas, och med antagandet att allt bildat helium frigörs till kapselns inre, har tryckökningen i kapselns inre beräknats och konstaterats vara avsevärt lägre än trycket utanför kapseln. Grundat på detta resultat, som redovisas i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, försummas konsekvenserna av heliumbildning för kapselns mekaniska stabilitet. Det finns ingenting i den slutförda analysen av scenarier och risker som ger anledning att ifrågasätta detta, eftersom referensutformningen överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för bränslet och kapseln. Beträffande bränslestavarna är antagandet i analysberäkningarna att alla bryts sönder och därför inte erbjuder något motstånd mot frigörelse eller transport av radionuklider från bränslet när kapseln väl har penetrerats. När det gäller heliumbildningens inverkan på den mekaniska stabiliteten hos bränslematrisen och därmed spaltinventariet är slutsatsen i **Processrapporten för bränslet och kapseln** att det inte finns några skadliga effekter, men att osäkerheter kvarstår på denna punkt som har att göra med framtida bränslen med en potentiell högre utbränningsnivå än som hitintills framställts. Men som nämns ovan för den FEP som rubriceras *F7 Strukturell utveckling för bränslematrisen* görs bedömningen att den i analysberäkningarna försiktiga hanteringen av de omedelbart frigjorda fraktionerna från radionuklidinventariet, se avsnitt 13.5.2, täcker in återstående osäkerheter i detta avseende.

F16 Kemisk förändring av bränslematrisen

Kemisk förändring av bränslematrisen avser omvandling av urandioxidmatrisen genom bildningen av koffinit vid kontakt med silikatrikt grundvatten i en otät kapsel. Enligt **Processrapporten för bränslet och kapseln** kommer detta högst sannolikt att inträffa under en upplösnings- och återutfällningsprocess där radionuklider i bränslematrisen frigörs under upplösningen av urandioxid. Att i analysberäkningarna anta att upplösningshastigheten för urandioxid bestämmer frigörelsen av matrisbundna radionuklider bör vara rimligt även om denna process försummas.

14.4.3 Kapseln

Enligt tabell 7-3 utesluts följande kapselprocesser från analysen under delar av eller en hel glaciationscykel:

- C4 Deformation av kopparkapsel genom yttre tryck (otät kapsel).
- C5 Termisk expansion (både segjärnsinsats och kopparkapsel).
- C7 Strålpåverkan.
- C9 Galvanisk korrosion (otät kapsel).
- C10 Sprickbildning i segjärnsinsatsen genom spänningskorrosion.
- C12 Sprickbildning i kopparkapseln genom spänningskorrosion.
- C13 Jordströmmar – läckströmskorrosion.
- C14 Utfällning av salter på kapselytan.

C4 Deformation av kopparkapsel genom yttre tryck (otät kapsel)

Deformation av en otät kopparkapsel genom yttre tryck, som grundvattentryck och buffertens svälltryck, såväl som lasten vid skjuv rörelser i berget försummas i analysen. Analysresultaten visar

att ett kapselbrott på grund av korrosion kräver att det råder advektiva förhållande i bufferten, dvs att bufferten är eroderad. Därför görs pessimistiska antaganden i beräkningarna av dospåverkan från ett kapselbrott genom korrosion, vilket innebär att hänsyn inte tas till något transportmotstånd i den otäta kapseln, se avsnitt 13.5. I konsekvensanalyserna av kapselbrott till följd av skjuvlast, se avsnitt 13.6 görs samma pessimistiska antagande beträffande den otäta kapselns tillstånd, dvs att brottet är omfattande och därför inte motiverar att hänsyn tas till något transportmotstånd i kapseln. Därigenom täcker de antaganden som gjorts i konsekvensberäkningarna effekterna av all följande deformation av en otät kapsel genom yttre påverkan.

C5 Termisk expansion (både segjärnsinsatsen och kopparkapseln)

Denna process gäller effekterna av skillnader i värmeutvidgning av kopparkapseln och segjärnsinsatsen. Under temperaturminskningen i förvaret är krympningen av kopparkapseln större än den för järninsatsen, vilket orsakar dragspänningar i kopparn. Dessa effekter försummas, vilket grundas på beräkningar som redovisas i **Processrapporten för bränslet och kapseln** och som visar att förändringen i kopparns dragtöjning är obetydlig jämfört med kopparns krypduktilitet. Detta gäller vid temperaturer upp till den högsta temperatur som förväntas i kapselmaterialet som ges av konstruktionskriterierna för högsta temperatur i buffert och kapsel. Eftersom dessa konstruktionsförutsättningar anses vara uppfyllda i referensutformningen och även är verifierade i de termiska analyserna, se avsnitt 10.3.4, anses det som motiverat att utesluta dessa effekter.

C7 Strålpåverkan

Denna process avser förändrade materialegenskaper hos segjärnsinsatsen och kopparkapseln till följd av neutron- och gammastrålning från bränslet. För att undvika att bestrålning ger tilltagande hårdhet och försprödning av segjärnsinsatsen finns en konstruktionsförutsättning för den övre gränsen för Cu-innehåll i segjärnsinsatsen. Eftersom referensutformningen för kapseln med dess innehåll av bränsle överensstämmer med denna konstruktionsförutsättning betraktas det som motiverat att utesluta dessa effekter.

C9 Galvanisk korrosion (otät kapsel)

Denna process avser den galvaniska korrosionen av segjärnsinsatsen i en otät kopparkapsel. I **Processrapporten för bränslet och kapseln** dras slutsatsen att denna process inte behöver någon särskild behandling, eftersom påverkan av galvanisk korrosion under syrefria reducerande förhållanden ligger inom felmarginalerna för järninsatsens korrosionshastighet. Dessutom tas ingen hänsyn till att segjärnsinsatsen utgör en korrosionsbarriär eller bidrar till att hindra radionuklidutsläpp från en otät kapsel i analysen av scenarier och risker. Följaktligen anses det motiverat att utesluta särskild behandling av galvanisk korrosion av järninsatsen.

C10 Sprickbildning i segjärnsinsatsen genom spänningskorrosion

Sprickbildning i segjärnsinsatsen genom spänningskorrosion fordrar en kombination av statiska dragspänningar, korrosiv miljö och känslighet hos materialet. I **Processrapporten för bränslet och kapseln** betraktas sprickbildning genom spänningskorrosion som osannolik. Även om den inträffade skulle det inte få några följder för insatsens stabilitet. En korrosiv miljö kan uppstå genom radiolys av vatten och luft i kapseln. För att motverka detta finns det en fastslagen konstruktionsförutsättning om ett högsta innehåll av vatten (600 g) och luft (kväve) i kapseln, se avsnitt 14.4.2, process F9, samt avsnitt 5.3.1. Eftersom referensutformningen anses stämma med denna konstruktionsförutsättning betraktas det som motiverat att bortse från denna process.

C12 Sprickbildning genom spänningskorrosion, kopparkapsel

I **Processrapporten för bränslet och kapseln** görs bedömningen att sprickbildning i kopparkapseln genom spänningskorrosion saknar betydelse på grund av den kombinerade effekten av de mycket låga förväntade (om ens existerande) koncentrationerna av ämnen som främjar processen i fråga och den otillräckliga tillgången på oxidanter. De kemiska ämnen som främjar sprickbildning genom spänningskorrosion för koppar är nitrit-, ammonium- och acetatjoner. Inga ytterligare analyser av detta har gjorts i SR-Site.

C13 Jordströmmar – läckströmskorrosion

Enligt avsnitt 3.5.6 i **Processrapporten för bränslet och kapseln** kan effekten av naturliga jordströmmar på kapselkorrosionen försummas, eftersom det är osannolikt att potentialgradienter som är tillräckligt stora för att påverka kopparkorrosionen kan upprätthållas över deponeringshålet. Anledningen till detta är att det elektriska motståndet är lågt hos en fullständigt vattenmättad bentonitbuffert och i berget som omger deponeringshålet.

När det gäller den befintliga monopolära kabelförbindelsen för högspänd likström (HVDC) vid Forsmark, kan uppmätta gradienter för egenpotential användas för att uppskatta installationernas påverkan på kopparkapselkorrosion. Mätningar av egenpotentialen i öppna borrhål kan fungera som en representation för fallet då hela bufferten är fullständigt mättad, medan avtätade borrhål på samma sätt kan fungera som en representation för fallet med mindre mättad bentonit runt kapseln än ovanför och under. Den största potentialskillnaden över den fem meter långa kapseln uppskattas till ungefär 0,5 V i ett pessimistiskt fall, men ett mer realistiskt antagande är en typisk potentialskillnad över kapseln på cirka 0,05 V, som tillfälligt kan öka upp till 0,25 V. De nuvarande och möjliga framtida kabelinstallationerna kommer emellertid att finnas enbart under kort tid jämfört med den totala analys tiden för SR-Site.

Även vid förekomsten av ett yttre fält skulle kapselkorrosionen begränsas av tillgängligheten av olika komponenter i grundvattnet som bidrar antingen till katodreaktionen (syre), anodreaktionen (sulfid) eller av joner som orsakar sprickbildning genom spänningskorrosion (nitrit, ammonium, acetat). Katodreaktioner skulle också motverkas av eventuell närvaro av löst vätgas. Det externa fältet skulle därför inte öka graden av korrosion i analysen.

Jordströmmars effekt på kapselkorrosionen kan därmed bortses från i ett långtidsperspektiv med hänvisning till den diskussion som förs ovan. Inga analyser förutom dem som presenteras i **Processrapporten för bränslet och kapseln** ansågs nödvändiga i samband med denna fråga.

C14 Utfällning av salter på kapselytan

Enligt avsnitt 3.5.7 i **Processrapporten för bränslet och kapseln** är det möjligt att salter i bentoniten kan komma att omfördelas, anrikas och avsättas på kapselytan. De salter som kan vara av intresse är klorider och sulfater från grundvattnet och sulfater och karbonater från orenheterna i bentoniten. Av dessa är kloriderna de viktigaste, eftersom förekomsten av höga kloridkoncentrationer kan ha en effekt på koppars korrosionsegenskaper. Sulfat- och karbonatavsättningar är inte elektriskt ledande så de förväntas inte öka risken för gropfrätning. En ökning i kloridkoncentrationen skulle emellertid sänka koppars känslighet för gropfrätning, eftersom den skulle gynna allmän korrosion /King et al. 2010/.

Avsnitt 12.6 visar att grundvattnets pH alltid förväntas vara något alkaliskt. Det vatten som når kapseln kommer att påverkas av reaktioner med bentonit, men pH skulle inte komma att gå under 6, inte ens vid ett pH på 6 i grundvattnet, se avsnitt 10.3.10. Kloridkoncentrationen skulle därför inte förändras i någon stor utsträckning. En hög kloridkoncentration kommer följaktligen inte att leda till ökad allmän korrosion. Korrosionens omfattning kommer att bestämmas av mängden tillgängligt syre (och sulfid). Processen kan alltså försummas.

14.4.4 Bufferten

Enligt tabell 7-4 utesluts följande buffertprocesser från analysen under delar av eller en hel glaciationscykel:

- Bu1 Strålningsdämpning och värmealstring (intakt kapsel).
- Bu3 Frysning (återmättnad/period med förhöjd temperatur, intakt kapsel).
- Bu6 Gastransport och upplösning (transport av gasfas) (intakt kapsel).
- Bu9 Flyttillstånd (intakt kapsel).
- Bu17 Interaktion mellan järn och bentonit (återmättnad/period med förhöjd temperatur, intakt kapsel).
- Bu19 Strålningsinducerade omvandlingar (intakt kapsel).
- Bu20 Radiolys av porvatten (intakt kapsel).
- Bu21 Mikrobiella processer (omättade förhållanden och intakt kapsel).

För bygg- och driftskedet försummas dessutom processer som är relaterade till radionuklidtransport, exempelvis diffusion, sorption, speciering och kolloidtransport, utifrån antagandet att det inte inträffar något kapselbrott under denna period. Detta bekräftas av analyserna av referensutvecklingen för bygg- och driftskedet som de sammanfattas i avsnitt 10.2.7.

Bu1 Strålningsdämpning och värmealstring (intakt kapsel)

Strålningsdämpningen och den resulterande värmealstringen i bufferten försummas i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**, eftersom kvantifieringar har visat att doshastigheten från en intakt kapsel är för låg för att ha någon betydelse för buffertens egenskaper (se processerna Bu19 och Bu20 nedan). Detta är åtminstone sant om doshastigheten är under 1 Gy/h, vilket är den gräns som fastställts som en konstruktionsförutsättning, se avsnitt 5.4.1. Vidare är den högsta erhållna stråldoshastighet som konstateras i **Bränslerapporten** 0,18 Gy/h. Därför anses det berättigat att bortse från denna process.

Bu3 Frysning (återmättnad/period med förhöjd temperatur, intakt kapsel)

Frysning av bufferten är utesluten under återmättnadsfasen och perioden med förhöjd temperatur eftersom detta kräver en temperatur på -4 °C på förvarsdjupet, vilket inte kommer att förekomma under detta stadium av förvarsutvecklingen (eller något senare stadium).

Bu6 Gastransport och upplösning (intakt kapsel)

Som beskrivs i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** förväntas det att all förekommande gas i bufferten runt en intakt kapsel upplöses i buffertens porvatten. Luft som finns innesluten i bufferten under återmättnaden av bufferten beaktas i THM-modellering av återmättnadsfasen. Så länge kopparkapseln är intakt uppträder inga processer i kapseln eller bufferten som förväntas bilda sådana gasmängder att lösligheten för gasen i buffertens porvatten överskrids. Radiolys av porvatten i bufferten kan ge väte och syre, men strålningsnivån utanför kapseln är för låg för att denna process ska kunna generera avsevärda mängder, se Bu20 nedan. Dessutom förväntas det att oxidanter förbrukas genom kopparkorrosion. Mikrobiella processer kan också leda till att det bildas olika gaser, men så länge det höga svälltrycket i bufferten upprätthålls förväntas den mikrobiella aktiviteten i bufferten vara låg.

Bu9 Flyttillstånd

En process som skulle kunna påverka kapseln i hög grad är att bufferten övergår i flyttillstånd. Enligt **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** är detta en process som innebär att ett fast material (exempelvis jord) övergår till "vätska" på grund av en kortvarig effekt, se exempelvis i /Lambe och Whitman 1969/. Det kan ske i en lös sand när porvattentrycket ökar, antingen på grund av en vibration som gör att sandkornen flyter i porvattnet (eftersom de strävar efter att övergå till en högre grad av kompaktering men vattnet tillfälligtvis förhindrar detta) eller på grund av ett starkt uppåtriktat vattenflöde som frigör den effektiva spänningen mellan partiklarna (kvicksand). Det kan också ske i lera som har avsatts i salthaltigt vatten (bildande en öppen struktur med hög vattenkvot). Om saltet delvis tvättas ur av sötvatten kan lerstrukturen inte hålla den stora mängden vatten när den formas till block eller utsätts för vibrationer, vilket betyder att strukturen kollapsar när den utsätts för vibrationer.

Dessa två typer av flyttillstånd kan inte äga rum i en bentonit med hög densitet, eftersom den effektiva spänning som håller samman leran är hög på grund av svälltrycket. Denna slutsats drogs också av /Pusch 2000/. Ett liknande fenomen har emellertid observerats under kompaktering av bentonitblock med mycket höga vattenkvoter. Om bentoniten kompakteras vid mycket hög spänning till ett tillstånd där bentoniten är helt och hållet vattenmättad, kommer alla ytterligare spänningsökningar att tas upp av vattnet och bentoniten uppför sig som en vätska. Detta fenomen har observerats under enaxlig kompaktering då flytande bentonit har sprutat ut från formen för blocktillverkningen.

Denna process fordrar en mycket stark tryckpåverkan och är ganska osannolik i ett deponeringshål. Den kan förmodligen bara uppstå vid ett jordskalv och kräver att deponeringshålets volym minskar till följd av ökad bergspänning. En kombination av faktorer kan leda till en ökning i bergspänningen av cirka 15 MPa /Bäckblom et al. 2004/. Enligt Kirsch /Brady och Brown 1994/ som gjort en uppskattning av sammanpressningen av ett deponeringshål vid en sådan ökning av bergspänningen resulterar detta i att hålet pressas samman cirka 1 mm. Det är inte tillräckligt för att uppnå flyttillstånd.

Varken jordskalv eller höga hydrostatiska tryck under en glacial händelse förväntas minska den effektiva spänningen i bufferten tillräckligt för att orsaka flyttillstånd, se också avsnitt 10.4.8.

Bu17 Interaktion mellan järn och bentonit

Reaktioner mellan metalliskt järn och montmorillonit i bufferten kan leda till nedbrytning av montmorillonitstrukturen. Så länge kopparkapseln är intakt kommer inte järninsatsen i kontakt med bentonitbufferten. Dessutom kräver buffertens installationsprocess att deponeringshålet rengörs innan bentonitblock och pelletar placeras i hålet, se avsnitt 5.4.3 i **Produktionsrapporten för bufferten**. Det bedöms därför vara motiverat att försumma denna process för intakta kopparkapslar.

Analysen av scenarier och risker visar att kapselbrott till följd av korrosion av kopparkapseln kräver att advektiva förhållanden råder i bufferten. I det fallet har den efterföljande kontakten mellan järninsatsen och bufferten inte längre någon betydelse, eftersom diffusionsbarriären redan förlorats. Om ett kapselbrott inträffar på grund av skjuvrörelser i en spricka som skär deponeringshålet fortsätter ändå bufferten som omger sprickan att vara en diffusionsbarriär vid tidpunkten för skjuvbrottet. Analysen av en kombination av skjuvlast- och korrosionsscenarierna, se avsnitt 13.6, visar emellertid att både fördröjningen i bufferten och den begränsade lösligheten för den dosdominanta nukliden Ra-226, vilket fordrar en intakt buffert, är av begränsad betydelse för resultatet. En förlust av bufferten som diffusionsbarriär efter ett skjuvbrott för kapseln är därför inte avgörande för dospåverkan. Att utesluta en särskild analys av följderna av interaktion mellan järn och bentonit anses därmed som motiverat.

Bu19 Strålningsinducerade omvandlingar

Denna process avser den direkta nedbrytningen av montmorillonit i bufferten genom strålning från det använda bränslet i kapseln. Processen försummas för intakta kapslar i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**, baserat på försöksresultat som inte visar någon effekt för absorberade doshastigheten från γ -strålning klart över 1 Gy/h. Så länge kopparkapseln är intakt kommer följaktligen konstruktionskravet på 1 Gy/h på kapselytan att säkerställa att doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ha någon effekt på buffertens egenskaper.

Om en kapsel går sönder kan radionuklider som frigörs från kapseln och sorberas i bufferten exponera montmorilloniten i bufferten för α -strålning. Baserat på resultat från radionuklidberäkningar för säkerhetsanalysen SR 97 /SKB 1999a / avseende koncentrationen av α -emitterare i bufferten och den totala dos som de vid ett tidigt kapselbrott skulle ge upphov till under en miljon år, är slutsatsen i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** att konsekvenserna är försumbara. Med hänsyn till att detta är resultat som gäller för ett tidigt kapselbrott som inte förväntas inträffa, och att det finns en stor marginal till de absorberade doshastigheter där påverkan på bufferten sker, motiverar dessa resultat att processen försummas. Dessutom innebär ett kapselbrott i SR-Site till följd av korrosion att advektiva förhållanden uppstår i bufferten innan detta inträffar och att ingen hänsyn tas till fördröjning i bufferten i analysberäkningarna. Konsekvenser av strålningsinducerade förändringar av buffertens egenskaper efter kapselbrott genom korrosion saknar därför betydelse. Av samma skäl som anges ovan för de potentiella följderna av interaktioner mellan järn och bentonit (se Bu17) gäller denna slutsats även för kapselbrott till följd av skjuvrörelser i en spricka som skär deponeringshålet.

Bu20 Radiolys av porvatten

Radiolys av porvatten i bufferten på grund av γ -strålning som tränger igenom kapseln leder till bildning av oxidanter och väte. Denna process är av primärt intresse för kopparkapselns korrosion och försummas i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** såväl som i **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Detta grundas på en uppskattning av den maximalt möjliga mängd av oxiderad koppar som kan bildas innan γ -doshastigheten väsentligt avtagit och på tillgänglig experimentell information som inte ger några belegg för att korrosionshastigheten ökas av γ -strålning, se avsnitt 10.3.13.

Bu21 Mikrobiella processer (omättade förhållanden)

Mikrobiella processer försummas under den initiala perioden med omättade förhållanden i bufferten. Anledningen till detta är att omfattningen av reaktioner i vattenlösning är begränsad under denna period, se **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Detta bestyrks

yttre i avsnitt 10.3.13, underrubrik ”Korrosion under ofullständigt mättade förhållanden”. Även om slutsatsen är att det under den omättade fasen inte går att utesluta mer gynnsamma förhållanden för mikrobiell aktivitet, är även tider i storleksordningen några tusentals år fram till uppnådd mättnad korta i analysens tidsperspektiv. Vidare kan bara begränsade mängder av sulfid som möjligen bildas i återfyllningen nå kapseln på grund av den begränsade transportkapaciteten som skulle vara lägre i den omättade bufferten än i den mättade. Perioden med delvis omättade förhållanden kommer därför inte att öka den största mängd av sulfid som når kapseln. Korrosionsprocesser som begränsas av massbalanser för korrosiva ämnen får inget tillskott genom att mättnadsförhållandena förändras.

14.4.5 Återfyllningen

Enligt tabell 7-5 utesluts följande återfyllningsprocesser från analysen under delar av eller en hel glaciationscykel:

- BfT2 Frysning (återmättnad/period med förhöjd temperatur, intakt kapsel).
- BfT5 Gastransport och upplösning (långsiktig för intakt kapsel, otät kapsel).
- BfT8 Flyttillstånd.
- BfT10 Diffusiv transport av lösta ämnen (tidigt skede, intakt kapsel).
- BfT11 Sorption (inklusive jonbyte) (tidigt skede, intakt kapsel).
- BfT13 Speciering och reaktioner i vattenlösning (tidigt skede, intakt kapsel).
- BfT17 Strålningsinducerade omvandlingar.

För bygg- och driftskedet försummas dessutom processer som är relaterade till radionuklidtransport, exempelvis diffusion, sorption, speciering och kolloidtransport, utifrån antagandet att det inte inträffar något kapselbrott under denna period. Detta bekräftas av analyserna av referensutvecklingen för bygg- och driftskedet som de sammanfattas i avsnitt 10.3.7.

BfT2 Frysning (återmättnad/period med förhöjd temperatur, intakt kapsel)

Frysning av återfyllningen i deponeringstunnlarna är utesluten under återmättnadsfasen och under perioden med förhöjd temperatur, eftersom detta kräver en temperatur som är lägre än -2 °C på förvarsdjupet, vilket inte kommer att förekomma under detta stadium av förvarsutvecklingen (eller något senare stadium).

BfT5 Gastransport och upplösning (långsiktigt för intakt kapsel, otät kapsel)

Korrosion av segjärnsinsatsen i en otät kapsel skulle leda till bildning av vätgas. Denna gas skulle kunna läcka ut genom återfyllningen i deponeringstunneln ovanför den otäta kapseln, liksom även radionuklider i den från kapseln utsläppta gasfasen skulle kunna göra. Denna transportväg för gas försummas i analysen eftersom inverkan på de mättade förhållandena i återfyllningen bedöms som liten enligt avsnitt 4.2.3 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Dessutom antas en omedelbar överföring av radionukliderna i gasfasen till biosfären efter gasens genombrott i bentoniten. Varken bufferten eller geosfären förväntas avsevärt fördröja transporten till biosfären. Det är dessutom inte säkert att den gas som bildas genom korrosion av järninsatsen kommer att nå tunneln. En alternativ utströmningsväg är genom sprickor i berget som skär deponeringshålet. Detta hör ihop med FEP Ge4 och diskuteras ytterligare i avsnitt 14.4.6.

BfT8 Flyttillstånd

Flyttillstånd i återfyllningen försummas utifrån samma argument som för bufferten, se avsnitt 14.4.4, underrubrik ”*Bu9 Flyttillstånd*”.

BfT10 Diffusiv transport av lösta ämnen (tidigt skede, intakt kapsel)

I **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** anses diffusion under perioden innan återfyllningen är vattenmättad vara försumbar, eftersom advektion är den dominerande processen under återmättnad. Processen beaktas emellertid i de kopplade hydrogeokemiska analyser som redovisas av /Sena et al. 2010/.

BfT11 Sorption (inklusive jonbyte) (tidigt skede, intakt kapsel)

Argumentet i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** för att försumma sorption före vattenmättnad är att det inte finns några tillgängliga kontinuerliga vattenvägar innan återfyllningen vattenmätts. Processen beaktas emellertid i de kopplade hydrogeokemiska analyser som redovisas av /Sena et al. 2010/.

BfT13 Speciering och reaktioner i vattenlösning (tidigt stadium, intakt kapsel)

Speciering och reaktioner i vattenlösning för perioden före vattenmättnad anses kunna försummas eftersom de geokemiska processerna förväntas vara desamma före och efter mättnad, se **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Förbrukningen av syre genom reaktioner med mineraler i återfyllningen beaktas emellertid också för återmättnadsperioden av /Sena et al. 2010/, i enlighet med diskussionen i avsnitt 10.2.5.

BfT17 Strålningsinducerade omvandlingar

Strålningsinducerade omvandlingar av återfyllningen anses i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** vara försumbara eftersom doshastigheten i återfyllningen är för låg för att ha någon effekt. Eftersom doshastigheten i bufferten är för låg för att ha någon effekt när konstruktionsförutsättningen för maximal doshastighet på kapselytan uppfylls, se avsnitt 14.4.4 (FEP Bu19) anses det verifierat att också doshastigheten i återfyllningen, som är mer avskärmad än bufferten, är för låg för att ha någon effekt.

14.4.6 Geosfären

Enligt tabell 7-6 utesluts följande geosfärsprocesser från analysen under delar av eller en hel glaciationscykel:

- Ge1 Värmetransport (bygg- och driftskedet).
- Ge4 Gasflöde/upplösning.
- Ge6 Reaktivering – förskjutning längs med befintliga diskontinuiteter (bygg- och driftskedet).
- Ge8 Kryp.
- Ge10 Erosion/sedimentation i sprickor.
- Ge14 Reaktioner grundvatten/bergmatris (bygg- och driftskedet, tempererat och periglacialt klimattillstånd).
- Ge18 Kolloidprocesser.
- Ge20 Bildning av metanis.
- Ge22 Strålningspåverkan (berg och injektering).
- Ge23 Jordströmmar.

För bygg- och driftskedet försummas dessutom processer som är relaterade till radionuklidtransport, exempelvis diffusion, sorption och speciering, utifrån antagandet att det inte inträffar något kapselbrott under denna period. Detta bekräftas av analyserna av referensutvecklingen för bygg- och driftskedet som de sammanfattas i avsnitt 10.2.7.

Ge1 Värmetransport (bygg- och driftskedet)

Enligt avsnitt 2.17 i **Processrapporten för geosfären**, bortses i den termiska dimensioneringen av förvaret från värmetransport i berget under bygg- och driftskedet i den meningen att alla kapslar antas bli deponerade samtidigt. Detta baseras på beräkningar som visar att den högsta temperaturen i bufferten, vilket är den aspekt som spelar roll för säkerheten (säkerhetsfunktionsindikator Buff4), underskattas med mindre än 0,2 °C om man antar samtidig kapseldeponering, jämfört med fallet då kapslar deponeras i viss ordning (dvs sektion för sektion) med en takt av två eller fyra dagar per kapsel, se avsnitt 10.2.1 och /Hökmark et al. 2009/. Enligt avsnitt 10.2.1 finns det emellertid deponeringsföljder för vilka denna förenkling inte är tillämpbar, men dessa kan undvikas genom adekvat

styrning av deponeringsordningen. Därför bedöms det som verifierat att det är berättigat att försumma deponeringsföljden vid utvärderingen av värmetransport och den högsta temperaturen i bufferten.

Alla relevanta kopplingar till andra processer beaktas, eftersom behandlingen av värmetransport under bygg- och driftskedet förenklar deponeringsföljden snarare än utesluter processen.

Ge4 Gasflöde och upplösning

Under förvarets drift före förslutning kan det enligt **Processrapporten för geosfären** komma att uppstå ett omättat område i närheten av tunnarna och en omättad zon ovanför förvaret. Dessa omättade zoner har emellertid enbart en marginell effekt på inflödena till tunnarna. Därför försummas detaljer avseende gasflöde och upplösning under bygg- och driftskedet, och effekten av gasflöde tas i beaktande på ett förenklat sätt i beräkningarna av tunnarnas återmättnad efter förvarets förslutning.

När det gäller gas som genereras i förvaret är huvudkällan väte som bildas i samband med anaerob korrosion av segjärnsinsatsen i en otät kapsel. Beräkningar utförda för SR-Can av /Hartley et al. 2006/ visade att gas som bildas i förvaret och släpps ut genom bufferten snabbt kan strömma ut genom geosfären utan att orsaka tryckuppbyggnad. Utgående från detta resultat och den lilla skillnaden i berggrundsegenskaper mellan de hydrogeologiska modellerna i SR-Can och SR-Site, försummas inverkan på geosfärens prestanda i **Processrapporten för geosfären**. Betydande lokal gasbildning i förvaret innebär att ett kapselbrott har skett så att korrosion av järninsatsen kan förekomma. Analysen visar att kapselbrott genom korrosion kräver advektiva förhållanden i bufferten, vilket i sin tur innebär att deponeringshålet skärs av en högtransmissiv spricka. Eftersom det inte finns någon buffert för att innesluta gasen kommer bildat väte att lösas och transporteras iväg med vatten som rinner i sprickan som skär deponeringshålet. Detta ger stöd för att försumma inverkan av gasflöde när korrosion lett till kapselbrott.

I fallet med kapselbrott till följd av skjuvrörelser tjänar bufferten fortfarande som barriär och det krävs att gastrycket byggs upp innanför bufferten innan gas släpps ut i geosfären. I analysen beaktas detta scenario med uppbyggnad av gastryck innanför bufferten för att analysera doskonsekvenserna för utsläpp av radionuklider i gasfas, se avsnitt 13.8. Eftersom det inte kan uteslutas att den spricka som orsakar kapselns skjuvbrott är transmissiv – eller blir transmissiv efter skjuvrörelsen – tas ingen hänsyn till retention av radionuklider i geosfären vid analysen av doskonsekvenser i scenariot för skjuvbrott eller i scenariot för utsläpp av radionuklider i gasfas, se avsnitten 13.6 respektive 13.8. All potentiell inverkan på dospåverkan från uppbyggnaden av ett gastryck eller av ett gasflöde i geosfären täcks därmed indirekt in av de utförda analyserna och det finns inget behov av någon särskild behandling av denna process.

Ge6 Reaktivering – förskjutning längs med befintliga diskontinuiteter (byggskedet)

Seismicitet orsakad av byggverksamhet försummas baserat på en analys i **Processrapporten för geosfären**. Där dras slutsatsen att det krävs att byggverksamheten framkallar ett jordskalv med en magnitud på ungefär 5 för att en förkastning ska förskjutas mer än 0,05 m. För att hysa ett sådant jordskalv måste strukturen ha ett skadeområde som är större än en kvadratkilometer. Det är osannolikt att en sådan struktur skulle förbli oupptäckt efter tunnelkartering, vilket betyder att det är möjligt att undvika strukturen under deponeringen. Det finns heller inga belägg för att nutida deviatorspänningar på förvarsdjup i svensk berggrund räcker till för att orsaka seismiska händelser med en magnitud på 5. Dessutom har de största seismiska händelser som registrerats i mycket djupa gruvor i Sydafrika, där spänningarna är stora och där utsprängningen sker mycket snabbare än i slutförvaret, haft en magnitud som understiger 5. Mot bakgrund av den slutförda analysen av scenarier och risker finns det ingen anledning att modifiera denna slutsats.

Ge8 Kryp

Kryp längs sprickor och i intakt berg försummas i **Processrapporten för geosfären** och diskuteras också i avsnitt 10.3.5. När det gäller sprickorna i Forsmark är förskjutningar genom kryp sannolikt utan betydelse jämfört med förskjutningar orsakade av de direkta förändringar i last och portryck som beräknats för de olika skedena under analysperioden. Beträffande kryp i intakt berg är den slutsats som dras i **Processrapporten för geosfären** att den kräver spänningar som bara kommer att finnas i små volymer av berget kring öppningarnas väggar. Dessa effekter tas med vid analysen av termiskt inducerad spjälkning. Därför är bedömningen att det är berättigat att försumma denna process.

Dessa slutsatser stöds ytterligare av den analys som presenterades i avsnitt 10.3.5. En nyligen genomförd studie av /Damjanac och Fairhurst 2010/, som undersökte om det finns en nedre gräns för den långsiktiga hållfastheten hos berg, visar att det alltid finns en spänningströskel för inspända förhållanden, eftersom dessa verkar för att undertrycka de dragspänningar som är förknippade med spricktillväxt. Om spjälkning inträffar så att det bildas ett kilformat utfall orsakar möjligen den spänningsjustering som kan inträffa vid kilens spets ytterligare tidsberoende deformationer/krypdeformationer. Observationer av den ej inspända öppna kilen i APSE-experimentet visade att de flesta av de nya förskjutningarna inträffade i den befintliga kilen /Andersson 2007/. När den spjälkade kilen är inspänd förväntas alla tidsberoende deformationer vara utan betydelse jämfört med de deformationer som formade kilen. Det är också värt att notera att effekterna av sprickkryp, uttryckta som förskjutning av sprickor under konstant skjuvlast på grund av tidsberoende hållfasthetsegenskaper hos materialet, kan uppskattas genom att använda det angreppssätt för modellering av sprickreaktivering som beskrivs i /Hökmark et al. 2010/. Även om hållfastheten går ner till noll över hela sprickplanet skulle endast mycket små sprickförskjutningar äga rum. Krypdeformation och relaterade frågor som ”underkritisk spricktillväxt” beaktas därför inte ytterligare i SR-Site.

Ge10 Erosion/sedimentation i sprickor

Erosion och sedimentation i sprickor försummas under bygg- och driftskedet, eftersom sprickor i förvarsberget som uppvisar en hög transmissivitet kommer att injekteras och flödes hastigheterna i de icke injekterade sprickorna förväntas vara för låga för att förorsaka erosion av någon betydelse. Efter det att förvaret förslutits kommer de hydrauliska gradienterna under den tempererade perioden att vara så små att risken för att det uppstår erosion är försumbar. När en inlandsis avancerar eller retirerar och kommer den hydrauliska gradienten att öka dramatiskt men skjuvspänningarna kommer fortfarande att vara små.

Som konstateras i avsnitt 10.4.8 fann /Birgersson et al. 2009/ att skjuvhållfastheten hos MX-80 vid en vattenkvot på 100 ($\phi=0,0037$) för en natriumkoncentration på 10 och 100 mM är större än 5 Pa. Den hydrogeologiska modelleringen av fallet med den ”växande isfronten” i SR-site visar att de beräknade skjuvspänningarna alltid är under 5 Pa och under större delen av tiden mycket mindre. Det går alltså att dra slutsatsen att förlusten av bentonit genom skjuvning av korn går att bortse från när det gäller alla rimliga förhållanden.

Ge14 Reaktioner grundvatten/bergmatris

Kemiska reaktioner mellan grundvatten och mineraler i bergmatrisen försummas i **Processrapporten för geosfären**, eftersom bedömningen är att de inte orsakar väsentliga förändringar i grundvattensammansättning eller matrisporositet under hela den tidsperiod då förvarets funktion måste beaktas. Reaktioner mellan grundvatten och sprickmineraler förväntas orsaka de effekter som i första hand är intressanta. Denna ståndpunkt baseras på observationer av borrhärnor från förvarsvolymen vid Forsmark vilka visar mycket liten förändring av den bergmatris som omger sprickor, se också avsnitt 4.4.4. Dessa observationer gör det berättigat att försumma reaktioner mellan grundvatten och bergmatris i jämförelse med reaktioner mellan grundvatten och sprickmineraler.

Ge18 Kolloidprocesser

I **Processrapporten för geosfären** är bedömningen att inverkan av kolloider på geosfärens geokemiska förhållanden är försumbar. Kolloider kan emellertid uppträda som bärare av radionuklider. Det är dessutom värt att notera att de nuvarande salthalterna i Forsmarks grundvatten är högre än den som krävs för att hålla koncentrationen av suspenderade kolloider i grundvattnet på låg nivå. Under bygg- och driftskedet kan det bildas avsevärda mängder kolloider, men kolloidkoncentrationerna kommer snabbt att återgå till naturliga värden under de salthaltiga vattenförhållanden som man kan räkna med återuppstår, se också avsnitt 10.2.5. Eftersom analysen visar att inga kapselbrott inträffar under denna period bedöms det som berättigat att bortse från kolloidprocesser under bygg- och driftskedet.

Ge20 Bildning av metanis

Potentialen för bildning av metanis under periglaciala förhållanden vid Forsmark försummas i avsnitt 5.11 i **Processrapporten för geosfären**, baserat på en modellsimulering. Slutsatsen från studien är att bildning av metanis är osannolik vid de metankoncentrationer och salthalter i vatten som rapporteras för Forsmark. Denna slutsats förs också fram i avsnitt 10.4.7, där uppskattningar av maximiflöden och bildning av metan används som stöd för slutsatsen. Bedömningen är följaktligen att det är berättigat att försumma denna process.

Ge22 Strålningspåverkan (berg och injektering)

Strålnings effekter på strukturstödande material avfärdas i **Processrapporten för geosfären** baserat på rön från Yucca Mountain-projektet. Enligt avsnitt 5.13.4 i **Processrapporten för geosfären** har det inte observerats någon försämring av cements mekaniska egenskaper enbart på grund av bestrålning. Observationen gjordes vid en så hög neutronpartikelfluens som $8,2 \cdot 10^{19}$ n/cm². Ingen förändring i dimension, vikt, tryckhållfasthet, böjhållfasthet eller elasticitetsmodul (Youngs modul) kunde iakttagas för cementpasta. Denna neutronpartikelfluens kan jämföras med den högsta gällande initiala stråldoshastighet som anges i **Bränslerapporten** och som sammanfattas i avsnitt 5.3.4. Maximiflödet avser ett PWR-element med en utbränning motsvarande 42,2 MWd/kgU efter 34,1 år, och enligt specifikationerna för typkapslarna är den initiala styrkan hos neutronkällan $1,2 \cdot 10^8$ /s. Om man antar att hela detta flöde koncentreras inom 1 cm², utan att ta hänsyn till radioaktivt sönderfall och dämpningen på grund av vattnet i bentoniten och berget, skulle det ta i storleksordningen 10^{11} sekunder, dvs några tusentals år, att uppnå dessa höga fluensnivåer. I verkligheten kommer neutronpartikelflödet att vara spritt, minska på grund av radioaktivt sönderfall och också absorberas, vilket innebär att det är klart berättigat att försumma processen.

Ge23 Jordströmmar

Inverkan av jordströmmar, som framkallats både naturligt och antropogent, försummas i **Processrapporten för geosfären** eftersom de förväntade elektriska potentialfälten är för små för att påverka grundvattenflödet eller transporten av lösta ämnen. Det finns ett antal anledningar till den slutsatsen. De viktigaste är att fälten av geometriska skäl vanligen är eller blir svaga på försvarsnivå och att de flesta av fälten är växlande och effekterna därför reversibla. Mot bakgrund av den slutförda analysen av scenarier och risker finns det inget som ifrågasätter att denna inverkan av jordströmmar försummas, se även avsnitt 14.4.3, underavsnittet ”C13 Jordströmmar – läckströmskorrosion”.

14.5 En kort redovisning av tidsperioden bortom en miljon år

För tidsperioden bortom en miljon år behövs ingen riskberäkning. Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd till SSMFS 2008:21 antyder att en redovisning av utvecklingen av radiotoxicitet möjligen är det enda meningsfulla sättet att belysa den framtida utvecklingen av förvaret. En sådan redovisning ges i figur 2-1 i avsnitt 2.4. Av figuren framgår att det använda kärnbränslets radiotoxicitet minskar något mellan en miljon år och 10 miljoner år. Radiotoxiciteten förblir sedan konstant under en mycket lång tidsperiod bortom 10 miljoner år. Här följer en kort kvalitativ diskussion om förvaringsplatsens utveckling för tidsperioden bortom en miljon år. Diskussionen grundar sig i huvudsak på allmänna tektoniska överväganden och indikationer från naturliga analogier.

Tektonik

Även om geologiska processer i allmänhet är långsamma, är utvecklingen av förvaringsplatsen över en period som är längre än en miljon år svår att förutsäga. Analysen i exempelvis avsnitt 10.4.5, som gäller jordskalv, kan inte utsträckas till längre tidsskeden utan att hänsyn tas till ytterligare effekter som ligger utanför ramarna för SR-Site. Även om det till exempel kan antas att den fennoskandiska skölden kommer att förbli en tektoniskt stabil sköld där de flesta deformationerna finns i dess utkanter, kan det inte antas att mönster och egenskaper hos deformationszonerna och sprickorna inom förvaringsområdet kommer att vara tillräckligt konstanta över detta tidsskede för att göra det möjligt att analysera risken för jordskalv. Jordytan på förvaringsplatsen kan förväntas genomgå väsentlig denudation, men tillfälligtvis även belastas med en okänd mängd sediment från denudation av bergskedjor. Detta ger mekaniska, termiska och kemiska effekter som skulle kunna överstiga effekterna av upprepade nedisningar.

Å andra sidan bildades berget och de plastiska och de spröda deformationszonerna i Forsmark för minst en miljard år sedan och har sedan dess övertäckts flera gånger, både av sediment och av inlandsisar. Effekterna av sådana händelser har undersökts utförligt under platsundersökningarna. Det förefaller som om mönstret av deformationszoner, som lokaliserat skjuvrörelser i olika riktningar, har förblivit någorlunda konstant under mer än 10 miljoner år. Det är därför rimligt att anta att väsentligen samma deformationszoner kommer att fungera som svaghetsplan och därmed möjliggöra att ackumulerad spänning frigörs på nästan samma sätt som under de senaste omkring 10 miljoner åren. Det är också rimligt att anta att spricktätheten kommer att öka. Dock uppnås en okänd nivå av sprickmättnad, bortom vilken reaktivering av existerande sprickor i den spröda övre delen av jordskorpan kommer att dominera kraftigt över fragmentering (bildning av nya sprickor). Eftersom fördelningen av sprickstorlekar tenderar att följa potenslagar kommer sprickor som kan skjuvas mer än 5 cm fortfarande att vara sällsynta, även om både spricktätheten och den genomsnittliga sprickstorleken ökar.

Kvalitativ diskussion om kapselbrott och utsläpp

Av ovanstående framgår att sannolikheten för att en spricka med potential för förskjutningar som överstiger 5 cm skär ett enskilt deponeringshål kommer att förbli låg, till och med under tidsperioder bortom en miljon år. Detta tyder på att omfattningen av kapselbrott till följd av skjuvlast skulle vara begränsad, även i ett perspektiv på tio miljoner år.

På samma sätt gäller att om geokemiska förhållanden och flödesförhållanden, medelvärdesberäknade över mycket långa tidsperioder, liknar de nuvarande skulle omfattningen av kapselbrott till följd av korrosion vara begränsad till några få kapselbrott, jämfört med exempelvis i medeltal 0,12 efter en miljon år för den centrala korrosionsvarianten, se avsnitt 12.6.2.

Det är också värt att notera att radioaktivt sönderfall har mindre betydelse för utvecklingen av utsläppskurvor bortom en miljon år, eftersom de dosdominerande nukliderna, särskilt modernukliderna till Ra-226, är mycket långlivade. Kopplat till detta är också att den vetenskapliga förståelsen av bränsleupplösningsprocessen antyder att bränslematrisen hos det använda bränslet har en livslängd på flera miljoner år i förvarsmiljön, se avsnitt 13.5.5.

Slutligen är det också värt att notera att det hypotetiska fallet i avsnitt 13.7.3, där alla kapslar uppvisar brott och bufferten saknas samt retentionen i berget bortses ifrån, resulterar i utsläpp som efter en miljon år motsvarar doskonsekvenser jämförbara med den naturliga bakgrundsstrålningen. Utsläppen styrs i det fallet av flödet på förvarsdjup och radionuklidinventariet, varvid det senare minskar med tiden.

Indikationer från naturliga analogier

För tiden bortom en miljon år från nu kommer det använda kärnbränslets radiotoxicitet att vara jämförbar med en rik uranfyndighet, vilket anges i figur 2-1, se avsnitt 2.4. Utvecklingen av de tekniska barriärerna blir allt mer osäker efter en miljon år. I den fortsatta diskussionen om utvecklingen av förvaret under tiden bortom en miljon år kan emellertid befintliga kunskaper om naturliga uranmalmer och urankemi i geologiska miljöer utnyttjas.

Ett obesträtt faktum, som framkommit från geologiska observationer, är att det finns uranmalmer som är många miljoner år och till och med miljarder år gamla. Undersökningar av till exempel Cigar Lake i Kanada visar en uranmalmskropp som har påträffats på ett djup på 450 m och som har bestått under 1 300 miljoner år, se exempelvis /Ruiz López et al. 2004, Miller et al. 2000/. Det finns för närvarande inte några geokemiska spår på ytan av uranmalmskroppen i Cigar Lake, vilket tyder på att en reducerande uranrik miljö med låg hydraulisk genomsläpplighet kan hålla kvar huvuddelen av de grundämnen som är associerade med malmen under en tidsperiod som med god marginal överskrider en miljon år.

Uranmalmsrika fickor i Oklo (Gabon) uppnådde en kritisk massa för nästan två miljarder år sedan. Det ”använda kärnbränsle” som bildades naturligt vid denna kriticitet har i stor utsträckning kvarhållits i fyndigheten under de nästan två miljarder år som gått sedan dess /Gauthier-Lafaye et al. 1996/. Detta kan dels förklaras av den reducerande miljön i Oklo, dels av områdets relativt stabila geologiska förhållanden. Det har dock förekommit viss tektonisk aktivitet i Oklo. För cirka 860 miljoner år sedan, till exempel, utsattes området för en regional extension som förorsakade intrusion av magma, rik på magnesium och järn, i den sedimentära bassäng som hyser uranmalmen. Magman svalnade och stelnade och kan nu ses som ett nätverk av diabasgångar i området. Det har konstaterats

att en av dessa diabasgångar, cirka 20 m bred, skär tvärs igenom Oklo-fyndigheten. Inträngningen och den regionala extensionen ökade temperaturen och cirkulationen av de hydrotermala vätskorna som i sin tur har påverkat Oklo-fyndigheten. Trots denna händelse och de interaktioner mellan fast fas och vätska som var förbundna med den, är uraniniten i de naturliga fossila fissionsreaktorerna anmärkningsvärt välbevarad och har till och med hållit kvar fissionsrelaterade föroreningar inom uraninitkornen /Evins et al. 2005/.

Av ovanstående framgår det att med stabil tektonik och bevarade reducerande förhållanden i förvaret kan den uranoxid som utgör bränslematrisen förbli stabil under många miljoner år. Ytterligare en observation är att upplösningsförsök i laboratoriet ger snabbare upplösningshastigheter än de som uppskattas från observationer av mineral i naturliga miljöer. Detta har iakttagits och diskuterats i litteraturen och kan delvis förklaras av utvecklingen av det upplösta mineralets yta, vilken sker i en tidsskala som inte kan studeras i ett vanligt laboratorieförsök /White och Brantley 2003/.

Den kunskap som inhämtats från studier av naturliga analogier återges i avsnitt 14.6.

14.6 Naturliga analogier

System i naturen tillför två saker som inte kan uppnås i ett laboratorium: den naturliga miljöns hela komplexitet och mycket långa tidsskalor. Genom att göra jämförelser med naturliga system, i vilka någon egenskap, händelse eller process bedöms likna dem som förväntas i förvarssystemet, kan förvarets utveckling i den naturliga miljön bedömas med större tilltro.

Det finns flera delar av förvarssystemet – använt kärnbränsle, kopparkapsel, bentonitbuffert – för vilka jämförelser med naturliga analogier har visat sig vara användbara. Kunskapen om många processer som sker i geosfären, till exempel transport av uran och andra grundämnen, har ökat genom undersökningar av platser där det finns naturliga analogier.

14.6.1 Studier av naturliga analogier och deras roll i säkerhetsanalyser

Sedan begreppet ”naturlig analogi” först började ta form under 1980-talet /Chapman et al. 1984/, har förhållandet mellan studier av naturliga analogier och säkerhetsanalyser av förvar för högaktivt avfall utvecklats. Det är svårt att få fram den kvantitativa information som är nödvändig för en säkerhetsanalys från studierna av naturliga analogier. Dessa studier har emellertid en stor kvalitativ betydelse, eftersom de kan visa att en egenskap eller process verkligen förekommer i naturen och att den har bestått i en naturlig miljö under mycket lång tid. Detta är en viktig aspekt, särskilt när det gäller att öka lekmannens medvetenhet och förståelse. En stor del av det som krävs för att förstå säkerhetsanalysen ingår inte i allmänkunskapen. Här kan analogier och demonstrationsförsök i viss utsträckning även ge lekmannen insikter i de förhållanden och processer som har betydelse för långsiktig säkerhet. Materialanalogier har varit särskilt användbara för detta syfte.

Det framgår nu klart att de två huvudskälen till att studier av naturliga analogier är intressanta, nämligen exponeringen för naturlig komplexitet och långa tidsskalor, inför osäkerheter som gör dem svåra att använda i en systematisk säkerhetsanalys. Bristen på information om randvillkor innebär ofta en begränsning för naturliga analogier. Behovet av välkända initialtillstånd för kvantitativa utvärderingar av processers påverkan är ett exempel på fall där svårigheter kan uppstå. Dessutom är analogier aldrig perfekta. Skillnaden mellan en analogi och den aktuella komponent som undersöks kommer alltid att väcka frågor. Därför leder de flesta studier av naturliga analogier inte fram till kvantitativa data som kan användas i säkerhetsanalysmodeller. Men trots dessa begränsningar har studierna ökat förståelsen betydligt för de naturliga processer som är relevanta för de processer som beaktas i säkerhetsanalyser. Den roll som studier av naturliga analogier spelar när det gäller att identifiera relevanta processer, och även när det gäller att kontrollera att alla relevanta processer har tagits med i modellerna, är betydande. Exempel som illustrerar denna roll ges av /Miller et al. 2000/.

En annan aspekt av studierna av naturliga analogier har varit de möjligheter de har gett att styra utvecklingen av den utrustning och de metoder som är avsedda för att undersöka förvarsplatser. Uttömmande studier av malmkroppar, huvudsakligen uranmalmer, har utförts för vilka platsundersökningsmetoder har utvecklats och använts. I det fallet innebär skillnaderna mellan enskilda analogier och typiska förvarslokaliseringar snarare en möjlighet än en svårighet. Skillnaderna gör

det möjligt att på ett bättre sätt testa de metoder som används för att tolka mätningar av exempelvis redoxförhållanden i grundvatten, pH, kolloider och mikrobiell aktivitet.

Många av studierna av naturliga analogier har genomförts i form av internationella projekt. Ett stort antal forskare från olika områden har deltagit i dessa projekt och bidragit till diskussioner som har inneburit värdefull granskning av de hypoteser som prövas. Långsiktig säkerhet, precis som vetenskap i allmänhet, förlitar sig i första hand på kombinationen av öppenhet och kritik.

Här följer en kort översikt av huvudresultaten från ett par av de analogistudier som genomförts under de senaste tre decennierna. Dessa har granskats mer omfattande av /Miller et al. 2000/ och /Ruiz López et al. 2004/. I första hand har de resultat som anses relevanta för KSB-3-konceptet tagits med. Andra expertgrupper har också funnit att dessa analogier är intressanta i det här sammanhanget /Apted et al. 2009, s 23–24, Bath och Hermansson 2009, s 58–68, Neall et al. 2008, s 35–42/.

14.6.2 Analogier till förvarsmaterial och processer som påverkar dem

Naturliga material och arkeologiska föremål som hittas i naturen har undersökts som analogier till förvarsmaterial. Dessa material har utsatts för en komplex mångfald av naturliga processer under olika tidsrymder och det vi ser i dag är resultatet av detta ”naturliga experiment”.

Använt kärnbränsle

Det naturliga mineralet uraninit (urandioxid) har många likheter med UO_2 -baserat använt kärnbränsle. Dessa material utgörs av uranoxider som har samma kristallografiska struktur (fluoritstruktur), de bildar fasta lösningar med oxider av Th, Ca och sällsynta jordartsmetaller, de är beständiga mot strålnings-skador (självläkande kristallgitter) och de påverkas på liknande sätt av oxidation /Janeczek et al. 1996/. Det betyder dock inte att dessa material är identiska – det finns många viktiga skillnader. Exempel på viktiga skillnader är mängden oxiderat uran, som är högre i uraninit, och mängden radiogen Pb, som kan vara nästan 20 viktprocent PbO i två miljarder år gammal uraninit, men som är mycket låg i använt kärnbränsle till och med efter 10 000 år (0,00014 viktprocent Pb /Janeczek et al. 1996/).

Många platser där det finns naturliga analogier, till exempel Oklo (Gabon), Cigar Lake (Kanada), Poços de Caldas (Brasilien) och Palmottu (Finland) är uppbyggda kring uranfyndigheter som bildats för flera miljoner år sedan. Platserna har delvis valts ut för de möjligheter de ger att studera hur uraninit, som en analogi till använt kärnbränsle, beter sig i olika geologiska miljöer.

Vid *Cigar Lake* finns malmkroppen på ett djup av cirka 450 m i en reducerande miljö och upplösning av urandioxid i malmkroppen har utförligt diskuterats /Bruno et al. 1997/. Trots den reducerande miljön är oxidationstillståndet något högre för uraniniten i *Cigar Lake* än för urandioxiden i använt kärnbränsle, vilket gör det svårare att dra paralleller till upplösningen av använt kärnbränsle i KBS-3-förvaret. Det är emellertid värt att notera att inga av de naturliga processer som har påverkat denna malmkropp sedan den bildades för omkring 1 300 miljoner år sedan har resulterat i några geokemiska tecken på dess existens vid markytan.

Radiolys är en annan process som har betydelse för upplösningen av använt kärnbränsle och som har undersökts i *Cigar Lake*. Joniserande strålning ger upphov till kemiska reaktioner och den totala energi som frigörs genom radioaktivt sönderfall är betydande. Det innebär att tidiga pessimistiska utvärderingar av denna effekt på upplösningen av använt kärnbränsle tenderade att vara kraftigt överskattade. Observationerna av utfällningar av trevärt järn i den lera som angränsar till malmkroppen i *Cigar Lake* tolkades i början som ett resultat av oxidation till följd av radiolys. Det kunde dock visas att det sannolika ursprunget var hydrotermala omvandlingar under bildningen av malmen. Dessa observationer gav tillsammans med andra observationer underlag till mer realistiska modeller /Smellie och Karlsson 1996/.

Som tidigare angivits innehåller naturlig uraninit andra grundämnen än uran och syre, till exempel Th och sällsynta jordartsmetaller. Många av dessa grundämnen bildas även i kärnbränslet under reaktordriften eller också kan de fungera som så kallade ”kemiska analogier” för grundämnena i det använda kärnbränslet. Dessa kemiska analogier förekommer rikligt i malmfyndigheterna i *Poços de Caldas* och de spelade en viktig roll vid undersökningarna av naturliga analogier som utfördes på denna plats /Chapman et al. 1993/.

Den mest uppseendeväckande naturliga analogin till använt kärnbränsle är uraniniten i de två miljarder år gamla, naturliga, fossila fissionsreaktorerna i *Oklo*, som i själva verket är ett naturligt använt kärnbränsle /Neuilly et al. 1972, Naudet 1991, Gauthier-Lafaye et al. 1996/. Dessa fossila reaktorer återfinns i en uranmalmsförande formation i Gabon, västra Afrika, där de bildar reaktorzoner som formats av kriticitet. Ungefär sexton sådana reaktorzoner upptäcktes i gruvorna vid Oklo, vid närliggande Okélobondo och under prospektering i Bangombé, som ligger omkring 20 km söderut. Kärnreaktionerna inträffade för omkring två miljarder år sedan när innehållet av U-235 fortfarande var tillräckligt högt för att upprätthålla en kedjereaktion. Ingen annanstans har man funnit några tecken på en liknande fossil reaktor. Det beror antagligen på de många tillfälligheter som gjorde det möjligt för kärnreaktionerna att starta på ett naturligt sätt: hög urankoncentration, rätt isotopsammansättning av uran, förekomsten av en neutronmoderator (vatten) tack vare hög porositet och den ovanligt ringa förekomsten av neutrongifter (exempelvis vanadin och mangan) som fångar in neutroner /Naudet 1991/. Dessutom är den sedimentära formationen i vilken dessa naturliga reaktorer ligger väsentligen opåverkad av tektoniska processer, trots att den funnits i två miljarder år.

Oklo-uraniniten och använt kärnbränsle har många slående likheter, men även viktiga skillnader. Dessa skillnader beror till en del på de mycket olika drifhistorier som de naturliga reaktorerna och de av människan konstruerade energiproducerade reaktorerna uppvisar. Kärnreaktionerna i Oklo-uraniniten pågick under en lång period med låg effekt, och med återkommande avbrott, under några hundra tusen år /Naudet 1991/. Använt kärnbränsle från energiproducerande reaktorer har en mycket intensivare termisk historia, en högre utbränning och ett större innehåll av fissionsprodukter. En annan viktig skillnad är förekomsten av kolväten i Oklo som kan ha bidragit till att upprätthålla de reducerande förhållandena.

De identifierade förutsättningarna för kriticitet i Oklo användes för att utvärdera möjligheten att uppnå kriticitet i ett förvar för använt kärnbränsle. Det finns fortfarande kvar klyvbart material i det använda kärnbränslet. En modell baserad på förhållandena vid Oklo tillämpades därför på KBS-3-förvarsfallet /Oversby 1998/. Resultatet var negativt i det avseendet att ingen kriticitet kunde förväntas i förvaret.

En aspekt som gör uraniniten i Oklo unik bland analogier till använt kärnbränsle är att uraniniten i reaktorzonen innehåller grundämnen som bildats under fissionsreaktionerna (fissionsprodukter). Reaktorzonerna är också anmärkningsvärt välbevarade med tanke på deras ålder. Bara en bråkdel av de ämnen som bildades under reaktionerna har försvunnit på grund av masstransport, vilket annars skulle ha försvårat utvärderingen av kärnreaktionerna. Till exempel är sällsynta jordartsmetaller som genererats genom fission välbevarade och inneslutna i uraniniten, medan lättflyktiga grundämnen som Cs har försvunnit. Analogier till de metallpartiklar som i använt kärnbränsle kallas ϵ -partiklar finns också i reaktorzonerna i Oklo. I använt kärnbränsle består dessa omkring 1 μm stora ϵ -partiklar av legeringar av Mo, Tc, Ru, Rh och Pd. Förekomster av fissionsprodukten Te har också observerats i samband med dessa partiklar /Cui et al. 2004/. I Oklo-reaktorerna förekommer liknande utskiljningar av metalliska fissionsprodukter, vilket bevisats genom registrering av partiklar som innehåller Ru, Pd och Pb /Gauthier-Lafaye et al. 1996/. Dessa partiklar har en diameter på upp till omkring 100 μm och utgörs inte av metallegeringar utan av ansamlingar av olika sulfidfaser. Det är värt att notera att dessa ansamlingar också är associerade med Te och Se, vilket åskådliggör den kemiska affiniteten mellan ädelmetallerna och dessa kalkogena metalloider.

Segjärn

En utgrävningsplats i Nydam Mose i Danmark innehåller nedgrävda järnföremål med militär anknytning, offrade under tidsperioden 200–500 e Kr. Här identifierades siderit som den huvudsakliga korrosionsprodukten, vilket tyder på en syrefri korrosionsmiljö, rik på karbonater (10^{-2} M) /Matthiesen et al. 2003, 2004/. De uppskattade korrosionshastigheterna sträcker sig från en övre gräns på 5 $\mu\text{m}/\text{år}$ ner till 0,03 $\mu\text{m}/\text{år}$ eller lägre. Medelkorrosionshastigheten för 151 analyserade lansar är omkring 0,2 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Korrosion av arkeologiska segjärnsartefakter har undersökts av /Neff et al. 2003, 2005/ som analyserade korrosionsprodukterna på artefakter från 100-talet e Kr till 1500-talet e Kr. Även lågkolhaltiga stålföremål som varit nedgrävda under långa perioder analyserades /Neff et al. 2006/ för att bestämma medelkorrosionshastigheten. Korrosionsprodukterna indikerade om syre förekommit i korrosionsprocessen. Det fastställdes att de uppmätta eller uppskattade korrosionshastigheterna varierade inom ett relativt stort intervall, men att de uppskattade medelkorrosionshastigheterna inte var högre än 4 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Koppar

Fynd av gedigen koppar i de geokemiska miljöer som är relevanta för förvarsförhållanden är illustrativa exempel på kopparkapslarnas långsiktiga stabilitet. Malmkroppar som innehåller gedigen koppar har därför undersökts och då speciellt processerna som korroderar eller möjligen korroderar koppar. Arkeologiska kopparföremål har använts för samma ändamål /Johnson och Francis 1980, Miller et al. 2000/.

Världens största fyndighet med gedigen koppar påträffades på *Keweenaw Peninsula* i norra Michigan, USA. De rena kopparådrorna, som är associerade med konglomerat, sediment inbäddad i basalt, bildades för omkring 1,1 miljarder år sedan /Brown 2006/. Omkring fem miljoner ton koppar har utvunnits enligt vad som rapporterats /Johnson och Francis 1980/. En del koppar har transporterats via glaciärer från primära kopparfyndigheter i övre Michigan, till exempel *Keweenaw Peninsula*. Det rör sig om ett storleksintervall från små stenar till block som väger mer än ett ton, exempelvis det välkända kopparblocket i Ontonagon. Detta block kallas ”flytande koppar”. Välbevarade stycken av flytande koppar har hittats i sand- och grusbankar som lämnats kvar av glaciärerna. Två sådana stycken med tecken på glacial avnötning undersöktes /Johnson och Francis 1980/. Den senaste glaciären drog sig tillbaka för 8 000 till 11 000 år sedan, men styckena är fortfarande mycket välbevarade med relativt tunna lager av korrosionsprodukter som befunnits vara kuprit (Cu_2O) och malakit ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). De nötta områdena hade en största oxidtjocklek på bara 0,6 mm. Ett av styckena hittades enligt rapporter på mindre än en meters djup (omkring två fot).

Mineraliseringen av koppar och uran i *Hyrkkölä* i Finland finns i en geologisk miljö som liknar de tilltänkta förvarsplatserna för deponering av använt kärnbränsle i Finland och Sverige. Gedigen koppar och uraninit i *Hyrkkölä* förekommer i granitiska pegmatitådror. Mineraliseringarnas ålder uppskattas till omkring 1 700 miljoner år. Ren koppar finns tillsammans med kopparsulfid och sekundära uranmineraler i öppna sprickor på flera djupintervall i dessa pegmatiter. Ett intervall med omvandlad granitpegmatit innehåller ren koppar tillsammans med kopparoxid och sprickytorna är belagda med smektit med adsorberat uran och adsorberad koppar /Marcos et al. 1999/. Undersökningar har utförts med kärnbörning ner till djup av omkring 100 m. Grundvattensammansättningar relaterade till de mineraliserade sprickorna analyserades med hjälp av SKB:s mobila fältlaboratorium. Den rena kopparn i *Hyrkkölä* har uppenbarligen bestått, trots att den utsatts för såväl sulfidinnehållande vatten som nuvarande oxiderande förhållanden. Studier av uranseriens isotoper bekräftar interaktion med grundvatten och antyder tillsammans med andra observationer att sulfidisering upphörde för några hundratusen år sedan för att sedan ersättas av oxidation. Kopparkorn så stora som en millimeter hittades med tunna höljen av kuprit. Vissa av de minsta kornen var helt oxiderade. Vissa välbevarade korn av gedigen koppar hittades inbäddade i smektit /Marcos et al. 1999/.

Fyndigheten med gedigen koppar i *Hyrkkölä* är ett av många exempel på de fall där koppar som återfunnits i naturen har överlevt under geologiska tidsperioder vid geokemiska förhållanden som liknar dem som förväntas i ett förvar /Marcos 1989/. Fyndigheter av ren koppar är emellertid i allmänhet huvudsakligen förenade med basalter, som i fallet med *Keweenaw Peninsula*, eller vittring av kopparsulfidfyndigheter strax under markytan /Amcoff 1998/. *Hyrkkölä* har stor betydelse i jämförande syfte eftersom den geokemiska miljön påminner i så hög grad om miljön för ett tilltänkt förvar i Finland eller Sverige.

Skikt av ren koppar, omkring 1–2 mm tjocka och upp till drygt 10 cm tvärsöver, har hittats i blottningar av permisk lersten i *Littleham Cove* i Storbritannien /Milodowski et al. 2002/. Förutom vissa tecken på korrosion är kopparn anmärkningsvärt välbevarad, trots den angivna åldern på mer än 176 miljoner år. Kopparskikten är förknippade med uraninnehållande noder som bildats inom en halo som orsakats av samtida reduktion av trevärt järn i lerstenen. Dessa uraninnehållande konkretioner och den rena kopparn bildades tidigt genom avlagring av mineral innan lerstenen kompakterades. Därefter har lerstenen med god marginal befunnit sig under den aktuella vattennivån och förblivit vattenmättade under större delen av sin existens. Både den gedigna kopparn och urannodulerna har studerats som analogier till använt kärnbränsle och kopparkapslar nedgrävda i kompakterad lera /Milodowski et al. 2002/.

I *Littleham Cove* fälldes koppar ut längs skiktade tunna lager och tunna sprickor i lerstenen. En smal diffusiv kopparhalo på mindre än en millimeter har uppmätts i lerstenen nära kopparn. Detta kan vara ett resultat av bildningsprocessen, eller senare förlust av koppar. Vare sig det sker på det ena eller andra sättet tyder det på att diffusion har skett längs sträckor på bara några hundratals mikrometer. En viss tidig omvandling av en del av kopparn till kuprit har identifierats, men bortsett från det har den rena kopparn förblivit relativt inert fram till dess att bergartsekvensen lyftes upp och expone-

rades för yterosion och oxidativ vittring i den nutida miljön. Radioaktiviteten i de uraninnehållande nodulerna har använts för att utvärdera effekterna av radiolys. Metoder som används för att beräkna produktionen av väteperoxid från radiolys av vatten med alfapartiklar från använt kärnbränsle tillämpades på en typisk nodul. Den högsta beräknade produktionen av väteperoxid var tillräckligt hög för att oxidera mer än ett gram pyrit. Men det fanns inga observationer eller mätningar som tyder på att radiolys har haft någon större betydelse för att framkalla oxidation av tvåvärt järn eller andra reducerade ämnen i lerstenens vattenmättade lermatris /Milodowski et al. 2002/.

Krigsfartyget *Kronan* exploderade och sjönk sydöst om Öland 1676 och fartygets kanoner spreds ut över havsbotten. En bronskanon valdes ut för korrosionsundersökningar. Den var nästan helt begravd, låg nästan vertikalt och med sin mynning nedsänkt i grund havslera. Bronsets kopparinnehåll var så högt som 96,3 procent och den omgivande, relativt kompakta havsleran bestod huvudsakligen av montmorillonit /Hallberg et al. 1988/. Kända randvillkor som hur länge kanonen varit nedgrävd och omgivningens sammansättning gjorde den värdefull som analogi till en kopparkapsel i en mättad lerbuffert, trots den jämförelsevis korta tiden kanonen varit nedgrävd. Kanonens yta analyserades tillsammans med den omgivande leran. Kuprit (Cu_2O) och en del malakit ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) hittades på ytan och slagginklusioner av tenorit (CuO) i bronsmatrisen under ytan. Man kunde spåra diffusionen av koppar fyra centimeter in i leran. Slagginklusionerna och det faktum att kanonen måste ha varit täckt av ett lager med korrosionsprodukter innan skeppet sjönk försvårade undersökningen. Tillgängliga fakta utvärderades noggrant och en maximal korrosion på mindre än tio mikrometer på hundra år rapporterades /Hallberg et al. 1988/.

Denna studie återupptogs senare och utvärderades på nytt med avseende på en korrosionsmekanism som utvecklats för kärnavfallsbehållare av koppar enligt ett kanadensiskt koncept /King 1995/. Denna mekanism omfattade bildningen av lösliga kopparföreningar och så kallade disproportioneringsreaktioner. Det senare innebär att tvåvärd koppar, till exempel från slagginklusioner med tenorit, tillsammans med kopparmetall ger envärd koppar. Med hjälp av den utvecklade mekanismen kunde tidigare rapporterade observationer förklaras på ett tillfredsställande sätt och slutsatserna förbättras /King 1995/.

Tre *åskledarplattor* som fanns på olika platser i Syd- och Mellansverige grävdes fram efter att de legat under marken i mer än femtio år /Hallberg et al. 1984/. De tre plattorna hade legat nergrävda på djup från 1,2 till 3,3 m i ler- och/eller siltjord. Plattornas korrosion undersöktes i förhållande till jordens kemiska egenskaper. Två av plattorna hade drabbats av gropfrätning med en gropfrättningsfaktor på fem, medan den tredje och djupast belägna plattan inte uppvisade sådana tecken. Koppinoxider hittades på de två förra plattorna och kopparsulfider på den senare plattan. *Vattenledningar av koppar* ger också tillgång till värdefull information om gropfrätning.

Senare utvärderingar av kopparkapslars korrosion avseende gropfrätning har främjats ytterligare av experiment och teoretiska överväganden som det inte fanns tillgång till tidigare, se avsnitt 5.3 i /King et al. 2010/.

Bentonit

Den bentonitlera som används i bufferten och återfyllningen tas vanligen från naturliga fyndigheter och vidarebearbetas i mycket liten utsträckning, med undantag av torkning, krossning och siktning. Själva bentonitfyndigheterna och andra förekomster av bentonit i olika geologiska miljöer har studerats som analogier till buffert och återfyllning i ett förvar. Processer av intresse är till exempel termisk och kemisk påverkan, hydrauliskt flödesmotstånd och diffusion av lösta ämnen.

Omvandling av smektit till illit (illitisering) är den vanligaste omvandlingen av smektit som observerats i naturliga sediment och den har kunnat återskapas under laboratorieförhållanden. Ett av kraven för att illit ska bildas är tillgång på kalium. Kalium finns både löst i grundvatten och i bergartsbildande mineral. För kinetiska överväganden beträffande omvandlingen från smektit till illit är den initiala kaliumkoncentrationen i grundvattnet och upplösningshastigheten för mineraler som innehåller kalium viktiga. All övrig mineralbildning som kan konkurrera med illiten om kaliumet kan också ha betydelse.

Förhållandena vid omvandling från smektit till illit har undersökts i *djupa brunnar i sedimentbassänger* /Velde och Vasseur 1992/. Dessa studier av illitisering i naturliga system är inte kopplade till någon särskild plats för naturliga analogier utan har i stället utförts i många olika sedimentbassänger för att bättre kunna beskriva tids- och temperaturförhållandena vid mineralomvandling från smektit till illit. Prover från brunnar från Texas kust längs Mexikanska golfen (USA), Niigata-

bassängen (Japan), Los Angeles-bassängen (USA) och Paris-bassängen (Frankrike) undersöktes av /Velde och Vasseur 1992/. Dessa brunnar som borrar i sedimentbassänger av varierande ålder (4,5 till 210 miljoner år) ger tillgång till data för en nästan komplett sedimenteringssekvens. Den framtagna modellen visar att reaktionshastigheten vid temperaturer som är relevanta för förvaret är mycket låg i förhållande till den tidsskala som beaktas för ett förvar (cirka en miljon år).

Termiska effekter på bentonit har undersökts vid *Kinneulle* i Sverige där en två meter mäktig bädd av bentonitlera bildades från avlagringar av vulkanisk aska för cirka 450 miljoner år sedan. Prover från bentonitleran belägen omkring 95 m under en hätta av en cirka 300 miljoner år gammal diabas undersöktes /Pusch et al. 1998/. Diabasen bildades när smält lava trängde in i sedimentsekvensen sidledes. Magman utsatte sedimenten för värme som nådde ner till bentonitlagren. Bentonitlagren i *Kinneulle* har varit kända under en tid och de har tidigare studerats som analogier till buffert av kompakterad bentonitlera för att testa aktuella kunskaper om effekter av temperaturökningar /Pusch 1983/. Dessa tidiga studier kompletterades senare med undersökningar av prover från *Gotland* och *Sardinien* där episoder med lavaflöden har värmt upp smektitmineral på samma sätt men med andra tids- och temperaturprofiler /Pusch och Karland 1988/.

Beroende på inträngningen av magma nådde bentonitlagrets mitt en högsta temperatur på 140 °C efter omkring 200 år, låg kvar över 100 °C under ytterligare 600 år och minskade långsamt ner mot omgivningstemperatur under mer än ettusen år /Pusch et al. 1998/. Det har tolkats som att cementeringen av leran med kiseldioxid (SiO₂) och förekomsten av lermineralet illit har orsakats av värmen. Båda processerna, cementering genom utfällning av kiseldioxid och bildning av illit från smektit, kan sänka bentonitens svällförmåga, vilken är nödvändig för att upprätthålla dess buffertfunktion. Tidiga iakttagelser /Pusch 1983, Pusch och Karland 1988/ bekräftade hypotesen att kompakterad bentonit kommer att behålla sin svällförmåga, förutsatt att värmepulsen är begränsad med avseende på tid och rum och förutsatt att den geologiska miljön inte inverkar negativt på smektit i något avseende. I senare undersökningar av *Kinneulle* användes en förenklad endimensionell diffusionreaktionsmodell för att simulera den observerade utvecklingen av leran /Pusch et al. 1998/. Vattnet antogs ha samma sammansättning som havsvatten och för reaktionen testades två olika alternativ: fastfasomvandling av smektit till illit jämfördes med upplösning av smektit följt av utfällning av illit. Det andra alternativet var det bästa och en ännu bättre överensstämmelse uppnåddes genom antagandet att illitbildning inte är reversibel. Det visade sig som väntat att kalium är en nödvändig komponent för att generera illit. Den kiseldioxid som bildades genom reaktionen förbrukades enligt beräkningarna genom diffusion till omgivande sediment och utfällning av kvarts.

Ett antal bentonitfyndigheter i Cabo de Gata-regionen i *Almería*, Spanien valdes ut för provtagning och studier av bufferten ur olika långtidsaspekter (Barraprojektet) /Villar et al. 2006/. Efter ett första skede begränsades studierna till att omfatta tre fyndigheter och två processer: *Morrón de Mateo* för termiska effekter samt *Cala del Tomate* och *Cortijo de Archidona* för effekten av salinitet. Den termiska effekten i *Morrón de Mateo* hade orsakats av en vulkankägla. Bentoniten i närheten av vulkanen visade sig vara smektit som var rik på järn och magnesium, medan proverna som tagits på längre avstånd innehöll vanlig aluminiumsmektit. Egenskaper som katjonbyteskapacitet och specifik yta var däremot desamma. Förekomsten av järn och magnesium i smektitmineralstrukturen förklarades bero på en reaktion mellan smektiter och föroreningar som sker i närheten av vulkankäglan vid måttliga temperaturer (under 100 °C). Kanske förhållandena inte var tillräckligt extrema för att omvandla smektiten till andra mineral. Uppenbarligen har bentonitlerorna vid *Cala del Tomate* och *Cortijo de Archidona* utsatts för förändringar i vattensammansättningen. Natrium och magnesium är de dominerande utbytbara katjonerna i smektiter som finns på djupet i *Cala del Tomate* jämfört med magnesium och kalcium nära ytan. Observationer från *Cortijo de Archidona* tyder på nedträngning av havsvatten, följt av infiltration av meteoriskt vatten rikt på kalcium och magnesium. Porvattnets jonstyrka hade varierat mellan 0,02 och 0,03 M per liter, men lermineralen föreföll stabila.

I *Wyoming*, USA, bildades bentonit genom omvandling av vulkanaska som fallit över det grunda forna *Mowryhavet*. Askan bildade tunna men vittspridda lager på havsbotten och omvandlades därefter till bentonit /Smellie 2001/. Dessa bentonitlager bildades för omkring 100 miljoner år sedan. Återstoden av dessa bryts på några platser på grund av att de innehåller natriumbentonit av god kvalitet. SKB har länge använt materialet MX-80 som referensmaterial för bufferten. Vetenskapliga studier ger stöd för hypotesen att bentoniten bildades under grunda, bräckta och delvis reducerande förhållanden samt att det inte skett någon ytterligare omvandling. Isolering med påföljande avlagringar av gyttja och silt kan emellertid ha fungerat som ett skydd för bentonitleran. Följaktligen var det inte möjligt att få svar på vad som skulle kunna hända under förhållanden där systemet är mer öppet för salthaltigt grundvatten.

Lerbuffertens skyddande och bevarande förmåga visas med hjälp av leravlagringarna i *Dunarobba*, Italien, som innehåller en fossil skog /Valentini et al. 1997/. Trädstammar identifierades som *Taxo-dioxylon gypsaceum* som dog ut under Pliocen, vilket tyder på att de har bevarats av leravlagringarna under mer än en miljon år. Avlagringen som hårbärerar träden är tät, konsoliderad lera med viss cementering med kalciumkarbonat (hydraulisk konduktivitet lägre än $2 \cdot 10^{-10}$ m/s och trycket vid sträckgränsen 1,5–9 MPa). Den ursprungliga täckningen var antagligen 80 m innan erosion ägde rum. Träet är anmärkningsvärt välbevarat. Det har skett mycket små förändringar och materialet är fortfarande i alla hänseenden trä, med ett cellulosa-innehåll som påminner om nutida trä. En utvärdering av platsen tydde på att lerformationen i lokal skala hade skyddat de fossila träden från olämpliga förhållanden. Lerans låga hydrauliska konduktivitet har förhindrat nedträngning av syresatt vatten som annars skulle ha förorsakat aerob nedbrytning av träet. Mer förvånande är att leran också verkar ha skyddat mot anaerob nedbrytning. Anaeroba bakterier är kända för att bryta ned organiskt material och framför allt cellulosa-material. Från arkeologiska utgrävningar är det också känt att lera kan hjälpa till att bevara sådana material där förhållandena allmänt är anaeroba, till exempel i sjö-sediment. Den fossila skogen i Dunarobba överensstämmer med dessa exempel, men är mer slående på grund av sin höga ålder. Det vanliga antagandet i säkerhetsanalyser av deponering av radioaktivt avfall, att organiskt material alltid kommer att brytas ned av anaeroba bakterier som därmed genererar gas, är troligen pessimistiskt i många fall där lera används som buffert och återfyllning. En möjlig förklaring till varför leran har förhindrat anaerob nedbrytning så effektivt är att leran har hållit borta essentiella näringsämnen /Valentini et al. 1997, s 216/.

I uranfyndigheten i *Cigar Lake* i Kanada omges uranmalmkroppen av lera (huvudsakligen illit och kaolinit). Malmen finns på cirka 450 m djup och kan inte detekteras geokemiskt på ytan. Denna isolering av malmen, och de därmed förknippade grundämnena, under miljoner av år beror delvis på den låga hydrauliska genomsläppligheten i den omgivande leran /Cramer och Smellie 1994/. Resultat från studierna i *Cigar Lake* illustrerar även lerans förmåga att filtrera kolloider /Vilks, s 219–241 i Cramer och Smellie 1994/. Det har också visats att sorption av radionuklider på skikt-silikat, huvudsakligen klorit och illit, i de naturliga fissionsreaktorzonerna i *Oklo*, spelat en betydande roll för att begränsa spridningen av dessa grundämnen kring reaktorzonerna /Bros et al. 2003/.

14.6.3 Transport- och fördröjningsprocesser i geosfären

Vetenskapliga undersökningar i syfte att öka kunskapen om transport och retention av radionuklider i geosfären, grundar sig på studier av dessa grundämnens (eller deras kemiska analogiers) geokemiska beteende.

Förhållanden under ytan

Uranmalmszonen vid sjön *Palmottu* i Finland bildar en brant sluttande zon som sträcker sig ned till ett djup på omkring 300 m. Förhållandena vad gäller geologi, hydrogeologi, grundvattenkemi, klimat och landskap liknar dem som råder på undersökta tilltänkta förvarsplatser i Finland och Sverige. Därför undersöktes denna zon som en analogi till deponering av använt kärnbränsle i kristallint berg /Blomqvist et al. 2000/. I *Palmottu* är djupförhållandena i allmänhet syrefria och reducerande, medan det vanligen råder oxiderande grundvattenförhållanden i de översta 100 metrarna. Reducerande förhållanden finns också på djupet i Forsmark. Den 1 700 miljoner år gamla uranfyndigheten i *Palmottu* har genomgått flera glaciationsperioder som tillfälligtvis kan ha utsatt malmen för oxiderande förhållanden, men om så var fallet återställdes de reducerande förhållandena effektivt. Trots den låga uranhalten i malmen (0,1 procent) visade det sig att förekomsten av uran var tillräckligt hög för att fungera som en ytterligare sänka för reduktion av infiltrerande syre. Observationerna i *Palmottu* illustrerar bergets förmåga att förbli stabilt och bibehålla reducerande förhållanden trots en lång geologisk historia som innehåller perioder med permafrost och glaciationer.

Permafrost och associerad utfrysning av salt kan ha gett upphov till den ovanliga grundvattenkemi som observerats i *Palmotto*, med förhöjda halter av natrium och sulfat. Frysning och efterföljande upplösning av NaSO_4 -mineral kan ligga bakom detta, men kopplingen är inte helt klarlagd /Blomqvist et al. 2000/. En annan aspekt av förhållanden under ytan vid permafrost och glaciationer är den möjliga bildningen av metangashydrater, så kallad metanis. Metanis har till största delen studerats i Kanada, där kärnprover innehållande metangashydrater tagits från sedimenten i dagens naturliga permafrostmiljö i Mallikreservoaren, Kanada, se exempelvis /Clark et al. 1999/. Förekomsten av gashydrater var också en aspekt i de studier som utfördes i Lupin Mine, Kanada. Man hittade dock

inga metanhydrater, även om det finns tecken som talar för att de förekommit i det förgångna /Stotler et al. 2009/. Studierna av naturliga permafrostmiljöer ger stöd för slutsatsen att det är osannolikt att hydrater bildas vid förväntade förhållanden.

Det råder reducerande förhållanden vid *Cigar Lake* i Kanada, där det finns en 1 300 miljoner år gammal uranfyndighet på cirka 450 m djup. Uraniniten vid *Cigar Lake* har interagerat med grundvatten vid olika tidpunkter i malmens geologiska historia, vilket framgår av såväl syrets isotopsammansättning som förekomsten av sekundära uranmineral. Förhållandena var dock fortfarande sådana att detta endast har orsakat mindre störningar av uraninitens kemiska sammansättning och struktur samt begränsad migration av aktinider /Fayek et al. 2002/.

Vittringsprocesser på ytan och grundvattenförhållanden nära ytan påverkar den naturliga fissionsreaktorn *Bangombé* i Gabon. *Bangombé*-reaktorn är belägen på 12 m djup i en subtropisk miljö med varierande oxidationsförhållanden. Följaktligen studerades effekterna av sådana grundvattenförhållanden på reaktorzonen. Grundvattnets redoxpotential i *Bangombé* visade sig vara känsligare för litologiska variationer än för djup och inneslutning. Interaktionen mellan reaktorzonen och det syrerika grundvattnet har pågått under omkring minst 70 000 år (och antagligen mycket längre), vilket framgår av åldern hos det sekundära uranylmineralet torbernit som påträffats i *Bangombé* /Gauthier Lafaye et al. 2000/. Kolloidkoncentrationen i *Bangombé*'s grundvatten visade sig vara låg (mindre än 0,3 ppm), trots de dynamiska subtropiska förhållandena /Gauthier Lafaye et al. 2000, s 55–56/.

Transport och fördröjning av radionuklider

En viktig aspekt av de projekt som rör naturliga analogier är att undersöka det geokemiska beteendet och de geokemiska reaktionerna hos de grundämnen som är relevanta för deponering av kärnavfall. Detta utgjorde en avsevärd del av studierna vid *Poços de Caldas* i Brasilien /Chapman et al. 1993/. Projektet visade att redoxfronten har haft en väsentlig betydelse för retentionen av många spår-element, även för element som inte anses vara känsliga för redoxförhållanden. Studien kunde inte visa att kolloider bidrar till transporten, utan snarare att partikelformigt material och kolloider i djupt grundvatten var immobiliserade. I systemet vid *Poços de Caldas* konstaterades det att mikrober katalyserar särskilda redoxreaktioner och att de därmed påverkar redoxfronten. Resultaten från *Poços de Caldas*-projektet tyder på att det inte har förekommit någon snabb transport av radionuklider och spår-element i stor skala på denna plats /Chapman et al. 1993/.

Studierna vid *Cigar Lake* visar på en liknande avsaknad av storskalig transport, eftersom det inte finns några geokemiska tecken på närvaron av den 1 300 miljoner år gamla uranmalmskroppen på ytan. Denna till synes effektiva retentionen av relevanta grundämnen kan bero på leran som omger malmen, varvid lerans låga hydrauliska genomsläpplighet kan ha varit en bidragande orsak. Denna egenskap har simulerats med modeller för masstransport av den typ som används i säkerhetsanalyser /Cramer och Smellie 1994/. Observationer vid *Cigar Lake* gav också stöd för slutsatser om kolloiders roll vid transport av radionuklider. Det fanns tecken på att kolloider filterats av leran. Det fanns också exempel på irreversibel sorption av radionuklider på kolloider, vilket är en mekanism som kan öka transporten av radionuklider /Vilks, s 219–241 i Cramer och Smellie 1994/. Men som också konstaterades i *Poços de Caldas*-projektet kan partiklar och kolloider vara mer eller mindre orörliga, vilket betyder att den irreversibla sorptionen på dessa partiklar och kolloider kan fungera som en sänka och därmed gynna en fördröjning /Chapman et al. 1993/.

De naturliga fissionsreaktorerna i Gabon, *Oklo*, *Okélobondo* och *Bangombé*, ger unika möjligheter att studera den spridning av fissionsprodukter och aktinider i geosfären som exponeringen för en naturlig geologisk miljö i två miljarder år har lett fram till. Trots den höga åldern har få komponenter transporterats ut ur zonerna. Lättflyktiga grundämnen som Cs har dock försvunnit /Gauthier-Lafaye et al. 1996/. Retention av plutonium kan spåras på vissa platser tack vare onormala koncentrationer av U-235 som har genererats genom sönderfall av Pu-239 /Bros et al. 1996/.

Den första och kanske den viktigaste episoden med transport av radionuklider i och kring reaktorzonerna har att göra med temperaturhöjningen i samband med kärnreaktionerna. Kärnreaktionerna orsakade i sig själva en uppvärmning av grundvattnet som ledde till geokemiska reaktioner och omlagringar av material nära zonerna. De lermineral som återfinns i reaktorzonerna bildades som ett resultat av denna hydrotermala omvandling. Transport av sällsynta jordartsmetaller i Okloreaktors närområde genom cirkulation av varmt vatten har beräknats. Det gick tämligen bra att använda

närområdesmodellerna för att simulera det mönster enligt vilket de sällsynta jordartsmetallernas fördelade sig i de få metrarna ovanför reaktorn. Längre bort från reaktorzonerna detekterades inte några sällsynta jordartsmetaller som uppkommit vid fissionen /Gauthier-Lafaye et al. 2000, s. 77–79/. Den hydrotermiska leran i och kring reaktorzonerna har visats ge en effektiv fördröjning av U, sällsynta jordartsmetaller och Zr, samt i viss grad Mo, genom sorption på skiktssilikater (illit och klorit) /Bros et al. 2003/.

Efter att reaktorzonerna svalnat följde en period på cirka 1 000 miljoner år under vilken inga större geologiska händelser påverkade reaktorzonerna. För omkring 860 miljoner år sedan utsattes sedimentbassängen i Franceville, som härbärgerar reaktorzonerna, för regional extension och associerad intrusion av magma, rik på magnesium och järn. Denna händelse ledde till omkristallisation av uraninit och frigörelse av bly. Vid detta tillfälle utfölldes radiogent bly, som drivits ut ur uraniniten, i form av blyglanskristaller (PbS) i och omkring reaktorzonerna /Evins et al. 2005/. Kopplingen mellan blyglans, platinametaller från fission (Ru, Rh, Pd) och kalkogener (Se, Te) som finns ansamlade i eller nära uraninitens korngränser, tyder på transport och omfördelning av dessa grundämnen inom reaktorzonerna samtidigt med kristallisering av blyglans /Gauthier-Lafaye et al. 2000, s 16/.

Transport och omfördelning av aktinider och radionuklider sker i reaktorzonerna i dag. Det demonstreras tydligast genom de studier som utförts vid Bangombé, där oxidativ omvandling och upplösning av uraninit observeras i form av olika typer av sekundära uranylmineral som fällts ut i och omkring reaktorzonen, och av den sammansättning av uranisotoper som uppmätts 50 m nedströms om reaktorzonen /Gauthier-Lafaye et al. 2000, s 53/. Studier av migrationsbeteendet hos sällsynta jordartsmetaller har visat att de endast lämnar reaktorzonen i mycket liten grad och att grundvattenproverna från reaktorzonen är utarmade på dem. Det tydde på att uraninit och sekundära uranfaser (inklusive koffinit, $U[SiO_4] \cdot nH_2O$) spelade en viktig roll för retentionen av de sällsynta jordartsmetallerna /Gauthier-Lafaye et al. 2000, s 51/.

Urantransport har även studerats vid *Palmottu* i Finland, där grundvattenförhållandena liknar dem vid förvarsplatsen i Forsmark. Vid Palmottu fann man att urantransport med grundvattnet endast hade betydelse i de översta hundra metrarna med oxiderande förhållanden. Kolloider analyserades också noga vid Palmottu, men i det här fallet befanns de sakna betydelse som bärare av uran /Blomqvist et al. 2000/. Redoxförhållandenas betydelse observerades också vid uranfyndigheten *Koongarra* i regionen Alligator Rivers (Australien), där transport- och retentionsmekanismerna i stor utsträckning är knutna till oxiderande vittring av mineraler eller förekomsten av unika beståndsdelar som fosfater /Duerden et al. 1992/.

Transport av radionuklider har även studerats vid *Nevada Test Site* (USA), där grundvattenprover från avtätade sektioner i djupborrade brunnar innehöll detekterbara mängder radionuklider från kärnvapenprov /Kersting et al. 1999/. Kärnvapenprov under jord smälter väggen i det bergutrymme som bildas genom explosionen. De flesta aktinider och sällsynta jordartsmetaller som bildas vid explosionen infogas i det smälta glas som smälter ihop till en ”sörja” i botten av det sammanstörtande bergutrymme. Det plutonium som hittades i brunnen hade samma isotopsignatur som proverna från det smälta glaset i ”Benham”-testet, vilket hade utförts under grundvattennivån, 1,3 km bort och 29 år före provtagningen. Vidare visade det sig att plutoniumet och vissa andra radionuklider var bundna till kolloidala partiklar. Det är antagligen den bästa indikationen hittills på att radionuklider faktiskt kan transporteras i form av kolloider över väsentliga avstånd på relativt kort tid.

14.6.4 Testning av modeller och metodutveckling

Huvuddelen av många projekt som rör naturliga analogier avser validering och testning av geokemiska modeller som används i säkerhetsanalyser av förvar för radioaktivt avfall. Dessutom är de metoder och den utrustning som har tagits fram för att användas vid studier av naturliga analogier viktiga vid detaljundersökningar.

I *Koongarra*-projektet (Alligator Rivers, Australien) testades totalt 13 olika modeller för masstransport. Syftet var att ta reda på hur pass väl de återger den observerade dispersionsplymen av uran-238 och några av dess dotternuklider utifrån den stora mängden information och data som samlats in genom omfattande undersökningar på platsen /Golian och Lever 1992/. Dispersionsplymens ålder var enligt dessa beräkningar i intervallet 0,5–3 miljoner år, vilket var någorlunda jämförbart med de 1–6 miljoner år som erhöles från geomorfologiska observationer. Inga modeller utslöts emellertid, vilket ifrågasätter

testets signifikans, antagligen beroende på analogins komplexitet och bristen på väldefinierade randvillkor. Dessutom kunde man inte utesluta att en liten fraktion förflyttat sig längre bort än den uppmätta dispersionsplymen. En sådan observation kunde ha haft betydelse och eventuellt skiljt modellerna åt.

Ett angreppssätt som var unikt för Koongarra-projektet var att testa scenarieanalysmetoden, som ursprungligen utvecklats som ett verktyg för säkerhetsanalyser. Detta visade sig ha en stimulerande inverkan på utvärderingarna och kunde även belysa analogins komplexitet /Skagius och Wingefors 1992/.

Vid *Poços de Caldas* (Brasilien) testades masstransportmodeller och reaktionsmodeller, till exempel genom att simulera utvecklingen av redoxfronten och hydrotermal transport /Chapman et al. 1993/. De modeller som användes vid prediktiv modellering kunde i allmänhet återge de observerade egenskaperna. Dessa omfattade transport av oxiderat järn och uran med meteoriskt vatten, följt av utfällning av pechblände genom reduktion när det uraninnehållande vattnet utsattes för reducerande förhållanden. Mönstret bekräftade antagandena om masstransport i kristallint sprucket berg där egenskaper som kanalbildning och matrisdiffusion spelar en viktig roll och där kontinuummodeller inte längre är tillräckliga /Romero et al. s 471–502 i Chapman et al. 1993/.

I *Poços de Caldas*-projektet testades och jämfördes olika geokemiska program och databaser för speciering och lösligheter. Det observerades till exempel att resultaten från löslighetsberäkningar har en benägenhet att vara pessimistiska (överskattade), även om så inte alltid är fallet. Dessa tester leder fram till rekommendationer om ändringar och förbättringar av modellerna och databaserna /Bruno et al. s 451–470 i Chapman et al. 1993/.

I studierna av den naturliga fossila fissionsreaktorn *Bangombé* (Gabon), gjordes jämförelser mellan två modeller som användes för geokemisk utvärdering: ett statistiskt angreppssätt med principalkomponentanalys och ett deterministiskt angreppssätt som simulerar kopplad transport och kemiska reaktioner längs grundvattnets flödeslinjer. Båda kunde skilja mellan kemiska reaktioner och blandning och båda kunde, oberoende av varandra, identifiera en ökning i alkalinitet kring *Bangombé*-reaktorzonen /Gurban et al. 1998/. Denna observation kunde förklaras med mikrobiell analys av järnreducerande bakterier, vilka har förmåga att bryta ned organiskt material och bilda koldioxid som får alkaliteten att öka. Modellen som bygger på principalkomponentanalys (M3) har sedan dess använts för geokemiska utvärderingar av resultat från undersökningar av tillänkta förvarsplatser i Sverige. Det faktum att tillgången på tillförlitliga och relevanta termodynamiska data är ett krav för adekvat modellering illustreras av de förbättrade resultaten från beräknade förutsägelser av de mineral som förekommer vid *Bangombé*, vilka efter en uppdatering av den termodynamiska databasen gav mycket bättre överensstämmelse med mineralogiska observationer /Jensen et al. 2002/.

Blind prediktiv modellering användes i undersökningarna av den naturliga analogin i *Palmottu* i Finland, där en flödesväg i det ”östra flödessystemet” täcktes av borrhål med avtätade sektioner för provtagning av grundvatten. Masstransportmodeller användes för att förklara de uppmätta koncentrationerna och isotopförhållandena längs flödesvägen /Blomqvist et al. 2000/. De första försöken gjordes i ”blindo”, baserade på en begränsad datamängd. Dessa första förenklade angreppssätt räckte inte till för att förklara observationerna. I den andra fasen distribuerades ytterligare data om grundvattenkemi ut och två avancerade modeller tillämpades, en fullständigt kopplad reaktion-transportmodell och en annan modell som inkluderar matrisdiffusion. Båda modellerna kunde användas för att förklara utvecklingen av urankoncentrationer. Den kopplade modellen gav en förklaring i nära överensstämmelse med mätresultaten för grundvattensammansättningen i borrhålen. Antagandet om matrisdiffusion i den andra modellen, i syfte att förklara upplösningen av uran genom gradvis oxidation av bergmatrisen, bekräftades genom oberoende mätningar av avvikelser från isotopjämvikt hos uranserien.

Förutom testning av modeller gav *Palmottu*-projektet också en möjlighet att testa de utrustningar som tagits fram för undersökning av förvarsplatser, exempelvis flödesloggar, videokamera och borrhålsradar, portabelt laboratorium för grundvattenanalys och kemiska sonder till borrhål. Mätning och provtagning i borrhål prövades noggrant och resultaten användes för att beskriva platsen, exempelvis sprickfördelningen och bergets sammansättning, liksom grundvattenflöde och grundvattenkemi. Ett liknande angreppssätt anammades senare under platsundersökningarna.

14.6.5 Sammanfattande kommentarer

Studier av naturliga analogier har bidragit till långsiktiga säkerhetsanalyser genom att ge kvalitativ information om vilka processer och egenskaper som ska ingå i analyserna. De relevanta processerna är inte begränsade till välkända platser med naturliga analogier, utan kan studeras i många naturliga system. Genom att koncentrera forskningsinsatser till dessa internationella projekt har mycket platsspecifik information gjorts tillgänglig och forskare från olika ämnesområden har förts samman för att diskutera resultaten.

Naturliga analogier kan betraktas som experiment som har pågått under mycket långa tidsperioder i en komplex, naturlig miljö. Därför kan man också göra observationer från resultaten av dessa ”experiment”, från vilka man kan formulera hypoteser om de processer som har påverkat den undersökta egenskapen. Dessa hypoteser kan prövas med olika metoder. På så sätt kan information från studier av naturliga analogier användas för att ta fram konceptuella modeller.

En central uppgift i många projekt som rör naturliga analogier har varit att testa lämpligheten hos de geokemiska verktyg som används vid analyser av långsiktig säkerhet och de matematiska modeller som hör samman med dem. I praktiken har detta lett fram till en bedömning av hur tillämpbara de databaser är som används i geokemiska modeller för naturliga förhållanden, vilket har varit till hjälp för att fastställa en del av de osäkerheter som är förenade med dessa modeller.

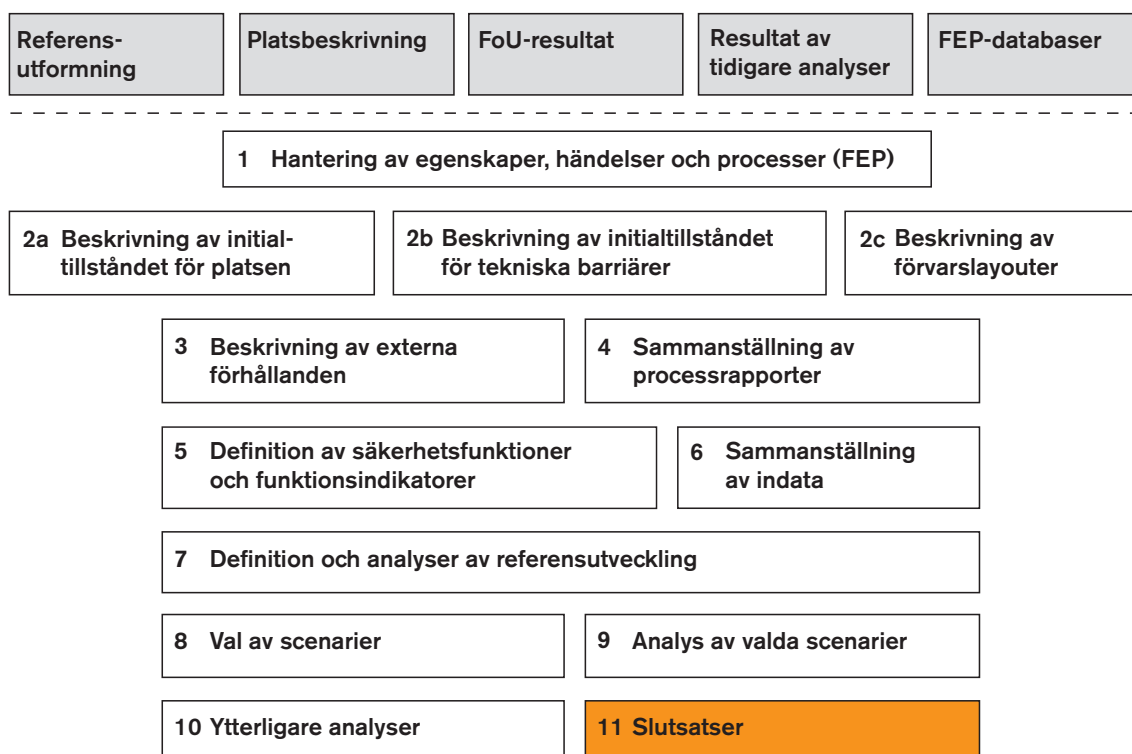
Det finns dock aspekter av studierna av naturliga analogier som begränsar användningen av de uppnådda resultaten. Svårigheten att ta fram de kvantitativa data som behövs för säkerhetsanalyser är den huvudsakliga begränsningen. Information som gäller initialtillståndet hos en egenskap, liksom uppgifter om händelser och processer som påverkar egenskapen under hela dess existens, är sällan helt tillgänglig. Det beror ofta på de långa tidsskalor som det handlar om och systemens komplexitet, vilket är inbyggt i begreppet naturlig analogi.

Sammanfattningsvis har resultaten från studierna av naturliga analogier snarare varit av en kvalitativ än en kvantitativ natur. En koncentration av forskningsinsatser och metodutveckling har uppnåtts genom att forskare och modellörer har deltagit i dessa internationella projekt. Detta ger tillgång till tillräckligt med information för att identifiera processer och scenarier som är relevanta för säkerhetsanalyser. Dessutom utgör erfarenheter från många naturliga analogier ett stöd till långsiktiga säkerhetsanalyser genom att de förbättrar den allmänna uppfattningen av och kunskapen om begreppet slutförvar.

Tabell 14-4. Utvalda källor för några studier av naturliga analogier som har relevans för säkerhetsanalyser av KBS-3V. Denna förteckning är inte uttömmande. Omfattande och intressanta översikter av studier av analogier finns i /Miller et al. 2000/ och /Ruiz López et al. 2004/.

Använt kärnbränsle, transport och fördröjning i geosfären, metodutveckling och testning av modeller	
Oklo, Gabon	Gauthier-Lafaye et al. 2000
Cigar Lake, Kanada	Cramer och Smellie 1994
Poços de Caldas, Brasilien	Chapman et al. 1993
Palmottu, Finland	Blomqvist et al. 2000
Koongarra (Alligator Rivers), Australien	Duerden et al. 1992
Nevada Test Site, USA	Kersting et al. 1999
Kopparkapsel	
Keweenaw Peninsula, USA	Johnson och Francis 1980
Hyrkkölä, Finland	Marcos et al. 1999
Littleham Cove, Storbritannien	Milodowski et al. 2002
Kronans kanon, Sverige	Hallberg et al. 1988
Askledarplattor, Sverige	Hallberg et al. 1984
Buffert och återfyllning	
Djupbrunnar i sedimentbassänger	Velde och Vasseur 1992
Kinnekulle, Sverige	Pusch et al. 1998
Wyoming, USA	Smellie 2001
Almería, Spanien	Villar et al. 2006
Dunarobba, Italien	Valentini et al. 1997

15 Slutsatser



Figur 15-1. SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.

15.1 Inledning

Den huvudsakliga slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site är att ett KBS-3-förvar som uppfyller kraven på långsiktig säkerhet kan byggas på den tilltänkta platsen i Forsmark.

Slutsatsen kan dras eftersom de gynnsamma egenskaperna hos förvarsplatsen i Forsmark säkerställer att KBS-3-förvarets barriärer är långsiktigt hållbara. Framför allt har det visats att kopparkapslarna med deras segjärnsinsatser är tillräckligt motståndskraftiga mot de mekaniska och kemiska påfrestningar som de kan komma att utsättas för i förvarsmiljön.

Slutsatsen baseras på följande omständigheter.

- KBS-3-förvarets säkerhetsfilosofi som bygger på i) en geologisk miljö där de egenskaper som är viktiga för den långsiktiga säkerheten – det vill säga mekanisk stabilitet, låga flödes hastigheter hos grundvattnet på förvarsdjup och avsaknad av höga halter av skadliga ämnen i grundvattnet – är stabila i ett långt tidsperspektiv och ii) valet av naturligt förekommande och i förvarsmiljön tillräckligt beständiga material (koppar och bentonitlera) för de tekniska barriärerna, vilket säkerställer den livslängd hos barriärerna som krävs för att uppnå långsiktig säkerhet.
- Kunskapen om fenomen som påverkar den långsiktiga säkerheten, som har inhämtats genom decenniers forskningsinsatser på SKB och genom internationella samarbeten, vilket har lett fram till en välutvecklad kunskapsbas för säkerhetsanalysen.
- Kunskapen om platsens egenskaper som har uppnåtts genom åtskilliga års undersökningar från ytan av förhållanden på djupet och genom vetenskapliga tolkningar av data från undersökningarna, vilket lett till en välutvecklad platsmodell anpassad till säkerhetsanalysens behov.
- Ett kvalitetssäkrat initialtillstånd som utgångspunkt för säkerhetsanalysen, erhållet genom detaljerade specifikationer för de tekniska delarna av förvaret och genom demonstration av hur komponenter kan tillverkas och kvalitetssäkras så att de uppfyller specifikationerna.

De utförliga analyserna, som har utförts systematiskt i enlighet med en väldefinierad metodik, visar att kapselbrott är sällsynta i ett tidsperspektiv på en miljon år. Även med flera pessimistiska antaganden om de fenomen som kan ha skadlig inverkan på bufferten och kapseln, är kapselbrott så sällsynta att deras försiktigt modellerade radiologiska konsekvenser blir betydligt under en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen.

Som bakgrund till diskussionen om slutsatser i detta kapitel upprepas här huvuddragen för KBS-3-metodens säkerhetskoncept.

- Genom att förlägga förvaret djupt ner i en långsiktigt stabil geologisk miljö isoleras avfallet från människor och miljön på markytan. Detta betyder att förvaret inte påverkas på något avgörande sätt av vare sig samhällsförändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på ytan.
- Genom att placera förvaret på en plats där det omgivande berget inte förväntas bli föremål för något ekonomiskt intresse från framtida generationer, minskar risken för mänskligt intrång.
- Det använda kärnbränslet omgärdas av flera tekniska och naturliga säkerhetsbarriärer.
- Barriärernas primära säkerhetsfunktion är att innesluta bränslet i en kapsel.
- Om inneslutningen skulle brytas är barriärernas sekundära säkerhetsfunktion att fördröja ett eventuellt utsläpp av radionuklider från förvaret.
- Tekniska barriärer ska tillverkas av naturligt förekommande material som är stabila på lång sikt i förvarsmiljön.
- Förvaret ska utformas och konstrueras så att temperaturer som kan ha en betydande skadlig effekt på barriärernas långsiktiga egenskaper undviks.
- Förvaret ska utformas och konstrueras så att strålningsinducerade processer som kan ha en betydande skadlig effekt på de tekniska barriärernas eller det omgivande bergets långsiktiga egenskaper undviks.
- Barriärerna ska vara passiva, det vill säga fungera utan mänskliga ingrepp och utan aktiv tillförsel av material eller energi.

Detta kapitel presenterar detaljerade slutsatser från SR-Site-projektet.

Presentationen av slutsatserna från SR-Site-projektet har två syften:

1. Att påvisa att ett KBS-3V-förvar i Forsmark uppfyller tillämpliga svenska myndighetsföreskrifter.
2. Att ge återkoppling till arbetet med utformningen av förvaret, till SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration, till kommande detaljerade undersökningar på platsen samt till framtida säkerhetsanalysprojekt.

Det första syftet behandlas i avsnitt 15.3 och det andra i avsnitten 15.4 till och med 15.8. Före den formella diskussionen om frågor som rör uppfyllelse av föreskrifterna och den detaljerade återkopplingen ges i avsnitt 15.2 en översikt av resultaten från de olika analyserna.

15.2 Översikt av resultaten

I detta avsnitt sammanfattas de viktigaste resultaten från SR-Site-projektet. Slutsatserna diskuteras och utvecklas vidare i följande avsnitt av detta kapitel.

15.2.1 Uppfyllelse av föreskrifternas riskkriterium

Ett förvar i Forsmark bedöms uppfylla föreskrifternas riskkriterium

De analyser som utförts i SR-Site visar att ett KBS-3V-förvar i Forsmark som byggts i enlighet med nuvarande referensutformning kommer att uppfylla det riskkriterium som SSM fastställt.

Sannolikheten för kapselbrott under de första tusen åren bedöms som försumbar

Det genomsnittliga antalet kapselbrott till följd av jordskalv under de första tusen åren beräknas pessimistiskt till storleksordningen ett på hundratusen. Alla andra typer av kapselbrott bedöms som uteslutna för denna period. Dessutom visar analyserna av förslutningsproceduren för kapslarna att samtliga kapslar kommer att vara täta vid deponeringstillfället.

I ett tidsperspektiv av en miljon år finns ett litet riskbidrag från kapselbrott som orsakas av ökad korrosion till följd av buffererosion

Buffertförlust skulle kunna förekomma om bufferten exponeras för vatten med låg jonstyrka, men omfattningen av detta är osäker. Förvarsplatsen vid Forsmark har stor potential att kunna upprätthålla tillräckligt hög jonstyrka på förvarsdjup under en glaciationscykel. Förlust av buffertmaterial i en sådan omfattning att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet kan emellertid inträffa i ett tidsperspektiv av 100 000 år för normalt färre än tio deponeringshål med höga flödes hastigheter.

Advektiva förhållanden i ett deponeringshål kommer att påskynda kapselkorrosionen. I ett tidsperspektiv av en miljon år kan detta leda till ett fåtal kapselbrott för de mest pessimistiska tolkningarna av de hydrauliska egenskaperna vid förvarsplatsen i Forsmark och med försiktiga antaganden om koncentrationer av korroderande ämnen och sovringskriterier för deponeringshål.

Med pessimistiska antaganden om buffererosion, kopparkorrosion och förhållanden för radionuklidtransport beräknas den radiologiska risken från sådana kapselbrott pessimistiskt till omkring 1/100 av föreskrifternas riskgräns i ett tidsperspektiv av 100 000 år och omkring 1/10 av föreskrifternas riskgräns i ett tidsperspektiv av en miljon år.

I ett tidsperspektiv av en miljon år finns ett litet riskbidrag från kapselbrott till följd av jordskalv

Kapselbrott till följd av stora jordskalv kan inte kategoriskt uteslutas. De probabilistiska analyserna tyder på att det i genomsnitt skulle behövas avsevärt längre tid än en miljon år innan ens ett sådant kapselbrott skulle inträffa.

Bidraget från jordskalv till den radiologiska risken beräknas pessimistiskt vara lägre än 1/100 av föreskrifternas riskgräns i ett tidsperspektiv av 100 000 år och lägre än 1/10 av föreskrifternas riskgräns i ett tidsperspektiv av en miljon år.

15.2.2 Frågor relaterade till förändrade klimatförhållanden

Åtskilliga frågor för långsiktig säkerhet är förknippade med framtida glaciala, periglaciala eller varmare klimatförhållanden. Ett antal slutsatser beträffande effekterna av sådana förhållanden har dragits.

Frysning av bufferten kan uteslutas – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Enligt analyserna kan frysning av bufferten uteslutas även för de mest pessimistiska klimatförhållanden som beaktas, där hänsyn tagits till de stora osäkerheter som är förknippade med den framtida klimatutvecklingen. Även frysning av återfyllningsmaterialet i deponeringstunneln eller av ett vattenfyllt hålrum i en eroderad buffert kan uteslutas för den mest pessimistiska klimatutvecklingen i Forsmark.

Kapselbrott till följd av isostatisk last kan uteslutas – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Enligt analyserna kan kapselbrott till följd av isostatisk last uteslutas för de svåraste framtida glaciala förhållanden som beaktas och som grundas på utvecklingen av glaciationer under de senaste två miljoner åren.

Nedträngning av syre är mycket osannolikt – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden – och konsekvenserna är små

Nedträngning av syre till deponeringshål kan uteslutas förutom för de situationer med ökat vattenflöde som inträffar i samband med den osannolika händelsen att en isfront tillfälligt står stilla över förvaret i kombination med flera andra pessimistiska antaganden. Även om detta skulle inträffa är konsekvenserna i form av kopparkorrosion små.

Förvarssäkerheten under en förlängd period med varmt klimat före nästa glaciala period bedöms som jämförbar med säkerheten vid ett klimat som inte drabbas av effekterna av global uppvärmning

En förlängd period med varmt klimat (global uppvärmning på grund av ökad växthuseffekt) kan leda till att ett förvar i Forsmark i ökad grad utsätts för utspätt grundvatten och därmed till ökad bufferterosion. Den beräknade riskens känslighet för effekterna av en sådan klimatförändring är emellertid låg.

Det är troligt att förekomsten av stora jordskalv ökar under isavsmältningen och denna effekt fördröjs således av en förlängd inledande period med varmt klimat.

15.2.3 Andra frågor relaterade till barriärernas funktion och utformning

Referensutformningen, som utgör grunden för det analyserade initialtillståndet i SR-Site, ger ett säkert förvar i Forsmark

Eftersom analyserna i SR-Site visar att föreskrifternas riskkriterium är uppfyllt, dras slutsatsen att förvaret blir säkert om den analyserade referensutformningen realiserar genom de utvalda produktions- och kontrollrutinerna. Slutsatser kring utformningsfrågor av betydelse för den långsiktiga säkerheten ger återkoppling till vidareutvecklingen av utformningen.

Det är avgörande att undvika deponeringspositioner som skärs av stora eller starkt vattenförande sprickor. Den låga frekvensen av vattenförande sprickor medger att sådana sovringskriterier kan tillämpas effektivt

De riskbidragande faktorerna i SR-Site är förknippade med förekomsten av stora och/eller starkt vattenförande sprickor som skär deponeringshålen. Detta gäller för erosion av bufferten samt påverkan från stora jordskalv i närheten av förvaret. Dessa två fenomen är förknippade med kapselbrott till följd av kapselkorrosion respektive sekundära skjuvrörelser i berggrunden. Eftersom dessutom retentionen är liten i stora, starkt vattenförande sprickor får i allmänhet sådana kapselbrott stora konsekvenser. Sådana sprickor behöver följaktligen identifieras och undvikas.

I SR-Site görs försiktiga antaganden beträffande sannolikheten för att sådana sprickor ska förekomma och beträffande kriterier för att sovra deponeringshål. Resultaten av analysen är känsliga för dessa antaganden. Det är viktigt att fortsätta utveckla acceptanskriterier för deponeringshål som en grund för framtida analyser. Detta måste studeras både genom simuleringar av effekterna av potentiella kriterier och genom att undersöka hur genomförbara kriterierna är.

Värmen från kapseln kommer troligen att spräcka berget i deponeringshålets väggar, vilket skulle öka in- och uttransporten av lösta ämnen, men detta påverkar risken endast i liten omfattning

Termiskt inducerad spjälkning runt deponeringshålen i Forsmark kan inte uteslutas och kan ha en avsevärd inverkan på massutbytet mellan det flödande grundvattnet och bufferten, så länge diffusion är den dominerande transportmekanismen i bufferten. För diffusiva förhållanden är emellertid marginalen till kapselbrott avsevärd, även om spjälkning pessimistiskt antas för alla deponeringspositioner i Forsmark. Om det råder advektiva förhållanden i bufferten är effekterna av spjälkning mycket mindre uttalade, eftersom spjälkning inte i någon större omfattning bidrar till den redan ökade flödeshastigheten. Följaktligen är den totala effekten på den beräknade risken liten.

Betydelsen av en skadad zon i berggrunden runt deponeringstunnlarna som transportväg för radionuklider är begränsad

Betydelsen av en skadad zon (EDZ) runt deponeringstunnlarna är begränsad jämfört med andra transportvägar för radionuklider. Mycket pessimistiska antaganden med avseende på EDZ i förhållande till referensmetoden för utsprängning skulle kunna påverka omfattningen av kapselkorrosion för advektiva förhållanden.

Detta bekräftar att den skonsamma utsprängning som föreskrivs som referensmetod i referensutformningen är lämplig.

I de flesta deponeringshål kommer grundvatten inte att nå kapseln på tusentals år tack vare de gynnsamma egenskaperna hos berggrunden i Forsmark

Tiderna för vattenmättnad av både återfyllningen och bufferten kommer troligen att variera från några tiotals år till flera tusen år som en följd av berggrundens egenskaper (matrisens hydrauliska konduktivitet samt förekomsten av och egenskaperna hos sprickor) i Forsmark. Majoriteten av deponeringshålen skärs inte av vattenförande sprickor, vilket ger en långsam mättnadsprocess (med vatten från deponeringstunneln och bufferten) och ett långsamt inflöde av exempelvis korroderande ämnen i grundvattnet, både under omättade och mättade förhållanden. Även under den omättade fasen kommer transporten av korroderande ämnen genom bentoniten att vara mycket begränsad och domineras av diffusion. Under mättnadsskedet kan den mikrobiella aktiviteten vara förhöjd innan svälltrycket har etablerats. Detta har emellertid liten betydelse, eftersom korrosionen begränsas av massbalans och transport. Eftersom grundvattenflödet under mättnadsskedet är riktat mot deponeringshålen kan ingen erosion av bufferten förekomma under den omättade perioden. Effekterna av den omättade perioden på de geokemiska, mineralogiska och termiska förändringarna av buffertens egenskaper har undersökts i SR-Site. De har befunnits vara små och inte ha någon betydande inverkan på den långsiktiga funktionen.

15.2.4 Tilltro

Tilltron till de erhållna resultaten är tillräcklig för ett beslut om ansökan om tillstånd för att bygga ett förvar

De delar som bidrar till den samlade tilltron till analysresultaten sammanfattas nedan.

- Kunskapen om förvarsplatsen vid Forsmark från de avslutade undersökningarna från ytan är tillräcklig för att analysera den långsiktiga säkerheten. Platsens säkerhetsrelaterade egenskaper är gynnsamma och det har inte identifierats några platsrelaterade frågor som behöver klaras ut ytterligare för att demonstrera säkerheten.
- Det finns en väl etablerad referensutformning med specificerade och genomförbara produktions- och kontrollrutiner som resulterar i ett initialtillstånd för förvarssystemet med egenskaper som främjar långsiktig säkerhet på förvarsplatsen i Forsmark. Det finns utrymme för ytterligare optimering när denna referensutformning vidareutvecklas och genomförs, vilket diskuteras vidare i avsnitten 15.3.5 och 15.5.
- Den vetenskapliga förståelsen för frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad till följd av decenniernas forskning inom svenska och andra nationella program och internationella samarbetsprojekt.
- I SR-Site har en fullständig analys av frågor som identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten genomförts i överensstämmelse med etablerad analysmetodik. Metodiken inbegriper exempelvis ett försiktigt förhållningssätt vid hanteringen av osäkerheter.
- Dokumenterade kvalitetssäkringsrutiner, inklusive expertgranskning, har tillämpats vid utvärderingen av initialtillståndet, vid framtagandet av platsbeskrivningen och vid analysen av den långsiktiga säkerheten.

Diskussionen om tilltro utvecklas vidare i avsnitt 15.3.6.

15.3 Uppfyllelse av föreskriftskrav

15.3.1 Inledning

SSM:s gällande föreskrifter samt de allmänna råden och riktlinjerna för dessa föreskrifter ställer ett flertal krav på utvärdering och redovisning av hur föreskrifterna uppfylls. Kraven kategoriseras och behandlas här enligt följande:

1. Redovisning av den beräknade individrisken, se avsnitt 15.3.3.
2. Redovisning av effekter på miljön från radionuklidutsläpp, se avsnitt 15.3.4.
3. Påvisande av att bästa möjliga teknik (BAT) används, se avsnitt 15.3.5.
4. Diskussion om tilltro, se avsnitt 15.3.6.
5. Andra allmänna krav på systemet, exempelvis påvisande av ett flerbarriärsystem, se avsnitt 15.3.7.
6. Allmänna krav på säkerhetsanalysen (adekvat hantering av osäkerheter, kvalitetssäkring osv), se avsnitt 15.3.8.

Alla aspekter av föreskrifterna ryms emellertid inte inom strukturen ovan. En fullständig redogörelse för hur SR-Site-rapporten uppfyller dessa krav finns därför i bilaga A, där föreskrifterna återges och där hänvisning görs till de avsnitt i denna rapport där varje särskild fråga hanteras.

Analyserna och slutsatserna i SR-Site bygger på en väl etablerad referensutformning med specificerade och genomförbara produktions- och kontrollrutiner som resulterar i ett initialtillstånd för försvarssystemet med egenskaper som främjar långsiktig säkerhet på försvarsplatsen i Forsmark. De tekniska delarna av försvarssystemet grundar sig på beprövad teknik och etablerade kvalitetssäkringsrutiner för att uppnå systemets initialtillstånd, inklusive uppförandet av försvarsanläggningen. Detta dokumenteras systematiskt i **Produktionsrapporterna** och deras underliggande referenser enligt sammanfattningen i kapitel 5.

Som inledning till diskussionen om kravuppfyllelse ges i följande avsnitt 15.3.2 en kortfattad redogörelse av säkerhetskonceptet baserat på resultat från SR-Site-analysen.

15.3.2 Säkerhetskonceptet och säkerhetens allokering till systemkomponenter

Den primära säkerhetsfunktionen i KBS-3-metoden är inneslutning och den sekundära är fördröjning, som träder in om inneslutningsfunktionen inte upprätthålls.

Inneslutning

Inneslutningen ges av ett intakt kopparhölje hos kapseln. Hur denna funktion upprätthålls beror på buffertens funktion att begränsa advektiv transport mellan omgivande berg och kapseln samt på gynnsamma mekaniska, hydrogeologiska och geokemiska egenskaper hos berget: i) begränsade flödes hastigheter och en lägsta laddningskoncentration i grundvattnet för att undvika erosion av bufferten, ii) begränsade flödes hastigheter och låga koncentrationer av sulfid i grundvattnet för att begränsa korrosion, speciellt om bufferten har eroderats och iii) låg sannolikhet för stora sprickor som skär deponeringshålen för att på så vis begränsa eventuell påverkan på kapseln av stora jordskalv i närheten av förvaret.

Analyserna i SR-Site visar att en överväldigande majoritet av kapslarna har kvar sin förmåga att innesluta även i ett tidsperspektiv av en miljon år. Nedbrytning av barriärsystemet i en omfattning som gör att inneslutningen går förlorad har uppskattats till att i medeltal bara inträffa för färre än en kapsel genom påskyndad korrosion efter att bufferten eroderats. Den andra typen av kapselbrott som inte kunde utslutas, den till följd av jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshåll, är ännu mindre sannolik. När denna typ av kapselbrott utvärderas statistiskt, baserat på ett antal pessimistiska antaganden, påverkar den i medeltal betydligt färre än en kapsel. Således bedöms inneslutningen upprätthållas för det stora flertalet av de 6 000 kapslarna under loppet av analysperioden.

Alla säkerhetsfunktioner som har att göra med inneslutning illustreras i figur 8-2. Många av dessa funktioner, som kapselns förmåga att motstå isostatisk last eller bergets "förmåga" att tillhandahålla en gynnsam bergtemperatur, bedöms kunna bestå under hela analysperioden.

Det är också värt att notera att konsekvenserna av en fullständig förlust av den inneslutande förmågan hos alla kapslar minskar med tiden. Vid slutet av analysperioden är den ungefär en faktor tre gånger större än föreskrifternas riskgräns (hypotetiskt fall C i figur 13-67).

Fördröjning

De båda mekanismer för kapselbrott som inte kunde uteslutas påverkar flera barriärer. Kapseln, bufferten och berget påverkas alla, antingen genom en skjuvrörelse med skadliga verkningar eller genom hög flödes hastighet i geosfären. Detta påverkar både erosion och korrosion. Orsakerna till dessa brott inverkar också på retentionsegenskaperna genom höga flödes hastigheter och, i fallet med erosion, genom frånvaron av buffert. Därigenom är förvarets fördröjningspotential i dessa särskilda fall begränsad för de kapslar som har blivit otäta. I stället uppnås säkerhet främst genom att bränslet löses upp långsamt och i mindre grad även genom att korrosions hastigheten hos metalldelarna i bränsleelementen är begränsad.

För de kapslar som upprätthåller sin inneslutningspotential utgör fördröjning en latent säkerhetsfunktion under hela analysperioden. En mer generell bild av fördröjningspotentialen för bufferten och berget ges av de analyser av en hypotetisk fullständig förlust av barriärfunktioner som beskrivs i avsnitt 13.7.3.

Retentionen i bufferten är viktig under de första tusen åren och begränsad under längre tidsskeden (jämför fall C och D i figur 13-67). Det senare beror på det faktum att den totala dosen på lång sikt domineras av icke-sorberande eller mycket långlivade nuklider. En nuklidspecifik jämförelse, se figurerna 13-63 och 13-61, visar emellertid att bufferten har en betydande fördröjande funktion för sorberande nuklider också på lång sikt. Detta syns inte i den totala dosen på grund av de icke-sorberande nuklidernas dominans.

Retention i berget spelar en likartad roll. För totaldosen är den viktig under de första tusen åren och begränsad i det längre tidsperspektivet (jämför fall C och C* i figur 13-67), detta återigen eftersom totaldosen då domineras av nuklider som berget inte sorberar. En nuklidspecifik jämförelse, se figurerna 13-62 och 13-61, visar emellertid att berget har en betydande fördröjande funktion för sorberande nuklider också på lång sikt, vilket inte syns i den totala dosen på grund av de icke-sorberande nuklidernas dominans. Även de låga flödes hastigheterna på förvarsdjup spelar en stor roll för att begränsa utsläppshastigheten för radionuklider till berget.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis är inneslutning den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-förvaret. Analysen visar att inneslutningen upprätthålls effektivt på förvarsplatsen i Forsmark under hela analysperioden, direkt genom kapselns egenskaper och indirekt genom bergets gynnsamma hydrogeologiska och geokemiska egenskaper. Vid de sällsynta fall då inneslutningen bryts, är fördröjning av begränsad betydelse. Det beror på att de mekanismer som leder till brott påverkar flera barriärer, samt på att endast mycket långlivade nuklider återstår när dessa brott inträffar. Som en latent funktion är fördröjning betydelsefull för hypotetisk frigörelse av i synnerhet sorberande nuklider under hela analysperioden. För hypotetiska fall som enbart påverkar kapselns inneslutning, blir fördröjningen av sorberande nuklider i buffert och i berg avsevärd.

15.3.3 Uppfyllelse av SSM:s riskkriterium

I detta avsnitt diskuteras hur SSM:s riskkriterium uppfylls för olika tidsperspektiv. En diskussion av tilltron till resultaten ges i avsnitt 15.3.6. Exempelvis diskuteras grunden för att anta de initialtillstånd och platsegenskaper som analysen bygger på.

Föreskrifternas krav

Det primära kriteriet som enligt de svenska föreskrifterna ska uppfyllas är SSM:s riskkriterium. En redovisning av den beräknade risken är därför en väsentlig komponent då kravuppfyllelse för de första tusen åren ska påvisas. Detta anges också uttryckligen i SSM:s allmänna råd, som också efterfrågar en redovisning av riskbidrag från varje analyserat scenario.

En riskberäkning krävs även för den inledande glaciationscykeln. För denna period anger SSM:s allmänna råd följande:

”Redovisningen bör baseras på en kvantitativ riskanalys i enlighet med råden till 5–7§§. Kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden, koncentrationer i miljön bör användas för att stärka trovärdigheten i beräknade risker. Tidsangivelsen hundratusen år är ungefärlig och bör väljas så att påverkan av förväntade stora klimatförändringar, t ex en glaciationscykel, på slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser kan illustreras.”

Beträffande tiden bortom den inledande glaciationscykeln, anger SSM följande i sina allmänna råd: ”Riskanalysen bör belysa den långsiktiga utvecklingen av slutförvarets barriärfunktioner samt betydelsen av större yttre störningar på slutförvaret som t ex jordskalv och glaciationer. Med hänsyn till de, med tiden, ökande osäkerheterna bör beräkningen av stråldoser till människa och miljö göras på ett förenklat sätt med avseende på klimatutveckling, biosfärsförhållanden och exponeringsvägar. Klimatutvecklingen kan förenklat beskrivas som en upprepning av identiska glaciationscykler.

En strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk mot föreskrifternas kriterium för individrisk är inte meningsfull. Bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga bör i stället baseras på ett resonemang kring den beräknade risken tillsammans med flera kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden och koncentrationer i miljön. Om den beräknade risken överstiger föreskrifternas kriterium för individrisk, eller om det finns andra indikationer på betydande störningar av slutförvarets skyddsförmåga, bör de bakomliggande orsakerna till detta redovisas, liksom möjliga åtgärder för att förbättra slutförvarets skyddsförmåga.”

Beräknad individrisk i SR-Site

En utförlig sammanfattning av den beräknade individrisken för ett förvar i Forsmark ges i avsnitt 13.9. Detaljerna upprepas inte här, men som bakgrund till diskussionen nedan återges i figur 15-2 det numeriska resultatet från en summering av risken från de två bidragande scenarierna korrosionsscenarioet och skjuvlastscenarioet.

Uppfyllelse under de inledande tusen åren

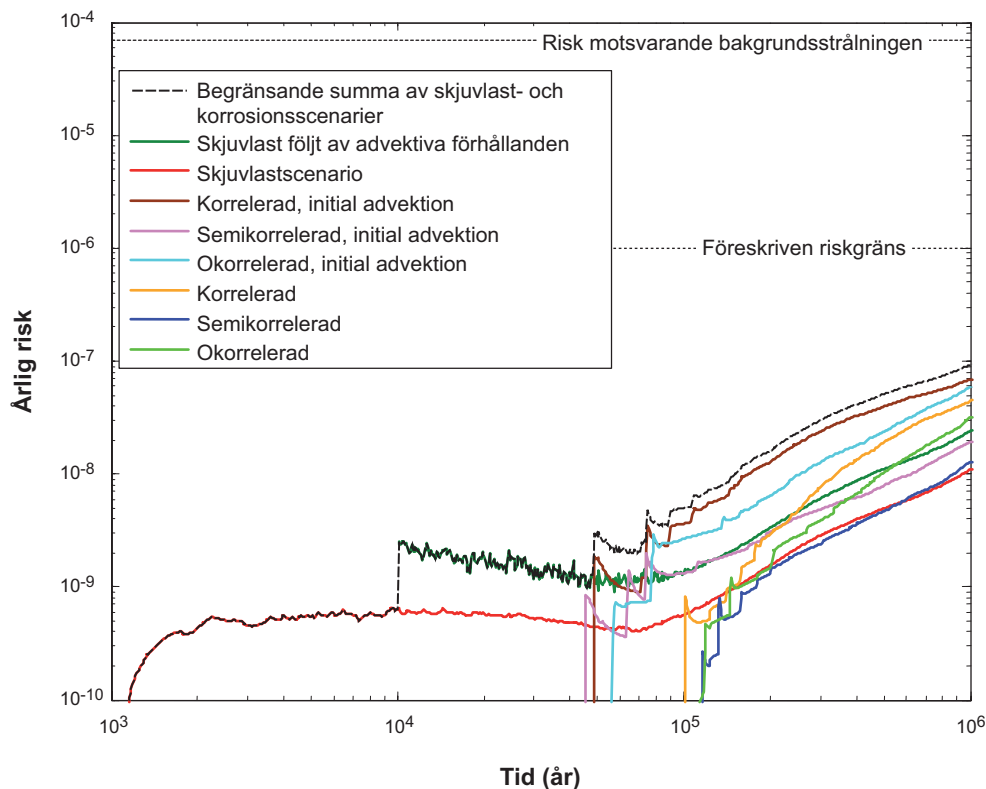
Alla kapslar bedöms vara täta vid deponering. Den initiala koppartjockleken diskuteras i redogörelsen för kapselns initialtillstånd i avsnitt 5.4.3. Den initiala minsta koppartjockleken anges till 47,5 mm i tabell 5-9. Om hänsyn även tas till förekomsten av lokala interna defekter i kopparhöljet bedöms inga kapslar ha lokala reduktioner i kopparhöljets tjocklek som överskrider 20 mm. Detta gäller för korrosionsbarriärens tjocklek efter tillverkning och den kontroll som utförs efter den slutliga maskinbearbetningen av kapselkomponenterna.

Enligt kraven i SSM:s föreskrifter har många aspekter av förvarsutvecklingen modellerats i detalj för de första tusen åren. Detta gäller den termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska utvecklingen samt även effekter på bufferten och kapseln. Detaljerade redogörelser ges i avsnitten 10.2 (bygg- och driftskedet) och 10.3 (den inledande perioden med tempererat klimat efter förslutningen). Även biosfärsutvecklingen modelleras i detalj för denna tidsperiod.

Av de tre identifierade typerna av kapselbrott, dvs brott till följd av korrosion, skjuvlast och isostatisk last, går det att med stora marginaler utesluta kapselbrott till följd av korrosion och isostatisk last under de inledande tusen åren, vilket framgår av referensutvecklingen (se kapitel 10) och analyserna av scenarierna med korrosion och isostatisk last, se avsnitt 12.6 respektive 12.7.

Skjuvlaster på kapseln kan uppkomma som en följd av stora jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen. Även om sannolikheten för stora jordskalv är högre under perioder med tektonisk spänning, exempelvis vid isavsmältning, kan det inte helt och hållet uteslutas att ett jordskalv med skadeverkningar skulle kunna äga rum under de första tusen åren.

Sannolikheten att en av de 6 000 kapslarna har förlorat sin integritet i slutet av den första tusenårsperioden uppskattas till $2,4 \cdot 10^{-5}$, se även avsnitt 10.4.5. Hypotetiskt skulle det alltså behöva byggas 40 000 förvar med vardera 6 000 kapslar för att ett enda kapselbrott under de första tusen åren ska förväntas. Trots denna extremt låga sannolikhet beräknades ett riskbidrag för de första tusen åren.



Figur 15-2. Riskkurvor uttryckta som årlig individrisk. Flera alternativ för korrosionsscenarioet och två för skjuvlastscenarioet visas. Den gränssättande streckade kurvan utgör summan av kurvan för skjuvbrott följt av advektiva förhållanden (mörkgrön) och kurvan för den variant av korrosionsscenarioet som ger den högsta risken (brun). Risken förknippad med huvudscenarioet täcks in av korrosionsscenarioet, eftersom detta representeras av det semikorrelerade fallet (blå).

Resultatet visade att medelårsdosen som högst ligger omkring 0,001 $\mu\text{Sv}/\text{år}$, vilket motsvarar en risk på $10^{-10}/\text{år}$, se figur 13-49 i avsnitt 13.6. Denna analys baseras på detaljerad modellering av biosfärsutvecklingen och radionuklidtransport i det föränderliga landskapet under de första tusen åren, i enlighet med vad SSM:s föreskrifter kräver.

Därför dras slutsatsen att det analyserade förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium under de inledande tusen åren efter förslutning.

I hypotetiska fall med initialt defekta kapslar finns det flera egenskaper hos barriärsystemet som ger skydd. Några av dessa är oviktiga eller svårare att hävda för längre tidsperspektiv. Enligt diskussionen i avsnitt 13.9.5 skulle med försiktiga antaganden några av dessa egenskaper på egen hand förebygga alla utsläpp under de inledande tusen åren med en initialt defekt kapsel. Detta gäller speciellt den tid det tar för vatten att komma i kontakt med bränsleelementen samt Zircaloykapslingens integritet.

Uppfyllelse under den inledande glaciationscykeln

Enligt resultaten i avsnitt 13.9, vilka återges i figur 15-2, är den beräknade pessimistiskt gränssättande risken under den första 120 000 år långa glaciationscykeln som högst omkring $10^{-8}/\text{år}$, vilket är omkring två storleksordningar lägre än den gräns som föreskrifterna anger.

Det är bara skjuvlastscenarioet som bidrar till risken under de första tiotusentals åren. Konsekvenserna i korrosionsscenarioet uppträder efter omkring 50 000 år för det mycket pessimistiska gränssättande fallet där advektion antas för samtliga deponeringshål redan vid förslutning. Med försiktiga skattningar av omfattningen av bufferterosion uppträder de första av korrosionsscenarioets konsekvenser som tidigast efter omkring 100 000 år.

Förvarets funktion för tiden bortom den inledande glaciationscykeln upp till en miljon år

Enligt resultaten i avsnitt 13.9, vilka återges i figur 15-2, är den beräknade pessimistiskt gränssättande risken efter den första 120 000 år långa glaciationscykeln upp till en miljon år som högst omkring 10^{-7} /år. Denna risk ligger omkring en storleksordning lägre än den gräns som föreskrifterna anger.

Både skjuvlastscenariot och korrosionsscenarioet bidrar till den beräknade risken under detta tidsskede. Bidragen är storleksmässigt jämförbara. Det går emellertid inte att göra en direkt jämförelse av de två riskbidragen eftersom båda representeras av pessimistiskt gränssättande fall och eftersom de pessimistiska antagandena är olika för de två scenarierna.

Alternativa säkerhetsindikatorer för denna tidsperiod diskuteras nedan.

Riskutspädning

Riskutspädning analyserades i samband med risksummeringen i avsnitt 13.9 och resultatet befanns inte motsäga slutsatsen beträffande uppfyllelse av riskkriteriet för någon av tidsperioderna.

Alternativa säkerhetsindikatorer

Särskilt när det gäller tider långt in i framtiden blir den beräknade risken allt mindre användbar som en indikator på förvarets säkerhet. Enligt SSM:s föreskrifter ska alternativa indikatorer därför också utvärderas. Fyra alternativa säkerhetsindikatorer används i SR-Site på så sätt som beskrivs i avsnitt 13.5.8. Följande resultat erhöles för det centrala korrosionsfallet.

- De högsta aktivitetsutsläppen från geosfären ligger ungefär tre storleksordningar under de aktivitetsbegränsningar som den finska tillsynsmyndigheten STUK föreskrivit.
- Det högsta radiotoxicitetsflödet från geosfären är mer än tre storleksordningar lägre än det referensvärde för radiotoxicitetsflödet från geosfären som EU-projektet SPIN föreslår.
- De beräknade högsta koncentrationerna av radionuklider i Forsmarks ekosystem efter utsläpp av Ra-226 från förvaret är ungefär tre storleksordningar lägre än de uppmätta koncentrationerna av naturligt förekommande Ra-226 i Forsmark.
- De högsta geosfärsflödena som orsakas av Ra-226 som släpps ut från förvaret är ungefär två storleksordningar lägre än de naturligt förekommande lokala flödena av Ra-226 som de uppskattats från platsdata. Skillnaden är större för U-234 och U-238. Det totala utsläppet av alla nuklider från förvaret, omvandlat till dos, är också omkring två storleksordningar lägre än den summerade dosen från flöden som omfattar de tre nämnda naturligt förekommande nukliderna.

Resultaten kan utan svårigheter tillämpas också på andra korrosionsfall. För flertalet indikatorer görs det genom att helt enkelt skala till utsläppet av Ra-226, vilket som mest är en storleksordning högre än det för det centrala korrosionsfallet.

Liknande slutsatser har dragits för skjuvlastscenariot, vilket redovisas i **Radionuklidtransportrapporten**.

Sammanfattningsvis visar tillämpningen av alternativa indikatorer att utsläpp från förvaret ligger storleksordningar under de referensvärden som antagits för indikatorerna. Det tyder på att framtida radiologiska konsekvenser för människa och miljö som uppstår genom utsläpp från förvaret är försumbara och att detta gäller oberoende av antaganden i biosfärsmodellen.

Tiden bortom en miljon år

Förvarets utveckling efter en miljon år diskuteras i avsnitt 14.5.

Förändringen av det använda kärnbränslets radiotoxicitet under perioden upp till tio miljoner år redovisas i figur 2-1 i avsnitt 2.4.

Även om berget, de plastiska och de spröda deformationszonerna i Forsmark alla bildades för åtminstone en miljard år sedan, gör de ökande osäkerheterna beträffande de yttre förhållandena att det inte är meningsfullt att förutsäga utvecklingen av platsen och förvaret för tidsperioder bortom en miljon år.

Det är värt att notera att det hypotetiska fallet i avsnitt 13.7.3, där alla kapslar uppvisar brott, bufferten är borta och man bortser från retentionen i berget, resulterar i utsläpp som efter en miljon år motsvarar doskonsekvenser som är jämförbara med den naturliga bakgrundsstrålningen. I det fallet bestäms utsläppen av flödet på förvarsdjup och av radionuklidinnehållet, av vilka det senare minskar med tiden och domineras av radionuklider som också förekommer i naturliga malmkroppar.

Avslutningsvis visar geologiska observationer att det finns uranmalmer som är många miljoner, upp till miljarder år gamla. Det tyder på att med stabil tektonik och med bevarade reducerande förhållanden i förvaret kan den uranoxid som bränslematrisen består av vara stabil under många miljoner år.

Osäkerheter förknippade med riskberäkningen för olika tidsperioder

Osäkerheter som påverkar den beräknade risken i betydande utsträckning visas i tabell 13-13 i avsnitt 13.10. Där sammanfattas hanteringen av osäkerheter i SR-Site och hänvisningar görs till de planer som finns för att minska dessa osäkerheter. Enligt tabellen har flertalet osäkra faktorer behandlats pessimistiskt, medan några har hanterats med sannolikhetsfördelningar i riskberäkningarna, där deras fulla osäkerhetsintervall används för att fastställa genomsnittliga årsdoser vilket är det relevanta måttet för att bestämma den beräknade risken.

Kombinationen av pessimistisk hantering av osäkerheter för vilka sannolikhetsfördelningar inte kunde bestämmas med den probabilistiska hanteringen av kvantifierade osäkerheter innebär att den totala risken enligt risksummeringen i avsnitt 13.9 hävdas stå för en övre gränssättande risk. Eftersom denna övre begränsning ligger under riskgränsen under hela den en miljon år långa analysperioden finns det inga riskrelaterade osäkerheter som är av kritisk betydelse att lösa.

15.3.4 Effekter på miljön av radionuklidutsläpp

Doser till biota har beräknats för det centrala korrosionsfallet i enlighet med metodiken som beskrivs i avsnitt 13.2.5. Resultaten redovisas i avsnitt 13.5.7. De högsta doshastigheterna för organismer i havsvattens-, sötvattens- och landekosystem i Forsmark, både totalt och för de dosdominerande radionukliderna, ligger väl under den doshastighet (10 μ Gy/h) som rekommenderas som gräns i den s k ERICA-metoden. Därför dras slutsatsen att de radionuklidutsläpp som förutsägs för detta fall inte kommer att leda till några biologiska effekter av betydelse för individer hos befintliga arter eller hos de arter som i framtiden kan komma att finnas på förvarsplatsen. Följaktligen förväntas ingen skadlig inverkan på populationer, samhällen eller ekosystem.

Resultaten kan utan svårigheter tillämpas också på andra korrosionsfall genom att skala utsläppen av nukliderna i fråga. Dessa ligger som mest omkring en storleksordning högre än utsläppen för det centrala korrosionsfallet. Det betyder att slutsatsen för det centrala korrosionsfallet gäller även för alla andra korrosionsfall som beaktas i SR-Site.

Doser till biota från utsläpp av radionuklider i skjuvlavlastscenariot har inte analyserats i SR-Site. Eftersom utsläppen i allmänhet är lägre för detta scenario jämfört med korrosionsscenarioet och eftersom marginalen till referensvärdet för det senare scenariot är flera storleksordningar, dras slutsatsen att påverkan på miljön är försumbar för skjuvlavlastscenariot.

15.3.5 Optimering och bästa möjliga teknik, BAT

Grunden för hur SR-Site bidrar till redovisningen av optimering och bästa möjliga teknik (BAT) beskrivs i avsnitt 2.7. Där anges också befintliga föreskriftskrav och allmänna råd. En allmän redovisning av användandet av bästa möjliga teknik är en bred fråga, som spänner från valet av metod för att ta hand om kärnavfall till detaljer i den valda metoden. Det är dock endast en begränsad del av denna breda fråga som kan och ska beaktas i säkerhetsanalysen av den valda metoden.

Baserat på resultaten i SR-Site och särskilt den specifika analys som redovisas i avsnitt 14.3, kan återkoppling ges avseende förändringar i den analyserade referensutformningen som skulle kunna leda till minskad risk eller till att minska osäkerheter som kan påverka risken. Beträffande aspekter på utformningen, där man realistiskt sett inte kan uppnå någon sådan minskning av risk eller osäkerhet i uppfyllandet av säkerhetsfunktioner, hävdas att lösningen är optimal och motsvarar BAT. I SR-Site görs

emellertid inte någon analys av alla tänkbara tekniska lösningar. SKB kommer att fortsätta den tekniska utvecklingen av flera aspekter på utformningen för att på så vis förenkla byggande och genomförande, men kommer bara att använda dessa lösningar om de leder till en risk som är jämförbar med eller lägre än den som redovisats i SR-Site.

Kapseln

Analysen som redovisas i avsnitt 14.3 visar följande:

- En ökning av koppertjockleken till 10 cm minskar det genomsnittliga antalet kapslar med korrosionsgenombrott vid en miljon år med en faktor tre, medan en halvering av tjockleken till 2,5 cm ökar antalet med ungefär en faktor två. Eftersom den risk som beräknats för referensutformningen är lägre än föreskrifternas gränsvärde är dock den minskning av risken som en ökning av tjockleken ger måttlig. På grund av också de ytterligare problem som följer med tillverkning och förslutning av en tjockare kapsel anses den valda koppertjockleken vara adekvat med avseende på bästa möjliga teknik.
- De specificerade värdena för töjning och krypduktilitet i kopparhöljerna har befunnits vara lämpliga. En förändring av dessa egenskaper skulle inte i någon större omfattning öka kapselns förmåga att stå emot även större skjuvlaster.
- Segjärnsinsatsens förmåga att motstå skjuvlaster beror främst på förekomsten av ytdefekter i insatsen. Medan slutsatsen i **Produktionsrapporten för kapseln** är att den nuvarande referensutformningen för kapseln överensstämmer med de fastslagna konstruktionsförutsättningarna, noteras det att rigorösa krav på tillverkning och oförstörande provning (OFP) behöver ställas. En omarbetning av utformningen av systemet kapsel-buffert så att lasterna på insatsen minskar, exempelvis genom att minska buffertdensiteten, skulle således sänka kraven på tillverkning och oförstörande provning av insatsen. Det har inte heller genomförts någon formell analys av om insatserna avsedda för PWR-bränsle uppfyller kriterierna, men PWR-utformningen är robustare på grund av att materialet är tjockare i segjärnsinsatsen.
- För den befintliga referensutformningen är marginalen till kapselbrott till följd av isostatisk last mycket god, även för de mest extrema lastsituationerna. Det förefaller inte finnas något behov av att ändra utformningen för att öka denna marginal.

Från säkerhetssynpunkt förefaller det sammanfattningsvis inte finnas behov av att ändra på kapselns utformning. De formella analyserna av om PWR-insatserna uppfyller kriterierna måste dock naturligtvis så småningom genomföras.

Bufferten

Analysen som redovisas i avsnitt 14.3 visar följande:

- Större mängd buffertmaterial, exempelvis genom ökad bufferttjocklek eller buffertdensitet, anses inte vara ett praktiskt sätt att dämpa effekterna av buffererosion. En större mängd buffertmaterial kan leda till att det tar något längre tid innan det uppstår advektiva förhållanden i deponeringshållet, men detta bedöms inte vara en lösning på problemet med buffererosion.
- Analysen av buffererosion/kolloidfrigörelse, som sammanfattas i avsnitt 10.3.11, visar att detta fenomen inte kan uteslutas i analysen av den långsiktiga säkerheten. Modelleringen av kolloidbildning och efterföljande erosion av buffertmaterialet är dessutom fortfarande osäker och angreppssättet vid modelleringen tenderar därför att vara pessimistisk. Det står också klart att det med nuvarande kunskaper inte finns något försvarbart sätt att minska osäkerheterna, exempelvis genom att välja ett annat buffertmaterial. Det finns behov av ett fortsatt forskningsprogram om mekanismer för buffererosion och ett sådant pågår.
- En sänkning av bentonitdensiteten medför att spänningen på segjärnsinsatsen minskar. Ytterligare minskningar av den maximalt tillåtna buffertdensiteten som i praktiken fortfarande är förenliga med kraven på minimal buffertdensitet kan vara möjliga, åtminstone i form av en statistisk fördelning. Således ger SR-Site denna återkoppling för uppdatering av konstruktionsförutsättningarna och för revidering av buffertens utformning, se avsnitt 15.5.7.

Sammanfattningsvis är det möjligt att ytterligare minska risken genom att vidareutveckla buffertens utformning och anpassa tillverkningen av bufferten och deponeringshålen så att de överensstämmer med denna utformning.

Återfyllningen i deponeringstunnlar

Analysen som redovisas i avsnitt 14.3 visar att bufferten och dess säkerhetsfunktioner kommer att upprätthållas under buffertens expansion in i återfyllningen för alla tänkbara kombinationer av buffert- och återfyllningsförhållanden. För fallet med förlust av återfyllningsmaterial kan en maximal förlust av 220 ton i en sektion av en deponeringstunnel tillåtas innan advektiva förhållanden måste beaktas i ett underliggande deponeringshål. Ingen av de enskilda sprickor som skär tunneln nära deponeringshål kommer emellertid att ge upphov till erosion av återfyllningen i sådan omfattning att förlusten i svälltryck innebär att advektiva förhållanden måste antas för de underliggande deponeringshålen. För ett fåtal lägen där tunneln skärs av en mycket transmissiv deformationszon kan potentiellt mer än 220 ton förloras. Eftersom dessa lägen är långt från deponeringshålen bedöms emellertid detta inte ha någon negativ inverkan på säkerheten. Även om det går att förbättra återfyllningens utformning med avseende på hur den installeras, har det inte identifierats något behov av att ändra utformningen för att ytterligare stärka dess säkerhetsfunktion.

Förvarslayout och acceptanskriterier för deponeringstunnlar och deponeringshål

Enligt avsnitt 14.3 är det viktigt att tillämpa acceptanskriterier för deponering i form av EFPC för att begränsa risken. Detta både direkt för att minska risken för skjuvbrott till följd av jordskalv och indirekt för att begränsa de framtida höga flöden som påverkar risken för att det ska uppstå advektiva förhållanden i bufferten och potentialen för efterföljande kapselbrott till följd av korrosion.

Med avseende på skjuvbrott är det enligt /Munier 2010/, troligt att kritiska sprickor som inte hittas med strikt tillämpning av EPFC verkligen kommer att hittas med ett adekvat undersökningsprogram. Det är också troligt att antalet potentiellt skadade kapslar kommer att vara färre än vad som förutses i denna analys.

För korrosionsbrott minskar tillämpning av EFPC markant antalet deponeringshål med höga Darcy-flöden, eftersom det finns en korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet. Storleksordningen på denna korrelation är dock osäker. Om det dessutom var möjligt att ännu bättre identifiera det fåtal deponeringshål som har de största Darcyflödena under mättade förhållanden, innan kapslarna deponeras, skulle detta ytterligare minska den redan låga risken, utan någon betydande förlust av användbara deponeringspositioner.

Med avseende på bästa möjliga teknik ger det befintliga EFPC tillräckligt skydd mot skjuvbrott. Det finns dock anledning att fortsätta det arbete som beskrivs i det detaljerade undersökningsprogrammet för att hitta kritiskt stora sprickor på andra sätt, eftersom ett sådant arbete troligen också leder till kriterier där färre deponeringshål skulle behöva uteslutas. Därigenom skulle ett både säkrare och effektivare förvar kunna utformas.

Tillämpning av EFPC är viktigt för skyddet mot korrosionsbrott. Kriterier som är direkt kopplade till flödesegenskaperna skulle emellertid vara att föredra framför indirekta kriterier. Dessutom förefaller det finnas möjligheter att ytterligare öka säkerheten genom att undvika deponeringshål med höga inflöden. Detta även om korrelationen mellan inflöden under driftskedet och flödesegenskaper på lång sikt inte är ett-till-ett givet skillnaderna i randvillkor. Inflödena kommer dessutom att störas av det öppna hålet, så kallade tätningseffekter (skin effects), och av injektering. Det kommer också att finnas en praktisk undre detektionsgräns. Sådana störningar kan delvis hanteras genom att kräva att deponeringshål som skärs av sprickor som kan ge inflöden som är högre än ett angivet värde ska undvikas. Detta tyder på att de hydrauliska egenskaperna hos de sprickor som skär borrhålet ska testas i pilohålet innan det fullskaliga hålet borrar, varvid tätningseffekterna minimeras. Dessutom bör deponeringshål som skärs av sprickor med synlig mängd injekteringsmaterial uteslutas, eftersom förekomsten av injekteringsmaterial tyder på att sprickan var relativt transmissiv före injekteringen.

Analysen i avsnitt 14.3 visar också att antalet kapselbrott till följd av korrosion skulle öka om det förekom en skadad zon med avsevärt högre transmissivitet än den för närvarande föreskrivna gränsen på 10^{-8} m²/s. Analysen visar dock också att det inte finns något behov av att tillämpa en mer restriktiv gräns. Antalet kapselbrott skulle inte minska ens om det inte fanns någon skadad zon alls.

Analyserna visar sammanfattningsvis att det väsentligen är layoutens detaljer, exempelvis den exakta placeringen av deponeringshålen och vilka deponeringshål som skulle kunna godkännas, som är av betydelse för de scenarier som bidrar till risken (korrosionsbrott och skjuvbrott). Dessa detaljer kan

fastställas slutgiltigt först under förvarets bygg- och driftsfas genom att tillämpa observationsmetoden där resultat från de detaljerade undersökningarna under jord används, samt genom att tillämpa konstruktionsförutsättningarna för att utesluta deponeringshål enligt diskussionen ovan. Frågan om huruvida förvarslayouten är BAT kan i detta skede endast analyseras utifrån dessa konstruktionsförutsättningar. En mer specifik återkoppling för dessa förutsättningar ges i avsnitt 15.5.

Förvarsdjup

Enligt slutsatsen från analysen i avsnitt 14.3.4 av huruvida det valda förvarsdjupet är adekvat, har förvarsdjupet huvudsakligen fastställts utifrån de hydrauliska förhållandena i Forsmark, dvs frekvensen och förekomsten av transmissiva sprickor och dessas beroende av djupet. Byggbarheten beror emellertid i huvudsak på bergmekaniska frågeställningar, exempelvis sannolikheten för spjälkning och omfattningen av spjälkning i deponeringshålen före deponeringen. Mer utförliga slutsatser ges nedan.

- Faktorer som är relaterade till säkerhetsfunktion R1 för kemisk stabilitet, ”Tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden”, är i allmänhet gynnsamma vid det valda djupet. De enda kvarvarande frågorna som rör kemisk stabilitet och som har betydelse för förvarets säkerhet är kopplade till risken för att ett fåtal deponeringshål utsätts för grundvatten med alltför låg jonstyrka och till förekomsten av sulfid. I allmänhet minskar risken för nedträngning av utspädda vatten med ökat förvarsdjup. Den låga förekomsten av migrationsvägar med hög transmissivitet i det i allmänhet mycket täta berget innebär emellertid att endast ett fåtal sådana händelser är möjliga. Det finns inga bevis för att en praktiskt realistisk ökning av djupet (i storleksordningen 100 m) skulle leda till en markant minskning av förekomsten av sådana isolerade vägar – och det förefaller vara en bättre strategi att försöka undvika dem lokalt. Det finns vidare inget som tyder på att förekomsten av sulfid är korrelerad till djup.
- Säkerhetsfunktion R2a ”Transportmotstånd i sprickor, F ” påverkas av förvarsdjupet. Transportvägarna för lösta ämnen i grundvattnet kommer att bli längre med ökande djup, men den påverkan detta får på transportmotståndet skulle endast vara marginellt.
- Både säkerhetsfunktion R2a ”Transportmotstånd i sprickor, F ” och R2b ”Ekvivalent flöde i gränssytan mellan buffert och berg, Q_{eq} ” påverkas av förvarsdjupet, eftersom sprickfrekvensen och sprickornas transmissivitet är djupberoende. Det valda förvarsdjupet under nivån 450 m är emellertid tillräckligt för att nå de bergvolymerna vid Forsmark som har låg sprickfrekvens och låg permeabilitet och det förefaller inte finnas några fördelar med ett större djup än så.
- Grundvattentrycket, säkerhetsfunktion R3a, ökar med djupet. Jämfört med buffertens svälltryck och det hydrostatiska trycket från en glacial last är detta ökade tryck dock endast av marginell betydelse.
- Bergspänningar påverkar indirekt säkerhetsfunktion R2b ”Ekvivalent flöde i gränssytan mellan buffert och berget, Q_{eq} ”, eftersom spänningen in situ avgör risken för spjälkning. Spänningen ökar i allmänhet med djupet, men en placering av förvaret på 400 m eller 500 m djup ökar inte påtagligt risken för spjälkning i deponeringshålen.
- Temperaturen in situ är kopplad till säkerhetsfunktion R4 ”Tillhandahålla gynnsamma termiska förhållanden”. Temperaturen ökar med djupet och detta måste beaktas då förvarets layout utformas. Förutsatt att detta beaktas i förvarsutformningen så finns det inga andra skadliga effekter av den med djupet ökande temperaturen in situ.
- Sannolikheten för frysning, säkerhetsfunktion R4, minskar med ökande djup. Analyserna i SR-Site har emellertid visat att frysning av bufferten kan betraktas som ett restskenario och även att frysning av återfyllningen i deponeringstunneln vid dessa djup kan uteslutas.
- Denudation av bergytan (erosion och vittring) har uppskattats till att i allmänhet begränsas till ett fåtal meter eller mindre per glaciationscykel vid förvarsplatsen i Forsmark och till några tiotals meter efter en miljon år. Därför behöver denudation av ytan inte beaktas då förvarsdjupet fastställs inom referensintervallet 400–700 m.
- Sannolikheten för oavsiktliga mänskliga intrång i förvaret minskar med ökande djup. I allmänhet betraktas intrång ned till fler hundra meter i resursfattig berggrund som osannolikt.

Sammanfattningsvis är det valda förvarsdjupet tillräckligt och ett ändrat djup bedöms inte kunna signifikant minska den beräknade risken. En ytligare placering, exempelvis grundare än 400 m,

skulle kunna öka risken, eftersom förekomsten av vattenförande sprickor är högre där. Att placera förvaret något hundratals meter djupare ner skulle förmodligen resultera i en risk som är jämförbar med den för det valda djupet. En mycket djupare placering av förvaret skulle innebära ett behov av att beakta ytterligare faktorer, exempelvis mycket höga spänningsnivåer.

15.3.6 Tilltro

Analysen i SR-Site stödjer SKB:s ansökan om ett slutförvar, en avgörande beslutspunkt i SKB:s program för hantering av använt kärnbränsle. Ett utlåtande om tilltron till de resultat som tagits fram i SR-Site är därför ändamålsenligt. Tilltron till de resultat som tagits fram bedöms som tillräcklig för det förestående beslutet, baserat på följande:

- Kunskapen om förvarsplatsen vid Forsmark från de avslutade undersökningarna från ytan är tillräcklig för att analysera den långsiktiga säkerheten. Platsens säkerhetsrelaterade egenskaper är gynnsamma. Det har inte identifierats några platsrelaterade frågor som kräver ytterligare utredning för att demonstrera säkerheten. Tilltron till den platsbeskrivande modellen och platsförståelsen har uppnåtts genom ett systematiskt och kvalitetssäkrat program för platsundersökningar och platsmodellering. Tilltron till platsmodellen har analyserats i detalj och finns dokumenterad i **Platsbeskrivning Forsmark**. Platsens viktiga egenskaper redovisas i kapitel 4 i denna huvudrapport.
- Det finns en väl etablerad referensutformning med specificerade och genomförbara produktions- och kontrollrutiner som resulterar i ett initialtillstånd för förvarssystemet med egenskaper som främjar den långsiktiga säkerheten på förvarsplatsen i Forsmark. De tekniska delarna av förvarssystemet grundar sig på beprövad teknik och etablerade kvalitetssäkringsförfaranden för att uppnå systemets initialtillstånd. Detta dokumenteras systematiskt i **Produktionsrapporterna** och deras underliggande referenser enligt sammanfattningen i kapitel 5. Exempel på viktiga aspekter av initialtillståndet för de tekniska barriärerna är:
 - a. Kvaliteten hos kopparkapselns förslutningsprocess.
 - b. Kvaliteten vid produktionen av segjärnsinsatsen.
 - c. Buffertegenskaper som densitet och innehåll av montmorillonit och föreningar.
 - d. Egenskaper hos återfyllningen som säkerställer dess förmåga att hålla bufferten på plats och svälla.
 - e. Kvaliteten hos metoden för att anpassa förvaret till detaljförhållandena under jord och kvaliteten vad gäller tekniken för berguttag.
 - f. Deponeringsteknikens kvalitet.

Det finns potential för ytterligare optimering när denna referensutformning vidareutvecklas och realiseras, något som diskuteras utförligare i avsnitt 15.3.5 och 15.5.

- Den vetenskapliga förståelsen för frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad till följd av decenniernas forskning inom svenska och andra nationella program och internationella samarbetsprojekt. Insatserna rörande forskning, utveckling och demonstration för att förstå förvarets utveckling och säkerhet har lett till förståelse av centrala processer som kopparkorrosion, skjuvning av kapslar och andra potentiella orsaker till kapselbrott samt av viktiga fenomen som styr fördröjning. I SR-Site har dessa kunskaper systematiskt dokumenterats i flera rapporter i ett format anpassat till säkerhetsanalysen, se även kapitlen 6 och 7.
- Huvudrapporten i SR-Site och dess huvudreferenser har varit föremål för omfattande expertgranskningar (peer reviewing). Särskilt den vetenskapliga grunden för säkerhetsanalysen har granskats av erkända experter inom de aktuella ämnesområdena.
- I SR-Site har en fullständig analys av frågor som identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten genomförts i överensstämmelse med etablerad analysmetodik, som beskrivs i kapitel 2. Metodiken inbegriper exempelvis ett försiktigt förhållningssätt vid hanteringen av osäkerheter.
 - Förståelsen av säkerhet bygger på systematisk identifiering av säkerhetsfunktioner och kriterier för säkerhetsfunktioner, se kapitel 8.
 - Förvarsutvecklingen har analyserats för flera tidsperioder med ett strukturerat angreppssätt. De processer som identifierats som relevanta har beaktats inom varje tidsperiod och säkerheten i systemet, uttryckt som säkerhetsfunktioner, har satts i fokus, se kapitel 10. Dataosäkerheter och datakvalitet har analyserats och dokumenterats i enlighet med en på förhand bestämd mall, vilken beskrivs i kapitel 9. Kvalitetssäkring av modeller och modellering har uppnåtts genom

att följa de procedurer som dokumenteras i **Modellrapporten**. Analysen bryts sedan ner till en uppsättning scenarier för att uttömmande pröva alla möjliga sätt på vilka de identifierade säkerhetsfunktionerna skulle kunna äventyras och konsekvenserna av sådana situationer, se vidare kapitel 11, 12 och 13.

- Tilltron till de huvudsakliga resultaten från radionuklidtransport- och riskberäkningar stärks av det faktum att de ofta kan reproduceras med ett snarlikt resultat med hjälp av enkla, analytiska modeller och med användning av samma indata som de fullt kvalificerade numeriska modellerna.
- De viktiga resultaten från radionuklidtransport- och riskberäkningar utgör överskattningar, eftersom ett antal pessimistiska antaganden gjordes i analyserna, både när det gäller kapselbrottens omfattning och deras konsekvenser.
- Dokumenterade kvalitetssäkringsrutiner har tillämpats vid utvärderingen av initialtillståndet, vid framtagandet av platsbeskrivningen och vid analysen av den långsiktiga säkerheten. En kvalitetsplan har upprättats och tillämpats i SR-Site. Denna omfattar de flesta av de rutiner som följts för att utföra de steg som punkterna ovan beskriver. Detta är en del av den övergripande metodik som följts i analysen och som dokumenteras i kapitel 2.

Fullständighet, omfattning

Huruvida analysen är fullständig och heltäckande är också relevant för diskussionen om tilltro. Denna fråga kan formuleras enligt följande.

1. Har samtliga faktorer som är relevanta för den långsiktiga säkerheten identifierats?
2. Har alla identifierade faktorer behandlats på lämpligt sätt i analysen?

Följande två punkter sammanfattar de insatser som gjorts för att säkerställa att alla relevanta faktorer har identifierats, se även avsnitt 2.8.3, i synnerhet underrubriken ”Systemosäkerhet”.

- Decennier av systematisk och dokumenterad forskning och utveckling i internationella samarbeten har utförts för att få tillräcklig kunskap om förvarssystemet och dess utveckling. Endast mycket få nya fenomen har identifierats under senare år, vilket visar att den vetenskapliga och tekniska grunden är väl utvecklad. Flera säkerhetsanalyser har genomförts under åren för att åstadkomma en integrerad utveckling av kunskapsbasen och för att ge återkoppling till programmet för forskning, utveckling och demonstration.
- Systematiska och dokumenterade studier av faktorer som identifierats av andra organisationer har utförts, exempelvis jämförelser med internationellt tillgängliga FEP-databaser.

Frågan om alla identifierade frågor har hanterats på lämpligt sätt i analysen tas delvis upp i diskussionen ovan om tilltro. Ett mer fullständigt svar ges av beskrivningen av analysmetodikerna i kapitel 2. Av särskild relevans är den systematiska hanteringen av osäkerheter som beskrivs i avsnitt 2.8.3. Valet av scenarier och scenarieanalysen hävdas vara fullständiga. Detta baseras på den systematiska fokuseringen på säkerhetsfunktioner och den systematiska hanteringen av faktorer som skulle kunna försämra säkerhetsfunktionerna som görs i valet av scenarier, med efterföljande hantering av kombinationer av scenarier. En formell kontroll har också gjorts av om de FEP som uteslöts i tidigare delar av analysen är av försumbar betydelse för säkerheten mot bakgrund av den slutförda scenarie- och riskanalysen. Denna kontroll redovisas i avsnitt 14.4.

Punkterna ovan stödjer påståendet att SR-Site-analysen är fullständig, även om fullständighet i strikt mening aldrig kan bevisas. I detta sammanhang är det därför relevant att diskutera möjliga konsekvenser om fullständighet inte har uppnåtts, till exempel om en viktig skadlig process inte identifierats trots alla ansträngningar att säkerställa motsatsen. I sin mest extrema form kan en sådan diskussion ske i form av konsekvenserna av en fullständig, tidig förlust av säkerhetsfunktioner. Som framgår av avsnittet nedan ger även mycket extrema och fullständigt oralistiska antaganden med avseende på tidiga barriärförluster beräknade doser som är jämförbara med dem som orsakas av den naturliga bakgrundsstrålningen.

Utifrån ovanstående resonemang dras slutsatsen att SR-Site-analysen är tillräckligt fullständig för dess avsedda syften.

15.3.7 Gränssättande fall, robusthet

I avsnitt 13.7.3 analyseras ett antal stiliserade gränssättande fall som illustrerar fullständig, initial förlust av viktiga säkerhetsfunktioner. Analyserna ledde till följande slutsatser.

- Ett mycket hypotetiskt beräkningsfall där alla 6 000 kapslar initialt har stora defekter skulle innebära en högsta dos på omkring 700 $\mu\text{Sv}/\text{år}$ för de mest exponerade individerna i ett fullständigt befolkat landskap. Detta motsvarar en risk på omkring $10^{-5}/\text{år}$ i tidsperspektivet 10 000 år. Efter omkring 100 000 år är den beräknade risken omkring en faktor två över riskgränsen på $10^{-6}/\text{år}$.
- Ett än mer hypotetiskt beräkningsfall där alla 6 000 kapslar initialt har stora defekter och där inga buffertbarriärer finns skulle innebära en högsta dos på omkring 4 000 $\mu\text{Sv}/\text{år}$ för de mest exponerade individerna i ett fullständigt befolkat landskap. Detta motsvarar en risk på omkring $10^{-4}/\text{år}$ för tidsperspektivet 10 000 år. Efter omkring 100 000 år är den beräknade risken omkring en faktor två över riskgränsen på $10^{-6}/\text{år}$.

Utöver det fiktiva antagandet om total förlust av barriärfunktioner gjordes flera pessimistiska antaganden i beräkningarna för dessa fall.

Resultaten som redovisades i avsnitt 13.7.3 tyder på att de beräknade doserna är jämförbara med eller lägre än den naturliga bakgrundsstrålningen även för fall med mycket allvarliga förluster av säkerhetsfunktioner. Till exempel ger en initial förlust av både kapsel och buffert i samtliga deponeringshål i ett förvar i Forsmark doser som är jämförbara med dem som orsakas av den naturliga bakgrundsstrålningen.

De gränssättande analyserna demonstrerar också KBS-3-systemets flerbarriärprincip, vilken ofta inte framträder lika tydligt i resultaten från andra analyser. Med intakta kapsel- och buffertegenskaper verkar till exempel berggrunden vara relativt betydelselös, eftersom de flesta nuklider kvarhålls i de inre barriärerna. I det orealistiska fallet där både kapsel- och buffertbarriären har gått helt förlorad redan från början visar emellertid resultaten i figurerna 13-67 och 13-68 att retentionen i berget minskar doserna med omkring två storleksordningar, vilket tydligt demonstrerar bergets betydelse. Berggrunden är dessutom alltid viktig genom att skapa förutsättningar för ett lågt grundvattenflöde, lämpliga kemiska förhållanden och stabila mekaniska förhållanden.

15.3.8 Ytterligare allmänna krav på säkerhetsanalysen

Användning av naturliga analogier

I avsnitt 14.6 redovisas naturliga analogier som ett stöd för en säkerhetsanalys av KBS-3-förvaret. Där diskuteras både de naturliga analogiernas roll i säkerhetsanalyserna och de faktiska belägen för särskilda förvarsmaterial och processer som påverkar dem.

I avsnitt 14.6.5 dras slutsatsen att resultaten från studierna av de naturliga analogierna är mer kvalitativa än kvantitativa. De vetenskapsmän och modellerare som medverkat i de internationella projekten som studerat naturliga analogier har fokuserat forskningen och metodutvecklingen för att få fram tillräckligt med information för att identifiera processer och scenarier som är relevanta för säkerhetsanalyserna. Många naturliga analogier stödjer också analyser av långsiktig säkerhet genom att bidra till att förbättra den allmänna uppfattningen och förståelsen av konceptet för ett slutförvar.

För de fall där naturliga analogier ger användbar information som bidrar till kunskapen om särskilda processer återfinns denna information under förutbestämda rubriker i **Processrapporterna**.

Kvalitetssäkring

Som beskrivs i avsnitt 2.9 har en kvalitetsplan tagits fram och realiserats. Planen omfattar exempelvis granskning av viktiga dokument och en kvalitetssäkrad hantering av FEP. Där beskrivs också hur framtagna mallar ska användas för att dokumentera väsentlig information om exempelvis processförståelse och indata till säkerhetsanalysen. En beskrivning av den kvalitetssäkring som rör modeller och modellering finns i **Modellrapporten** för SR-Site.

Mer allmänt tillämpar SKB ett ledningssystem som uppfyller kraven i ISO 9001:2000 och som har certifierats av DNV Certification AB i Sverige. I enlighet med SKB:s rutiner för projektledning, som

beskrivs i ledningssystemet, har kvalitetsplaner utvecklats och införts för Kärnbränsleprojektet, där SR-Site ingår som ett delprojekt, och för projektet SR-Site. Kvalitetsplanen för SR-Site-projektet (SDK-003) bygger på den plan för kvalitetssäkring som togs fram för SR-Can-projektet /SKB 2006a/. Den har dock utvidgats och anpassats för att uppfylla de allmänna kraven på ett projekt som ska stödja ansökan om att bygga ett slutförvar, vilket anges i kvalitetsplanen för Kärnbränsleprojektet (SDK-001). Andra delprojekt som ingår i Kärnbränsleprojektet har egna kvalitetsplaner, som har anpassats för att uppfylla de allmänna kraven i kvalitetsplanen för Kärnbränsleprojektet. Därtill ska alla delprojekt som förser projektet SR-Site med indata uppfylla de allmänna kraven på kvalitetssäkring enligt kvalitetsplanen för SR-Site.

Hantering av osäkerheter

En systematisk hantering av osäkerheter har tillämpats där systemosäkerheter, konceptuella/modellrelaterade osäkerheter och dataosäkerheter har behandlats. Den systematiska hanteringen av FEP, som dokumenterats i **FEP-rapporten**, är viktig för att säkerställa att alla relevanta faktorer har beaktats i analysen. Osäkerheter som rör förståelsen och modelleringen av processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten tas upp i **Processrapporterna** i enlighet med mallen för dokumentation av processer. Data och dataosäkerheter för modellering kvalificeras i **Datarapporten** i enlighet med mallen för datakvalificering.

Analyserna av referensutvecklingen syftar till att minska antalet osäkerheter som kräver ytterligare överväganden samt att identifiera och kvantifiera osäkerheter som måste föras vidare till de efterföljande delarna av säkerhetsanalysen. Dessa sistnämnda osäkerheter behandlas i de senare delarna av beskrivningen av referensutvecklingen och/eller i de efterföljande analyserna av ytterligare scenarier.

Fler detaljer om den integrerade hanteringen av osäkerheter i SR-Site finns i avsnitt 2.8.4.

15.4 Konstruktionsstyrande fall

Återkoppling från analyser av den långsiktiga säkerheten är centrala indata vid detaljeringen av utformningen av KBS-3-förvaret och rekommenderas även av föreskrifterna. De allmänna råden till föreskriften SSMFS 2008:21 anger följande: ”Med utgångspunkt i scenarier som kan visas vara särskilt viktiga från risksynpunkt bör ett antal konstruktionsstyrande fall identifieras. Dessa fall bör tillsammans med annan information, t ex om tillverkningsteknik och kontrollerbarhet, användas för att underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper.”

En första uppsättning konstruktionsstyrande fall formulerades i huvudrapporten för SR-Can, se avsnitt 13.4 i /SKB 2006a/. Återkoppling till konstruktionen av kapseln och förvaret gavs i avsnitten 13.5–13.6 i huvudrapporten för SR-Can /SKB 2006a/. Detta vidareutvecklades till krav som benämndes *konstruktionsförutsättningar* i en rapport med namnet ”Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses (Konstruktionsförutsättningar för ett KBS-3V-förvar baserat på resultat från säkerhetsanalysen SR-Can och vissa efterföljande analyser)”, /SKB 2009a/. Konstruktionsförutsättningar avser vanligtvis specifikationer av vilka mekaniska laster barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning och acceptanskriterier för de olika utrymmena under mark.

Enligt utförligare beskrivning i kapitel 5 och i **Produktionsrapporterna** utgjorde dessa konstruktionsförutsättningar grunden för att fastställa och motivera den referensutformning som analyserats i SR-Site, även om huvuddelen av utformningen utvecklades innan dessa konstruktionsförutsättningar formellt fastställdes.

Som framgick när de konstruktionsstyrande fallen och konstruktionsförutsättningarna först presenterades i /SKB 2009a/ kan konstruktionsförutsättningarna komma att modifieras i framtida faser av SKB:s program, exempelvis efter större uppdateringar av säkerhetsanalysen eller som en följd av granskningar av säkerhetsanalysen. Resultat från analyser baserade på mer detaljerade platsdata och en mer utvecklad kunskap om processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten kan utgöra motiv till sådana modifieringar. Utgående från resultaten i SR-Site ges i detta avsnitt återkoppling till en eventuell uppdatering av de konstruktionsstyrande fallen, medan detaljerad återkoppling till konstruktionsförutsättningarna återfinns i avsnitt 15.5.

15.4.1 Allmänt

I avsnitt 13.4 i huvudrapporten till SR-Can /SKB 2006a/ beskrevs i grova drag metoden för att ta fram konstruktionsstyrande fall och denna vidareutvecklades i /SKB 2009a/. Denna metod bedöms vara adekvat, men för att ge en fullständig bild upprepas den här, med uppdateringar vad gäller referenser.

Enligt SSM:s allmänna råd är syftet med att identifiera konstruktionsstyrande fall att ge indata till formuleringen av krav på barriäregenskaperna. Denna process är *iterativ* och består av flera moment.

1. Fastställande av en referensutformning för förvaret, dvs ett barriärsystem *med en utvald uppsättning egenskaper*, se **Produktionsrapporterna** och kapitel 5 i denna rapport.
2. Identifiering av de säkerhetsfunktioner som systemet ska uppfylla över tiden, se kapitel 8.
3. Identifiering av de påfrestningar som systemet kommer att utsättas för över tiden och som potentiellt kan äventyra säkerheten. Detta görs i kapitel 10 (referensutvecklingen) och vidare i scenarieanalyserna i kapitel 12.
4. En kvantitativ analys av hur de identifierade påfrestningarna påverkar säkerheten för den fastställda utformningen. Denna analys beskrivs i kapitel 10, 12 och 13. De lastsituationer som förekommer i scenarierna och som är av särskild betydelse från risksynpunkt, dvs en uppsättning konstruktionsstyrande fall, sammanfattas i korthet efter detta avsnitt. De utgör viktiga indata till formuleringen av konstruktionsförutsättningarna.
5. Slutsatser huruvida den utvalda uppsättningen egenskaper är tillräckliga eller rekommendationer avseende möjliga förbättringar. Detta är viktig återkoppling till designprocessen.
6. Härledning av modifierade krav på barriäregenskaperna utgående från steg 5, vilket ger en modifierad utformning för vilken stegen ovan kan upprepas.

För en särskild säkerhetsanalys utarbetas således en bestämd förvarsutformning, steg 1. Steg 2, 3, 4 och 5 utgör väsentligen säkerhetsanalysen. Steg 6 ingår emellertid inte formellt i säkerhetsanalysen, se vidare nedan.

Scenarier

Det framgår klart från analyserna i SR-Site, liksom i SR-Can, att scenarier som är relaterade till kapselbrott orsakade av kapselkorrosion för en eroderad buffert och av skjuvrörelser är de viktigaste med avseende på risk. Förutom dessa från risksynpunkt viktigaste scenarierna betraktas även de kapselbrottsscenarier som inte bidrar till risken som konstruktionsstyrande fall, eftersom den analyserade utformningen räcker för att förhindra brott. Detta görs även om det inte är ett strikt krav enligt säkerhetsföreskrifterna. Det enda scenario av denna typ som identifierats i SR-Site är kapselbrott till följd av isostatisk last. Även om sådana brott inte bidrar till den beräknade risken är kapselns beständighet mot isostatisk last en viktig del av konstruktionsunderlaget. Andra scenarier än de som leder till kapselbrott beaktas inte, eftersom sådana scenarier per definition inte utgör någon risk. Scenarierna för kapselbrott täcker emellertid in ett antal andra scenarier som avser bufferten och berget, och dessa ingår således i de konstruktionsstyrande fallen.

Tidsskala

De konstruktionsstyrande fallen beror även på den tidsskala som betraktas. För tider bortom 100 000 år anger de allmänna råden till föreskriften SSMFS 2008:37 att: ”En strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk mot föreskrifternas kriterium för individrisk är inte meningsfull. Bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga bör i stället baseras på ett resonemang kring den beräknade risken tillsammans med flera kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden och koncentrationer i miljön.”

Sannolikheten för att skadliga händelser, som jordskalv och betydande inlandsisar, ska inträffa ökar med tiden. Även de skadliga effekterna av vissa kontinuerliga processer, som kapselkorrosion, ökar med tiden. Om de allmänna råden följs är en strikt tillämpning av riskkriteriet relevant för en tidsskala på 100 000 år. Eftersom de konstruktionsstyrande fallen ska härledas från scenarier som är viktiga från risksynpunkt kan detta tolkas som en indikation på att konstruktionsunderlaget också bör utvecklas för denna tidsperiod. Principen för bästa tillgängliga teknik (BAT) gäller emellertid

för hela analysperioden på en miljon år. Det förefaller inte rimligt att utveckla konstruktionsförutsättningar för en tidsskala av 100 000 år och sedan använda en tidsskala av en miljon år då principen för bästa möjliga teknik tillämpas. Därför beaktas tidsskalan av en miljon år även då konstruktionsförutsättningarna utvecklas.

Detta innebär dock inte att förvaret måste utformas för att stå emot alla påfrestningar som identifierats i säkerhetsanalysen under ett tidsperspektiv på en miljon år. Konstruktionen måste vara sådan att kraven på risk och BAT uppfylls och detta kan mycket väl vara förenligt med att viss skadlig inverkan på barriärerna sker under analysperioden.

Integrerat angreppssätt

Det finns en ansevärd mängd information i SR-Site som kan användas för att utvärdera de nuvarande konstruktionsförutsättningarna för ett KBS-3-förvar. Däremot finns det få, om ens några, lastfall *för individuella barriärer* som direkt kan härledas endast från de yttre förhållandena, vilket var slutsatsen redan i SR-Can. Den isostatiska lasten på kapseln kommer till exempel inte bara att bero på de yttre förhållandena, som storleken på en framtida glacial last och tillhörande grundvattentryck, utan även på förvarets djup och buffertens utformning som bestämmer dess högsta svälltryck. Situationen med skjuvrörelser på kapseln är ännu mer komplicerad. Den beror på yttre faktorer som sannolikheter för framtida stora jordskalv, men också på sprickfördelningen i berget i deponeringsområdet, hur layouten för deponeringsområdet och deponeringshålen anpassas till förhållandena på platsen samt på buffertens materialegenskaper.

Påfrestningarna på barriären kommer därför att bero på utformningen av övriga barriärer och på platsens egenskaper. Det innebär att konstruktionsförutsättningarna måste fastställas för hela barriär-systemet på ett integrerat sätt och i vissa avseenden även platsspecifikt. Det innebär också att det finns en mängd olika kombinationer av barriär- och platsegenskaper som kan ge förvaret liknande prestanda. Säkerhetsanalysens roll i detta sammanhang är att leverera indata till att härleda konstruktionsförutsättningar, i form av yttre påfrestningar som barriärssystemet ska tåla med hänsyn till den beräknade risken, och därefter granska de specifika resultaten avseende konstruktion och byggnation. Det ingår emellertid inte i säkerhetsanalysen att utveckla den specifika utformningen. Däremot behövs säkerhetsanalytisk kompetens för att på ett ändamålsenligt sätt senare formulera konstruktionsförutsättningarna.

Nedan följer en sammanfattning av de viktigaste resultaten, *med avseende på de yttre påfrestningar som barriärssystemet kommer att utsättas för*, som måste beaktas när konstruktionsförutsättningarna utvecklas. Den kan också ses som en introduktion till den mer detaljerade diskussionen i avsnitt 15.5 om återkopplingen till kapsel- och förvarsutformning.

15.4.2 Kapseln: Isostatisk last

Den isostatiska lasten på kapseln beror på grundvattentrycket och på buffertens svälltryck. Det antas pessimistiskt att summan av dessa två tryck bestämmer den isostatiska lasten. Den detaljerade analysen av scenariot med kapselbrott till följd av isostatisk last som beskrivs i avsnitt 12.7 visar att ett högsta svälltryck på 15 MPa skulle kunna förkomma i bufferten och att grundvattentrycket är omkring 4,5 MPa för isfria förhållanden vid Forsmark. Analysen visar vidare att ett ytterligare grundvattentryck på som mest 30 MPa skulle kunna förekomma som en följd av den högsta glaciala last som det finns geologiska belägg för från inlandsisar i historisk tid. Summan av dessa laster är 49,5 MPa. Med tanke på att den kombinerade inverkan av svälltryck och hydrostatisk last är något mindre än denna summa ger detta emellertid ett totalt tryck på runt 46,5 MPa, vilket framgår i avsnitt 12.7.5. Slutsatsen från analysen av kapselns hållfasthet är att marginalen till total kollaps (90 MPa), dvs kriteriet för kapselbrott, är avsevärd.

I SR-Can drogs följande slutsats: ”Om kapseln placeras i en buffert med en densitet i intervallet 1 950 till 2 050 kg/m³, vilket motsvarar ett svälltryck på upp till 15 MPa, ska kapseln stå emot en isostatisk last på 45 MPa. Därigenom förblir en global kollaps till följd av isostatisk last ett restskenario, som inte bidrar till risken.”

Även om det grundläggande budskapet fortfarande gäller finns det ett behov av att revidera detta påstående så att hänsyn tas till osäkerheten avseende tjocklekar hos framtida inlandsisar. En övre gräns

ges av den mäktigaste inlandsis som konstaterats för pleistocena inlandsisar, inklusive den mäktigaste inlandsis som för närvarande finns i Östantarktis (cirka 4 500 m). Detta motsvarar en isostatisk last från isen av 40 MPa, vilket ger en total last av 60 MPa. Denna övre gräns bedöms dock vara extrem.

Från risksynpunkt är det viktigt att förstå att de isostatiska laster som nämns ovan, åtminstone (det dominerande) bidraget från grundvattentrycket vid förvaringsdjup, troligen påverkar *alla kapslar samtidigt*. Om kapslarna inte är utformade så att de står emot dessa laster, kan ett stort antal kapslar potentiellt gå sönder samtidigt. Detta skiljer sig från fall där bergets naturliga variabilitet påverkar lastsituationen, exempelvis i fråga om sannolikheten för att en stor spricka skär ett deponeringshål.

Kapseln kan komma att utsättas för asymmetriska laster under olika skeden av förvarsutvecklingen. Detta skulle kunna inträffa tillfälligt till följd av ojämn vattenmättnad av bufferten och på grund av att deponeringshålet inte är rakt. Permanenta asymmetriska laster kan förekomma till följd av en ojämn fördelning av buffertdensiteten efter vattenmättnad i kombination med att deponeringshålet inte är rakt. Enligt avsnitt 10.3.9 förväntas dock svälltrycket runt kapseln homogeniseras. Betydande asymmetriska laster förväntas då bli sällsynta och således bara påverka en liten andel av deponeringspositionerna – om ens några. Det är fördelaktigt att ta hänsyn till sådana fall vid analys av fallet med isostatisk last. Sannolikheten för att de ska inträffa är dock för liten för att de ska antas sammanfalla med det skjuvlastfall med låg sannolikhet som behandlas i nästa avsnitt.

15.4.3 Kapseln: Skjuvrörelser

I sällsynta fall kan skadliga skjuvrörelser uppkomma som en följd av jordskalv som skulle kunna inducera sekundära rörelser i sprickor som skär deponeringshål. Enligt slutsatsen som drogs i /SKB 2009a/ beror kapselns reaktion på skjuvlast på ett antal faktorer. De viktigaste är:

- Jordskalvets magnitud och läge.
- Den sträcka den skärande sprickan skjuvas.
- Hastigheten på sprickans skjuvrörelse.
- Sprickans skärningsvinkel och dess läge i förhållande till kapselns huvudaxel.
- Buffertens mekaniska egenskaper, av vilka många i hög grad beror på buffertens densitet.
- Kapselns geometri och kapselmaterialets egenskaper, bland annat elasticitetsmodulen och brottsegheten.
- Kapselns och buffertens temperatur då händelsen inträffar.

Den kombinerade effekten av alla dessa faktorer bestämmer om kapseln står emot en skjuvlast.

Följande konstruktionsstyrande fall vad gäller skjuvrörelser formulerades i /SKB 2009a/: ”Koppar-korrosionsbarriären ska vara intakt efter en 5 cm lång skjuvrörelse med en hastighet av 1 m/s för buffertmaterialegenskaper hos en 2 050 kg/m³ Ca-bentonit, för alla positioner och vinklar hos skjuvsprickan i deponeringshålet, samt för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last.”

Produktionsrapporten för kapseln, se även avsnitt 5.4, visar att den aktuella referensutformningen för kapseln uppfyller dessa krav. För att uppfylla dessa krav måste emellertid hårda krav ställas på tillverkning och oförstörande provning (särskilt av insatsen).

Risken för skjuvning utvärderas ytterligare i SR-Site, se avsnitt 10.4.5 och 12.8. Slutsatsen är att i genomsnitt färre än ett deponeringshål kommer att utsättas för skjuvrörelser som är större än 0,05 m under en miljon år. En sådan skjuvning leder till kapselbrott om det antas att kapselbrott faktiskt inträffar om lasten är högre än det konstruktionsstyrande värdet. I själva verket sker ännu färre brott, eftersom i) bufferten i de flesta deponeringshålen kommer att ha en lägre densitet än den högsta tillåtna, ii) bara ett fåtal vinklar och lägen för skärande sprickor leder till brott vid en skjuvning på 5 cm och iii) de värden för kopparhöljets brottöjning och kryppelasticitet som uppnåtts vid provtillverkningen tyder på att det finns en marginal mellan det nuvarande antagandet att kopparhöljet brister direkt när den tillåtna storleken på defekter i insatsen överskrids och kopparhöljets verkliga prestanda under en skjuvrörelse.

Dessutom kommer bara ett fåtal kapslar att kunna utsättas för skjuvrörelser som är tillräckligt stora för att orsaka skada. Majoriteten av kapslarna förväntas bara utsättas för försumbara skjuvrörelser, eftersom deras deponeringshål bara kommer att skäras av små sprickor, om ens några. Det är således bara en liten andel av deponeringshålerna som förväntas ha egenskaper som gör att kapslarna måste motstå en skjuvrörelse på 5 cm. I den utsträckning en fördelning av tåligheten mot skjuvrörelser kan fastställas för hela uppsättningen kapslar, med hänsyn till exempelvis tillverkningsfel, bör den eventuella andelen av fördelningen som inte uppfyller konstruktionskraven utvärderas mot fördelningen av deponeringshålens egenskaper för att uppskatta sannolikheten för att kapseln kommer att utsättas för skjuvbrott.

I allmänhet minskar kapselns tålighet mot skjuvrörelser med sjunkande temperatur. De termiska analyserna i avsnitten 10.4.3 och 12.3 visar att det krävs extrema och orealistiska klimatförhållanden för att ge temperaturer lägre än 0 °C vid förvaringsdjup. Därför behöver hänsyn inte tas till temperaturer under 0 °C för skjuvfallet.

Som beskrivits i avsnitt 10.3.10 finns det ingen anledning att tro att bufferten skulle förändras mineralogiskt på ett sätt som leder till större förändringar av de mekaniska och hydrauliska egenskaperna under analysperioden. Det finns emellertid experimentella resultat som visar att bentonitens mekaniska egenskaper kan förändras om materialet utsätts för en förhöjd temperatur i mättat tillstånd /Dueck 2010/. Om buffertmaterialet runt kapseln antas omvandlas till ett cementliknande material utan svälltryck ger en ökad elasticitetsmodul och skjuvhållfasthet å andra sidan en liten inverkan i skjuvanalysen. Därför görs bedömningen att cementering av buffertmaterialet inte behöver ingå i det konstruktionsstyrande fallet för skjuvrörelser.

Följande slutsatser dras:

- Riskbidraget från kapselbrott till följd av skjuvrörelser är avsevärt mindre än föreskrifternas riskgräns, vilket innebär att det nuvarande konstruktionsstyrande fallet är tillräckligt begränsande.
- Det konstruktionsstyrande fallet utgör en balans mellan kraven på kapseln, på bufferten och på förvarslayouten, på den senare genom kravet på en maximal skjuvrörelse på 5 cm. Då detta konstruktionsstyrande fall revideras kan bland annat följande beaktas, förutsatt att den resulterande beräknade risken från skjuvrörelser är jämförbar med eller mindre än den i SR-Site:
 - Med tanke på den tekniska utmaning det innebär att uppfylla de höga kraven på tillverkning och oförstörande provning kan det vara lämpligt att mildra kraven på kapseln, exempelvis genom att kräva bevarad motståndskraft vid en mindre tillåten skjuvrörelse eller för en mindre styv bentonit.
 - Det finns potential för att omdefiniera kraven på buffertdensiteten, dvs att sänka den övre gränsen för densiteten mot bakgrund av de gränser som uppnåtts i den senaste provtillverkningen. Detta skulle minska kraven på tillverkningen och den oförstörande provningen av kapseln.
 - Den största tillåtna skjuvrörelsen kan utvärderas på nytt. Att öka gränsen till mer än 5 cm skulle emellertid innebära ökade krav på kapselkonstruktionen med tanke på nuvarande möjligheter att analysera hur systemet kapsel-buffert reagerar på skjuvrörelser. Att sätta ett lägre gränsvärde skulle innebära en ökad beräknad risk med den aktuella förvaringsutformningen, eftersom fler kapslar skulle utsättas för sådana rörelser. Alternativt skulle ett lägre gränsvärde innebära orealistiska krav på förvarslayouten för att kunna undvika rörelserna.

15.4.4 Kapseln; korrosionspåkänning

En av kapselns tre långsiktiga säkerhetsfunktioner är att utgöra en korrosionsbarriär, och därför behöver konstruktionsstyrande fall avseende korrosion diskuteras. Säkerhetsanalysens roll när det gäller korrosionspåkänning är inte bara att specificera påkänningen, utan även att beräkna de korrosionsdjup som blir följden. En mer direkt återkoppling kan därför ges huruvida den kapseltjocklek som antas i säkerhetsanalysen är tillräcklig och hur stor känsligheten för variationer i den tjockleken är.

I /SKB 2009a/ drogs följande slutsats avseende det konstruktionsstyrande fall som är relaterat till korrosionspåkänningen: ”... koppertjockleken bör väljas så att antalet otäta kapslar till följd av korrosion inte är större än vad som är godtagbart med avseende på riskkriteriet för 100 000 år. I SR-Can visades det att 5 cm är tillräckligt för att uppfylla riskkriteriet. En nominell tjocklek på 5 cm är därför den erforderade konstruktionsförutsättningen för SR-Site.”

Även om SR-Site genomgående visar att kravet på nominell tjocklek ger en fullgod korrosionsbarriär är det motiverat att utvärdera resultaten från den uppdaterade korrosionsanalys som gjorts i SR-Site.

I avsnitten 10.2.5 och 10.3.13 visas att de korrosionsdjup som blir följden av olika korrosionsprocesser är i storleksordningen några få millimeter för en buffert som är intakt med avsedda svälltryck och transportegenskaper.

I avsnitt 10.4.9 analyseras korrosionen för ett fall med en delvis eroderad buffert, och en fortsatt analys av känsligheten görs i korrosionsscenarioet, se avsnitt 12.6.2. Resultaten visar att det beräknade genomsnittliga antalet kapslar med korrosionsgenombrott över en miljon år är mellan noll och två. Detta intervall täcker osäkerheter avseende buffererosionsprocessen, variabiliteten hos de hydrogeologiska DFN-modellerna och osäkerheter i fördelningen av sulfidkoncentrationer samt även osäkerheter avseende den konceptuella modellen för korrosionsgeometrin (vilken del av kopparytan som korroderas av den sulfid som transporteras till kapseln).

Vid analysen av BAT, se avsnitt 14.3.2, har koppartjocklekar på 2,5 och 10 cm utvärderats. Resultaten visar att en ökning av koppartjockleken till 10 cm minskar det genomsnittliga antalet otäta kapslar vid en miljon år med en faktor tre, medan en halvering av tjockleken till 2,5 cm ökar antalet med ungefär en faktor två, se figur 14-6. Eventuella problem vid tillverkning och tätning av en tjockare kapsel har inte beaktats vid denna analys.

Vid utvärderingen av korrosionen används den koppartjocklek som uppnåtts för referensutformningen med nuvarande produktions- och kvalitetssäkringsrutiner. För höljet, botten och locket antas att den tillverkade tjockleken inte är mindre än 45 mm, vilket kan betraktas som en undre gräns för tjockleken efter tillverkning. För att utvärdera betydelsen av att det förekommer små områden med tunnare koppar (svetsområdet eller ytdefekter från transport och hantering) används sannolikhetsaspekter (att små områden på ett fåtal kapslar sammanfaller med ett fåtal deponeringshål med högt flöde) i analysen.

Sammanfattningsvis är korrosion i fallet med en delvis eroderad buffert det enda riskbidraget från kapselbrott till följd av korrosion. Det konstruktionsstyrande fall som är relevant för det analyserade förvaret vid Forsmark bör vara det som analyserats i SR-Site, med hänsyn tagen till osäkerheter avseende buffererosionsprocessen, variabiliteten hos de hydrogeologiska DFN-modellerna och osäkerheter i fördelningen av sulfidkoncentrationer, såväl som till osäkerheter avseende den konceptuella modellen för korrosionsgeometrin. Med tanke på hur relativt okänsligt antalet otäta kapslar är för koppartjockleken är det tydligt att konstruktionsförutsättningar som härletts utifrån detta konstruktionsstyrande fall inte kan anges lika detaljerat som tillverknings-specifikationen. Det anses därför lämpligare att specificera tjockleken i centimeterskala.

15.4.5 Bufferten

De konstruktionsstyrande fall för bufferten som formulerats i /SKB 2009a/ bestod av en lista på yttre kemiska, mekaniska och termiska påkänningar som bufferten utsätts för under den en miljon år långa analysperioden. Allmänt har denna lista inte förändrats mycket, men eftersom kunskapen om faktorer som påverkar buffertens stabilitet har vidareutvecklats sedan SR-Can omformuleras detta konstruktionsstyrande fall här.

Listan med yttre påkänningar som kan påverka bufferten grundar sig på en ingående kunskap om buffertens säkerhetsrelaterade funktioner i förvaret, dvs om buffertens roll i säkerhetskonceptet och om de förväntade variationerna i buffertens kemiska miljö, se kapitel 10. Utgående från detta bör följande kemiska och termiska miljö för bufferten beaktas.

- I allmänhet kommer de flesta av deponeringshålen att ha en salthalt med en jonstyrka på $\Sigma q[M^{qt}] > 4$ mM laddningsekvivalenter. Upp till två procent av alla deponeringshål kan emellertid utsättas för grundvatten med salthalter under detta värde vid någon tidpunkt under hela glaciationscykeln.
- Grundvatten med en TDS på upp till 20 g/l kan förekomma i de scenarier som analyserats i SR-Site. Detta bör inte utgöra något hot mot buffertens funktioner.
- pH-värdet kan, åtminstone under korta tidsperioder, vara upp till 11. Särskilt kan ett initialt kortvarigt högt pH-värde inte uteslutas och bör även vara godtagbart, utgående från massbalans-

argument. Följaktligen bör bufferten tåla sådana förhållanden, vilket verkligen visat sig vara fallet för den referensutförning av bufferten som analyseras i SR-Site, se avsnitt 10.3.

- Bufferten kan även utsättas för isostatiska tryck på upp till 34,5 MPa. Enligt slutsatsen i SR-Can påverkas inte de buffertmaterial som analyserades negativt av sådana tryck, se avsnitt 10.4.8, underrubriken ”Flyttillstånd”.
- Vad gäller skjuvrörelser, se diskussionen i denna fråga för kapseln ovan.
- Funktionsindikatorkriteriet för buffertfrysning ansätts pessimistiskt ett värde på -4 °C , se avsnitt 8.3.2. Enligt avsnitt 12.4 kommer grundvattnet vid förvarsdjup aldrig att frysa, vilket innebär att kriteriet -4 °C för buffertmaterialet är en uppnåbar konstruktionsförutsättning för bufferten.

15.5 Återkoppling till utvärderad referensutförning och relaterade konstruktionsförutsättningar

15.5.1 Inledning

I SR-Site har en definierad referensutförning baserad på specifika konstruktionsförutsättningar utvärderats. I det här avsnittet om återkoppling tas säkerhetsaspekter av referensutförningen upp och återkoppling ges huruvida det finns anledning att överväga om referensutförningen och/eller konstruktionsförutsättningarna, så som de formulerats i /SKB 2009a/, bör revideras.

Omvärderingen av de konstruktionsstyrande fallen, såväl som andra slutsatser som uppnåtts inom SR-Site, kan också användas för att revidera de specifika konstruktionsförutsättningar som listas i /SKB 2009a/.

Eftersom SR-Site visar att säkerhetsnivån är tillräcklig för ett förvar vid Forsmark som byggs enligt referensutförningen och uppfyller konstruktionsförutsättningarna som anges i /SKB 2009a/, är de kvarstående motiven till att revidera dessa konstruktionsförutsättningar följande:

- Övervägande av om en detaljerad formulering eller ett detaljerat krav markant kan förbättra den resulterande säkerheten, med hänsyn tagen till om det är realistiskt att uppnå en sådan förändring.
- Återkoppling från konstruktionsarbetet och tillverkningsprocessen (**Produktionsrapporter**) inklusive möjligheter att verifiera konstruktionsförutsättningarna i både konstruktions- eller projekteringsarbetet och i tillverkningsprocessen.
- Justering av förutsättningar som bevisats vara onödiga eller som inte alls eller endast i mindre utsträckning förbättrar säkerheten.
- Förtydligande av skrivningar, korrektioner och andra mindre modifieringar för att förbättra tydligheten.

Motiven till att revidera referensutförningen omfattar:

- utmaningar, exempelvis komplexa eller mindre välgrundade belägg för att verifiera att referensutförningen kommer att uppfylla givna konstruktionsförutsättningar,
- föreslagna förändringar av konstruktionsförutsättningar,
- ytterligare detaljering och utveckling av metoder för tillverkning, installation och inspektion som främjar förbättringar inom ramen för referensutförningen,
- forskning och utveckling som leder till alternativa utformningar som exempelvis är lättare att realisera och som har potential att upprätthålla barriärfunktionerna och säkerheten.

Baserat på dessa generella principer bedöms de flesta av de redan fastlagda konstruktionsförutsättningarna och åtföljande referensutförningarna vara lämpliga som de är. Vissa av dem kan emellertid med fördel modifieras eller vidareutvecklas. En mer detaljerad utvärdering redovisas i följande underavsnitt.

15.5.2 Kapselns mekaniska stabilitet – motstå isostatisk last

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Kapseln ska motstå en isostatisk last på 45 MPa, vilket är summan av maximalt svälltryck och maximalt grundvattentryck.”

Som konstaterats i kapitel 5 och visats i **Produktionsrapporten för kapseln** kan kapslar utformas och tillverkas i överensstämmelse med den fastlagda konstruktionsförutsättningen för isostatisk last. Den detaljerade utvärderingen av scenariot med kapselbrott på grund av isostatisk last i avsnitt 12.7 bekräftar den slutsats som redan dragits i SR-Can att sådana kapslar inte kommer att gå sönder till följd av förutsägbara isostatisk laster under analysperioden. Analysen pekar emellertid även på att framtida laster kan bli något större än 45 MPa och ett värde på 46,5 MPa beaktas. Beträffande osäkerheten avseende framtida istjocklekar kan en marginal till den största istjockleken som analyserats i SR-Site övervägas. Det bör även påpekas att de möjliga förändringarna av buffertens densitet i princip påverkar denna konstruktionsförutsättning, men de förändringar som föreslås är alltför små för att ha betydelse för den här frågeställningen.

Aterkoppling till konstruktionsförutsättningar

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna för isostatisk last bör revideras så att osäkerheten med avseende på mäktigheten hos framtida inlandsisar beaktas. En övre gräns för en sådan marginal skulle vara den mäktigaste inlandsis som konstaterats för pleistocena inlandsisar, inklusive den mäktigaste inlandsis som för närvarande finns i Östantarktis (cirka 4 500 m). Detta motsvarar en isostatisk last från isen av 40 MPa, vilket motsvarar en total last av 60 MPa. Denna övre gräns bedöms dock vara extrem.

Aterkoppling till referensutformning

Den nuvarande referensutformningen är lämplig med avseende på dess okänslighet för isostatisk last.

15.5.3 Kapselns mekaniska stabilitet – motstå skjuvrörelse

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Kopparkorrosionsbarriären ska vara intakt efter en 5 cm lång skjuvrörelse med en hastighet på 1 m/s för buffertmaterialegenskaper hos en Ca-bentonit med en densitet på 2 050 kg/m³, och för alla lägen och vinklar hos skjuvsprickan i deponeringshålet samt för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last.”

Som redan konstaterats i avsnitt 15.4.3 skulle en kapsel som uppfyller de angivna konstruktionsförutsättningarna i genomsnitt resultera i färre än ett kapselbrott under en miljon år, även med antagandet att kapselbrott inträffar direkt om lasten överstiger det specificerade konstruktionsvärdet. I själva verket sker ännu färre brott, eftersom i) bufferten i de flesta deponeringshål kommer att ha en lägre densitet än det högsta tillåtna värdet, ii) endast ett fåtal vinklar och lägen för sprickor leder till brott vid 5 cm skjuvning och iii) de värden för kopparhöljets töjning och krypduktilitet som uppnåtts vid pilottillverkningen tyder på att det finns en marginal mellan det nuvarande antagandet att ett omedelbart och fullständigt brott av kopparhöljet inträffar när den tillåtna defektstorleken i insatsen överskrids och kopparhöljets verkliga prestanda under en skjuvrörelse.

Som konstaterats i avsnitt 5.4, och som visats i **Produktionsrapporten för kapseln**, uppfyller den nuvarande referensutformningen för kapseln de fastslagna konstruktionsförutsättningarna. Det noteras dock att detta även innebär att hårda krav behöver ställas på tillverkning och oförstörande provning. Å andra sidan är känsligheten för skjuvlast ett problem som berör kombinationen av kapsel och buffert. Större laster skulle kunna hanteras om buffertdensiteten var lägre. Med tanke på den erfarenhet som finns vad gäller bufferttillverkning och kontroll av buffertens densitet, som utvärderats i **Produktionsrapporten för bufferten**, skulle ett genomförbart sätt att sänka kraven på kapseln vara att modifiera kraven på den maximalt tillåtna buffertdensiteten.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Med tanke på de tekniska utmaningar det innebär att uppfylla de hårda kraven på tillverkning och oförstörande provning kan en mildring av kravet på kapseln övervägas, förutsatt att kravet på buffertens densitet ändras så att riskbidraget från skjuvlast blir mindre än eller lika stort som det är i SR-Site.

Sannolikheten för mer omfattande skjuvning än 5 cm är mycket låg. Det förefaller finnas mycket lite att vinna genom att ändra detta kriterium för skjuvningens omfattning i någon riktning, se vidare avsnitt 15.4.3.

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig. Det finns emellertid potential för en justering av konstruktionsförutsättningarna som kan tillåta något mindre hårda krav på tillverkning och oförstörande provning.

15.5.4 Utgöra korrosionsbarriär – kopparns tjocklek

I /SKB 2009a/ konstateras att det ska finnas ”en nominell koppartjocklek på 5 cm, även då svetsfogarna beaktas”.

Som redan konstaterats i avsnitten 14.3.2 och 15.4.4 ger kravet på en nominell tjocklek på 5 cm en tillräcklig korrosionsbarriär. Det är inte befogat att ta fram mer detaljerade kriterier för koppartjockleken.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Även om konstruktionsförutsättningen uttrycks som en nominell koppartjocklek på 5 cm går det att ta fram ett mer detaljerat kriterium, som medger toleranser vid tillverkningen. Den tillverkade koppartjockleken som uppnås för referensutformningen med nuvarande tillverknings- och kvalitets-säkringsrutiner anses inte understiga 45 mm för höljet, botten och locket. Detta kan betraktas som en undre gräns för den tjocklek som erhålls vid tillverkningen.

Återkoppling till referensutformningen

Nuvarande referensutformning betraktas som lämplig. Det måste dock tydliggöras att den undre gränsen för den tillverkade tjockleken på hölje, botten och lock är 45 mm, inklusive toleranser.

15.5.5 Kapselmaterial och övrigt

I /SKB 2009a/ anges vissa detaljerade konstruktionsförutsättningar för kopparinnehållet i segjärnet, gränsvärden för andra grundämnen i kopparn, maximal vattenmängd som får finnas kvar i insatsen, kopparmaterialets väteinnehåll, maximala temperaturer och tillåtna strålningsnivåer. Riskanalyserna i SR-Site ger inte någon direkt återkoppling till dessa konstruktionsförutsättningar. De ytterligare analyser som gjorts och redovisats i exempelvis **Processrapporten för bränslet och kapseln** kan emellertid medge viss vidareutveckling av dessa konstruktionsförutsättningar, genom förbättringar av grunderna för de givna gränsvärdena och för justering av vissa gränsvärden så att också toleranser kan tillåtas.

15.5.6 Buffertmaterialets hydromekaniska egenskapers varaktighet

I /SKB 2009a/ konstateras följande avseende buffertmaterialets hållbarhet vid kemiska och termiska påfrestningar: ”Efter svällning ska bufferten upprätthålla ett minsta svälltryck på 2 MPa och den hydrauliska konduktiviteten ska inte överstiga 10^{-12} m/s för kloridkoncentrationer upp till 1 M och oberoende av vilken katjon som är dominerande. Efter svällning får buffertens skjuvhållfasthet inte överskrida den hållfasthet som används i verifieringsanalysen av kapselns beständighet mot skjuvlast. Dessa förhållanden gäller för temperaturer ner till 0 °C och för temperaturer upp till 100 °C.”

Enligt en slutsats i avsnitt 15.4.5 bör konstruktionsunderlaget för de yttre kemiska, mekaniska och termiska påfrestningar som bufferten kommer att utsättas för under de en miljon åren revideras relativt det som formulerats i /SKB 2009a/. Följaktligen bör de relaterade konstruktionsförutsättningarna revideras för att avspegla denna förändring.

Utvärderingen i kapitel 10 visar att buffertens funktionsindikatorkriterier upprätthålls för alla tänkbara kemiska och termiska förhållanden under analysperioden. Detta gäller så länge inte alltför mycket buffertmaterial går förlorat, antingen initialt eller till följd av erosion. Initialtillståndet ska säkerställas med de rutiner som beskrivs i **Produktionsrapporten för bufferten**. En minskad förlust av buffert till följd av kanalbildning med erosion kan åstadkommas genom att välja deponeringshål där potentialen för omfattande kanalbildning med erosion undviks, se vidare i avsnitt 15.5.13.

Det konstateras i avsnitt 10.3.9 att när stora mängder bentonit har förlorats eller saknas från start så sväller bentoniten och fyller ut det tomma utrymmet. Densiteten och det resulterande svälltrycket kommer dock lokalt att bli relativt låga på grund av friktionen i bufferten och friktionen mot bergytan. I sådana fall kan svälltrycket åtminstone lokalt falla och bli lägre än 1 MPa, beroende på inre friktion i materialet och på bergväggens jämnhet (friktion). Advektiva förhållanden i bufferten kan uppkomma om den hydrauliska konduktiviteten är tillräckligt hög. Buffertens funktionsindikatorer fastställer att en hydraulisk konduktivitet på 10^{-12} m/s och ett svälltryck på 1 MPa måste föreligga för att advektion i bufferten ska kunna uteslutas. Dessa värden inkluderar dock vissa säkerhetsmarginaler.

I diskussionen i avsnitt 8.3.5 om marginaler för kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer konstateras det att marginalen för den hydrauliska konduktiviteten är relaterad till den hydrauliska gradienten och till diffusiviteten för ämnena i fråga, samt att marginalen är betydande. I praktiken kommer buffertens hydrauliska konduktivitet endast i sällsynta fall att styra om diffusion kommer att vara den rådande dominerande transportmekanismen. Då svälltrycket faller ökar sannolikheten för att flödesvägar bildas i bufferten. Det finns en effekt som beror på den hydrauliska gradienten och möjligen på salthalten. Laboratorieprov uppvisar kanalbildning vid cirka 60 kPa. I en situation med kanalbildning har den hydrauliska konduktiviteten i huvuddelen av bufferten av ingen betydelse. Enligt analysen krävs det en torrdensitet på minst 1 000 kg/m³, vilket motsvarar ett portal på 1,75. Detta krav är fortfarande uppfyllt i nästan hela buffertens radiella utsträckning när två hela bentonitringar utelämnas, vilket motsvarar en förlust av 2 400 kg torrt material. Det bör påpekas att även om marginalen för säkerhetsfunktionsindikatorkriteriet för svälltrycket är mer än en storleksordning, så är marginalen för förlust av material (densitet) endast omkring en faktor två.

För fallet när bufferten eroderar genom kolloidbildning kan materialförlusten vara mer lokal. Det är då lämpligt att behandla gränsen för förluster över typiskt halva omkretsen. Detta innebär en förlust av 1 200 kg, vilket även täcker in situationen när förlusten sker närmare kapselns centrum. Detta värde innefattar ett visst mått av pessimism eftersom homogenisering i den horisontella riktningen försummas.

Som konstaterats i avsnitt 10.4.7 kommer jonstyrkan i grundvattnet, $\Sigma q[M^{qt}]$, att sjunka till värden under 4 mM laddningsekvivalenter, dvs bryta mot säkerhetsindikatorkriteriet R1c, för vissa deponeringshål under någon del av glaciationscykeln. Detta innebär att kolloider kan frigöras från dessa hål och från delar av återfyllningen. Närmare bestämt konstateras det i avsnitt 10.4.7 att mindre än två procent av deponeringspositionerna kan antas bli utsatta för utspädda förhållanden under en glaciationscykel och att de kommer att vara utsatta för dessa förhållanden endast under en bråkdel av tiden. Även om det ännu råder osäkerhet beträffande modelleringen av kolloidbildning och efterföljande erosion av buffertmaterialet – och angreppssättet i modelleringen därför tenderar att vara pessimistiskt, som diskuterats i avsnitt 10.3.11 – verkar det stå klart att processen som sådan är reell och att det med nuvarande kunskap inte på något försvarbart sätt går att hämma denna genom att exempelvis välja ett annat buffertmaterial.

I avsnitt 10.3.10 dras slutsatsen att en förhöjd temperatur kan ha en effekt på bentonitens mekaniska egenskaper, men effekten är inte speciellt uttalad ens vid 150 °C och förefaller inte tillta med tiden. Den här effekten diskuteras emellertid vid utvärderingen av skjuvlast på kapseln, se avsnitt 10.4.5. I avsnitt 10.3.10 och 12.4 dras slutsatsen att den förhöjda temperaturen inte kommer att ha någon betydande inverkan på buffertens mineralogiska egenskaper.

Som visats i avsnitten 10.4.3 och 12.3 kan buffertfrysning uteslutas även för fallet med en delvis eroderad buffert.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Kraven på lägsta tillåtna svälltryck och på hydraulisk konduktivitet bör revideras så att de återspeglar de nuvarande säkerhetsfunktionsindikatorkriterierna. Detta innebär att det lägsta svälltrycket bör vara 1 MPa i stället för 2 MPa. Även konstruktionsförutsättningarna bör revideras så att de förhållanden under vilka lägsta tillåtna svälltryck, hydrauliska konduktivitet och skjuvhållfasthet bör upprätthållas återspeglar de förhållanden som anges i konstruktionsunderlaget. Eftersom SR-Site visar att säkerheten upprätthålls även om en liten andel av deponeringshålen förlorar bufferten till följd av en grundvattensammansättning med en jonstyrka $\Sigma q[M^{q+}]$ som är lägre än 4 mM laddnings-ekvivalenter och eftersom inverkan av sådana förhållanden inte dramatiskt kan minskas genom att exempelvis välja ett annat buffertmaterial, behöver inte grundvatten med jonstyrkor $\Sigma q[M^{q+}]$ under 4 mM laddningsekvivalenter beaktas för konstruktionsförutsättningen.

Återkoppling till referensutformningen

De exempel på buffertmaterial som i nuläget analyserats bedöms vara lämpliga. Det finns skillnader mellan de två bentoniter som beaktats. Skillnaderna rör huvudsakligen deras geokemiska utveckling. Enligt avsnitt 10.3.10 påverkas dock båda materialen av de geokemiska förhållandena vid förvaringsplatsen och skillnaderna mellan dem kommer att minska med tiden. Inga betydande skillnader mellan de två materialen vad gäller den långsiktiga funktionen har identifierats.

15.5.7 Installerad mängd buffertmaterial

Vad gäller ”buffertdensitet” konstateras det i /SKB 2009a/ att: ”Den initialt deponerade mängden buffertmaterial bör vara sådan att den motsvarar en mättad buffertdensitet i den volym som initialt fyllts med buffert vilken är: lägre än 2 050 kg/m³ för att förhindra för hög skjuvlast på kapseln ... och högre än 1 950 kg/m³, dvs tillräckligt hög för att säkerställa att svälltrycket är 2 MPa med marginal för eventuella materialförluster.”

Enligt avsnitt 5.5.2 och 5.5.3 kommer den installerade genomsnittliga buffertdensiteten i ett deponeringshål att ligga väl inom gränserna för det önskade intervallet. Den slutliga fördelningen av buffertdensitet beror på:

- Homogenisering av block och pelletter.
- Materialförlust genom kanalbildning/erosion under den tidiga perioden efter utplacering.
- Buffertens expansion in i återfyllningen.

På lång sikt kan förlust till följd av kolloidfrigörelse även påverka densiteten i ett deponeringshål.

Buffertens initialtillstånd efter deponering utgörs av omättade bentonitblock och bentonitringar med mycket högre densitet än den genomsnittliga densiteten för hela hålet, samt en tom spalt vid kapselytan och en pelletfylld spalt med mycket låg densitet vid bergytan. Som visas i avsnitt 10.3.9 leder homogeniseringsprocessen till kvarvarande densitetsgradienter i materialet, huvudsakligen till följd av inre friktion. Detta innebär att densiteten i den ursprungliga pelletvolymen kan vara något lägre än 1 950 kg/m³, men säkerhetsfunktionsindikatorerna kommer trots detta att upprätthållas.

Kanalbildning följt av erosion under vattenmättnaden kan leda till en lokal förlust av buffertmaterial i en del deponeringshål, se avsnitt 10.2.4. För de tillåtna vattenflödena i deponeringshål, enligt avsnitt 5.2.1, kan densiteten lokalt bli lägre än 1 950 kg/m³, men säkerhetsfunktionskriterierna kommer fortfarande att upprätthållas.

Buffertens expansion in i återfyllningen och växelverkan mellan buffertblock och buffertpelletter diskuteras i avsnitt 10.3.8. Expansionen in i återfyllningen kommer att leda till en minskning av den installerade densiteten, men effekten är begränsad även för ogynnsamma beräkningsfall.

Fallet med frigörelse av kolloider från bufferten och återfyllningen, som redovisas i avsnitt 10.3.8, kan leda till en väsentlig minskning av buffertens densitet.

Som en följd av en förlust av buffertmaterial/buffertdensitet kan sulfid bildas till följd av mikrobiell aktivitet i den kraftigt kompakterade bentoniten, se avsnitt 10.3.13. Fastän de faktorer som begränsar aktiviteten inte är helt kända, tyder experimentella resultat på att det krävs en mättad densitet på minst 1 800 kg/m³ för att kopparkorrosion till följd av mikrobiell aktivitet ska hållas på en försumbar nivå.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

En buffert med en densitet av 1 950 kg/m³ kommer att ha goda marginaler med avseende på säkerhetsfunktionerna. Den här konstruktionsförutsättningen avser emellertid den installerade genomsnittliga densiteten i ett tvärsnitt av deponeringshålet och kan inte upprätthållas i alla lägen inom volymen. Även om det har visats att det finns en marginal för att säkerställa en säker funktion hos bufferten, föreslås det att denna undre gräns kvarstår som en konstruktionsförutsättning. Anledningen är att säkerställa att marginalen till buffertförlust genom kanalbildning med erosion med mera är tillräcklig. Konstruktionsförutsättningen behöver därför förtydligas så att buffertförluster, som exempelvis orsakas av kanalbildning med erosion och homogenisering, inte behöver beaktas vid utvärderingen av om konstruktionsförutsättningen är uppfylld. Potentialen för och betydelsen av sådana förluster tas upp i säkerhetsanalysen.

Dessutom bör ytterligare utvärderingar genomföras för att öka kunskapen om betydelsen av begränsade lokala volymer av buffert med en lägre densitet än den huvudsakliga volymen. Utvärderingen bör omfatta både de mekaniska egenskaperna och möjligheten för betydande mikrobiell aktivitet.

Rönen från SR-Site pekar på att riskbidraget från skjuvlast på kapseln skulle minska ytterligare ifall buffertdensiteten var lägre än maximivärdet 2 050 kg/m³. Erfarenhet från arbetet med buffertens utformning tyder på att det skulle vara möjligt att ersätta den övre gränsen med en fördelning av tillåtna densiteter, så att bara en mindre andel av deponeringshålen skulle ha densiteter i närheten av 2 050 kg/m³. En sådan fördelning skulle också ta hänsyn till det torra buffertmaterialets innehåll av montmorillonit, se avsnitt 15.5.9. Den exakta formuleringen av en sådan fördelning kan emellertid endast göras i samarbete med konstruktörerna av bufferten och berganläggningen, så att det även kan säkerställas att det går att uppfylla den reviderade konstruktionsförutsättningen.

Återkoppling till referensutformningen

Tillverkningsmetoden som redovisats i avsnitt 5.5.2 ger en buffert med ett mycket smalare densitetsintervall än vad som tillåts i konstruktionsförutsättningarna. Med avseende på långsiktig prestanda stärker detta tilltron till analysen. Det primära skälet till detta är svälltryckets starka densitetsberoende. Ett smalare intervall av initial densitet innebär att ett mindre svälltrycksintervall behöver beaktas.

Om konstruktionsförutsättningen avseende initial buffertdensitet revideras kommer buffertens referensutformning och rutinerna för kvalitetskontroll av deponeringshålens geometri och av buffertinstallationen också att behöva revideras.

15.5.8 Buffertjocklek

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”De buffertdimensioner som används som referensdimensioner i SR-Can ska användas, utöver andra krav som påverkar bufferten och deponeringshålens geometri.”

Enligt avsnitt 14.3 anses en större mängd buffertmaterial inte vara ett praktiskt sätt att dämpa effekterna av buffererosion. En större mängd buffertmaterial kan leda till att det tar något längre tid innan det uppstår advektiva förhållanden i deponeringshålet, men betraktas inte som en lösning på problemet. Det krävs också fortsatt forskning och utveckling med avseende på erosionsprocessen.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Den nuvarande konstruktionsförutsättningen, som hänför sig till dimensioner som utvärderats i SR-Can, är i huvudsak lämplig. Trots det föreslås en omformulering på ett sätt som ger bättre vägledning för projektörer. Exempelvis kan vissa minimidimensioner anges där hänsyn också tas till de största tillåtna mellanrummen mellan buffert och kapsel och mellan buffert och bergvägg.

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig.

15.5.9 Buffertens mineralogiska sammansättning

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Innehållet av montmorillonit i det torra buffertmaterialet måste vara 75–90 viktprocent. Halten organiskt kol ska vara lägre än en viktprocent. Sulfidinnehållet får inte överstiga 0,5 viktprocent av den totala massan, vilket motsvarar ungefär en procent pyrit. Det totala svavelinnehållet (innefattande sulfiden) får inte överstiga en viktprocent.”

Kravet på montmorillonitinnehåll är kopplat till buffertens svällegenskaper. En utvärdering i SR-Site visar att extrema kombinationer av densiteter och montmorillonitinnehåll leder till ett bredare intervall för svälltryck än vad tidigare ansetts troligt. Densiteten är dock fortfarande den viktiga faktorn för svälltrycket.

Kraven på kol, sulfid och svavel rör inverkan av dessa material på kopparn. Som visas i kapitel 10 utgör kopparkorrosion som orsakas av ämnen i bufferten, återfyllningen och grundvattnet inte något hot mot kapselns integritet under den inledande tempererade perioden så länge bufferten är intakt. Även under hela analysperioden på en miljon år skulle den förväntade korrosionen av kapseln för ett antaget tempererat klimat bara leda till korrosionsdjup av i storleksordningen ett fåtal millimeter, även för de mest ogynnsamma deponeringspositionerna i Forsmark.

Buffertens skjuvegenskaper kan påverkas av den laddningskompenserande katjonen. Det konstateras dock att kraven måste vara uppfyllda för alla katjonsammansättningar.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna bedöms vara lämpliga.

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig. Intervallet för innehåll av montmorillonit bedöms vara lämpligt. Det kan fortfarande vara meningsfullt att undersöka möjligheten att i tillverkningen justera blockdensiteten för de bentonitleveranser som ligger utanför intervallet 80–85 procent.

15.5.10 Bottenplattan i deponeringshålen

I /SKB 2009a/ finns det inga specifika konstruktionsförutsättningar som är relaterade till bottenplattan. Eftersom plattan utgör en del av den nuvarande referensutformningen behövs emellertid återkoppling rörande dess lämplighet.

I avsnitt 10.2.4 konstateras att det behövs ytterligare utvärderingar och möjligen utvecklingsarbete för bottenplattan. Det finns osäkerheter som berör den nuvarande konstruktionen och som det ännu inte finns någon lösning för. Dessa är förknippade med bottenplattans tjocklek och kompressibilitet samt med risken att buffert-kapselpaketet lyfts innan återfyllningen är på plats. En tjock, komprimerbar bottenplatta kan leda till densitetsförlust till en nivå under konstruktionsmålet $1\,950\text{ kg/m}^3$ i botten av bufferten. Dessutom konstateras det i avsnitt 10.3.12 att även om inverkan av en nedbruten bottenplatta på massöverföringsmotståndet i närområdet är mindre än inverkan av antagen spjälkning i deponeringshålet, så kommer den nedbrutna bottenplattan att utgöra den huvudsakliga transportvägen om spjälkning kan undvikas och om bottenplattan skärs av en spricka. En annan frågeställning är den kemiska växelverkan mellan bottenplattan och bufferten. Denna befanns vara acceptabel i SR-Site, men måste betraktas som en onödig störning.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Det finns inget skäl att tillföra konstruktionsförutsättningar som direkt rör bottenplattan. Närvaron av den påverkar inte risken.

Återkoppling till referensutformningen

Med tanke på svagheterna förknippade med bottenplattans nuvarande konstruktion bör alternativa lösningar eftersträvas. Idealiskt skulle bara kapseln och bentonit vara tillåtna i ett deponeringshål.

15.5.11 Återfyllningen i deponeringstunnlarna

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Återfyllningens packning och täthet, både för ett initialt torrt tillstånd och efter fullständig vattenmättnad, måste vara tillräckliga för att säkerställa en kompressibilitet som resulterar i en lägsta densitet hos den mättade bufferten i enlighet med de givna förhållandena (dvs $1\,950\text{ kg/m}^3$) med tillräcklig marginal för förlust av återfyllning och för osäkerheter.”

Dessutom ska följande funktionsindikatorkriterier upprätthållas i återfyllningen för att begränsa ämnestransport:

- *Hydraulisk konduktivitet $< 10^{-10}$ m/s.*
- *Svälltryck $> 0,1$ MPa.*

Det konstateras i avsnitt 10.3.9 att buffertens svälltryck och de därmed förknippade säkerhetsfunktionerna kommer att upprätthållas under buffertens expansion in i återfyllningen för många tänkbara kombinationer av buffert- och återfyllningsförhållanden. Dessutom görs flera troligen pessimistiska antaganden i denna analys, inklusive antagandet att bufferten är helt vattenmättad och homogeniserad från början, antagandet att den mekaniska kontakten mellan återfyllningsblocken är svag och där eventuella krossade block lokalt nära sulan inte tas med i beräkningen, samt antagandet att återfyllningsblocken inte är staplade så att de överlappar varandra.

För fallet med förlust av återfyllningsmaterial kan en maximal förlust av 220 ton i en sektion av en deponeringstunnel tillåtas innan advektiva förhållanden måste beaktas i deponeringshålet i denna sektion. Som konstaterats i avsnitt 10.3.11 kan advektiva förhållanden inte uteslutas i några enstaka deponeringshål som ligger närmast den spricka som skär tunneln, men bidraget från förlust av återfyllning i deponeringstunnlar till den möjliga uppkomsten av advektiva förhållanden i deponeringshål betraktas som försumbart. För ett fåtal lägen där tunneln skärs av en mycket transmissiv deformationszon kan eventuellt mer än 220 ton förloras, men detta är inte relevant för kapselns integritet. En sådan lokal förlust av återfyllning till följd av erosion innebär inte att den hydrauliska konduktiviteten i hela tunneln kommer att påverkas och sådana händelser bedöms inte utgöra någon risk för säkerheten.

Generellt har ett krav på den hydrauliska bulkkonduktiviteten i återfyllningen en mycket begränsad betydelse och skulle förmodligen kunna tas bort. Däremot är kravet på svälltryck betydelsefullt för att säkerställa att kontakten mellan återfyllningen och bergväggen är tillräckligt tät.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna gällande återfyllning i deponeringstunnlar bedöms vara lämpliga. De bör dock detaljeras för att avspegla att återfyllningens egenskaper inte måste upprätthållas där deponeringstunneln skär mycket transmissiva sprickor (som absolut inte skulle tillåtas att skära deponeringshål).

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig. De identifierade osäkerheterna avseende den långsiktiga funktionen hos en återfyllning med nuvarande utformning är få. Det pågående detaljerade konstruktions- och provningsarbetet avseende tunnelpluggen måste dock verifiera att denna kommer att vara tillräckligt tät för att säkerställa att inflödet till deponeringshål kommer att vara lägre än de värden som skulle leda till oacceptabel kanalbildning och erosion av bufferten.

15.5.12 Val av deponeringshål – mekanisk stabilitet

I /SKB 2009a/ konstateras följande:

- *Det är inte tillåtet att förlägga deponeringshål närmare än 100 m från deformationszoner med en spårlängd längre än 3 km.*
- *Deponeringshål ska, så långt som rimligen är möjligt, väljas så att de inte utsätts för kraftigare skjuvning än vad kapseln kan motstå. För att uppnå detta ska EFPC tillämpas vid valet av deponeringspositioner.*

Enligt avsnitt 10.4.5 leder tillämpning av dessa konstruktionsförutsättningar till en mycket låg sannolikhet för skjuvrörelser som är större än 5 cm i ett deponeringshål. Det resulterande riskbidraget från kapslar som gått sönder till följd av detta är mycket litet, även med det nuvarande pessimistiska antagandet att brott sker för alla fall där skjuvningen överskrider 5 cm. Det finns således inget skäl att skärpa konstruktionsförutsättningen. Analyserna i avsnitt 10.4.5 visar emellertid också att endast några av de 3 km långa deformationszonerna kan hysa jordskalv och att EFPC-regeln är ett indirekt sätt att undvika alltför stora sprickor. Dessutom har det tidigare påpekats /SKB 2009a/ att det kan vara möjligt att minska respektavståndet på 100 m till vissa deformationszoner. Detta kan göras baserat på en platsspecifik detaljerad och individuell utvärdering av den faktiska utbredningen av skadezonen inklusive deformationszonens förgreningar, i kombination med reviderade kriterier för vilka sprickor som ska undvikas i deponeringshål.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Möjligheten att revidera nuvarande konstruktionsförutsättningar är direkt kopplad till de möjliga framstegen inom det detaljerade undersökningsprogrammet för karakterisering av den faktiska omfattningen av skadezoner och förgreningar för de få deformationszoner som är längre än 3 km vid Forsmark, och för att finna alternativa metoder för att storleksbestämma sprickor som skär deponeringshål. Innan betydande framsteg görs beträffande detta bör nuvarande konstruktionsförutsättningar gälla. En omformulering kan dock övervägas för att skapa utrymme för dessa möjliga framsteg, utan att konstruktionsförutsättningen behöver modifieras ytterligare en gång. En möjlighet vore därför att den sista meningen ändras till: ”EFPC är ett verktyg för att identifiera sådana sprickor, men det kan ersättas eller kompletteras med andra verktyg om det går att visa att användningen av sådana verktyg inte ökar riskbidraget.”

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig. Ytterligare arbete med att karakterisera den faktiska omfattningen av skadezoner och förgreningar för de få deformationszoner som är längre än 3 km vid Forsmark samt för att finna alternativa metoder för att storleksbestämma sprickor som skär deponeringshål är berättigat. Om detta arbete är framgångsrikt kan konstruktionsreglerna ändras enligt resultaten.

15.5.13 Val av deponeringshål – hydrologiska och transportrelaterade förhållanden

Stora sprickor och sprickor med höga flödeshastigheter som skär deponeringshål är gemensamma faktorer för många identifierade säkerhetsrelaterade frågeställningar. Flöde i sprickor som skär deponeringshål påverkar:

- Kanalbildning i bentoniten.
- Frigörelse av kolloider.
- Nedträngning av syre.
- Inflöde av korrosiva ämnen, vilket potentiellt leder till kapselbrott.
- Utflöde av radionuklider (både i fallet med korrosion och i fallet med skjuvrörelse, i synnerhet för eroderad buffert).

Höga flödeshastigheter i deponeringshål är också generell förknippade med låga F -värden i geosfären för både in- och utströmningsvägar.

I /SKB 2009a/ konstateras följande:

- *Den totala vattenvolymen som strömmar in i ett deponeringshål, för tiden från det att bufferten exponeras för inströmmande vatten till mättnad, ska begränsas för att säkerställa att högst 100 kg av det initialt deponerade buffertmaterialet går förlorat på grund av kanalbildning/erosion. Detta betyder, enligt nuvarande kunskap, att den totala vattenvolymen som strömmar in i ett godkänt deponeringshål måste vara mindre än 150 m³.*
- *Sprickor som skär deponeringshålen ska ha tillräckligt låg konnekterad transmissivitet (ett specifikt värde kan inte anges i nuläget).*

Resultaten från SR-Site tyder på att dessa förutsättningar bör revideras, både avseende kanalbildning med erosion och avseende följderna för korrelation med Darcyflöde under den analyserade perioden.

Kanalbildning med erosion

I avsnitt 10.2.4 dras slutsatsen att kanalbildning följt av erosion inte kan uteslutas. Upp till omkring 100 kg torr bentonit kan förloras genom erosion utan att buffertens funktion äventyras. Osäkerheten i bedömningen av den motsvarande eroderade volymen behöver beaktas i samband med att konstruktionsförutsättningarna för tillåtet tillflöde till deponeringshålen revideras.

Dessutom bedöms den fastslagna regeln för en högsta tillåten total tillflödesvolym till ett deponeringshål ha en begränsad praktisk nytta för konstruktörer och den är även relaterad till hur mycket vatten som skulle passera deponeringstunnelns plugg före mättnad.

Korrelation med Darcyflöde och transportmotstånd i fjärrområdet

Analyserna i SR-Site talar för att risken ytterligare skulle minska mycket om det var möjligt att identifiera de deponeringshål som har de största Darcyflödena under mättade förhållanden. Enligt kapitel 10 kan endast några få procent av alla deponeringshål uppnå utspädda förhållanden på grund av den mycket låga frekvensen av vattenförande sprickor på förvaringsplatsen vid Forsmark. Av dessa skulle endast en handfull, de med de största Darcyflödena, förlora bufferten under den en miljon år långa tidsperioden. Därefter skulle ännu färre kapslar gå sönder till följd av dessa förhållanden. Slutsatsen är därför att om det vore möjligt att på ett bättre sätt identifiera dessa få deponeringspositioner före inplacering, skulle den redan låga risken markant minska utan något betydande bortfall av användbara deponeringspositioner. Utmaningen vid projekteringsarbetet och den detaljerade undersökningen blir i stället att hitta dessa positioner.

Det bör noteras att eftersom EFPC tillämpas i SR-Site så innebär det i praktiken att även ett hydrauliskt övervägande görs. Eftersom det finns en korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet, även om den är osäker, minskar i själva verket antalet deponeringshål med högt Darcyflöde betydligt då EFPC tillämpas. Denna observation understryker det faktum att det inte är EFPC i sig som är viktigt för att undvika höga flöden, utan i stället att identifiera en observerbar egenskap med vars hjälp det går att hitta potentiella flödessprickor.

Enligt avsnitt 14.3.2 förefaller det finnas möjligheter att ytterligare öka säkerheten genom att undvika deponeringshål med stora tillflöden, även om korrelationen med det långsiktiga Darcyflödet inte är ett-till-ett givet skillnaderna i randvillkor. Tillflödena kommer dessutom att påverkas av naturliga tätningseffekter (skin effects) och injektering och det kommer i praktiken även att finnas en undre detektionsgräns. Dessa störningar kan i viss utsträckning hanteras genom att kräva att deponeringshål som skärs av sprickor som kan ge tillflöden som är högre än ett visst värde ska undvikas. Detta innebär att de hydrauliska egenskaperna hos de sprickor som skär borrhålet bör testas i pilothålet innan det fullskaliga hålet borrar, för att på så sätt undvika naturliga tätningseffekter. Dessutom bör deponeringshål som skärs av sprickor som uppvisar synlig mängd injekteringsmaterial uteslutas, eftersom förekomsten av injekteringsmaterial tyder på att sprickan var relativt vattenförande före injekteringen.

Aterkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Med hänsyn till kanalbildning med erosion så förefaller den fastlagda gränsen på 150 m³ inkommande vatten till deponeringshålet före vattenmättnad vara lämplig. En mer praktisk konstruktionsregel än att begränsa den totala vattenvolymen som kommer in i deponeringshålet är dock eftersträvansvärd. Indata för en sådan uppdaterad regel kräver emellertid mer forskning och utveckling.

Förslaget är att nuvarande konstruktionsförutsättningar revideras så att deponeringshål med potential för höga Darcyflöden under analysperioden undviks. Den praktiska formuleringen av regeln måste utarbetas vidare, men en preliminär regel kan vara att undvika deponeringshål som skärs av sammanhängande transmissiva sprickor som kan ge högre tillflöden än 0,1 l/min. Deponeringshål som skärs av sprickor med synlig mängd injekteringsmaterial bör också uteslutas. Att göra denna regel mer restriktiv genom att minska det tillåtna tillflödet till 0,01 l/min skulle möjligen minska risken ytterligare, men att tillämpa den här regeln i praktiken kan vara svårt. Förslaget är i stället att detta kriterium kombineras med en tillämpning av EFPC för hela deponeringshålet, vilket förklaras i avsnitt 5.2.2, men bara för sprickor som uppvisar potential för grundvattenflöde. Fullständigt läkta sprickor skulle av detta skäl inte beaktas.

Återkoppling till referensutformningen

Ytterligare utveckling behövs för att ta fram en mer praktisk konstruktionsregel än en begränsning av den totala vattenmängden som kan komma in i ett deponeringshål från den tidpunkt då bufferten exponeras för inströmmande vatten fram till mättnad. En betydelsefull faktor i detta sammanhang rör de praktiska möjligheterna att begränsa flödet genom pluggen i deponeringstunneln innan återfyllningen mättats.

Den reviderade konstruktionsförutsättningen för den tillåtna transmissiviteten hos sprickor som skär deponeringshålen, tecken på injektering och tillämpning av EFPC måste beaktas när förvarsutformningen uppdateras och när det detaljerade undersökningsprogrammet vidareutvecklas.

15.5.14 Hydrauliska egenskaper i deponeringshålets väggar

I I/SKB 2009a/ konstateras följande: ”Före deponering av kapslar måste den sammanhängande faktiska transmissiviteten, integrerad utefter deponeringshålets hela vägg längd och beräknad som ett medelvärde runt hålet, vara mindre än 10^{-10} m²/s.”

Det finns väsentligen två skäl till att detta villkor eventuellt inte kan upprätthållas: dels skador som uppkommer till följd av byggandet, dels nya sprickor till följd av spjälkning. Överensstämmelsen med konstruktionsförutsättningen påvisas i **Berglinjerapporten** och det finns inget skäl att revidera konstruktionsförutsättningen baserat på resultaten i SR-Site. Eftersom spjälkning även kan uppstå till följd av den termiska påfrestningen är det dock av värde att överväga dess betydelse.

I den bergmekaniska utvärderingen, se avsnitt 10.3.5, dras slutsatsen att termiskt inducerad spjälkning sannolikt kommer att ske, men att det mottryck som utövas av bentonitpelletarna i spalten mellan buffert och bergvägg kan undertrycka spjälkningen, eller åtminstone hålla de spjälkade skivorna på plats och minimera den hydrauliska transmissiviteten i den spjälkade zonen.

Utvärderingen av spjälkningens inverkan, se avsnitt 10.3.6, visar att spjälkning kan öka massöverföringen (det ekvivalenta flödet Q_{eq}) för Q1-vägen med mer än en storleksordning, medan de andra vägarna inte påverkas. Denna ökning har dock i själva verket ingen inverkan på risken, eftersom spjälkning inte påverkar det lokala Darcyflödet om advektiva förhållanden råder i deponeringshålet eller om kapseln skadas av en skjuvande spricka.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Eftersom termiskt inducerad spjälkning påverkar risken obetydligt, är förslaget att de nuvarande konstruktionsförutsättningarna behålls och ingen konstruktionsregel kopplad till dess förekomst specificeras.

Återkoppling till referensutformningen

Även om förekomsten av termiskt inducerad spjälkning har en obetydlig inverkan på risken bör arbetet med att hantera och minska termiskt inducerad spjälkning fortsätta.

15.5.15 Deponeringspositioner – anpassade till de termiska förhållandena

Följande gäller enligt nuvarande konstruktionsförutsättningar: ”Buffertgeometri (exempelvis hålutrymmen), buffertens vatteninnehåll och avstånd mellan deponeringshål ska väljas så att temperaturen i bufferten är lägre än 100 °C.”

Enligt diskussionen i avsnitt 10.3.10 är temperaturkravet tillräckligt för att skydda bufferten men möjligtvis alltför strikt, åtminstone om temperaturutvecklingen beaktas. Det har konstaterats att en förhöjd temperatur kommer att påverka bentonitens mekaniska egenskaper, men effekten är inte speciellt uttalad ens vid 150 °C och förefaller inte tillta med tiden.

Den termiska analysen, se avsnitt 10.3.4, visar att den nuvarande förvarsutformningen med dess avstånd mellan deponeringshål, buffertgeometri och maximala resteffekt, ger tillräcklig marginal till kriteriet för högsta tillåtna temperatur i bufferten. Detta även med hänsyn tagen till den rumsliga

variationen i berggrundens termiska egenskaper och med pessimistiska värden för övriga data som behövs för att beräkna resultatet. Det är emellertid möjligt att tänka sig deponeringsföljder som skulle leda till en temperatur i bufferten som överstiger det maximalt tillåtna värdet, exempelvis när en kapsel deponeras centralt i ett deponeringsområde där deponering i närliggande positioner skett flera år tidigare. Sådana situationer kan dock alltid undvikas, men denna möjlighet understryker behovet av en omsorgsfull hantering av deponeringsföljden med avseende på temperatur.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

Det förefaller inte finnas ett omedelbart behov av att revidera konstruktionsförutsättningen för bufferttemperaturen. Det kan dock vid den faktiska konstruktionen av inkapslingsanläggningen finnas behov av en mer detaljerad regel för den maximalt tillåtna resteffekten i kapseln, exempelvis om det kan accepteras att någon kapsel har en något högre effekt. För att tillhandahålla sådana detaljerade regler kan det strikta nuvarande kravet på maximal temperatur i bufferten behöva omprövas.

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen, i vilken maximal resteffekt, buffertgeometri och minsta avstånd mellan deponeringshål anges, förefaller lämplig. Utformningen kan emellertid naturligtvis revideras om konstruktionsförutsättningarna revideras. Restriktioner avseende deponeringsföljden för kapslar bör införas för att säkerställa att temperaturkraven är uppfyllda under hela driftperioden.

15.5.16 Kontroll av den skadade zonen (EDZ)

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Sprängskador ska begränsas och inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet, utefter en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och beräknat som ett medelvärde över tunnelsulan, som är högre än 10^{-8} m²/s. På grund av den preliminära statusen för detta kriterium måste dess lämplighet verifieras i SR-Site.”

Att den övre transmissivitetsgränsen på 10^{-8} m²/s är tillräcklig visas verkligen i SR-Site. Enligt utvärderingen i avsnitt 14.3.2 är antalet korroderade kapslar praktiskt taget opåverkat då ett fall utan en skadad zon jämförs med det grundläggande antagandet att EDZ-transmissiviteten är 10^{-8} m²/s. Analysen visar dock även att en skadad zon med högre transmissivitet kan påverka risken, eftersom antalet kapselbrott börjar öka, om än måttligt, när transmissiviteten ökar. Den skadade zonen förefaller ha än mindre betydelse för radionuklidtransport. För pinnhålsfallet, se avsnitt 13.7.2, innebär förekomsten av en skadad zon med en transmissivitet på 10^{-8} m²/s en högre dos i jämförelse med ett fall utan en skadad zon, men endast marginellt. Om transmissiviteten i den skadade zonen är större ökar inte dosen ytterligare.

Belägg som redovisats i **Berglinjerapporten** och vidareutvecklats i **Datarapporten**, se även avsnitt 10.2.2, tyder på att det finns åtskilligt stöd för att en potentiell skadad zon som uppkommer vid bergguttaget kommer att ha en transmissivitet som är lägre än den som maximalt tillåts i konstruktionsförutsättningarna. Vidare tyder data på att en kontinuerlig skadad zon inte alls kommer att utvecklas. Enligt **Berglinjerapporten** krävs det dock en vidareutveckling av den metod som utnyttjas för att kontrollera och inspektera den skadade zonen och dessutom att denna metods tillförlitlighet påvisas.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De variationsfall som analyserats i SR-Site bekräftar att den föreslagna övre gränsen på 10^{-8} m²/s för konnekterad transmissivitet i skadade zoner är lämplig och inte behöver sänkas. En konnekterad transmissivitet i skadade zoner som överstiger detta värde börjar dock påverka risken och behöver undvikas.

Återkoppling till referensutformningen

Betydelsen av att tydligt fastställa att det inte finns någon sammanhängande EDZ eller att dess konnekterade transmissivitet är lägre än 10^{-8} m²/s visar att det krävs ytterligare utveckling av metoden för att kontrollera utvecklingen av den skadade zonen såväl som utveckling av teknik för att verifiera följderna av bergguttaget.

15.5.17 Material för injektering och betongsprutning

Enligt /SKB 2009a/ gäller följande restriktioner i deponeringstunnlar:

- *Endast material med "lågt pH" ($pH < 11$).*
- *Ingen kontinuerlig sprutbetong.*
- *Kontinuerliga injekteringsborrhål utanför tunnelns periferi ska undvikas.*

Enligt **Berglinjerapporten** innehåller referensutformningen cement med lågt pH som används i sprutbetongsförstärkning, för att innesluta olika bergförstärkningsselement och i injekteringsblandningar för tätningsändamål. Olika recept som ger ett porvatten med $pH < 11$ har utvecklats med syftet att injektera i bergarter med potential för oacceptabla tillflöden, såväl som för bergförstärkningskomponenter som behöver inneslutas i cement. Dessutom bekräftar utvärderingen av förvarsutvecklingen som presenterats i kapitel 10 att de i dag uppskattade mängderna av konstruktions- och kvarlämnat material efter deponering, återfyllning och förslutning av bergutrymmena skulle ha en försumbar påverkan på säkerhetsfunktionerna. Den modellering som redovisas i avsnitt 10.3.12 visar att den givna cementsammansättningen kommer att ge ett $pH > 11$ i bottenplattan under en kort period, men att detta har en försumbar inverkan på bufferten.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De i dag gällande konstruktionsförutsättningarna bedöms vara lämpliga, men bör formuleras mer korrekt för att ange att endast material med tillräckligt låg alkalinitet, som inte ger upphov till pH-värden över 11 i det grundvatten som exponeras för materialet, är tillåtna. Dessutom bör det klargöras att en kortvarig puls över pH 11 när betongen härdar kan vara godtagbar.

Återkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen bedöms vara lämplig, även om den praktiska tillämpbarheten av de föreslagna materialen måste testas ytterligare och de slutliga recepten kan komma att modifieras. Även om mängderna av injekteringsbruk och förstärkningsmaterial som redovisas i **Berglinjerapporten** inte skulle äventyra säkerheten och att troligtvis ännu större mängder och material som är mer alkaliska skulle vara godtagbara, kommer det att vara viktigt att noggrant registrera alla material som förs in i (och tas ut från) förvaret. Detta möjliggör uppdaterade analyser av huruvida mängderna kommer i närheten av skadliga nivåer.

15.5.18 Förvarsdjup

I /SKB 2009a/ konstateras följande:

- *Förvarsvolymer och förvarsdjupet måste väljas där det är möjligt att finna stora volymer berg som uppfyller de specifika kraven på deponeringshål.*
- *Med hänsyn till potentiell frysning av buffert och återfyllning, krävet på temperaturer som gynnar de mekaniska egenskaperna hos kapseln, yterrosion och oavsiktligt mänskligt intrång ska djupet vara betydande. Analyser i SR-Can bekräftar att detta uppnås genom att fastställa att det minsta djupet ska vara det som specificeras för ett KBS-3-förvar, dvs minst 400 m.*

Analyserna i SR-Site styrker lämpligheten av det valda förvarsdjupet. En mer detaljerad bedömning ges i avsnitt 14.3.4.

Återkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna är lämpliga.

Återkoppling till referensutformningen

Det finns ingen anledning att revidera det valda förvarsdjupet baserat på resultaten från SR-Site.

15.5.19 Stamtunnlar, transporttunnlar, tillfartstunnlar, schakt och centralområde samt förslutning

I /SKB 2009a/ konstateras följande:

- *Under toppförslutningens nivå måste den integrerade effektiva konnekterade hydrauliska konduktiviteten hos återfyllningen i tunnlar, ramp och schakt och i den skadade zonen som omger dem vara lägre än 10^{-8} m/s. Det här värdet måste inte upprätthållas i sektioner där exempelvis tunneln eller rampen går genom kraftigt transmissiva zoner. Det finns ingen begränsning för den hydrauliska konduktiviteten i centralområdet.*
- *För toppförslutningen finns inga krav gällande hydraulisk konduktivitet.*
- *Toppförslutningens djup kan anpassas till det förväntade permafrostdjupet under analysperioden, men toppförslutningen får inte ligga på större djup än 100 m ovanför förvarsdjupet.*

Referensutformningen som redovisas i **Produktionsrapporten för förslutningen** och i **Berglinjerapporten** överensstämmer med dessa konstruktionsförutsättningar. Analyserna i SR-Site visar att en utformning som följer dessa regler skulle vara lämplig. Baserat på resultaten från analyser med varierande transmissivitet hos den skadade zonen, som diskuteras i avsnitt 15.5.16, är det heller inte uppenbart att dessa regler kan formuleras mildare. Det är emellertid troligt att den direkta inverkan på risken endast skulle gälla den skadade zonen i deponeringstunnlarna, medan en högre transmissivitet troligen skulle kunna tillåtas i övriga tunnlar. En sådan situation har emellertid inte analyserats i SR-Site.

Aterkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna är lämpliga. För att ytterligare lätta på kraven skulle det krävas fler känslighetsanalyser med inriktning på de hydrauliska egenskaperna för tillfarter, samt för stam- och transporttunnlarna.

Aterkoppling till referensutformningen

Den nuvarande referensutformningen kan, baserat på deponeringstunnelkonceptet, troligtvis förenklas utan att bryta mot de gällande konstruktionsförutsättningarna. Dessutom kan ytterligare förenklingar troligtvis genomföras om konstruktionsförutsättningarna skulle kunna revideras enligt ovan.

15.5.20 Förslutning av borrhål

I /SKB 2009a/ konstateras följande: ”Borrhål måste förslutas så att de inte i onödan försämrar förvarets inneslutnings- eller retentionsegenskaper. Detta uppnås preliminärt om borrhålsförslutningens hydrauliska konduktivitet är $< 10^{-8}$ m/s, vilket säkerställs om förslutningens svälltryck är $> 0,1$ MPa. Det här värdet måste inte upprätthållas i sektioner där hål exempelvis går genom mycket transmissiva zoner.”

Påverkan av ett öppet borrhål på grundvattenflödet i förvaret och det omgivande berget har studerats genom att borrhål har införts på olika platser i den hydrogeologiska modell som använts för analyserna av den tempererade perioden i SR-Site /Joyce et al. 2010/. Som konstaterats där och i avsnitt 10.3.6 är inverkan av felaktiga borrhålsförslutningar mycket måttlig. Dessutom kommer, enligt utvärderingen som redovisas i avsnitt 10.3.14, borrhålsförslutningarnas referensutformning att fungera som avsett. Klart är att bentoniten kan gå förlorad i sektioner som skär sprickor med stora flöden, men i referensutformningen finns det ingen bentonit i sådana sektioner. Det enda problemet med förslutningarna består i att visa att de fungerar. Den centrala frågeställningen är att det är svårt att kontrollera förslutningarnas kvalitet efter installationen. Bentonitförlust över en sträcka på några meter i förslutningarna kommer att leda till en total funktionsförlust i den sektionen, medan resten av förslutningen kommer att vara praktiskt taget opåverkad. Förslutningens funktion är inte att hindra flöde i de skärande sprickorna, utan att hindra flödet utefter borrhålet. Därför utgör en funktionsförlust längs några meter inte någon viktig faktor som hänsyn behöver tas till.

Aterkoppling till konstruktionsförutsättningarna

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna är lämpliga. Det kan emellertid hävdas att de nuvarande konstruktionsförutsättningarna för borrhålsförslutningarna är alltför strikta, eftersom även öppna borrhål förefaller ha en begränsad inverkan på flödet. Eftersom det kan vara svårt att kontrollera resultatet

av förslutningens nuvarande utformning, kan det vara av intresse att analysera om en lösning som ger en större effektiv genomsläpplighet i borrhålsförslutningarna, men som skulle vara mer robust att kontrollera, skulle ge ett tillräckligt bra skydd. Att mildra konstruktionsförutsättningarna på det här sättet skulle dock kräva ytterligare känslighetsanalyser.

Återkoppling till referensutformningen

Analysen i SR-Site tyder på att referensutformningen är lämplig för ändamålet. Om konstruktionsförutsättningarna mildras kan det emellertid vara värt att undersöka mer robusta utformningar.

15.6 Återkoppling till detaljerade undersökningar och platsmodellering

I tidigare kapitel har det visats att flera platsspecifika förhållanden har stor inverkan på förvarets utveckling och i vissa fall även på individrisken. Även om tilltron till kunskapen om förvarsplatsen anses som tillfredsställande och återstående osäkerheter är tillräckligt begränsade för att medge riskuppskattningar som anger en övre gräns, kan förvaret optimeras ytterligare med avseende på effektivitet och riskreducering. Av analysen av konstruktionsförutsättningarna i föregående avsnitt framgår dessutom att de flesta sådana potentiella förbättringar avser möjligheter att lokalt anpassa deponeringstunnlarna och deponeringshålerna till de förhållanden som påträffas i berggrunden. Dessutom återstår vissa frågor avseende egenskaperna hos bergmassan utanför deponeringsområdenas omedelbara närhet. Återkoppling till de detaljerade platsundersökningarna och till platsmodelleringen kan således ges, under beaktande av den tilltro och osäkerhet i **Platsbeskrivning Forsmark** som sammanfattas i kapitel 4.

Ett ramprogram för de detaljerade undersökningarna och den åtföljande platsbeskrivande modelleringen har tagits fram och beskrivs i /SKB 2010b/. Det konstateras allmänt att detta ramprogram och de planer som presenterats för att utveckla ramverket till det faktiska detaljerade undersökningsprogrammet är adekvata. Resultaten från SR-Site är dock viktiga för att prioritera och närmare specificera utvecklingsbehoven.

15.6.1 Fortsatt karakterisering av deformationszoner med potential att orsaka stora jordskalv

För att säkerställa deponeringshålens mekaniska stabilitet är det nödvändigt att deponeringshålerna ligger med lämpliga respektavstånd från deformationszoner som har potential att hysa större jordskalv, se avsnitt 15.5.12. Enligt **Platsbeskrivning Forsmark** är tilltron mycket hög till att det fåtal sådana zoner som redan identifierats är de enda som finns på platsen, och att ännu färre av dem skär förvarsvolymen på ett sådant sätt att hänsyn behöver tas till respektavstånd.

Det kommer även att vara viktigt att lokalt befästa att de tillämpade respektavstånden är lämpliga med hänsyn till observationer (exempelvis vid kartering i transporttunnlar) av de fåtal zoner som kan hysa större jordskalv och som förekommer i förvarets omedelbara närhet. Programmet för detaljerade undersökningar behöver därför lägga mer resurser på att:

- Fastställa omfattningen av skadezonen för de få deformationszoner som kan hysa större jordskalv vid förvarsplatsen i Forsmark.
- Identifiera och karakterisera dessa deformationszoners förgreningar.

Enligt ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/ räcker de verktyg som finns i dag för en sådan karakterisering, vilket medger en utveckling av mer detaljerade karakteriseringsplaner.

15.6.2 Vidareutveckla hjälpmedlen för att begränsa storleken på sprickor som skär deponeringshål

För att kapslarna ska vara mekaniskt stabila krävs att de inte skärs av sprickor som är tillräckligt stora för att orsaka skjuvbrott på kapseln i händelse av jordskalv. Som noteras i avsnitt 15.5.12 är det kriterium som för närvarande används, EFPC, bara ett indirekt underlag för att undvika sådana stora sprickor. Användningen av EFPC innebär att flera deponeringspositioner kan komma att uteslutas även om sprickan som skär dem inte är tillräckligt stor för att utgöra ett problem. Hur effektivt EFPC

är, dvs hur stor risken är att en problematisk spricka förbises, beror i viss omfattning på den statistiska fördelningen av sprickornas storlek. Följaktligen är det av intresse att vidareutveckla hjälpmedlen för att gränssätta storleken hos de sprickor som skär deponeringshål. Planer för ett sådant utvecklingsarbete sammanfattas i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/.

15.6.3 Minska osäkerheten i DFN-modellerna

Riskbidraget från stora jordskalv beror delvis på den statistiska beskrivning av sprickorna som används, även om osäkerheten i denna beskrivning till stor del minskas genom tillämpning av den konstruktionsregel som anger att stora sprickor inte får skära kapseln. Osäkerheter som avser de geologiska DFN-modellerna är fortfarande ett problem. Att minska osäkerheten i den geologiska DFN-modellen skulle dessutom vara av vikt för att minska osäkerheten i den hydrogeologiska DFN-modellen, se avsnitt 15.6.5.

DFN-modellen för platsen är fortfarande relativt osäker och flera alternativ presenteras och utvärderas i SR-Site, se avsnitt 10.4.5. Utvärderingen av jordskalvsrisken tar därför hänsyn till detta stora osäkerhetsintervall, men trots det är riskbidraget mycket litet. Ytterligare insatser för att minska osäkerheterna är likväl berättigade.

I **Platsbeskrivning Forsmark** drogs slutsatsen att det enda sättet att markant minska osäkerheterna i den geologiska DFN-modellen är att använda undermarksdata. Sådana data innebär tunnelkartering och utvärderingar från borrhål (till exempel pilothål som borrar under byggverksamheten under jord) och enligt ramverket för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/ ska sådana data tas fram och utvärderas.

15.6.4 Identifiera konnekterade transmissiva sprickor

Analyserna i SR-Site tyder på att om det var möjligt att identifiera det fåtal deponeringshål som har de största Darcyflödena under mättade förhållanden, skulle detta dramatiskt minska risken utan någon signifikant förlust av användbara deponeringspositioner, se avsnitt 15.5.13. Hjälpmedel för att hitta (och sedan undvika) konnekterade transmissiva sprickor som kan ge högre inflöden och höga Darcyflöden in i och runt deponeringshål bör därför vara en prioriterad uppgift för de detaljerade undersökningarna. Detta bekräftas även i ramverket för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/, där det konstateras att det finns hydrauliska testmetoder för att möta detta behov, men att vidareutveckling krävs för att tolka sådan tester tillsammans med annan information från tunneln.

15.6.5 Förvarsvolymens hydrauliska egenskaper

Förvarsvolymens hydrauliska egenskaper, som beskrivs i den hydrogeologiska DFN-modellen, har tillsammans med den hydrauliska beskrivningen av deformationszonerna en stor inverkan på förvarets funktion. Som diskuterats tidigare kan dock betydelsen i viss mån minska genom att effektivare kriterier för att acceptera deponeringshål införs.

Även om tilltron är hög till den mycket låga förekomsten av konnekterade transmissiva sprickor, finns det stora osäkerheter avseende den faktiska fördelningen av dessa sprickors hydrauliska egenskaper. Detta beskrivs genom att olika varianter avseende korrelationen mellan sprickors storlek och transmissivitet formuleras och förs vidare i analysen. I kapitel 10, 12 och 13 visas det att valet av denna korrelation påverkar både antalet kapslar som blir otäta till följd av korrosion vid advektiva förhållanden i bufferten, och den resulterande transporten av frigjorda radionuklider. Därför dras slutsatsen att det skulle vara fördelaktigt med bättre begränsningar av den hydrogeologiska DFN-modellen, särskilt avseende korrelationen mellan storlek och transmissivitet. De osäkerheter avseende det flödesrelaterade transportmotståndet som följer av att enskilda sprickor hanteras som om de har enhetliga egenskaper, anses vara små baserat på de argument som ges i avsnitt 10.3.6.

Liksom för den geologiska DFN-modellen dras i **Platsbeskrivning Forsmark** slutsatsen att osäkerheterna i den hydrogeologiska DFN-modellen endast kan minskas markant med hjälp av data från undermarkskaraktiseringen. En kombination av hydrauliska undermarksdata, exempelvis från hydrauliska tester i borrhål (till exempel pilothål som borrar under byggverksamheten under jord), och den geologiska karakteriseringen av de sprickor som står för det uppmätta flödet kommer att medge ytterligare integrering mellan den geologiska och den hydrogeologiska modelleringen. En sådan integrerad modellering förutses även i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/.

15.6.6 Verifiera överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna för EDZ

Enligt avsnitt 15.5.6 är den nuvarande konstruktionsförutsättningen adekvat. Den innebär att sprängskador ska begränsas och inte leda till en konnektad effektiv transmissivitet som är högre än 10^{-8} m²/s längs med en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och medelvärdesbildat över tunnelsulan. Slutsatsen drogs också att en mer transmissiv skadad zon (EDZ) börjar påverka risken, även om inverkan är måttlig.

Enligt tidigare diskussion finns det fullt tillräckliga belägg för att transmissiviteten i en eventuell skadad zon som uppkommer vid berguttaget håller sig under det högsta tillåtna värdet enligt konstruktionsförutsättningarna. Dessutom tyder data på att ingen kontinuerlig skadad zon kommer att utvecklas över huvud taget. Det är också tydligt att metoderna för att kontrollera skadade zoner behöver vidareutvecklas och att dessa metoders tillförlitlighet måste demonstreras.

Metoderna för att kontrollera uppkomsten av en skadad zon är i hög grad knutna till kvaliteten hos borrhings- och sprängningsmetoderna. Vissa frågeställningar när det gäller att bekräfta att dessa åtgärder verkligen ger en skadad zon som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna ingår emellertid i programmet för detaljerade undersökningar och måste därför utvecklas inom detta program. Detta bekräftas i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/, där vissa relevanta planer presenteras. I ramprogrammet för detaljerade undersökningar dras dock även slutsatsen att det varken är möjligt eller nödvändigt att fortlöpande verifiera dessa hydrauliska konstruktionsförutsättningar. Överensstämmelsen skulle i stället baseras på verifiering av att referensmetoden för berguttag kan hanteras så att den överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna.

15.6.7 Bergmekanik

Enligt diskussionen i avsnitt 15.5.14 är bergspänningen *in situ* och det intakta bergets egenskaper sådana att termiskt inducerad spjälkning sannolikt kommer att inträffa. Den hydrauliska analysen av inverkan från spjälkning, se avsnitt 10.3.6, visar att spjälkning kan öka det ekvivalenta flödet för Q1-vägen med mer än en storleksordning, medan de andra vägarna inte påverkas. Denna ökning har dock väsentligen ingen inverkan på risken, eftersom spjälkning inte påverkar det lokala Darcyflödet om advektiva förhållanden råder i deponeringshålet eller om kapseln skadas av en skjuvande spricka.

Enligt **Platsbeskrivning Forsmark** återstår vissa osäkerheter när det gäller bergspänningarnas storlek vid Forsmark. Hållfastheten vid spjälkning är också förknippad med vissa osäkerheter. Även om en lösning av dessa osäkerheter är viktig för förvarets utformning och layout, särskilt eftersom spjälkningens omfattning påverkar antalet användbara deponeringshål, är de av något mindre betydelse för säkerheten. Risken för termiskt inducerad spjälkning är dock uppenbar med tanke på det nuvarande osäkerhetsintervallet. Eftersom spjälkning påverkar en av säkerhetsfunktionerna, om än inte själva risken, så är det motiverat med ytterligare insatser för att hitta metoder som minskar spjälkningen. Detta omfattar även ett behov av ytterligare karakterisering av både bergspänningarna och bergets hållfasthet vid spjälkning.

Sammanfattningsvis bedöms de planer för analys av bergmekaniken som presenteras i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/ som adekvata.

15.6.8 Termiska egenskaper

För en specifik resteffekt i kapseln bestäms buffertens högsta temperatur av värmeledningsförmågan och temperaturen *in situ*, tillsammans med förvarets layout och buffertens termiska egenskaper samt geometri. De termiska analyserna, se avsnitt 10.3.4, visar att de föreslagna layouterna skulle överensstämma med de termiska konstruktionsförutsättningarna med god marginal, även med hänsyn tagen till återstående osäkerheter i termiska data. I själva verket kommer de flesta av deponeringshålen att ha en temperatur som ligger långt under den högsta tillåtna temperaturen. Sett strikt från säkerhetssynpunkt behövs ytterligare detaljerade undersökningar och modellering av de termiska egenskaperna bara om SKB beslutar att sträva efter en kompaktare utformning, där avstånden mellan deponeringshålen och/eller resteffekten i kapslarna anpassas till temperaturförhållandena i tunneln. Sammanfattningsvis bedöms de planer för analys av termiska egenskaper som presenteras i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/ som adekvata.

15.6.9 Hydrogeokemi

Den kemiska miljön styr direkt förvarets utveckling. De viktigaste parametrarna är redoxegenskaper, salthalt och jonstyrka, som direkt påverkar kapselns och buffertens säkerhetsfunktioner. Även andra faktorer är av betydelse, bland annat grundvattnets halter av kalium, sulfid och tvåvärt järn, eftersom de kan påverka buffertens och kapselns kemiska stabilitet. Enligt kapitel 10 och kapitel 12 påverkas risken särskilt av sulfidnivåerna, eftersom dessa nivåer bestämmer kapselns korrosionshastighet och således antalet kapselbrott till följd av korrosion om advektiva förhållanden råder i bufferten.

De hydrogeokemiska data som finns att tillgå är med marginal tillräckliga för att påvisa att lämpliga förhållanden i dag råder vid den tilltänkta förvarsplatsen i Forsmark och att de även kommer att råda under den tempererade period som kommer att fortsätta åtminstone några få tusen år från nu. Att uppskatta möjliga förändringar i grundvattnets sammansättning för längre tidsperioder och under en glaciationscykel är en större utmaning. Detta har därför gjorts med ett pessimistiskt förhållningssätt i SR-Site. Enligt avsnitt 10.4.7 kommer uppträngning av grundvatten under nedisning inte att ge överdrivet höga salthalter, medan nedträngning av utspätt glacialt smältvatten, som kan leda till bufferterosion, inte kan uteslutas. För fallet med en eroderad buffert blir dessutom sulfidhalten viktig, eftersom alltför höga värden kan leda till korrosionsgenombrott i kapselns kopparhölje, se avsnitt 10.4.9.

För att förbättra tilltron till dessa viktiga utvärderingar, och eventuellt även kunna utesluta risken för nedträngning av utspätt glacialt smältvatten, skulle mer information vara av värde. Data från grundvattenprov avseende sulfid, liksom löst organiskt kol, mikrobiella populationer, väte och metan, som anger koncentrationerna och isotopkvoterna för dessa ämnen, skulle förbättra möjligheten att uppskatta den framtida sulfidhalten. Isotopdata för ädelgaser skulle också förbättra kunskapen om diffusion av olika slags gaser. Dessutom behövs fler analyser av uran och radium för att förstå den heterogena fördelningen av dessa grundämnen i Forsmark. De metoder som i grova drag beskrivs i ramprogrammet för detaljerade undersökningar /SKB 2010b/ bedöms vara adekvata för att fylla dessa behov.

15.6.10 Ytnära ekosystem

Utvärderingen av de långsiktiga effekterna på människor och på miljön grundar sig i huvudsak på två faktorer: i) den konceptuella kunskapen om ekosystemens funktion i dag, i en nära framtid och längre fram samt under olika klimathållanden, och ii) indata till analysmodeller, sammanställda från platsbeskrivningen, från litteraturen och från modeller som beskriver landskapets utveckling.

Vissa viktiga indata till radionuklidmodellen för biosfären, som fördelningskoefficienter (K_d -värden) och parametrar som beskriver det biologiska upptaget (CR) av några betydande radionuklider, förlitar sig i dag helt eller delvis på användning av data från litteraturen och data avseende analoga ämnen. Modellens noggrannhet skulle antagligen öka om uppskattningar av dessa parametrar i högre grad kunde återspegla platsens förhållanden och mindre grunda sig på generiska data från andra platser. Kommande detaljerade platsundersökningar bör därför sträva efter att ge mer heltäckande mätningar av koncentrationer av ett fåtal grundämnen (inklusive Ra och I) i alla miljömedier. Det finns även ett behov av att mäta koncentrationerna av alla grundämnen i lokalt producerade jordbruksprodukter och i jorden där dessa produkter odlas. I övrigt kommer ytterligare kemiska data från nederbördsprov att öka kunskapen om grundämnenas fördelning och transport i landskapet.

15.7 Återkoppling till Fud-programmet

I enlighet med tillbörlig säkerhetskultur bör den allmänna forskningen om processer av betydelse för säkerheten fortsätta, även om den rådande synen är att befintlig kunskap räcker för att styrka långsiktig säkerhet. Behovet av fortsatt forskning gäller särskilt faktorer som SR-Site visat bidrar till risk och där förutsättningarna för analysen kan förbättras genom ytterligare forskning och utveckling.

15.7.1 Använt bränsle

Inventariet i gränsen mellan spalt och korn

I SR-Site har gapinventariet reviderats med hänsyn till planerna på att öka utbränningen av framtida BWR- och PWR-bränslen liksom att öka kärnkraftverkens termiska effekt, se vidare **Bränslerapporten**. Eftersom frigörelse av gapinventariet är viktigt vid beräkningen av risk, se avsnitt 13.5.11, är det nödvändigt att fortsätta detta arbete. Uppskattningarna i SR-Site av utsläpp av fissionsgaser från bränslet med hög utbränning skulle behöva kompletteras med faktiska mätningar av fissionsgasutsläpp och den snabbt frigjorda andelen av rörliga grundämnen som Cs och I.

Utsläppshastighet vid korrosion

I SR-Site baseras korrosionshastigheten för metalldelarna i bränsleelementen på publicerade data om deras korrosion under anoxiska förhållanden. Korrosionen av styrstavarna, vilka består av en legering av Cd, In och Ag, behandlas å andra sidan mycket pessimistiskt genom att anta omedelbar upplösning, eftersom få data finns att tillgå. Tillgängliga opublicerade data från reaktorinnandömet tyder på en möjlig selektiv urlakning och frigörelse av In och Cd. Silver är en ädelmetall som under anoxiska förhållanden förväntas korrodera enbart i närvaro av exempelvis sulfidjoner /McNeil och Little 1992/. En del forskningsinsatser kommer att involvera studier av hur legeringen mellan Cd, In och Ag korroderar, med fokus på silvers korrosion och frigörelse. Detta förväntas möjliggöra en mindre pessimistisk behandling av frigörelse av silver i framtiden.

Upplösning av använt bränsle

Med tanke på hur viktig upplösning av det använda bränslet är för mängden frigjorda radionuklider, se avsnitt 13.5.11, bör forskningen om bränsleupplösning fortsätta. Denna forskning bör fokusera både på data under förvarsliknande förhållanden och på förståelsen av grundläggande processer som bidrar till bränsleupplösning. Rön från denna forskning skulle kunna minska den beräknade risken ytterligare.

15.7.2 Kapseln

Korrosion av kopparkapseln

Förståelse för kopparkorrosion är grundläggande för säkerhetskonceptet. Även om tilltron bedöms vara hög är det fortfarande viktigt att fortsätta pågående forskning. Sådan forskning omfattar studier av de reaktioner som skulle kunna inträffa på kopparytor i en syrgasfri miljö både i laboratorieexperiment och genom teoretisk kvantmekanisk modellering, studier av kopparsulfidfilmer såväl som att ytterligare utvärdera bentonitens roll vid bestämning av korrosionshastigheter.

Spänningskorrosion hos koppar

Bedömningen är att förhållanden som kan orsaka spänningskorrosion inte förekommer i förvaret, men grundläggande forskning som fokuserar på att identifiera de förhållanden som är nödvändiga för att spänningskorrosion av koppar ska uppstå bör fortsätta.

Deformation av segjärn

Att förstå deformationen av segjärn är av grundläggande betydelse för att uppnå tilltro till analysen av hur mekanisk last påverkar kapseln. Även om tilltron bedöms som hög till de designanalyser som presenteras i **Produktionsrapporten för kapseln**, är fortsatt arbete berättigat eftersom detta är en central fråga och eftersom mindre pessimistiska antaganden skulle kunna göras beträffande exempelvis de brottkriterier som tillämpas i designanalysen. Det pågående utvecklingsarbetet vad gäller att tillverka och prova segjärnsinsatserna, inklusive PWR-insatserna, bör därför drivas vidare. Hanteringen av inverkan av väte på mekaniska egenskaper för de vätenivåer som skulle kunna uppstå genom korrosion orsakad av eventuellt kvarvarande vatten i den förslutna kapseln skulle också vinna på ökad förståelse.

Deformation av kopparkapslar genom yttre tryck

Att förstå deformation av koppar under yttre tryck är också väsentligt för tilltron till analysen av hur mekanisk last påverkar kapseln. Även om tilltron bedöms som hög till de designanalyser som presenteras i **Produktionsrapporten för kapseln** är fortsatt arbete berättigat, eftersom detta är en central fråga och eftersom mindre pessimistiska antaganden skulle kunna göras beträffande exempelvis de brottkriterier som tillämpas i designanalysen. Det pågående arbetet för att bedöma koppars krypegenskaper bör fortsätta och omfatta svetsat material såväl som effekterna av olika störningar, som kallbearbetning och inverkan av väte, på mekaniska egenskaper.

15.7.3 Bufferten och återfyllningen

Vattentransport

Enligt kapitel 10 är kunskapen om vattentransport i buffert- och återfyllningsmaterialet tillräcklig för att göra adekvata förutsägelser med avseende på den långsiktiga säkerheten. Osäkerheter kvarstår dock och en lösning på dessa kan tänkas förbättra nuvarande utformningar. Det är därför berättigat att utföra laboratorie- och fälttester av olika material samt att kalibrera modeller för att optimera parametervärden i modellerna och därigenom öka kunskapen om vattentransport för både torra och våta förhållanden.

Gastransport

Ytterligare analyser av de parametrar som är avgörande för gastransport i lermaterial är motiverade. Rön från Lasgit, som är en del av EU-projektet Forge som kommer att avslutas 2012, bör analyseras och dessutom bör laboratorieförsök genomföras för att studera kritiska parametrar som är svåra att utvärdera i ett fullskaleförsök.

Kanalbildning och erosion

Kunskapen om kanalbildning och erosion har ökat betydligt sedan SR-Can och har gjort det möjligt att formulera konstruktionsförutsättningar med avseende på inflöde i deponeringshål. För att detaljera dessa konstruktionsförutsättningar och för att utveckla utformningarna vore det värdefullt med ökad förståelse av geometriens betydelse, förbättrade kunskaper om när kanalbildning inte inträffar, erosionsmodellens användbarhet, självläkning av sprickor och ökad förmåga att kvantifiera processen. Sådana studier bör beakta de processer som inträffar under vattenmättnad med fokus på homogenisering.

Mekaniska processer

Homogenisering och självläkning är viktiga processer för buffertens och återfyllningens utveckling i förvarsmiljö. Pågående forskning bör fortsätta.

Utveckling av integrerad THM modellering

Också den pågående utvecklingen av den integrerade kopplade THM-modellen för bufferten bör fortsätta. Detta bör underlättas genom analys av olika projekt vid Äspölaboratoriet, fortsatt utveckling av de program som används och genom nya mer småskaliga experiment för att studera hydromekaniska processer. Insatsen bör fokusera på processer som äger rum under vattenmättnad: kanalbildning, erosion, vattenmättnad, självläkning och homogenisering av både buffert och återfyllning.

Montmorillonitombildningar

Buffertens och återfyllningens funktion är beroende av kunskapen om hur montmorillonit förändras. Inverkan från potentiella bygg- och injekteringsmaterial, som cementtyper med låg alkalinitet och silica sol, bör även fortsättningsvis studeras, speciellt för att ytterligare specificera begränsningarna för hur dessa material används i förvaret.

Cementering

Studierna av reologiska effekter av cementering bör fortsättas.

Buffererosion och frigörelse av kolloider

Från de studier av buffererosion och kolloidfrigörelse som utförts sedan SR-Can har slutsatsen dragits att denna process inte kan uteslutas i analysen av den långsiktiga säkerheten och att det finns behov av ett fortsatt program för forskning och utveckling. Transportmodellen beaktar huvudsakligen ett rent natriumsystem och förlusten av bentonit är sannolikt överskattad. Ytterligare studier skulle kunna minska det pessimistiska inslaget i hanteringen. Några områden av intresse är:

- Effekten av kalcium och blandade Ca/Na-system på beteendet vid svällning och kolloidbildning.
- Erosion i sprickor eller spalter (i stället för öppna rör eller filter som har varit fallet i flertalet tidigare experimentella arbeten).
- Effekten av flöde och vattenhastighet på erosionen.
- Tätning av erosions-skador.

Dessa studier pågår.

15.7.4 Geosfären

Mycket av den forskning och utveckling som har att göra med geosfären täcks in av det detaljerade undersökningsprogrammet men forskning om vissa av processerna bör också fortgå.

Spjälkning

Sedan SR-Can har det gjorts ett flertal insatser för att förbättra förståelsen av såväl de förhållanden under vilka termisk spjälkning kommer att äga rum som omfattningen av den spjälkade zonen. Som redan konstaterats kommer termiskt inducerad spjälkning sannolikt att inträffa. Bentonitpelletarna i spalten mellan buffert och bergvägg utövar dock ett mottryck som kan undertrycka spjälkningen, eller åtminstone hålla de spjälkade skivorna på plats och minimera den hydrauliska transmissiviteten hos den skadade zonen. Dessutom visar analysen att spjälkning kan öka det ekvivalenta flödet för Q1-vägen med mer än en storleksordning. Denna ökning har väsentligen ingen inverkan på risken, eftersom spjälkning inte kommer att påverka det lokala Darcyflödet om det uppstår advektiva förhållanden i deponeringshållet eller om kapseln skadas genom en skjuvande spricka. Andra utsläppsvägar än Q1 påverkas inte av spjälkning. Följaktligen är det inte kritiskt för säkerheten med fortsatta framsteg avseende åtgärderna för att beräkna spjälkning, men insatser för att hantera och dämpa termiskt inducerad spjälkning bör fortsätta då detta påverkar en av säkerhetsfunktionerna.

THM-analys av geosfären

Analysen av de kopplade termohydromekaniska processer som presenteras i kapitel 10, visar klart att sådana processer har begränsad inverkan på säkerheten. Fortsatt forskning om de underliggande processerna är fortfarande berättigad, fast möjligen främst för att skaffa underlag till förvarets bergtekniska utformning. De långsiktiga säkerhetsfrågor som är värda fortsatt analys omfattar en översyn av de nuvarande antagandena om kopplingar mellan bergspänning och transmissivitet för sprickor och deformationszoner, liksom en översyn av de nuvarande antagandena om ett porvattenövertryck under glaciationscykeln. Nuvarande antaganden bedöms överdriva betydelsen av dessa effekter.

Glacialt inducerade spänningar och jordskalvssimuleringar

Sedan SR-Can har det skett väsentliga framsteg beträffande bedömningen av risken för jordskalv och deras följder för säkerheten. Ett riskbidrag från denna mekanism kan inte uteslutas, men det är under alla förhållanden litet. Vidare hanteras förvarets anpassning till deformationszoner och sprickor inom det detaljerade undersökningsprogrammet, se avsnitt 15.6. Med tanke på att mekanisk stabilitet är grundläggande bör forskning om förutsättningarna (exempelvis spänningstillstånd) bakom glacialt inducerade förkastningar fortsätta. Ytterligare utveckling av verktygen och angreppssätten för simulering av jordskalv bedöms också vara värdefull.

DFN-metodik

Förbättrade kunskaper om spricknätverket i kristallin berggrund är grundläggande för att komma fram till en mer realistisk förståelse som minskar osäkerheten hos modeller som representerar bergets geologiska, mekaniska och hydrologiska aspekter. Därför kommer insatser att göras för att undersöka hur uppskattad spricktäthet beror av mätmetod, identifiera vilka extra data som behövs för att bestämma gränsvärden för indataparametrar som skulle begränsa modellernas möjliga utfallsintervall, utveckla en effektiv metod för att utvärdera skillnader mellan olika modeller, ytterligare undersöka fördelningen av sprickaperturer över sprickytan, studera effekterna av sprickors sammanlänkning genom exempelvis kanalbildning, trunkering eller alternativa metoder för att generera spricknätverk och att utvärdera alternativa koncept för sprickors uppkomst.

Grundvattenkemi – sulfid

Som framgår i avsnitt 13.6 påverkas risken i stor utsträckning av de framtida sulfidnivåerna i grundvattnet. Den sulfidfördelning som används i SR-Site bedöms hantera konsekvenserna av framtida sulfidkoncentrationer pessimistiskt, särskilt som det antas att områden med höga sulfidnivåer kommer att ha kvar de höga nivåerna under hela analysperioden. Detta motiverar ytterligare forskning för att bättre sätta gränser för den förväntade utvecklingen av sulfidhalter och de processer som påverkar denna utveckling vid förvarsplatsen i Forsmark. Sådan forskning bör omfatta fler analyser av fel som införs genom provtagnings- och monitoringsutrustningen.

Mikrobiella processer

Redoxförhållanden och sulfidnivåer påverkar risken direkt. Eftersom dessa förhållanden påverkas starkt av mikrobiell aktivitet är fortsatt forskning motiverad om mikrobernas förmåga att upprätthålla en låg och stabil redoxpotential i närområdet och fjärrområdet och om deras roll för sulfidbildning och syrekonsumtion.

Radionuklidtransport

I avsnitt 10.3.6 hävdas det att de beräknade värdena för det flödesrelaterade transportmotståndet inte behöver minskas på grund av kanalbildningseffekter. Detta baseras på motiveringar som finns i **Radionuklidtransportrapporten** och som också sammanfattas i **Datarapporten**. I korthet grundas argumentet på beräkningar som visar att kanalbildning leder till stillastående vatten i sprickplanen (mellan kanalerna), vilket ökar potentialen för matrisdiffusion till följd av snabb diffusion från flödeskanalerna in i sprickans stillastående partier. Dessutom tyder stödjande beräkningar med hjälp av den alternativa konceptuella modellen CHAN3D /Liu et al. 2010/ på att de erhållna värdena för flödesrelaterat transportmotstånd är i huvudsak konsistenta med dem som presenteras av /Joyce et al. 2010/, se avsnitt 10.3.6 för detaljer. Detta stödjer ytterligare det antagande som görs om kanalbildning.

För att bringa ytterligare klarhet i de antaganden som görs i SR-Site bör dock forskningen inom området kanalbildning fortsätta. Särskilt finns planer för högupplösta numeriska simuleringar av sprickor med rumsligt variabla aperturer. Syftet är att studera effekterna av kanalbildning inom sprickor och mellan sprickor med varierande aperturer i ett nätverk. Med en mer detaljerad kunskap om kanalbildningsfenomenen går det att dra säkrare slutsatser beträffande de antaganden som görs i SR-Site.

15.7.5 Biosfären

Ett antal potentiella förbättringar har identifierats som kan bidra till att öka tilltron, reducera osäkerheter eller minska graden av pessimism i biosfärsanalysen. De detaljerade platsundersökningarna omfattar framför allt insamling av ytterligare data, medan program för forskning och utveckling spänner över allt från förbättring av analysmodeller med befintlig information, till sammanställning av nya kunskaper från den vetenskapliga litteraturen eller genom grundläggande forskning. Insamling av ytterligare platsdata, sammanställning av ny kunskap och tillämpning av kunskapen i analysmodeller är en iterativ process, som ofta involverar samma individer och forskningsgrupper.

Insamling av ytterligare platsdata för koncentrationerna av grundämnen i olika media är ett sätt att minska osäkerheten i parametrar som beskriver radionuklidens retention och biologiska upptag, se avsnitt 15.6.10. För att förutsäga retention och biologiskt upptag av radionuklider i det framtida landskapet, då miljöförhållandena kan vara andra än i dag, är det också viktigt att öka förståelsen av viktiga processer. Bättre processförståelse kan uppnås genom kompletterande och fördjupade analyser av data för grundämnes- och isotopkoncentrationer.

För några nuklider kan det också vara möjligt att beskriva sorption och/eller biologiskt upptag med alternativa modelleringsmetoder som är mindre känsliga för parameterosäkerheter. Det kommande programmet för forskning och utveckling kommer därför att syfta till att utveckla analysverktyg som explicit beskriver biologiskt upptag som en funktion av fysiologiska processer /Kumblad och Kautsky 2004/. För primärproducenter betyder detta att både aktivt och passivt upptag kommer att modelleras, och att radionuklidens biotillgänglighet och konkurrensen mellan radioaktiva och stabila isotoper beaktas, exempelvis /Avila 2006/. Förutom ytterligare insamling av platsdata behövs fler studier av radionuklidtransport i avlagringar med hjälp av kemisk modellering, se /Piqué et al. 2010/, för att minska osäkerheten i K_d -värden. Tillsammans med massbalansberäkningar för olika element bör studier av grundämnesflöden i landskapet fortsätta med nya data för att undersöka grundämnes-transport och gränser för retentionen av grundämnen i landskapet /Tröjbom et al. 2007/.

Vid analysen av biosfären används i den nuvarande beräkningskedjan konceptet med ett maximalt LDF-värde baserat på enhetsutsläpp (1 Bq/år). Detta innebär att det maximala LDF-värdet räknas över alla biosfärsobjekt och alla tidsperioder, separat för varje radionuklid. Denna frikoppling mellan LDF-värdena å ena sidan och rum- och tidsdimensioner å den andra resulterar med stor sannolikhet i överskattade doser. Graden av överskattning kan utvärderas i studier där hydrogeologiska modeller kopplas med biosfärsmodeller. Sådana studier är nödvändiga för att utvärdera den pessimism som följer av förenklarna med ett förmodat pulsutsläpp, och bör bidra till en mer genomgripande förståelse av viktiga processer för radionuklidtransport från förvaret till biosfären. Den konceptuella förståelsen och beskrivningen av framtida landskap vinner i hög grad på att data samlas in från andra miljöförhållanden än dagens Forsmark, exempelvis Grönland, såväl som på en ytterligare granskning av hur andra kulturer utnyttjar eller har utnyttjat landskapet.

Den metodik som används för att utvärdera dos till biota behöver utvecklas mer för att fullt ut dra nytta av platsdata.

15.7.6 Klimatet

För att i högre utsträckning kunna bedöma graden av pessimism i olika antaganden som görs i modellering i SR-Site av grundvattenflöde och kemi under glaciala och periglaciala klimatförhållanden finns behov av mer forskning. För att öka den konceptuella förståelse som är nödvändig för sådana modellsimuleringar bör nutidsanalogier som observationer av glaciala hydrologiska processer från den grönländska inlandsisen och hydrologiska tolkningar av paleodränagesystem från den senaste glaciationscykeln i Fennoskandia användas.

Utöver arbetet med att identifiera och beskriva extremer inom vilka klimat och klimatrelaterade processer kan variera, har arbetet inom SR-Site också fokuserat på att beskriva klimat och klimatrelaterade processer inom vart och ett av klimattillstånden och under övergångar mellan dem. Framtida forskning bör omfatta ytterligare beskrivningar och analyser av övergångar mellan klimattillstånd och de eventuella förändringar av processer som särskilt kan höra samman med sådana övergångsfaser. Detta arbete bör också omfatta kopplingen till representationen av processer och egenskaper i biosfären och till andra ämnesområden under sådana övergångsfaser.

15.8 Slutsatser beträffande säkerhetsanalysens metodik

Den analysmetodik som beskrivs i kapitel 2 har konstaterats vara adekvat för att analysera den långsiktiga säkerheten hos ett KBS-3-förvar i enlighet med kraven i gällande svenska myndighetsföreskrifter. Den är också i linje med internationell praxis för säkerhetsanalyser. Mycket av den tekniska återkoppling som ges i de ovanstående avsnitten förväntas leda till ett uppdaterat underlag för framtida analyser och kommer att påverka det tillvägagångssätt som används för att hantera frågorna i sådana framtida analyser.

16 Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublishade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Referenser med kortnamn

Produktionsrapport för återfyllningen, 2010. Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Biosfärsrapport, 2010. Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results. SKB TR-10-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Processrapport för bufferten, återfyllningen och förslutningen, 2010. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Produktionsrapport för bufferten, 2010. Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Produktionsrapport för kapseln, 2010. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Klimatrapport, 2010. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Produktionsrapport för förslutningen, 2010. Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Datarapport, 2010. Data report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.

FEP-rapport, 2010. FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

FHA-rapport, 2010. Handling of future human actions in the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Processrapport för bränslet och kapseln, 2010. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Processrapport för geosfären, 2010. Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Modellrapport, 2010. Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Radionuklidtransportrapport, 2010. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Platsbeskrivning Forsmark, 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase – SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bränslerapport, 2010. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Berglinjerapport, 2010. Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Övriga referenser

- Aastrup M, 1981.** Naturligt förekommande uran-, radium- och radonaktiviteter i grundvatten. SKBF/KBS TR 81-08, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Ahokas H, Hellä P, Ahokas T, Hansen J, Koskinen K, Lehtinen A, Koskinen L, Löfman J, Mészáros F, Partamies S, Pitkänen P, Sievänen U, Marcos N, Snellman M, Vieno T, 2006.** Control of water inflow and use of cement in Onkalo after penetration of fracture zone R19. Posiva Working Report 2006-45, Posiva Oy, Finland.
- Ahonen L, Vieno T, 1994.** Effects of glacial meltwater on corrosion of copper canisters. Report YJT-94-13, Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta, Finland.
- Allard B, Banwart S, Bruno J, Ephraim J, Grauer R, Grenthe I, Hadermann J, Hummel W, Jakob A, Karapiperis T, Plyasunov A, Puigdomenech I, Rard J, Saxena S, Spahiu K, 1997.** Modelling in aquatic chemistry. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Amcoff Ö, 1998.** Mineral formation on metallic copper in a "future repository site environment": textural considerations based on natural analogs. SKI Report 98:7, Statens kärnkraftinspektion.
- Anderson J G, 1986.** Seismic strain rates in the central and eastern United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 76, s 273–290.
- Andersson E (red), 2010.** The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J, 1999.** Data and data uncertainties. Compilation of data and data uncertainties for radionuclide transport calculations. SKB TR-99-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson J C, 2007.** Rock mass response to coupled mechanical thermal loading: Äspö pillar stability experiment. Ph. D. thesis. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-E, Ericsson L O, 2000.** What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson P, Garnier-Laplace J, Beresford N A, Copplestone D, Howard B J, Howe P, Oughton D, Whitehouse P, 2009.** Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values. Journal of Environmental Radioactivity, 100, s 1100–1108.
- Andra, 2005.** Dossier 2005 Argile. Safety evaluation of a geological repository. Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).
- Apted M J, Bennett D G, Saario T, 2009.** A review of evidence for corrosion of copper by water. Report 2009:30, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Aquilonius K (red), 2010.** The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Arcos D, Grandia H, Domènech C, 2006.** Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository. SKB TR-06-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Arenius M, Hansen J, Juhola P, Karttunen P, Koskinen K, Lehtinen A, Lyytinen T, Mattila J, Partamies S, Pitkänen P, Raivio P, Sievänen U, Vuorinen U, Vuorio M, 2008.** R20 summary report: The groundwater inflow management in Onkalo – the future strategy. Posiva Working Report 2008-44, Posiva Oy, Finland.
- Arvidsson R, 1996.** Fennoscandian earthquakes: whole crustal rupturing related to postglacial rebound. Science, 274, s 744–746.
- Auqué L F, Gimeno M J, Gómez J B, Puigdomenech I, Smellie J, Tullborg E-L, 2006.** Groundwater chemistry around a repository for spent nuclear fuel over a glacial cycle. Evaluation for SR-Can. SKB TR-06-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Avila R, Bergström U, 2006.** Methodology for calculation of doses to man and implementation in Pandora. SKB R-06-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Avila R, Pröhl G, 2008.** Models used in the SFR 1 SAR-08 and KBS-3H safety assessments for calculation of ^{14}C doses. SKB R-08-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Avila R, Ekström P-A, Åstrand P-G, 2010.** Landscape dose conversion factors used in the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bamber J L, Layberry R L, Gogineni S P, 2001.** A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet 1: Measurement, data reduction, and errors. *Journal of Geophysical Research*, 106, s 33773–33780.
- Bamber J L, Riva R E M, Vermeersen B L A, LeBrocq A M, 2009.** Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic ice sheet. *Science*, 324, s 901–903.
- Banwart S A, 1999.** Reduction of iron(III) minerals by natural organic matter in groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, s 2919–2928.
- Banwart S A, Gustafsson E, Laaksharju M, 1999.** Hydrological and reactive processes during rapid recharge to fracture zones: the Äspö large scale redox experiment. *Applied Geochemistry*, 14, s 873–892.
- Bath A, Hermansson H-P, 2009.** Biogeochemistry of redox at repository depth and implications for the canister. Report 2009:28, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Bath A, Lalieux P, 1999.** Technical summary of the SEDE Workshop on the use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models. I: Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models: proceedings of an NEA Workshop, Borgholm, Sweden, 1–3 September 1997. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, s 13–30.
- Becker D-A, Buhmann D, Storck R, Alonso J, Cormenzana J-L, Hugi M, van Gemert F, O’Sullivan P, Laciok A, Marivoet J, Sillen X, Nordman H, Vieno T, Niemeyer M, 2002.** Testing of safety and performance indicators (SPIN). EUR 19965 EN, European Commission.
- Behrenz P, Hannerz K, 1978.** Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline rock. KBS TR 108, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Beresford N, Brown J, Coplestone D, Garnier-Laplace J, Howard B J, Larsson C-M, Oughton O, Pröhl G, Zinger I (red), 2007.** D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. ERICA Project, contract number FI6R-CT-2004-508847, European Commission.
- Berger A, 1978.** Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35, s 2362–2367.
- Berger A, Loutre M F, 2002.** An exceptionally long interglacial ahead? *Science*, 297, s 1287–1288.
- BIOCLIM, 2003.** Deliverable D7. Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1,000 km scale). Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).
- BIOCLIM, 2004.** Deliverable D10-D12. Development and application of a methodology for taking climate-driven environmental change into account in performance assessments. Work package 4: Biosphere system description. Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).
- Birgersson M, Børgesson L, Hedström M, Karnland O, Nilsson U, 2009.** Bentonite erosion. Final report. SKB TR-09-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Birgersson M, Karnland O, Nilsson U, 2010.** Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. SKB TR-10-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Blomqvist R, Ruskeeniemi T, Kaija J, Ahonen L, Paananen M, Smellie J, Grundfelt B, Pedersen K, Bruno J, Pérez del Villar L, Cera E, Rasilainen K, Pitkänen P, Suksi J, Casanova J, Read D S, Frapé S, 2000.** The Palmottu natural analogue project Phase II: Transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu. Project Report EUR 1961, European Commission.

- Bockgård N, 2010.** Groundwater flow modelling of an abandoned partially open repository. SR-Site Forsmark. SKB R-10-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bond A E, Hoch A R, Jones G D, Tomczyk A J, Wiggin R W, Worraker W J, 1997.** Assessment of a spent fuel disposal canister. Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component. SKB TR 97-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bosson E, Sassner M, Sabel U, Gustafsson L-G, 2010.** Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Boulton G S, Kautsky U, Morén L, Wallroth T, 2001.** Impact of long-term climate change on a geological repository for spent nuclear waste. SKB TR-99-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bowman C D, Venneri F, 1994.** Underground supercriticality from plutonium and other fissile material. LA-UR-94-4022A, Los Alamos National Laboratory. (Även publicerad i Science and Global Security 1996, 5, s 279–302.)
- Bradbury M H, Baeyens B, 2005.** Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V), and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, No. 4, pp. 875–892. doi:10.1016/j.gca.2004.07.020.
- Brady B H G, Brown E T, 1994.** Rock mechanics for underground mining. 2nd ed. London: Chapman & Hall.
- Brandefelt J, Otto-Bliesner B L, 2009.** Equilibration and variability in a Last Glacial Maximum climate simulation with CCSM3. *Geophysical Research Letters* 36, L19712, doi:10.1029/2009GL040364.
- Broed R, 2008.** Landscape model configuration for biosphere analysis of selected cases in TILA-99 and in KBS-3H safety evaluation, 2007. Posiva Working Report 2007-108, Posiva Oy, Finland.
- Bros R, Carpéne J, Sere V, Beltritti A, 1996.** Occurrence of Pu and fissiogenic REE in hydrothermal apatites from the fossil nuclear reactor 16 at Oklo (Gabon). *Radiochimica Acta*, 74, s 277–282.
- Bros R, Hidaka H, Kamei G, Ohnuki T, 2003.** Mobilization and mechanisms of retardation in the Oklo natural reactor zone 2 (Gabon) – inferences from U, REE, Zr, Mo and Se isotopes. *Applied Geochemistry*, 18, s 1807–1824.
- Brown A C, 2006.** Genesis of native copper lodes in the Keweenaw District, northern Michigan: a hybrid evolved meteoric and metamorphogenic model. *Economic Geology*, 101, s 1437–1444.
- Brown G H, 2002.** Glacier meltwater hydrochemistry. *Applied Geochemistry*, 17, s 855–883.
- Brown J E, Alfonso B, Avila R, Beresford N A, Copplestone D, Pröhl G, Ulanovsky A, 2008.** The ERICA Tool. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, s 1371–1383.
- Bruno J, Casas I, Cera E, Duro L, 1997.** Development and application of a model for the long-term alteration of UO₂ spent nuclear fuel: test of equilibrium and kinetic mass transfer models in the Cigar Lake ore deposit. *Journal of Contaminant Hydrology*, 26, s 19–26.
- Brydsten L, 2004.** A mathematical model for lake ontogeny in terms of filling with sediments and macrophyte vegetation. SKB TR-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, 2009.** Sediment dynamics in the coastal areas of Forsmark and Laxemar during an interglacial. SKB TR-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Strömgren M, 2010.** A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Engqvist A, Näslund J-O, Lindborg T, 2009.** Expected extreme sea levels at Forsmark and Laxemar-Simpevarp up until year 2100. SKB TR-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- BSC, 2003.** Total system performance assessment – license application methods and approach. TDR-WIS-PA-000006 REV 00, Bechtel SAIC Company, Las Vegas, Nevada.
- Bungum H, Olesen O, Pascal C, Gibbons S, Lindholm C, Vestøl O, 2010.** To what extent is the present seismicity of Norway driven by post-glacial rebound? *Journal of the Geological Society*, 167, s 373–384.

- Bäckblom G, 2009.** Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. SKB TR-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bäckblom G, Almén K-E, 2004.** Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel. SKB R-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bäckblom G, Munier R, 2002.** Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB TR-02-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bäckblom G, Munier R, Hökmark H, 2004.** Earthquake data and modelling to study the effects of future earthquakes on a final repository of spent nuclear fuel in Sweden. Paper 3238. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1–6 August 2004.
- Böðvarsson R, 2002.** Swedish National Seismic Network (SNSN). A short report on recorded earthquakes during the third quarter of the year 2002. SKB P-02-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böðvarsson R, 2002–2009.** Swedish National Seismic Network (SNSN). Series of short reports on recorded earthquakes during the period 2002–2009. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böðvarsson R, 2009.** Swedish National Seismic Network (SNSN). A short report on recorded earthquakes during the fourth quarter of the year 2008. SKB P-09-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böðvarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006.** Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bøggild C E, Mayer C, Podlech S, Taurisano A, Nielsen S, 2004.** Towards an assessment of the balance state of the Greenland Ice Sheet. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 4, s 81–84.
- Börgesson L, Hernelind J, 2006a.** Consequences of loss or missing bentonite in a deposition hole. A theoretical study. SKB TR-06-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 2006b.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Influence of shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage caused to the canister. SKB TR-06-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 2009.** Mechanical interaction buffer/backfill. Finite element calculations of the upward swelling of the buffer against both dry and saturated backfill. SKB R-09-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Johannesson L-E, 2006.** Consequences of upwards swelling from a wet deposition hole into a dry tunnel with backfill made of blocks. A preliminary study. SKB TR-06-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Sandén T, 2006.** Piping and erosion in buffer and backfill materials. Current knowledge. SKB R-06-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Johannesson L-E, Sandén T, Hernelind J, 1995.** Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application. SKB TR 95-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Fälth B, Hernelind J, 2006.** Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept. Special emphasis given to the influence of the backfill on the wetting of the buffer. SKB TR-06-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Calais E, Mattioli G, DeMets C, Nocquet J-M, Stein S, Newman A, Rydelek P, 2005.** Seismology: tectonic strain in plate interiors? *Nature*, 438, E9-E10, doi:10.1038/nature04428.
- Calais E, Han J Y, DeMets C, Nocquet J M, 2006.** Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements. *Journal of Geophysical Research*, 111, B06402, doi:10.1029/2005JB004253.
- Carlsten S, Stråhle A, 2000.** Borehole radar and BIPS investigations in boreholes at the Boda area. SKB TR-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chapman N A, McKinley I G, Smellie J A T, 1984.** The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal of high-level radioactive waste. SKB TR 84-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Chapman N A, McKinley I G, Shea M E, Smellie J A T (red), 1993.** The Poços de Caldas project: natural analogues of processes in a radioactive waste repository. Amsterdam: Elsevier.
- Christiansson R, Ericsson L O, Gustafson G, 2009.** Hydraulic characterisation and conceptual modelling of the Excavation Disturbed Zone (EDZ). Proceedings of the 2009 International Symposium on Rock Mechanics "Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods" (Sinorock 2009), Hong Kong, 19–22 May 2009.
- Claesson Liljedahl L, Munier R, Sandström B, Drake H, Tullborg E-L, 2010.** Assessment of fractures classified as non-mineralised in the SICADA database. SKB R-11-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Clark I D, Matsumoto R, Dallimore S R, Lowe B, Loop J, 1999.** Isotope constraints on the origin of pore waters and salinity in the permafrost and gas-hydrate core intervals of the JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas-hydrate research well. Geological Survey of Canada Bulletin, 544, s 177–188.
- Cliffe K A, Kelly M, 2006.** COMP23 version 1.2.2 user's manual. SKB R-04-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Colleoni F, Krinner G, Jakobsson M, Peyaud V, Ritz C, 2009.** Influence of regional parameters on the surface mass balance of the Eurasian ice sheet during the peak Saalian (140 kya). Global and Planetary Change, 68, s 132–148.
- Collins G S, Melosh H J, Marcus R A, 2005.** Earth Impact Effects Program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. Meteoritics & Planetary Science, 40, s 817–840.
- Coope G R, Lemdahl G, Lowe J J, Walkling A, 1998.** Temperature gradients in northern Europe during the last glacial–Holocene transition (14–9 ¹⁴C kyr BP) interpreted from coleopteran assemblages. Journal of Quaternary Science, 13, s 419–433.
- Cooper R J, Wadham J L, Tranter M, Hodgkins R, Peters N E, 2002.** Groundwater hydrochemistry in the active layer of the proglacial zone, Finsterwalderbreen, Svalbard. Journal of Hydrology, 269, s 208–223.
- Cosgrove J, Stanfors R, Röshoff K, 2006.** Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. SKB R-06-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Couture R A, 1985.** Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. Nature, 318, s 50–52.
- Cowie P A, Scholz C H, 1992a.** Growth of faults by accumulation of seismic slip. Journal of Geophysical Research, 97, s 11085–11095.
- Cowie P A, Scholz C H, 1992b.** Displacement-length scaling relationship for faults: data synthesis and discussion. Journal of Structural Geology, 14, s 1149–1156.
- Cox P M, Hungingford C, Jones C D, 2006.** Conditions for sink-to-source transitions and runaway feedbacks from the land carbon cycle. I: Schellnhuber H J, Cramer W, Nakicenovic N, Wigley T, Yohe G (red). Avoiding dangerous climate change. Cambridge: Cambridge University Press, s 155–161.
- Cramer J J, Smellie J A T (red), 1994.** Final report of the AECL/SKB Cigar Lake Analogue Study. SKB TR 94-04, Svensk Kärnbränslehantering AB. (Även publicerad som AECL-10851, COG-93-147.)
- Cuadros J, Linares J, 1996.** Experimental kinetic study of the smectite-to-illite transformation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60, s 439–453.
- Cui D, Low J, Sjöstedt C J, Spahiu K, 2004.** On Mo-Ru-Tc-Pd-Rh-Te alloy particles extracted from spent fuel and their leaching behaviour under Ar and H₂ atmospheres. Radiochimica Acta, 92, s 551–555.
- Damjanac B, Fairhurst C, 2010.** Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock. Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, s 513–531.
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, Hammer C U, Hvidberg C S, Steffensen J P, Sveinbjörnsdóttir A E, Jouzel J, Bond G, 1993.** Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature, 364, s 218–220.

- Dawers, N H, Anders M H, Scholz C H, 1993.** Growth of normal faults: displacement-length scaling. *Geology*, 21, s 1107–1110.
- Degueldre C, Baeyens B, Goerlich W, Riga J, Verbist J, Stadelmann P, 1989.** Colloids in water from a subsurface fracture in granitic rock, Grimsel Test Site, Switzerland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, s 603–610.
- Degueldre C, Grauer R, Laube A, Oess A, Silby H, 1996.** Colloid properties in granitic groundwater systems. II: Stability and transport study. *Applied Geochemistry*, 11, s 697–710.
- Delos A, Trincherio P, Richard L, Molinero J, Dentz M, Pitkänen P, 2010.** Quantitative assessment of deep gas migration in Fennoscandian sites. SKB R-10-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dillström P, Bolinder T, 2010.** Damage tolerance analysis of canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load. SKB TR-10-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Domènech C, Arcos D, Duro L, Grandia F, 2006.** Effect of the mineral precipitation-dissolution at tunnel walls during the operational and post-operational phases. SKB R-06-108, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Drew M C, 1983.** Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: a review. *Plant and Soil*, 75, s 179–199.
- Dueck A, 2010.** Thermo-mechanical cementation effects in bentonite investigated by unconfined compression tests. SKB TR-10-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Duerden P, Lever D A, Sverjensky D A, Townley L R, 1992.** Summary of findings. Alligator Rivers Analogue Project, final report. Vol. 1. An OECD/NEA International Project Managed by ANSTO. SKI Report 92:20-1, Statens kärnkraftinspektion.
- Duro L, Grivé M, Cera E, Gaona X, Domènech C, Bruno J, 2006.** Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can. SKB TR-06-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dverstorp B, Strömberg B, 2008.** SKI's and SSI's review of SKB's safety report SR-Can. SKI Report 2008:23, Statens kärnkraftinspektion, SSI Report 2008:04 E, Statens strålskyddsinstitut.
- Dvinskikh S V, Szutkowski K, Furó I, 2009.** MRI profiles over very wide concentration ranges: application to swelling of a bentonite clay. *Journal of Magnetic Resonance*, 198, s 146–150.
- Ekman M, 1996.** A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. *Terra Nova*, 8, s 158–165.
- Ekström P-A, 2011.** Pandora – a simulation tool for safety assessments. Technical description and user's guide. SR-Site Biosphere. SKB R-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Elert M, Gylling B, Lindgren M, 2004.** Assessment model validity document FARF31. SKB R-04-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eng T, Norberg E, Torbacke J, Jensen M, 1996.** Information, conservation and retrieval. SKB TR 96-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engqvist A, Andrejev O, 2000.** Sensitivity analysis with regard to variations of physical forcing including two possible future hydrographic regimes for the Öregrundsgrepen. A follow-up baroclinic 3D-model study. SKB TR-00-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Enssle C P, Poppei J, 2010.** Implementation and testing of an improved methodology to simulate resaturation processes with DarcyTools. SKB R-09-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ericsson L O, Brinkhoff P, Gustafson G, Kvartsberg S, 2009.** Hydraulic features of the Excavation Disturbed Zone. Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. SKB R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson S, 2007.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype repository. Analysis of microorganisms, gases and water chemistry in buffer and backfill, 2004–2007. SKB IPR-08-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eshelby J D, 1957.** The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 241, s 376–396.

- Evans D F, Wennerström H, 1999.** The colloidal domain: where physics, chemistry, biology, and technology meet. 2nd ed. New York: Wiley-VCH.
- Evins L Z, Jensen K A, Ewing R C, 2005.** Uraninite recrystallization and Pb loss in the Oklo and Bangombé natural fission reactors, Gabon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, s 1589–1606.
- FASSET, 2004.** FASSET – Framework for Assessment of Environmental Impact. Final report. A project within the EC 5th Framework Programme, Contract No FIGE-CT-2000-00102, project co-ordinator: Swedish Radiation Protection Authority.
- Fastook J L, 1994.** Modelling the Ice Age: the finite-element method in glaciology. *Computational Science and Engineering*, 1, s 55–67.
- Fastook J L, Chapman J E, 1989.** A map plane finite-element model: three modelling experiments. *Journal of Glaciology*, 35, s 48–52.
- Fastook J L, Holmlund P, 1994.** A glaciological model of the Younger Dryas event in Scandinavia. *Journal of Glaciology*, 40, s 125–131.
- Fayek M, Harrison M T, Ewing R C, Grove M, Coath C D, 2002.** O and Pb isotopic analyses of uranium minerals by ion microprobe and U–Pb ages from the Cigar Lake deposit. *Chemical Geology*, 185, s 205–225.
- FENCAT, 2007.** Historical earthquakes in northern Europe. [Online]. Tillgänglig: http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog_northeurope.html. Seismologiska institutet, Finland.
- Fenton C, Adams J, Halchuk S, 2006.** Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, s 579–592.
- Follin S, 2008.** Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modeling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Follin S, Johansson P-O, Hartley L, Jackson P, Roberts D, Marsic N, 2007a.** Hydrogeological conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Follin S, Levén J, Hartley L, Jackson P, Joyce S, Roberts D, Swift B, 2007b.** Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Forsyth R, 1997.** The SKB Spent Fuel Corrosion Programme. An evaluation of results from the experimental programme performed in the Studsvik Hot Cell laboratory. SKB TR 97-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Forsyth R S, Werme L O, 1992.** Spent fuel corrosion and dissolution. *Journal of Nuclear Materials*, 190, s 3–19.
- Fox A, La Pointe P, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Frape S K, Stotler R L, Ruskeeniemi T, Ahonen L, Paananen M, Hobbs M Y, 2004.** Hydrogeochemistry of groundwaters at and below the base of the permafrost at Lupin: Report of phase II. Report 06819-REP-01300-10047-R00, Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Canada.
- Fredén C (red), 2002.** Sveriges nationalatlas. Berg och jord. Stockholm: Sveriges nationalatlas (SNA).
- French H M, 2007.** The periglacial environment. 3rd ed. Chichester: John Wiley and Sons.
- 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 nuclear fuel. SKB/KBS TR 84-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fritzell A, 2006.** Concerns when designing a safeguards approach for the back-end of the Swedish nuclear fuel cycle. SKI Report 2008:18, Statens kärnkraftinspektion.
- Funehag J, 2008.** Injekteringen av TASS-tunneln. Delresultat t o m september 2008. SKB R-08-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, 2007.** Mechanical and thermo-mechanical discrete fracture near-field analyses based on preliminary data from the Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB R-06-89, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2007.** Seismically induced shear displacements in repository host rock fractures. I: Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, 26–29 June 2007.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2008.** Seismically induced slip on rock fractures – expanded study with particular account of large earthquakes. I: Yale D, Holtz S, Breeds C, Ozbay U (red). Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Fransisco, 29 June – 2 July 2008.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Galíndez J M, Molinero J, 2010.** Assessment of the long-term stability of cementitious barriers of radioactive waste repositories by using digital-image-based microstructure generation and reactive transport modeling. *Cement and Concrete Research*, 40, s 1278–1289.
- 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.
- Gaucher E, Blanc P, Matray J-M, Michau N, 2004.** Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. *Applied Geochemistry*, 19, s 1505–1515.
- Gauthier-Lafaye F, Holliger P, Blanc P-L, 1996.** Natural fission reactors in the Franceville basin, Gabon: a review of the conditions and results of a "critical event" in a geologic system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, s 4831–4852.
- Gauthier-Lafaye F, Ledoux E, Smellie J, Louvat D, Michaud V, Pérez del Villar, Oversby V, Bruno J, 2000.** OKLO – natural analogue Phase II. Behaviour of nuclear reaction products in a natural environment: final report. EUR 19139, European Commission.
- Gierszewski P, Avis J, Calder N, D'Andrea A, Garisto F, Kitson C, Melnyk T, Wei K, Wojciechowski L, 2004.** Third case study – postclosure safety assessment. Report 06819-REP-01200-10109-R00, Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Canada.
- Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007.** Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glamheden R, Fälth B, Jacobsson L, Harrström J, Berglund J, Bergkvist L, 2010.** Counterforce applied to prevent spalling. SKB TR-10-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Golian C, Lever D A, 1992.** Radionuclide Transport. Alligator Rivers Analogue Project. Final report. Vol. 14. An OECD/NEA International Project Managed by ANSTO. SKI Report 92:20-14, Statens kärnkraftinspektion.
- Grandia F, Domènech C, Arcos D, Duro L, 2006.** Assessment of the oxygen consumption in the backfill. Geochemical modelling in a saturated backfill. SKB R-06-106, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grandia F, Galíndez J-M, Arcos D, Molinero J, 2010a.** Quantitative modelling of the degradation processes of cement grout. Project CEMMOD. SKB TR-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grandia F, Galíndez J-M, Molinero J, Arcos D, 2010b.** Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site. SKB TR-10-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gregory J M, Huybrechts P, 2006.** Ice-sheet contributions to future sea-level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364, s 1709–1731.

- Grivé M, Domènech C, Montoya V, Garcia D, Duro L, 2010.** Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can. Supplement to TR-06-32. SKB R-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gubner R, Andersson U, 2007.** Corrosion resistance of copper canister weld material. SKB TR-07-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Guimerà 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.
- Gurban I, Laaksoharju M, Ledoux E, Made B, Salignac A L, 1998.** Indications of uranium transport around the reactor zone at Bagombé (Oklo). SKB TR 98-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafsson B G, 2004.** Millennial changes of the Baltic Sea salinity. Studies of the sensitivity of the salinity to climate change. SKB TR-04-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, 2009.** Microbial processes in glaciers and permafrost. A literature study on microbiology affecting groundwater at ice sheet melting. SKB R-09-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, 2010.** Principal organic materials in a repository for spent nuclear fuel. SKB TR-10-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, Pedersen K, 2008.** Explorative analysis of microbes, colloids and gases. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-85, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallberg R, Engvall A-G, Wadsten T, 1984.** Corrosion of copper lightning conductor plates. *British Corrosion Journal*, 19, s 85–88.
- Hallberg R, Östlund P, Wadsten T, 1988.** Inferences from a corrosion study of a bronze cannon, applied to high level nuclear waste disposal. *Applied Geochemistry*, 3, s 273–280.
- Hamby D M, 1994.** A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32, s 135–154.
- Harrington J F, Birchall D J, 2007.** Sensitivity of total stress to changes in externally applied water pressure in KBS-3 buffer bentonite. SKB TR-06-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harrington J F, Horseman S T, 2003.** Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartikainen J, 2004.** Permafrost modeling in DECOVALEX III for BMT3. I: Eloranta E (red). DECOVALEX III, 1999–2003. An international project for the modelling of coupled thermo-hydro-mechanical processes for spent fuel disposal. Finnish national contributions. STUK-YTO-TR 209, Strålsäkerhetscentralen (STUK), Finland.
- Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartley L, Hoch A, Jackson P, Joyce S, McCarthy R, Rodwell W, Swift B, Marsic N, 2006.** Groundwater flow and transport modelling during the temperate period for the SR-Can assessment. Forsmark area – version 1.2. SKB R-06-98, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartmann W K, 1965.** Terrestrial and lunar flux of large meteorites in the last two billion years. *Icarus*, 4, s 157–165.
- Hedenström A, Risberg J, 2003.** Shore displacement in northern Uppland during the last 6500 calendar years. SKB TR-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, 1997.** Spent nuclear fuel – how dangerous is it? A report from the project ”Description of risk”. SKB TR 97-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, 2002a.** Safety assessment of a spent nuclear fuel repository: sensitivity analyses for prioritisation of research. I: Bonano E J, Camp A L, Majors M J, Thomson R A (red). Proceedings of the 6th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM6, San Juan, Puerto Rico, 23–28 June 2002. Oxford: Elsevier.
- Hedin A, 2002b.** Integrated analytic radionuclide transport model for a spent nuclear fuel repository in saturated fractured rock. *Nuclear Technology*, 138, s 179–205.

- Hedin A, 2003.** Probabilistic dose calculations and sensitivity analyses using analytic models. *Reliability Engineering & System Safety*, 79, s 195–204.
- Hedin A, 2004a.** Methodology for risk assessment of an SNF repository in Sweden. I: Spitzer C, Schmocker U, Dang V N (red). *Proceedings of the 7th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM7, Berlin, 14–18 June 2004*. London: Springer-Verlag.
- Hedin A, 2004b.** Integrated near-field evolution model for a KBS-3 repository. SKB R-04-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, 2008a.** Risk, uncertainty and sensitivity analyses in a recent safety assessment of a spent nuclear fuel repository in Sweden. I: Kao T M, Zio E, Ho V (red). *Proceedings of the 9th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM9, Hong Kong, 18–23 May 2008*. Hong Kong: Edge Publication Group.
- Hedin A, 2008b.** Semi-analytic stereological analysis of waste package/fracture intersections in a granitic rock nuclear waste repository. *Mathematical Geosciences*, 40, s 619–637.
- Helmens K F, 2009.** Climate, vegetation and lake development at Sokli (northern Finland) during early MIS 3 at ~50 kyr. Revising earlier concepts on climate, glacial and vegetation dynamics in Fennoscandia during the Weichselian. SKB TR-09-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helton J C, 1993.** Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. *Reliability Engineering & System Safety*, 42, s 327–367.
- Hernelind J, 2010.** Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. SKB TR-10-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hetzel F, Doner H E, 1993.** Some colloidal properties of beidellite: comparison with low and high charge montmorillonites. *Clays and Clay Minerals*, 41, s 453–460.
- Hohl V, 2005.** Northern European long term climate archives. SKB TR-05-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holden B, Stotler R L, Frappe S K, Ruskeeniemi T, Talikka M, Freifeld B M, 2009.** High Lake permafrost comparison site: permafrost phase IV. NWMO TR-2009-11, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- Hora S, 2002.** Expert opinion in SR 97 and the SKI/SSI joint review of SR 97. SSI Report 2002:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Hora S, Jensen M, 2002.** Expert judgement elicitation. SSI report 2002:19, Statens strålskyddsinstitut.
- Hora S, Jensen M, 2005.** Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Report 2005:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Howard B J, Beresford N A, Andersson P, Brown J E, Coplestone D, Beaugelin-Seiller K, Garnier-Laplace J, Howe P D, Oughton D, Whitehouse P, 2010.** Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context – an overview of the PROTECT coordinated action project. *Journal of Radiological Protection*, 30, s 191–194.
- Huang W-L, Longo J M, Pevear D R, 1993.** An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals*, 41, s 162–177.
- Huertas F J, Rozalen M L, Garcia-Palma S, Iriarte, Linares J, 2005.** Dissolution kinetics of bentonite under alkaline conditions. I: Ecoclay II: effects of cement on clay barrier performance – Phase II. Final report. EUR 21921, European Commission, s 132–142.
- Humlum O, Houmark-Nielsen M, 1994.** High deglaciation rates in Denmark during the late Weichselian – implications for the palaeoenvironment. *Geografisk Tidsskrift*, 94, s 26–37.
- Huybrechts P, 1990.** A 3-D model for the Antarctic ice sheet: a sensitivity study on the glacial-interglacial contrast. *Climate Dynamics*, 5, s 79–92.
- Huybrechts P, de Wolde J, 1999.** The dynamic response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multiple-century climate warming. *Journal of Climate*, 12, s 2169–2188.
- Hökmark H, Karnland O, Pusch R, 1997.** A technique for modeling transport/conversion processes applied to smectite-to-illite conversion in HLW buffers. *Engineering Geology*, 47, s 367–378.

- Hökmark H, Fälth B, Wallroth T, 2006.** T-H-M couplings in rock. Overview of results of importance to the SR-Can safety assessment. SKB R-06-88, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Kristensson O, Sundberg J, Hellström G, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- IAEA, 1994.** Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories. First report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal. IAEA-TECDOC-767, International Atomic Energy Agency.
- IAEA, 2010.** Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to humans in terrestrial and freshwater environments. Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA Technical Reports Series 472)
- ICRP, 2000.** Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 81; Annals of the ICRP 28)
- ICRP, 2007.** The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 103; Annals of the ICRP 37)
- Iman R L, Conover W J, 1979.** The use of the rank transform in regression. *Technometrics*, 21, s 499–509.
- Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, McIntyre A, Mix A C, Morley J J, Pisias N G, Prell W L, Shackleton N J, 1984.** The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. I: Berger A L, Imbrie J, Hays J D, Kukla G, Saltzman B (red). *Milankovitch and climate: understanding the response to astronomical forcing*. Dordrecht: Reidel, s 269–305.
- INSITE/OVERSITE, 2008.** International expert review of SR-Can: site investigation aspects. External review contribution in support of SKI's and SSI's review of SR-Can. SKI Report 2008:09, Statens kärnkraftinspektion, SSI Report 2008:11, Statens strålskyddsinstitut.
- IPCC, 2007.** *Climate Change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L (red). Cambridge: Cambridge University Press.
- Isaksson H, Keisu M, Lindholm T, Martinson O, Mattsson H, Thunehed H, Triumf C-A, 2010.** The geophysical response from a KBS-3 repository for spent nuclear fuel. Theoretical modelling based on physical properties of underground constructions at Forsmark. SKB P-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Itasca, 2007.** 3DEC – 3-Dimensional Distinct Element Code. Version 4.1. User's guide. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Janecek J, Ewing R C, Oversby V M, Werme L O, 1996.** Uraninite and UO_2 in spent nuclear fuel: a comparison. *Journal of Nuclear Materials*, 238, s 121–130.
- Jansson, P, 1997.** Longitudinal coupling effects in ice flow across a subglacial ridge. *Annals of Glaciology*, 24, s 169–174.
- Jansson P, Näslund J-O, 2009.** Spatial and temporal variations in glacier hydrology on Storglaciären, Sweden. SKB TR-09-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jansson P, Näslund J-O, Rodhe L, 2007.** Ice sheet hydrology – a review. SKB TR-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jensen K A, Palenik C S, Ewing R C, 2002.** U^{6+} phases in the weathering zone of the Bangombé U-deposit: observed and predicted mineralogy. *Radiochimica Acta*, 90, s 761–769.

- JNC, 2000.** H12 – Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan main report and four supplementary reports. JNC Technical Report TN1410 2000-001, JNC TN1410 2000-002 – 005, Japan Nuclear Fuel Cycle Development Institute.
- Jockwer N, Wieczorek K, 2003.** Gas generation measurements in the FEBEX project (Abstract). I: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: proceeding from the international meeting held in Reims, 9–12 December 2002. Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), s 108–117.
- Johannesson L-E, 2007.** Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Dismantling and sampling of the buffer and determination of density and water ratio. SKB IPR-07-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johannesson L-E, Nilsson U, 2006.** Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB R-06-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johannesson L-E, Sandén T, Dueck A, Ohlsson L, 2010.** Characterization of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF. Baclo Project – Phase 3. SKB R-10-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johnson A B, Francis B, 1980.** Durability of metals from archeological objects, metal meteorites, and native metals. Report PNL-3198, UC-70, Pacific Northwest Laboratory, U.S. Department of Energy, Richland, Washington.
- Johnston A C, 1987.** Suppression of earthquakes by large continental ice sheets. *Nature*, 330, s 467–469.
- Johnston A C, 1996.** A wave in the Earth. *Science*, 274, s 735.
- Jonsson M, Bäckström A, Quanhong F, Berglund J, Johansson M, Mas Ivars D, Olsson M, 2009a.** Äspö Hard Rock Laboratory. Studies of factors that affect and control the Excavation Damaged/Disturbed Zone. SKB R-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, Hakami H, Ekneligoda T, 2009b.** Analysis of the effect of vibrations on the bentonite buffer in the canister hole. SKB R-09-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Joyce S, Applegate D, Hartley L, Hoek J, Swan D, Marsic N, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark. SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kahn A, 1958.** The flocculation of sodium montmorillonite by electrolytes. *Journal of Colloid Science*, 13, s 51–60.
- Karlsson A, Eriksson C, Borell Lövstedt C, Liungman O, Engqvist A, 2010.** High-resolution hydrodynamic modelling of the marine environment at Forsmark between 6500 BC and 9000 AD. SKB R-10-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, 2010.** Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository. SKB TR-10-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, Birgersson M, 2006.** Montmorillonite stability with special respect to KBS-3 conditions. SKB TR-06-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, Olsson S, Nilsson U, 2006.** Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kautsky U (red), 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area. SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kellner E, 2003.** Wetlands – different types, their properties and functions. SKB TR-04-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kelly M, Cliffe K A, 2006.** Validity document for COMP23. SKB R-06-76, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kersting A B, Efurd D W, Finnegan D L, Rokop D J, Smith D K, Thompson J L, 1999.** Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. *Nature*, 397, s 56–59.

- Kim Y-S, Sanderson D J, 2008.** Earthquake and fault propagation, displacement and damage zones. I: Landowe S J, Hammler G M (red). Structural geology: new research. New York: Nova Science.
- Kim Y-S, Peacock D C P, Sanderson D J, 2004.** Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, s 503–517.
- King F, 1995.** A natural analogue for the long-term corrosion of copper nuclear waste containers – reanalysis of a study of a bronze cannon. *Applied Geochemistry*, 10, s 477–487.
- King F, Lilja C, Pedersen K, Pitkänen P, Vähänen M, 2010.** An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-10-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King-Clayton L, Chapman N, Ericsson L O, Kautsky F (red), 1997.** Glaciation and hydrogeology. Proceedings of the workshop on the impact of climate change & glaciations on rock stresses, groundwater flow and hydrochemistry: past, present and future. Hässelby, Sweden, 17–19 April 1996. SKI Report 97:13, Statens kärnkraftinspektion.
- Kjellander R, Marčelja S, Quirk J P, 1988.** Attractive double-layer interactions between calcium clay particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 126, s 194–211.
- Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J-O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000 year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Koistinen T, Stephens M, Bogatchev V, Nordgulen Ø, Wennerstrom M, Korhonen J V, 2004.** Geological map of the Fennoscandian Shield 1:2,000,000. Espoo: Geologiska forskningscentralen, Trondheim: Norges Geologiske Undersøkelse, Uppsala: Sveriges geologiska undersökning, Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia.
- Krabill W, Abdalati W, Frederick E, Manizade S, Martin C, Sonntag J, Swift R, Thomas R, Wright W, Yungel J, 2000.** Greenland ice sheet: high elevation balance and peripheral thinning. *Science*, 289, s 428–430.
- Kujansuu R, 1964.** Nuorista siirroksista Lapissa (på finska). *Geologi*, 16, s 30–36.
- Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Models for transport and fate of carbon, nutrients and point source released radionuclides to an aquatic ecosystem. SKB TR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Laaksoharju M, Smellie J, Tullborg E-L, Gimeno M, Hallbeck L, Molinero J, Waber N, 2008.** Bedrock hydrogeochemistry Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagaly G, Ziesmer S, 2003.** Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, s 105–128.
- Lagerbäck R, 1979.** Neotectonic structures in northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 100, s 263–269.
- Lagerbäck R, Sundh M, 2008.** Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Research Paper C 836, Sveriges geologiska undersökning.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svedlund J-O, Johansson H, 2005.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002–2004. SKB R-05-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svantesson S-I, 2006.** Oskarshamn site investigation. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Oskarshamn region. Results from 2005. SKB P-06-160, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lambe T W, Whitman R V, 1969.** Soil mechanics. New York: Wiley.
- Lambeck K, Purcell A, Funder S, Kjær K H, Larsen E, Möller P, 2006.** Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling. *Boreas*, 35, s 539–575.
- Lambeck K, Purcell A, Zhao J, Svensson N-O, 2010.** The Scandinavian Ice Sheet: from MIS 4 to the end of the Last Glacial Maximum. *Boreas*, 39, s 410–435.

- Lang C, Leuenberger M, Schwander J, Johnsen S, 1999.** 16°C rapid temperature variation in Central Greenland 70,000 years ago. *Science*, 286, s 934–937.
- Lantenois S, Lanson B, Muller F, Bauer A, Jullien M, Plançon A, 2005.** Experimental study of smectite interaction with metal Fe at low temperature: 1. Smectite destabilization. *Clays and Clay Minerals*, 6, s 597–612.
- La Pointe P R, Cladouhos T T, Outters N, Follin S, 2000.** Evaluation of the conservativeness of the methodology for estimating earthquake-induced movements of fractures intersecting canisters. SKB TR-00-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- La Pointe P R, Cladouhos T, Follin S, 2002.** Development, application, and evaluation of a methodology to estimate distributed slip on fractures due to future earthquakes for nuclear waste repository performance assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, s 923–944.
- Lemdahl G, 1988.** Palaeoclimatic and palaeoecological studies based on subfossil insects from Late Weichselian sediments in southern Sweden. Ph. D. thesis. Lunds universitet.
- Lidmar-Bergström K, Näslund J-O, 2002.** Landforms and uplift in Scandinavia. I: Doré A G, Cartwright J A, Stoker M S, Turner J P, White N (red). *Exhumation of the North Atlantic margin: timing, mechanisms, and implications for petroleum exploration*. London: Geological Society. (Special publication 196), s 103–116.
- Lindborg T (red), 2008.** Surface system Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T (red), 2010.** Landscape Forsmark – data, methodology and results for SR-Site. SKB TR-10-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindroos H, Isaksson H, Thunehed H, 2004.** The potential for ore and industrial minerals in the Forsmark area. SKB R-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Liu J, Neretnieks I, 2006.** Physical and chemical stability of the bentonite buffer. SKB R-06-103, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Liu L, Moreno L, Neretnieks I, 2009.** A dynamic force balance model for colloidal expansion and its DLVO-based application. *Langmuir*, 25, s 679–687.
- Liu L, Moreno L, Neretnieks I, Gylling B, 2010.** A safety assessment approach using coupled NEAR3D and CHAN3D – Forsmark. SKB R-10-69, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lokrantz H, Sohlenius G, 2006.** Ice marginal fluctuations during the Weichselian glaciation in Fennoscandia, a literature review. SKB TR-06-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Loutre M F, Berger A, 2000.** Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial? *Climatic Change*, 46, s 61–90.
- Ludvigson J-E, 2002.** Brunnsinventering i Forsmark. SKB R-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Luna M, Arcos D, Duro L, 2006.** Effects of grouting, shotcreting and concrete leachates on backfill geochemistry. SKB R-06-107, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, 2005.** Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: a parametric study of simple Earth and ice models. SKB TR-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, 2006.** Stress variations during a glacial cycle at 500 m depth in Forsmark and Oskarshamn: Earth model effects. SKB R-06-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, Näslund J-O, 2009.** Glacial isostatic adjustment: implications for glacially induced faulting and nuclear waste repositories. I: Connor C B, Chapman N A, Connor L J (red). *Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities*. Cambridge: Cambridge University Press, s 142–155.
- Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lundquist J, Lagerbäck R, 1976.** The Pärve Fault: a late-glacial fault in the Precambrian of Swedish Lapland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 98, s 45–51.

- Luukkonen A, 2008.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype repository. Inverse modelling of a prototype repository using near-field groundwater samples from July 1998 – March 2004. SKB IPR-08-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lythe M, Vaughan D G, the BEDMAP Consortium, 2001.** BEDMAP: a new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 106, s 11335–11351.
- Löfgren A (red), 2010.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Hökmark H, 2010.** Assessment of potential for glacially induced hydraulic jacking at different depths. SKB R-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marcos N, 1989.** Native copper as a natural analogue for copper canisters. Report YJT-89-18, Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta, Finland..
- Marcos N, Ahonen L, Bros R, Roos P, Suksi J, Oversby V, 1999.** New data on the Hyrkkölä native copper mineralization: a natural analogue for the long-term corrosion of copper canisters. I: Wronkiewicz D J, Lee J H (red). Scientific basis for nuclear waste management XXII: symposium held in Boston, Massachusetts, 30 November – 4 December 1998. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 556), s 825–832.
- Marrett R, Allmendinger R W, 1990.** Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12, s 973–986.
- Martin C D, 2005.** Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB R-05-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin C D, Kaiser P K, 1996.** Mine-by Experiment Committee Report, Phase 1: excavation response, summary and implications. AECL Report AECL-11382, Atomic Energy of Canada Limited.
- Martinerie P, Raynaud D, Etheridge D M, Barnola J-M, Mazaudier D, 1992.** Physical and climatic parameters which influence the air content in polar ice. *Earth and Planetary Science Letters*, 112, s 1–13.
- Masurat P, Eriksson S, Pedersen K, 2010a.** Evidence of indigenous sulphate-reducing bacteria in commercial Wyoming bentonite MX-80. *Applied Clay Science*, 47, s 51–57.
- Masurat P, Eriksson S, Pedersen K, 2010b.** Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste. *Applied Clay Science*, 47, s 58–64.
- Matthiesen H, Hilbert L R, Gregory D J, 2003.** Siderite as a corrosion product on archaeological iron from a waterlogged environment. *Studies in Conservation*, 48, s 183–194.
- Matthiesen H, Hilbert L R, Gregory D, Sørensen B, 2004.** Corrosion of archaeological iron artefacts compared to modern iron at the waterlogged site Nydam, Denmark. Prediction of long term corrosion behaviour in nuclear waste system. I: Andra (red). Long term prediction and modelling of corrosion: proceedings of the 2nd International Workshop organized by the Working Party on nuclear corrosion (WP4) of the European Federation of Corrosion (EFC), Nice, 12–16 September 2004 (Eurocorr 2004), s 114–127.
- Mazotti S, James T S, Henton J, Adams J, 2005.** GPS crustal strain, postglacial rebound, and seismic hazard in eastern North America: the Saint Lawrence valley example. *Journal of Geophysical Research*, 110, B11301, doi:10.1029/2004JB003590.
- McNeil M B, Little B J, 1992.** Corrosion mechanisms for copper and silver objects in near-surface environments. *Journal of the American Institute for Conservation*, 31, s 355–366.
- Melosh H J, 1989.** Impact cratering: a geologic process. New York: Oxford University Press.
- Miller W, Alexander R, Chapman N, McKinley I, Smellie J, 2000.** Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues: lessons from nature and archaeology. Amsterdam: Pergamon. (Waste Management Series 2)
- Miller B, Lind A, Savage D, Maul P, Robinson P, 2002.** Natural elemental concentrations and fluxes: their use as indicators of repository safety. SKI Report 02:3, Statens kärnkraftinspektion, SSI report 2002:02, Statens strålskyddsinstitut.

- Milne, G A, Gehrels W R, Hughes C W, Tamisiea M E, 2009.** Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience*, 2, s 471–478.
- Milodowski A E, Styles M T, Horstwood M S A, Kemp S J, 2002.** Alteration of uraniferous and native copper concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom. A natural analogue study of the corrosion of copper canisters and radiolysis effects in a repository for spent nuclear fuel. SKB TR-02-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mitrovica J X, Milne G A, 2003.** On post-glacial sea level: I. General theory. *Geophysical Journal International*, 154, s 253–267.
- Mitrovica J X, Gomez N, Clark P U, 2009.** The sea-level fingerprint of West Antarctic collapse. *Science*, 323, s 753.
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, Datsenko N M, Karlén W, 2005.** Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, s 613–617.
- Moberg A, Gouirand I, Wohlfarth B, Schoning K, Kjellström E, Rummukainen M, de Jong R, Linderholm H, Zorita E, 2006.** Climate in Sweden during the past millennium – Evidence from proxy data, instrumental data and model simulations. SKB TR-06-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Molinero-Huguet J, Samper-Calvete F J, Zhang G, Yang C, 2004.** Biogeochemical reactive transport model of the Redox Zone experiment of the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden. *Nuclear Technology*, 148, s 151–165.
- Morbidelli A, Bottke W F, Froeschlé C, Michel P, 2002.** Origin and evolution of near-Earth objects. I: Bottke W F, Cellino P, Paolicchi P, Binzel R P (red). *Asteroids III*. Tucson: University of Arizona Press, s 409–422.
- Morén L, Ritchey T, Stenström M, 1998.** Scenarier baserade på mänskliga handlingar. Tre arbetsmöten om metod- och säkerhetsanalysfrågor (Scenarios based on human actions. Three workshops on issues related to method and safety assessment). SKB R-98-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Neretnieks I, Liu L, 2010.** Modelling of erosion of bentonite by gel/sol flow. SKB TR-10-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Motamedi M, Karnland O, Pedersen K, 1996.** Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite. *FEMS Microbiology Letters*, 141, s 83–87.
- 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.
- Muir Wood R, 2000.** Deglaciation seismotectonics: a principal influence on intraplate seismogenesis at high latitudes. *Quaternary Science Reviews*, 19, s 1399–1411.
- Muir Wood R, Gregersen S, Basham P W, 1989.** Extraordinary deglaciation reverse faulting in northern Fennoscandia. I: Gregersen S, Basham P W (red). *Earthquakes at North-Atlantic passive margins: neotectonics and postglacial rebound*. Boston: Kluwer Academic Publishers. (NATO Advanced Study Institutes Series C, Mathematical and Physical Sciences 266), s 141–173.
- Munier R, 2006.** Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes. SKB R-06-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, 2007.** Demonstrating the efficiency of the EFPC criterion by means of sensitivity analyses. SKB R-06-115, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, 2010.** Full perimeter intersection criteria. Definitions and implementations in SR-Site. SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Hökmark H, 2004.** Respect distances. Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Munier R, Stenberg L, Stanfors R, Milnes A G, Hermanson J, Triumpf C-A, 2003.** Geological Site Descriptive Model. A strategy for the model development during site investigations. SKB R-03-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Hökmark H, Fälth B, 2008.** Respect distances: rationale and means of computation. I: Ahlbom K, Stephens M (red). Investigations of potential repository sites for spent nuclear fuel at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, Sweden. Abstracts, 33rd International Geological Congress, Oslo. SKB R-08-97, Svensk Kärnbränslehantering AB, s 57.
- Muzeau B, Jégou C, Delaunay F, Broudic V, Brevet A, Catalette H, Simoni E, Corbel C, 2009.** Radiolytic oxidation of UO₂ pellets doped with alpha emitters (^{238/239}Pu). Journal of Alloys and Compounds, 467, s 578–589.
- Mårtensson E, Gustafsson L-G, 2010.** Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark. Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment. SKB R-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mäder U, Frieg B, Puigdomenech I, Decombarieu M, Yui M, 2004.** Hyperalkaline cement leachate-rock interaction and radionuclide transport in a fractured host rock (HPF Project). I: Oversby V M, Werme L O (red). Scientific basis for nuclear waste management XXVII: symposium held in Kalmar, Sweden, 15–19 June 2003. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 807), s 861–866.
- Mörner N-A, 1989.** Postglacial faults and fractures on Äspö. SKB HRL Progress Report 25-89-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mörner N-A, 2003.** Paleoseismicity of Sweden: a novel paradigm. Stockholm: N.-A. Mörner.
- Mörner N-A, 2004.** Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia, especially Sweden: primary structures and secondary effects. Tectonophysics, 380, s 139–157.
- Nagra, 2002.** Project Opalinus Clay. Safety report. Demonstration of disposal feasibility of spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Switzerland.
- Naudet R, 1991.** Oklo: des réacteurs nucléaires fossiles, étude physique. Paris: Commissariat à l’Energie Atomique.
- NEA, 1991.** Disposal of radioactive waste: review of safety assessment methods: a report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 1993.** Palaeohydrogeological methods and their application: proceedings of a NEA workshop, Paris, 9–10 November 1992. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 1995.** Future human actions at disposal sites: a report from the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 1997a.** Lessons learnt from ten performance assessment studies. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 1997b.** The Probabilistic System Assessment Group: history and achievements 1985–1994. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development. (Disposal of radioactive waste)
- NEA, 1999a.** Confidence in the long-term safety of deep geological repositories: its development and communication. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

- NEA, 1999b.** Safety assessment of radioactive waste repositories – An international database of Features, Events and Processes. A report 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. Nuclear Agency of the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD/NEA), Paris, France. Electronic version 1.2 of the NEA FEP database developed on behalf of the Nuclear Energy Agency by Safety Assessment Management Ltd with support of Quintessa Ltd.
- NEA, 2001.** Scenario development methods and practices: an evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, Spain, May 1999. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 2004a.** The handling of timescales in assessing post-closure safety: lessons learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 2004b.** Post-closure safety case for geological repositories: nature and purpose. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 2005.** Management of uncertainty in safety cases and the role of risk: workshop proceedings. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 2006.** Electronic version 2.1 of the NEA FEP database developed on behalf of the Nuclear Energy Agency by Safety Assessment Management Ltd.
- NEA, 2009.** International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC): Outcomes of the INTESC Project. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Neall F, Pastina B, Snellman M, Smith P, Gribo P, Johnson L, 2008.** Safety assessment of a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Complementary evaluation of safety. SKB R-08-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nebot J, Bruno J, 1991.** The implications of soil acidification on a future HLNW repository. Part I: The effects of increased weathering, erosion and deforestation. SKB TR 91-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neff D, Dillmann P, Beranger G, 2003.** An analytical study of corrosion products formed on buried ferrous archaeological artefacts. I: Féron D, Macdonald D D (red). Prediction of long term corrosion behaviour in nuclear waste systems (EFC 36). Leeds: Maney Publishing, s 295–315.
- Neff D, Dillmann P, Bellot-Gurlet L, Beranger G, 2005.** Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: characterisation of the corrosion system. *Corrosion Science*, 47, s 515–535.
- Neff D, Dillmann P, Descostes M, Beranger G, 2006.** Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations. *Corrosion Science*, 48, s 2947–2970.
- Neretnieks I, 1986.** Some uses for natural analogues in assessing the function of a HLW repository. *Chemical Geology*, 55, s 175–188.
- Neretnieks I, 2006a.** Flow and solute transport in a zone damaged due to spalling. SKB R-06-91, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, 2006b. Flow and transport through a damaged buffer** – exploration of the impact of a cemented and an eroded buffer. SKB TR-06-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, Liu L, Moreno L, 2009.** Mechanisms and models for bentonite erosion. SKB TR-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, Liu L, Moreno L, 2010.** Mass transfer between waste canister and water seeping in rock fractures. Revisiting the Q-equivalent model. SKB TR-10-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neuilly M, Bussac J, Frejacques C, Nief G, Vendreys G, Yvon J, 1972.** Sur l'existence dans un passé reculé d'une réaction en chaîne naturelle de fission, dans le gisement d'uranium d'Oklo (Gabon). *Comptes rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D: Sciences Naturelles*, 275, s 1847–1849.

- Nicot J-P, 2008.** Methodology for bounding calculations of nuclear criticality of fissile material accumulations external to a waste container at Yucca Mountain, Nevada. *Applied Geochemistry*, 23, s 2065–2081.
- Nordén S, Avila R, de la Cruz I, Stenberg K, Grolander S, 2010.** Element-specific and constant parameters used for dose calculations in SR-Site. SKB TR-10-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nordstrom D K, Ball J W, Donahoe R J, Whitemore D, 1989.** Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, s 1727–1740.
- Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package. SKB TR 90-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Näslund J-O, Fastook J L, Holmlund P, 2000.** Numerical modelling of the ice sheet in western Dronning Maud Land, East Antarctica: impacts of present, past, and future climates. *Journal of Glaciology*, 46, s 54–66.
- Näslund J-O, Jansson P, Fastook J L, Johnson J, Andersson L, 2005.** Detailed spatially distributed geothermal heat-flow data for modelling of basal temperatures and meltwater production beneath the Fennoscandian ice sheet. *Annals of Glaciology*, 40, s 95–101.
- Näslund J-O (red), Wohlfarth B, Alexanderson H, Helmens K, Hättstrand M, Jansson P, Kleman J, Lundqvist J, Brandefelt J, Houmark-Nielsen M, Kjellström E, Strandberg G, Knudsen K L, Krogh Larsen N, Ukkonen P, Mangerud J, 2008.** Fennoscandian paleo-environment and ice sheet dynamics during Marine Isotope Stage (MIS) 3. Report of a workshop held September 20–21, 2007 in Stockholm, Sweden. SKB R-08-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ochs M, Talerico C, 2004.** SR-Can. Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. SKB TR-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olesen O, Dehls J, Bungum H, Riis F, Hicks E, Lindholm C, Blikra L H, Fjeldskaar W, Olsen L, Longva O, Faleide J I, Bockmann L, Rise L, Roberts D, Braathen A, Brekke H, 2000.** Neotectonics in Norway. Final report. NGU Report 2000.002, Norges Geologiske Undersøkelse.
- Olsson M, Niklasson B, Wilson L, Andersson C, Christiansson R, 2004.** Äspö HRL. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB R-04-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson S, Karnland O, 2009.** Characterisation of bentonites from Kutch, India and Milos, Greece – some candidate tunnel backfill materials? SKB R-09-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olvmo M, 2010.** Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. SKB TR-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- ONDRAF/NIRAS, 2001. SAFIR:2 Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROND 2001-06E, ONDRAF/NIRAS.**
- Oversby V M, 1996.** Criticality in a high level waste repository. A review of some important factors and an assessment of the lessons that can be learned from the Oklo reactors. SKB TR 96-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Oversby V M, 1998.** Criticality in a repository for spent fuel: lessons from Oklo. I: McKinley I G, McCombie C (red). Scientific basis for nuclear waste management XXI: symposium held in Davos, Switzerland, 23 September – 3 October, 1997. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 506), s 781.
- Painter S, Mancillas J, 2009.** MARFA version 3.2.2 user's manual: migration analysis of radionuclides in the far field. SKB R-09-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Painter S, Cvetkovic V, Mancillas J, Pensado O, 2008.** Time domain particle tracking methods for simulating transport with retention and first-order transformation. *Water Resources Research*, 44, W01406, doi:10.1029/2007WR005944.
- Parkhurst D L, Appelo C A J, 1999.** User's guide to PHREEQC (version 2): a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Denver, CO: U.S. Geological Survey. (Water-resources investigations report 99-4259)

- Parkhurst D L, Kipp K L, Engesgaard P, Charlton S R, 2004.** PHAST: a program for simulating ground-water flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A8. Denver, CO: U.S. Geological Survey.
- Paterson W S B, 1994.** The physics of glaciers. 3rd ed. Oxford: Pergamon.
- Pattyn F, De Smedt B, Souchez R, 2004.** Influence of subglacial Vostok lake on the regional dynamics of the Antarctic ice sheet: a model study. *Journal of Glaciology*, 50, s 583–589.
- Payne A J, Huybrechts P, Abe-Ouchi A, Calov R, Fastook J L, Greve R, Marshall S J, Marsiat I, Ritz C, Tarasov L, Thomassen M P A, 2000.** Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling. *Journal of Glaciology*, 46, s 227–238.
- Pedersen K, 2006.** Microbiology of transitional groundwater of the porous overburden and underlying fractured bedrock aquifers in Olkiluoto, Finland. Posiva Working Report 2006-09, Posiva Oy, Finland.
- Pedersen K, 2010.** Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 108, s 1094–1104.
- Pedersen K, Kennedy C, Nederfeldt K-G, Bergelin A, 2004.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype repository. Chemical measurements in buffer and backfill; sampling and analyses of gases. SKB IPR-04-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pers K, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, Hedin A, Morén L, Sellin P, Ström A, Pusch R, Bruno J, 1999.** SR 97 – Identification and structuring of process. SKB TR-99-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Petsev D N, Starov V M, Ivanov I B, 1993.** Concentrated dispersions of charged colloidal particles: sedimentation, ultrafiltration and diffusion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 81, s 65–81.
- Piqué, A, Grandia, F, Sena, C, Arcos, D, Molinero, J, Duro, L, Bruno, J, 2010.** Conceptual and numerical modelling of radionuclide transport in near-surface systems at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Porcelli D, Andersson P S, Baskaran M, Wasserburg G J, 2001.** Transport of U- and Th-series in a Baltic shield watershed and the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, s 2439–2459.
- Puigdomenech I, Ambrosi J-P, Eisenlohr L, Lartigue J-E, Banwart S A, Bateman K, Milodowski A E, West J M, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Yoshida H, Kotelnikova S, Pedersen K, Michaud V, Trotignon L, Rivas Perez J, Tullborg E-L, 2001.** O₂ depletion in granitic media. The REX project. SKB TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, 1983.** Stability of deep-sited smectite minerals in crystalline rock – chemical aspects. SKBF/KBS TR 83-16, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Pusch R, 2000a.** On the effect of hot water vapor on MX-80 clay. SKB TR-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, 2000b.** On the risk of liquefaction of buffer and backfill. SKB TR-00-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, 2008.** Rock fill in a KBS-3 repository. Rock material for filling of shafts and ramps in a KBS-3V repository in the closure phase. SKB R-08-117, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Karnland O, 1988.** Geological evidence of smectite longevity. The Sardinian and Gotland cases. SKB TR 88-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Ramqvist G, 2004.** Borehole sealing, preparative steps, design and function of plugs – basic concept. SKB IPR-04-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Ramqvist G, 2007.** Borehole project – Final report of Phase 3. SKB R-07-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Hiroyasu T, Steven B, 1998.** Chemical processes causing cementation in heat-affected smectite – the Kinnekulle bentonite. SKB TR-98-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB R-01-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010.** Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- RETROCK, 2005.** Treatment of radionuclide transport in geosphere within safety assessments. Final report of the RETROCK Concerted Action. EUR 21230, European Commission.
- Riis F, 1996.** Quantification of Cenozoic vertical movements of Scandinavia by correlation of morphological surfaces with offshore data. *Global and Planetary Change*, 12, s 331–357.
- Ritchey T, 1997.** Scenario Development and Risk Management using Morphological Field Analysis. I: Proceedings of the 5th European Conference on Information Systems. Cork: Cork Publishing Company, vol 3, s 1053–1059.
- Roberts M J, 2005.** Jökulhlaups: a reassessment of floodwater flow through glaciers. *Reviews of Geophysics*, 43, RG1002, doi:10.1029/2003RG000147.
- Roberts M J, Russell A J, Tweed F S, Knudsen O, 2000.** Ice fracturing during jökulhlaups: implications for englacial floodwater routing and outlet development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, s 1429–1446.
- Romero A L, 1995.** The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste. Ph. D. thesis. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Romero L, Thompson A, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Boghammar A, 1999.** Comp23/ Nuctran user's guide. Proper version 1.1.6. SKB R-99-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ruiz López C, Rodríguez J, Hernán P, Recreo F, Ruiz C, Prado P, Gimeno M J, Auqué L F, Gómez J, Acero P, González Á, Samper J, Montenegro L, Molinero J, Delgado J, Criado A, Martínez J A, Ruiz S, 2004.** Analogue application to safety assessment and communication of radioactive geological disposal. Illustrative synthesis. Colección Documentos I+D 11.2004, Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid.
- Rummukainen M, 2003.** The Swedish regional climate modeling program, SWECLIM, 1996–2003. Final report. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). (SMHI Meteorologi 104)
- Ruskeenieniemi T, Ahonen L, Paananen M, Frape S, Stotler R, Hobbs M, Kaija J, Degnan P, Blomqvist R, Jensen M, Lehto K, Moren L, Puigdomenech I, Snellman M, 2004.** Permafrost at Lupin: report of Phase II. Report YST-119, Geologiska forskningscentralen, Finland.
- Sagar B, Egan M, Röhlig K-J, Chapman N, Wilmot R (red), 2008.** International expert review of SR-Can: Safety assessment methodology. External review contribution in support of SSI's and SKI's review of SR-Can. SSI Rapport 2008:5, Statens strålskyddsinstitut, SKI Rapport 2008:15, Statens kärnkraftinspektion.
- Salas J, Gimeno M J, Auqué L F, Molinero J, Gómez J, Juárez I, 2010.** SR-Site – hydrogeochemical evolution of the Forsmark site. SKB TR-10-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Saltelli A, Andres T H, Homma T, 1993.** Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques. *Computational Statistics & Data Analysis*, 15, s 211–238.
- Saltelli A, Chan K, Scott E M (red), 2000.** Sensitivity analysis. Chichester: Wiley.
- Sandén T, Börgesson L, 2010.** Early effect of water inflow into a deposition hole. Laboratory test results. SKB R-10-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandén T, Börgesson L, Dueck A, Goudarzi R, Lönnqvist M, 2008.** Deep repository-Engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. SKB R-08-135, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandiford M, Wallace M, Coblentz D, 2004.** Origin of the in situ stress field in south-eastern Australia. *Basin Research*, 16, s 325–338.

- Sandström B, Stephens M B, 2009.** Mineralogy, geochemistry, porosity and redox properties of rocks from Forsmark. Compilation of data from the regional model volume for SR-Site. SKB R-09-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström B, Tullborg E-L, Smellie J, MacKenzie A B, Suksi J, 2008.** Fracture mineralogy of the Forsmark site. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-102, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström B, Tullborg E-L, Larsson S Å, Page L, 2009.** Brittle tectonothermal evolution in the Forsmark area, central Fennoscandian Shield, recorded by paragenesis, orientation and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of fracture minerals. *Tectonophysics*, 478, s 158–174.
- Savage D, Bennett D, Apted M, Sällfors G, Saario T, Segle P, 2008.** International expert review of SR-Can: Engineered barrier issues. External review contribution in support of SKI's and SSI's review of SR-Can. SKI Report 2008:10, Statens kärnkraftinspektion.
- Scherneck H-G, Lidberg M, Haas R, Johansson J M, Milne G A, 2010.** Fennoscandian strain rates from BIFROST GPS: a gravitating, thick-plate approach. *Journal of Geodynamics*, 50, s 19–26.
- Schlesinger M E, Yin J, Yohe G W, Andronova N G, Malyshev S, Li B, 2006.** Assessing the risk of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. I: Schellnhuber H J, Cramer W, Nakicenovic N, Wigley T, Yohe G (red). *Avoiding dangerous climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, kap 5.
- Scholz C H, 2002.** *The mechanics of earthquakes and faulting*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Selroos J-O, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Selroos J-O, Walker D D, Ström A, Gylling B, Follin S, 2002.** Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock. *Journal of Hydrology*, 257, s 174–188.
- Sena C, Salas J, Arcos D, 2010.** Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site. SKB TR-10-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sidborn M, Neretnieks I, 2003.** Modelling of biochemical processes in rocks: Oxygen depletion by pyrite oxidation: model development and exploratory simulations. I: Finch R J, Bullen D B (red). *Scientific basis for nuclear waste management XXVI*. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 757), s 553–558.
- Sidborn M, Neretnieks I, 2004.** Modelling biochemical processes in rocks: Analysis and exploratory simulation of competition of different processes important for ferrous mineral oxidation and oxygen depletion. I: Oversby V M, Werme L O (red). *Scientific basis for nuclear waste management XXVII: symposium held in Kalmar, Sweden, 15–19 June 2003*. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 807), s 829–834.
- Sidborn M, Neretnieks I, 2008.** Long-term oxygen depletion from infiltrating groundwaters: model development and application to intra-glaciation and glaciation conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 100, s 72–89.
- Sidborn M, Sandström B, Tullborg E-L, Delos A, Molinero J, Hallbeck L, Pedersen K, 2010.** SR-Site: Oxygen ingress in the rock at Forsmark during a glacial cycle. SKB TR-10-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Silver W L, Lugo A E, Keller M, 1999.** Soil oxygen availability and biogeochemistry along rainfall and topographic gradients in upland wet tropical forest soils. *Biogeochemistry*, 44, s 301–328.
- Skagius K, Wingefors S, 1992.** Scenarios. Application of scenario development methods in evaluation of the Koongarra analogue. Alligator Rivers Analogue Project, final report. Vol. 16. An OECD/NEA International Project Managed by ANSTO. SKI Report 92:20-16, Statens kärnkraftinspektion.
- Skagius K, Ström A, Wiborgh M, 1995.** The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of FEPs in a repository system. Application on the far-field of a deep geological repository for spent fuel. SKB TR 95-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1990.** Granskning av Nils-Axel Mörnars arbeten avseende postglaciala strukturer på Äspö. SKB AR 90-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 1995. SR 95. Template for safety reports with descriptive example. SKB TR 96-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 1999a. Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety. Main report – Vol I, Vol II and Summary. SKB TR-99-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 1999b. SR 97 – Processes in the repository evolution. Background report to SR 97. SKB TR-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2004a. Interim data report for the safety assessment SR-Can. SKB R-04-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2004b. Interim main report of the safety assessment SR-Can. SKB TR-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006a. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006b. FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006c. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006d. Geosphere process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006e. Handling of future human actions in the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006f. Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006g. The biosphere at Forsmark. Data assumptions and models used in the SR-Can assessment. SKB R-06-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2007a. Forsmark site investigation. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2007b. Final repository facility. Underground design premises/D2. SKB R-07-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2008a. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2008b. Confidence assessment. Site descriptive modeling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009a. Design premises for a KBS-3V repository based on the results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009b. Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009c. Site engineering report Forsmark. Guidelines for underground design. Step D2. SKB R-08-83, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010a. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010b. Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. SKB R-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010c. Components, processes and interactions in the biosphere. SR-Site Biosphere. SKB R-10-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010d. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2010e.** Platsval – lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-10-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I–IV. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- SKI, 2007.** Statens ansvar för förslutning av använt kärnbränsle. SKI Rapport 2007:01, Statens kärnkraftinspektion.
- SKI/SSI, 2001.** SKI's and SSI's joint review of SKB's safety assessment report, SR 97, summary. SKI Report 01:3, Statens kärnkraftinspektion, SSI Report 2001:02, Statens strålskyddsinstitut.
- Slunga R S, 1991.** The Baltic Shield earthquakes. *Tectonophysics*, 189, s 323–331.
- Smellie J, 2001.** Wyoming bentonites. Evidence from the geological record to evaluate the suitability of bentonite as a buffer material during the long-term underground containment of radioactive wastes. SKB TR-01-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smellie J, Karlsson F (red), 1996.** A reappraisal of some Cigar Lake issues of importance to performance assessment. SKB TR 96-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smith P, Johnson L, Snellman M, Pastina B, Gripi P, 2008.** Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Evolution report. SKB R-08-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Spiessl S M, MacQuarrie K T B, Mayer K U, 2008.** Identification of key parameters controlling dissolved oxygen migration and attenuation in fractured crystalline rocks. *Journal of Contaminant Hydrology*, 95, s 141–153.
- SSI, 2007.** Strålmiljön i Sverige. SSI Rapport 2007:02, Statens strålskyddsinstitut.
- SSM, 2008a.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten. (SSMFS 2008:21)
- SSM, 2008b.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten. (SSMFS 2008:37)
- Stephens M B, Fox A, La Pointe P, Simeonov A, Isaksson H, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephens M B, Bergman T, Isaksson H, Petersson J, 2008a.** Bedrock geology Forsmark. Modelling stage 2.3. Description of the bedrock geological map at the ground surface. SKB R-08-128, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephens M B, Simeonov A, Isaksson H, 2008b.** Bedrock geology Forsmark. Modelling stage 2.3. Implications for and verification of the deterministic geological models based on complementary data. SKB R-08-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stotler R L, Frappe S K, Ruskeeniemi T, Ahonen L, Onstott T C, Hobbs M Y, 2009a.** Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin, Nunavut, Canada. *Journal of Hydrology*, 373, s 80–95.
- Stotler R L, Frappe S K, Ruskeeniemi T, Ahonen L, Paananen M, Hobbs M Y, Lambie K E, Zhang M, 2009b.** Hydrochemistry of groundwaters at and below the base of the permafrost at Lupin: report of Phase III. NWMO TR-2009-10, Nuclear Waste Management Organisation, Canada.
- Strömberg M, Brydsten L, 2008.** Digital elevation models of Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- STUK, 2001.** Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel. Guide YVL 8.4. Strålsäkerhetscentralen (STUK), Finland.
- Sundberg J, Back P-E, Ländell M, Sundberg A, 2009.** Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. SKB TR-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Svendsen J I, Astakhov V I, Bolshiyarov D Y, Demidov I, Dowdeswell J A, Gataullin V, Hjort C, Hubberten H W, Larsen E, Mangerud J, Melles M, Möller P, Saarnisto M, Siegert M J, 1999.** Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. *Boreas*, 28, s 234–242.
- Svendsen J I, Alexanderson H, Astakhov V I, Demidov I, Dowdeswell J A, Funder S, Gataullin V, Henriksen M, Hjort C, Houmark-Nielsen M, Hubberten H W, Ingólfsson O, Jakobsson M, Kjær K H, Larsen E, Lokrantz H, Lunkka J P, Lyså A, Mangerud J, Matiouchkov A, Murray A, Moller P, Niessen F, Nikolskaya O, Polyak L, Saarnisto M, Siegert C, Siegert M J, Spielhagen R F, Stein R, 2004.** Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 23, s 1229–1271.
- Svensson U, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling of the excavation and operation phases – SR-Site Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, Ferry M, Kuylentierna H-O, 2010.** DarcyTools, Version 3.4. Concepts, methods and equations. SKB R-07-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Swartzen-Allen S L, Matijević E, 1976.** Colloid and surface properties of clay suspensions III. Stability of montmorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 56, s 159–167.
- Szakálos P, Hultquist G, Wikmark G, 2007.** Corrosion of copper by water. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 10, s C63–C67.
- Söderbäck B (red), 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Talbot C J, 1999.** Ice ages and nuclear waste isolation. *Engineering Geology*, 52, s 177–192.
- Tarasov L, Peltier W R, 2004.** A geophysically constrained large ensemble analysis of the deglacial history of the North American ice-sheet complex. *Quaternary Science Reviews*, 23, s 359–388.
- Thorne M C, Kane P, 2006.** Development of a series of narratives for climatic and landscape change. MTA/P0011a/2005-1: Issue 2, Mike Thorne and Associates Limited Report to United Kingdom Nirex Limited.
- Tohidi B, Chapoy A, Smellie J, Puigdomenech I, 2010.** The potential for methane hydrate formation in deep repositories of spent nuclear fuel in granitic rocks. SKB R-10-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Torudd J, 2010.** Long term radiological effects on plants and animals of a deep geological repository. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tröjbom M, Grolander S, 2010.** Chemical conditions in present and future ecosystems in Forsmark. Implications for selected radionuclides in the safety assessment SR-Site. SKB R-10-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tullborg E-L, Smellie J, Nilsson A-C, Gimeno M J, Auqué L F, Brüchert V, Molinero J, 2010.** SR-Site – sulphide content in the groundwater at Forsmark. SKB TR-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tushingham A M, Peltier W R, 1991.** ICE-3G: a new global model of late Pleistocene deglaciation based on geophysical predictions of post-glacial relative sea level change. *Journal of Geophysical Research*, 96, s 4497–4523.
- UNSCEAR, 2000.** Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly with scientific annexes. Vol. I. Annex A: Dose assessment methodologies: New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- UNSCEAR, 2008.** Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes. Vol. I. Sources. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- Vahlund F, Hermansson H, 2006.** Compulink. Implementing the COMP23 model in Simulink. SKB R-06-86, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Valentini G, Lombardi S, Bozzano F, Scarascia Mugnozza G (red), 1997.** Analysis of the geo-environmental conditions as morphological evolution factors of the sand-clay series of the Tiber valley and Dunarobba forest preservation. EUR 17479, European Commission.
- Van Konynenburg R A, 1995.** Comments on the draft paper "Underground supercriticality from plutonium and other fissile material" written by C. D. Bowman and F. Venneri (LANL). Report UCRL-ID-120990 COM, University of California.
- Velde B, Vasseur G, 1992.** Estimation of the diagenetic smectite to illite transformation in time-temperature space. *American Mineralogist*, 77, s 967–976.
- Vidstrand P, Svensson U, Follin S, 2006.** Simulation of hydrodynamic effects of salt rejection due to permafrost. Hydrogeological numerical model of density-driven mixing, at a regional scale, due to a high salinity pulse. SKB R-06-101, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vidstrand P, Follin S, Zugec N, 2010.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99. Posiva 99-07, Posiva Oy, Finland.
- Villar M V, Pérez del Villar L, Martín P L, Pelayo M, Fernández A M, Garralón A, Cuevas J, Leguey S, Caballero E, Huertas F J, Jiménez de Cisneros C, Linares J, Reyes E, Delgado A, Fernández-Soler J M, Astudillo J, 2006.** The study of Spanish clays for their use as sealing materials in nuclear waste repositories: 20 years of progress. *Journal of Iberian Geology*, 32, s 15–36.
- Waber H N, Gimmi T, Smellie J A T, 2009.** Porewater in the rock matrix. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-105, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Waddington E D, 1987.** Geothermal heat flux beneath ice sheets. I: Waddington E D, Walder J S (red). *The physical basis of ice sheet modelling*. Wallingford, Oxfordshire: International Association of Hydrological Sciences. (IAHS Publication 170), s 217–226.
- Wadham J L, Tranter M, Skidmore M, Hodson A J, Prisco J, Lyons W B, Sharp M, Wynn P, Jackson M, 2010.** Biogeochemical weathering under ice: size matters. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB3025, doi:10.1029/2009GB003688.
- Walsh J J, Watterson J, 1987.** Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology*, 9, s 1039–1046.
- Walsh J J, Watterson J, 1989.** Displacement gradients on fault surfaces. *Journal of Structural Geology*, 11, s 307–316.
- Washburn A L, 1979.** *Geocryology: a survey of periglacial processes and environments*. 2nd ed. London: Arnold.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, s 974–1002.
- Werner K, Hamrén U, Collinder P, 2010.** Vattenverksamhet i Forsmark (del I). Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle. SKB R-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wersin P, Spahiu K, Bruno J, 1994a.** Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions in a HLW repository. SKB TR 94-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wersin P, Bruno J, Laaksoharju M, 1994b.** The implications of soil acidification on a future HLW repository. Part II: Influence on deep granitic groundwater. The Klipperås study site as test case. SKB TR 94-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- White A F, Brantley S L, 2003.** The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? *Chemical Geology*, 202, s 479–506.
- Whitehouse P, 2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. SKB TR-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Wilmot R D, Wickham S M, Galson D A, 1999.** Elements of a regulatory strategy for the consideration of future human actions in safety assessments. SKI Report 99:46, Statens kärnkraftinspektion.
- Wilmot R D, Galson D A, 2000.** Expert judgement in performance assessment. SKI Report 00:4, Statens kärnkraftinspektion.
- Wilmot R D, Galson D A, Hora S C, 2000.** Expert judgements in performance assessments. Report of an SKI/SSI seminar, SKI Report 00:35, Statens kärnkraftinspektion.
- Wimelius H, Pusch R, 2008.** Backfilling of KBS-3V deposition tunnels – possibilities and limitations. SKB R-08-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Witt A, Schumann A Y, 2005.** Holocene climate variability on millennial scales recorded in Greenland ice cores. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12, s 345–352.
- Wohlfarth B, 2009.** Ice-free conditions in Fennoscandia during Marine Oxygen Isotope Stage 3? SKB TR-09-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wold S, 2010.** Sorption of prioritized elements on montmorillonite colloids and their potential to transport radionuclides. SKB TR-10-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wu P, Wood R, Stott P, 2004.** Does the recent freshening trend in the North Atlantic indicate a weakening thermohaline circulation? *Geophysical Research Letters*, 31, L02301, doi:10.1029/2003GL018584.
- Wänstedt S, 2000.** Geophysical and geological investigations of the Boda area. SKB R-00-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Yang C, Samper J, Molinero J, Bonilla M, 2007.** Modelling geochemical and microbial consumption of dissolved oxygen after backfilling a high level radioactive waste repository. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93, s 130–148.
- Yershov E D, 1998.** *General geocryology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Åkesson M, Kristensson O, Börgesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010a.** THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Börgesson L, Kristensson O, 2010b.** SR-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. SKB TR-10-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åstrand P-G, Broed R, Jones J, 2005.** Pandora technical description and user guide. Posiva Working Report 2005-64, Posiva Oy, Finland.
- Öhman J, Follin S, 2010.** Site investigation SFR. Hydrogeological modelling of SFR. Model version 0.2. SKB R-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1077122 ver 2.0	Strålskärmsberäkningar för kopparkapslar innehållande BWR, MOX och PWR bränsleelement.	SKB, 2010
1175162 ver 4.0	Svetsning vid tillverkning och förslutning.	SKB, 2011
1193244 ver 4.0	Criticality safety calculations of disposal canisters.	SKB, 2010
1221567 ver 2.0	SKB – Simulering av inkapsling av använt kärnbränsle för slutförvaring i KBS-3-förvar.	SKB, 2010

Tillämpliga föreskrifter och SKB:s implementering av dessa i säkerhetsanalysen SR-Site

Denna bilaga omfattar utdrag ur de av SSM:s föreskrifter som är tillämpliga vid säkerhetsanalys av förvar för radioaktivt avfall. Hänvisningar till SKB:s planer för att uppfylla dessa föreskrifter är infogade som kursiv text på relevanta ställen i avsnitt A1.1 (SSMFS 2008:21) och i avsnitt A2.1 (SSMFS 2008:37).

A1 SSMFS 2008:21

SSM:s föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämnen och kärnavfall samt SSM:s allmänna råd om tillämpningen av dessa föreskrifter finns samlade i SSMFS 2008:21.

Föreskrifterna har rättslig status, medan de allmänna råden beskrivs i 1§ i författningssamlingsförordningen (1976:725) som: sådana generella rekommendationer om tillämpningen av en författning som anger hur någon kan eller bör handla i ett visst hänseende.

A1.1 Föreskrifter i SSMFS 2008:21

Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall beslutades den 19 december, 2008.

Med stöd av 20 a § och 21 §§ förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet har Strålsäkerhetsmyndigheten utfärdat följande föreskrifter och beslutat om följande allmänna råd.

Tillämpningsområde

1 § Dessa föreskrifter gäller anläggningar för slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (slutförvar). Föreskrifterna gäller inte för anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 16 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet.

Föreskrifterna innehåller kompletterande bestämmelser till Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar.

Barriärer och dess funktioner

2 § Säkerheten efter förslutning av ett slutförvar ska upprätthållas genom ett system av passiva barriärer.

3 § Varje barriär ska ha till funktion att på ett eller flera sätt medverka till att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen, antingen direkt, eller indirekt genom att skydda andra barriärer i barriärsystemet.

Hantering i SR-Site: I kapitel 8 redovisas i detalj hur barriärerna bidrar till säkerheten. Beräkningsfallen som redovisas i avsnitt 13.7.3 adresserar direkt denna frågeställning. Rent allmänt syftar stora delar av säkerhetsanalysen åt att påvisa barriärernas säkerhet.

4 § En brist i någon av slutförvarets barriärfunktioner, som konstateras under tiden slutförvaret är under uppförande eller driftövervakas, och som kan komma att försämra säkerheten efter förslutningen utöver vad som förutsetts i säkerhetsredovisningen²³, ska utan onödigt dröjsmål rapporteras till Strålsäkerhetsmyndigheten²⁴. Detsamma gäller om det uppstår misstanke om en sådan brist eller om att en sådan brist kan komma att uppstå i framtiden.

²³ Jfr. 4 kap. 2 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar.

²⁴ Jfr. 2 kap. 3 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar.

Konstruktion och utförande

5 § Barriärsystemet ska ha tålighet mot sådana förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutningen.

Hantering i SR-Site: Det övergripande syftet för säkerhetsanalysen kan sägas vara att demonstrera just detta.

6 § Barriärsystemet ska konstrueras och utföras med hänsyn till bästa möjliga teknik²⁵.

Hantering i SR-Site: Frågan om BAT redovisas i avsnitten 2.7, 14.3 och 15.3.5.

7 § Barriärsystemet ska innehålla flera barriärer så att så långt det är möjligt nödvändig säkerhet upprätthålls trots enstaka brist i en barriär.

Hantering i SR-Site: Denna frågeställning tas upp i många av analyserna och illustreras i synnerhet av den uppsättning beräkningsfall som redovisas i avsnitt 13.7.3.

8 § Inverkan på säkerheten av sådana åtgärder som vidtas för att underlätta övervakning eller återtagning av deponerat kärnämne eller kärnavfall från slutförvaret eller för att försvåra tillträde till slutförvaret ska analyseras och redovisas till Strålsäkerhetsmyndigheten.

Säkerhetsanalys

9 § Utöver bestämmelserna i 4 kap. 1 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar gäller att säkerhetsanalyserna även ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning och att sådana analyser ska göras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.

Hantering i SR-Site: Den systematiska behandlingen i en databas av ovan nämnda förhållanden, händelser och processer i SR-Site beskrivs i kapitel 3 och i FEP rapporten. Den detaljerade hanteringen av dessa faktorer redovisas genomgående i rapporten. En verifiering av att FEP som uteslutits i ett tidigt skede av analysen är försumbara också i skenet av den fullbordade scenario- och riskanalysen redovisas i avsnitt 14.4.

10 § En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år.

Hantering i SR-Site: De tidsskalor som är relevanta i SR-Site diskuteras i avsnitt 2.4.

Säkerhetsredovisning

11 § Säkerhetsredovisningen för ett slutförvar ska, utöver vad som framgår av bestämmelserna i 4 kap. 2 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar innehålla den information som framgår av bilaga 1 till dessa föreskrifter och som avser tiden efter förslutning.

Innan slutförvaret försluts ska den slutliga säkerhetsredovisningen förnyas och säkerhetsgranskas i enlighet med 4 kap 3 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar samt vara prövad och godkänd av Strålsäkerhetsmyndigheten.

Undantag

12 § Strålsäkerhetsmyndigheten får, om särskilda skäl föreligger, medge undantag från dessa föreskrifter om det kan ske utan att syftet med föreskrifterna åsidosätts och under förutsättning att säkerheten kan upprätthållas.

²⁵ Jfr. 2 kap. 3 § miljöbalken.

Bilaga 1

Följande ska redovisas beträffande analysmetoder:

– hur en eller flera metoder använts för att beskriva det passiva systemet av barriärer i slutförvaret, dess funktion och utveckling med tiden; metoden eller metoderna ska bidra till att ge en klar bild av de förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner samt de inbördes kopplingarna mellan dessa förhållanden, händelser och processer,

Hantering i SR-Site: Formatet för systembeskrivningen redovisas i kapitel 5 (initialtillståndet), kapitel 6 (yttre förhållanden) och i kapitel 7 (processer). Beskrivningen av systemets utveckling omfattar hela analysen och analyseras i detalj i form av en referensutveckling i kapitel 10. Varianter av denna utveckling analyseras för ett antal scenarier i kapitel 12.

– hur en eller flera metoder använts för att identifiera och beskriva relevanta scenarier för händelseförlopp och förhållanden som kan påverka den framtida utvecklingen av slutförvaret; bland scenarierna ska finnas ett huvudscenariot som tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning,

Hantering i SR-Site: Metoden för att välja scenarier i SR-Site beskrivs i avsnitt 2.5.8 och hur den genomförs beskrivs i kapitel 11.

– tillämpbarheten hos använda modeller, parametervärden och andra förutsättningar som används för beskrivning och beräkning av slutförvarets funktioner så långt det rimligen är möjligt,

Hantering i SR-Site: Detta görs i Modellrapporten, se exempelvis avsnitt 7.5, och i Datarapporten, se kapitel 9.

– hur osäkerheter i beskrivningen av barriärssystemets funktioner, scenarier, beräkningsmodeller och beräkningsparametrar samt variationer i barriärernas egenskaper hanterats i säkerhetsanalysen, inklusive redovisning av en känslighetsanalys som visar hur osäkerheterna inverkar på beskrivningen av barriärernas utveckling och analysen av konsekvenserna för människors hälsa och för miljön.

Hantering i SR-Site: Hanteringen av osäkerheter genomsyrar hela säkerhetsanalysen. En plan för hanteringen av osäkerheter redovisas i avsnitt 2.8.3. Känslighetsanalyser förekommer på flera ställen i referensutvecklingen och i analyserna av olika scenarier; se exempelvis avsnitten 12.2.2, 12.6.2, 13.5.11 och 13.6.2. De huvudsakliga riskbidragens känslighet för olika konceptuella osäkerheter analyseras i avsnitt 13.10.

Följande ska analyseras beträffande analys av betingelserna efter förslutning:

– säkerhetsanalysen enligt 9 § omfattande beskrivningar av utvecklingen i biosfär, geosfär och slutförvar för utvalda scenarier; slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.

Hantering i SR-Site: Detta är väsentligen redovisningen av analyserna av referensutvecklingen i kapitel 10 och av analyserna av de valda scenarierna i kapitel 12.

A1.2 Utdrag från de allmänna råden i SSMFS 2008:21

Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna (SSMFS 2008:21) om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall

Nedan följer oavkortat allmänna råd till 9 och 10 § och till bilagan i SSMFS 2008:21 som utgör de avsnitt som relaterar till säkerhetsanalysen.

Till 9 § och bilaga

Ett slutförvars säkerhet efter förslutning analyseras kvantitativt främst genom att beräkna eventuell spridning av radioaktiva ämnen och hur de är fördelade i tiden för ett relevant urval av framtida möjliga händelseförlopp (scenarier). Syftet med säkerhetsanalysen är bl a att visa att riskerna från

dessa scenarier är acceptabla i förhållande till de krav på skydd av människors hälsa och miljön som har utfärdats av Strålsäkerhetsmyndighetens (SSMFS 2008:37). Säkerhetsanalysen bör också syfta till att ge en grundläggande förståelse av slutförvarets funktion i olika tidsrymder och till att identifiera krav på funktion och konstruktion av slutförvarets olika delar.

Ett *scenario* i säkerhetsanalysen omfattar en beskrivning av hur en given kombination av yttre och inre betingelser inverkar på slutförvarets funktion. Två grupper av sådana betingelser är:

- yttre betingelser i form av förhållanden, händelser och processer som verkar utanför slutförvarets barriärer; hit hör klimatförändringar och deras följdverkningar på slutförvarets omgivning såsom permafrost, nedisning, landsänkning och landhöjning samt effekter av mänsklig verksamhet,
- inre betingelser i form av förhållanden, händelser och processer som verkar inom slutförvaret; hit hör egenskaper, inklusive defekter, hos kärnämne, kärnavfall och tekniska barriärer och därtill knutna processer, samt egenskaper hos omgivande berg med därtill knutna processer.

Med utgångspunkt från en analys av sannolikheten för att scenarier av olika slag ska inträffa i olika tidsrymder bör scenarier med signifikant inverkan på slutförvarets funktion indelas i olika kategorier:

- huvudscenario,
- mindre sannolika scenarier,
- övriga scenarier eller restscenarier.

Huvudscenariot bör grunda sig på den troliga utvecklingen av yttre betingelser och realistiska eller där så är motiverat, konservativa antaganden om de inre betingelserna. Det bör omfatta framtida yttre händelser som har stor sannolikhet att inträffa eller som inte kan visas ha låg sannolikhet att inträffa under den tid som säkerhetsanalysen avser. Det bör vidare bygga på i största möjliga utsträckning trovärdiga antaganden om inre betingelser, inklusive underbyggda antaganden om förekomst av tillverkningsfel och andra ofullkomligheter, och som medger en analys av slutförvarets barriärfunktioner (det är t ex inte tillräckligt att alltid utgå ifrån täta avfallsbehållare under lång tid, även om detta skulle kunna visas vara det mest sannolika fallet). Huvudscenariot bör användas som utgångspunkt för en analys av hur osäkerheter inverkar (se nedan), vilket innebär att även analysen av huvudscenariot inrymmer ett antal beräkningsfall.

Mindre sannolika scenarier bör tas fram för utvärdering av scenarioosäkerhet (se även nedan). Hit hör varianter av huvudscenariot med alternativa händelse och tidsförlopp samt scenarier som beaktar effekter av framtida mänsklig verksamhet såsom skador som tillfogats barriärer. (Skador på människor som gör intrång i slutförvar belyses i restscenarier, se nedan.) Vid analys av mindre sannolika scenarier bör ingå analys av sådana osäkerheter som inte utvärderas inom ramen för huvudscenariot.

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

Hantering i SR-Site: Metodiken för val av scenarier beskrivs i avsnitt 2.5.8 och hur den tillämpas beskrivs i kapitel 11.

Brist på kunskap och andra ovissheter i beräkningsförutsättningarna (antaganden, modeller, data) benämns i detta sammanhang osäkerheter. Dessa osäkerheter kan indelas i:

- scenariosäkerhet: osäkerhet i yttre och inre betingelser med avseende på slag, grad och tidsföljd,
- systemosäkerhet: osäkerhet i fullständighet vid beskrivningen av det system av förhållanden, händelser och processer som används vid analysen av både enskilda barriärfunktioner och funktionen hos slutförvaret i sin helhet,
- modellosäkerhet: osäkerhet i de beräkningsmodeller som används i analysen,
- parametersäkerhet: osäkerhet i de parametervärden (ingångsdata) som används vid beräkningarna,
- rumslig variation hos de parametrar som används för att beskriva bergets barriärfunktioner (främst vad gäller vattenströmning, mekaniska och kemiska förhållanden).

Det finns ofta inga klara gränslinjer mellan de olika slagen av osäkerheter. Det viktiga är att osäkerheterna beskrivs och hanteras på ett konsistent och strukturerat sätt.

Utvärderingen av osäkerheter är en viktig del av säkerhetsanalysen. Detta innebär att osäkerheter bör diskuteras och beaktas ingående såväl vid val av beräkningsfall, beräkningsmodeller och parametervärden som vid bedömning av beräkningsresultat.

Hantering i SR-Site: *Hantering av osäkerheter genomsyrar hela säkerhetsanalysen. En plan för hanteringen av osäkerheter redovisas i avsnitt 2.8.3.*

De antaganden och beräkningsmodeller som används bör väljas omsorgsfullt med tanke på tillämpningen och valet motiveras genom diskussion av alternativ och med hänvisningar till vetenskapligt underlag. I de fall det råder tvekan om vilken modell som är tillämplig bör flera modeller användas för att belysa effekterna av osäkerheten i val av modell.

Hantering i SR-Site: *Denna fråga hanteras främst i **Processrapporterna** och i **Klimatrapporten** vad det gäller yttre påverkan, se vidare kapitel 7 respektive kapitel 6. En strukturerad redogörelse av viktiga valda modeller ges i **Modellrapporten**.*

Både deterministiska och probabilistiska metoder bör användas så att de kompletterar varandra och på så sätt ger så allsidig riskbild som möjligt.

Hantering i SR-Site: *De flesta beräkningarna i SR-Site är deterministiska. Probabilistiska beräkningar används huvudsakligen för att hantera osäkerheter och rumsliga variationer i modelleringen av radionuklidtransport och dos, väsentligen i kapitel 13.*

Sannolikheter för att scenarier och beräkningsfall verkligen ska inträffa bör uppskattas så långt det är möjligt för att kunna beräkna risk. Sådana uppskattningar är inte möjliga att göra exakt. Uppskattningarna bör därför underbyggas genom att använda flera metoder, t ex bedömningar av flera oberoende experter. Detta kan göras t ex genom uppskattningar av när i tiden olika händelser kan förväntas ha inträffat.

Hantering i SR-Site: *Sannolikheten för scenarier som inte utsluts i risksummeringen därför att de betraktas som restsценарier ansätts pessimistiskt. Detta är en del av det allmänna tillvägagångssättet för att uppskatta risk, se avsnitt 2.6.2. Metoden för val av scenarier, som beskrivs i avsnitt 2.5.8, och dess tillämpning enligt kapitel 11 är också relevanta i detta avseende. Analysen som leder till kategoriseringen av scenarier redovisas i kapitel 12.*

Med utgångspunkt i scenarier som kan visas vara särskilt viktiga från risksynpunkt bör ett antal konstruktionsstyrande fall identifieras. Dessa fall bör tillsammans med annan information, t ex om tillverkningsteknik och kontrollerbarhet, användas för att underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper.

Hantering i SR-Site: *Se avsnitt 15.4.*

Speciellt för slutförvaring av kärnämne, t ex använt kärnbränsle, bör det kunna visas att kriticitet inte kan uppkomma i den konfiguration kärnämnet har från början. För omfördelning genom fysiska och kemiska processer av kärnämnet, och som kan leda till kriticitet, bör det visas att en sådan omfördelning är mycket osannolik.

Hantering i SR-Site: Se avsnitt 13.3 och i *Processrapporten för bränsle och kapsel*, avsnitt 2.1.3.

Resultatet av beräkningar i säkerhetsanalysen bör innehålla sådan information och presenteras på ett sådant sätt att bedömning av säkerheten kanske mot uppställda krav på ett överskådligt sätt.

Hantering i SR-Site: Detta är ett övergripande krav på kvaliteten hos säkerhetsredovisningen som har styrt sammanställningen av SR-Site rapporten. Kravuppfyllelse diskuteras i avsnitt 15.3.

Giltigheten av använda förutsättningar, såsom modeller och parametervärden, bör styrkas t ex genom hänvisningar till vetenskaplig litteratur, särskilda utredningar och forskningsresultat, laboratorieexperiment i olika skalor, fältförsök och studier av naturliga fenomen (naturliga analogier).

Hantering i SR-Site: Rättfärdigande av modeller med användande av nämnda motiv redovisas i *Processrapporterna* samt för yttre påverkan i *Klimatrapporten*. En strukturerad redogörelse av viktiga valda modeller ges i *Modellrapporten*. Parametervärden motiveras i *Datarapporten*.

Vetenskapligt underlag, liksom gjorda bedömningar av experter, bör dokumenteras på ett spårbart sätt genom att noggrant ange referenser till vetenskaplig litteratur och annat underlag.

Hantering i SR-Site: Detta redovisas i en stor del av dokumentationen av SR-Site, i synnerhet i de tre *Processrapporterna*, i *Klimatrapporten* och i *Datarapporten*.

Till 10 §

Den tid som säkerheten behöver bibehållas och visas bör framgå som en utgångspunkt för säkerhetsanalysen. Ett sätt att diskutera och motivera en sådan tidsbedömning är att utgå från farligheten hos slutförvarets innehåll av radioaktiva ämnen i jämförelse med farligheten hos radioaktiva ämnen i naturliga förekomster. Hänsyn bör dock också kunna tas till svårigheterna att göra meningsfulla analyser för extremt långa tidsrymder, bortom en miljon år, på annat sätt än att redovisa hur farligheten hos de radioaktiva ämnena i slutförvaret avtar med tiden.

För slutförvar avsedda för långlivat avfall kan säkerhetsanalysen behöva omfatta scenarier som tar hänsyn till större förväntade klimatförändringar, främst i form av kommande nedisningar. Exempelvis bör man särskilt ta hänsyn till nästkommande fullständiga glaciationscykel som för närvarande beräknas vara i storleksordningen 100 000 år.

Hantering i SR-Site: Tidsskalan för SR-Site diskuteras i avsnitt 2.4.

För tider upp till tusen år efter förslutning ligger i enlighet med bestämmelserna i SSMFS 2008:37 dos och risk beräknade för dagens förhållanden i biosfären till grund för bedömningen av slutförvarets säkerhet och skyddsförmåga.

För längre tider kan bedömningen dessutom ske med dos som en av flera säkerhetsindikatorer. Detta bör beaktas både vid beräkningar och presentation av analysresultat. Exempel på sådana kompletterande säkerhetsindikatorer är de halter av radioaktiva ämnen från slutförvaret som kan byggas upp i mark och ytnära grundvatten eller det beräknade flödet av radioaktiva ämnen till biosfären.

(Jämför föreskrifterna i SSMFS 2008:37 och SSM:s kommentarer till dessa föreskrifter).

Hantering i SR-Site: Valet av alternativa säkerhetsindikatorer beskrivs i avsnitt 2.6.3 och deras tillämpning i avsnitt 13.5.8 och dessutom i *Radionuklidtransportrapporten*.

A2 SSMFS 2008:37

Strålsäkerhetsmyndigheternas föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall och Strålsäkerhetsmyndigheternas allmänna råd om tillämpning av dessa föreskrifter finns redovisade i SSMFS 2008:37.

Föreskrifterna har rättslig status, medan de allmänna råden beskrivs i 1 § i författningssamlingsförordningen (1976:725) som: sådana generella rekommendationer om tillämpningen av en författning som anger hur någon kan eller bör handla i ett visst hänseende.

A2.1 Föreskrifter i SSMFS 2008:37

Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall; beslutade den 19 december 2008.

Strålsäkerhetsmyndigheten föreskriver följande med stöd av 7 och 8 §§ strålskyddsförordningen (1988:233).

Tillämpningsområde och definitioner

1 § Dessa föreskrifter är tillämpliga på slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Föreskrifterna är inte tillämpliga på anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 19 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet.

2 § I dessa föreskrifter avses med:

- *bästa möjliga teknik*: den effektivaste åtgärden för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen och utsläppens skadliga effekter på människors hälsa och miljön, och som inte medför orimliga kostnader,
- *intrång*: mänskligt handlande vid ett slutförvar som kan påverka dess skyddsförmåga,
- *optimering*: begränsning av stråldoser till människor så långt detta rimligen kan göras med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhällsliga faktorer,
- *skadeverkningar*: cancer (dödlig och icke-dödlig) samt ärftliga skador hos människor orsakade av joniserande strålning, i enlighet med styckena 47-51 i Internationella strålskyddskommissionens (ICRP) publikation nr 60, 1990,
- *skyddsförmåga*: förmåga att skydda människors hälsa och miljön från skadlig verkan av joniserande strålning,
- *slutligt omhändertagande*: hantering, behandling, transport, mellanlagring inför, och i samband med, slutlig förvaring samt den slutliga förvaringen,
- *risk*: produkten av sannolikheten att erhålla en stråldos och stråldosens skadeverkningar.

Termer och begrepp som används i strålskyddslagen (1988:220) och lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet har samma betydelse i dessa föreskrifter.

Helhetssyn m m

3 § Människors hälsa och miljön ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning, dels under den tid då de olika stegen i det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall genomförs, dels i framtiden. Det slutliga omhändertagandet får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som accepteras inom Sverige.

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

Kollektivdos på grund av förväntat utläckage av radioaktiva ämnen under tusen år efter förslutningen av ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska beräknas som summan över 10 000 år av den årliga kollektivdosen. Beräkningen ska redovisas i enlighet med 10-12 §§.

***Hantering i SR-Site:** De aspekter på optimering och bästa möjliga teknik som kan tas om hand i säkerhetsanalysen hanteras i avsnitten 2.7, 14.3 och 15.3.5. Kollektivdoser redovisas i avsnitt 13.6.5.*

Skydd av människors hälsa

Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska 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 risken²⁶.

Sannolikheten för skadeverkningar på grund av en stråldos ska beräknas med de sannolikhetskoefficienter som redovisas i Internationella strålskyddskommissionens publikation nr 60, 1990.

***Hantering i SR-Site:** Beräkning av risk och bedömning av uppfyllelse av ovanstående kriterium är ett av huvudsyftena i SR-Site. Stora delar av metodiken som beskrivits i kapitel 2 syftar till att nå denna slutpunkt. Frågeställningar som direkt relaterar till riskberäkningar redovisas i avsnitt 2.6. En summering av beräknade riskbidrag från relevanta scenarier ges i avsnitt 15.2.1.*

Miljöskydd

6 § Slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall ska 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 och ta särskild hänsyn till förekomst av genetiskt särpräglade populationer, såsom isolerade populationer, endemiska arter och utrotningshotade arter samt i övrigt skyddsvärda organismer.

***Hantering i SR-Site:** Detta hanteras i kapitel 13, avsnitten 13.2,5 och 13.5.7. Slutsatser redovisas i avsnitt 15.3.4.*

Intrång och tillträde

8 § Ett slutförvar ska främst utformas med hänsyn till dess skyddsförmåga. Om åtgärder vidtas för att underlätta tillträde eller försvåra intrång ska effekterna på slutförvarets skyddsförmåga redovisas.

9 § Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar ska redovisas för de olika tidsperioder som anges i 11–12 §§.

Slutförvarets skyddsförmåga efter intrång ska beskrivas.

***Hantering i SR-Site:** Intrångsfrågor diskuteras i avsnitt 6.2.1 och analyseras i avsnitt 14.2 och ytterligare i **FHA-rapporten**.*

²⁶ För anläggningar i drift gäller Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:23) om skydd av människors hälsa och miljön vid utsläpp av radioaktiva ämnen från vissa kärntekniska anläggningar samt Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:51) om grundläggande bestämmelser för skydd av arbetstagare och allmänhet vid verksamhet med joniserande strålning.

Tidsperioder

10 § En bedömning av ett slutförvars skyddsförmåga ska redovisas för två tidsperioder av sådana storleksordningar som framgår av 11 -12 §§. Redovisningen ska innefatta ett fall, som utgår ifrån att de biosfärsförhållanden som råder vid tiden för ansökan om tillstånd för uppförande av slutförvaret inte förändras. Osäkerheter i gjorda antaganden ska redovisas och tas hänsyn till i bedömningen av skyddsförmågan.

De första tusen åren efter förslutning av ett slutförvar

11 § För de första tusen åren efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön.

Tiden efter tusen år efter förslutning av ett slutförvar

12 § För tiden efter tusen år efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.

Hantering i SR-Site (11 § och 12 §): Detta tas huvudsakligen om hand i referensutvecklingen i kapitel 10 som är uppdelad i flera tidsperioder. De första tusen åren hanteras som en del av den inledande tempererade perioden. Ett antal scenarier som täcker möjliga förvarsutvecklingar analyseras (kapitel 12 och 13).

Undantag

13 § Strålsäkerhetsmyndigheten får medge undantag från dessa föreskrifter om särskilda skäl föreligger och om det kan ske utan att syftet med föreskrifterna åsidosätts.

A2.2 Allmänna råd i SSMFS 2008:37

Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd om tillämpning av föreskrifterna (SSMFS 2008:37) om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall; beslutade den 19 december 2008.

Till 1 § Tillämpningsområde

Dessa råd är tillämpliga på geologisk slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall. Råden omfattar de åtgärder som vidtas i syfte att utveckla, förlägga, uppföra, driva och försluta ett slutförvar och som kan påverka slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser efter förslutning.

Råden är även tillämpliga på de åtgärder som vidtas med använt kärnbränsle och kärnavfall inför slutförvaring och som kan påverka ett slutförvars skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser. Här ingår verksamheter vid andra anläggningar än slutförvaret som t ex den konditionering av avfallet som sker genom ingjutning av avfall i betong och genom inkapsling av använt kärnbränsle, samt transporter mellan anläggningar och styrning av avfall till olika slutförvar, inklusive markdeponier för lågaktivt kärnavfall som är tillståndsgivna enligt 16 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet. Råden är dock, i likhet med föreskrifterna, inte tillämpliga på själva anläggningen för markdeponering.

Till 2 § Definitioner

Termer och begrepp som används i strålskyddslagen (1988:220), lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet och Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:37) om skydd av människors

hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall har samma betydelse i dessa råd. Dessutom används följande definitioner:

<i>Scenario</i>	en beskrivning av slutförvarets möjliga utveckling givet ett initialtillstånd, och förhållandena i omgivningen och deras utveckling,
<i>Exponeringsväg</i>	radioaktiva ämnens spridning från ett slutförvar till en punkt där människan, eller någon organism som omfattas av det miljöskydd föreskrifterna avser, vistas. Detta innefattar spridning i den geologiska barriären, transport med vatten- och luftströmmar, spridning i ekosystem samt upptag i människa eller organismer i miljön,
Risikanalys	en analys med syfte att belysa ett slutförvars skyddsförmåga och dess konsekvenser med avseende på miljöpåverkan samt risk för människor.

Till 4, 8 och 9 §§. Helhetssyn m m samt intrång och tillträde

Optimering och Bästa Möjliga Teknik

Föreskrifterna kräver att optimering ska genomföras och att hänsyn ska tas till bästa möjliga teknik. Optimering och bästa möjliga teknik bör användas parallellt i syfte att förbättra förvarets skyddsförmåga.

Optimering av ett slutförvar innebär att åtgärder bör utvärderas med utgångspunkt från beräknade risker.

Tillämpning av bästa möjliga teknik i samband med slutförvaring innebär att förläggningsplats, utformning, bygge och drift av slutförvaret och tillhörande systemkomponenter bör väljas för att förhindra, begränsa och fördröja utsläpp från både tekniska och geologiska barriärer så långt som är rimligt möjligt. Avvägning mellan olika åtgärder bör göras genom en samlad bedömning av deras påverkan på slutförvarets skyddsförmåga.

För fall där de beräknade riskerna är behäftade med stora osäkerheter, t ex vid analyser av slutförvaret lång tid efter förslutning, eller analyser som görs i ett tidigt skede av utvecklingsarbetet med slutförvarssystemet, bör större tyngd läggas på bästa möjliga teknik.

Vid eventuella konflikter mellan tillämpningen av optimering och bästa möjliga teknik bör bästa möjliga teknik ges företräde.

Erfarenheter från riskanalyser och utvecklingsarbetet med slutförvaret bör löpande utnyttjas för optimeringen och för att ta hänsyn till bästa möjliga teknik.

Hantering i SR-Site: De aspekter av optimering och bästa möjliga teknik som kan hanteras i säkerhetsanalysen redovisas i avsnitten 2.7, 14.3 och 15.3.5.

Kollektivdos

Föreskrifterna ställer krav på redovisning av kollektivdos från utsläpp som sker under de första tusen åren efter förslutning. För slutförvaring bör kollektivdosen också användas vid jämförelser mellan alternativa förvarskoncept och lokaliseringar. Om förvarskonceptet innebär en fullständig inneslutning av det använda kärnbränslet eller kärnavfallet i tekniska barriärer under de första tusen åren efter förslutning behöver kollektivdosen inte redovisas.

Hantering i SR-Site: En beräkning av kollektivdosen redovisas i avsnitt 13.6.5.

Personalstrålskydd

Åtgärder som vidtas för personalstrålskyddet som kan försämra slutförvarets skyddsförmåga eller försvåra möjligheten att bedöma denna, bör redovisas.

Hantering i SR-Site: Inga sådana åtgärder har identifierats i SR-Site.

Mänsklig påverkan och informationsbevarande

Vid tillämpning av bästa möjliga teknik bör hänsyn också tas till möjligheten att begränsa sannolikheten för, och konsekvenserna av, oavsiktlig framtida mänsklig påverkan på slutförvaret t ex oavsiktligt intrång. Ett ökat försvarsdjup och undvikande av förläggningsplatser med brytbara mineraltillgångar kan t ex bedömas minska sannolikheten för oavsiktligt mänskligt intrång.

Hantering i SR-Site: *Malmpotentialen för platsen utvärderas, se avsnitt 4,3,2, Denna information förs vidare till analyserna av FHA-scenarier i avsnitt 14.2. Ofrivilligt intrång diskuteras som en av många faktorer när återkoppling ges till valet av försvarsdjup i avsnitten 14.3.4 och 15.5.18.*

Bevarande av kunskap om slutförvaret skulle kunna minska risken för framtida mänsklig påverkan. En strategi för informationsbevarande bör tas fram så att åtgärder kan vidtas inför förslutning av slutförvaret. Exempel på information som bör beaktas är uppgifter om slutförvarets läge, innehåll av radioaktiva ämnen och konstruktion.

Hantering i SR-Site: *Framtagandet av en sådan strategi är inte en uppgift för säkerhetsanalysen. På annat ställe i SKB:s tillståndsansökan anges dock att information om förvaret under byggnad, drift och förslutning kommer att insamlas och sparas enligt de rättsliga krav som gäller. En strategi för bevarande av information efter förslutning av förvaret kommer att tas fram av SKB i rimlig tid innan förvaret försluts och delvis i form av internationellt samarbete i frågan.*

Till 5–7 §§. Skydd av människors hälsa och miljöskydd

Risk till individ ur allmänheten

Förhållande mellan dos och risk

Internationella strålskyddskommissionens (ICRP) rekommendationer ska enligt föreskrifterna användas för beräkning av skadeverkningar på grund av en stråldos. Enligt ICRP publikation nr. 60, 1990, är faktorn för omvandling av effektiv stråldos till risk 7,3 procent per sievert.

Föreskrifternas kriterium för individrisk

Risken för skadeverkningar för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken (den mest exponerade gruppen) får enligt föreskrifterna inte överstiga 10⁻⁶ per år. Eftersom den mest exponerade gruppen inte kan beskrivas på ett entydigt sätt, bör gruppen ses som ett sätt att kvantifiera slutförvarets skyddsformåga.

Ett sätt att definiera den mest exponerade gruppen är att inkludera de individer som erhåller en risk i intervallet från den högsta risken ner till en tiondedel av denna risk. Om ett större antal individer kan bedömas ingå i en sådan grupp bör det aritmetiska medelvärdet av individriskerna i gruppen användas vid prövningen mot föreskrifternas kriterium för individrisk. Ett sådant exempel är utsläpp av radioaktiva ämnen i en större sjö som kan utnyttjas som vattentäkt och för fiske.

Om endast ett fåtal individer ingår i gruppen kan föreskrifternas kriterium för individrisk anses vara uppfyllt om den högsta beräknade individrisken inte överstiger 10⁻⁵ per år. Ett exempel på en sådan situation kan vara om konsumtion av dricksvatten från en borrhållning utgör den dominerande exponeringsvägen. För sådana fall bör valet av individer med högst riskbelastning motiveras med information om spridningen i beräknade individrisker med avseende på antagna levnadsvanor och vistelseorter.

Hantering i SR-Site: *Den mest exponerade gruppen definieras som den grupp av individer som utsätts för den högsta exponeringen sett över alla tänkbara utsläppsområden (dvs biosfärsobjekt) i landskapet, se vidare avsnitt 13.2.3 och Biosfärsrapporten.*

Medelvärdesbildning över en livstid

Individrisken bör beräknas som ett årligt medelvärde utifrån en uppskattning av livstidsrisken för samtliga relevanta exponeringsvägar för varje individ. Livstidsrisken kan beräknas som den ackumulerade livstidsdosen multiplicerad med omvandlingsfaktorn 7,3 procent per sievert.

Hantering i SR-Site: Detta tillvägagångssätt används i SR-Site, se avsnitt 13.2.3 och Biosfärsrapporten.

Medelvärdesbildning mellan generationer

Både deterministiska och probabilistiska beräkningar kan användas för att belysa hur risken från slutförvaret utvecklas med tiden. En probabilistisk analys kan dock i vissa fall ge en otillräcklig bild av hur en enskild händelse som skadar slutförvaret, t ex ett större jordskalv, påverkar risken för en enskild generation. De probabilistiska beräkningarna bör i dessa fall kompletteras så som anges i bilaga 1.

Hantering i SR-Site: Detta så kallade riskutspädningsfenomen tas upp i allmänna termer i avsnitt 2.3.2 och underrubrik "Riskutspädning" och analyseras i avsnitt 13.9.4.

Val av scenarier

Bedömningen av ett slutförvars skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser bör baseras på en uppsättning scenarier som tillsammans illustrerar de viktigaste förloppen av betydelse för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.

Hantering av klimatutveckling

Med hänsyn till de stora osäkerheter som är förknippade med antaganden om klimatutvecklingen i en avlägsen framtid och för att underlätta tolkningen av den risk som ska beräknas, bör riskanalysen förenklas till att omfatta några möjliga framtida klimatutvecklingar.

Till varje klimatutveckling bör kopplas en realistisk uppsättning biosfärsförhållanden. De olika klimatutvecklingarna bör väljas så att de tillsammans belyser de mest betydelsefulla och rimligt förutsägbara sekvenserna av framtida klimattillstånd och deras påverkan på slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser. Valet av de klimatutvecklingar som ligger till grund för analysen bör grundas på känslighetsanalyser och expertbedömningar. Ytterligare råd ges i råden till 10–12 §§.

För varje antagen klimatutveckling bör risken från slutförvaret beräknas genom att väga samman riskbidragen från ett antal scenarier som tillsammans belyser hur de mer eller mindre sannolika förloppen i slutförvaret och det omgivande berget påverkar slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser. Den beräknade risken bör redovisas och värderas mot föreskrifternas kriterium för individrisk, separat för varje klimatutveckling. Slutförvaret bör således kunna visas uppfylla riskkriteriet för de alternativa klimatutvecklingarna. Om en lägre sannolikhet än ett (1) anges för en viss klimatutveckling bör den motiveras, t ex genom expertbedömningar.

Hantering i SR-Site: Metoden för val av scenarier beskrivs i avsnitt 2.5.8. En referensutveckling för klimatet används för att definiera ett basfall för huvudscenariot. I en variant av huvudscenariot där global uppvärmning analyseras antas ett klimat som påverkats av effekter av antropogena utsläpp av växthusgaser. Båda dessa varianter beaktas i analyserna av samtliga ytterligare scenarier som redovisas i kapitel 12. Dessutom analyseras för varje scenario effekterna av osäkerheter i klimatrelaterade faktorer av betydelse. Resultaten av alla dessa scenarier beaktas i risksummeringen.

Mänsklig påverkan

Ett antal scenarier för framtida oavsiktlig mänsklig påverkan på slutförvaret bör redovisas. Scenarierna bör omfatta ett fall av direkt intrång i samband med borning i förvaret, och några exempel på andra aktiviteter som indirekt försämrar slutförvarets skyddsförmåga, t ex genom att förändra de hydrologiska eller grundvattenkemiska förhållandena i slutförvaret eller dess omgivning. Urvalet av intrångsscenarioer bör baseras på dagens levnadsvanor och tekniska förutsättningar, och ta hänsyn till slutförvarets egenskaper.

Konsekvenserna för det störda slutförvarets skyddsförmåga bör illustreras med beräkningar av stråldoser för individer i den mest exponerade gruppen, och redovisas separat utanför riskanalysen

för det ostörda slutförvaret. Resultaten bör användas för att belysa tänkbara motåtgärder och ge ett underlag till tillämpning av bästa möjliga teknik (se råden om optimering och bästa möjliga teknik).

Direkta konsekvenser för de individer som gör intrång i slutförvaret behöver inte redovisas.

Hantering i SR-Site: Detta tillvägagångssätt används i SR-Site, se avsnitt 14.2. Vad det gäller åtgärder för att förhindra intrång har ett av mågen syften varit att välja förvarets djup och placering (ingen malmpotential) så att risken för oavsiktligt intrång minimeras.

Särskilda scenarier

För slutförvar som i första hand baseras på inneslutning av det använda kärnbränslet eller kärnavfallet bör en analys av ett tänkt bortfall, under de första tusen åren efter förslutning, av någon eller några barriärfunktioner av central betydelse för skyddsförmågan redovisas separat utanför riskanalysen. Syftet med en sådan analys bör vara att tydliggöra hur de olika barriärerna bidrar till slutförvarets skyddsförmåga.

Hantering i SR-Site: En sådan analys redovisas i avsnitt 13.7.3.

Biosfärsförhållanden och exponeringsvägar

De framtida biosfärsförhållandena för beräkningar av omgivningskonsekvenser för människa och miljö bör väljas så att de är överensstämmande med det klimattillstånd som antas råda. Om det inte är uppenbart orimligt bör dock dagens biosfärsförhållanden vid slutförvaret och dess omgivning utvärderas, d.v.s. jordbruksmark, skog, våtmark (myr), insjö, hav eller andra relevanta ekosystem. Vidare bör hänsyn tas till landhöjning (- sänkning) och andra förutsägbara förändringar.

Riskanalysen kan innehålla ett begränsat urval av exponeringsvägar, men valet av dessa bör baseras på en analys av den mångfald av mänskligt utnyttjande av miljö- och naturresurser som kan förekomma i Sverige i dag. Hänsyn bör även tas till att enskilda individer kan beröras av kombinationer av exponeringsvägar inom och mellan olika ekosystem.

Hantering i SR-Site: Detta tillvägagångssätt används i SR-Site.

Miljöskydd

Beskrivning av exponeringsvägar enligt ovan bör utföras så att de också inkluderar exponeringsvägar till vissa organismer i de ekosystem som angivits ovan och som bör ingå i riskanalysen. Koncentrationen av radioaktiva ämnen i jord, sediment och vatten bör redovisas där så är relevant för respektive ekosystem.

När biologisk effekt för de identifierade organismerna kan förmodas, bör en värdering göras av vilken konsekvens detta kan ha för de berörda ekosystemen, med syfte att möjliggöra bedömning av betydelse för biologisk mångfald och ett hållbart nyttjande av miljön.

Den analys av konsekvenser för organismer i ”dagens biosfär” som genomförs enligt ovan bör användas för bedömningen av miljömässiga konsekvenser i ett långtidsperspektiv. För antagna klimat där dagens biosfärsförhållanden är uppenbart orimliga, t ex ett kallare klimat med permafrost, är det tillräckligt att göra en översiktlig analys baserad på i dag tillgängliga kunskaper om tillämpliga ekosystem. Ytterligare råd ges i bilaga 2.

Hantering i SR-Site: Tillvägagångssättet som används i SR-Site förklaras i avsnitt 13.2.5.

Redovisning av osäkerheter

Identifiering och bedömning av osäkerheter i t ex platsspecifika och generiska data och modeller bör ske i enlighet med de anvisningar som ges i allmänna råd till Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:21) om säkerhet vid slutförvaring av kärnämnen och kärnavfall. De olika kategorierna av osäkerheter, som anges där, bör utvärderas och redovisas på ett systematiskt sätt och värderas med hänsyn till deras betydelse för riskanalysens resultat. Redovisningen bör också innehålla en motivering av de metoder som valts för att hantera olika typer av osäkerheter, t ex i samband med val av scenarier, modeller och data. Samtliga beräkningssteg med tillhörande osäkerheter bör redovisas.

Oberoende expertbedömningar (peer review) och formaliserade expertutfrågningar (expert panel elicitation) kan, i de fall dataunderlaget är otillräckligt, användas för att stärka trovärdigheten i bedömningar av osäkerheter i frågor av stor betydelse för bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga.

Hantering i SR-Site: Tillvägagångssättet för hantering av osäkerheter beskrivs i avsnitt 2.8.

Till 10–12 §§. Tidsperioder

I föreskrifterna definieras två tidsperioder; dels tiden fram till tusen år efter förslutning, dels tiden därefter.

För längre tidsperioder bör riskanalysens resultat successivt betraktas mer som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet vissa antagna förutsättningar.

Riskanalysens begränsning i tiden

Följande principer bör vara vägledande för riskanalysens begränsning i tiden:

- För ett slutförvar för använt kärnbränsle, eller annat långlivat kärnavfall, bör riskanalysen åtminstone omfatta cirka hundratusen år eller tiden för en glaciationscykel för att belysa rimligt förutsägbara yttre påfrestningar på slutförvaret. Riskanalysen bör därefter utsträckas i tid så länge som den tillför betydelsefull information om möjligheten att förbättra slutförvarets skyddsförmåga, dock längst för en tidsrymd upp till en miljon år.
- För andra slutförvar för kärnavfall, än de som avses i punkt 1, bör riskanalysen åtminstone omfatta tiden fram till dess att de förväntade maximala konsekvenserna avseende risk och miljöpåverkan har inträffat, dock längst för en tidsrymd upp till hundratusen år. Argumenten för de valda begränsningarna av riskanalysen bör redovisas.

Hantering i SR-Site: Analysperioden i SR-Site är en miljon år, se avsnitt 2.4.

Redovisning för de första tusen åren efter förslutning

Tidsangivelsen tusen år bör betraktas som den ungefärliga tidsperiod för vilken en riskanalys kan genomföras med hög trovärdighet för många ingående faktorer, såsom klimat- och biosfärsförhållanden. För denna tidsperiod bör tillgängliga mätdata och annan kunskap om initiala förhållanden användas för en utförlig analys och redovisning av slutförvarets skyddsförmåga och dess omgivnings utveckling.

Förhållanden och processer under slutförvarets tidiga utveckling som kan påverka dess långsiktiga skyddsförmåga bör beskrivas särskilt utförligt. Exempel på sådana förhållanden och processer är återmättnad av slutförvaret, stabilisering av hydrogeologiska och geokemiska förhållanden, termisk utveckling och andra transienta förlopp.

Även biosfärsförhållanden och kända trender i omgivningen till slutförvaret bör beskrivas utförligt, dels för att kunna karaktärisera ”dagens biosfär” (se råden till 5 §), dels för att kunna karaktärisera de förhållanden som kan gälla vid ett tänkt tidigt utsläpp från slutförvaret. Med kända trender avses här t ex landhöjning (-sänkning), eventuella trender i klimatutvecklingen och därmed tillhörande förändringar i utnyttjande av mark och vatten.

Hantering i SR-Site: Tillvägagångssätten ovan används i SR-Site, särskilt i analysen av referensutvecklingen där de första tusen åren efter förslutning ingår i den detaljerade utvärderingen av byggnads- och driftfasen, se avsnitt 10.2, och av den inledande tempererade perioden, se avsnitt 10.3.

Redovisning för mycket långa tider

Upp till hundratusen år.

Redovisningen bör baseras på en kvantitativ riskanalys i enlighet med råden till 5–7 §§. Kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden, koncentrationer i miljön bör användas för att stärka trovärdigheten i beräknade risker.

Tidsangivelsen hundratusen år är ungefärlig och bör väljas så att påverkan av förväntade stora klimatförändringar, t ex en glaciationscykel, på slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser kan illustreras,

Hantering i SR-Site: *Tillvägagångssättet ovan används i SR-Site, särskilt i analysen av den första glaciala cykeln efter förslutning, som en del av referensutvecklingen, se avsnitt 10.4. Se också diskussionen om kravuppfyllelse för denna tidsperiod i avsnitt 15.3.3.*

Bortom hundratusen år

Riskanalysen bör belysa den långsiktiga utvecklingen av slutförvarets barriärfunktioner samt betydelsen av större yttre störningar på slutförvaret som t ex jordskalv och glaciationer. Med hänsyn till de, med tiden, ökande osäkerheterna bör beräkningen av stråldoser till människa och miljö göras på ett förenklat sätt med avseende på klimatutveckling, biosfärsförhållanden och exponeringsvägar. Klimatutvecklingen kan förenklat beskrivas som en upprepning av identiska glaciationscykler.

En strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk mot föreskrifternas kriterium för individrisk inte meningsfull. Bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga bör i stället baseras på ett resonemang kring den beräknade risken tillsammans med flera kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden och koncentrationer i miljön. Om den beräknade risken överstiger föreskrifternas kriterium för individrisk, eller om det finns andra indikationer på betydande störningar av slutförvarets skyddsförmåga, bör de bakomliggande orsakerna till detta redovisas, liksom möjliga åtgärder för att förbättra slutförvarets skyddsförmåga.

Hantering i SR-Site: *Tillvägagångssättet ovan används i SR-Site, särskilt i analysen av perioden efter den första glaciala cykeln och upp till en miljon år, som en del av referensutvecklingen, se avsnitt 10.5. Se också diskussionen om kravuppfyllelse för denna tidsperiod i avsnitt 15.3.3.*

Sammanställning av argument för uppfyllelse av föreskriftens krav

Det bör framgå hur principerna för optimering och bästa möjliga teknik har tillämpats vid lokaliseringen och utformningen av slutförvaret med tillhörande systemkomponenter samt hur kvalitetssäkring använts i arbetet med slutförvaret och tillhörande riskanalyser.

Hantering i SR-Site: *Se ovan och i avsnitt 15.3.5 vad det gäller redovisningen i säkerhetsanalysen av optimering och BAT. Kvalitetssäkring i säkerhetsanalysen beskrivs i avsnitt 2.9.*

Argumenten för ett slutförvarets skyddsförmåga bör värderas och redovisas på ett systematiskt sätt. Redovisningen bör innehålla en logiskt uppbyggd argumentation för slutförvarets skyddsförmåga med information om beräknade risker, osäkerheter i gjorda beräkningar och rimlighet i gjorda antaganden. För att ge en bra förståelse för riskanalysens resultat bör det framgå hur enskilda scenarier bidrar till risken från slutförvaret.

Hantering i SR-Site: *Argumenten för förvarets skyddande förmåga redovisas i diskussionen om kravuppfyllelse i avsnitt 15.3 och i de olika delarna av analysen som ger stöd för slutsatserna i detta avsnitt.*

Bilaga 1. Råd om medelvärdesbildning av risk mellan generationer

För vissa exponeringssituationer ger en årlig risk, beräknad som ett medelvärde av alla tänkbara utfall av en probabilistisk riskberäkning, en otillräcklig bild av hur risken fördelas mellan framtida generationer. Detta gäller särskilt händelser som:

- kan bedömas leda till stråldoser under en begränsad tidsperiod i förhållande till den tidsperiod som riskanalysen omfattar, och
- om de uppkommer, kan bedömas ge upphov till en betingad individrisk som överstiger föreskrifternas kriterium för individrisk, och
- kan bedömas ha en så hög sannolikhet att inträffa över den tidsperiod riskanalysen omfattar att produkten av denna sannolikhet och den beräknade betingade risken är av samma storleksordning som, eller större än, föreskrifternas kriterium för individrisk.

För sådana exponeringssituationer bör en probabilistisk beräkning av risk kompletteras genom att beräkna risken för de individer som antas leva efter det att händelsen har inträffat och som påverkas av dess beräknade maximala konsekvens. Beräkningen kan göras t ex genom att illustrera betydelsen av att händelsen inträffar vid olika tidpunkter ($T_1, T_2 \dots, T_n$), under beaktande av sannolikheten för att händelsen har inträffat under respektive tidsintervall (T_0 till T_1, T_0 till T_2, \dots, T_0 till T_n , där T_0 motsvarar tidpunkten för förslutning av slutförvaret). Resultaten från dessa, eller likvärdiga beräkningar, kan på så sätt förväntas ge en illustration av effekterna av spridning av risk mellan framtida generationer och bör, tillsammans med övriga riskberäkningar, redovisas och utvärderas mot föreskrifternas kriterium för individrisk.

Hantering i SR-Site: Detta tillvägagångssätt används i hanteringen av riskutspädning i avsnitt 13.9.4.

Bilaga 2. Råd om utvärdering av miljöskydd

De organismer som tas med i analysen av miljöpåverkan bör väljas utifrån deras betydelse i ekosystemen, men också utgående från deras skyddsvärde enligt övriga biologiska, ekonomiska eller naturvårdsmässiga kriterier. Med övriga biologiska kriterier avses bland annat genetisk särpräglighet och isolation (t ex i dag kända endemiska arter), med ekonomiska kriterier avses organismernas betydelse för olika slag av näringsfång (t ex jakt och fiske), och med naturvårdsmässiga kriterier om de omfattas av skydd enligt gällande lagstiftning eller lokalt utformade regler. Övriga aspekter, t ex kulturhistoriska, bör också beaktas i identifieringen av sådana organismer.

Bedömning av effekter av joniserande strålning i valda organismer, härrörande från radioaktiva ämnen som kan ha spridits från ett slutförvar, kan göras utifrån den generella vägledning som ges i den Internationella strålskyddskommissionens (ICRP) Publikation 91.²⁷ Tillämpligheten av de kunskaper och databaser som används avseende spridning av radioaktiva ämnen i ekosystem och strålningens effekter på olika organismer bör bedömas och redovisas.

Hantering i SR-Site: Tillvägagångssättet i SR-Site förklaras i avsnitt 13.2.5.

²⁷ A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species, ICRP Publication 91, Annals of the ICRP 33:3, 2003

Ordlista med förkortningar och speciella termer som används i SR-Site

Syftet med ordlistan är att förklara alla akronymer, SKB-specifika termer och tekniska termer som ofta förekommer i denna rapport. Syftet är däremot inte att listan ska omfatta alla tekniska termer i rapporten. Kemiska formler och enheter är i regel inte inkluderade. I listan används bokstaven x, som exempelvis i KFMxxx, som symbol för siffror eller bokstäver i namnet för exempelvis deformationszonen KFM01D.

Det bör påpekas att förklaringarna i vissa fall avviker något från förklaringar av motsvarande termer i mindre specialiserade rapporter. De mer tekniska förklaringarna i listan nedan är anpassade till rapportens innehåll.

1D	Endimensionell.
2D	Tvådimensionell.
3D	Tredimensionell.
3DEC	Ett datorprogram (diskreta element) för analys av berg och bergförstärkningar som används för att simulera hur sprickigt berg reagerar på antingen statiska eller dynamiska laster.
Abaqus	Ett datorprogram (finita element) som används för att analysera homogenisering av buffert, kapselsjunkning samt skjuvlaster på kapselbuffertsystemet som orsakas av jordskalv.
Albedo	Förhållandet mellan intensiteten av det ljus som reflekteras av jorden och intensiteten av det totala inkommande ljuset från solen, dvs andelen av inkommande solljus som reflekteras av jorden tillbaka ut i rymden.
AMF	<i>Assessment Model Flowchart</i> . Modellschema.
APSE	<i>Åspö Pillar Stability Experiment</i> . Experiment i Åspölaboratoriet.
Asha	Namn på ett alternativt återfyllningsmaterial som utreds av SKB.
Avsänkning	Förändring i grundvattennivån orsakad av pumpning i en brunn eller i ett underjordiskt utrymme.
Bankningsplan/sprickor	Sprickor som är orienterade parallellt med den topografiska ytan vid tiden för bergets avlastning och som saknar tecken på hydrotermal omvandling (eng sheet joints).
BAT	<i>Best Available Technique</i> . Bästa möjliga teknik.
BIOCLIM	Ett forskningsprojekt inom EU som bl a omfattar modellering av sekventiella biosfärsystem vid klimatförändringar i samband med deponering av radioaktivt avfall.
Biosfärsobjekt	Ett område i landskapet som potentiellt kan utgöra utströmningsområde för radionuklider från ett framtida förvar (ersätter Landskapsobjekt).
Bränsleelement	En grupp bränslestavar som hanteras som en enhet i reaktorn.
Bränslestav	Zirkoniumlegerat rör som är fyllt med cylindriska bränslekutsar.
Buffert	En av barriärerna i KBS-3-konceptet som består av bentonitlera som omger kapseln.
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i> . Kokvattenreaktor.
CA	<i>Central Area</i> . Centralområdet – del av förvarssystemet.
CCC	<i>Critical Coagulation Concentration</i> . Kritisk koaguleringskoncentration – den salt-/elektrolytkoncentration då energibarriären för aggregation av partiklar närmar sig noll.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> . Kumulativ fördelningsfunktion.
CEC	<i>Cation Exchange Capacity</i> . Katjonbyteskapacitet. Ett mått på ett materials förmåga att binda katjoner via jonbyte (antalet positioner tillgängliga för jonbyte).
CHAN3D	Ett datorprogram för simulering av grundvattenflöde.
Clab	Mellanlagret för använt kärnbränsle i Oskarshamn.
Clink	Clab/inkapslingsanläggning. Den planerade integrerade anläggningen som omfattar Clab och inkapslingsanläggningen.
CMH	<i>Canister Mid-Height</i> . Kapselns mitt i höjded.
Code-Bright	Ett datorprogram för kopplade termiska, hydrauliska och mekaniska beräkningar.
COMP23	Ett datorprogram för beräkningar av radionuklidtransport i närområdet och utsläppet av radionuklider till geosfären (fjärrområdet).
ConnectFlow	Ett datorprogram för simulering av grundvattenflöde.
CPM	<i>Continuous Porous Medium</i> . Kontinuerligt poröst medium – flödeskoncept som används inom hydrogeologisk modellering.

CRF	<i>Corrosion Release Fraction</i> . Den andel av radionuklidinventariet som frigörs genom korrosion av metalldelar i bränsleelementen.
Crown space	Vattenförande utrymme under tunneltaket som bildas genom konsolidering av återfyllningen.
CRR	<i>Corrosion Release Rate</i> . Korrosivt inducerad utsläppshastighet för radionuklider, här detsamma som korrosionshastigheten.
CRT	<i>Canister Retrieval Test</i> . Återtagsförsök i Äspölaboratoriet.
CSH	<i>Calcium Silicate Hydrate</i> . Kalciumsilikathydrat.
D2	Den förvarsutformning och layout som analyseras i SR-Site.
DA	<i>Deposition area</i> . Deponeringsområde.
Darcyflöde	Specifikt grundvattenflöde [L/T] vilket är grundvattenflödet [L^3/T] per ytenhet [L^2].
DarcyTools	Datorprogram för simulering av grundvattenflöde.
D_e	Effektiv diffusionskoefficient.
Deformationszon	En i huvudsak tvådimensionell struktur (en plan struktur under mark med liten tjocklek i förhållande till dess laterala utsträckning) i vilken deformation (spänning) har koncentrerats (eller i fallet med aktiva förkastningar, koncentreras).
Delavrinningsområden	Avrinningsområdet för ett biosfärsobjekt minus avrinningsområdet för uppströms liggande objekt.
Denudation	Vittring och erosion av markytan.
Deponit CA-N	Ett varunamn för den bentonitlera som utgör ett av referensmaterialen för bufferten i SR-Site.
DFN	<i>Discrete Fracture Network</i> . Diskret spricknätverk.
DFuel	Bränsleupplösningshastighet.
DLVO	Derjaguin och Landau, Verwey och Overbeek. Teori som används vid modellering av processer i bentonit.
DOC	<i>Dissolved organic carbon</i> . Upplöst mängd organiskt kol.
DZ	<i>Deformation Zone</i> . Deformationszon.
Ecoligo	Datorprogram för probabilistiska beräkningar av radionuklidtransport.
ECPM	<i>Equivalent Continuous Porous Medium</i> . Ekvivalent kontinuerligt poröst medium – ett flödeskoncept som används i hydrogeologisk modellering.
EDPM	<i>Equivalent Discontinuous Porous Medium</i> . Ekvivalent diskontinuerligt poröst medium – ett flödeskoncept som används i hydrogeologisk modellering.
EDZ	<i>Excavation Damaged Zone</i> . Skadad zon. Den del av berget närmast bergutrymmet som vid berguttag drabbas av irreversibel deformation där skjuvning av befintliga sprickor såväl som utbredning och utveckling av nya sprickor ägt rum.
Eem	Den näst sista mellanistiden (marint isotopstadium 5e) som föregick Weichselistiden.
EFPC	<i>Extended Full Perimeter Intersection Criterion</i> . Sovringskriterium för deponeringspositioner som slår fast att en deponeringsposition inte får skäras av spricka som också fullständigt skär deponeringstunnels omkrets. Dessutom utesluts de deponeringspositioner som skäras av sprickor som även skär fyra eller fler närliggande positioner.
Elasticitetsmodul	Den matematiska beskrivningen av ett objekts eller ett materials benägenhet att deformeras elastiskt (dvs icke permanent) under belastning.
ERICA	Datorprogram som används för att beräkna aktivitetskoncentrationer och radiologiska effekter på biota.
Eustatiska förändringar	Förändringar i havsnivå orsakade av tillförsel eller bortförsl av vattenmassor i världshaven.
Externa förhållanden	Förhållanden utanför förvarssystemet som kan påverka förvarets säkerhetsfunktioner och som beaktas i säkerhetsanalysen.
F	Flödesrelaterat transportmotstånd [T/L], en storhet som integreras längs en flödesväg och som kvantifierar de flödesrelaterade aspekterna av den möjliga retentionen av lösta ämnen som transporteras i ett sprickigt medium.
FARF31	Datorprogram för beräkning av radionuklidtransport i geosfären (fjärrområdet).
FEM	<i>Finite Element Method</i> . Finita elementmetoden – en numerisk metod för att lösa partiella differentialekvationer.
Fennoskandiska skölden	Den prekambrikt exponerade nordvästra delen av Östeuropakratonen.
FEP	<i>Features Events Processes</i> . Egenskaper, händelser och processer.
FFMxx	Sprickdomän i Forsmark.
FGR	<i>Fission Gas Release</i> . Frigörelse av fissionsgaser.
FHA	<i>Future Human Actions</i> . Framtida mänskliga handlingar.
Flyttillstånd	<i>Liquefaction</i> . En process genom vilken ett styvt material (jord) omvandlas till vätska.
Forebulge	En uppbuktning framför exempelvis lasten av en inlandsis på litosfären.
FoU	Forskning och Utveckling.

FPC	<i>Full Perimeter Intersection Criterion.</i> Sovringskriterium för deponeringspositioner som slår fast att en deponeringsposition inte får skäras av spricka som också fullständigt skär deponeringstunnelnns omkrets.
FPI	<i>Full Perimeter Intersection.</i> Sovringskriterier för deponeringspositioner – FPC + EFPC.
FSW	<i>Friction Stir Welding.</i> Friktionsomrörningssvetsning – metod för att svetsa kopparhöljets botten och lock.
Fud	Forskning, Utveckling och Demonstration.
Förvarslayout	Rumsliga layouten för förvarskomponenterna, exempelvis deponeringstunnlar, centralområde och tillfarter.
GIA	<i>Global Isostatic Adjustment.</i> Global isostatisk återhämtning – se isostatiska förändringar.
Glacial	Kall period typiskt associerad med växande och avtagande inlandsisar. En alternativ benämning är istid.
Glacialt klimattillstånd	Regioner som är täckta av inlandsisar.
Glacialt tillstånd	Se glacialt klimattillstånd.
Glaciationscykel	En period på cirka 100 000 år som omfattar både en istid (exempelvis Weichsel) och en mellanistid (exempelvis Holocen).
(variant med) Global uppvärmning	En variant av huvudscenariot där det framtida klimatet och därmed de externa förhållandena antas vara väsentligt påverkade av mänskligt orsakad global uppvärmning, dvs en situation med en förstärkt växthuseffekt.
Glödförlust	Ett mått på mängden flyktiga ämnen (huvudsakligen vatten) i ett prov.
GRIP	<i>European Greenland Ice Core Project.</i>
HCD	<i>Hydraulic Conductor Domain.</i> Hydraulisk domän som representerar de deterministiskt modellerade deformationszonerna.
HM	<i>Heavy Metal.</i> Tungmetall.
HM	HydroMekanisk
Holocen	Nuvarande interglacial (mellanistid) som startade för omkring 11 500 år sedan.
HRD	<i>Hydraulic Rock mass Domain.</i> Hydraulisk domän som representerar de mindre uppspruckna bergvolymerna mellan deformationszonerna.
HSD	<i>Hydraulic Conductor Domain.</i> Hydraulisk domän som representerar regoliten (de kvartära avlagringarna ovanpå berggrunden).
Ibeco RWC	Tänkbart material för återfyllning och fyllning med pelletar (benämnd Deponit CA-N i SR-Can).
ICE3G	En global inlandsisrekonstruktion av W R Peltier.
ICRP	International Commission on Radiological Protection.
IFL	<i>Ice Front Location.</i> Isfrontlägen som ansatts i de hydrogeologiska flödessimuleringarna.
Illitisering	Omvandling av smektit (svällande skiktisilikat) till illit (icke-svällande skiktisilikat).
Initialtillstånd	Barriärernas egenskaper/tillstånd vid tidpunkten då analysen påbörjas, exempelvis vid tiden för deponering av kapsel och installation av buffert och återfyllning och vid förslutning av deponeringstunnlar.
Interglacial	En varm period mellan två glacialer (istider). I SR-Site definieras en interglacial som perioden från när inlandsisen drar sig tillbaka från platsen (tiden för isavsmältningen) till när den första permafrosten bildas.
Interna processer	Processer som sker i förvarssystemet som kan påverka förvarets säkerhetsfunktioner och som beaktas i säkerhetsanalysen.
Interstadial	En varm period under en glacial, ibland med isfria förhållanden.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
IRF	<i>Instant Release Fraction.</i> Den fraktion av radionuklider som antas vara omedelbart tillgänglig för upplösning i vatten som kommer in i en otät kapsel.
Isostatiska förändringar	Vertikala rörelser av jordskorpan orsakade av förändringar i last från exempelvis en inlandsis.
Isostatisk landhöjning	Höjning av den kontinentala jordskorpan som en följd av isavsmältning.
Kanalbildning – berg	Heterogent fördelat flöde längs preferentiella flödesvägar inom sprickor och deformationszoner.
Kanalbildning – buffert	Bildning av hydrauliskt konduktiva kanaler i buffertleran genom erosion.
K_d	Fördelningskoefficient för sorption [L^3/M]
K_{eff}	Effektiv neutronmultiplikationsfaktor. Enligt konstruktionsförutsättningarna som relaterar till kriticitet ska denna faktor med osäkerheter inräknat vara lägre än 0,95 vid hantering och deponering av kapslar.
KFMxx	Kärnbränsle i Forsmark.
Klimattillstånd	En klimatbestämd miljö, i vilken en uppsättning karakteristiska processer som har betydelse för förvarssäkerheten förekommer.
Kolloider	Mycket små partiklar med en ungefärlig storlek av 10 till 10 000 Ångström dispergerade i ett kontinuerligt medium som inte lätt sedimenterar eller filtreras.

Konstruktionsförutsättningar	Krav, vilka normalt uttrycks som specifikationer av vilka mekaniska laster barriärerna måste motstå, restriktioner kopplade till barriärmaterialens sammansättning eller acceptanskriterier för de olika undermarksutrymmena.
Konstruktionsstyrande fall	Ett beräkningsfall formulerat utifrån ett scenario som har visats vara av särskild betydelse i riskhänseende. Resultatet från analysen av ett konstruktionsstyrande fall används för att formulera krav som barriärerna måste uppfylla.
Koppargöt	Ett gjutet kopparstycke med en utformning som lämpar sig för vidare bearbetning.
Kraton	En stor andel av en kontinentalplatta som varit relativt stabil sedan den prekambrika eran och som omfattar både sköldar och plattformar.
Kvartär	Den kvartära perioden (från 1,6 miljoner år sedan till nutid) är den senaste perioden i den Kenozoiska eran i den geologiska tidsskalan. Kvartär omfattar två geologiska epoker: Pleistocen och Holocen.
Landskapsmodell	En modell på landskapsnivå som beskriver den långsiktiga utvecklingen av landskapet. Modellen används för att beskriva de tidsberoende egenskaper hos biosfärsobjekten som utgör ingångsparametrar i radionuklidmodellen.
Lasgit	<i>Large Scale Gas Injection Test</i> . Experiment i Äspölaboratoriet.
LDF	<i>Landscape Dose conversion Factor</i> . En radionuklidspecifik dosomvandlingsfaktor, uttryckt i Sv/år per Bq/år, som relaterar dos till ett utsläpp av radionuklider av 1 Bq/år.
LGM	<i>Last Glacial Maximum</i> . Det senaste glaciala maximumet.
Litosfär	Den fasta yttre delen av jorden som har en medeltjocklek av ungefär 75 km och som omfattar jordskorpan och den fasta delen av manteln ovanför astenosfären.
Lågt pH material	Cementmaterial som i kontakt med vatten inte ökar vattnets pH till värden över 11.
Ma	Megaanni, miljoner år
MARFA	<i>Migration Analysis for Radionuclides in the Far Field</i> . Ett datorprogram för beräkning av radionuklidtransport i fjärrområdet.
Matlab	Numerisk beräkningsmiljö och fjärde generationens programmeringsspråk.
MDZ	Mindre deformationszon.
MIKE SHE	Ett datorprogram för modellering av ythydrogeologi.
Milos återfyllning	Bentonit som motsvarar materialet för referensåterfyllningen.
Montmorillonit	En svällande fyllosilikat som är huvudkomponenten i bentonit.
Morän	Huvudsakligen osorterat och oskiktat material som i allmänhet inte är konsoliderat och som har avsatts direkt av en inlandsis eller en glaciär.
MOX bränsle	<i>Mixed Oxide fuel</i> . Blandning av plutonium och utarmat uran.
MT	<i>Main and Transport tunnel</i> . Stam- och transporttunnel i förvaret.
Naturliga analogier	Ett naturligt system som studeras med syfte att undersöka processer som har pågått under mycket längre tider än de som normalt kan studeras i laboratoriet eller i fältförsök.
NWMO	Nuclear Waste Management Organization, Kanada.
Observationsmetoden	En riskbaserad metod för undermarks konstruktion och bygge som tillämpar adaptiv styrning och nyttjar avancerade tekniker för monitorering och mätning.
OFF	Oförstörande provning.
Pandora	SKB:s och Posivas modelleringsverktyg för dosberäkningar i biosfären.
PDZ	<i>Possible Deformation Zone</i> . Möjlig deformationszon
Peneplan	En flack horisontell urbergsyta som representerar slutstadiet för denudation av ytan under perioder med långvarig tektonisk stabilitet.
Periglacialt klimattillstånd	Regioner med permafrost.
PHREEQC	Ett datorprogram för beräkning av kemisk speciering, tankreaktioner, endimensionell transport samt för geokemisk inversmodellering.
Platsbeskrivning, platsbeskrivande modell	En modell av platsen som ger beskrivningar av de nuvarande förhållandena i geosfären och biosfären, se SDM.
Pleistocen	Den närmast föregående geologiska epoken som tillsammans med den pågående epoken Holocen utgör den kvartära perioden.
Posiva	Posiva Oy, organisation i Finland som ansvarar för slutförvaring av använt kärnbränsle.
Prekambrium	Tiden i jordens historia innan början av kambrium.
PWR	<i>Pressurised Water Reactor</i> . Tryckvattenreaktor.
(Utsläppsvägarna) Q1, Q2 och Q3	Utsläppsvägar för radionuklider i närområdesmodellen för radionuklidtransport. Utsläppsväg Q1 representerar transport in i en spricka som skär deponeringshålet. Utsläppsväg Q2 representerar transport in i den skadade zonen (EDZ) under sulan i deponeringstunneln. Utsläppsväg Q3 representerar transport in i den återfyllda deponeringstunneln och vidare in i en spricka som skär deponeringstunneln.
Q_{eq}	Ekvivalent flöde som används exempelvis i COMP23.
Radionuklidmodell	Modell för beräkning av radionuklidinventarier i olika kompartiment av biosfären, radionuklidflöden mellan kompartiment och radionuklidkoncentrationer i miljön (jord, vatten, luft och biota). Exponering till människa för att beräkna LDF ingår i modellen medan exponering till icke-mänsklig biota beräknas separat.

Randvillkor	En uppsättning specificerade villkor som gäller för lösningen av en uppsättning differentialekvationer vid randen av dess domän.
Regolit	Används i denna rapport för alla avlagringar ovanpå berggrunden och omfattar kvartära avlagringar, jord, sediment, förna, ytan på berghällar, och av människan tillverkade strukturer.
Respektavstånd	Det vinkelräta avståndet från en deformationszon som definierar en volym inom vilken deponering av kapslar är förbjuden på grund av förutsedda framtida seismiska effekter för kapselns integritet.
RFMxxx	Bergdomän i Forsmark.
RHB 70	Nationellt system för angivande av höjd över havet.
Ridge push	Tektoniska rörelser hos kontinentalplattorna och därmed förknippade horisontella rörelser i jordskorpan utgående från mittatlantiska ryggen.
Riskkriterium	Ett myndighetskrav som en beräknad risk jämförs med.
Riskutspädning	Den till synes paradoxala situationen när mindre kunskap om exempelvis skadliga fenomen leder till en lägre beräknad individrisk.
RN	Radionuklid.
Saale	Den näst senaste glacialen (istiden) som föregick Eem interglacialen (mellanistiden).
SAFE	Säkerhetsanalys för förvaret för lågaktivt avfall (SFR) vis Forsmark.
SCC	<i>Stress Corrosion Cracking</i> . Uppspräckning orsakad av spänningskorrosion.
SDM	<i>Site Descriptive Model</i> . Platsbeskrivande modell. En syntes av den tilltänkta förvarplatsens geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, bergets transportegenskaper och ytsystemets egenskaper.
SDM-Site	Kortnamn för den platsbeskrivande modellen baserad på de avslutade platsundersökningarna från ytan.
SFR	Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall vid Forsmark.
Silica sol	En suspension av silikatpartiklar i nanostorlek som kan omvandlas till gel genom att tillsätta en koncentrerad saltlösning. Silica sol kan användas som ett injekteringsmaterial som ger nära neutralt pH.
SKI	Statens Kärnkraftinspektion. SKI och SSI slogs samman och bildade Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) den 1 juli 2008.
"Skin" effekt	En störning i flödestillståndet i gränsskiktet mellan sprickigt berg och tunneln. Störningen beskrivs med den så kallade "skin" faktorn som kan vara positiv eller negativ beroende på om permeabiliteten i gränsskiktet blir mindre (positiv "skin" faktor) eller högre (negativ "skin" faktor) jämfört med bergets ursprungliga permeabilitet.
SMOW	<i>Standard Mean Ocean Water</i> . En vattenstandard som definierar isotopsammansättningen för vatten.
Sorption	I denna rapport används termen för alla processer som innebär att ett löst ämne hålls kvar på en fast yta.
Spjälkning	Skador på bergytan i form av flak som släpper från bergväggen.
SR 97	Säkerhetsanalysen som föregick SR-Can.
SRB	Sulfatreducerande bakterier.
SR-Can	Den preliminära säkerhetsanalysen för det planerade förvaret för använt kärnbränsle som utgavs 2006.
SSI	Statens Strålskyddsinstitut. SKI och SSI slogs samman och bildade Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) den 1 juli 2008.
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten. SKI och SSI slogs samman och bildade Strålsäkerhetsmyndigheten den 1 juli 2008.
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter.
STUK	Finska Strålsäkerhetscentralen.
Säkerhetsfunktion	Ett sätt på vilket en förvarskomponent bidrar till säkerheten.
Säkerhetsfunktionsindikator	En mätbar eller beräkningsbar egenskap hos en förvarskomponent som indikerar i vilken omfattning säkerhetsfunktionen upprätthålls.
Säkerhetsfunktionsindikatorkriterium	En kvantitativ gräns som motsvarande säkerhetsfunktionsindikator måste uppfylla för att säkerhetsfunktionen ska uppnås.
Talik	Partier med ofrusen mark inom ett område med permafrost som orsakas av en lokal anomali i termiska, hydrologiska, hydrogeologiska eller hydrokemiska förhållanden.
TASQ-tunnel	En tunnel i Äspölaboratoriet.
TASS-tunnel	En tunnel i Äspölaboratoriet.
TDS	<i>Total Dissolved Solids</i> . Total mängd löst fast material.
Tektonisk lins	En linsformad styv bergkropp som omges av deformationszoner.
Tempererat klimatillstånd	Regioner utan permafrost eller inlandsis som i vid mening domineras av ett tempererat klimat. Inom det tempererade klimatillståndet kan en plats också vid vissa tidpunkter täckas av hav eller av en sjö uppdämd av inlandsisen.
Termiskt inducerad spjälkning	Spjälkning inducerad av spänningar orsakade av den termiska lasten från värmen som avges från kapseln.

Tertiär	Geologisk period från 65 miljoner till 2,6 miljoner år sedan.
T_{Failure}	Tiden för kapselbrott.
THM	Termo-Hydro-Mekanisk.
TIC	<i>Total Inorganic Carbon</i> . Total mängd oorganiskt kol.
t_w	Advektiv gångtid.
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i> . Enaxlig tryckhållfasthet.
Uppträngning av salt grundvatten	En höjning av gränsytan (upconing) mellan färskt vatten och salt vatten på grund av avsänkning av grundvattennivån, som orsakas av exempelvis pumpning i en brunn eller i ett undermarksutrymme. I SR-Site används detta fenomen också för att beskriva de omfattande förändringarna i läget för denna gränsyta som sker i samband med framryckning och tillbakadragande av en inlandsis.
Utbränning	Energi som utvunnits ur bränslet genom fission; anges normalt i MWd/kgU.
VS	<i>Ventilation Shaft</i> . Ventilationsschakt i förvaret.
Weichsel	Namnet för den senaste glacialen (istiden) i nordöstra Europa.
Weichselglaciationscykeln	Den senaste glaciationscykeln som definieras omfatta Weichselglacialperioden och interglacialperioden Holocen.
XRD	<i>X-ray diffraction</i> . Röntgendiffraktion.
ZFMzz	Flack zon i Forsmark
ZFMXXXxxxx	Brant stupande zon i Forsmark (XXX ersätter bokstäver för geografisk riktning på engelska, exempelvis ENE)
Zircaloy	Benämning på en grupp zirkoniumrika legeringar som vanligtvis används som kapslingsmaterial för bränslestavarna.
Äspölaboratoriet	SKB:s underjordiska berglaboratorium på Äspö, norr om Oskarshamn.
Återfyllning	Det material som används som fyllning i deponeringstunnlarna.
$\delta^{18}\text{O}$	Beteckning som används för att redovisa isotopförhållanden och som ofta används som indirekt mått på temperaturen i atmosfären eller i världshaven.

