Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

Huvudrapport från projekt SR-Site

Del I

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

ISSN 1404-0344

Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

Huvudrapport från projekt SR-Site

Del I

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2011

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Förord

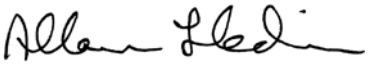
Detta dokument utgör huvudrapporten till SR-Site, en analys av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-förvar i Forsmark. Rapporten är bilaga till SKB:s ansökningar om ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark.

Undertecknad har varit huvudredaktör för rapporten och även ansvarig för metodikutvecklingen i samarbete med främst Johan Andersson, JA Streamflow och Kristina Skagius, Kemakta Konsult AB. Kristina Skagius har sammanställt beskrivningen av Forsmark i kapitel 4 och är ansvarig för utvecklingen av FEP-databasen för SR-Site samt för hanteringen av frågor som är relaterade till framtida mänskliga handlingar. Johan Andersson har fungerat som samordnare mellan förvarsprojekteringen och säkerhetsanalysprojekten. Han har även koordinerat beskrivningen av förvarets initialtillstånd i kapitel 5, referensutvecklingen i kapitel 10 samt återkopplingen till design och platsrelaterade frågor i kapitel 15.

Följande personer (SKB-anställda om inte annat anges) har haft huvudansvaret för specifika ämnesområden vid analysen och författat motsvarande texter i denna rapport: Kastriot Spahiu och Lena Zetterström Evins (bränsle); Christina Lilja (kapsel); Patrik Sellin (buffert, återfyllning och förslutning); Jan-Olof Selroos och Sven Follin, SF Geologic AB (hydrogeologi); Jan-Olof Selroos och Scott Painter, LANL, USA (transport i geosfären); Raymond Munier och Johan Andersson JA Streamflow AB (bergmekanik); Ignasi Puigdomenech och Birgitta Kalinowski (geokemi); Tobias Lindborg, Ulrik Kautsky och Eva Andersson, Studsvik Nuclear AB (biosfärsfrågor); Jens-Ove Näslund (klimatfrågor); Lena Zetterström Evins (naturliga analogier) samt Maria Lindgren, Kemakta Konsult AB, Christina Greis och undertecknad (integrerad modellering av radionuklidtransport). Martin Löfgren, Niressa AB har i samarbete med Fredrik Vahlund varit ansvarig för sammanställningen av indata till analysen.

Rapporten har granskats av SKB:s externa internationella expertgrupp (Sierg), som även granskat platsundersökningen. Vid granskningen utökades den ursprungliga gruppen med några experter på säkerhetsanalysmetodik och bestod av följande medlemmar: Per-Eric Ahlström, SKB (ordförande); Lucy Bailey, NDA, Storbritannien; Jordi Bruno Amphos[21], Spanien; John Cosgrove, Imperial College, Storbritannien, Tom Doe, Golder Ass Inc, USA; Alan Hooper, Alan Hooper Consulting Ltd, Storbritannien; John Hudson, Rock Engineering Consultants, Storbritannien; Jürg Schneider, Nagra, Schweiz, Lars Söderberg, SKB; Mike Thorne, Mike Thorne and Associates Ltd, Storbritannien och Timo Äikes, Posiva Oy, Finland. Rapporten har också granskats av Olle Olsson, SKB.

Stockholm, mars 2011



Allan Hedin
Projektledare SR-Site

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 Analyser 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 landskapsspecifika 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 Resulterande 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 korrosionsscenariot 686
13.5.8 Alternativa säkerhetsindikatorer för korrosionsscenariot 687
13.5.9 Sammanfattning av resultat från beräkningsfall för korrosionsscenariot 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 korrosionsscenariot 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 borrningsfallet 751
14.2.6 Utvärdering av fallet med berguttag 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 Analyser 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 – kopparns tjocklek 828
15.5.5 Kapselmaterial och övrigt 828
15.5.6 Buffertmaterialets 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 deponeringshål – mekanisk stabilitet 833
15.5.13 Val av deponeringshål – hydrologiska och transportrelaterade förhållanden 834
15.5.14 Hydrauliska egenskaper i deponeringshålens 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 Ytnära 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

Sammanfattning

Den huvudsakliga slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site är att ett KBS-3-förvar som uppfyller kraven på långsiktig säkerhet kan byggas i Forsmark. Slutsatsen kan dras eftersom de gynnsamma egenskaperna hos förvarsplatsen i Forsmark säkerställer att KBS-3-förvarets barriärer är långsiktigt hållbara. Framför allt är kopparkapslarna och deras segjärnsinsatser tillräckligt motståndskraftiga mot de mekaniska och kemiska påfrestningar de kan komma att utsättas för i förvarsmiljön.

Slutsatsen baseras på:

- KBS-3-förvarets säkerhetsfilosofi som bygger på i) en geologisk miljö där de egenskaper som är viktiga för den långsiktiga säkerheten – dvs mekanisk stabilitet, låga flödeshastigheter 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 långsiktig säkerhet.
- Kunskapen om fenomen som påverkar den långsiktiga säkerheten, som har inhämtats genom decenniers forskningsinsatser inom SKB och genom internationella samarbeten, vilket har lett till en välutvecklad kunskapsbas för säkerhetsanalysen.
- Kunskapen om platsens egenskaper som har uppnåtts genom åtskilliga års ytbaserade undersökningar 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 som uppfyller specifikationerna kan tillverkas och kvalitetssäkras.

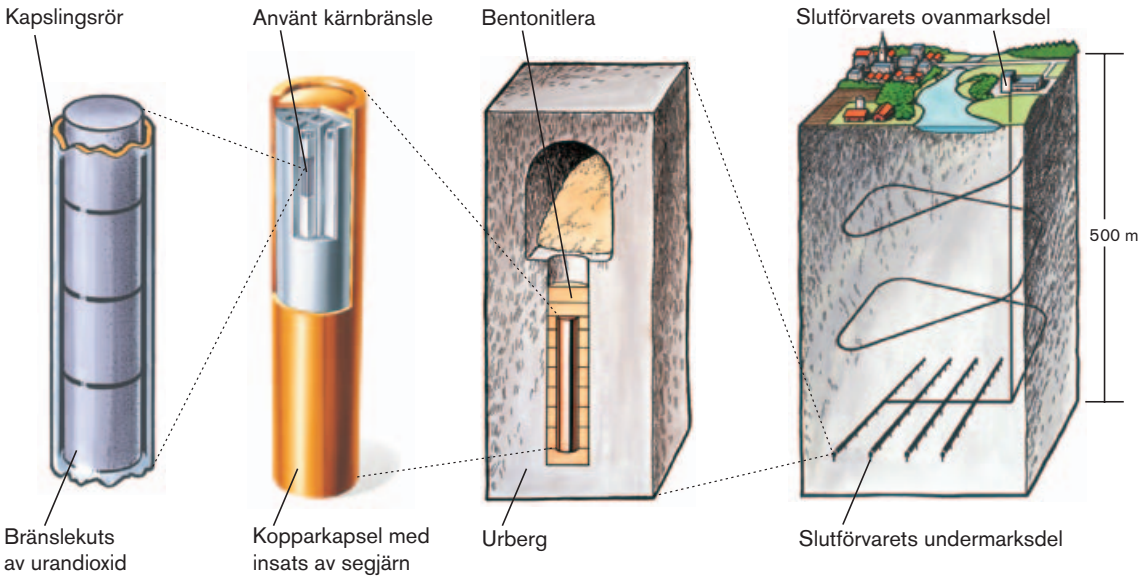
De detaljerade analyserna visar att kapselskador är sällsynta i ett tidsperspektiv på en miljon år. Även med flera pessimistiska antaganden om skadliga fenomen som påverkar bufferten och kapseln, är kapselskador så sällsynta att deras försiktigt modellerade radiologiska konsekvenser blir betydligt under en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen.

S1 Syfte och allmänna förutsättningar

Syftet med säkerhetsanalysen SR-Site är att undersöka om ett säkert förvar för använt kärnbränsle av KBS-3-typ kan uppföras i Forsmark i Östhammars kommun i Sverige. Platsen i Forsmark har valts baserat på resultat av flera års undersökningar från ytan av förhållanden på djupet i Forsmark och i Laxemar i Oskarshamns kommun. Valet av plats motiveras inte i SR-Site-rapporten utan i andra bilagor till SKB:s tillståndsansökningar.

SR-Site-rapporten är en viktig del av SKB:s tillståndsansökningar för att uppföra och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun. Rapportens syfte i ansökningarna är att visa att ett förvar i Forsmark är säkert efter förslutning.

Flera decenniers forskning och utveckling har lett till att SKB föreslår KBS-3-metoden som det slutliga steget i hanteringen av det använda kärnbränslet. I metoden används kopparkapslar med en segjärnsinsats för att innesluta det använda kärnbränslet. Kapslarna omges av bentonitlera och deponeras på ett djup av ungefär 500 m i grundvattenmättat granitiskt berg, se figur S-1. Syftet med KBS-3-förvaret är att isolera kärnavfallet från människa och miljö under mycket långa tidsrymder. Det nuvarande svenska kärnkraftprogrammet (där man planerar att 2045 avveckla den sista av de tio reaktorer som för närvarande är i drift) bedöms ge upphov till omkring 12 000 ton använt kärnbränsle, vilket motsvarar ungefär 6 000 kapslar i ett KBS-3-förvar.



Figur S-1. *KBS-3-metoden för förvaring av använt kärnbränsle.*

Huvudsyftena med säkerhetsanalysprojektet SR-Site är:

- Att utvärdera säkerheten, som den definieras i gällande svensk lagstiftning, för det föreslagna förvaret i Forsmark.
- Att ge återkoppling till arbetet med att utforma förvaret, till SKB:s Fud-program, till kommande detaljerade undersökningar av platsen och till framtida säkerhetsanalyser.

Ett viktigt steg på vägen mot denna rapport var säkerhetsanalysrapporten SR-Can, som publicerades i november 2006. SR-Can-rapporten granskades av svenska säkerhetsmyndigheter med stöd av internationella experter. Resultatet av granskningen har beaktats i SR-Site-analysen.

Föreskrifter

Samhällets krav på säkerhet efter förslutning för slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall uttrycks i myndighetsföreskrifter. Två detaljerade föreskrifter har utfärdats av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) med stöd av kärntekniklagen respektive strålskyddslagen:

- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” (SSMFS 2008:21).
- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSMFS 2008:37).

Dessa två dokument återges i sin helhet i bilaga A till denna rapport. Det sätt som kraven hanteras på i SR-Site-rapporten anges i bilagan genom att hänvisningar till relevanta avsnitt i rapporten har lagts in i bilagans föreskriftstexter.

Det övergripande acceptanskriteriet, som anges i SSMFS 2008:37, rör skyddet av människors hälsa och fastställer att ”den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken”. ”Skadeverkningar” avser cancer och ärftliga effekter. Riskgränsen motsvarar en gräns för effektivdos på omkring $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Sv/år. Detta motsvarar i sin tur omkring en procent av effektivdosen från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige. I föreskriften SSMFS 2008:21 krävs det även att utvecklingen av biosfären, geosfären och förvaret beskrivs för utvalda scenarier. Dessutom måste förvarets miljöpåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, utvärderas med avseende på defekter hos de tekniska barriärerna och andra identifierade osäkerheter.

Tidsperioden som utvärderas i analysen – en miljon år

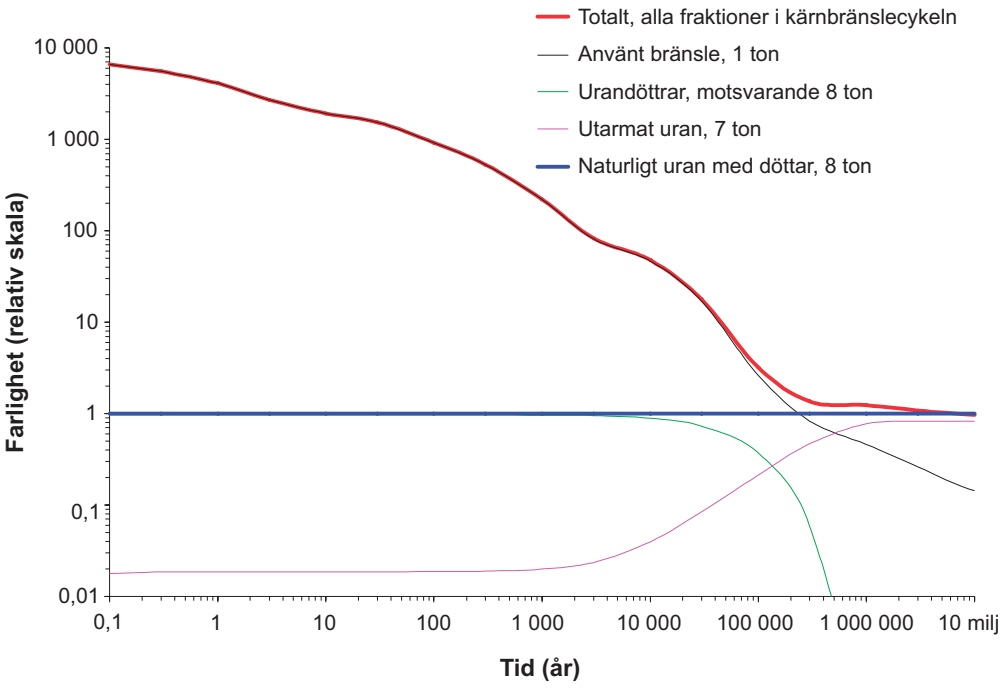
I de allmänna råden till SSMFS 2008:37 anges det att den tidsperiod som ska täckas i en säkerhetsanalys av ett slutförvar för använt kärnbränsle ska sträcka sig en miljon år framåt i tiden efter förslutning. En detaljerad riskanalys krävs för den första perioden på tusen år efter förslutning. För tidsperioden fram till ungefär 100 000 år krävs att redogörelsen baseras på en kvantitativ riskanalys.

För perioden bortom 100 000 år efter förslutning anges det i de allmänna råden att en strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk i förhållande till föreskrifternas kriterium för individrisk inte är meningsfull. Det ska i stället visas att utsläpp från både tekniska och geologiska barriärer begränsas och fördröjs så långt som det rimligen är möjligt genom att använda den beräknade risken som en av flera indikatorer.

Avfallets farlighet

Efter ungefär 100 000 år är radiotoxiciteten hos det använda kärnbränslet jämförbar med radiotoxiciteten för den naturliga uranmalm som en gång använts för att framställa bränslet. Även summan av toxiciteten från alla fraktioner som uppstått i kärnbränslecykeln (de dotternuklider som separerats från uranet före anrikningen, det utarmade uranet som uppstår vid anrikningsprocessen och det använda bränslet) är jämförbar med toxiciteten hos den använda uranmalmen efter 100 000 år, se figur S-2.

Noterbart är även att de inledningsvis mycket höga doserna från en tänkt exponering för direkt, extern bestrålning från det använda bränslet minskar väsentligt efter några tusen år. På lång sikt kommer dessa doshastigheter emellertid att vara kvar på nivåer som kräver avskärmning från människor under mycket lång tid, eftersom den långsiktiga nivån av direktstrålning bestäms av dotternuklider till U-238.



Figur S-2. *Radiotoxicitet vid intag via födan av uran och urandöttrar i malm (blå kurva) och av summan av alla fraktioner som uppkommer när samma mängd uran används i kärnbränslecykeln (röd kurva). Tiden avser tiden efter reaktordrift. De olika fraktionerna utgör det använda kärnbränslet (38 MWd termisk energi/kg U av typ SVEA 64 BWR), det utarmade uranet och urandöttrarna som separeras vid isotopanrikning.*

Den stegvisa utvecklingen av förvarsprogrammet

Utformningen och säkerhetsvärderingen av ett förvarskoncept för geologisk avfallsdeponering, som exempelvis KBS-3-systemet, utvecklas stegvis. En säkerhetsvärdering i ett skede ger återkoppling till utvecklingen av förvarsutformningen. Den utvecklade utformningen utvärderas sedan i en efterföljande säkerhetsanalys, som ger en förfinad återkoppling till den fortsatta utvecklingen av utformningen etc. På samma sätt utvecklas kunskapen om naturliga processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten i ett forskningsprogram. De resultat som kommer fram utvärderas i ett iterativt samspel med säkerhetsanalysprojekt. En annan viktig aspekt av utvecklingsarbetets iterativa karaktär är de externa granskningar av säkerhetsanalyserna, vilka genomförs av myndigheter och internationella experter.

SKB har bedrivit forskning och utveckling om KBS-3-systemet under tre årtionden. Både förvarsutformningen och det vetenskapliga kunnandet är väl utvecklade, vilket illustreras av att inga större förändringar av utformningen har skett under senare år och av att den identifierade uppsättningen av processer som har betydelse för långsiktig säkerhet inte förändras. Även kunnandet om dessa processer är väl utvecklat.

SKB har tagit fram en tekniskt genomförbar referensutformning med layout för KBS-3-förvaret och har visat att denna överensstämmer med de framtagna konstruktionsförutsättningarna, se nedan. Den tekniska utvecklingen kommer att fortsätta. Detaljerade utformningar som är anpassade för en industriell process som uppfyller krav på kvalitet, kostnad och effektivitet återstår att ta fram. Layouten måste anpassas efter de lokala förhållanden som påträffas när förvaret byggs på djupet. Dessa potentiellt mer optimala lösningar ska resultera i en säkerhet på minst samma nivå som för den aktuella referensutformning som analyseras i SR-Site. Eftersom SR-Site utgör en viktig grund för en väsentlig milstolpe i förvarsprogrammet är det viktigt att visa i) att utformningen är väl utvecklad med avseende på dess viktigaste säkerhetsrelaterade funktioner och ii) att det finns minst en tillgänglig och fullgod lösning för de delar av systemet som bidrar till säkerheten på ett mer perifert sätt.

Den aktuella utformningen kännetecknas även av att de välutvecklade delarna specificeras i detalj. Återkopplingen till utvecklingen av utformningen från den säkerhetsanalys som föregick SR-Site (SR-Can) ges i form av detaljerade konstruktionsförutsättningar. Dessa ger förutsättningarna för framtagandet av specifikationer för referensutformningen och har bidragit till utvärderingen av utformningens lämplighet med avseende på långsiktig säkerhet.

S2 Att uppnå säkerhet i praktiken – platsens egenskaper samt utformningen och uppförandet av förvaret

S2.1 Säkerhetsprinciper

Sedan arbetet med ett svenskt slutförvar inleddes i slutet av 1970-talet har SKB fastlagt ett antal principer för slutförvarets utformning. Principerna kan sägas utgöra säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-metoden och sammanfattas nedan.

- Genom att förlägga förvaret djupt nere i en långsiktigt stabil geologisk miljö isoleras avfallet från människor och miljön nära markytan. Detta innebär att förvaret inte påverkas på något avgörande sätt vare sig av samhällsförändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på markytan.
- Genom att förlägga förvaret till en plats där berget inte förväntas bli av ekonomiskt intresse för framtida generationer minskar risken för mänskligt intrång.
- Det använda kärnbränslet omgärdas av flera tekniska och naturliga barriärer.
- Barriärernas primära säkerhetsfunktion är att innesluta bränslet i en kapsel.
- Om inneslutningen skulle brytas är barriärernas sekundära säkerhetsfunktion att fördröja ett eventuellt utsläpp från förvaret.
- De tekniska barriärerna 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 skadlig effekt på barriärernas långsiktiga egenskaper undviks.

- Förvaret ska utformas och byggas så att strålningsinducerade processer som kan ha skadlig effekt på de tekniska barriärernas eller bergets långsiktiga egenskaper undviks.
- Barriärerna ska vara passiva, dvs de ska fungera utan mänskliga ingrepp och utan aktiv tillförsel av material eller energi.

Tillsammans med flera andra faktorer, som de geologiska förhållandena i Sverige och kraven på att förvaret måste vara tekniskt möjligt att bygga, har dessa principer lett till utvecklingen av KBS-3-systemet för slutförvaring av använt kärnbränsle.

I praktiken uppnås långsiktig säkerhet genom att välja en plats med gynnsamma egenskaper och genom att utforma och bygga ett förvar som uppfyller krav relaterade till långsiktig säkerhet. Dagens förhållanden på platsen samt utformningen och layouten av KBS-3-förvaret i Forsmark utgör säkerhetsanalysens initialtillstånd. Detta är också de aspekter som styrs av verksamhetsutövaren, genom valet av plats och genom utformningen och anpassningen av förvaret till platsen.

S2.2 Förvarsplatsen i Forsmark

Den valda förvarsplatsen i Forsmark ligger i norra Uppland i Östhammars kommun, omkring 120 km norr om Stockholm. Forsmarksområdet består av kristallin berggrund som tillhör den fennoskandiska skölden och bildades för 1,85 till 1,89 miljarder år sedan. Tektoniska linser, i vilka berggrunden är förhållandevis opåverkad av plastisk deformation, omgärdas av starkt deformerade plastiska bälten. Kandidatområdet ligger i den nordvästligaste delen av en av dessa tektoniska linser. Linsen sträcker sig från nordväst om Forsmarks kärnkraftverk i sydostlig riktning mot området kring Öregrund (se figur S-3).

Tre huvudkategorier av deformationszoner med distinkta riktningar har identifierats. Utöver vertikala och brant stupande zoner finns det zoner som sluttar svagt mot sydost och syd. Dessa flacka zoner är vanligare i den sydöstra delen av kandidatvolymen och har högre hydraulisk transmissivitet än de vertikala och brant stupande deformationszoner som finns på platsen. I den nordvästra delen av kandidatvolymen, vilket är den volym som är tilltänkt för förvaret, är förekomsten av öppna och delvis öppna sprickor mycket låg på större djup än ungefär 300 m jämfört med vad som observeras i den övre delen av berggrunden. Utöver detta är bergspänningarna relativt höga jämfört med genomsnittliga värden för den svenska berggrunden. De översta 100 till 150 metrarna av berggrunden ovanför den tilltänkta volymen innehåller många horisontella högtransmissiva sprickor och har god hydraulisk kontakt över långa sträckor, medan det djupt liggande berget har mycket låg genomsläpplighet med få transmissiva sprickor. På förvarsdjup (cirka 470 m) är medelavståndet mellan de transmissiva sprickorna större än 100 m.

Grundvatten i de översta 100 till 200 metrarna av berggrunden uppvisar stor kemisk variation, med kloridkoncentrationer i intervallet 200 till 5 000 mg/l. Detta tyder på inverkan från både bräckt havsvatten och nederbörd. På djup mellan 200 och 800 m håller sig salthalten tämligen konstant (5 000–6 000 mg/l). Vattensammansättningen tyder på rester av vatten från Littorinahavet, som täckte Forsmark från 9 500 år tillbaka i tiden till 5 000 år tillbaka i tiden. På djup mellan 800 och 1 000 m ökar salthalten till högre värden.

Data från platsundersökningen för säkerhetsanalysen

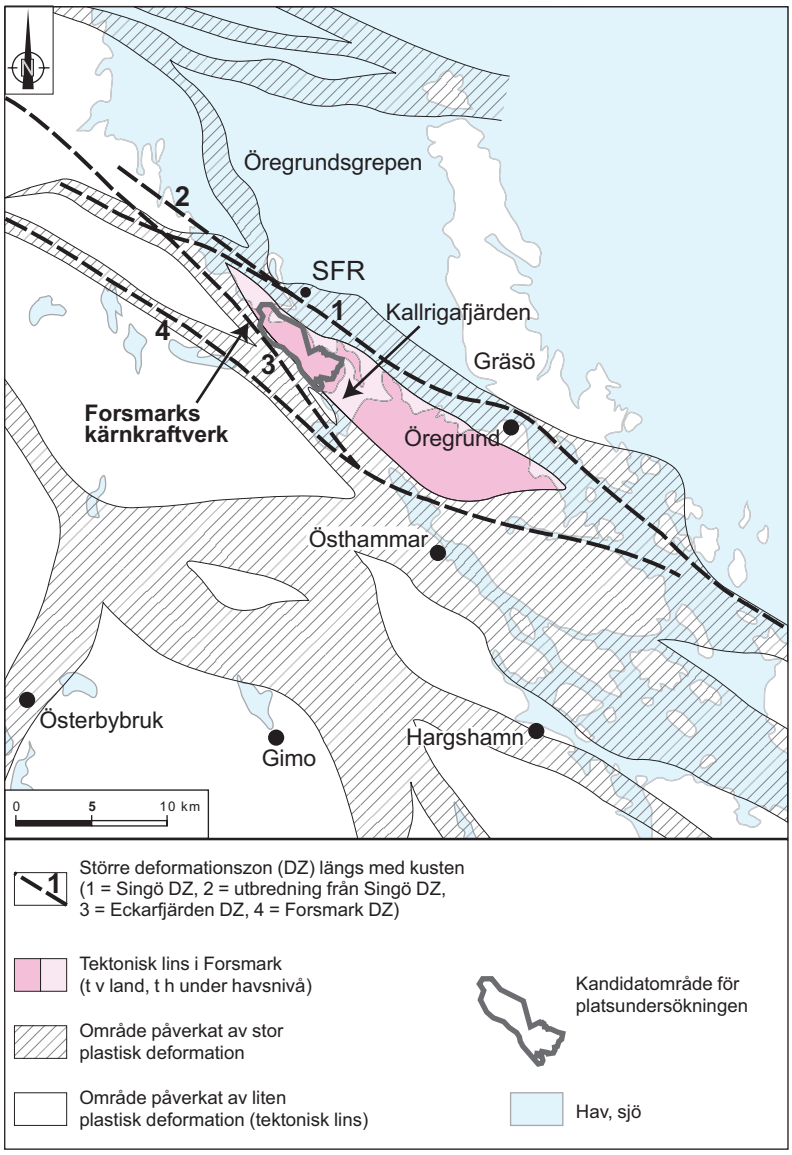
Platsundersökningen i Forsmark, inklusive bearbetning av insamlade data och platsmodellering, genomfördes mellan 2002 och 2008. Informationsinsamlingen och överföringen av information från platsundersökningarna i Forsmark till säkerhetsanalysarbetet har skett i flera steg.

- Fältdata från olika undersökningsaktiviteter, exempelvis flyg- och markgeofysiska studier från ytan, samt olika tester i de hål som borrats, har insamlats och efter kvalitetskontroll lagrats i SKB:s databaser.
- Fältdata har tolkats och utvärderats i en tvärvetenskaplig platsbeskrivande modell (Site Descriptive Model, SDM) som är en syntes av geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper hos berggrunden och ytsystemets egenskaper, se figur S-4. **Platsbeskrivning Forsmark** (SDM) ger en beskrivning av kunskapen om platsens egenskaper

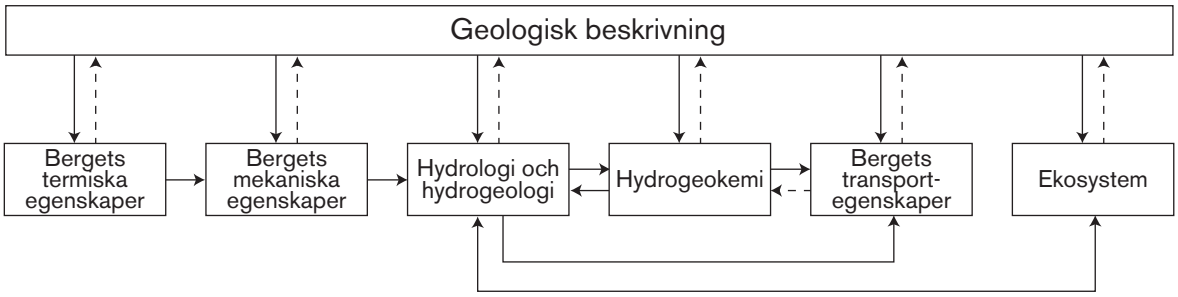
inom de olika ämnesområdena. Den omfattar även en utvärdering av osäkerheten i dessa beskrivningar. **Platsbeskrivning Forsmark**, vilken baseras på de genomförda undersökningarna från ytan, redovisas i en huvudrapport och i flera stödjande underlagsrapporter.

- Platsbeskrivningen med tillhörande referenser kan inte alltid användas direkt i säkerhetsanalysen. Det finns behov av att också beakta information som inte är platsspecifik, att hantera osäkerheter som identifierats i platsbeskrivningen och att slutgiltigt välja indata till modellerna i säkerhetsanalysen. Av detta skäl utvärderas alla platsdata som används i SR-Site i **Datarapporten** för SR-Site, där SDM används som indata. **Datarapportens** funktion förklaras i avsnitt S3.7.

Som en del av den platsbeskrivande modelleringen utvärderades osäkerheten och tilltron till platsbeskrivningen för Forsmark. Denna utvärdering omfattade tilltron till data från platskarakteriseringen, viktiga kvarvarande osäkerheter i platsbeskrivningen, alternativa modeller och hanteringen av dessa, överensstämmelse mellan ämnesområden samt huvudorsakerna till tilltro till eller avsaknad av tilltro till den platsbeskrivande modellen. Det övergripande resultatet av denna utvärdering var att man, med hjälp av kvantitativa osäkerhetsuppskattningar och alternativa modeller, fann att de egenskaper hos platsen som är betydelsefulla för både möjligheten att bygga förvaret och för den långsiktiga säkerheten är tillräckligt väl avgränsade.



Figur S-3. *Den tektoniska linsen i Forsmark och områden som påverkas av kraftig plastisk deformation i Forsmarks omgivning.*



Figur S-4. *De olika ämnesbeskrivningarna i SDM hänger samman genom flera återkopplingsslingor, där det geometriska ramverket väsentligen bestäms av geologiska faktorer.*

Sammanfattningsvis är de viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna hos förvarsplatsen i Forsmark:

- En låg frekvens av vattenförande sprickor på förvarsdjup.
- Gynnsamma geokemiska förhållanden, i synnerhet reducerande förhållanden på förvarsdjup (vilket gäller allmänt i den djupa berggrunden i Sverige) och salthalter som säkerställer att bufferten av bentonitlera förblir stabil.
- Ingen potential för fyndigheter av metaller och industriella mineraler inom kandidatområdet i Forsmark.

Dessutom möjliggör den relativt höga värmeledningsförmågan vid platsen att bergvolymen kan utnyttjas effektivt. De bergmekaniska förhållandena och andra egenskaper, som är betydelsefulla för att förvaret ska kunna uppföras på ett säkert och effektivt sätt, är också gynnsamma.

S2.3 Den platsanpassade referensutformningen av förvaret

En uttömmande beskrivning av förvarssystemets initialtillstånd är en av huvudförutsättningarna för säkerhetsanalysen. För de tekniska barriärerna definieras initialtillståndet i SR-Site som tillståndet vid tidpunkten för deponering/installation. Initialtillståndet för geosfären och biosfären definieras som det naturliga orörda tillståndet vid tidpunkten då berguttaget för förvaret påbörjas. (Påverkan på geosfären och biosfären till följd av berguttaget för förvaret analyseras som en del av säkerhetsanalysen.)

Konstruktionsförutsättningar, referensutformning och produktionsrapporter

Utformningen av KBS-3-förvaret har utvecklats sedan det introducerades. Den nuvarande utformningen är baserad på den som första gången presenterades i KBS-3-rapporten 1983. Återkoppling från utvärderingar av långsiktig säkerhet är central information för vidareutvecklingen av förvarets utformning. Återkoppling från SR-Can-analysen utvecklades vidare till *konstruktionsförutsättningar* för SR-Site-analysen och tillståndsansökningarna. Konstruktionsförutsättningar avser t ex specifikationer av vilka mekaniska påfrestningar barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning och acceptanskriterier för de olika momenten vid bergarbetena under markytan. Ungefär 30 olika konstruktionsförutsättningar för kapseln, bufferten, deponeringshålen, deponeringstunnlarna och återfyllningen samt för stamtunnlarna, transporttunnlarna, tillfartstunnlarna, schakten, centralområdet och förslutningen har utvecklats utgående från SR-Can-analysen och en del efterföljande analyser. De resulterande konstruktionsförutsättningarna utgör begränsningar för utformningen som, om alla är uppfyllda, ger en bra grund för att påvisa att förvaret är säkert.

En referensutformning som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna har utvecklats och redovisas i flera så kallade **Produktionsrapporter**. Dessa rapporter, som täcker in det använda bränslet, kapseln, bufferten, återfyllningen i tunnlar, förslutningen av förvaret och bergutrymmena, innehåller den information som krävs för att utvärdera de tekniska delarna av förvarssystemet i SR-Site.

I varje rapport redovisas i) de konstruktionsförutsättningar som ska vara uppfyllda, ii) den referensutformning som valts för att uppfylla kraven, iii) analyser som bekräftar att referensutformningen verkligen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, iv) de produktions- och kontrollrutiner som valts

för att åstadkomma referensutformningen, v) analyser som bekräftar att dessa rutiner verkligen leder fram till referensutformningen och vi) det resulterande initialtillståndet. Den sista punkten är en central utgångspunkt för säkerhetsanalysen.

Initialtillståndet, som beskrivs i **Produktionsrapporterna,** ger kvantitativ information om viktiga indata till säkerhetsanalysen. Dessa data utvärderas kritiskt i **Datarapporten**. I denna kvalificeras formellt indata till säkerhetsanalysen, utifrån en bedömning av osäkerheter i initialtillståndets data.

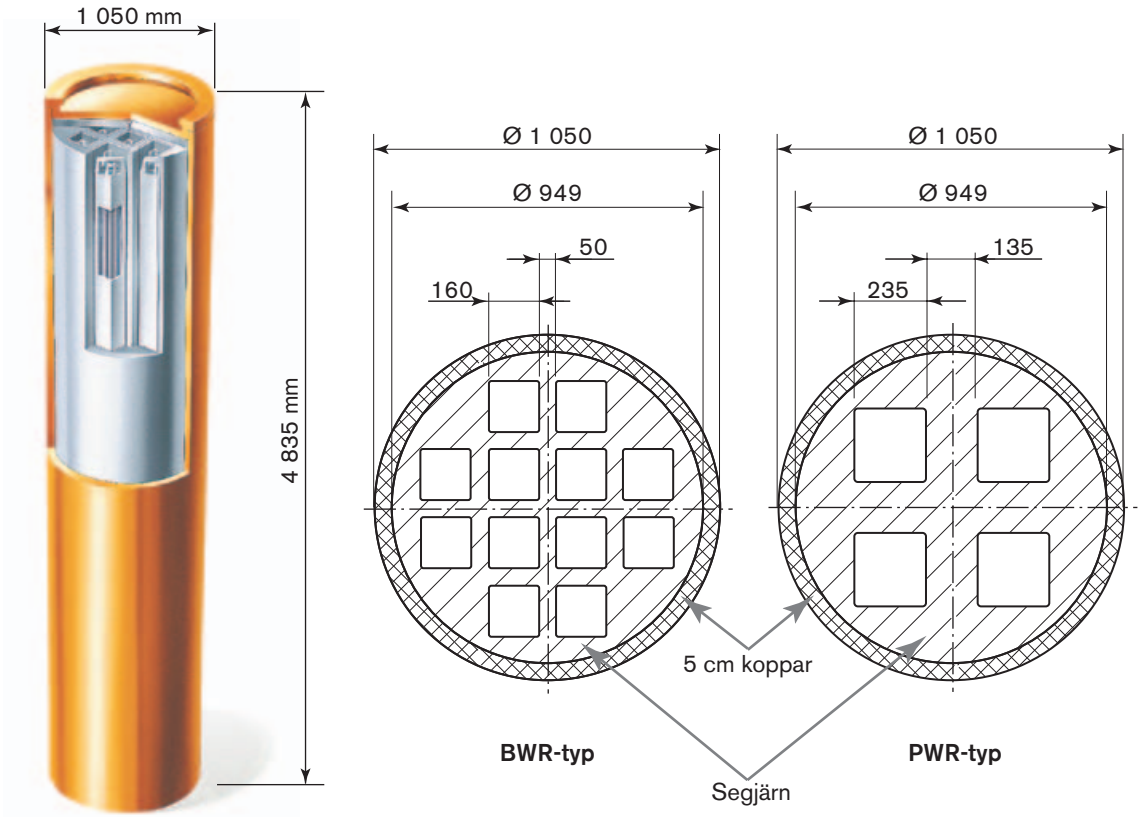
Nedan följer en kort sammanfattning av förvarsutformningens viktigaste funktioner.

Bränsle

Större delen av det kärnbränsle som ska deponeras består av använt kärnbränsle från driften av de tolv svenska kärnkraftverken. Reaktorerna är antingen av kokvattenreaktortyp (Boiling Water Reactor, BWR) eller av tryckvattenreaktortyp (Pressure Water Reactor, PWR). Bränsletyperna och bränslemängderna har beräknats utifrån det använda kärnbränsle som förvarades i Clab (31 december 2007) och ett referensscenario för den framtida driften av de tio återstående kärnkraftverken. I referensscenariot antas drifttiden vara 50 år för de fyra reaktorerna i Ringhals och de tre i Forsmark, medan drifttiden antas vara 60 år för de tre reaktorerna i Oskarshamn. De två reaktorerna i Barsebäck togs ur drift efter ungefär 24 respektive 28 år. Huvuddelen av det bränsle som används i reaktorerna består av uranoxid (UOX). Från Oskarshamn kommer det att finnas mindre mängder bränsle med blandoxid (MOX). KBS-3-förvaret ska också rymma mindre mängder av andra typer av oxidbränslen från forskningsprogram och från den tidiga delen av kärnkraftsprogrammet.

Kapsel

Referensutformningen för kapseln utgörs av en tät, 5 cm tjock korrosionsbarriär av koppar och en lastupptagande insats av segjärn. Den förslutna kapseln har en total längd på 4 835 mm och en diameter på 1 050 mm, se figur S-5.



Figur S-5. *Vänster: Referensutformningen av kapseln med ett korrosionsbeständigt yttre kopparhölje och en lastupptagande insats av segjärn. Höger: Tvärsnitt av insatser av BWR- respektive PWR-typ.*

I **Produktionsrapporten för kapseln** beskrivs hur kapslar ska tillverkas och kvalitetssäkras för att uppfylla specifikationerna för referensutformningen. Rapporten visar även att referensutformningen överrensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för kapseln, baserat på en omfattande konstruktionsanalys. Där dras slutsatsen att referensutformningen, tillsammans med de föreslagna tillverknings- och kontrollmetoderna, som resultat ger en kapsel som är i överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna. En viktig konsekvens av detta är att alla de 6 000 kapslarna är täta när de deponeras.

Buffert

Lerbuffertens huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln. Detta uppnås genom att man väljer ett buffertmaterial med låg hydraulisk konduktivitet efter vattenmättnad. Diffusion blir då den dominerande transportmekanismen. Materialet måste även ha ett tillräckligt högt svälltryck, vilket gör att bufferten blir självläkande. Lermaterialets montmorillonitinnehåll är en viktig egenskap för buffertens säkerhetsfunktioner.

I SR-Site utvärderas två exempel på lermaterial som uppfyller konstruktionsförutsättningarna. Exemplen, MX-80 och Ibeco RWC, är båda från stora fyndigheter och bryts av stora bentonitleverantörer. De har olika ursprung och ska betraktas som möjliga exempel på alternativ som kan användas i förvaret.

I **Produktionsrapporten för bufferten** visas det hur bufferten ska tillverkas och inplaceras på ett kvalitetssäkrat sätt för att specifikationerna för referensutformningen ska uppfyllas.

Återfyllningsmaterial i deponeringstunnlar

Huvudfunktionen för deponeringstunnlarnas återfyllning är att begränsa advektiv transport i deponeringstunnlarna. Detta uppnås genom att man väljer ett återfyllningsmaterial med låg hydraulisk konduktivitet och tillräckligt högt svälltryck. Återfyllningen ska även bidra till att hålla bufferten på plats, dvs den ska motverka att bufferten expanderar uppåt. Detta uppnås huvudsakligen genom att återfyllningsmaterialet har en tillräckligt hög densitet.

Referensmaterialet för återfyllningen är en bentonitlera med mellan 50 och 60 procent montmorillonit. I SR-Site utvärderas ett exempel på material, Milos BF 04, som uppfyller konstruktionsförutsättningarna.

Produktionsrapporten för återfyllningen redogör för hur deponeringstunnlarnas återfyllning ska tillverkas och inplaceras på ett kvalitetssäkrat sätt för att uppfylla specifikationerna för referensutformningen.

Övriga tekniska delar i förvaret

För SR-Site definieras de övriga tekniska delarna i förvaret som:

1. Pluggar i deponeringstunnlar: Behandlas i **Produktionsrapporten för återfyllningen**.
2. Centralområde: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
3. Toppförslutning: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
4. Bottenplatta i deponeringshål: Behandlas i **Berglinjerapporten**.
5. Borrhålsförslutningar: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
6. Förslutning av stamtunnlar och transporttunnlar.
7. Förslutning av ramp och schakt under toppförslutningen.
8. Pluggar (på andra ställen än i deponeringstunnlar).

I SR-Site behandlas förslutningen av alla tunnlar på förvarsnivå samt rampen och schaktet under toppförslutningen som tunnelåterfyllning, i enlighet med den nuvarande referensutformningen. Alla pluggar i förvaret behandlas som deponeringstunnelpluggar, även detta enligt rådande referensutformning.

Syftena med förslutningskomponenterna är i allmänhet att begränsa grundvattenflödet genom bergutrymmena, att tillhandahålla mekanisk inneslutning och att förhindra oavsiktligt intrång i förvaret. Undantaget är bottenplattan i deponeringshålen som endast har till uppgift att underlätta installationen av kapseln och bufferten.

Bergutrymmen

Under alla faser av arbetet med att utforma de underjordiska delarna av förvaret måste man ta hänsyn till de faktiska förhållandena på platsen och osäkerheter i dessa. För att fastställa en slutgiltig layout för deponeringstunnlar och deponeringshål måste en stor bergvolym karakteriseras. Denna karakterisering går emellertid bara på ett effektivt sätt att utföra från bergutrymmen på eller nära förvarsdjup. Det innebär att karakteriseringen kommer att detaljeras i takt med att byggarbetet går framåt.

Det djup som fastställts för referensutformningen är en kompromiss mellan konstruktionsförutsättningarna för långsiktig säkerhet och byggbarheten för deponeringstunnlarna och deponeringshålen i förvarsanläggningen. Under ett djup av 400 m är förekomsten av vattenförande sprickor mycket liten, medan bergspänningarna fortfarande är acceptabla. Detta motiverar att förvarsanläggningens maximala djup är 470 m och att den har ett minsta djup (tunneltak) av 457 m.

Platsens termiska egenskaper används för att bestämma ett minsta avstånd mellan kapslarna. Detta säkerställer att den maximala temperaturen i bufferten understiger 100 °C.

Layouten är anpassad för att uppfylla de konstruktionsförutsättningar som avser att minska jordskalvsrisken. Den säkerställer att alla deponeringshål ligger bortom respektavstånden till stora deformationszoner, som skulle kunna hysa större framtida jordskalv. Stora sprickor får dessutom inte skära deponeringspositioner enligt EFPC (Extended Full Perimeter Intersection Criterion). Detta kriterium slår fast att en deponeringsposition inte får skäras av en spricka som också fullständigt skär deponeringstunnelns omkrets. Dessutom diskvalificeras de deponeringspositioner som skärs av sprickor som även skär fyra eller fler närliggande positioner.

Deponeringspositioner med höga inflöden godkänns inte. I SR-Site hanteras detta huvudsakligen genom att en modifierad version av EFPC används för att undvika deponeringspositioner med potential för uppkomst av höga framtida grundvattenflöden.

Deponeringstunnlarnas orientering relateras till den största huvudspänningens orientering för att minska spjälkningsrisken. Visst byggmaterial i berget eller på bergytor, t ex från bergförstärkning och från injektering, kommer att finnas kvar i förvaret efter förslutning.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis är nedanstående säkerhetsrelaterade egenskaper bland de mest betydelsefulla för förvarets initialtillstånd.

- Kapselns 5 cm tjocka kopparhölje som utgör en korrosionsbarriär.
- Kapselns förmåga att motstå isostatiska laster, vilken ges av segjärnsinsatsens mekaniska egenskaper.
- Kapselns förmåga att motstå skjuvlaster, vilken också ges av segjärnsinsatsens mekaniska egenskaper.
- Densiteten hos den deponerade bufferten och buffertens kvalitetssäkrade materialsammansättning, vilka säkerställer att bufferten utvecklas till en diffusionsbarriär då den vattenmättas.
- Densiteten och materialsammansättningen hos deponeringstunnelns återfyllning vid deponeringen.
- Förvarets allmänna layout, med respektavstånd till sprickzoner som potentiellt kan hysa stora jordskalv samt med ett avstånd mellan deponeringshålen som tillsammans med begränsningarna för värmeavgivningen från de deponerade kapslarna säkerställer att temperaturen i förvaret med god marginal är lägre än 100 °C.
- Acceptans av deponeringspositioner i enlighet med fastställda kriterier, vilket minskar sannolikheten för att deponeringspositioner skärs av sprickor som är stora och/eller kraftigt vattenförande.

S3 Analysen av långsiktig säkerhet

S3.1 Inledning

Förvarssystemet kommer att utvecklas över tiden. Framtida tillstånd kommer att bero på

- förvarets initialtillstånd,
- interna processer, dvs ett antal strålningsrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som samverkar inom förvarssystemet över tiden, samt
- externa faktorer som påverkar systemet.

Interna processer är t ex radioaktivt sönderfall, vilket medför värmeutveckling och uppvärmning av bränslet, de tekniska barriärerna och det omgivande berget. Grundvattenrörelser samt kemiska processer, som påverkar de tekniska barriärerna och grundvattnets sammansättning är andra exempel. Till externa faktorer hör inverkan av framtida klimat och andra processer relaterade till klimatet, såsom glaciationer och landhöjning.

Initialtillståndet, de interna processerna och den externa påverkan, samt de sätt på vilka dessa faktorer tillsammans styr förvarets utveckling, kan aldrig till fullo beskrivas eller förstås. Osäkerheter av olika slag finns därför förknippade med alla aspekter av förvarets utveckling och följaktligen också med bedömningen av säkerheten. En grundtanke i metodiken för en säkerhetsanalys måste därför vara att hantera alla relevanta typer av osäkerhet. Denna hantering innebär att identifiera, klassificera och beskriva osäkerheter, liksom att hantera dem på ett konsekvent sätt vid kvantifieringen av förvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som denna medför. Ett metodiskt tillvägagångssätt innefattar också att jämföra resultaten från analysen med myndighetens kriterier på ett sådant sätt att tillbörlig hänsyn tas till de osäkerheter som är förbundna med analysen.

Säkerhetsanalysen SR-Site består av elva huvudsteg. Figur S-6 visar en schematisk bild som beskriver de olika stegen. Den metodik som utnyttjas i analysens första tio steg beskrivs i följande underavsnitt, tillsammans med de viktigaste resultaten från varje steg. Resultatet av det slutliga steget, sammanställningen av slutsatser, redovisas i avsnitt S4.

S3.2 Steg 1: Hantering av egenskaper, händelser och processer (FEP)

Vid detta steg identifieras alla de faktorer som behöver ingå i analysen. Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser och KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer (Features, Events and Processes, FEP) som påverkar den långsiktiga säkerheten utnyttjas. En SKB-specifik FEP-databas utvecklas för detta, där de flesta FEP klassificeras som antingen i) FEP för initialtillståndet, ii) interna processer eller iii) externa FEP. Återstående FEP är antingen relaterade till analysmetodiken i allmänhet eller har konstaterats vara irrelevanta för KBS-3-metoden. Utifrån resultaten från FEP-hanteringen har en FEP-katalog tagits fram för SR-Site, vilken innehåller de FEP som ska hanteras i SR-Site. Den fortsatta hanteringen av de tre FEP-kategorierna beskrivs i metodikens tre nästföljande steg.

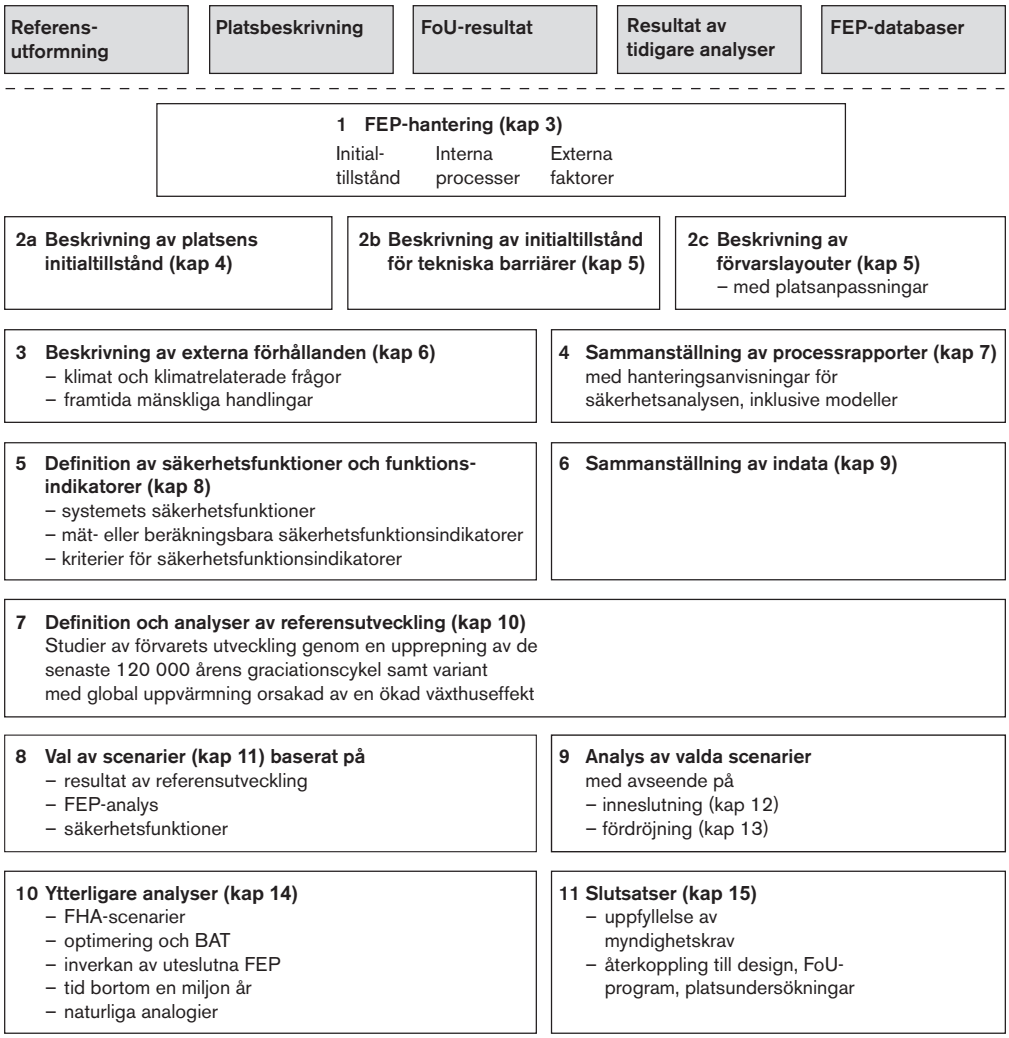
Detta steg som omfattar FEP-hanteringen redovisas utförligt i **FEP-rapporten** för SR-Site[1].

S3.3 Steg 2: Beskrivning av initialtillståndet

Systemets initialtillstånd beskrivs med hjälp av den platsbeskrivande modellen, utformningen av KBS-3-förvaret med dess olika komponenter och en platsspecifik layout som tillämpar denna utformning på platsen i fråga. Initialtillståndet för geosfären och biosfären definieras som tillståndet hos det naturliga systemet innan bergarbetena påbörjas. Initialtillståndet för bränslet och de tekniska komponenterna definieras som tillståndet omedelbart efter deponering/installation.

Systemets initialtillstånd är fundamentalt i analysen och kräver omfattande dokumentation. För den aktuella platsen uppnås detta genom den platsbeskrivande modellen i **Platsbeskrivning Forsmark**, dvs resultaten från platsundersökningen från ytan och platsmodelleringen baserad på platsundersökningsdata. Platsmodellen för Forsmark är en huvudreferens till SR-Site.

[1] **FEP-rapporten** är en av flera huvudreferenser till denna huvudrapport. Vid hänvisning till dessa huvudreferenser anges deras kortnamn i fetstil. Samma nomenklatur används i huvudrapporten.



Figur S-6. *En översikt av de elva huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Site. De översta rutorna ovanför den streckade linjen utgör indata till analysen. De kapitel i huvudrapporten där stegen redovisas mer utförligt anges också.*

Initialtillståndet för förvarssystemets tekniska komponenter beskrivs i ett antal **Produktionsrapporter** som omfattar det använda bränslet, kapseln, bufferten, tunnelåterfyllningen, förslutningen av förvaret respektive konstruktionen av bergutrymmena. Se även avsnitt S2.3.

S3.4 Steg 3: Beskrivning av externa förhållanden

Faktorer relaterade till externa förhållanden hanteras i de tre kategorierna ”klimatrelaterade frågor”, ”storskaliga geologiska processer och effekter” samt ”framtida mänskliga handlingar” (Future Human Actions, FHA). Hanteringen av dessa faktorer beskrivs i **Klimatrapporten**, **Processrapporten för geosfären** respektive **FHA-rapporten**.

En viktig grund för hanteringen av externa förhållanden är att lägga fast externa referensförhållanden för den efterföljande analysen. Som referensförhållanden postuleras en upprepning av den senaste 120 000 år långa glaciationscykeln. En alternativ referensutveckling baseras på ett antagande om global uppvärmning. Dessutom undersöks de fysikaliskt möjliga klimatförhållanden som skulle kunna ha allvarligare inverkan på förvarets säkerhet. Syftet är att använda dessa vid valet av scenarier i ett senare steg av analysen.

Framtida mänskliga handlingar hanteras i enlighet med en metodik som fastställdes i SR-Can-analysen och som uppdaterats i viss utsträckning för SR-Site. Utifrån en strukturerad redovisning av ett stort antal FEP som rör framtida mänskliga handlingar, väljs ett antal stiliserade fall för vidare analys.

S3.5 Steg 4: Sammanställning av processrapporter

Identifieringen och hanteringen av processer av betydelse för förvarets långsiktiga utveckling och säkerhet är en viktig del i säkerhetsanalysen. Identifieringen av processer baseras på tidigare analyser och sållning av FEP. Alla processer som identifieras inom systemgränsen, och som är relevanta för systemets långsiktiga utveckling, beskrivs i tre särskilda **Processrapporter**, en för bränslet och kapseln, en för bufferten, återfyllningen och förvarsförslutningen samt en för geosfären. Kortsiktiga processer eller förändringar i geosfären som orsakas av berguttaget för förvaret ingår i **Processrapporten för geosfären** och beaktas i säkerhetsanalysen.

Varje process dokumenteras i **Processrapporterna** enligt en mall med fastställda rubriker. I slutet av processdokumentationen fastställs hur processen ska hanteras i säkerhetsanalysen, vilket utgör det viktigaste resultatet från **Processrapporterna**. **Processrapporterna** tillhandahåller således ett ”recept” för hantering av de olika processerna i analysen.

Hanteringen av samtliga processer i en processrapport sammanfattas i en *processtabell* som beskriver om processen kan försummas, om den är föremål för kvantitativ modellering eller om valet mellan dessa alternativ beror på ett angivet villkor (som uppfylls eller inte uppfylls) under förvarssystemets utveckling.

Flera av processerna hanteras således genom kvantitativ modellering. Varje modell inkluderar i allmänhet flera samverkande processer. Processerna förekommer ofta i olika delar av systemet och beskrivs därför i olika processrapporter. Modellerna bildar ett nätverk, där resultaten från en modell används som indata till en annan. Nätverket beskrivs grafiskt genom två modellscheman (så kallade *AMF-scheman*, eng Assessment Model Flowcharts) och två tillhörande AMF-tabeller som kopplar samman processer i processtabellerna, modeller i AMF-scheman och rapportering av modellering i olika avsnitt av huvudrapporten.

S3.6 Steg 5: Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

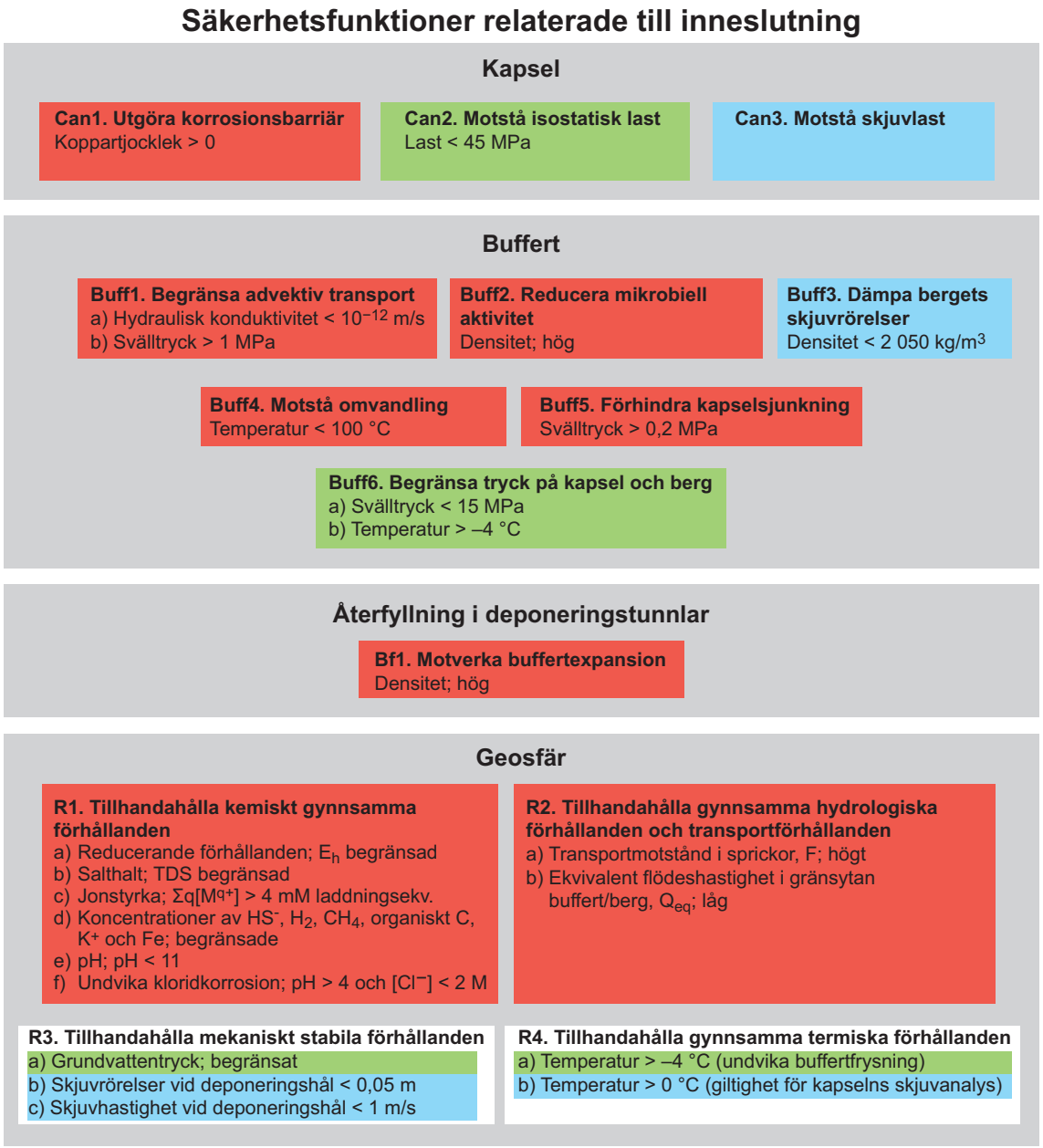
Ett centralt inslag i metodiken för SR-Site-analysen är definitionen av en uppsättning *säkerhetsfunktioner* som förvarssystemet optimalt ska uppfylla över tid. De övergripande säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning” delas upp i ett antal delfunktioner för kapseln, bufferten, återfyllningen i deponeringstunnlar och berget. Utvärderingen av säkerhetsfunktionerna över tid möjliggörs genom att varje säkerhetsfunktion kopplas till en *säkerhetsfunktionsindikator*, dvs en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos den aktuella förvarskomponenten. För flera funktioner är det också möjligt att ange *kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer.* Om en säkerhetsfunktionsindikator uppfyller kriteriet, är den aktuella säkerhetsfunktionen uppfylld.

Kapselns förmåga att stå emot isostatiska laster är ett exempel på en säkerhetsfunktion. Den tillhörande indikatorn är den isostatiska belastningen på kapseln och kriteriet är den isostatiska last som kapseln har visats kunna stå emot.

Det är viktigt att notera att kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna inte är desamma som designkriterier, vilka formellt beskrivs som konstruktionsförutsättningar i SR-Site. De förra ska optimalt upprätthållas under den period som omfattas av analysen, medan konstruktionsförutsättningarna ska uppfyllas initialt. Konstruktionsförutsättningarna ska i allmänhet säkerställa att systemet är tillräckligt robust för att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid. Kopparkapseln måste exempelvis utformas på ett sådant sätt att dess initiala tjocklek (konstruktionsförutsättningen) säkerställer att den står emot korrosion under mycket lång tid, dvs att tjockleken är större än noll (funktionsindikatorkriteriet) under denna tid.

Uppsättningen av säkerhetsfunktioner ger förståelse för systemets säkerhetsegenskaper. Det ger också en lista över nyckelfrågor som ska utvärderas över tid i analysen. Säkerhetsfunktionerna används direkt i senare steg av analysen när referensutvecklingen analyseras för att utvärdera säkerheten på ett strukturerat sätt för de olika tidsskedena. Säkerhetsfunktionerna har även en framträdande roll vid valet av ett antal scenarier, varigenom de osäkerheter som är relaterade till förvarets säkerhetsfunktioner utvärderas på ett strukturerat sätt.

Alla säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och säkerhetsfunktionsindikatorkriterier relaterade till inneslutning sammanfattas i figur S-7. Varje funktion diskuteras kort i samband med redovisningen av resultaten av referensutvecklingen i avsnitt S3.8. Säkerhetsfunktioner relaterade



Figur S-7. *Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till inneslutning. När kvantitativa kriterier inte kan anges används termerna ”stor”, ”liten” och ”begränsad” för att indikera gynnsamma värden för säkerhetsfunktionsindikatorerna. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner Can1 (rött), Can2 (grönt) och Can3 (blått).*

till fördröjning har också lagts fast och de sammanfattas i en figur liknande figur S-7. Flera av fördröjningskriterierna är relaterade till inneslutningskriterierna. Det gäller särskilt geosfärens roll att tillhandahålla gynnsamma kemiska och hydrologiska förhållanden/transportförhållanden.

När säkerhetsfunktionerna har definierats tas ett *FEP-diagram* fram som visar hur initialtillståndets egenskaper och processer i den långsiktiga utvecklingen av förvaret är relaterade till säkerhetsfunktionerna.

S3.7 Steg 6: Sammanställning av indata

I detta steg används ett strukturerat förfarande för att välja ut data som ska användas för kvantifieringen av förvarsutvecklingen och för beräkningar av dos. Urvalsprocessen och de valda datavärdena rapporteras i en särskild **Datarapport**. Arbetet följer en mall för att diskutera kvalitet och osäkerheter hos indata.

Instruktionerna berör två parter, leverantören och kunden. Leverantörerna är de arbetsgrupper som tar fram data. Kunden är i vid bemärkelse SR-Site-gruppen som ansvarar för att utföra säkerhetsanalysen SR-Site. De modeller för vilka data krävs anges i de AMF-scheman som beskrivs i steg 4 (se avsnitt S3.5). Rutinerna för granskning och lagring av data utgör en del av kvalitetssäkringsplanen för SR-Site.

S3.8 Steg 7: Definition och analys av referensutvecklingen

I detta steg definieras och analyseras en referensutveckling av förvarssystemet. Referensutvecklingen är ett resultat av bland annat de externa referensförhållanden som definierades i steg 3. Syftet är att få kunskap om systemets övergripande utveckling, samt om de osäkerheter som påverkar utvecklingen inför det val av scenarier och de scenarieanalyser som kommer i de två efterföljande stegen. Utvecklingen är ett viktigt underlag för att i ett senare skede definiera ett huvudscenario.

Fokus ligger på systemets inneslutningsförmåga. Två fall av referensutvecklingen analyseras:

1. Ett basfall där de externa förhållandena under den första 120 000 år långa glaciationscykeln förutsätts likna de förhållanden som gällde under den senaste cykeln. Därefter antas sju upprepningar av denna cykel täcka in hela den 1 000 000 år långa analysperioden.
2. En variant med ökad global uppvärmning där man antar att det framtida klimatet och därmed de externa förhållandena i hög grad påverkas av mänskligt förorsakade utsläpp av växthusgaser under den första 120 000 år långa glaciationscykeln. Denna analys bygger på analysen för basfallet.

För båda fallen gäller att initialtillståndet med dess osäkerheter förutsätts, alla interna processer med sina osäkerheter hanteras i enlighet med specifikationen i **Processrapporterna** och data med tillhörande osäkerheter hämtas från **Datarapporten**.

Analysen av referensutvecklingens basfall genomförs för fyra tidsskeden:

- Bygg- och driftperioden.
- De första 1 000 åren efter förslutning av förvaret och den inledande perioden med tempererat klimattillstånd enligt referensglaciationscykeln.
- Den återstående delen av glaciationscykeln.
- Efterföljande glaciationscykler upp till en miljon år efter förslutning av förvaret.

För varje tidsskede presenteras analyserna i följande ordning:

- Klimatanalyser.
- Biosfärsanalyser.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska analyser som rör geosfären.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska analyser som rör det tekniska barriärsystemet (kapsel, buffert och återfyllning).

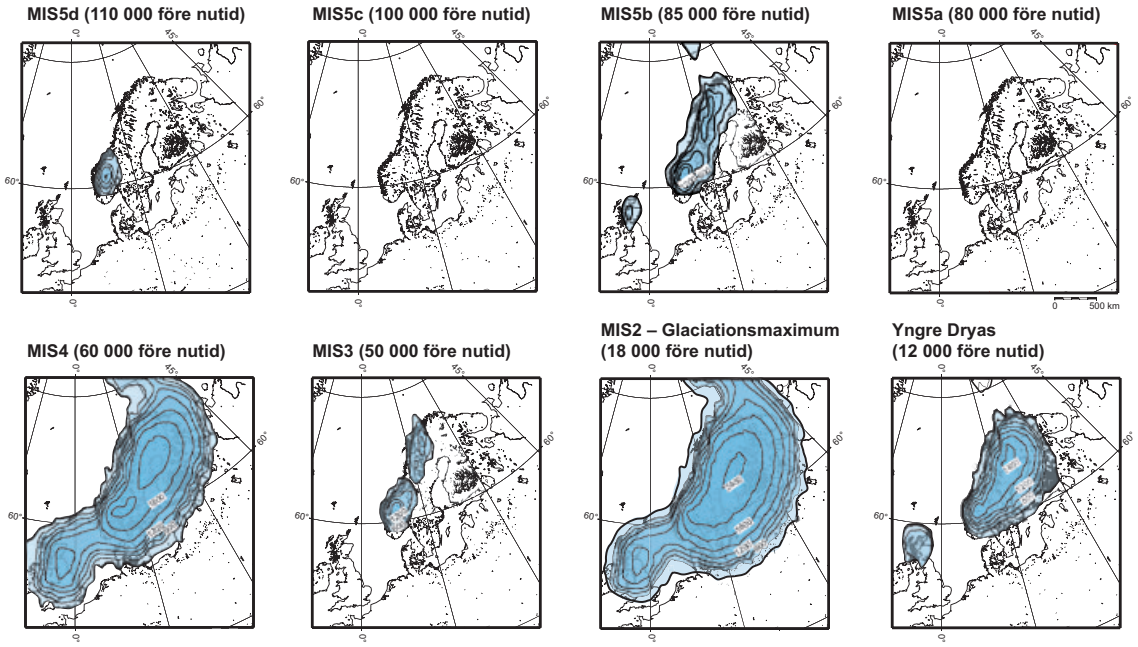
Behandlingen av varje delanalys avslutas med en redovisning av identifierade osäkerheter som ska föras vidare till senare skeden av referensutvecklingen och/eller till efterföljande delar av säkerhetsanalysen.

Redogörelsen för varje skede avslutas med en diskussion om förväntad status hos säkerhetsindikatorerna under och i slutet av skedet.

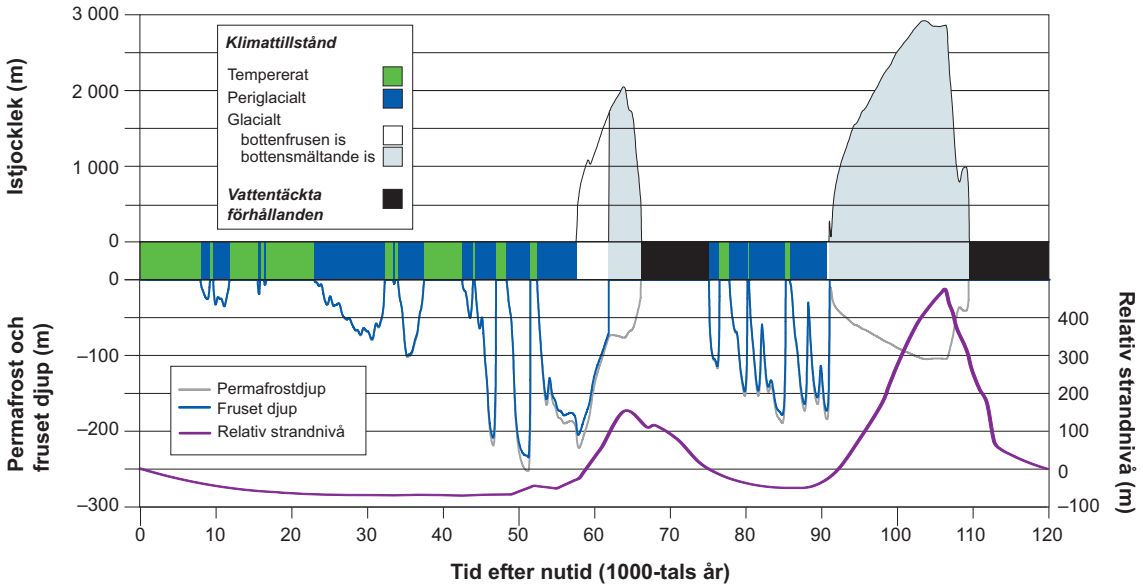
Allmänt om referensutvecklingen

En avsevärd del av det material som presenteras i referensutvecklingen är resultat från simuleringsstudier, som specificerades när hanteringen av processerna fastställdes och som visas grafiskt i AMF-schemana.

Initialt kännetecknas referensutvecklingen av ett transient skede som orsakas av berguttaget samt av uppförandet och existensen av förvaret. Långsiktigt kännetecknas referensutvecklingen av ändringar som orsakas av ändrade externa förhållanden. Figurerna S-8 och S-9 visar centrala aspekter av referensutvecklingens externa förhållanden i form av den modellerade rekonstruktionen av Weichselglaciationscykeln.



Figur S-8. *Urval av kartor över modellerade utbredningar av inlandsisen från rekonstruktionen av Weichsel-periodens inlandsis. Konturlinjerna visar isytans höjd med ett intervall på 300 m. Alla kartor visar det nuvarande läget för strandlinjen.*



Figur S-9. *Utveckling av viktiga klimatrelaterade variabler vid Forsmark under referensglaciationscykeln.*

Den termiska utvecklingen kännetecknas av en snabb temperaturökning till följd av värmeproduktionen i det använda kärnbränslet. Maximala temperaturer i kapseln, bufferten och deponeringshålets vägg uppnås efter några tiotals år. Det kommer att ta tiotusentals år av tempererade klimatförhållanden innan temperaturen återgår till den bakgrundstemperatur som råder i berget (omkring 11 °C vid Forsmark). För glaciala klimatförhållanden och särskilt permafrostförhållanden kommer temperaturen på förvarsdjup att minska, men kommer alltid att överstiga 0 °C.

Från mekanisk synpunkt förväntas en skadezon bildas under utsprängning, i synnerhet under deponeringstunnlarnas sula. Det är dock inte troligt att denna kommer att bilda en hydrauliskt sammanhängande flödesväg. Dessutom kan den initialt förhöjda temperaturen orsaka termiskt inducerad spjälkning

i begränsad omfattning i deponeringshålens väggar. Långsiktigt kännetecknas de mekaniska förhållanden av stabilitet. Det går inte att utesluta kraftiga jordskalv i större sprickzoner i närheten av förvaret. Förvarslayouten är därför utformad för att undvika kapselbrott på grund av sådana händelser.

Från hydraulisk synpunkt dräneras förvaret under uppförande och drift. Den tid som åtgår för att vattenmätta återfyllnaden i deponeringstunnlar och buffert kommer att variera avsevärt mellan olika delar av förvaret. Till följd av berggrundens egenskaper i Forsmark sträcker sig tiden för att nå vattenmättnad sannolikt från några tiotals år till flera tusentals år. Långsiktigt kommer berggrundens flödesförhållanden att bestämmas av ändrade externa förhållanden.

Från kemisk synpunkt förväntas initiala transienter. Dessa omfattar förbrukning av initialt innesluten syre i förvaret av mikrober och mineraler i berget, återfyllningen och bufferten. Dessutom sker reaktioner som inbegriper konstruktionsmaterial och andra kvarlämnade material i förvaret. Transienterna följs av långsamt varierande förhållanden under det inledande tempererade skedet och ändringar som styrs av varierande externa förhållanden i ett långt tidsperspektiv.

Säkerhet och säkerhetsfunktioner under referensutvecklingen

För flertalet av de 6 000 deponeringspositionerna görs bedömningen att alla säkerhetsfunktioner som är relaterade till kapseln, bufferten, deponeringstunneln och berget kan upprätthållas under referensutvecklingen. Följande resultat och slutsatser som rör säkerhetsfunktioner framkom från analysen av referensutvecklingen. Nomenklaturen för säkerhetsfunktionerna motsvarar den som används i figur S-7.

Berget

Resultaten från studierna av den *hydrogeokemiska utvecklingen* under referensutvecklingen innebär följande:

- Reducerande förhållanden (säkerhetsfunktion R1a) upprätthålls genom hela referensutvecklingen, från att de har etablerats kort efter förvarets förslutning. Lokal, tillfällig nedträngning av syre till förvarsdjup kan inte uteslutas under de hydrologiska transienter som uppstår när en isfront passerar. De möjliga effekterna är emellertid för små för att påverka säkerheten.
- Salthalten (R1b) begränsas till en kloridhalt under 0,35 M, dvs den understiger de koncentrationer där buffertens eller återfyllningens funktion kan påverkas. De högsta salthalterna förekommer som följd av saltvattenuppträngning i) under de initiala geokemiska transienter som orsakas av dräneringen och den efterföljande återmättnaden av berggrunden och ii) under transienter som uppstår när en isfront passerar ovanför förvaret.
- Jonstyrkan (R1c) överstiger 4 mM laddningsekvivalenter för merparten av deponeringspositionerna under hela referensutvecklingen. Detta krävs för att kolloidfrigörelse/erosion av bufferten ska kunna uteslutas. Det kan emellertid inte uteslutas att några få procent av deponeringspositionerna, de som skärs av sprickor med de högsta vattenflödena, exponeras för utspädda vatten på ett sätt som innebär att bufferterosion skulle kunna ske efter tusentals år med tempererade eller glaciala förhållanden eller under de korta transienter som uppstår när en isfront passerar ovanför förvaret.
- Koncentrationerna av ämnen som är skadliga för bufferten och kapseln (R1d) är som följer:
  - Koncentrationerna av HS^- förväntas inte överstiga nuvarande koncentrationer.
  - Koncentrationerna av H_2 förväntas ligga kvar under 0,1 mM. Den vätgas som bildas genom korrosion av förvarets stål- och järnkomponenter förväntas antingen att diffundera bort eller förbrukas genom mikrobiella processer. Om sulfatreduktion är inblandad förväntas den sulfid som bildas att reagera med det tvåvärda järnet från korrosionen, vilket innebär att sulfidnivåerna inte kommer att öka på grund av denna mekanism.
  - Koncentrationerna av CH_4 och organiskt C kommer att ligga kvar under ~0,1 mM respektive ~1 mM.
  - Koncentrationerna av K^+ and Fe kommer att ligga kvar under ~5 mM respektive 0,1 mM.
- Grundvattnets pH (R1e) är under 11 och över 6,3.
- De villkor som krävs för att undvika kloridfrämjad korrosion (R1f) är uppfyllda genom den begränsande kloridkoncentrationen (< 0,35 M) och grundvattnets pH-värden (> 6,3).

Resultaten från studierna av den *hydrogeologiska utvecklingen* under referensutvecklingen innebär följande:

- De ekvivalenta flödena i gränsytan mellan buffert och berg (R2b) är låga. Enligt den hydrogeologiska modellens fördelning av sprickstorlekar och sprickintensiteter skärs nästan 5 000 av de 6 000 deponeringspositionerna inte alls av vattenförande sprickor. Bland de skärande sprickorna har de flesta ett mycket lågt ekvivalent flöde. Om man betraktar hela uppsättningen av deponeringspositioner varierar dock flödena inom ett stort intervall. Den högsta percentilen för fördelningen av flöden är sådan att dessa kan bidra till långsiktigt skadliga effekter på bufferten och kapseln.
- Det flödesrelaterade transportmotstånd som finns i spricknätverket som förbinder deponeringshålen med ytan (R2a) är högt för de flesta deponeringspositioner, vilket bidrar till att retentionen av radionuklider i berget är effektiv. Om man betraktar hela uppsättningen av deponeringspositioner varierar dock transportmotstånden inom ett stort intervall. Den lägsta percentilen för fördelningen är sådan att retentionen i berget kan vara ringa. Dessutom kan transportvägar med lågt transportmotstånd ofta ha en hög flödeshastighet vid deponeringspositionen.

Följande slutsatser dras beträffande bergets *mekaniska stabilitet*:

- Grundvattentrycket (R3a) är vanligen i storleksordningen 5 MPa, men kan öka om förvarsplatsen är täckt med is. Under glaciala förhållanden kommer trycket att vara beroende av inlandsisens tjocklek, och ligga under 26 MPa för den modellerade referensutvecklingen.
- Skjuvrörelser som överstiger 5 cm vid deponeringshål (R3b) är ytterst sällsynta. Detta beror på att sannolikheten för att kraftiga jordskalv ska inträffa i närheten av förvaret är liten, samt på iakttagandet av respektavstånd till stora sprickzoner vid valet av deponeringsområden och tillämpningen av acceptanskriterier vid valet av enskilda deponeringspositioner.
- Skjuvhastigheter vid deponeringshål (R3c) är av samma skäl som ovan under 1 m/s.

Beträffande bergets *termiska utveckling*, överstiger temperaturen på förvarsdjup i Forsmark med god marginal 0 °C i referensutvecklingen, dvs buffertfrysning kan undvikas (R4a) och skjuvanalyserna av kapseln är giltiga (R4b).

Återfyllningen i deponeringstunnlar

Vad gäller återfyllningen i deponeringstunnlar är densiteten tillräckligt hög för att motverka buffertexpansion (BF1) för alla analyserade fall i referensutvecklingen.

Bufferten

I merparten av deponeringshålen förväntas bufferten upprätthålla en densitet över tiden på ett sätt som innebär – givet buffertens egenskaper i initialtillståndet, grundvattnets gynnsamma sammansättning över tiden och de begränsade maximitemperaturer som uppnås genom en lämplig förvarslayout – att alla dess säkerhetsfunktioner uppfylls, dvs så att:

- Advektiv transport begränsas genom en hydraulisk konduktivitet under 10^{-12} m/s (Buff1a) och ett svälltryck över 1 MPa (Buff1b).
- Mikrobiell aktivitet undertrycks (Buff2).
- Skjuvrörelser i berget dämpas (Buff3) genom att en övre densitetsgräns säkerställs.
- Buffertomvandling undviks (Buff4) genom en övre temperaturgräns.
- Kapselsjunkning (Buff5) undviks genom ett svälltryck över 0,2 MPa.
- Trycket på kapseln och berget begränsas (Buff6) genom ett svälltryck under 15 MPa och en bergtemperatur över –4 °C.

Eftersom det långsiktigt inte går att säkerställa en tillräckligt hög jonstyrka (R1c) för de deponeringshål som skärs av sprickorna med de högsta flödena, kan det inte uteslutas att den buffert som befinner sig i dessa positioner kommer att eroderas. De beräknade erosionshastigheterna är sådana att advektiva förhållanden skulle kunna uppstå i omkring en procent av deponeringshålen under den en miljon år långa analysperioden. För dessa hål är inte säkerhetsfunktionerna Buff1 and Buff2 uppfyllda.

Kapseln

Vad gäller kapselns roll som korrosionsbarriär (Can1) visar analyserna i referensutvecklingen att högst några få millimeter av det 5 cm tjocka kopparhöljet kommer att korrodera på en miljon år om bufferten är på plats med upprätthållna säkerhetsfunktioner. För de få deponeringspositioner där bufferten kan försvinna till följd av erosion, på ett sätt som innebär att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet, ökar däremot korrosionshastigheten. De kvantitativa analyserna visar, uttryckt som ett statistiskt medelvärde, att upp till ungefär en kapsel kan ha förlorat sin integritet till följd av korrosion i slutet av den en miljon år långa analysperioden på grund av sådana omständigheter.

Vad gäller kapselns förmåga att motstå isostatiska laster (Can2) visar de kvantitativa analyserna att det totala isostatiska trycket understiger konstruktionsförutsättningen på 45 MPa, vilket betyder att denna säkerhetsfunktion hos kapseln upprätthålls.

När det gäller kapselns förmåga att motstå skjuvlaster visar analysen att sannolikheten för att ett enda sådant brott bland de 6 000 kapslarna har skett i slutet av den en miljon år långa analysperioden är 0,08. Då ingår ett antal pessimistiska antaganden avseende både berget och kapseln.

Identifierade osäkerheter i analysen av referensutvecklingen

De osäkerhetsfrågor som behöver föras vidare till scenarieanalyser kan huvudsakligen hänföras till två grupper: frågor som rör kapselbrott till följd av korrosion (säkerhetsfunktion Can1) och frågor som rör kapselbrott till följd av skjuvlaster (säkerhetsfunktion Can3). Kapselbrott till följd av isostatisk last (Can2) utesluts i enlighet med analyserna i referensutvecklingen.

Frågorna som rör kapselbrott till följd av korrosion är:

- Grundvattenflödet under glaciationscykeln.
- Grundvattnets salthalt under glaciationscykeln.
- Bufferterosion som bestäms av grundvattenflöde, sprickaperturer och salthalt och vars analys även påverkas av den ofullständiga konceptuella förståelsen för bufferterosion.
- Grundvattnets sulfidkoncentrationer under glaciationscykeln.
- Kapselkorrosion under advektiva förhållanden, vilket kräver bufferterosion i den omfattningen att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet och som därefter bestäms av grundvattenflöde och sulfidkoncentrationer.

Frågorna som rör kapselbrott till följd av skjuvlast är:

- Förekomsten av jordskalv av tillräckligt stor magnitud för att orsaka sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshål.
- Omfattningen av skadliga sekundära skjuvrörelser, under förutsättning att tillräckligt stora jordskalv inträffar.
- Sekundära skjuvrörelsers påverkan på buffert/kapselsystemet.

Definitionsmässigt begränsas de externa förhållandena för referensutvecklingen antingen till en utveckling som är jämförbar med en upprepning av Weichselglaciationscykeln (basfallet) eller till en som är kompatibel med varianten med global uppvärmning. Som anges ovan finns det osäkerheter inom dessa begränsningar, som i sin tur leder till osäkerheter inom referensutvecklingen. Det finns också betydande osäkerheter till följd av det faktum att andra externa förhållanden än de som bestämmer Weichsel-basfallet eller fallet med global uppvärmning är tänkbara. Dessa hanteras i scenarieanalyserna.

S3.9 Steg 8: Val av scenarier

Metod för val av scenarier

Vid hanteringen av osäkerheter i den framtida utvecklingen av förvarssystemet är det angeläget att minska antalet möjliga utvecklingar som behöver analyseras. Detta görs genom att välja ut en representativ uppsättning scenarier. Valet fokuseras på att hantera de delar av utvecklingen som är relevanta för säkerheten, uttryckta på övergripande nivå genom säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning”. Dessa detaljeras ytterligare med hjälp av säkerhetsfunktionsindikatorer.

De valda scenarierna bör täcka in alla rimliga framtida utvecklingar. Dessutom ska det vara möjligt att beräkna den risk som är förenad med existensen av förvaret som en summa av riskbidrag från uppsättningen av scenarier.

Det finns flera krav och riktlinjer i tillämpliga föreskrifter som måste beaktas vid valet av scenarier. Givet föreskrifternas krav och de nyss nämnda övervägandena har en femstegsmetod för valet av scenarier utvecklats, enligt nedan.

1. Definition av huvudscenariot

Ett *huvudscenario* definieras utifrån referensutvecklingen och i enlighet med SSMFS 2008:21. Huvudscenariot är uppdelat i två varianter, vilka baseras på de två varianterna av referensutvecklingen (Weichsel-basfallet och varianten med ökad global uppvärmning).

2. Val av ytterligare scenarier baserat på eventuellt bortfall av säkerhetsfunktioner

En viktig faktor som styr scenarievalet är att säkerhetsfunktionerna som rör inneslutning ska upprätthållas. Dessa säkerhetsfunktioner används därför för att strukturera valet av ytterligare scenarier. Detta är det huvudsakliga tillvägagångssättet för att hantera frågan om *mindre sannolika scenarier* i SSMFS 2008:21.

Kapseln har tre säkerhetsfunktioner som rör inneslutning: att utgöra en korrosionsbarriär, att stå emot isostatiska laster och att stå emot skjuvlaster. Från säkerhetsfunktionerna kan man således härleda tre olika typer av kapselbrott: brott som orsakas av korrosion, isostatiskt tryck respektive skjuvrörelser. Därför definieras scenarier, ett för varje typ av kapselbrott. Tre typer av buffertfel betraktas också som scenarier: advektion, frysning och omvandling. Kapselscenarierna kombineras systematiskt med buffertscenarierna.

Osäkerheter relaterade till initialtillståndet, till processer och till externa förhållanden som inte ingår i huvudscenariot beaktas sedan för varje utvalt scenario. För till exempel scenariot som täcker kapselbrott till följd av isostatiskt övertryck beaktas brister vid tillverkningen av den lastbärande kapselinsatsen, högre svälltryck än de som angivits för referensbufferten och extrema inlandsisar som ger upphov till höga grundvattentryck.

För varje scenario görs en bedömning av om det ska betraktas som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”. I det förra fallet sätts normalt sannolikheten för scenariot pessimistiskt till ett. De bedömda begränsade sannolikheterna för dess karakteristiska FEP, till exempel stora jordskalv, beaktas emellertid i riskberäkningen för scenariot.

Dessa scenarier omfattar även många av de restscenarier som krävs enligt SSM:s föreskrifter och allmänna råd för att analysera *betydelsen av barriärer och barriärfunktioner*. För att få en djupare förståelse för barriärfunktionerna definieras ett antal restscenarier. Dessa beskriver, med fokus på radionuklidtransport, hypotetiska situationer där ett initialt bortfall av en eller flera barriärer antas.

3. Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar

Även en uppsättning scenarier som rör framtida mänskliga handlingar definieras och analyseras. Scenarier som rör mänskligt intrång och som leder till en försämring av systemets funktioner ska i enlighet med SSMFS 2008:21 betraktas som ”mindre sannolika scenarier”. Enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 ska inte dessa tas med i risksummeringen. SSM kräver att restscenarier tas fram för att belysa *skador på människor som gör intrång i slutförvaret* och fall som visar på följderna av ett *förvar som varken är förslutet eller övervakas*.

4. Övriga restscenarier

Eventuella övriga scenarier, som av någon anledning anses nödvändiga för att få en heltäckande uppsättning av scenarier, definieras också. Dessa kan omfatta scenarier som identifieras direkt vid FEP-analysen men inte enligt kriterierna ovan. Inga sådana frågor har identifierats i SR-Site.

5. Kombination av scenarier

För att valet av scenarier ska bli heltäckande måste kombinationer av scenarierna beaktas. Detta görs när samtliga scenarier har valts och analyserats. Alternativa händelseförlopp är också relaterade till frågan om hur olika scenarier kombineras. Ordningsföljden i vilken olika händelser eller aspekter av utvecklingen inträffar kan vara viktig för förvarets utveckling. Detta tas upp explicit i varje scenario.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis består scenariemetodiken av en undersökning av alla förlopp som kan leda till de tre identifierade typerna av kapselbrott. Metodikens syfte är att utesluta eller kvantifiera förloppen med hänsyn till alla tänkbara utvecklingsvägar för systemet. Säkerhetsfunktionerna hos förvarets olika delar och den kunskap om förvarssystemets utveckling som kommer från analysen av referensutvecklingen utgör grunden för uttömmande utvärderingar av sådana förlopp.

Valda scenarier

Följande scenarier har valts ut i SR-Site.

- Ett huvudscenario som motsvarar referensutvecklingen.
- Ett scenario med advektion i bufferten för att undersöka de förlopp som leder till advektiva förhållanden i deponeringshålet och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett buffertfrysningsscenario för att undersöka de förlopp som leder till att bufferten fryser.
- Ett buffertomvandlingsscenario för att undersöka de förlopp som leder till att bufferten omvandlas.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av korrosion och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av skjuvlaster och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av isostatiska laster.
- Hypotetiska restscenarier som belyser barriärfunktioner.
- Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar.

S3.10 Steg 9, del 1: Analys av inneslutningspotentialen för de valda scenarierna

Metod

Analysen av de valda scenarierna är uppdelad i två steg: analys av inneslutningspotential och av fördröjningspotential.

Inneslutningspotentialen analyseras inte ytterligare för huvudscenariot. Resultaten från referensutvecklingen i steg 7 används.

De ytterligare scenarierna analyseras genom att fokus riktas mot faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte upprätthålls. I de flesta fall utförs dessa analyser genom jämförelser med utvecklingen för huvudscenariot. Det innebär att de endast omfattar sådana aspekter av förvarsutvecklingen för vilka scenariot i fråga skiljer sig från huvudscenariot.

För analyserna, och för dokumentationen av dem, används en gemensam mall med en uppsättning fasta rubriker.

Resultat

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras från analyserna av inneslutningspotentialen hos de utvalda scenarierna. (För de hypotetiska restscenarierna förutsätts att inneslutningen bryts. FHA-scenarier analyseras med hjälp av en annan metodik.)

- Advektion i bufferten: Situationen kan uppträda i referensutvecklingen. De ytterligare analyser som utfördes för scenariot med advektion i bufferten, där hänsyn togs till konceptuella osäkerheter och ytterligare tolkningar av platsernas hydrauliska egenskaper, visade att omfattningen

av advektion i bufferten kan variera inom ett brett intervall. *Dessa konsekvenser fördes vidare till kapselkorrosionsscenariot.*

- Buffertfrysning: Buffertfrysning uteslöts i referensutvecklingen, även för en eroderad buffert. De ytterligare analyser som utfördes för buffertfrysningsscenariot ledde också till slutsatsen att frysning av en intakt buffert kan uteslutas och följaktligen bör betraktas som ett restscenario. Detta gäller även frysning av vatten i hålrum hos en delvis eroderad buffert. *Risken för buffertfrysning fördes därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Buffertomvandling: För buffertomvandlingsscenariot utfördes analyser av höga temperaturer i bufferten och andra förhållanden som kan leda till att buffertmaterialet omvandlas, och slutsatsen drogs att detta bör betraktas som ett restscenario. *Risken för buffertomvandling fördes därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Kapselbrott till följd av korrosion: Ett funktionsfel av denna typ finns med i referensutvecklingen. Där uppträder det vid förhållanden med advektiv transport i en eroderad buffert och med sulfid i grundvattnet som den huvudsakliga korrodanten. För kapselkorrosionsscenariot analyserades återigen samtliga mekanismer som kan leda till att kapseln korroderar. Det bekräftades att kopparkorrosion som orsakas av klorid kan uteslutas, eftersom detta kräver höga kloridkoncentrationer och mycket lågt pH jämfört med vad som förväntas i förvaret. Analysen visade även att en nyligen föreslagen mekanism för kopparkorrosion i rent vatten, vars vetenskapliga grund bedöms som svag, har försumbar inverkan på kopparkorrosionens totala omfattning om man antar att mekanismen verkligen förekommer. De ytterligare analyser som utfördes för kapselkorrosionsscenariot, där indata från scenariot med advektion i bufferten användes, ledde till slutsatsen att advektiva förhållanden i bufferten verkligen är huvudorsaken till potentiella kapselbrott till följd av korrosion. Det konstaterades också att sulfid i grundvattnet är den enda korrodanten som har potential att orsaka kapselbrott, och då enbart om det råder advektiva förhållanden. Då alla advektiva situationer och andra osäkerheter relaterade till korrosion utvärderats, ledde detta till att omfattningen av korrosionsbrotten kan variera inom ett visst intervall. *Detta fördes vidare till analysen av korrosionsscenariots radiologiska konsekvenser.*
- Kapselbrott till följd av isostatiska laster: Ett funktionsfel av denna typ uteslöts för referensutvecklingen. Analysen i scenariot med isostatiska laster ledde till slutsatsen att detta bör betraktas som ett restscenario. Konsekvenserna av ett hypotetiskt fall där kapselbrott inträffar till följd av isostatisk last analyseras trots detta.
- Kapselbrott till följd av skjuvlaster: Detta funktionsfel analyserades för referensutvecklingen. Sannolikheten för att funktionsfelet skulle inträffa var låg, även då ett antal pessimistiska antaganden gjordes. Denna slutsats kvarstår efter de ytterligare analyser som utförts för skjuvlastscenariot. *Den pessimistiskt uppskattade förekomsten av kapselbrott till följd av skjuvlast fördes vidare till analyserna av skjuvscenariots konsekvenser.*
- Efter analyser av olika kombinationer drogs slutsatsen att relevanta kombinationer och den stegvisa utvecklingen av olika fenomen antingen har tagits upp i tidigare delar av analysen och i vissa fall förts vidare till konsekvensberäkningar, eller att det med relativt enkla kompletterande argument kunde visas att de inte ger upphov till ytterligare fall som måste beaktas. Det enda undantaget rör ett fall där kapselbrott till följd av skjuvlast följs av bufferterosion. Också detta fall fördes vidare till konsekvensberäkningar.

S3.11 Steg 9, del 2: Analys av fördröjningspotentialen för de valda scenarierna

Detta andra steg i scenarieanalyserna omfattar beräkningar av radionuklidutsläpp, radionuklidtransport och dospåverkan för de möjliga typer av kapselbrott som identifierats för varje scenario i analysen av inneslutningspotentialen. Syftet är att utvärdera systemets fördröjningsegenskaper för dessa scenarier och att kvantifiera risken. En fullständig redogörelse för konsekvensberäkningarna ges i SR-Sites **Radionuklidtransportrapport**.

Kriticitet

Om ett kapselbrott sker måste möjligheten för uppkomst av kriticitet beaktas, eftersom det skulle kunna ha en avsevärd inverkan på den fortsatta utvecklingen av en otät kapsel. Slutsatsen från kriticitetsanalyserna i SR-Site är att kapseln förblir underkritisk i förvaret i alla rimligen tänkbara fall.

Biosfären

Under de tidsperioder som är relevanta för säkerhetsanalysen kommer biosfären att genomgå betydande förändringar, särskilt på grund av långsiktiga klimatvariationer styrda av glaciationscykler. I de fall det förekommer utsläpp av radionuklider från förvaret, förväntas de potentiella aktivitetskoncentrationerna i ytvattnet att öka när förvarsplatsen höjer sig ur havet. Radionuklider, som eventuellt har ackumulerats i sediment, kan då tas upp i den terrestra näringskedjan i befintliga eller för jordbruksändamål omvandlade våtmarker. Det innebär att den potentiellt högsta exponeringen av människor och andra organismer för radionuklider från förvaret förväntas när förvarsplatsen åtminstone delvis har höjt sig ur havet. I SR-Site modelleras utvecklingen av landskapet i Forsmark under en interglacial klimatperiod i detalj. Landskapet delas upp i ett antal olika objekt och för varje objekt görs sedan utförliga modelleringar över utvecklingen i tiden. Enhetsutsläpp för relevanta nuklider matas sedan in till varje objekt och den resulterande tidsberoende omsättningen av radionuklider beräknas. Varje objekt antas pessimistiskt vara befolkat i sådan omfattning att mängden föda är precis tillräcklig för dess invånare, vilket innebär att de bara äter kontaminerad föda. Människorna antas i framtiden täcka sitt dricksvattenbehov till hälften från en kontaminerad brunn och till hälften från ytvattnet i den sjö eller det vattendrag som passerar genom objektet. Den tidsberoende radionuklidfördelningen i varje objekt leder till årsdoser som varierar i tiden för invånarna. För varje nuklid fastställs den högsta årsdosen över hela interglacialperioden och bland alla objekt, vilket ger en högsta årsdos per enhetsutsläpp av varje radionuklid till landskapet. Dessa landskapsspecifika omvandlingsfaktorer (Landscape Dose Conversion Factor, LDF) används för att omvandla utsläppshastigheter från förvaret till årsdoser. Detta tillvägagångssätt utgår från det faktum att utsläpp från förvaret i allmänhet varierar relativt långsamt under en interglacial.

Resultat av radionuklidtransport och dos för riskbidragande scenarier

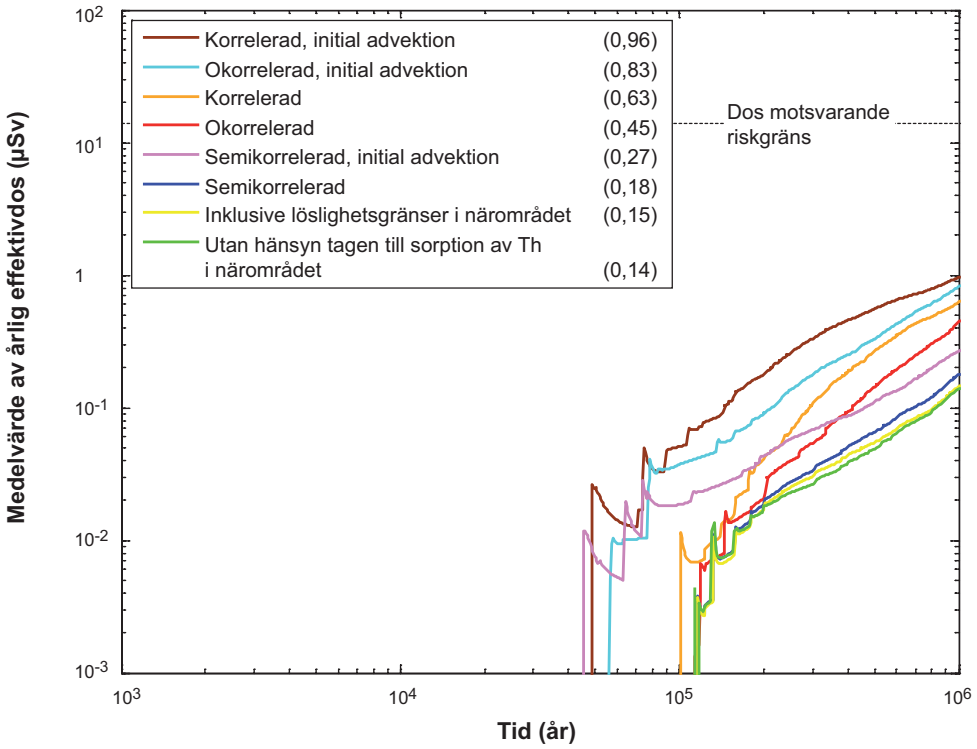
Enligt analysen av inneslutningspotential finns det två scenarier för vilka kapselbrott inte kan uteslutas: korrosionsscenariot och skjuvscenariot.

För korrosionsscenariot beaktas en uppsättning fall som täcker in det intervall för den möjliga omfattningen av korrosionsbrott som erhölls vid analysen av inneslutningspotentialen. De beräknade medeldoserna är minst en storleksordning lägre än den dos som motsvarar SSM:s riskgräns, se figur S-10. I de mest pessimistiska varianterna av detta scenario sker det första kapselbrottet – och således det första utsläppet – efter omkring 50 000 år. I dessa varianter är den genomsnittliga dosen efter 100 000 år omkring två storleksordningar lägre än föreskrifternas riskgräns och omkring en storleksordning lägre än gränsen efter en miljon år.

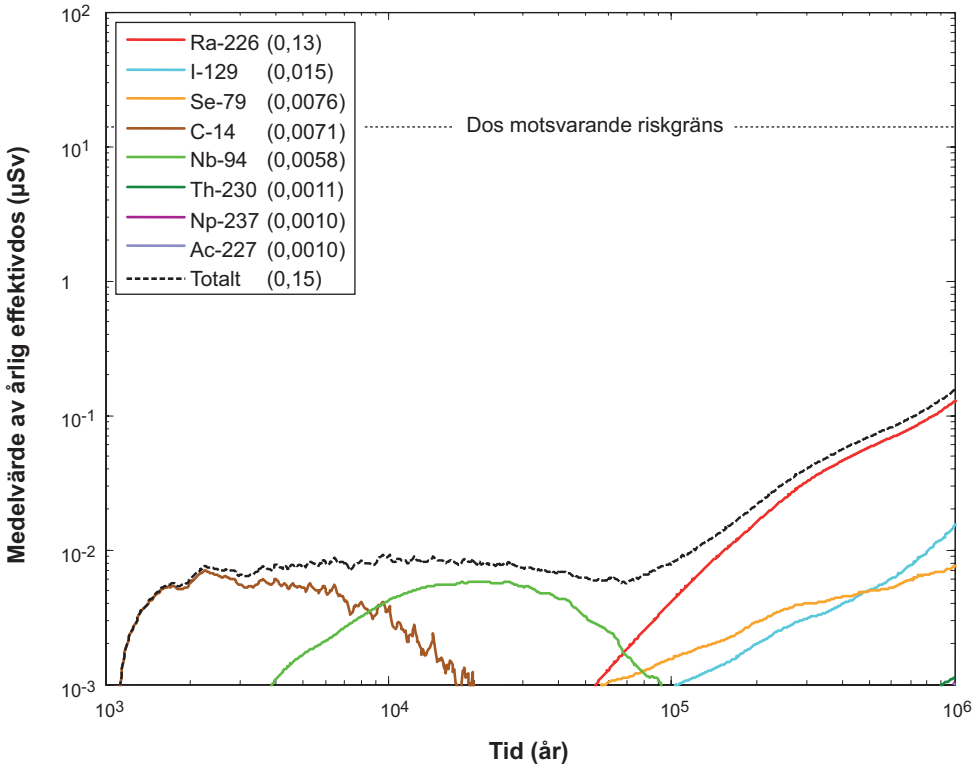
Eftersom flera beräkningsfall, alla med olika omfattning av kapselbrott i korrosionsscenariot, fördes vidare från analysen av inneslutningspotential varierade de beräknade medeldoserna inom en storleksordning. Även fall som täcker osäkerheter i transportförhållanden i närområdet har en liknande begränsad inverkan på beräkningsresultaten.

För skjuvscenariot används i konsekvensberäkningarna de pessimistiskt härledda sannolikheterna för kapselbrott till följd av skjuvlast från analysen av inneslutningspotential. Den beräknade genomsnittsdosen för de första 1 000 åren är försumbar jämfört med den dos som motsvarar föreskrifternas riskgräns. Mellan 1 000 och 100 000 år är den beräknade genomsnittsdosen omkring tre storleksordningar under gränsen. Därefter ökar genomsnittsdosen så att den efter en miljon år är omkring två storleksordningar under gränsen, se figur S-11.

Känslighetsanalyser av resultaten från den probabilistiska beräkningen visar att indataosäkerheter för bränsleupplösningshastigheten, för tidpunkten för kapselbrott och för det flödesrelaterade transportmotståndet i geosfären svarar för största delen av osäkerheterna i den beräknade dosen i ett givet beräkningsfall. Ytterligare osäkerheter hanteras genom att man formulerar varianter av beräkningsfall som exempelvis avser olika konceptuella hydrogeologiska modeller eller genom att man gör pessimistiska antaganden avseende exempelvis sannolikheten för kapselbrott till följd av skjuvlast. Inverkan av samtliga betydande osäkerheter på den beräknade risken utvärderas utifrån resultatet av risksummeringen. De möjligheter som finns att minska osäkerheterna diskuteras som återkoppling från analysen.



Figur S-10. *Sammanfattning av medelvärdet av den årliga effektivdosen från fjärrområdet för alla probabilistiska beräkningar som utförts för korrosionsscenariot. De maximala doserna visas inom parentes i µSv. I teckenförklaringen hänvisar "korrelerad", "okorrelerad" och "semikorrelerad" till tre varianter av den hydrogeologiska modell som används i SR-Site. De tre fallen med "initial advektion" ger den övre gränsen för de möjliga konsekvenserna av bufferterosion.*



Figur S-11. *Probabilistiskt beräknade konsekvenser i händelse av skjuvbrott för perioden mellan 1 000 år och en miljon år. Teckenförklaringen är ordnad efter sjunkande högsta medelvärde av årlig effektivdos under en miljon år (anges inom parentes i µSv).*

Beräkningsfall med hypotetisk fullständig förlust av barriärfunktioner

För att illustrera barriärernas funktion och som ett underlag för diskussionen om KBS-3-förvarets säkerhetskoncept har även en uppsättning beräkningsfall med hypotetiska, fullständiga förluster av barriärfunktioner analyserats. Följande fall med skadade barriärer har antagits:

A. Det saknas sådana mängder buffert att det uppstår advektiva förhållanden i samtliga 6 000 deponeringshål redan från början.

B. Ett initialt litet hål (benämnt pinnhål) i kopparhöljet hos samtliga 6 000 kapslar.

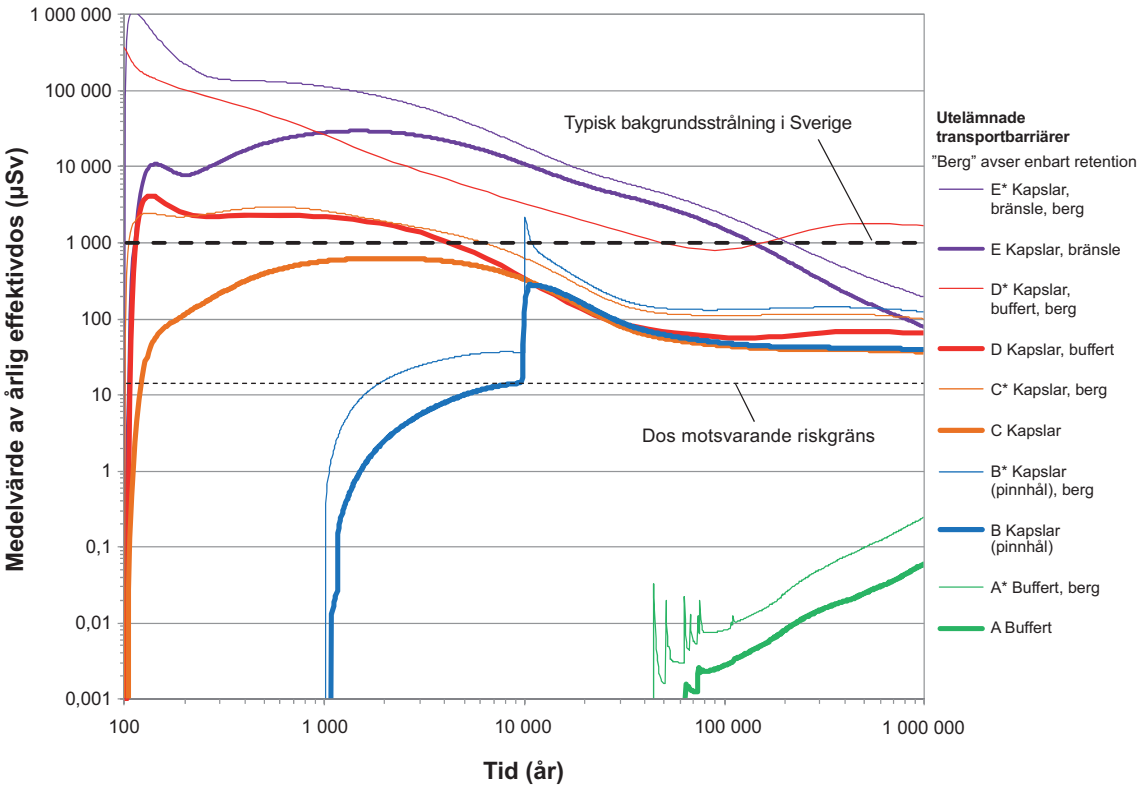
C. En stor initial öppning i kopparhöljet och i segjärnsinsatsen hos samtliga 6 000 kapslar.

D. En kombination av fall A och C, dvs en initial stor öppning i samtliga kapslar och advektiva förhållanden till följd av buffertförlust i samtliga 6 000 deponeringshål.

E. En kombination av fall C och antaganden om snabb bränsleupplösning och snabb korrosion av metalldelar. En stor initial öppning i varje kapsel kombineras med antagandet om fullständig bränsleupplösning och metallkorrosion inom bara 100 år.

Förlust av berggrundens förmåga att fördröja radionuklider kombineras med vart och ett av de fem fallen, vilket totalt ger tio utsläppssituationer. Fallen utan retention i geosfären benämns A* till och med E*.

I alla dessa fall antas det att återfyllningen och förslutningen är på plats och fungerar som förväntat. Alla egenskaper hos berggrunden – förutom de som är förknippade med retention – förutsätts vara oförändrade. Det gäller exempelvis grundvattenflödet i närområdet, som i allmänhet är litet och där bara en sjättedel av alla deponeringshål står i kontakt med en vattenförande spricka. I närområdet är även grundvattnets sammansättning stabil och gynnsam. Löslighetsgränser används för radionuklider i kapselns tomvolym endast i de fall då bufferten finns kvar. Detta är samma tillvägagångssätt som användes i analyserna av korrosions- och skjuvlastscenarierna. Den totala dosen för vart och ett av fallen visas i figur S-12.



Figur S-12. *Resultat av stiliserade fall för att illustrera förlust av barriärfunktioner. Notera att utelämnande av den barriär som ”berggrunden” utgör i dessa fall endast avser utelämnande av retention av radionuklider i sprickor. Den gynnsamma låga flödeshastigheten på förvarsdjup och de gynnsamma geokemiska förhållandena antas fortfarande gälla.*

Efter omkring 10 000 år är doserna för nästan samtliga fall lägre än den dos som orsakas av den normala bakgrundsstrålningen i Sverige. De enda undantagen är det fall där retentionsegenskaperna i kapseln, bufferten och bergrunden ignoreras (fall D*) och det fall där det förekommer snabb upplösning av bränslet i kombination med kapselbrott (fall E och E*). Det låga vattenflödet och den gynnsamma grundvattenkemin i berget samt närvaron av återfyllningen och förslutningen av förvarstunneln skyddar därför i hög grad mot ett bränsle för vilket upplösningshastigheten är oförändrad.

Ytterligare resultat

Ytterligare resultat från beräkningarna av utsläpp av radionuklider och dos presenteras i avsnittet med slutsatser nedan. Här ingår bland annat en summering av riskbidragen från de scenarier som inte kunde uteslutas från analysen, beräkningar av doser till levande organismer förutom människor, beräkningar som utförts med alternativa, förenklade analytiska modeller och användning av alternativa säkerhetsindikatorer.

S3.12 Steg 10: Ytterligare analyser och stödjande argument

Översikt

I detta steg av analysen görs ytterligare ett antal analyser för att fullborda säkerhetsanalysen:

- Analyser av scenarier som rör framtida mänskliga handlingar.
- Analyser för att påvisa optimering och användning av bästa möjliga teknik, BAT.
- Verifiering av att de FEP som uteslutits under tidigare delar av analysen har försumbar betydelse i ljuset av den genomförda scenarie- och riskanalysen.
- En kort redovisning av tidsperioden bortom en miljon år.
- Användning av naturliga analogier.

Nedan ges endast resultat från den första punkten. Vissa resultat från de övriga punkterna sammanfattas i slutsatsavsnittet i denna sammanfattning.

Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar

I enlighet med allmänt accepterade principer och SSM:s föreskrifter är de framtida mänskliga handlingar som studeras begränsade till globala föroreningar och handlingar som utförs efter förslutningen av förvaret, sker vid eller nära förvarsplatsen, är oavsiktliga och försämrar säkerhetsfunktionerna hos förvarets barriärer. För detta används ett systematiskt tillvägagångssätt som omfattar en teknisk analys, en analys av samhällsfaktorer, ett urval av representativa fall och slutligen scenariebeskrivningar och konsekvensanalyser av de fall som valts. De viktigaste slutsatserna från dessa analyser sammanfattas nedan.

- För ett stiliserat fall där borrpersonal oavsiktligt borrar igenom en kapsel och en del av det använda bränslet förs upp till ytan drogs följande slutsatser:
  - Doshastigheten som en individ bland borrpersonalen skulle utsättas för under tiden han eller hon arbetar i det mycket kontaminerade området kan vara relativt hög. Om borrningen sker omkring 5 000 år efter förslutningen av förvaret kommer emellertid doshastigheten att ha minskat till ett värde som understiger 1 μSv/timme.
  - Den totala dos som fås om borrhålet används som brunn 300 år efter förslutningen av förvaret understiger bakgrundsstrålningen.
  - Den högsta totala årliga effektivdosen från utnyttjande av mark för jordbruksändamål, vilken kontaminerats med bränslerester, är mycket hög. Det noteras dock att beräkningarna utförts med ett antal förenklade pessimistiska antaganden.
- Inverkan av ett öppet undersökningsborrhål på grundvattenflödet och på återfyllningens långsiktiga egenskaper i deponeringstunneln i närheten av borrhålet bedöms som försumbara.
- En tunnel som byggts i den övre delen av berggrunden skulle inte påverka grundvattenflödet på förvarsdjup på ett sådant sätt att existensen av tunneln skulle innebära att slutförvarets säkerhetsfunktioner hotas.
- Exploatering av de potentiella mineralresurserna i närheten av Forsmark skulle inte påverka förvarets säkerhetsfunktioner.

- Om förvaret överges utan att alla delar av det återfylls och försluts kan, enligt analysen av ett stiliserat FHA-scenario, innebära att återfyllningen i deponeringstunneln förloras och att säkerhetsfunktionerna för inneslutning bryts för de deponeringshål som ligger nära deponeringstunnlarnas mynning. Utan återfyllning i delar av systemet förväntas inga kapselbrott ske under den första perioden med tempererade förhållanden. Under den efterföljande nedisningsperioden, som förväntas pågå fram till 66 000 år efter nutid, kan korrosionsbrott inträffa och den beräknade årliga effektiva dosen från radionuklider i de otäta kapslarna överstiger föreskrifternas riskgränser. Med tanke på de stora osäkerheter och försiktiga antaganden som görs i analysen, kan resultatet betraktas som en förenklad illustration av möjliga följder. Resultatet pekar på nödvändigheten av att korrekt återfylla och försluta förvaret.

S4 Slutsatser från SR-Site

Som nämndes i början är den huvudsakliga slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site att ett KBS-3-förvar som uppfyller kraven för långsiktig säkerhet kan byggas i Forsmark.

Denna slutsats har kunnat dras eftersom de gynnsamma förhållandena i Forsmark säkerställer att KBS-3-förvarets barriärer är långsiktigt hållbara. Framför allt är kopparkapslarna och dess segjärnsinsatser tillräckligt motståndskraftiga mot de mekaniska och kemiska påfrestningar de kan komma att utsättas för i förvarsmiljön.

De utförliga analyser som gjorts på ett systematiskt sätt i enlighet med en fastlagd metodik visar att kapselbrott är sällsynta i ett tidsperspektiv på en miljon år. Även med flera pessimistiska antaganden om skadliga fenomen som påverkar bufferten och kapseln, är kapselbrott så sällsynta att deras försiktigt modellerade radiologiska konsekvenser hamnar betydligt under en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen.

S4.1 Översikt av resultaten

Uppfyllande av föreskrifternas riskkriterium

Ett förvar i Forsmark bedöms uppfylla föreskrifternas riskkriterium

De analyser som utförts i SR-Site visar att ett KBS-3-förvar i Forsmark som byggts i enlighet med nuvarande referensutformning, kommer att uppfylla det riskkriterium som SSM lagt fast.

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 på en miljon år finns ett litet riskbidrag från kapselbrott som orsakas av ökad korrosion till följd av bufferterosion

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 på 100 000 år för normalt färre än tio deponeringshål med höga flödeshastigheter.

Advektiva förhållanden i ett deponeringshål kommer att påskynda kapselkorrosionen. Under ett tidsperspektiv på 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 acceptanskriterier för ett deponeringshål.

Med pessimistiska antaganden om bufferterosion, kopparkorrosion och förhållanden för radionuklidtransport beräknas den radiologiska risken från sådana kapselbrott pessimistiskt till omkring 1/100 av föreskrifternas riskgräns under ett tidsperspektiv på 100 000 år och omkring 1/10 av föreskrifternas riskgräns under ett tidsperspektiv på en miljon år.

I ett tidsperspektiv på 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 på 100 000 år och lägre än 1/10 av riskgränsen i ett tidsperspektiv på en miljon år.

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, vilka inkluderar 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 vid de situationer med ökat flöde 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 kapselkorrosion 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.

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 realiseras 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 funktionsfel 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 den inte bidrar i någon större omfattning 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 (Excavation Damaged Zone, 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 egenskaper hos sprickor) i Forsmark. Majoriteten av deponeringshålen skärs inte av vattenförande sprickor, vilket ger en långsam mättning (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.

S4.2 Uppfyllelse av föreskriftskrav

Inledning

Det här avsnittet sammanfattar de viktigaste aspekterna när det gäller att påvisa att tillämpliga föreskrifter från SSM uppfylls. En fullständig redogörelse ges i bilaga A till huvudrapporten SR-Site, där föreskrifterna återges och hänvisning görs till de avsnitt i rapporten där varje fråga behandlas.

Säkerhetskonceptet och säkerhetens allokering till systemkomponenter

Som inledning till diskussionen om kravuppfyllelse ges en kort översikt av säkerhetskonceptet baserat på resultat från SR-Site-analysen. Den primära säkerhetsfunktionen i KBS-3-metoden är inneslutning och den sekundära är fördröjning, som mobiliseras om inneslutningsfunktionen inte upprätthålls.

Inneslutning för ett KBS-3-förvar i Forsmark

Inneslutningen ges av ett intakt kopparhölje hos kapseln. Hur denna funktion upprätthålls beror på buffertens funktion att begränsa advektiv transport mellan berget och kapseln samt på gynnsamma mekaniska, hydrogeologiska och geokemiska egenskaper hos berget: i) begränsade flödeshastigheter och en lägsta laddningskoncentration i grundvattnet för att undvika erosion hos bufferten, ii) begränsade flödeshastigheter 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 den eventuella 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 på 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 feltyp som inte kunde uteslutas, den till följd av jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som korsar deponeringshål, är ännu mindre sannolik. När denna feltyp 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 S-7. Många av dessa funktioner, som kapselns förmåga att motstå isostatiska laster eller bergets ”förmåga” att tillhandahålla en gynnsam bergtemperatur, bedöms kunna bestå under 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 S-12).

Fördröjning för ett KBS-3-förvar i Forsmark

De båda felmekanismer som inte kunde uteslutas påverkar flera barriärer. Kapseln, bufferten och berget påverkas alla, antingen genom en skjuvrörelse med skadliga verkningar eller genom hög flödeshastighet i geosfären. Detta påverkar både erosion och korrosion. Orsaken bakom dessa fel inverkar också på retentionsegenskaperna genom höga flödeshastigheter och i fallet med erosion genom frånvaron av buffert. Därigenom är förvarets fördröjningspotential i dessa särskilda fall begränsad för de kapslar som skadats. I stället uppnås säkerhet främst genom att bränslet löses upp långsamt och i mindre grad även genom att korrosionshastigheten hos metallstrukturdelarna 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 fås av de analyser av en hypotetisk fullständig förlust av barriärfunktioner som diskuterades i avsnitt S3.11.

Retentionen i bufferten är viktig under de första 1 000 åren och begränsad när man ser till längre tidsskeden (jämför fallen C och D i figur S-12). Det senare beror på det faktum att den totala dosen på lång sikt domineras av icke-sorberande eller mycket långlivade nuklider. En nuklidspecifik jämförelse avslöjar emellertid att bufferten 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.

Retention i berget spelar en likartad roll. När det gäller totaldos är den viktig för de första 1 000 åren och begränsad i det längre tidsperspektivet (jämför fallen C och C* i figur S-12), detta återigen eftersom totaldosen då domineras av nuklider som berget inte sorberar. En nuklidspecifik jämförelse avslöjar att bergets retentionsförmåga är stor för sorberande nuklider också på lång sikt, vilket inte syns i den totala dosen på grund av att de icke-sorberande nukliderna dominerar. Även de låga flödeshastigheterna på förvarsdjup spelar en stor roll för att begränsa utsläppshastigheten för radionuklider till berget.

Slutligen visar en jämförelse av t ex fallen E och C att den låga bränsleupplösningshastigheten har stor betydelse för att begränsa den beräknade totaldosen.

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 felmekanismerna i fråga påverkar flera barriärer, samt på att endast mycket

långlivade nuklider återstår när dessa fel inträffar. Som en latent funktion är fördröjningen betydande för en hypotetisk frigörelse av i synnerhet sorberande nuklider under hela analysperioden. För hypotetiska feltyper som bara drabbar kapseln, blir fördröjningen av sorberande nuklider i buffert och berg avsevärd.

Uppfyllelse av SSM:s riskkriterium

Uppfyllelse under de första 1 000 åren

Av kapselns tre identifierade brottyper, 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 1 000 åren, vilket framgår av referensutvecklingen och analyserna av scenarierna med korrosion och isostatisk last.

Skjuvlaster på kapseln kan förekomma som en följd av stora jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen. Fastän sannolikheten för stora jordskalv är högre under perioder med tektonisk spänning, t ex vid deglaciationer, kan det inte helt och hållet uteslutas att ett jordskalv med skadeverkningar skulle kunna äga rum under de inledande 1 000 åren.

Sannolikheten att en av de 6 000 kapslarna har förlorat sin integritet i slutet av den första 1 000-årsperioden uppskattas till $2{,}4 \cdot 10^{-5}$. Hypotetiskt skulle det alltså behöva byggas 40 000 förvar med 6 000 kapslar vardera för att ett enda kapselbrott under de första 1 000 åren ska förväntas. Trots denna extremt låga sannolikhet beräknades ett riskbidrag för de första 1 000 åren med resultat att medelårsdosen som högst ligger omkring 0,001 μSv/år, vilket motsvarar en risk på 10^{-10}/år. Denna analys baseras på detaljerad modellering av biosfärsutvecklingen och radionuklidtransport i det föränderliga landskapet under de inledande 1 000 åren, i enlighet med vad föreskrifterna från SSM kräver.

Därför dras slutsatsen att det analyserade förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium under de inledande 1 000 åren efter förslutning.

I hypotetiska fall med initialt defekta kapslar finns det flera egenskaper hos barriärsystemet som ger skydd, av vilka några är oviktiga eller svårare att hävda i längre tidsperspektiv. Med försiktiga antaganden skulle några av dessa egenskaper på egen hand förebygga alla utsläpp under de inledande 1 000 åren med en initialt defekt kapsel. Detta gäller speciellt den tid som det tar för vatten att komma i kontakt med bränsleelementen samt Zircaloykapslingens integritet.

Uppfyllelse för tiden bortom de första 1 000 åren

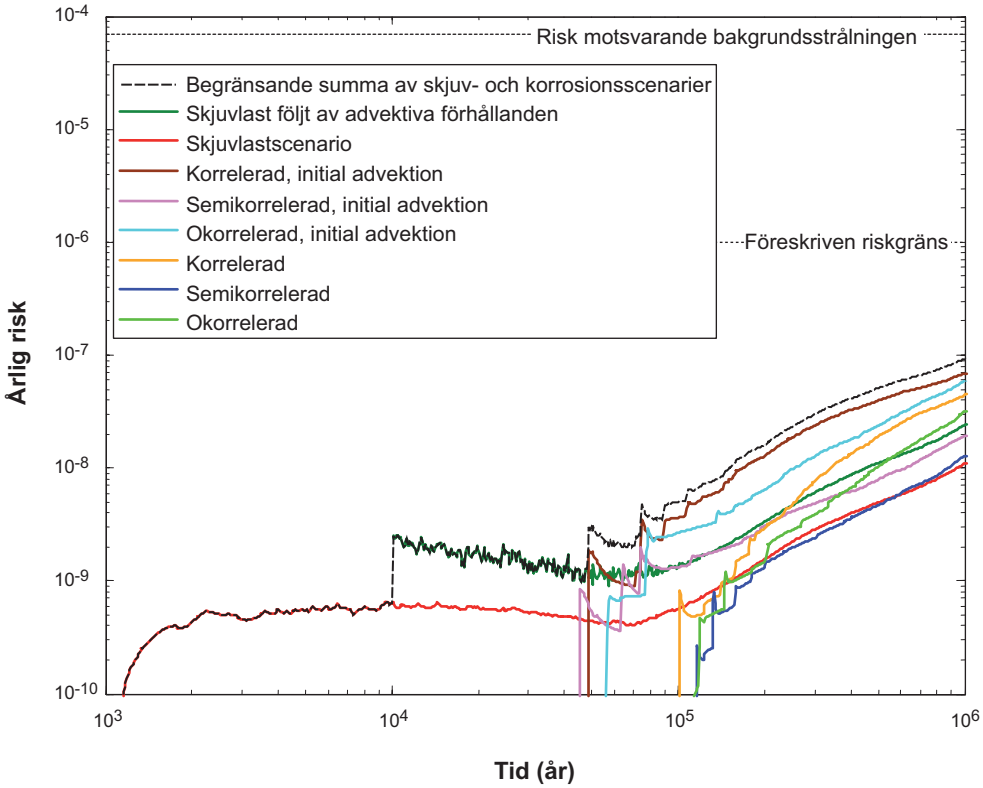
Den gränssättande, streckade kurvan i figur S-13 utgör summan av risken förknippad med skjuvscenariot och med korrosionsscenariot. Varje scenario representeras här pessimistiskt av det beräkningsfall som leder till den högsta risken.

Andra scenarier gav inte några bidrag till den beräknade risken. I redogörelsen för kombinationer av scenarier och fenomen drogs slutsatsen att konsekvenserna av ett skjuvlastbrott följt av bufferterosion behöver analyseras, och det görs i det gränssättande fallet för skjuvscenariot. Alla relevanta riskbidrag bedöms därför vara inkluderade i figur S-13.

Eftersom den begränsande kurvan i figur S-13 ligger under riskgränsen under den en miljon år långa analysperioden är bedömningen att det analyserade KBS-3-förvaret i Forsmark uppfyller föreskriftens riskkriterium. Det har också visats att riskutspädning inte talar 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 skadas av skjuvrörelser orsakade av stora jordskalv. Detta skulle kunna uppnås om något mindre pessimistiska antaganden kunde försvaras för skjuvscenariot.

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 befolkat, inklusive det objekt där den högsta dosen beräknas uppträda och vid den tidpunkt då detta inträffar. I själva verket 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 vid risksummeringen. I stället antas ständigt tempererade förhållanden, vilka ger de högsta doserna.



Figur S-13. *Riskkurvor, uttryckta som årlig risk för individen. Flera alternativ för korrosionsscenariot och två för skjuvscenariot visas. Den gränssättande streckade kurvan utgör summan av kurvan för skjuvbrott följt av advektiva förhållanden (mörkgrön) och kurvan för den variant av korrosionsscenariot som ger den högsta risken (brun). Risken förknippad med huvudscenariot täcks in av korrosionsscenariot, eftersom detta representeras av det semikorrelerade fallet (blå).*

Tiden bortom en miljon år

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 S3.11, 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 ger en indikation på att med stabil tektonik och bevarade reducerande förhållanden i förvaret kan den uranoxid som bränslematrisen består av vara stabil under många miljoner år.

Alternativa säkerhetsindikatorer

Särskilt när det gäller tider långt in i framtiden blir den beräknade risken allt mindre användbar som en indikator på förvarssäkerhet. Enligt SSM:s föreskrifter ska alternativa indikatorer därför också utvärderas. Fyra alternativa säkerhetsindikatorer används i SR-Site. Följande resultat erhölls för 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, orsakade av Ra-226 som släppts ut från förvaret, är ungefär två storleksordningar lägre än de naturligt förekommande lokala flödena av Ra-226 som de uppskattas från platsdata. Skillnaden är större för U-234 och U-238, se figur S-14. Totalutsläppet 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.

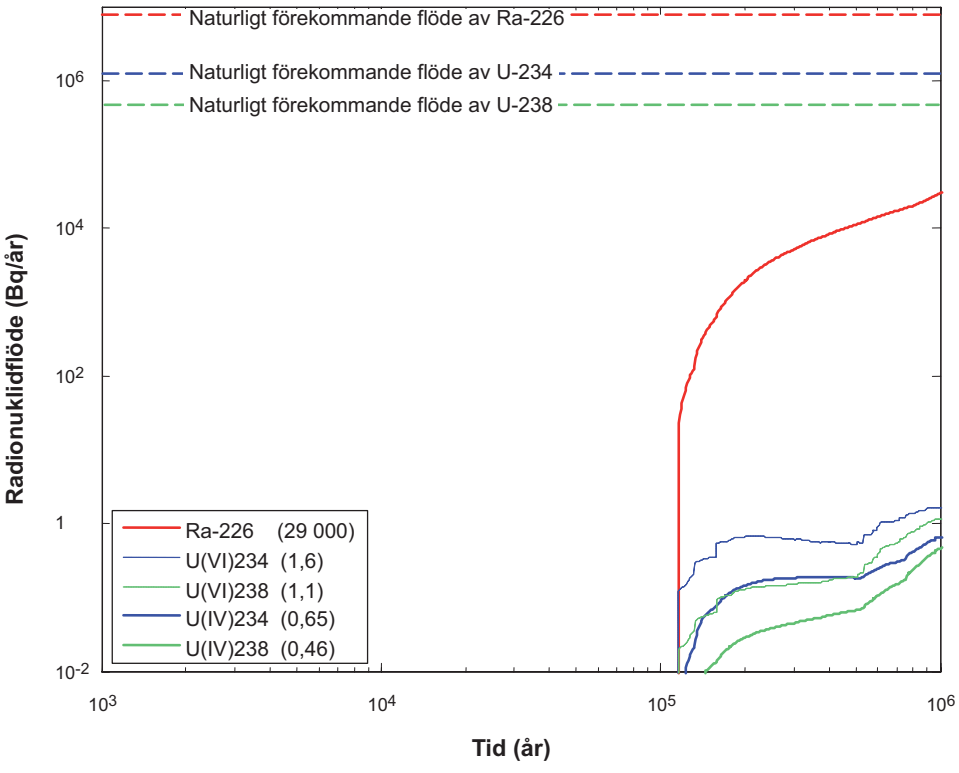
Resultaten är tillämpbara också på andra korrosionsfall, för flertalet indikatorer genom att helt enkelt skala till utsläppet av Ra-226, vilken som mest är en storleksordning högre än den för det centrala korrosionsfallet. Liknande slutsatser dras för skjuvlastscenariot.

Sammanfattningsvis visar tillämpningen av alternativa indikatorer att utsläpp från förvaret ligger storleksordningar under de referensvärden som antagits för indikatorerna. Det pekar 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.

Osäkerheter förknippade med riskberäkningen för olika tidsperioder

Osäkerheter som påverkar den beräknade risken i betydande utsträckning har identifierats i korrosions- och skjuvscenarierna. Hanteringen av dessa osäkerheter i SR-Site har sammanfattats tillsammans med hänvisningar till planer för att minska dessa osäkerheter. Flertalet osäkra faktorer har behandlats pessimistiskt, medan några har hanterats med sannolikhetsfördelningar i riskberäkningar där deras fulla osäkerhetsintervall används för att fastställa genomsnittliga årsdoser, 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 hävdas stå för en övre gränssättande risk. Eftersom denna övre begränsning ligger under riskgränsen under hela den en miljon år långa analysperioden har det inte identifierats några riskrelaterade osäkerheter som är av kritisk betydelse att lösa.



Figur S-14. *Utsläppshastigheter (Bq/år) från fjärrområdet för U-238, U-234 och Ra-226 i det centrala korrosionsfallet jämförda med de naturligt förekommande flödena i Forsmark.*

Effekter på miljön av radionuklidutsläpp

Doser för icke-mänsklig biota har beräknats för det centrala korrosionsfallet. De högsta doshastigheterna till organismer i havsvattens-, sötvattens- och landekosystem i Forsmark, både totalt och för de dosdominerande radionukliderna, ligger väl under den doshastighet (10 μGy/h) som rekommenderas som gräns i den s k ERICA-metoden. Därför dras slutsatsen att de radionuklidutsläpp som förutsägs i detta fall inte kommer att leda till några biologiska effekter av betydelse för individer hos funna arter eller för de arter som kan komma att finnas i framtiden på förvarsplatsen. Följaktligen förväntas inga skadeverkningar på populationer, samhällen eller ekosystem. Slutsatsen går att tillämpa på alla andra fall som ingår i risksummeringen.

Användandet av bästa möjliga teknik, BAT

Enligt svensk lag måste en ansökan för ett slutförvar för använt kärnbränsle behandla frågan om bästa möjliga teknik (Best Available Technique, BAT). Eftersom en allmän redovisning av användandet av BAT är en omfattande fråga, som spänner från valet av metod för omhändertagande av kärnavfall till detaljer i den valda metoden, kan och ska endast en begränsad del av denna fråga beaktas i säkerhetsanalysen av den valda metoden. Återkoppling kan ges om huruvida förändringar i den analyserade referensutformningen skulle kunna leda till minskad risk eller till minskade osäkerheter som kan påverka risken. Beträffande aspekter på utformningen där man realistiskt inte kan uppnå någon sådan minskning av risk eller osäkerheten i uppfyllandet av säkerhetsfunktioner hävdar SR-Site att lösningen är optimal och motsvarar BAT. SR-Site analyserar emellertid inte alla tänkbara tekniska lösningar. SKB kommer att fortsätta den tekniska utvecklingen av flera sidor av utformningen för att på så vis förenkla byggande och genomförande, men kommer bara att använda sig av dessa lösningar om de leder till en risk som är jämförbar med eller lägre än den som redovisats i SR-Site. Följande slutsatser gäller beträffande BAT:

- Inga behov av att ändra på *kapselutformningen* har identifierats ur ett säkerhetsperspektiv. Förmågan hos segjärnsinsatsen att motstå skjuvlaster beror emellertid främst av 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 även att rigorösa krav på tillverkningen och på OFP (oförstörande provning) behöver ställas. Dessutom har det inte genomförts någon formell analys av om insatserna avsedda för PWR-bränsle uppfyller kriterierna, men PWR-utformningen är robustare till följd av segjärnsinsatsens tjockare material.
- Det finns potential för att ytterligare minska risken förknippad med skjuvning genom att ytterligare minska den maximalt tillåtna buffertdensiteten och anpassa produktionen av buffert och deponeringshål till en sådan utformning. Det råder osäkerhet beträffande modelleringen av kolloidfrigörelse och efterföljande erosion av buffertmaterialet och angreppssättet i modelleringen tenderar att vara pessimistiskt, men det finns med nuvarande kunskaper inte något försvarbart sätt att minska denna genom att exempelvis välja ett annat buffertmaterial. Det finns behov av ett fortsatt forskningsprogram om mekanismen för bufferterosion.
- Möjligen går det att förbättra återfyllningens utformning med avseende på hur den installeras. Däremot har det inte identifierats något behov av att ändra utformningen för att ytterligare förbättra dess säkerhetsfunktion.
- Acceptanskriterier för deponering i form av EFPC ger tillräckligt skydd mot skjuvbrott. Det finns dock anledning att genomföra de insatser som planeras i det detaljerade undersökningsprogrammet, eftersom EFPC i onödan innebär att många hål som bara skärs av korta sprickor diskvalificeras. Andra sätt att identifiera stora sprickor skulle kunna öka effektiviteten hos kriteriet utan att tappa säkerhet och även höja säkerhetsnivån, eftersom fokus för de detaljerade undersökningarna skulle ligga på de få sprickor som är av potentiellt intresse. Tillämpning av EFPC är också viktig för att skydda mot korrosionsbrott, och det tycks finnas potential att ytterligare förbättra säkerheten genom att undvika deponeringshål med höga inflöden.
- Det valda förvarsdjupet är lämpligt och ett ändrat djup bedöms inte kunna minska den beräknade risken. En ytligare placering, t ex grundare än 400 m, skulle kunna öka risken eftersom förekomsten av vattenförande sprickor är högre där. Att placera förvaret något hundratal meter djupare ner skulle förmodligen resultera i en risk i samma intervall som råder på valt djup. Placeringar mycket djupare ner skulle innebära ett behov av att beakta ytterligare faktorer, exempelvis mycket höga spänningsnivåer.

S4.3 Återkoppling från analyserna i SR-Site

Konstruktionsförutsättningar

SR-Site visar på en tillräcklig säkerhet för ett förvar i Forsmark som byggts enligt referensutformningen och i överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna. Därför bedöms de flesta av de redan fastslagna konstruktionsförutsättningarna och tillhörande referensutformningar vara ändamålsenliga, medan några bör ses över. De viktigaste föreslagna omarbetningarna av konstruktionsförutsättningarna är som följer:

- De nuvarande konstruktionsförutsättningarna ifråga om isostatisk belastning skulle behöva ses över för att beakta osäkerheten avseende framtida istjocklek.
- Resultaten från SR-Site pekar på att riskbidraget från skjuvlaster på kapseln skulle minskas ytterligare ifall buffertdensiteten vore lägre än maximivärdet 2 050 kg/m^3. Erfarenhet från arbetet med buffertdesignen antyder att det skulle vara möjligt att ersätta den övre gränsen med en fördelning av tillåtna densiteter så att bara en liten andel av deponeringshålen skulle ha densiteter i närheten av 2 050 kg/m^3. En sådan fördelning kunde också ta hänsyn till halten av montmorillonit i buffertmaterialet.
- Alternativa lösningar till den nuvarande konstruktionen av bottenplattan borde undersökas. Idealt bör bara kapsel och bentonit vara tillåtna i ett deponeringshål.
- Så långt som det rimligen går ska deponeringshål enligt de nuvarande konstruktionsförutsättningarna väljas så att större skjuvning än vad kapseln kan stå emot inte är möjlig. EFPC är ett verktyg för att identifiera sådana stora sprickor, men det kan ersättas eller kompletteras av andra verktyg om dessa visar sig ge jämförbar eller lägre risk.
- Analyserna i SR-Site talar för att den beräknade risken skulle minska om det vore möjligt att identifiera de deponeringshål som har de största vattenflödena under mättade förhållanden. Det föreslås att de nuvarande konstruktionsförutsättningarna revideras så att man undviker deponeringshål med potential för höga vattenflöden under analysperioden. Den praktiska utformningen av regeln kräver vidareutveckling. Ett förslag till regel kan vara att undvika deponeringshål som skärs av hydrauliskt förbundna transmissiva sprickor som kan ge högre inflöde än 0,1 l/min. Detta betyder även att deponeringshål som skärs av sprickor där injekteringsbruk är synligt också skulle behöva uteslutas. Kriteriet kan behöva kombineras med att tillämpa EFPC på hela deponeringshålet, men bara i fråga om sprickor som uppvisar potential för grundvattenflöde.
- De olika fall som analyseras i SR-Site bekräftar att den föreslagna tillåtna transmissiviteten på 10^{-8} m^2/s för en hydrauliskt förbunden EDZ i deponeringstunnlar är rimlig och inte behöver sänkas. Transmissiviteten för en hydrauliskt förbunden EDZ som går över detta värde börjar påverka risken och behöver undvikas.

Detaljerade platsundersökningar

Även om tilltron till förståelsen av förvarsplatsen anses som tillfredsställande och återstående osäkerheter är tillräckligt avgränsade för att medge gränssättande riskuppskattningar, kan förvaret optimeras ytterligare med avseende på effektivitet och riskreducering. Många sådana potentiella förbättringar handlar om möjligheterna att anpassa deponeringstunnlar och deponeringshål till de lokala förhållanden som påträffats i berget, även om några frågor återstår när det gäller egenskaperna hos bergmassan utanför den omedelbara närheten av deponeringsområdena. Det går därför att göra en återkoppling till de detaljerade platsundersökningarna och platsmodelleringen för att prioritera och ytterligare specificera utvecklingsbehoven i befintliga planer.

Planer för det detaljerade undersökningsprogrammet har utvecklats av SKB. Inom ramen för dessa planer framhäver resultaten i SR-Site behoven av att:

- Avgöra den faktiska utsträckningen av påverkanszonen kring de få deformationszoner som kan drabbas av större jordskalv vid förvarsplatsen i Forsmark.
- Utveckla metoder för att gränssätta storleken på sprickor som skär deponeringshål.
- Minska osäkerheten i den geologiska DFN-modellen.
- Utveckla sätt att finna (och sedan undvika) hydrauliskt förbundna transmissiva sprickor som kan orsaka höga inflöden till och omkring deponeringshål.

- Minska osäkerheterna i den faktiska fördelningen av hydrauliska egenskaper mellan vattenförande sprickor.
- Utveckla metoden för kontroll av EDZ liksom att visa på tillförlitligheten för denna metod.
- Karakterisera både bergspänningen och spjälkningshållfastheten hos berget.
- Stärka tilltron till utvärderingar av framtida sulfidnivåer.
- Komplettera data för vissa parametrar när det gäller biosfärsmodelleringen.

Allmänt bedöms de planer som presenterats i ramprogrammet för detaljundersökningar som adekvata för dessa frågor.

Forskning om processer av betydelse för långtidssäkerheten

I enlighet med en god säkerhetskultur bör forskning om processer av betydelse för säkerheten drivas vidare, även om nuvarande kunskap är tillräcklig för att styrka den långsiktiga säkerheten. Mer specifikt finns det några frågor som genom SR-Site har visat sig bidra till risk och där grunden för säkerhetsanalysen kan förbättras genom mer FoU.

- För det använda bränslet omfattar sådana frågor fortsatta ansträngningar för att förstå mekanismerna för upplösning av använt bränsle och för att kvantifiera i) inventariet i gränsen mellan spalt och korn och ii) korrosionshastigheterna för avfallets metallkomponenter.
- Att förstå kopparkorrosion är grundläggande för säkerhetskonceptet. Även om tilltron bedöms vara hög är det fortfarande viktigt att fortsätta pågående forskning. För kapseln är det av grundläggande betydelse att förstå deformationen av segjärn för att förstärka tilltron till analysen av hur mekanisk belastning påverkar kapseln. Att förstå koppardeformation under yttre tryck är också väsentligt för tilltron till analysen av hur mekanisk belastning påverkar kapseln. Förhållanden som orsakar spänningskorrosion bedöms inte förekomma i förvaret, men grundläggande forskning kring att identifiera de förhållanden som krävs för spänningskorrosion i koppar bör fortsätta.
- Beträffande bufferten bör fortsatt forskning ske om vattentransport, gastransport, kanalbildning/erosion, homogenisering och självläkning, förändringar hos montmorillonit samt om reologiska effekter vid cementering. Utifrån studierna av bufferterosion/kolloidfrigörelse har slutsatsen dragits att processen inte enkelt kan försummas och att det finns behov av ett fortsatt FoU-program. Ytterligare studier skulle kunna minska den nuvarande pessimismen i antagandena.
- Mycket av den FoU som har att göra med geosfären täcks in av det detaljerade undersökningsprogrammet, men forskning om vissa av processerna bör fortgå. Forskningsområden av intresse omfattar insatser för att hantera och mildra effekterna av termiskt inducerad spjälkning, fortsatt forskning om kopplade termohydromekaniska processer i berg, analyser av potentialen för jordskalv inklusive fortsatt utveckling av simuleringsverktygen för jordskalv, utveckling av DFN-metodiken, bättre avgränsning av hur sulfidhalterna förväntas utvecklas vid förvarsplatsen i Forsmark, vilken roll mikrobiell aktivitet har när det gäller att upprätthålla en låg och stabil redoxpotential, för sulfidbildning och syreförbrukning, och betydelsen av kanalbildning för transporten av radionuklider.

Det finns också ett antal frågor beträffande biosfären och det framtida klimatet som är av intresse att driva vidare i FoU-programmet.

S4.4 Tilltron till analysresultaten

Analysen i SR-Site stödjer SKB:s ansökan om ett slutförvar, som utgör en avgörande beslutspunkt i SKB:s program för att hantera använt kärnbränsle. Ett uttalande om tilltron till de resultat som tagits fram i SR-Site är därför adekvat. 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, och det har inte identifierats några platsrelaterade frågor som behöver klaras ut ytterligare 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 analyserades och dokumenterades i detalj i **Platsbeskrivning Forsmark**.

- Det finns en väl etablerad referensutformning med specificerade och genomförbara produktions- och kontrollprocedurer som resulterar i ett initialtillstånd för förvarssystemet med egenskaper som främjar långsiktig säkerhet 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. Exempel på viktiga aspekter av initialtillståndet för de tekniska barriärerna är:
  a. Kvaliteten hos kopparkapselns förslutningsteknik.
  b. Kvaliteten hos segjärnsinsatsens produktion.
  c. Buffertegenskaper som densitet och innehåll av montmorillonit och föroreningar.
  d. Egenskaper hos återfyllningen som säkerställer dess förmåga att hålla bufferten på plats och svälla.
  e. Kvaliteten hos metoderna 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 utvecklas och realiseras.
- Den vetenskapliga förståelsen av frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad som en följd av decenniers forskning inom svenska och andra nationella program och internationella samarbetsprojekt. FoU-insatserna 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 processer relaterade till fördröjning. I SR-Site har dessa kunskaper systematiskt dokumenterats i flera rapporter på ett format anpassat för säkerhetsanalysen.
- Huvudrapporten i SR-Site och dess understödjande dokument har undergått omfattande expertgranskningar. 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 exempelvis inbegriper ett försiktigt förhållningssätt vid hanteringen av osäkerheter.
  – Förståelsen av säkerhet bygger på systematisk identifiering av säkerhetsfunktioner och kriterier för säkerhetsfunktioner.
  – Förvarsutvecklingen har analyserats med ett strukturerat angreppssätt i flera tidsskalor. De processer som identifierats som relevanta har beaktats inom varje tidsskala och säkerheten i systemet, uttryckt som säkerhetsfunktioner, har satts i fokus. Dataosäkerheter och datakvalitet har analyserats och dokumenteras enligt en på förhand bestämd mall. Kvalitetssäkring av modeller och modellering uppnås genom att följa de procedurer som dokumenterats i **Modellrapporten**. Analysen bryts sedan ner till en uppsättning scenarier för att uttömmande pröva alla möjliga sätt på vilka de identifierade säkerhetsfunktionerna skulle kunna hotas och konsekvenserna av sådana situationer. Ytterligare argument och analyser tillhandahålls enligt avsnitt S3.12.
  – Tilltron till de huvudsakliga resultaten kring 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 viktigaste resultaten för 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 utvecklandet 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.

S5 Översikt av SR-Sites huvudrapport

Efter det inledande kapitlet 1 sammanfattar huvudrapporten metodiken för analysen i SR-Site i kapitel 2 och presenterar i kapitel 3 hanteringen av egenskaper, händelse och processer, FEP, som är av vikt för den långsiktiga säkerheten. I kapitel 4 presenteras förvarsplatsen och i kapitel 5 initialtillståndet för det uppförda förvaret. I kapitlen 6 och 7 presenteras planerna och metoderna för att hantera extern påverkan respektive interna processer. Säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer diskuteras i kapitel 8. Metodiken för värdering och sammanställningen av indata för analysen beskrivs i kapitel 9. Det material som presenteras i de första nio kapitlen används vid analysen av referensutvecklingen i kapitel 10, där fokus ligger på förvarets inneslutningsförmåga. Scenarier för den fortsatta utvärderingen av säkerheten väljs i kapitel 11. De valda scenarierna analyseras med avseende på inneslutningspotential i kapitel 12 och med avseende på fördröjningspotential i kapitel 13 genom utvärdering av radionuklidtransport och dos. Ytterligare analyser till stöd för säkerhetsanalysen presenteras i kapitel 14. Slutsatser och återkoppling ges i kapitel 15.

I kapitel 16 ges en referenslista. Bilaga A är en redogörelse för hur tillämpbara föreskrifter beaktas i analysen. En ordlista över förkortningar och specialisttermer som används i SR-Site återfinns i bilaga B. En topografisk karta över Forsmarksområdet finns i bilaga C.

1 Inledning

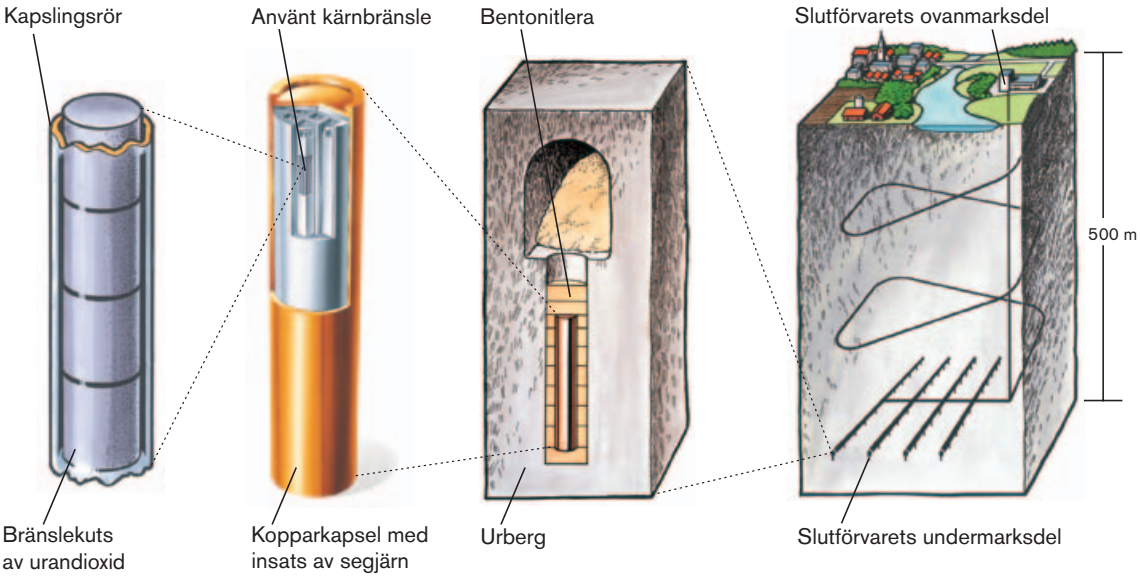
1.1 SKB:s program för använt kärnbränsle

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, har till uppgift att ta hand om det radioaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken. Inom SKB:s kärnbränsleprogram är för närvarande (mars 2011) ett mellanlager och ett transportsystem i bruk. Flera decenniers forskning och utveckling har lett till att SKB föreslår KBS-3-metoden för slutförvaring av det använda kärnbränslet. Enligt denna metod placeras det använda kärnbränslet i en segjärnsinsats inuti en kopparkapsel. Kapseln deponeras sedan på omkring 500 meters djup i grundvattenmättat granitiskt berg och omges där av en buffert av bentonitlera, se figur 1-1. Syftet med KBS-3-förvaret är att isolera det använda kärnbränslet från människa och miljö under mycket lång tid, se vidare avsnitt 2.4. Det svenska kärnkraftsprogrammet (där planen är att den sista av de tio reaktorer som nu är i drift, ska tas ur bruk 2045) beräknas ge upphov till omkring 12 000 ton använt bränsle. Detta motsvarar ungefär 6 000 kapslar i ett KBS-3-förvar.

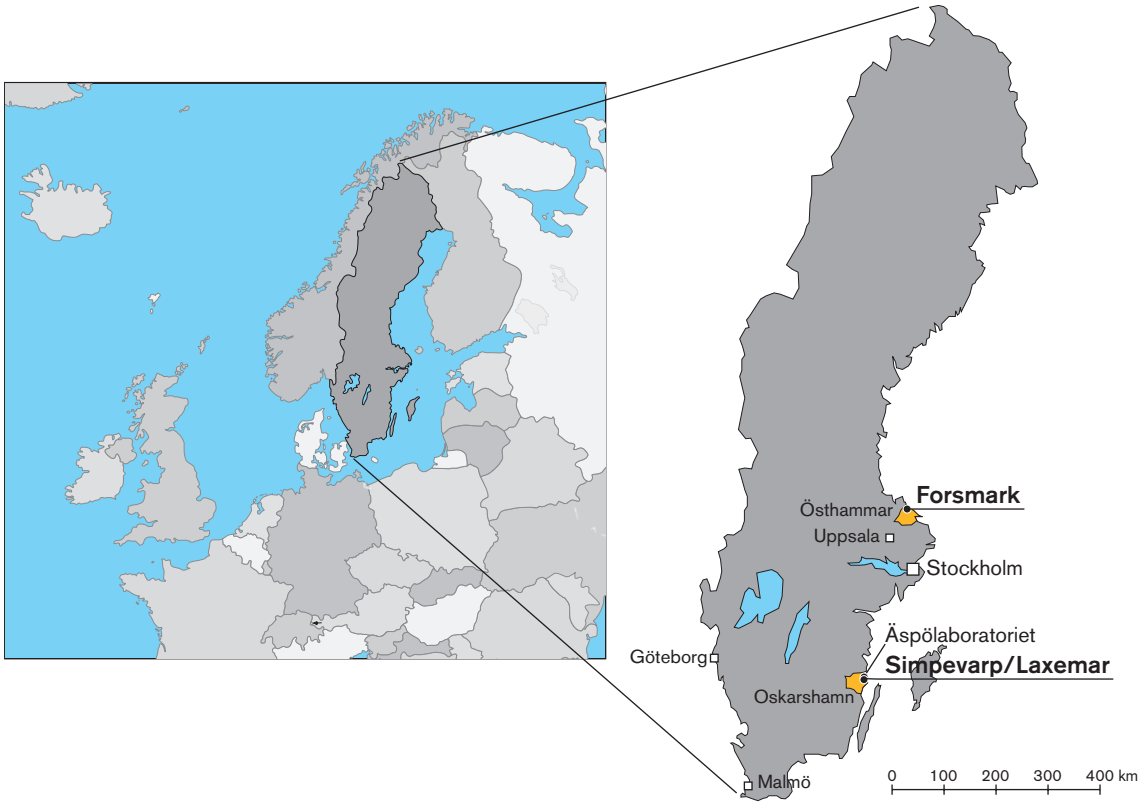
Två huvuduppgifter återstår i programmet: att bygga och driva i) slutförvaret för använt kärnbränsle och ii) en inkapslingsanläggning, där det använda bränslet placeras i kapslar som därefter deponeras i slutförvaret.

SKB har genomfört platsundersökningar för ett slutförvar i Östhammars kommun (Forsmark) och Oskarshamns kommun (Laxemar), se figur 1-2. I juni 2009 valde SKB Forsmark som plats för slutförvaret. Denna rapport utgör huvudrapporten från analysen av förvarets långsiktiga säkerhet och ingår i ansökningarna om att bygga och driva slutförvaret i Forsmark. Valet av Forsmark motiveras i en separat rapport, som lämnas in som bilaga till tillståndsansökan /SKB 2010e/.

SKB har vidare valt Oskarshamn som plats för att bygga inkapslingsanläggningen, i anslutning till det redan befintliga mellanlagret för använt kärnbränsle. En ansökan för inkapslingsanläggningen lämnades in i november 2006 och kompletterades i oktober 2009.



Figur 1-1. *KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle.*



Figur 1-2. *De två platser som har undersökts för ett slutförvar, Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun.*

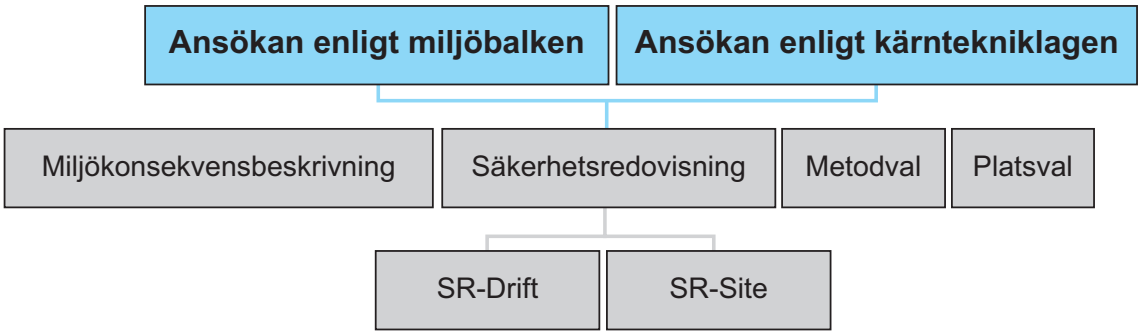
1.1.1 SR-Site-rapportens roll i tillståndsansökningarna

SR-Site-rapporten ingår i SKB:s ansökningar om att bygga och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. SKB kommer att lämna in två tillståndsansökningar, en enligt lagen om kärnteknisk verksamhet och en enligt miljöbalken. SR-Site-rapporten ingår i båda ansökningarna, se figur 1-3.

Tillståndsdokumentationen består av ett ansökningsdokument och en uppsättning bilagor. Viktiga bilagor är Miljökonsekvensbeskrivningen och Säkerhetsredovisningen. Säkerhetsredovisningen inleds med ett övergripande dokument, som sammanfattar och integrerar olika aspekter av strålsäkerhet under driften samt efter förslutningen av förvaret.

Säkerhetsredovisningen innehåller dessutom två delrapporter som ger mer djupgående analyser av säkerheten. Dessa är driftsäkerhetsrapporten, SR-Drift, och denna SR-Site-rapport, som behandlar den långsiktiga säkerheten efter förslutning. SR-Drift beskriver hur säkerheten upprätthålls under driften och vid förslutningen. Den avhandlar också de åtgärder som vidtas för att säkerställa att driften genererar det initialtillstånd som ligger till grund för de analyser av den långsiktiga säkerheten som redovisas i SR-Site. SR-Drift innehåller en analys av hur oupptäckta misstag skulle kunna påverka den långsiktiga säkerheten. Några sådana oupptäckta misstag har inte identifierats. En detaljerad redovisning av produktionen, driften och kvalitetskontrollen, som har betydelse för den långsiktiga säkerheten, ges i ett antal **Produktionsrapporter**. Dessa utgör referenser till både SR-Site och SR-Drift. SR-Drift behövs således inte som referens till SR-Site. Ytterligare hänvisningar till SR-Drift görs därför inte i denna rapport.

I ansökningarna ingår också särskilda bilagor avseende valet av KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle och valet av Forsmark som platsen för slutförvaret. Det finns två varianter av KBS-3-metoden – vertikal (KBS-3V) och horisontell (KBS-3H) deponering av kapslarna. Tillsammans med Posiva, den finska organisationen för avfallshantering, har SKB studerat horisontell deponering. Horisontell deponering för KBS-3 framstår som möjlig, men avgörande teknisk utveckling och forskning återstår för att kunna besvara kritiska frågor i samma utsträckning som redan gjorts för KBS-3V. SR-Site-projektet och tillståndsansökningarna gäller den vertikala deponering som visas i figur 1-1.



Figur 1-3. *Förenklad struktur för SKB:s tillståndsansökningar för att bygga och driva ett slutförvar i Forsmark.*

1.2 Syftet med säkerhetsanalysprojektet SR-Site

Som nämns i avsnitt 1.1.1 är rollen för säkerhetsanalysen SR-Site i SKB:s tillståndsansökningar att visa att det förvar som SKB har för avsikt att bygga i Forsmark är långsiktigt säkert. Syftet med säkerhetsanalysprojektet SR-Site är att undersöka huruvida det slutförvar som SKB avser att bygga i Forsmark är säkert. Under förutsättning att säkerhet kan påvisas kan SR-Site tjäna sitt avsedda syfte i ansökningarna.

Huvudsyftena för säkerhetsanalysprojektet SR-Site är:

- Att utvärdera säkerheten, såsom den definieras i gällande svensk lagstiftning, för det föreslagna KBS-3V-förvaret i Forsmark.
- Att ge återkoppling till arbetet med att utforma förvaret, till SKB:s program för forskning och utveckling, till kommande detaljerade undersökningar av platsen samt till framtida säkerhetsanalyser.

Även om SKB har fastställt en tekniskt genomförbar referensutformning och layout av KBS-3V-förvaret och visat att denna överensstämmer med de angivna konstruktionsförutsättningarna, se vidare kapitel 5, kommer det tekniska utvecklingsarbetet att fortsätta. Detaljutformningar av en process i industriell skala – som uppfyller särskilda krav avseende kvalitet, kostnad och effektivitet – återstår att utarbeta. Förvarslayouten måste anpassas till de lokala förhållanden som påträffas när slutförvaret byggs. Dessa potentiellt bättre lösningar ska resultera i en minst lika hög säkerhetsnivå som vid den aktuella referensutformningen, vilken analyseras i SR-Site.

Säkerhetsanalyser i olika skeden av programmet kommer att utnyttja den information som just då finns tillgänglig. Information om samtliga delar av förvaret och olika frågeställningar behövs i varje skede, eftersom säkerheten beror på alla dessa komponenter. Fokus för en särskild analys kommer inte bara att bestämmas av den tillgängliga informationen utan även av analysens syfte, dvs det eller de beslut som den är avsedd att utgöra underlag för.

SR-Site-rapporten ingår i tillståndsansökningarna. Syftet med SR-Site-rapporten är att undersöka om ett förvar i Forsmark enligt KBS-3-metoden har potential att uppfylla myndigheternas säkerhetskriterier. Utgångspunkten är de förhållanden som, enligt resultaten från platsundersökningar från ytan, råder i berget. Analysen baseras vidare på en referensutformning av förvarets barriärer och på referensmetoder för att åstadkomma den specificerade utformningen, där hänsyn tas till de metoder som används för att kontrollera att referensutformningens specifikationer har uppnåtts. Ett annat viktigt syfte är att ge återkoppling till en vidareutveckling av specifikationen, i synnerhet genom att tillhandahålla ny information så att uppdaterade konstruktionsförutsättningar kan tas fram.

1.3 Återkoppling från SR-Can-rapporten

Ett viktigt steg på vägen fram till denna rapport var att ta fram rapporten för säkerhetsanalysen SR-Can, som publicerades i november 2006 /SKB 2006a/. Huvudsyftet med SR-Can var att redovisa en första analys av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-förvar med vertikal deponering i Forsmark respektive Laxemar, baserad på data från den inledande fasen av platsundersökningarna. Syftet var också att främja dialogen med ansvariga myndigheter om hur de tillämpliga föreskrifterna bör tolkas och om det

tillvägagångssätt som fastställts för säkerhetsanalysen kan godtas. SR-Can-rapporten granskades av Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI) 2007 och 2008[2].

SR-Site-rapporten bygger på SR-Can-analysen i flera viktiga avseenden:

1. Analysens metodik och struktur och hur den rapporteras bygger på SR-Can.
2. Hänsyn har tagits till resultatet från granskningen av SR-Can-analysen när analysens metodik och omfång har uppdaterats, se vidare avsnitt 1.3.1.
3. Det sammanfattade kapitlet 13 i huvudrapporten från SR-Can pekade ut flera utvecklingsmöjligheter, bland annat ökad processförståelse, förbättrade kvantitativa modeller och data samt utveckling av säkerhetsanalysmetodiken. Dessa frågor har bearbetats och de resultat som framkom har inkluderats i denna rapport.
4. Resultaten från SR-Can-analyserna användes i efterföljande känslighetsanalyser /Hedin 2008a/ för att formellt identifiera vilka processer och data som påverkar riskerna som beräknades i SR-Can. Resultaten överensstämmer med dem i huvudrapporten från SR-Can och stödjer således den identifiering av viktiga faktorer för SR-Site som presenterades i SR-Can-rapporten.
5. Resultaten från SR-Can-analysen har använts för att ge återkoppling till hur KBS-3-konceptet bör utvecklas. Återkopplingen, som presenteras i det sammanfattande kapitlet 13 i SR-Can-rapporten, har sedan dess utvidgats /SKB 2009a/ och är till viss del baserad på kompletterande analyser som utförts efter SR-Can-analysen. Framför allt har mer detaljerade konstruktionsförutsättningar specificerats för kapseln, bufferten och deponeringstunneln, samt för hur förvarets utformning och layout ska anpassas till det omgivande berget. Dessa krav beaktades när den förvarsutformning som analyserats i SR-Site fastställdes, se vidare kapitel 5.

1.3.1 Granskning

SR-Can-rapporten har granskats av SKI och SSI /Dverstorp och Strömberg 2008/, med hjälp av tre internationella granskningsgrupper. Granskningen fokuserade på metodiken för säkerhetsanalysen /Sagar et al. 2008/, en utvärdering av det tekniska barriärsystemet /Savage et al. 2008/ samt på användningen av platsundersökningsdata /INSITE/OVERSITE 2008/. Myndigheterna tog dessutom hjälp av ett antal experter för att utvärdera mer specifika frågor, som inte behandlades av granskningsgrupperna. De viktigaste slutsatserna från myndigheternas sammanfattande granskningsrapport är följande /Dverstorp och Strömberg 2008/:

- SKB:s säkerhetsanalysmetodik följer till största delen myndigheternas krav, även om den till viss del måste utvecklas ytterligare inför inlämnandet av tillståndsansökningarna.
- SKB:s kvalitetssäkring av säkerhetsanalysen är otillräcklig i SR-Can.
- Innan tillståndsansökningarna lämnas in behövs mer kunskap om processer med potentiellt stor inverkan på risken som är förknippad med förvaret, exempelvis erosion av bufferten i deponeringshålen.
- SKB måste visa att det antagna initialtillståndet för förvaret är realistiskt och kan uppnås.
- Redovisningen av risken för tidiga utsläpp ska förbättras.

Samtliga slutsatser från granskningen beaktades när denna rapport togs fram. Detta är i enlighet med rutinerna för kvalitetssäkring av SR-Site, vilka kräver att resultat från myndighetsgranskningar av tidigare analyser beaktas. Granskningsresultaten har använts för att identifiera ett stort antal frågeställningar, som behandlas på ett strukturerat sätt i SR-Site-analysen. Dokumentationen av dessa frågeställningar – och hur de hanteras i SR-Site – utgör en del av projektdokumentationen. Denna görs tillgänglig för de granskande myndigheterna på begäran, men publiceras inte som någon SKB-rapport.

[2] SKI och SSI slogs samman till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) den 1 juli 2008.

1.4 Myndighetsföreskrifter

Formen för och innehållet i en säkerhetsanalys – och framför allt kriterierna för att bedöma förvarets säkerhet – definieras i myndighetsföreskrifter. Dessa utfärdades ursprungligen av SKI och SSI, men utfärdas numera av SSM. Föreskrifterna baserar sig på olika tillämpliga delar av en ramlagstiftning, där de viktigaste ingående delarna är lagen om kärnteknisk verksamhet och strålskyddslagen. Vägledning i strålskyddsfrågor ges av flera internationella organ och den nationella lagstiftningen påverkas ofta av internationella rekommendationer. Så är fallet även i Sverige.

Beträffande långsiktig säkerhet för kärnavfallsförvar finns två detaljerade föreskrifter av särskild betydelse. Dessa har utfärdats med stöd av lagen om kärnteknisk verksamhet respektive strålskyddslagen:

- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSMFS 2008:37).
- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall” (SSMFS 2008:21).

De två dokumenten återges i sin helhet i bilaga A till denna rapport. Det sätt som kraven hanteras på i SR-Site anges i bilagan genom att hänvisningar till relevanta avsnitt i rapporten fogas in i bilagans föreskriftstexter.

Eventuella hälso- och miljörisker på grund av kemiskt toxiska material i förvaret redovisas i Miljökonsekvensbeskrivningen.

1.4.1 Föreskrifter för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SSMFS 2008:37

De delar av SSMFS 2008:37 som har störst betydelse för en analys av långsiktig säkerhet anger följande:

- Skyddet av människors hälsa ska påvisas genom att ett riskkriterium uppfylls. Kriteriet anger att ”den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken”. ”Skadeverkningar” avser cancer och ärftliga skador. Riskbegränsningen motsvarar enligt SSM en begränsning av den effektiva dosen till omkring $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Sv/år. Detta motsvarar i sin tur omkring en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen i Sverige.[3]
- Beträffande skyddet av miljön ska biologiska effekter av joniserande strålning, orsakad av utsläpp av radioaktivt material från förvaret i berörda livsmiljöer och ekosystem, redovisas utifrån tillgänglig kunskap.
- Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar ska redovisas och slutförvarets skyddsförmåga efter intrång ska beskrivas.
- SSM kräver en utförligare analys av de första 1 000 åren efter slutförvarets förslutning, än för tidsperioder därefter.

SSM har också utfärdat allmänna råd om tillämpningen av SSMFS 2008:37. I dessa finns utförligare information om ovan nämnda aspekter. Även de allmänna råden återfinns i bilaga A.

I de allmänna råden anges att den tidsperiod som ska täckas av en säkerhetsanalys för ett slutförvar av använt kärnbränsle ska vara en miljon år efter förslutning, se vidare avsnitt 2.4. En detaljerad riskanalys krävs för den första perioden på 1 000 år framåt i tiden efter förslutning. För tidsperioden upp till ungefär 100 000 år krävs att rapporteringen baseras på en kvantitativ riskanalys.

För perioden bortom 100 000 år anger de allmänna råden till SSMFS 2008:37 att en strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk i förhållande till föreskrifternas kriterium för individrisk inte är meningsfull. Det ska i stället visas att utsläpp från både tekniska och geologiska barriärer begränsas och fördröjs i så stor utsträckning som rimligen är möjligt, med användning av den beräknade risken som en av flera indikatorer. Att påvisa detta betraktas i föreskrifterna som en del av bevisningen för att bästa möjliga teknik (Best Available Technology, BAT) används.

[3] Den naturliga bakgrundsstrålningen i Sverige är omkring 1 mSv/år /SSI 2007/.

1.4.2 Föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SSMFS 2008:21

I de delar av SSMFS 2008:21 som är mest relevanta för en analys av långsiktig säkerhet anges följande krav:

- En säkerhetsanalys ska beakta egenskaper, händelser och processer (Features, Events, Processes, FEP) som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning.
- En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktionerna behövs, dock minst 10 000 år.
- Rapportering av
  - analysmetoder för systembeskrivning och systemutveckling,
  - analysmetoder för val av scenarier (inklusive ett huvudscenario som tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i förvaret och dess omgivning),
  - tillämpligheten av modeller, parametervärden och andra förutsättningar som används vid analyserna,
  - hantering av osäkerheter och känslighetsanalyser.
- Beträffande analyser av förhållandena efter förslutning kräver SSM beskrivningar av utvecklingen av biosfären, geosfären och förvaret för utvalda scenarier. Dessutom krävs en beskrivning av förvarets påverkan på omgivningen för valda scenarier, inklusive huvudscenariot. Hänsyn ska tas till brister hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.

SSM har också utfärdat allmänna råd om tillämpningen av SSMFS 2008:21. I dessa finns utförligare information om exempelvis klassificering av scenarier och osäkerheter. De delar av råden som är tillämpliga vid en analys av den långsiktiga säkerheten finns också i bilaga A tillsammans med en beskrivning av hur kraven hanteras i SR-Site.

1.5 SR-Site-projektets organisation

SR-Site-projektet inleddes i april 2007, efter slutförandet av SR-Can-projektet i december 2006. Genom hela SR-Site-projektet har ett antal specialister vid SKB utgjort en kärngrupp i projektet tillsammans med externa konsulter. Gruppen består av flera generalister med stor erfarenhet av säkerhetsanalyser av kärnavfallsförvar. Dessutom ingår ett antal experter inom nyckelområden av betydelse för analysen. I förordet till denna rapport anges de personer som för närvarande utgör SR-Site-gruppen samt deras respektive funktioner. Ett stort antal externa experter har också bidragit, främst genom att tillhandahålla specialistanalyser och dokumentation av analysens vetenskapliga grund. SR-Site-gruppen och de externa experternas funktioner, erfarenhet osv har dokumenterats, se vidare avsnitt 2.9.4.

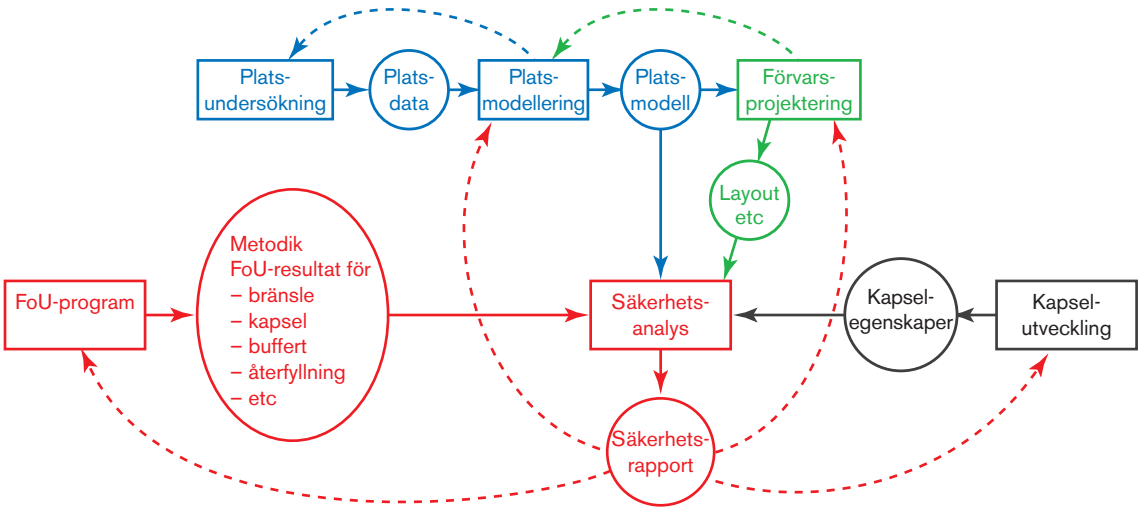
1.6 Angränsande projekt

Säkerhetsanalysprojektet är nära kopplat till platsundersöknings- och projekteringsaktiviteter vid SKB, se figur 1-4.

1.6.1 Platsundersökningar och platsmodellering

En avsevärd del av grunden till säkerhetsanalyserna SR-Can och SR-Site kommer från SKB:s slutförda platsundersökningar i Oskarshamns och Östhammars kommuner.

Fältdata från platsundersökningarna analyserades inom platsundersökningsprojektet av en analysgrupp, som tog fram en serie platsbeskrivande modeller av geosfären och biosfären. Gruppen bestod av flera team som specialiserade sig på olika ämnesområden. Den platsbeskrivande modellen är en sammanställning av observationer av platsens nuvarande tillstånd och av förståelsen av tidigare och pågående processer. Exempel på sådana är hydrauliska och geokemiska processer, som drivs av fenomen såsom landhöjning och klimatförändringar. Modellsimuleringar av platsens historiska utveckling är en viktig del av det arbete som utförts av analysgruppen. Den resulterande 3D-modellen av det nuvarande tillståndet i geosfären ger information om bergets termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och transportegenskaper inom ett geometriskt och geologiskt ramverk som beskriver



Figur 1-4. *Kopplingar till andra projekt. Aktiviteter visas som rektanglar och produkter som cirklar eller ellipser. Som visas av de streckade linjerna ger säkerhetsredovisningen återkoppling till förvarsutformningen beträffande till exempel layoutfrågor och valet av återfyllningsmaterial samt till platsundersökningarna, via platsmodellen, beträffande detaljerade platsundersökningsbehov. Den senare typen av återkoppling fås också från gruppen för platsmodellering, oberoende av säkerhetsanalysen. Säkerhetsanalysen ger också återkoppling till SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration.*

platsens stora strukturer. Den del av modellen som rör biosfären inbegriper en beskrivning av platsens ekosystem och har tagits fram för att vara samstämmig med geosfärsmodellen. Den platsbeskrivande modellen åtföljs av en omfattande beskrivning av den tvärvetenskapliga analysen och det tolkningsarbete som understödjer den.

Den platsbeskrivande modellen för Forsmark levererar beskrivningar av de nuvarande geosfärs- och biosfärstillstånden till säkerhetsanalysen. En mer detaljerad redovisning ges i kapitel 4.

Modellen beskriver situationen innan bergarbetena påbörjas. Analyser av hur berguttaget kommer att påverka bergets orörda, naturliga tillstånd krävs också. Med utgångspunkt från platsbeskrivningen – och i samarbete med platsmodellörerna – kunde bergprojekteringsgruppen fastställa en lämplig förvarslayout i platsmodellen. Resultaten från dessa analyser utgör en del av den totala mängden indata till SR-Site och beskrivs i relevanta delar av denna rapport, i synnerhet i avsnitt 5.2. Ytterligare analyser av den mekaniska, hydrogeologiska och kemiska utvecklingen, som orsakas av bygget och driften av förvaret, görs som en del av SR-Site och redovisas i avsnitt 10.2.

Förutom att beskriva geosfären och biosfären ger den platsbeskrivande modellen en förståelse för tidigare och pågående processer på platsen. Sådan information är användbar för att beskriva och modellera platsens och förvarets framtida utveckling, där resultaten måste vara kompatibla med förståelsen av platsens historiska utveckling.

I säkerhetsanalysen utnyttjas de hydrogeologiska simuleringsmodeller som tagits fram av analysgruppen för att simulera platsens historiska utveckling. Den framtida utvecklingen utgör dock fokus i säkerhetsanalysen.

De data som kommer från platsmodellen har analyserats i SR-Site-projektet i enlighet med fastställda rutiner för att hantera alla indata och dataosäkerheter, se vidare kapitel 9. Platsmodelleringsgruppens bedömning av tillförlitligheten hos den platsbeskrivande modellen, vilken ingår i dokumentationen av modellen, ger viktigt underlag till dataanalysen i SR-Site.

Resultaten från säkerhetsanalysen ger i sin tur underlag till planeringen av de detaljundersökningar av platsen som ska utföras i samband med förvarsbygget samt till ytterligare utveckling av förvarsutformningen.

1.6.2 Förvarsutformning

Vid förvarsutformningen utvecklas en referensutformning, som både är praktiskt möjlig att åstadkomma och som tillhandahåller de säkerhetsfunktioner som krävs. Referensutformningen omfattar såväl grundläggande mått för anläggningen som tekniska referenslösningar för buffert och återfyllning. Vid projekteringen har referensutformningen och platsbeskrivningen använts för att utveckla platsanpassade layouter för slutförvaret. Under arbetet har återkoppling skett till den fortsatta platsmodelleringen och platsundersökningen. För SR-Site och SKB:s ansökan har referenskoncepten, den platsanpassade förvarslayouten och metoderna för att uppnå dessa dokumenterats i ett antal så kallade **Produktionsrapporter**, vilket beskrivs i kapitel 5.

1.6.3 Kapselutveckling

Som ett resultat av ett omfattande projekt rörande inkapsling lämnades en tillståndsansökan för en inkapslingsanläggning in i november 2006. Inom ramen för fortsättningen av det projektet vidareutvecklas och dokumenteras olika tekniker för att tillverka och försluta kapslar. Projektet ger indata till SR-Site beträffande kapselns egenskaper. För SR-Site och SKB:s tillståndsansökan finns referenskapseln och metoderna som används för att tillverka den dokumenterade i en **Produktionsrapport för kapseln** /SKB 2010a/, se vidare avsnitt 5.4.

2 Metodik

2.1 Inledning

Detta kapitel sammanfattar huvuddragen i den metodik som har använts för säkerhetsanalysen SR-Site. Metodiken bygger på den som presenterades i SKB:s senaste fullständiga säkerhetsanalys, SR-Can /SKB 2006a/. Utvecklingen sedan SR-Can har till stor del påverkats av vad som framkom vid granskningen av densamma, i synnerhet av det som uttrycks i den gemensamma granskningsrapporten från svenska myndigheter /Dverstorp och Strömberg 2008/. Samtliga centrala delar av metodiken förklaras i avsnitt 2.5 med en tillräcklig detaljeringsgrad för att de ge en fristående översikt av analysmetodiken.

Metodikutvecklingen för SR-Can-analysen påverkades och inspirerades också – på ett allmänt plan – av flera andra säkerhetsanalyser från till exempel Schweiz /Nagra 2002/, Finland /Vieno och Nordman 1999/, Belgien /ONDRAF/NIRAS 2001/, Japan /JNC 2000/, USA /BSC 2003/, Kanada /Gierszewski et al. 2004/ och Frankrike /Andra 2005/ samt av internationellt samarbete inom det område som OECD:s atomenergiorgan NEA håller i /NEA 1997a, 1999a, 2001, 2004a, b, 2009/.

Huvudsyftet med en säkerhetsanalys av ett slutförvar är att undersöka om förvaret kan betraktas som radiologiskt säkert över tid. Detta görs i princip genom att beräknade utsläpp av radionuklider från förvaret och tillhörande stråldoser jämförs med myndigheternas kriterier (se avsnitt 1.4 och bilaga A). För ett KBS-3-förvar är den primära säkerhetsfunktionen att fullständigt innesluta avfallet under hundratusentals år, se vidare avsnitt 2.4. Ett huvudsyfte med denna säkerhetsanalys är därför också att analysera förvarets förmåga att innesluta avfallet, under en lång rad olika omständigheter och under mycket lång tid.

Lämpligt vetenskapligt och tekniskt stöd för alla gjorda påståenden och utvalda data är avgörande för att de beräknade resultaten ska betraktas som tillförlitliga. Att påvisa kunskap om och förståelse för förvarssystemet och dess utveckling är således grundläggande komponenter i varje säkerhetsanalys.

Förvarssystemet definieras i stora drag som det deponerade använda kärnbränslet, de tekniska barriärerna som omgärdar det, det omgivande berget och biosfären i anslutning till förvaret. Systemet kommer att utvecklas med tiden. Det framtida tillståndet kommer att bero på:

- systemets initialtillstånd,
- interna processer, dvs ett antal strålningsrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som pågår inom förvarssystemet över tiden,
- externa faktorer som påverkar systemet.

Till de interna processerna hör till exempel sönderfallet av radioaktiva ämnen. Sönderfallet leder till värmeutveckling och efterföljande uppvärmning av bränslet, de tekniska barriärerna och det omgivande berget. Grundvattenrörelser och kemiska processer, som påverkar de tekniska barriärerna och grundvattnets sammansättning, är andra exempel. Inverkan av framtida klimat och klimatrelaterade processer, såsom glaciation och landhöjning, är exempel på externa faktorer som påverkar systemet. Ett annat exempel är uppbyggnaden av mekanisk energi på grund av plattektoniska rörelser. Även framtida mänskliga handlingar kan påverka förvaret.

Initialtillståndet, de interna processerna och de externa faktorerna, samt de sätt på vilka dessa faktorer tillsammans styr förvarets utveckling, kan aldrig till fullo beskrivas eller förstås. Osäkerheter av olika slag finns därför förknippade med alla aspekter av förvarets utveckling och följaktligen även med säkerhetsanalysen. En central grundtanke i varje säkerhetsanalysmetodik måste därför vara att hantera alla relevanta typer av osäkerheter. Denna hantering innebär att identifiera, klassificera och beskriva osäkerheterna. Dessutom ska osäkerheterna hanteras på ett konsekvent sätt vid kvantifieringen av förvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som denna medför. I hanteringen ingår även att jämföra resultaten från analysen med myndigheternas kriterier på ett sådant sätt att vederbörlig hänsyn tas till de osäkerheter som är förknippade med analysen.

Den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-systemet, som beskrivs i figur 1-1, är att fullständigt innesluta det använda kärnbränslet i kapslar av koppar och segjärn under hela den tidsperiod som analysen omfattar. Om en kapsel skulle skadas är den sekundära säkerhetsfunktionen att fördröja eventuella

utsläpp från kapslarna. Fördröjningen ska ske i tillräcklig omfattning för att hålla de resulterande koncentrationerna av radionuklider nere på sådana nivåer att följderna inte blir oacceptabla. Huvudfrågorna genom hela analysen är därför huruvida säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning upprätthålls.

I nästa avsnitt 2.2 ges utförligare beskrivningar av säkerhetsprinciperna för KBS-3-förvaret. Därefter fastställs förvarssystemets gränser i avsnitt 2.3. Den relevanta tidsperioden för analysen ges i avsnitt 2.4.

Med dessa grundläggande förutsättningar fastlagda redovisas metoden för SR-Site-analysen i avsnitt 2.5. Detta avsnitt är betydligt mer omfattande än motsvarande avsnitt i huvudrapporten för SR-Can. Vissa detaljer av metodiken förklaras ändå bäst då de tillämpas, varför läsaren ibland hänvisas till efterföljande kapitel för ytterligare detaljer.

Metodikaspekter avseende riskberäkningen tas upp i avsnitt 2.6.

Säkerhetsanalysen har en viktig roll i påvisandet av att bästa möjliga teknik (Best Available Technique, BAT) används. Denna uppgift och hur den genomförs beskrivs i avsnitt 2.7.

Hanteringen av osäkerheter genomsyrar säkerhetsanalysen och är därför en integrerad del av den metodik som beskrivs i avsnitt 2.5. Avsnitt 2.8 ger en utförligare redovisning av identifieringen, klassificeringen och hanteringen av osäkerheter i SR-Site-analysen. Detta är viktigt, eftersom en noggrann hantering av osäkerheter är nära kopplad till tilltron till analysens resultat.

Även kvalitetssäkringsåtgärder berör samtliga aspekter av analysen. Kvalitetssäkringsplanen för SR-Site presenteras i avsnitt 2.9.

2.2 Säkerhet

2.2.1 Säkerhetsprinciper för KBS-3-förvaret

Sedan arbetet med ett svenskt slutförvar inleddes i slutet av 1970-talet har SKB fastlagt ett antal principer för utformningen av slutförvaret. Dessa principer kan sägas utgöra säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-konceptet och sammanfattas nedan.

- Genom att förlägga förvaret djupt ner i en långsiktigt, stabil geologisk miljö isoleras avfallet från människor och miljö på markytan. Detta betyder att förvaret inte påverkas på något avgörande sätt vare sig av samhällsförändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på markytan.
- Genom att placera förvaret på en plats där det omgivande berget inte förväntas bli föremål för något ekonomiskt intresse för 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 kapseln.
- 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, dvs de ska fungera utan mänskliga ingrepp och utan aktiv tillförsel av material eller energi.

Tillsammans med många andra överväganden, såsom den geologiska situationen i Sverige och kravet på att förvaret måste vara tekniskt möjligt att bygga, har dessa principer lett fram till utvecklingen av KBS-3-metoden för att slutförvara det använda kärnbränslet.

2.2.2 Säkerhetsfunktioner och säkerhetsmått

De viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna för KBS-3-förvaret kan sammanfattas i säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning.

Bränslet placeras i kopparkapslar, som ger skydd mot korrosion. Kapseln har en segjärnsinsats som ger mekanisk hållfasthet. Kopparkapslarna omges av en buffert av bentonitlera i deponeringshål på ett djup ungefär 500 m ner i berget, se figur 1-1. Bentonitleran skyddar kapslarna från mindre rörelser i berget och begränsar transporten av korrosiva ämnen i grundvattnet in till dem. Berget tillhandahåller en långsiktigt kemiskt, mekaniskt, termiskt och hydrogeologiskt stabil miljö för kapslarna och bentonitleran. Kapslarna utgör därför en inneslutande barriär med mycket lång livslängd i den miljö som tillhandahålls av bufferten och berget.

Bränslet, kapseln, bufferten och berget bidrar till att fördröja alla eventuella utsläpp av radionuklider om en kapsel skulle skadas. Bränslematrisen är i sig mycket stabil i den reducerande miljön på förvarsnivå. Många av de farligaste radionukliderna har mycket låg löslighet i grundvatten och därmed en begränsad möjlighet att spridas. Både segjärnsinsatsen och kopparkapseln begränsar inflödet av vatten även om de skadas. Bufferten begränsar inflödet av vatten till en skadad kapsel. Den begränsar också utsläppet av radionuklider genom att minska vattenflödet och genom sorption. Grundvattnet rör sig långsamt genom bergets spricksystem närmast kapslarna och många radionuklider är benägna att diffundera in i bergmatrisen och att fastna på dess ytor genom sorption.

Det grundläggande säkerhetskriteriet uttrycks i SSM:s föreskrifter SSMFS 2008:37. Föreskrifterna anger att målet är att säkerställa att ”den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken”. Riskkriteriet motsvarar effektiva doser som uppgår till cirka en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen. Som nämns i avsnitt 1.4.1 ska effekter på livsmiljöer och ekosystem beskrivas.

Resultat från riskberäkningar i säkerhetsanalysen jämförs med detta kriterium för att bedöma om kravet är uppfyllt. Riskutfallen är emellertid kopplade till ett stort antal faktorer på ett komplicerat sätt. I en säkerhetsanalys är det därför nödvändigt att – utöver bedömningen av uppfyllandet av ett övergripande krav – även påvisa hur säkerheten hänger samman med barriärernas viktigaste egenskaper och hur dessa egenskaper varierar över tiden. En uppenbar sådan egenskap är om kopparkapslarna fortfarande är intakta. Detta beror i sin tur på en rad faktorer, exempelvis buffertens egenskaper och förvarets kemiska miljö.

I kapitel 8 presenteras och diskuteras ett antal säkerhetsfunktionsindikatorer för barriärerna. Kriterier ges för egenskaper som bufferttemperatur, buffert- och återfyllningsdensitet, hydraulisk konduktivitet och svälltryck. Genom att påvisa att dessa kriterier är uppfyllda kan man hävda att barriärerna kommer att fullgöra sin avsedda funktion under förvarssystemets utveckling. Om ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator inte skulle uppfyllas ger detta i stället en signal om att säkerheten – på ett eller annat sätt – kan vara äventyrad och att följderna måste utredas ytterligare. Det betyder emellertid inte automatiskt att systemets övergripande prestanda är oacceptabel.

I avsnitt 2.6.3 diskuteras några övergripande indikatorer, som kan användas som alternativ till riskkriteriet. De alternativa kriterierna är mer direkt relaterade till utsläpp från geosfären och kräver inte detaljerade antaganden om biosfärsförhållanden eller mänskliga vanor.

2.3 Systemgränser

Förvarssystemet omfattar det använda kärnbränslet, kapslarna, bufferten, den återfyllda deponeringstunneln och andra förvarsutrymmen, samt geosfären och biosfären i förvarets närhet, se figur 1-1. Vid upprättandet av SR-Can-databasen över egenskaper, händelser och processer, FEP (se nedan), definierades systemgränsen mer i detalj. Följande huvudpunkter är tagna från den definitionen.

- En skarp definition av gränser är i allmänhet varken möjlig eller nödvändig. Samma gränser är inte nödvändigtvis relevanta för alla delar av säkerhetsanalysen. Följande definitioner utgjorde grunden för FEP-indelningen – och har därmed påverkat systembeskrivningen.

- Grovt räknat betraktas den del av biosfären som har undersökts vid platsundersökningarna, dvs ett område i storleksordningen 100–300 km^2 ovanför förvaret, som en del av systemet. Den storskaliga biosfären betraktas däremot som extern. Analysen av biosfären i SR-Site sträcker sig ned till själva berget. Beroende på analyssammanhanget kan denna definition variera något.
- Grovt räknat betraktas motsvarande del av geosfären, ned till ett djup av omkring 1 000 m, som en del av systemet. Beroende på analyssammanhanget kan även denna definition variera. Den lokala grundvattenmodellen, som är den skala som är mest relevant för säkerheten, har till exempel en projektion på markytan som är mindre än 100 km^2. Större områden än 300 km^2 och större djup än 1 000 m kan emellertid krävas vid regional grundvattenmodellering. Randvillkoren för den lokala grundvattenmodellen kommer från en sådan större regional modell.
- Framtida mänskliga handlingar på lokal nivå räknas som interna i förhållande till systemet. Det gör däremot inte frågor som rör egenskaper och beteende hos det framtida samhället i stort.

2.4 Tidsskalor

En tidsperiod för säkerhetsanalysen måste fastställas, eftersom detta ger en allmän begränsning av analysens omfattning och också tidsgränsvärden för exempelvis beräkningar av radionuklidtransport. Denna fråga tas upp i de tillämpliga föreskrifter som citeras nedan.

2.4.1 Föreskrifternas krav och allmänna råd

SSM:s föreskrifter SSMFS 2008:21 anger att säkerhetsanalysen ska omfatta så lång tid som barriärfunktionerna behövs, dock minst 10 000 år efter förslutningen. De allmänna råden om tillämpningen av föreskrifterna anger att tidsperioden för en analys ska sättas i relation till den fara som förvarets innehåll utgör i jämförelse med naturligt förekommande radionuklider. I råden anges även att ”hänsyn bör också kunna tas till svårigheterna att göra meningsfulla analyser för extremt långa tidsrymder, bortom en miljon år …”.

SSM:s föreskrifter SSMFS 2008:37 anger att ”För de första tusen åren efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön.” ”För tiden efter tusen år efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.”

De allmänna råden till SSMFS 2008:37 anger följande beträffande ett förvar för använt kärnbränsle: ”… 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.”

Beträffande den kvantitativa riskanalysen för de första 100 000 åren anger de allmänna råden följande: ”Kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförmåga, t ex barriärfunktioner, aktivitetsflöden och koncentrationer i miljön bör användas för att stärka trovärdigheten i beräknade risker.”

För tiden bortom ungefär 100 000 år anger dessutom de allmänna råden följande: ”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.”

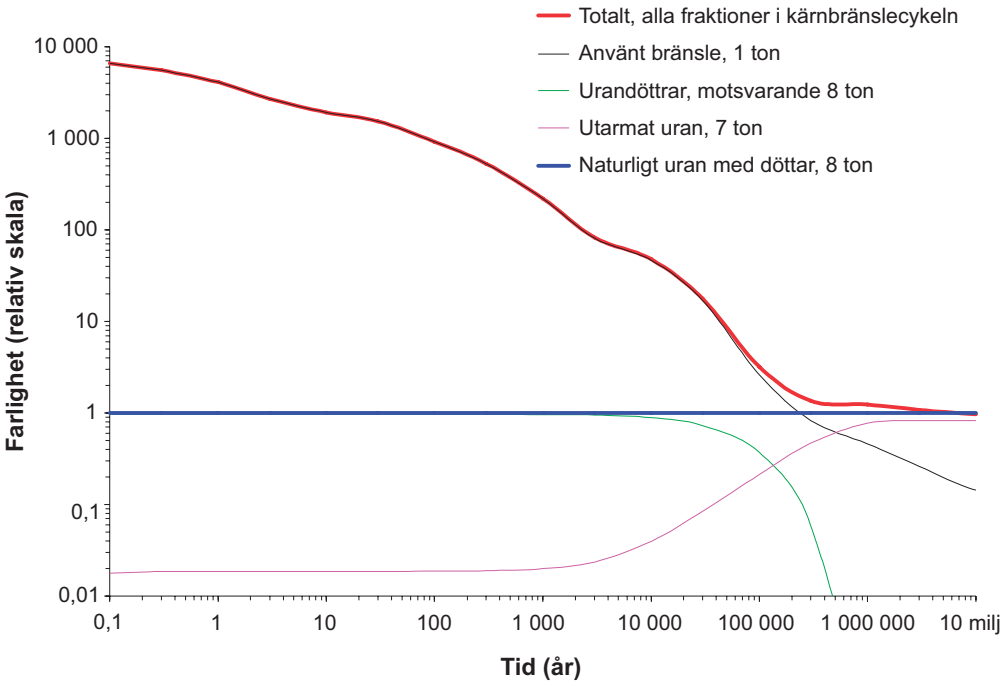
2.4.2 Säkerhetsanalysens tidsskalor

Förutom det uppenbara behovet av att uppfylla myndighetskraven, kan frågor förknippade med det använda kärnbränslets radiotoxicitet också beaktas när tidsperioden för en säkerhetsanalys fastställs.

Efter ungefär 100 000 år är radiotoxiciteten hos det använda kärnbränslet jämförbar med den från den naturliga uranmalm som en gång användes för att framställa bränslet /Hedin 1997/. Även summan av toxiciteten för alla fraktioner som uppstått i kärnbränslecykeln (de dotternuklider som separerats från uranet före anrikningen, det utarmade uranet som uppstår vid anrikningsprocessen och det använda bränslet) är efter 100 000 år jämförbar med toxiciteten hos den använda uranmalmen som behövdes för att tillverka bränslet, se figur 2-1. Den senare jämförelsen motsvarar att jämföra radiotoxiciteten hos den mängd naturligt U-235 och U-238 som förbrukas i reaktorn med radiotoxiciteten hos mängderna av de nya produkter som uppstår i reaktorn (fissionsprodukter och aktinider) och som återstår efter 100 000 år.

Ett annat kriterium, som kan beaktas för att motivera en viss tidsperiod som en säkerhetsanalys ska omfatta, är att den analyserade perioden ska sträcka sig bortom den tidpunkt då doserna från förvaret är som högst. För långa tidsperioder är emellertid doserna oftast som högst i slutet av den period av typiskt en miljon år som analysen omfattar. Detta beror på inväxt av den naturligt förekommande nukliden Ra-226 från förvarat U-238, i kombination med det faktum att barriärsystemet oundvikligen försämras över tiden. Så var fallet i SR-Can-analysen. Eftersom KBS-3-metoden syftar till fullständig inneslutning av avfallet genom inkapsling under tidsperioder som sträcker sig mycket långt in i framtiden, bedöms kriteriet med ett dosmaximum inte som en lämplig utgångspunkt för att definiera analysens utsträckning i tiden.

I SR-Site omfattar analysen tidsperioden upp till en miljon år. Denna tidsperiod följer förslagen i de rekommendationer och allmänna råd som citeras ovan. Tidsperioden är dessutom längre än vad som behövs för att reducera radiotoxiciteten hos förvarets innehåll av utbränt bränsle till en nivå som är jämförbar med den hos motsvarande mängd naturlig uranmalm. Värt att notera är att de viktigaste radionukliderna som finns kvar i avfallet efter en miljon år är desamma som de som förknippas med naturlig uranmalm, t ex U-238.



Figur 2-1. *Radiotoxicitet vid intag via födan av uran och urandöttrar i malm (blå kurva) och av summan av alla fraktioner som uppstår när samma kvantitet uran används i kärnbränslecykeln (röd kurva). Tiden avser tiden efter reaktordriften. De olika fraktionerna utgör det använda kärnbränslet (38 MWd termisk energi/kg U av typ SVEA 64 BWR), det utarmade uranet och urandöttrarna som separeras i uranverket. Från /Hedin 1997/.*

Som anges i de allmänna råden till SSMFS 2008:37 kan det kvantitativa riskkriteriet tillämpas som ett gränsvärde under de första cirka 100 000 åren och därefter som en grund för diskussioner om förvarets skyddsförmåga. Riskberäkningarna i SR-Site sträcker sig därför upp till en miljon år. Resultaten används i enlighet med SSM:s allmänna råd i diskussionen om uppfyllande av föreskrifternas krav i kapitel 15. Riskberäkningarna kompletteras med beräkningar av alternativa indikatorer för förvarets säkerhet, se vidare avsnitt 2.6.3.

Även en kortfattad allmän diskussion om utvecklingen bortom en miljon år ges emellertid för att påvisa effekterna av att viktiga processer i förvaret fortgår. Ett annat skäl är att en strikt tidsgräns för analysen av den allmänna utvecklingen av systemet inte kan härledas från föreskrifterna.

Föreskrifterna kräver en mer detaljerad analys för de inledande 1 000 åren efter förslutning. Kravet motiveras av både den höga radiotoxiciteten hos det använda kärnbränslet under denna period och av den större förmågan att förutsäga denna, relativt sett, nära framtid. I SR-Site uppfylls detta delvis genom att de inledande, övergående skedena av förvarsutvecklingen analyseras, främst i referensutvecklingen som redovisas i kapitel 10. För att uppfylla föreskrifternas krav på en mer detaljerad analys för de inledande 1 000 åren ses säkerhetsrelaterade frågor över genom riktade analyser av barriärsystemets funktion under denna period, främst som en uppsättning beräkningar av hypotetiska fall med tidiga barriärförluster som redovisas i avsnitt 13.9.5.

För tidsrymder bortom en miljon år ges en kvalitativ redovisning av förvarsutvecklingen, baserad på de kvantitativa analyserna upp till en miljon år. Ingen riskberäkning presenteras för dessa tidsperioder.

2.4.3 Relevanta tidsskalor för förvarets utveckling

Det finns ett antal tidsskalor som är relevanta för förvarsutvecklingen. Dessa sammanfattas nedan.

- En viktig tidsskala är den som behövs för att avfallets radiotoxicitet ska minska, såsom framgår av figur 2-1. Vid tidpunkten för deponering har radiotoxiciteten grovt räknat minskat med en faktor tio jämfört med situationen en månad efter avslutad reaktordrift. Den fortsätter sedan att minska med omkring en faktor tio för varje tiofaldig ökning av tiden. Som nämndes ovan är radiotoxiciteten efter 100 000 år hos en viss mängd använt kärnbränsle jämförbar med radiotoxiciteten hos den naturliga uranmalm som en gång användes för att framställa bränslet.
- Det noteras också att de inledningsvis mycket höga doserna från exponering för direktstrålning från det använda bränslet minskar betydligt inom några tusen år. På lång sikt kommer dessa doser emellertid att ligga kvar på nivåer som kräver avskärmning från människor praktiskt taget i det oändliga, eftersom de långsiktiga direktstrålningsnivåerna bestäms av U-238-döttrar. För den långsiktiga säkerheten utgör människors exponering för direktstrålning ett problem endast i de scenarier som tar upp oavsiktligt intrång i förvaret. (Processer som har samband med strålningseffekter i ett ostört förvar ingår i analysen av förvarsutvecklingen.)
- Långsiktiga geologiska processer, som pågår under miljontals år, inkluderar tektoniska rörelser hos kontinentalplattorna och därmed förknippade horisontella rörelser i jordskorpan utgående från mittatlantiska ryggen, så kallad ”ridge push”.
- Klimatförändringar sker under tidsskalor av några tiotals år till mer än en miljon år. En viktig tidsskala utgår från längden på glaciationscyklerna. Dessa har under de senaste ungefär 700 000 åren gått i cykler om cirka 100 000 år. I regionen där Forsmark nu ligger omfattar varje cykel flera episoder av permafrost och glaciala förhållanden. De mekaniska, hydrauliska och grundvattenkemiska förhållandena i berget varierar med klimatutvecklingen, i synnerhet när det glaciala tillståndet dominerar. Det är möjligt att dessa cykler i framtiden kommer att störas av mänskligt orsakad klimatpåverkan, men omfattningen och varaktigheten av sådana störningar är fortfarande ett ämne som debatteras livligt.
- Det finns ett antal tidsskalor under vilka biologisk evolution sker. Människan och hennes föregångare har till exempel utvecklats avsevärt under de senaste hundratusentals åren.
- Ekosystemens naturliga utveckling kan under 1 000 år leda till avsevärda förändringar. Detta är till exempel fallet för de kustnära ekosystemen i Sverige, vilka påverkas starkt av landhöjningen.

- De flesta förhållanden i samhället har förändrats kraftigt under de senaste 100 åren och stora förändringar kan ske plötsligt eller under bara ett fåtal år. Historiska uppgifter om mänskligheten täcker endast några få tusen år.
- Bränslets resteffekt resulterar i maximala temperaturer i förvarets närområde efter omkring tio år och förhöjda temperaturer i det omgivande berget under några tusentals år.
- Återmättnaden av bufferten, återfyllningen och det omgivande berget tar normalt tiotals till hundratals år vid svenska förhållanden.
- De kemiska förhållandena i det omgivande berget efter bygget och driften av slutförvaret förväntas i stort sett ha återgått till naturliga förhållanden inom en tidsrymd av 100 eller 1 000 år. De kemiska förhållandena i bufferten kommer i viss mån att förändras under perioden på grund av förhöjda temperaturer. Kapselkorrosion vid normala förvarsförhållanden måste pågå i miljontals år för att kapseln ska förlora sin funktion.

Tidsskalor är ett återkommande ämne i denna rapport, till exempel i samband med processbeskrivningar (se avsnitt 7.3) och när förvarsutvecklingen analyseras (se kapitel 10). Frågan om tidsskalor i säkerhetsanalyser har också tagits upp i en NEA-workshop /NEA 2004a/ där SKB deltog. Tillvägagångssättet som användes i SR-Site överensstämmer med resultaten från NEA-workshopen, exempelvis när det gäller att fokusera på kompletterande indikatorer för dos och risk för långa tidsperioder samt att använda scenarier för att täcka en lång rad möjliga utvecklingar av framtida externa förhållanden.

2.5 Metodik i elva steg

Säkerhetsanalysen SR-Site består av elva huvudsteg, som delvis utförs samtidigt och delvis i följd. Från projektledningssynpunkt kan många av stegen betraktas som delprojekt i ett större integrerat säkerhetsanalysprojekt. Figur 2-2 visar en schematisk bild över de olika stegen.

Metodiken som används i analysens elva steg beskrivs i följande underavsnitt. Vissa detaljer förklaras dock bäst när de tillämpas och läsaren hänvisas därför ibland till efterföljande kapitel för detaljer.

2.5.1 Steg 1: FEP-hantering

Vid detta steg identifieras alla de faktorer som måste ingå i analysen. Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser och KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer (Features, Events and Processes, FEP) som påverkar den långsiktiga säkerheten utnyttjas för detta. En SKB-FEP-databas utvecklas, där de flesta FEP klassificeras som antingen i) FEP för initialtillståndet, ii) interna processer eller iii) externa FEP. Återstående FEP är antingen relaterade till analysmetodiken i allmänhet eller har konstaterats vara irrelevanta för KBS-3-metoden.

Utifrån resultaten från FEP-hanteringen har en FEP-katalog tagits fram för SR-Site. Katalogen innehåller de FEP som ska hanteras vidare i SR-Site.

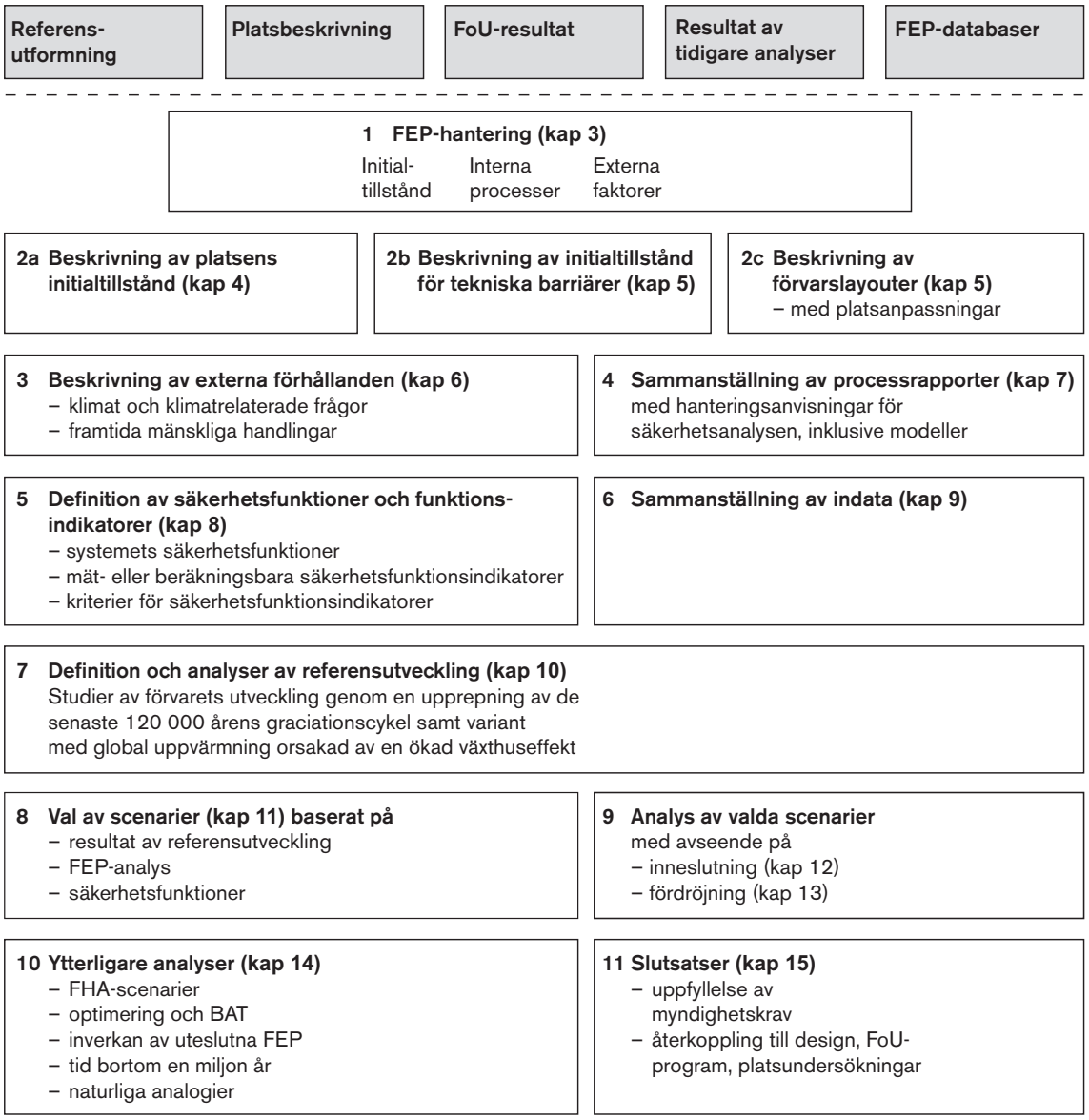
Den fortsatta hanteringen av de tre FEP-kategorierna beskrivs i metodens tre efterföljande steg.

Detta steg i FEP-hanteringen beskrivs vidare i kapitel 3 och dokumenteras fullständigt i **FEP-rapporten** för SR-Site[4].

2.5.2 Steg 2: Beskrivning av initialtillståndet

Systemets initialtillstånd beskrivs med hjälp av förvarsplatsens platsbeskrivande modell, utformningen av KBS-3-förvaret med dess olika komponenter och en platsspecifik layout som tillämpar denna utformning på platsen i fråga. Initialtillståndet för geosfären och biosfären definieras som tillståndet hos det naturliga systemet innan förvaret börjar byggas. Initialtillståndet för bränslet och de tekniska komponenterna definieras som tillståndet omedelbart efter deponering. Valet av tidpunkt för initialtillståndet beskrivs ytterligare i avsnitt 5.1.

[4] **FEP-rapporten** är en av flera huvudreferenser till denna huvudrapport. Se avsnitt 2.5.12 för en fullständig lista och nomenklatur för hänvisning, där kortnamnen anges i fetstil.



Figur 2-2. *En översikt av de elva huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Site. De översta rutorna ovanför den streckade linjen utgör indata till analysen. Produkterna från varje steg beskrivs i detalj i huvudtexten. Sammantaget utgör de elva stegen rutan "Säkerhetsanalys" i figur 1-4.*

Systemets initialtillstånd är fundamentalt vid analysen och kräver en omfattande dokumentation. För den aktuella platsen uppnås detta genom den platsbeskrivande modellen av Forsmark /SKB 2008a/. Denna baserar sig på resultaten från platsundersökningen – både data från berggrunden och från de ytnära systemen. Platsmodellen för Forsmark är en grundläggande referens till SR-Site. En sammanfattning av platsbeskrivningen, där fokus ligger på frågeställningar som är av vikt för den långsiktiga säkerheten, ges i kapitel 4.

Initialtillståndet för förvarssystemets tekniska komponenter beskrivs i ett antal så kallade **Produktionsrapporter**. Dessa behandlar det använda bränslet, kapseln, bufferten, tunnelåterfyllningen, förslutningen av förvaret respektive konstruktionen av bergutrymmena. Den sistnämnda rapporten innehåller en beskrivning av förvarslayouten efter platsanpassning. Varje produktionsrapport redovisar i) konstruktionsförutsättningar som härletts från SR-Can-analysen, ii) den referensutformning som valts för att uppfylla kraven, iii) analyser som verifierar att referensutformningen verkligen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, iv) produktions- och kontrollrutiner som valts för att åstadkomma referensutformningen, v) analyser som verifierar att dessa rutiner, om de genomförs, verkligen skulle åstadkomma referensutformningen och vi) en redovisning av det initialtillstånd som därvid uppnås.

Den sistnämnda punkten ger viktiga indata till säkerhetsanalysen. Initialtillståndet för de tekniska komponenterna beskrivs i kapitel 5, med utgångspunkt från det innehåll i **Produktionsrapporterna** som har koppling till den långsiktiga säkerheten.

FEP-hanteringen i steg 2 gav upphov till ett antal FEP, som relaterar till initialtillståndet. De flesta av dessa täcks in av beskrivningarna av initialtillståndet och den efterföljande användningen av denna information i analysen. Ett fåtal FEP för initialtillståndet, exempelvis sådana som relaterar till en ofullständig förslutning av förvaret, kräver separat behandling i scenarieanalysen som görs i senare skeden av säkerhetsanalysen. Sådana FEP redovisas i avsnitt 5.1.3.

2.5.3 Steg 3: Beskrivning av externa förhållanden

Faktorer relaterade till externa förhållanden hanteras i de tre kategorierna ”klimatrelaterade frågor”, ”storskaliga geologiska processer och effekter” samt ”framtida mänskliga handlingar” (FHA[5]). Hanteringen av dessa faktorer beskrivs i **Klimatrapporten**, **Processrapporten för geosfären** respektive **FHA-rapporten**.

Ett viktigt moment vid hanteringen av externa förhållanden är att ta fram externa referensförhållanden för den efterföljande analysen. Dessa externa referensförhållanden förutsätter en upprepning av den senaste 120 000 år långa glaciationscykeln – Weichsel. En alternativ referensutveckling baseras på antagandet om en ökad global växthuseffekt. Dessutom undersöks de fysikaliskt möjliga klimatförhållanden som skulle ha den allvarligaste inverkan på förvarets säkerhet. Syftet är att använda dessa i relevanta scenarier i ett senare steg av analysen. Hanteringen av klimatrelaterade frågor beskrivs utförligare i avsnitt 6.2.

Framtida mänskliga handlingar hanteras i enlighet med den metodik som fastställdes i säkerhetsanalysen SR-Can och som i viss utsträckning uppdaterats för SR-Site. Utifrån en strukturerad redovisning av ett stort antal FEP som rör FHA, väljs ett antal stiliserade fall ut för vidare analys. Detta beskrivs i analysen av scenarier för FHA, se avsnitt 14.2.

2.5.4 Steg 4: Beskrivning av processer

Identifieringen och hanteringen av processer av betydelse för förvarets långsiktiga utveckling och säkerhet är en huvudpunkt i säkerhetsanalysen. Identifieringen av processer baseras på tidigare analyser och sållning av FEP. Alla processer som identifieras inom systemgränsen – och som är relevanta för systemets långsiktiga utveckling – beskrivs i tre särskilda **Processrapporter**: en för bränslet och kapseln, en för bufferten, återfyllningen och förslutningen samt en för geosfären. Kortvariga processer eller förändringar i geosfären, som orsakas av byggnationen av förvaret, ingår i **Processrapporten för geosfären** och beaktas i säkerhetsanalysen.

Varje process dokumenteras i **Processrapporterna**. Dokumentationen följer en mall med följande rubriker:

- Översikt/allmän beskrivning.
- Beroenden mellan process och systemvariabler.
- Randvillkor.
- Modellstudier/experimentella studier.
- Naturliga analogier/observationer i naturen.
- Relevant tidsperspektiv för processen.
- Hantering i säkerhetsanalysen SR-Site.
- Hantering av osäkerheter i SR-Site.
- Relevans hos referenser som stödjer hanteringen i SR-Site.

[5] Future Human Actions.

Beskrivningen av randvillkoren (andra rubriken) pekar ut interaktioner med processer i andra processrapporter när sådana finns. Innehållet under de nästa sista och tredje sista rubrikerna, där det fastställs hur processerna kommer att hanteras i säkerhetsanalysen, utgör de huvudsakliga resultaten från **Processrapporterna**. **Processrapporterna** tillhandahåller således ett ”recept” för att hantera de olika processerna i analysen.

Hanteringen av samtliga processer i en processrapport sammanfattas i en processtabell som beskriver om processen utesluts, om den är föremål för kvantitativ modellering eller om valet mellan uteslutning och modellering beror på ett särskilt villkor (som uppfylls eller inte uppfylls under förvarssystemets utveckling).

Flera av processerna hanteras således genom kvantitativ modellering. Varje modell inkluderar i allmänhet flera samverkande processer. Dessa förekommer ofta i olika delar av systemet och beskrivs därför i olika processrapporter. Modellerna bildar ett nätverk, där resultaten från en modell används som indata till en annan. Nätverket beskrivs grafiskt genom två scheman, så kallade modellscheman (Assessment Model Flowcharts, AMF) och två tillhörande AMF-tabeller. Tabellerna kopplar samman processer i processtabeller, modeller i AMF-scheman och rapportering av modellering i denna huvudrapport.

Hanteringen av processerna beskrivs utförligare i kapitel 7, där processtabeller (se avsnitt 7.4), AMF-scheman och AMF-tabeller (se avsnitt 7.5) också finns med.

2.5.5 Steg 5: Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Ett centralt inslag i metodiken för SR-Site-analysen är definitionen av en uppsättning *säkerhetsfunktioner,* som förvarssystemet idealt ska upprätthålla över tid. De övergripande säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning delas upp i ett antal delfunktioner för kapseln, bufferten, återfyllningen av deponeringstunnlarna och berget. Utvärderingen av säkerhetsfunktionerna över tid möjliggörs genom att varje säkerhetsfunktion kopplas till en *säkerhetsfunktionsindikator*, dvs en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos den aktuella förvarskomponenten. För flera funktioner är det också möjligt att koppla *kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer*. Om säkerhetsfunktionsindikatorn uppfyller kriteriet, betraktas den aktuella säkerhetsfunktionen som upprätthållen.

Kapselns förmåga att stå emot isostatisk belastning är ett exempel på en säkerhetsfunktion. Den tillhörande indikatorn är den isostatiska belastningen på kapseln och kriteriet är den isostatiska last som kapseln har visats kunna stå emot.

Säkerhetsfunktioner, indikatorer och kriterier presenteras i kapitel 8. Där ges också en utförligare beskrivning av metodiken bakom säkerhetsfunktionerna. Detaljerade säkerhetsfunktioner för inneslutning och fördröjning finns i avsnitt 8.3 respektive 8.4.

Det är viktigt att notera att kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer inte är detsamma som konstruktionskriterier, vilka formellt beskrivs som konstruktionsförutsättningar i SR-Site. De förra ska optimalt upprätthållas under den period som omfattas av analysen, medan konstruktionsförutsättningarna ska uppfyllas initialt. Konstruktionsförutsättningarna ska säkerställa att systemet är tillräckligt robust för att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid. Kopparkapseln måste till exempel utformas på ett sådant sätt att dess initiala tjocklek (konstruktionsförutsättningen) säkerställer att den står emot korrosion under mycket lång tid, dvs att tjockleken är större än noll (funktionsindikatorkriteriet) under denna tid.

Uppsättningen av säkerhetsfunktioner ger förståelse för systemets säkerhetsegenskaper. Den ger också en lista över nyckelfrågor som ska utvärderas över tid i analysen. Säkerhetsfunktionerna används direkt i senare steg av analysen, när referensutvecklingen analyseras, för att utvärdera säkerheten på ett strukturerat sätt för de olika tidsskedena. Säkerhetsfunktionerna har även en framträdande roll vid valet av ett antal scenarier, varigenom de osäkerheter som är relaterade till systemets säkerhet utvärderas på ett strukturerat sätt, se vidare avsnitt 2.5.8.

När säkerhetsfunktionerna har definierats tas ett FEP-diagram fram. Diagrammet visar hur initialtillståndsfaktorer och processer är relaterade till säkerhetsfunktionerna under den långsiktiga utvecklingen av förvaret.

2.5.6 Steg 6: Sammanställning av data

I detta steg används ett strukturerat förfarande för att välja ut de data som ska användas för att kvantifiera förvarsutvecklingen och för att beräkna dos. Urvalet och de valda datavärdena rapporteras i en särskild **Datarapport**. Arbetet följer en mall för att diskutera osäkerheter hos indata. Mallen beskrivs i kapitel 9 och de data som valts ut tillhandahålls i **Datarapporten**. De modeller som kräver data visas i de AMF-scheman som beskrivs i steg 4, se avsnitt 2.5.4.

Jämfört med SR-Can-analysen har den strukturerade sammanställningen av data utvidgats till att på ett mer fullständigt sätt omfatta beräkningarna i analysen, se avsnitt 9.3. Även mallen har uppdaterats som en följd av synpunkter vid granskningen av SR-Can-analysen.

2.5.7 Steg 7: Analys av referensutvecklingen

I detta steg definieras och analyseras en referensutveckling av förvarssystemet. Referensutvecklingen är ett resultat av de externa referensförhållanden som definierades i steg 3. Syftet är att få kunskap om systemets övergripande utveckling samt om de osäkerheter som påverkar utvecklingen, inför det val av scenarier och de scenarieanalyser som följer i de två efterföljande stegen. Referensutvecklingen är ett viktigt underlag för att i ett senare skede definiera ett huvudscenario, se avsnitt 2.5.8.

Fokus ligger på systemets inneslutningsförmåga. Två fall av referensutvecklingen analyseras.

1. Ett basfall där de externa förhållandena under den första 120 000 år långa glaciationscykeln antas likna de förhållanden som förelåg under den senaste cykeln (Weichselistiden). Därefter antas sju upprepningar av samma cykel täcka in hela den 1 000 000 år långa period som analyseras.
2. En variant med ökad global uppvärmning, där man antar att det framtida klimatet – och därmed de externa förhållandena – i hög grad påverkas av mänskligt orsakade utsläpp av växthusgaser. Denna analys har kopplingar till analysen för basfallet.

För båda dessa fall antas de initialtillstånd med tillhörande osäkerheter som beskrivs i kapitel 5. Vidare hanteras alla interna processer med tillhörande osäkerheter i enlighet med specifikationen som ges i **Processrapporten**, vilket sammanfattas i kapitel 7. Data med tillhörande osäkerheter är tagna från **Datarapporten** som sammanfattas i kapitel 9.

Analysen av referensutvecklingens basfall är uppdelad i fyra tidsskeden:

- Förvarets bygg- och driftperiod.
- De första 1 000 åren efter förslutning av förvaret och den första perioden med tempererat klimat enligt referensglaciationscykeln.
- Den återstående delen av glaciationscykeln.
- Efterföljande glaciationscykler under perioden fram till en miljon år efter förslutning.

För varje tidsskede presenteras frågorna i följande ordning:

- Klimatfrågor.
- Biosfärsfrågor.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska frågor som rör geosfären.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska frågor som rör det tekniska barriärsystemet (kapsel, buffert och återfyllning).

Behandlingen av varje fråga avslutas med en redovisning av identifierade osäkerheter att föras vidare till senare skeden av referensutvecklingen samt till efterföljande delar av säkerhetsanalysen.

Redogörelsen för varje skede avslutas med en diskussion om förväntad status hos säkerhetsfunktionsindikatorerna (definieras i kapitel 8) under och i slutet av skedet.

En avsevärd del av materialet som presenteras är resultat från simuleringsstudier, vilka nämndes i steg 4 (se avsnitt 2.5.4) och som visas grafiskt i AMF-scheman.

Efter analysen av basfallet analyseras varianten med global uppvärmning under rubrikerna ”Externa förhållanden”, ”Biosfären”, ”Förvarsutveckling” och ”Säkerhetsfunktioner”, huvudsakligen som jämförelser med analyserna av basfallet.

2.5.8 Steg 8: Val av scenarier

Vid hanteringen av osäkerheter i den framtida utvecklingen av förvarssystemet är det viktigt att reducera antalet möjliga utvecklingar som ska analyseras. Detta görs genom att välja ut en representativ uppsättning scenarier. Valet fokuseras på de delar av utvecklingen som är relevanta för säkerheten. På övergripande nivå handlar det om säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning”. Dessa detaljeras ytterligare genom säkerhetsfunktionsindikatorerna i kapitel 8.

De valda scenarierna ska tillsammans täcka alla rimliga framtida utvecklingar. Dessutom ska det vara möjligt att beräkna den risk som förknippas med förvaret som en summa av riskbidrag från de valda scenarierna. Detta diskuteras ytterligare i avsnitt 2.6.2 under rubriken ”Scenarieuppdelning”.

Föreskriftskrav och allmänna råd

Det finns flera aspekter av gällande föreskrifter som påverkar valet av scenarier. Det kvantitativa kriteriet för förvarets säkerhet i svenska föreskrifter är en riskbegränsning. Det måste därför vara möjligt att dra slutsatser om risken utifrån analyserna av de definierade scenarierna.

SSM:s föreskrift SSMFS 2008:21 kräver att olika scenarier används för att beskriva framtida möjliga utvecklingar av förvaret. Bland dessa ska det finnas ett huvudscenario, som täcker de mest troliga förändringarna inom förvaret och i dess omgivning.

De allmänna råden angående tillämpning av SSMFS 2008:21 definierar ett scenario i säkerhetsanalysen som ”en beskrivning av hur en given kombination av yttre och inre betingelser inverkar på slutförvarets funktion”.

I de allmänna råden beskrivs tre typer av scenarier: huvudscenariot, som omfattar den förväntade utvecklingen av förvarssystemet; mindre sannolika scenarier, som omfattar alternativa händelseförlopp till huvudscenariot och också effekterna av ytterligare händelser; samt restscenarier, som utvärderar särskilda händelser och förhållanden för att belysa funktionen hos enskilda barriärer. För dessa kategorier anger SSM:s allmänna råd följande:

”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 händelser 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 höra fall för att belysa skador på människor som gör intrång i slutförvar liksom fall för att belysa konsekvenserna av ett ej förslutet slutförvar som lämnats utan övervakning.”

Beträffande sannolikheten för scenarierna anger SSM:s allmänna råd: ”Sannolikheter för att scenarier och beräkningsfall verkligen ska inträffa bör uppskattas så långt det är möjligt för att kunna beräkna risk.”

SSM:s allmänna råd om tillämpning av SSMFS 2008:37 definierar ett scenario som ”en beskrivning av slutförvarets möjliga utveckling givet ett initialtillstånd, och förhållandena i omgivningen och deras utveckling”.

Beträffande valet av scenarier anger SSM:s allmänna råd följande:

”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.

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.”

”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.”

SSM:s allmänna råd anger: ”Ett antal scenarier för framtida oavsiktlig mänsklig påverkan på slutförvaret bör redovisas. Scenarierna bör omfatta ett fall av direkt intrång i samband med borrning 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 intrångsscenarier 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.”

SSM:s allmänna råd till SSMFS 2008:37 anger följande: ”Direkta konsekvenser för de individer som gör intrång i slutförvaret behöver inte redovisas.” Det noteras att detta står i motsats till vad som uttrycks i SSMFS 2008:21, där dessa situationer ingår bland restscenarierna.

De allmänna råden till SSMFS 2008:37 nämner också ”särskilda scenarier”: ”… en analys av ett tänkt bortfall, under de första tusen åren efter förslutning, av någon eller några barriärfunktioner av central betydelse för skyddsförmågan bör redovisas separat utanför riskanalysen. Syftet med en sådan analys bör vara att tydliggöra hur de olika barriärerna bidrar till slutförvarets skyddsförmåga.”

Metodik för val av scenarier

Givet föreskrifternas krav och de allmänna råd som beskrivs ovan, har en metodik i fem steg utvecklats för att välja scenarier. Metodiken förklaras nedan.

1. Definition av huvudscenariot

Ett huvudscenario definieras utifrån referensutvecklingen och i enlighet med SSMFS 2008:21. Huvudscenariot är uppdelat i två varianter, vilka baseras på de två varianterna av referensutvecklingen (Weichsel-basfallet och varianten med global uppvärmning). (Referensutvecklingen som motsvarar huvudscenariot förklaras i allmänna termer i steg 7. Hanteringen av osäkerheter i referensutvecklingen utvecklas ytterligare i avsnitt 2.8.4.)

(Det noteras att SSM använder ”klimatutvecklingar” som en hierarkisk nivå över scenarierna. För att inte komplicera beskrivningen ytterligare hanteras de olika typerna av klimatutveckling, som nämns i SSM:s allmänna råd, som varianter av scenarier.)

2. Val av ytterligare scenarier baserat på ett eventuellt bortfall av säkerhetsfunktioner

En viktig faktor som styr valet av scenarier är att de avsedda säkerhetsfunktionerna som rör inneslutning (se kapitel 8) bör upprätthållas. Dessa säkerhetsfunktioner används därför för att strukturera valet av ytterligare scenarier. Detta är det huvudsakliga tillvägagångssättet för att hantera frågan om mindre sannolika scenarier i enlighet med SSMFS 2008:21.

Kapseln har tre säkerhetsfunktioner som rör inneslutning: att tillhandahålla en korrosionsbarriär, att stå emot isostatisk last och att stå emot skjuvlast. Från säkerhetsfunktionerna kan man således härleda tre olika typer av kapselbrott; brott som orsakas av korrosion, isostatiskt tryck respektive skjuvrörelser. Därför väljs tre scenarier – ett för varje typ av kapselbrott. Tre olika fall av förlorad buffertfunktion betraktas också som olika scenarier: advektiva förhållanden, frysning och omvandling. Kapselscenarierna kombineras på ett systematiskt sätt med buffertscenarierna.

Osäkerheter relaterade till initialtillståndsfaktorer, processer och externa förhållanden som inte ingick i huvudscenariot beaktas sedan för varje utvalt scenario. För till exempel scenariot som behandlar kapselbrott på grund av isostatiskt övertryck beaktas möjliga brister vid tillverkningen av den lastbärande kapselinsatsen, högre svälltryck än de som angivits för referensbufferten och extrema inlandsisar som ger upphov till höga grundvattentryck.

FEP-diagrammet, se steg 5 i avsnitt 2.5.5, bidrar till att säkerställa att alla tänkbara förlopp som leder till brister i inneslutningen täcks in. Systematiska analyser görs av initialtillståndsfaktorer, långsiktiga processer och sådana externa förhållanden som möjligen skulle kunna bidra till vart och ett av dessa scenarier. Resultaten av analysen av huvudscenariot, med alla kopplade FEP och osäkerheter som beaktas däri, är en viktig utgångspunkt för denna genomgång.

Utifrån denna information görs sedan en bedömning av huruvida varje scenario ska betraktas som ett ”mindre sannolikt scenario” eller som ett ”restscenario”. I det förra fallet sätts normalt sannolikheten för scenariot pessimistiskt till ett. Begränsningar i sannolikheterna för dess karakteristiska FEP, till exempel stora jordskalv, beaktas emellertid i den riskberäkning som är kopplad till scenariot.

Dessa scenarier omfattar även många av de restscenarier som krävs av SSM:s föreskrifter och allmänna råd för att analysera betydelsen av barriärer och barriärfunktioner. För att få en djupare förståelse för barriärfunktionerna definieras ytterligare ett antal restscenarier. Dessa beskriver, med fokus på radionuklidtransport, hypotetiska situationer där ett initialt bortfall av en eller flera barriärer antas, se vidare avsnitt 13.7.3.

Valet av ytterligare scenarier beskrivs i detalj i avsnitt 11.2.

Analyserna av de valda ytterligare scenarierna beskrivs i kapitel 12, från avsnitt 12.2 och framåt.

3. Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar

Även en uppsättning scenarier som rör framtida mänskliga handlingar definieras och analyseras. Scenarier som rör mänskligt intrång och som leder till en försämring av systemets funktioner ska enligt SSMFS 2008:21 betraktas som ”mindre sannolika scenarier”. Enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 ska inte dessa tas med i risksummeringen. SSM kräver att restscenarier tas fram för att belysa skador på människor som gör intrång i slutförvaret och fall som visar på följderna av ett förvar som varken är förslutet eller övervakat.

Valet och konsekvensanalyserna av de scenarier som rör framtida mänskliga handlingar, FHA-scenarier, presenteras i avsnitt 14.2 som en del av dokumentationen av ytterligare analyser i kapitel 14. Dessa scenarier redovisas separat från huvudscenariot och de ytterligare scenarier som bygger på att säkerhetsfunktioner gått förlorade. Anledningen är att såväl metodiken för att definiera FHA-scenarier som analyserna av inneslutningsförmåga och fördröjningsförmågan skiljer sig från övriga scenarier.

4. Övriga restscenarier

Eventuella övriga scenarier, som av någon anledning bedöms nödvändiga för att få en heltäckande uppsättning, definieras vid behov också. Dessa kan omfatta scenarier som identifieras direkt i FEP-analysen, men inte i enlighet med kriterierna ovan.

Inga sådana frågor har identifierats i SR-Site. Det finns därför inga ytterligare restscenarier än de som definierats i enlighet med det förfarande som beskrivs i steg 2 och 3.

Ytterligare en uppgift för säkerhetsanalysen är att bidra till att påvisa att bästa möjliga teknik, BAT, har använts vid utformningen av förvaret. Detta kräver ett antal särskilda beräkningsfall, som inte ingår i de valda scenarierna, se vidare i avsnitt 2.7.

5. Kombination av scenarier

För att valet av scenarier ska bli heltäckande måste kombinationer av scenarierna och varianterna beaktas. Detta görs när samtliga varianter och restscenarier har valts och analyserats. Antalet möjliga kombinationer skulle kunna bli stort, även om man tar hänsyn till att ömsesidigt uteslutande scenarier inte ska kombineras. Därför måste ett praktiskt tillvägagångssätt för att hantera denna situation användas. Problemet blir ytterligare komplext av det faktum att varje variant kan undersökas med hjälp av ett antal olika beräkningsfall.

Olika möjliga händelseföljder är också relaterade till frågan om hur scenarierna kombineras. Ordningen i vilken olika händelser eller fenomen uppträder kan vara viktig för förvarets utveckling. Detta tas uttryckligen upp i varje scenario.

Utvärderingen av kombinationer av scenarier beskrivs i avsnitt 12.9.

2.5.9 Steg 9: Analys av valda scenarier

Analysen av de valda scenarierna är uppdelad i två steg: analys av inneslutningsförmåga och av fördröjningsförmåga.

Analys av inneslutningsförmåga

Inneslutningsförmåga analyseras inte ytterligare i huvudscenariot. Resultaten från referensutvecklingen i steg 7 (se avsnitt 2.5.7) används.

De ytterligare scenarierna analyseras genom att fokus riktas mot faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte bibehålls. I de flesta fall utförs dessa analyser genom jämförelser med utvecklingen för huvudscenariot. Det innebär att de endast omfattar sådana aspekter av förvarsutvecklingen för vilka scenariot i fråga skiljer sig från huvudscenariot.

En gemensam mall används vid analysen av de ytterligare scenarierna. Rubrikerna i mallen är följande:

- Beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er).
- Hantering av frågan i referensutvecklingen.
- Kvalitativ beskrivning av förloppen som leder till denna situation.
- Kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till denna situation.
- Kategorisering som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”.
- Slutsatser.

Analysen av inneslutningsförmågan redovisas i kapitel 12, med undantag av scenarier som rör framtida mänskliga handlingar vilka analyseras i avsnitt 14.2.

Analys av fördröjningsförmågan

I det andra steget i scenarieanalyserna beräknas radionuklidutsläpp, radionuklidtransport och dospåverkan för de möjliga kapselbrott som identifierats för varje scenario i analysen av inneslutningsförmågan. Syftet är att utvärdera systemets fördröjningsegenskaper för dessa scenarier och att kvantifiera risken.

I allmänhet definieras ett antal beräkningsfall för varje scenario, förutom för huvudscenariot där konsekvenserna inbegrips i de fall som analyseras för de ytterligare scenarierna. Beräkningsfallen formuleras så att de tar hänsyn till osäkerheter som rör både inneslutningsförmågan och fördröjningsförmågan.

Osäkerheter som rör fördröjningsförmågan ingår inte som faktorer vid valet och analysen av scenarier som beskrivs ovan. För varje scenario hanteras därför säkerhetsfunktionerna för fördröjning på ett liknande sätt som det som användes för att hantera funktionerna för inneslutning. Tillvägagångssättet ger en fullständig täckning av de osäkerheter som rör fördröjning. En liknande mall som för inneslutningsförmågan används. De antal fall som erhålls för varje scenario begränsas till ett hanterbart antal, eftersom det för de viktigaste scenarierna gäller att i) fallen för de olika scenarierna liknar varandra och ii) de identifierade felsituationerna i ett scenario ofta tyder på att en eller flera barriärer har försämrats i sådan utsträckning att barriärfunktionen har gått förlorad. Antalet osäkra faktorer minskar därmed. Ett scenario behandlar till exempel förlust av inneslutning orsakad av korrosion. I det scenariot erhålls ett riskbidrag endast i de fall bufferten går förlorad. För denna situation definieras ett basfall för beräkningarna av radionuklidtransport och dos. Därefter gås samtliga säkerhetsfunktioner, som bidrar till fördröjning, igenom med hjälp av den nämnda mallen för att härleda ytterligare beräkningsfall som omfattar osäkerheter relaterade till fördröjning. Det faktum att bufferten gått förlorad i detta scenario minskar avsevärt antalet beräkningsfall.

De beräknade riskerna från huvudscenariot och från de ytterligare scenarier som hör till kategorin ”mindre sannolika” (men inte till ”restscenarier”) summeras för att få den totala risken för förvaret över tid.

Känslighetsanalyser av hur resultaten från de probabilistiska beräkningarna påverkas av osäkerheter i indata görs huvudsakligen genom i) beräkning av standardiserade rangregressionskoefficienter för att utvärdera resultatet av probabilistiska beräkningar, ii) utveckling av en skräddarsydd regressionsmodell, baserad på den matematiska modell som används vid riskberäkningen.

Huvudresultaten från konsekvensberäkningarna presenteras i kapitel 13, medan detaljer ges i **Radionuklidtransportrapporten** för SR-Site.

2.5.10 Steg 10: Ytterligare analyser och stödjande argument

I detta steg görs ytterligare ett antal analyser för att fullborda säkerhetsanalysen. Dessa omfattar:

- Urval och analys av FHA-scenarier, inklusive en kartbeskrivning av urvalsmetodiken.
- Analyser för att redovisa optimering och användning av bästa möjliga teknik.
- Verifiering av att de FEP som uteslutits under tidigare delar av analysen är försumbara i ljuset av den slutförda scenarie- och riskanalysen.
- En kort redovisning av tidsperioden bortom en miljon år.
- Naturliga analogier.

Se vidare i kapitel 14.

2.5.11 Steg 11: Slutsatser

Detta steg innebär att integrera resultaten från de olika scenarieanalyserna, dra slutsatser beträffande säkerheten i relation till myndighetskriterierna samt att ge återkoppling rörande förvarsutformning, detaljerade platsundersökningar och SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration.

Diskussionen om uppfyllandet av föreskrifternas riskbegränsning är en central del i slutsatserna. I detta ingår också en diskussion om tilltron till de olika analysfallen som riskberäkningarna bygger på.

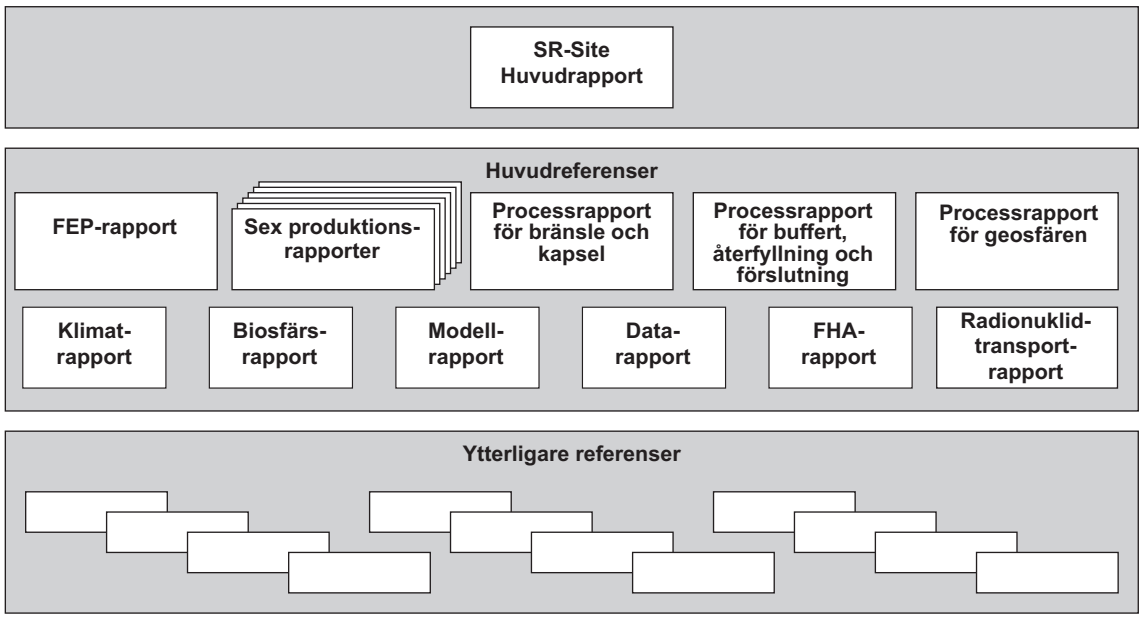
Även slutsatser och återkoppling beträffande utformningen av de tekniska barriärerna och förvaret ingår. Framför allt presenteras, i enlighet med gällande föreskrifter, en uppsättning konstruktionsstyrande fall, vilka är baserade på de riskbidragande scenarierna. Fallen utgörs av specifikationer av de laster som förvarssystemet ska kunna stå emot över tid. De uppdaterade konstruktionsstyrande fallen används, tillsammans med andra resultat från SR-Site, för att bedöma om det finns ett behov av att uppdatera de konstruktionsförutsättningar som påverkar den långsiktiga säkerheten /SKB 2009a/ och som användes för att utveckla den nuvarande utformningen så att den blir långsiktigt säker. Utöver de konstruktionsstyrande fallen och andra indata till översynen av konstruktionsförutsättningarna ges återkoppling avseende ett antal detaljer vid utformningen. Slutsatser dras också beträffande bästa möjliga teknik, BAT. Detta är emellertid en mångfacetterad fråga för vilken endast en del av underlaget för slutsatserna kommer från säkerhetsanalysen och från de beräknade riskerna.

Se vidare i kapitel 15.

2.5.12 Rapporthierarki i SR-Site-projektet

Som nämndes i föregående avsnitt leder flera av de steg som genomförs i SR-site-analysen till särskilda rapporter med central betydelse för slutsatserna och analyserna i denna huvudrapport. I tabell 2-1 presenteras dessa *huvudreferenser*. Där definieras också förkortningar med vilka de identifieras i den fortsatta texten. Rapporten med den fullständiga titeln ”FEP report for the safety assessment SR-Site”, identifieras till exempel som **FEP-rapporten**. Det finns också omkring 80 *ytterligare referenser*, som behandlar snävare frågeställningar och som stödjer antingen huvudrapporten eller en av huvudreferenserna. Rapporthierarkin visas i figur 2-3. Alla dessa rapporter kan laddas ned från www.skb.se.

Som nämndes i avsnitt 1.6 är dessutom ett av de mest grundläggande dokumenten den platsbeskrivande modellen för Forsmark /SKB 2008a/. Denna rapport ger indata till SR-Site-projektet och förkortas **Platsbeskrivning Forsmark**.



Figur 2-3. *Hierarkin för huvudreferenserna och de ytterligare referenserna i SR-Site-projektet. Huvudreferenserna stödjer huvudrapporten. De ytterligare referenserna stödjer antingen huvudrapporten direkt eller en av huvudreferenserna. Bland de sex* ***Produktionsrapporterna*** *ingår* ***Bränslerapporten*** *och* ***Berglinjerapporten****.*

Tabell 2-1. Huvudreferenser i SR-Site-projektet. Alla dessa rapporter finns tillgängliga på www.skb.se.

Fullständigt namn	Förkortning som används för hänvisning i denna huvudrapport	Text i referenslistan (kapitel 16)
FEP report for the safety assessment SR-Site	**FEP-rapport**	**FEP report, 2010.** FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository	**Bränslerapport**	**Spent fuel report, 2010.** Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Design, production and initial state of the canister	**Produktionsrapport för kapseln**	**Canister production report, 2010.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Design, production and initial state of the buffer	**Produktionsrapport för bufferten**	**Buffer production report, 2010.** Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels	**Produktionsrapport för återfyllningen**	**Backfill production report, 2010.** Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Design, production and initial state of the closure	**Produktionsrapport för förslutningen**	**Closure production report, 2010.** Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Design, construction and initial state of the underground openings	**Berglinjerapport**	**Underground openings construction report, 2010.** Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site	**Processrapport för bränslet och kapseln**	**Fuel and canister process report, 2010**. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site	**Processrapport för bufferten, återfyllningen och förslutningen**	**Buffer, backfill and closure process report, 2010**. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Geosphere process report for the safety assessment SR-Site	**Processrapport för geosfären**	**Geosphere process report, 2010**. Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site	**Klimatrapport**	**Climate report, 2010**. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site	**Radionuklidtransportrapport**	**Radionuclide transport report, 2010.** Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Model summary report for the safety assessment SR-Site	**Modellrapport**	**Model summary report, 2010**. Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Data report for the safety assessment SR-Site	**Datarapport**	**Data report, 2010**. Data report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Handling of future human actions in the safety assessment SR-Site	**FHA-rapport**	**FHA report, 2010**. Handling of future human actions in the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results	**Biosfärsrapport**	**Biosphere synthesis report, 2010.** Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results. SKB TR-10-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

2.6 Metod för riskberäkningar

2.6.1 Föreskrifternas krav och allmänna råd

Det kvantitativa acceptanskriteriet i Sverige för den långsiktiga säkerheten hos ett kärnavfallsförvar definieras som en begränsning av den årliga risken. SSMFS 2008:37 anger följande: ”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 risken.” Omvandlingen mellan effektiv dos och risk ska göras med hjälp av ICRP:s sannolikhetskoefficient 0,073 per Sievert för cancer och ärftliga skador. En årlig riskbegränsning på 10^{-6} motsvarar alltså en begränsning av den effektiva dosen till omkring $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Sv/år. (ICRP:s koefficient har uppdaterats och är nu något lägre, men detta har inte införts i de svenska föreskrifterna.)

SSM:s allmänna råd anger följande: ”Individrisken bör beräknas som ett årligt medelvärde utifrån en uppskattning av livstidsrisken för samtliga relevanta exponeringsvägar för varje individ.”

Som nämndes redan i avsnitt 2.4 kan, i enlighet med de allmänna råden till SSM:s föreskrifter, det kvantitativa riskkriteriet tillämpas som ett gränsvärde under de ungefär första 100 000 åren. Därefter kan det användas som en av flera indikatorer, som en grund för diskussioner om förvarets skyddsförmåga.

Det är vidare viktigt att notera att scenarierna som rör framtida mänskliga handlingar enligt SSM:s allmänna råd inte ska ingå i riskberäkningen.

2.6.2 Tillämpning i SR-Site

Detta avsnitt beskriver vissa grundläggande frågor om hur uppfyllandet av SSM:s riskkriterium visas i SR-Site. Det mesta av materialet nedan har presenterats och diskuterats vid en NEA-workshop om vilken roll risk har i säkerhetsanalyser /NEA 2005/ och vid en internationell konferens om probabilistisk analys och hantering av säkerhet /Hedin 2004a/.

Scenarieuppdelning

I princip ska produkten av doskonsekvenser och sannolikheter för samtliga möjliga framtida förvarsutvecklingar vägas samman och presenteras som en tidsberoende risk. Spektrumet av möjliga utvecklingar är emellertid mycket brett och kan inte skildras med hög detaljeringsgrad. Detta konstateras också i SSM:s föreskrifter och tillhörande allmänna råd.

Det vanliga tillvägagångssättet i säkerhetsanalyser – och så även i SR-Site – är att arbeta med scenarier och varianter, som utformas för att täcka in huvuddragen i ett antal representativa möjliga framtida utvecklingar. Tillsammans har de till uppgift att ge en rimlig bild av möjliga framtida exponeringssituationer. I princip skulle risken kunna beräknas för varje scenario och variant och därefter vägas samman med hjälp av sannolikheten för varje scenario/variant. I praktiken måste emellertid scenariesannolikheterna ofta överskattas pessimistiskt, se vidare underavsnittet ”Överskattning av risk” nedan. Varje variant, som representeras av ett specifikt beräkningsfall, kan dessutom utvärderas probabilistiskt för att fastställa medelexponeringen, givet dataosäkerheterna för den specifika varianten.

Angreppssättet att beräkna risken som en summa av riskbidrag från ett antal scenarier begränsar hur man väljer och definierar scenarier. Det måste vara möjligt att logiskt förklara att summeringen och uppsättningen av scenarier behöver vara heltäckande i den meningen att alla relevanta framtida utvecklingar täcks.

Ett ”normalscenario” med en hög sannolikhet måste till exempel innehålla initialt defekta kapslar och andra barriärbrister – om sådana är sannolika – då hela uppsättningen av kapslar och deponeringshål i förvaret beaktas.

Eftersom SSM:s allmänna råd anger att riskkriteriet avser ett av människan ostört förvar, utesluts scenarier som avser direkt intrång i förvaret från risksummeringen. Även framtida mänskliga handlingar som stör förvarets omedelbara omgivning, exempelvis det lokala grundvattenflödesfältet, beaktas vid hanteringen av framtida mänskliga handlingar i avsnitt 14.2, men undantas vid risksummeringen.

Överskattning av risk

Formuleringen av scenarier, varianter och beräkningsfall samt efterföljande sammanvägning av dessa till en total risk syftar till att överskatta risken. SSM:s föreskrifter kräver att den årliga risken ska vara mindre än 10^{-6}. Vad gäller påvisandet av att riskkravet uppfylls finns det ett antal osäkerheter som inte kan hanteras kvantitativt på något annat sätt än genom att göra pessimistiska antaganden.

En annan situation där risken måste överskattas rör sannolikheten för olika scenarier. Beträffande till exempel det framtida klimatet kan man föreställa sig antingen upprepningar av tidigare 120 000 år långa glaciationscykler eller ett alternativ där denna utveckling i hög grad störs av globala uppvärmningseffekter. Även om de två scenarierna inte kan inträffa samtidigt, måste båda betraktas som sannolika. Vid risksummeringen kan man då utnyttja att den sammanlagda konsekvensen av en uppsättning ömsesidigt uteslutande scenarier inte vid någon tidpunkt kan överskrida maximivärdena

för konsekvenserna av ett enskilt scenario. För scenarier och varianter där en försvarbar sannolikhet är svår att ta fram kan ett scenario eller en variant som ger stora konsekvenser pessimistiskt tilldelas sannolikheten ett. Andra scenarier och varianter, som ger mindre doskonsekvenser, kan då i risk-summeringen pessimistiskt täckas in av fallet med de allvarligare konsekvenserna.

Även om det primära syftet med riskberäkningarna är att påvisa att riskkriteriet är uppfyllt, finns också en tydlig ambition att bestämma känsligheterna hos beräkningsresultaten. För det ändamålet ska beräkningsfallen i princip återspegla osäkerheten så realistiskt som möjligt. Ett kvantitativt verktyg för detta är probabilistiska utvärderingar av beräkningsfall, följt av känslighetsanalyser av resultaten.

Slutsatsen blir att pessimistiska förenklingar ska undvikas i de fall där det finns en sund vetenskaplig grund för en kvantitativ behandling. De egenskaper hos systemet som pessimistiskt har utelämnats bör ingå i en diskussion om känsligheter.

Den exponerade gruppens storlek

Storleken av den grupp för vilken den övre riskgränsen gäller måste definieras för att utvärdera om riskkriteriet uppfylls. SSMFS 2008:37 ger ingen detaljerad definition. I de allmänna råden anger emellertid SSM följande: ”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 borrad brunn 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.”

Den detaljerade tillämpningen av dessa två alternativ i SR-Site beskrivs vidare i samband med konsekvensberäkningarna i kapitel 13.

Tidsperioder

I SR-Site utförs riskberäkningar för en tidsperiod av en miljon år. I enlighet med SSM:s allmänna råd, utvärderas ett strikt uppfyllande av riskbegränsningskriteriet för en tidsperiod av 100 000 år. För längre tidsperioder används resultaten från riskberäkningen för att diskutera förvarets skyddsförmåga och hur denna förmåga kan förbättras, vilket också är i enlighet med SSM:s allmänna råd.

Tidsberoende risk eller maximivärde över hela analysperioden?

En övre gräns för maxvärdet av den tidsberoende risken kan beräknas genom att man för varje realisering fastställer maxvärdet för den årliga effektiva dosen[6] över analysperioden på en miljon år. Medelvärdet för den fastställda fördelningen av maxdoser jämförs sedan med kriteriet för effektiv dos. Även om detta är ett korrekt sätt att definiera en övre gräns för risken, är det mer informativt – och också i enlighet med SSM:s föreskrifter – att beräkna medelvärdet för den årliga effektiva dosen vid varje tidpunkt och kräva att denna kvantitet aldrig överskrider den effektiva dos som motsvarar riskkriteriet 10^{-6}. De två metoderna benämns ibland ”medelvärdet av maxvärdena” och ”maximum av medelvärdet”. Tolkningen av ”maximum av medelvärdet” är meningsfull i det hänseendet att samtliga exponeringsvägar för hypotetiska individer som lever i framtiden beaktas, medan ”medelvärdet av maximumvärdena” är svårare att tolka. I SR-Site redovisas risk som en funktion av tiden genom att de tidsberoende genomsnittliga årliga effektiva doserna från varje scenario vägs samman för att få en tidsberoende risk.

[6] Den årliga effektiva dosen är summan av den årliga effektiva dosen från extern exponering och den årliga faktiska effektiva dosen från intern exponering.

Riskutspädning

Termen ”riskutspädning” används ibland för att beskriva en situation där en högre grad av osäkerhet i ingångsparametrarna, dvs en bredare indatafördelning, leder till ett lägre medelvärde för en resulterande kvantitet, exempelvis medeldos eller risk /NEA 1997b/. En till synes paradoxal situation uppstår, där ofullständigare kunskap skulle ge ett säkrare förvar om medelvärdet för en högt exponerad individ vid en viss tidpunkt används som säkerhetsindikator. Ofullständig kunskap sprider dosen över fler individer och över längre tidsperioder. Den totala exponeringen för samtliga individer över alla tidsperioder kan vara samma eller större, medan mer exakt kunskap kommer att ”koncentrera” risken till färre individer och kortare tidsperioder. Detta kan till exempel vara fallet när det finns en osäkerhet beträffande tidpunkten för en händelse som skulle leda till ett kapselbrott. Doskonsekvenserna för en given tidpunkt kunde då i mycket hög grad bero på den antagna tidpunkten då kapselbrottet inträffade. Ett genomsnitt för alternativa situationer då kapseln blir otät – och maximidosen alltså uppträder vid olika tidpunkter – skulle minska det resulterande medelvärdet vid varje tidpunkt, där minskningen ökar med det tidsintervall över vilket möjliga kapselbrott fördelas.

Denna effekt är inneboende i begreppet risk, som det definieras i SSM:s föreskrifter. Effekten är därmed en oundviklig konsekvens av ett riskkriterium som ska tillämpas som funktion av tid och där kvantiteten som ska fastställas är medelvärdet med hänsyn tagen till alla relevanta osäkerheter. SSM:s allmänna råd kräver också att frågan om riskutspädning tas upp när konsekvenserna av utsläpp från förvaret analyseras.

Ett besläktat fenomen rör utvecklingen av biosfären under de förväntade långa perioderna av permafrost eller glaciation. Antag, för att belysa detta, att för människan betydande doser endast kan förekomma under perioder med tempererat klimat. Antag också att dessa perioder i det långa loppet kommer att utgöra omkring tio procent av tiden, vilket historiska belägg relevanta för Sverige antyder. De exakta tidpunkterna för dessa tempererade perioder kan dock inte förutsägas bortom omkring 10 000 år in i framtiden. I princip skulle denna situation kunna hanteras genom att ett antal framtida situationer simuleras, där början på de tempererade perioderna tillåts variera slumpmässigt efter 10 000 år. Ett genomsnitt av samtliga dessa resultat skulle för varje tidpunkt bortom 10 000 år ge en doskonsekvens som är en faktor tio mindre än den som erhålls under en period av tempererat klimat. Detta mycket förenklade exempel visar en annan typ av riskutspädning, återigen orsakad av en osäkerhet angående tidpunkten för när ett fenomen inträffar, vilken i princip skulle kunna vara kompatibel med det svenska riskkriteriet. Effekten kommer emellertid att undvikas i säkerhetsanalysen, genom att man till exempel antar samma tidsföljd av klimattyper i varje simulering eller genom att man antar dagens biosfär.

För SR-Site dras flera slutsatser från vad som nämns ovan:

- En bredare indatafördelning är inte nödvändigtvis pessimistisk, inte ens om den breddas i riktning mot svårare konsekvenser. Alltså krävs noggrannhet vid tilldelning av indatafördelningar, så att indatafördelningar som skulle kunna påverka beräkningsresultatet på detta sätt inte breddas i onödan.
- Uppdelade beräkningar och uppdelade diskussioner av resultaten av mer integrerade beräkningar är nödvändiga om riskutspädning ska kunna fångas upp. Sådana beräkningar och diskussioner ingår därför i SR-Site. Ett enkelt men effektivt sätt att undvika riskutspädning när orsaken till den har identifierats är att belysa effekten genom att ersätta probabilistiska indata för exempelvis tidpunkter för kapselbrott med en fastställd tidpunkt. Detta är ett av angreppssätten i SR-Site.
- För att undvika riskutspädning i vissa fall med kortvariga utsläpp används en metod som föreslås i bilaga 1 till SSMFS 2008:37.
- Ett annat alternativ för att fånga upp effekterna av riskutspädning är att komplettera en beräkning enligt ”maximum av medelvärdet” med en beräkning enligt "medelvärdet av maximivärdena", enligt beskrivningen i föregående avsnitt. Detta görs emellertid bara i illustrativa syften i SR-Site eftersom resultatet från en sådan beräkning är svår att tolka, vilket diskuterades ovan.

2.6.3 Alternativa säkerhetsindikatorer

Säkerhetsindikatorn för dos/risk utgör ett mått på radiologisk påverkan från förvaret på framtidens människor. Flera aspekter av biosfärens utveckling är behäftade med stora osäkerheter, även i ett relativt kort tidsperspektiv. Utvärderingen av säkerhet beror på ett antal antaganden som görs för att hantera dessa osäkerheter. Det är därför av intresse att komplettera både indikatorn för dos/risk

och utvärderingen av påverkan på biota med alternativa indikatorer, som inte kräver detaljerade antaganden om biosfären eller om mänskliga vanor.

De allmänna råd som tillhör SSMFS 2008:21 nämner att dosindikatorn för en avlägsen framtid kan kompletteras med andra säkerhetsindikatorer, till exempel koncentrationer i grundvatten eller ytnära vatten av radionuklider från förvaret eller de beräknade flödena av radionuklider till biosfären.

Ett problem med alternativa indikatorer är att det i allmänhet inte finns något kriterium att jämföra de beräknade kvantiteterna med. I vissa fall kan beräkningsresultat jämföras med såväl naturliga koncentrationer som flöden på platsen eller på andra ställen. Sådana kriterier ger emellertid inga referenspunkter för de radionuklider som genereras genom mänskliga aktiviteter. Problemet kan till viss del lösas genom att naturligt förekommande totalkoncentrationer/totalflöden av α- och β-strålare jämförs med motsvarande förvarsrelaterade kvantiteter, eller genom att jämföra totaltoxicitet som erhålls genom att skala aktiviteten för de olika ingående nukliderna (i Bq) med den dos som erhålls vid intag av en Bq av respektive nuklid.

Det noteras också att säkerhetsfunktionsindikatorerna, se kapitel 8, är en typ av alternativa säkerhetsindikatorer som är relaterade till barriärförhållanden, snarare än till koncentrationer och flöden. Indikatorkriterierna är där referensvärden, som utfallet av en analys av förhållandet i fråga kan jämföras med. Emedan säkerhetsfunktionsindikatorerna relaterar till funktionen hos ett delsystem, utgör säkerhetsindikatorerna ett mått på det totala systemets prestanda.

EU-projektet SPIN

Ett EU-projekt /Becker et al. 2002/ drar slutsatsen att två alternativa indikatorer med fördel kan användas för att komplettera dosindikatorn. Dessa är:

- Radiotoxicitetskoncentration i vatten i biosfären: Förordas för medellånga tidsperioder, dvs flera tusen till flera tiotusentals år.
- Radiotoxicitetsflöde från geosfären: Förordas för senare tidsskeden.

Projektet beskriver också referensvärden som preliminärt kan användas för jämförelser med beräknade koncentrationer och flöden av radionuklider från förvaret. Beträffande radiotoxicitetsflöden från geosfären föreslogs ett indikativt referensvärde på 60 Sv/år för ett typiskt område av 200 km^2.

Finska begränsningar för utsläpp av radioaktivitet

Den finska strålsäkerhetscentralen STUK har fastställt begränsningar beträffande utsläpp av radioaktivitet till miljön /STUK 2001/.

Dessa nuklidspecifika begränsningar har endast definierats för långlivade radionuklider. Effekterna av deras kortlivade radionukliddöttrar beaktas i de begränsningar som definieras för de långlivade modernukliderna. De nuklidspecifika utsläppsbegränsningarna är:

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

Begränsningarna tillämpas på aktivitetsutsläpp som uppstår från ”normalscenarier” (expected evolution scenarios) och som kan nå ut i miljön efter flera tusen år, medan begränsningar i doshastighet tillämpas på kortare sikt. Då ovanstående begränsningar tillämpas kan medelvärden av aktivitetsutsläpp beräknas över högst 1 000 år i taget. Summan av kvoterna mellan de radionuklidspecifika aktivitetsutsläppen och motsvarande begränsningar ska vara mindre än ett. Det bör

noteras att den finska myndigheten har härlett dessa begränsningar delvis utifrån en uppsättning referensbiosfärer – som i framtiden anses vara möjliga vid den planerade förvarsplatsen Olkiluoto som är belägen vid Östersjökusten – och delvis från naturliga flöden av radionuklider som fastställts för liknande miljöer. Referensvärdena från den finska myndigheten är således inte direkt tillämpliga för andra förvarskoncept och platser /Becker et al. 2002/. Både förvarsmetoden och de platser som har övervägts i Sverige liknar emellertid dem som de finska begränsningarna av aktivitetsutsläpp har utvecklats för.

Övriga studier

En studie från SKI och SSI /Miller et al. 2002/ sammanställde utifrån publicerad litteratur en omfattande databas över förekomsten av grundämnen i naturliga material. Dessa data användes sedan för att beräkna ett intervall av grundämnes- och aktivitetsflöden, som uppstår på grund av olika processer vid olika rumsliga skalor. Författarna drar slutsatsen att dessa flöden bör vara jämförbara med resultaten från säkerhetsanalysberäkningar.

IAEA har publicerat en studie om säkerhetsindikatorer under olika tidsskeden för säkerhetsanalys av kärnavfallsförvar under jord (”Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories”) /IAEA 1994/. Organisationen genomför för närvarande ett forskningsprogram om naturliga koncentrationer och flöden.

Tillämpning i SR-Site

Fyra alternativa riskindikatorer används i SR-Site: utsläpp av aktivitet från geosfären, radiotoxicitetsflöde från geosfären, koncentrationer av radionuklider i ekosystem och flöden av radionuklider. 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 från SPIN-projektet för radiotoxicitetsflöde från geosfären.
- Uppmätta koncentrationer av naturligt förekommande radionuklider i ekosystemen vid förvaret i Forsmark eller andra jämförbara platser.
- Naturligt förekommande flöden av radionuklider på platsen, i synnerhet U-238 och Ra-226.

2.7 Bästa möjliga teknik och optimering

2.7.1 Inledning

Enligt svensk lagstiftning måste en tillståndsansökan om ett slutförvar ta upp frågan om bästa möjliga teknik och optimering. En allmän genomgång av bästa möjliga teknik ges i en särskild bilaga till tillståndsansökningarna. Till tillståndsansökningarna biläggs också rapporter som beskriver i) alternativa metoder och motiven till valet av KBS-3-metoden och ii) den tekniska utvecklingen av KBS-3-metoden med motiv till valda material, barriärmått osv.

För att uppfylla SSM:s detaljerade föreskrifter beträffande långsiktig säkerhet måste vissa aspekter av påvisandet av bästa möjliga teknik tas upp i den analys av långsiktig säkerhet som biläggs tillståndsansökningarna, dvs i denna SR-Siterapport. Här följer en mer detaljerad redovisning av dessa krav och sättet att hantera dem.

2.7.2 Föreskrifternas krav

Beträffande optimering och bästa möjliga teknik anger de allmänna råden till SSMFS 2008:37 följande:

”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.”

SSMFS 2008:21 anger att ”barriärsystemet ska konstrueras och utföras med hänsyn till bästa möjliga teknik” och hänvisar till miljöbalken. I de allmänna råden till SSMFS 2008:21 anges att ”Användande av bästa möjliga teknik innebär att tekniken från teknisk och ekonomisk synpunkt ska vara industriellt möjlig att använda inom detta område. Det innebär att den ska vara tillgänglig och inte bara förekomma på experimentstadiet. Tekniken behöver dock inte finnas tillgänglig i Sverige (se närmare prop. 1997/98:45, del I, sid. 215 ff).”

2.7.3 Allmänna frågor rörande optimering och bästa möjliga teknik

En allmän redovisning av användningen av bästa möjliga teknik är ett vittomspännande ämne som spänner från valet av metod för hanteringen av kärnavfall till små detaljer avseende den valda metoden. Endast en begränsad del av detta vittomspännande ämne kan och bör tas upp i säkerhetsanalysen av den valda metoden. Här har redovisningen av bästa möjliga teknik därför begränsats till KBS-3-metoden med vertikal deponering. Metoden innebär att man utnyttjar koppar-/segjärnskapslar, buffert och återfyllning på den plats som valts. Säkerhetsrelaterade aspekter av platsvalet diskuteras i en separat rapport som biläggs tillståndsansökningarna. Enligt SR-Can-analysen, se avsnitt 13.3.4 i /SKB 2006a/, är det i viss mån möjligt att diskutera exempelvis val av material och mått utifrån perspektivet av bästa möjliga teknik, baserat på resultaten från säkerhetsanalysen. Säkerhetsanalysens roll beträffande bidraget till diskussionen om optimering och bästa möjliga teknik stämmer också överens med de åsikter som uttrycks i SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SKB:s SR 97-analys, se avsnitt 3.3.6 i /SKI/SSI 2001/. Den omfattande frågan om bästa möjliga teknik diskuteras i ett särskilt dokument som biläggs SKB:s ansökningar om slutförvaret, se ovan.

Frågan om bästa möjliga teknik är också nära förknippad med den om återkoppling till förvarsutformningen, vilket också anges i de allmänna råden till SSMFS 2008:37. Som också noteras i föreskrifterna utvecklas förvarssystemet stegvis. Säkerhetsutvärderingar görs vid lämpliga tidpunkter av utvecklingen. Detta betyder att den blivande verksamhetsutövaren inte slutligen kan hävda att optimering har skett och att bästa möjliga teknik används förrän mycket av det iterativa utvecklingsarbetet har slutförts. Vid tidigare skeden är redovisningen av optimering och bästa möjliga teknik snarare ett ramverk för diskussioner om återkoppling till återstående utvecklingsbehov. Diskussionen som fördes i samband med SR-Can-analysen är i hög grad ett exempel på den senare rollen för optimering och bästa möjliga teknik.

2.7.4 Optimering kontra bästa möjliga teknik

I de allmänna råden till SSMFS 2008:37 framhävs optimering framför allt för den första perioden efter förslutning. Det anges också att optimering ska ske med avseende på beräknade risker. Som framgår av redovisningen av beräknad risk i SR-Can-analysen (se avsnitt 13.3.2 i /SKB 2006a/) är den analyserade risken försumbar för tiotusentals år framåt i tiden. Detta tyder på att optimering har begränsad betydelse under denna inledande period som betonas i föreskrifterna. I föreskrifterna nämns emellertid också att optimering och bästa möjliga teknik ska tillämpas parallellt. I själva verket är det ofta svårt att tydligt särskilja de två. När diskussionen baseras på resultat från säkerhetsanalysen av den föredragna metoden ”reduceras” ofta tolkningen om vad som är bästa möjliga teknik till en redovisning av hur den valda lösningen optimeras, eftersom det i allmänhet inte finns några alternativa tekniker att välja bland eller som analyserats i säkerhetsanalysen. (Termen ”optimering” används med samma betydelse som i SSMFS 2008:37, dvs ”begränsning av stråldoser till människor så långt detta rimligen kan göras med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhälleliga faktorer”, den så kallade ALARA-principen.)

I de allmänna råden till SSMFS 2008:37 noteras det att för tidsperioden mellan 100 000 år och en miljon år ska resultaten från riskberäkningen användas för att diskutera åtgärder som kan förbättra förvarets skyddsförmåga om riskgränsen överskrids.

2.7.5 Slutsatser relaterade till SR-Site-analysens metodik

Baserat på ovanstående dras slutsatsen att de beräknade riskresultaten i analysen av långsiktig säkerhet måste utvärderas utifrån bästa möjliga teknik.

För att uppnå detta utförs känslighetsanalyser av risken med avseende på viktiga barriärmått, layoutregler, förvarsdjup, osv som en del av de ytterligare analyser som följer på riskberäkningen, se vidare i avsnitt 14.3.

Baserat på resultaten från känslighetsanalyserna förs även en diskussion i avsnitt 14.3 om uppfyllande av denna aspekt av bästa möjliga teknik.

2.8 Övergripande hantering av information och osäkerheter

En säkerhetsanalys hanterar en mycket stor mängd information av kvalitativ och kvantitativ art, inklusive de osäkerheter som är förknippade med den informationen. I detta avsnitt ges en översikt av frågor som är kopplade till hanteringen av information och osäkerheter i SR-Site. Eftersom detta genomsyrar hela analysen är översikten delvis en sammanfattning av de olika stegen i metoden som beskrivs i avsnitt 2.5, men med tyngdpunkt på hanteringen av information och osäkerheter. I all hantering av osäkerheter är det viktigt att beakta betydelsen av osäkerheten i fråga i relation till säkerhetsanalysens ändamål.

Som bakgrund ges i avsnitt 2.8.1 en kortfattad beskrivning av de olika typer av osäkerheter som måste hanteras i säkerhetsanalysen.

2.8.1 Klassificering av osäkerheter

Det finns inget unikt sätt att klassificera osäkerheter i en säkerhetsanalys. Klassificeringen som används nedan är emellertid förenlig med internationell praxis /NEA 1991, 1997a/ i den här typen av analys. SKB har tidigare diskuterat klassificering och typer av osäkerheter i detalj, se exempelvis /SKB 1996, avsnitt 3.4/ och /Andersson 1999, avsnitt 2.1/ samt huvudrapporten för SR-Can /SKB 2006a, avsnitt 2.7/, som det följande är en uppdatering av. Här ges endast en kortfattad översikt, i vilken presentationen av hanteringsplanen sätts in i sitt sammanhang.

Säkerhetsanalysen grundas på analysen av hur ett system med ett initialtillstånd utvecklas till följd av inverkan på systemet av en mångfald interna processer och av yttre påverkan/händelser. Utifrån beskrivningen kan ett flertal frågeställningar som rör osäkerheter identifieras. Dessa listas nedan.

- Hur väl är initialtillståndet känt, kvalitativt och kvantitativt, dvs har alla viktiga aspekter av initialtillståndet identifierats och hur väl kan de beskrivas kvantitativt?

- Har alla relevanta interna processer under de aktuella tidsskedena identifierats? Hur väl förstår man processmekanismerna?
- Har alla relevanta yttre händelser och fenomen identifierats? Hur väl kan de kvantifieras?
- Hur kan en representativ redogörelse för systemets utveckling ges, där hänsyn tas till alla typer av osäkerhetsfaktorer som nämns ovan? Hur väl kan de interna processerna representeras matematiskt vid en realistisk beskrivning av systemets utveckling? Hur väl känner man alla indata som behövs för kvantifieringen av systemets utveckling?

För att fastställa en struktur för en strikt hantering av ovanstående frågeställningar är det vanligt /NEA 1997a/ att beskriva osäkerheter i kategorierna system-/scenarieosäkerhet, konceptuell osäkerhet och dataosäkerhet. En generell slutsats från internationella samarbeten inom området analysmetodik är att det inte finns ett unikt eller korrekt sätt att beskriva eller klassificera osäkerhet. I ljuset av resultaten från internationella arbeten, såsom sammanställning av erfarenheter från tio säkerhetsanalyser /NEA 1997a/, är det snarare viktigt att i alla säkerhetsanalyser tydligt definiera hur olika termer används inom området.

I SR-Site har följande breda definitioner använts.

Systemosäkerhet rör frågor relaterade till fullständighet, dvs frågan om huruvida allt av betydelse för säkerhetsutvärderingen har identifierats och om analysen täcker in de identifierade frågorna på ett kvalitativt korrekt sätt, exempelvis genom val av en lämplig uppsättning scenarier. Kort sagt, har alla faktorer (FEP) identifierats och inkluderats på ett tillfredsställande sätt eller har uteslutning av dem motiverats på ett bra sätt?

Konceptuell osäkerhet avser i huvudsak förståelsen av beskaffenheten hos de processer som är involverade i förvarsutvecklingen. Detta rör inte endast den mekanistiska förståelsen av en process eller uppsättning kopplade processer utan även hur väl de är representerade – och vad som inte är representerat – i en ibland avsevärt förenklad matematisk modell av förvarsutvecklingen.

Dataosäkerhet rör alla kvantitativa indata som används i analysen. Det finns flera faktorer att ta hänsyn till vid hanteringen av dataosäkerhet. Dessa innefattar korrelationer mellan data, distinktion mellan osäkerhet på grund av avsaknad av kunskap (epistemologisk osäkerhet) och på grund av naturlig variabilitet (aleatorisk osäkerhet) samt situationer där konceptuell osäkerhet behandlas med en vidgad datafördelning. Vilka indata som krävs i en speciell modell är delvis en konsekvens av konceptualiseringen av den modellerade processen. Detta betyder att konceptuell osäkerhet och dataosäkerhet till viss del är kopplade till varandra. Likaså finns det flera tänkbara strategier för att härleda indata. En möjlighet är att sträva efter pessimistiska data för att få en övre begränsning av konsekvenser vid beräkningar som syftar till att visa kravuppfyllelse. En annan möjlighet är att genomföra en fullständig probabilistisk analys, vilket kräver indata i form av sannolikhetsfördelningar. Dessa frågor diskuteras vidare i kapitel 9 och i **Datarapporten**.

Den plan som presenteras i avsnitt 2.8.3 visar hur alla diskuterade typer av osäkerheter hanteras i säkerhetsanalysen.

2.8.2 Behov av stiliserade exempel

De inre delarna av systemet, som tillhandahåller säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning, behandlas på det mest fullständiga sättet vid hanteringen av osäkerheter. Biosfären och de yttre förhållandena hanteras på ett mer stiliserat sätt, dvs med förenklade representationer där de viktiga aspekterna av dessa delsystem fångas upp. Detta sker ofta på ett pessimistiskt sätt. Dessa delsystem omfattar inte de viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna hos systemet och de är alltför komplexa för att modelleras i detalj i säkerhetsanalysen.

Den lokala biosfären utgör per definition en del av systemet, dvs den är belägen inom systemgränserna. Biosfärsosäkerheter bör därför hanteras på samma sätt som osäkerheter för andra interna delar. I biosfären är dock listan av processer som bestämmer systemutvecklingen lång och systemet i vilket de förekommer är synnerligen inhomogent. Det omfattar flera olika ekosystem, som vart och ett består av ett stort antal komponenter. Dessutom är tidsskalan för biosfärens förändringar i allmänhet betydligt kortare än för andra delar av systemet. Interaktionerna med människor är starkare och

förknippade med stora osäkerheter, delvis sådana som inte kan reduceras. Fastän vissa aspekter av utvecklingen av biosfären på en speciell plats kan förutses i ett tidsperspektiv på kanske 1 000 år, måste en stor del av beskrivningen – speciellt av mänskligt beteende – göras med stiliserade exempel, se vidare i avsnitt 13.2.

Även när det gäller yttre förhållanden måste osäkerheter hanteras med stiliserade exempel som konstruerats för att täcka in alla möjliga framtida utvecklingar, exempelvis avseende klimatförändringar. En detaljerad behandling av alla de processer som är inblandade i klimatutvecklingen ligger utanför säkerhetsanalysens ramar. Klimatforskning är dessutom ett vetenskapligt område som utvecklas snabbt, där osäkerheter är fundamentala och till viss del omöjliga att reducera. Strategin är i stället att följa utvecklingen inom området och att ta fram flera stiliserade tänkbara exempel på utvecklingar, som tillsammans ger en rimlig täckning av vad som kan förväntas i framtiden. I synnerhet inkluderas extrema förhållanden, som kan ha en negativ effekt på förvarssäkerheten, i dessa exempel. Dessa förhållanden omfattar:

- Maximala värden för mäktigheten hos glaciärer och de resulterande hydrauliska/mekaniska trycken samt de hydrauliska/mekaniska lasterna på berggrunden.
- Nedträngning av vatten med extrem sammansättning, till exempel syrerikt glacialt smältvatten med låg jonstyrka.
- Extrema randvillkor för grundvattenflöde som skulle kunna leda till höga grundvattenflöden på förvarsnivå, eller till grundvattenrörelser som kan ge upphov till uppträngning av djupt liggande salthaltiga grundvatten.
- Förhållanden som leder till extrema permafrostdjup.

2.8.3 Osäkerhetshantering – allmänt

Säkerhetsanalysens syften påverkar hanteringen av osäkerheter. I detta sammanhang har analysen i huvudsak två syften:

- Att analysera hur väl de relevanta föreskrifterna uppfylls.
- Att ge återkoppling till förvarsutformning, forskning och utveckling samt till de detaljerade undersökningar som görs allt eftersom förvaret byggs.

Det första syftet kan, om det finns tillräckliga säkerhetsmarginaler, till stor del uppnås genom en pessimistisk hantering av många osäkerheter. Det andra syftet kräver emellertid mer sofistikerad hantering för att kvantitativt bestämma vilka osäkerhetsfaktorer och öppna konstruktionsfrågor som påverkar säkerheten mest.

I det följande sammanfattas huvudpunkterna vid hanteringen av osäkerheter i SR-Site. Kvalitetssäkringsfrågor rörande hanteringen av osäkerheter diskuteras ytterligare i avsnitt 2.9.

Systemosäkerhet

Systemosäkerheter hanteras generellt genom en korrekt FEP-behandling i FEP-databasen, enligt de rutiner som beskrivs i **FEP-rapporten** och som sammanfattas i kapitel 3 i den här rapporten.

Databasstrukturen och rutinerna för FEP-behandling har tagits fram för att erhålla följande information.

- En tillräcklig uppsättning initialtillstånd. Detta uppnås genom att inkludera alla FEP kopplade till initialtillståndet i databasen. Dessa är dock ofta formulerade i generella termer och måste uttryckas på ett sätt som är specifikt för KBS-3-systemet. Detta görs genom den systematiska dokumentationen av ett referensinitialtillstånd, enligt beskrivningen i **Produktionsrapporterna**. Där det är relevant används initialtillståndet som utgångspunkt för alternativa initialtillstånd.
- En tillräcklig uppsättning interna, kopplade processer. Detta uppnås genom att i säkerhetsanalysen inkludera alla relevanta process-FEP som finns i databasen. Det är viktigt att notera att databasen redan från start innehåller resultatet av flera tidigare analyser och utvärderingar med syfte att identifiera processer för KBS-3-konceptet. Detta beskrivs vidare i avsnitt 7.1.1. Påverkan mellan processer hanteras i **Processrapporterna** genom en systematisk genomgång av en uppsättning

definierade fysikaliska variabler, som kan förmedla påverkan, och genom en systematisk behandling av randvillkoren för varje process. Dessa förfaranden beskrivs ytterligare i avsnitt 7.3. Utöver att inkludera FEP som beskriver påverkan och kopplingar, upprättas därför rutiner för att dokumentera processer på ett sätt som tvingar fram ett systematiskt sökande efter en sådan påverkan.

- En tillräcklig uppsättning yttre källor till påverkan. Detta uppnås genom att i analysen inkludera alla relevanta externa FEP och genom att strukturera dokumentationen för dessa i **Klimatrapporten** med ett format som liknar det som används för de interna processerna, se vidare i kapitel 6.

Val av scenarier

En annan aspekt av systemosäkerhet rör valet av en tillräcklig uppsättning scenarier, genom vilken hänsyn till alla relevanta FEP tas på lämpligt sätt i analysen. Valet av scenarier är en uppgift av subjektiv natur, vilket betyder att det är svårt att föreslå en metod som säkerställer en korrekt hantering av alla detaljer vid valet av scenarier. Flera åtgärder har dock vidtagits för att öka tilltron till tillräckligheten hos den valda uppsättningen av scenarier:

- En strukturerad och logisk strategi för valet av scenarier, se vidare kapitel 11.
- Användning av säkerhetsfunktionsindikatorer för att fokusera valet på frågor som har betydelse för säkerheten, se kapitel 8.
- Användning av fall med gränssättande beräkningar för att utforska hur robust systemet är med hänsyn till effekterna av alternativa sätt att välja scenarier. Här ingår orealistiska scenarier, som kan sätta en övre begränsning för möjliga konsekvenser.
- Kvalitetssäkringsåtgärder för att säkerställa att alla FEP har hanterats korrekt i analysen.
- Externa granskningar.

Konceptuell osäkerhet

Hanteringen av konceptuell osäkerhet för interna processer beskrivs grundligt i **Processrapporterna**. För varje process beskrivs kunskapsbasen, inklusive återstående osäkerheter. Med den informationen som grund fastställs sedan en hantering av processen i säkerhetsanalysen. (Osäkerhet avseende påverkan mellan processer kan ses som antingen systemosäkerhet eller en konceptuell osäkerhet. Ovan beskrivs den som systemosäkerhet.)

Genom att använda ett definierat format för alla processbeskrivningar, se avsnitt 7.3, säkerställer man att processerna och deras åtföljande konceptuella osäkerheter beskrivs på ett konsekvent sätt. Externa granskningar av centrala delar av processdokumentationen har också genomförts.

Konceptuell osäkerhet för yttre påverkan hanteras på ett mer stiliserat sätt, i huvudsak genom att en tillräcklig uppsättning scenarier definieras och genom att modeller som bygger på de senaste rönen för kvantifiering av yttre påverkan används, exempelvis ismodeller för att modellera glaciationscykler. En annan metod är att använda sig av gränssättande fall, som säkerställer att konsekvenserna överskattas.

Dataosäkerhet

Dataosäkerheter hanteras enligt de rutiner som beskrivs i kapitel 9 och mer utförligt i **Datarapporten**.

Kvalitetssäkring erhålls genom att en mall används för dokumentation av dataosäkerhet, genom tydligt definierade roller för deltagande experter och generalister, samt genom att externa granskningar utförs innan indata för analysen slutligen fastställs.

Modellering

En viktig del av analysen rör kvantifiering av både förvarsutveckling och dos- och riskkonsekvenser genom matematisk modellering. Förutom krav på lämpligt definierade modeller som representerar relevanta konceptualiseringar av de processer som ska modelleras och kvalitetssäkrade indata kräver detta steg:

- Bra modelldokumentation, där resultat av verifiering av datorprogram och tester gentemot andra modeller ingår.
- Rutiner för att upptäcka och ge skydd mot fel orsakade av den mänskliga faktorn vid tillämpningen av modellerna.

En speciell **Modellrapport**, som sammanställts enligt på förhand fastställd mall, beskriver de modeller som används i analysen samt hänvisar till mer detaljerade beskrivningar av modellerna och tillhörande kvalitetssäkringsfrågor. Kopplingen av processer till modeller, se kapitel 7, ger en översikt av de använda modellerna. En vägledande princip är att modeller och data ska dokumenteras tillräckligt detaljerat för att beräkningarna ska kunna reproduceras och granskas.

Fel orsakade av den mänskliga faktorn kan minimeras genom exempelvis formaliserade rutiner för att kontrollera att indata är korrekta och genom att använda alternativa, ofta förenklade, modeller för kritiska kvantifieringsaspekter. Ett exempel på det senare ges i beräkningarna av radionuklidtransport och dos i kapitel 13.

2.8.4 Integrerad hantering av osäkerheter

Som nämnts ovan kan osäkerheter i stora drag kategoriseras som systemosäkerhet, konceptuell osäkerhet/modellosäkerhet och dataosäkerhet. Det måste säkerställas att alla dessa osäkerheter hanteras på lämpligt sätt i analysen. Eftersom skillnaden mellan huvudscenariot och andra scenarier till stor del är relaterad till osäkerheter och sannolikheten för relevanta fenomen, är den övergripande strategin för hantering av osäkerheter nära relaterad till valet av scenarier.

Den allmänna diskussionen om hantering av osäkerheter utvecklas ytterligare nedan och bygger på processen för att välja scenarier.

Det första integrationssteget: Referensutvecklingen

Analysen av referensutvecklingen delas upp i flera delanalyser. Dessa täcker in olika tidsskeden och varierande frågeställningar (framför allt termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska) av utvecklingen inom ett specifikt tidsskede.

Många av analyserna i referensutvecklingen syftar till att visa att ett särskilt kriterium är uppfyllt, dvs de är gränssättande analyser som skapar goda förutsättningar för efterföljande delar av säkerhetsanalysen. Resultaten av dessa analyser förenklar i själva verket efterföljande delar av säkerhetsanalysen och kräver i allmänhet ingen ytterligare utvärdering av osäkerheter. Till exempel beräknar man den maximala bufferttemperaturen på ett gränssättande vis och visar att den ligger under säkerhetsfunktionsindikatorn 100°C när alla osäkerheter beaktats. Detta medger i sin tur att mineralomvandling i bufferten kan uteslutas.

Andra analyser leder till resultat som måste beaktas på ett mer djupgående och ofta kvantitativt sätt i efterföljande analyser. Till exempel pekar resultatet av de hydrogeologiska analyserna ut både konceptuella osäkerheter och dataosäkerheter som måste beaktas, exempelvis vid beräkningar av radionuklidtransport.

Med hänsyn till osäkerheter syftar följaktligen analyserna i referensutvecklingen till att reducera antalet osäkerheter som kräver ytterligare överväganden och till att identifiera och kvantifiera de osäkerheter som måste föras vidare till efterföljande delar av säkerhetsanalysen.

För att erhålla en systematisk hantering av osäkerheter i referensutvecklingen sammanfattas varje delanalys med att osäkerheterna i resultaten sammanfattas. Behovet av att föra vidare osäkerheter till efterföljande delar av säkerhetsanalysen redovisas också.

När analysen av referensutvecklingen slutförts redovisas identifierade osäkerheter i tabellformat för efterföljande användning i valet av scenarier och i beräkningsfall för konsekvensanalys av scenarierna.

Huvudscenariot

Som nämnts i avsnitt 2.5.8 baseras huvudscenariot på den referensutveckling som analyseras i kapitel 10. Huvudscenariot täcker därmed in ett referensinitialtillstånd, baserat på en realistisk beskrivning av förvarssystemet omedelbart efter förslutning, och en realistisk beskrivning av platsen med osäkerheter, baserad på resultaten av platsundersökningen och efterföljande platsbeskrivande modellering. Dessutom behandlas alla processer som identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten i huvudscenariot, i enlighet med dokumentation i **Processrapporterna**. Huvudscenariot täcker också in yttre referensförhållanden, i huvudsak en upprepning av den senaste glaciationscykeln och ett alternativt fall med ett utsträckt tempererat klimat som antas bli följden av en kraftigare växthuseffekt. Framtida mänskliga handlingar, som borrning eller användning av eller påverkan på berget i förvarets omgivning, ingår per definition inte i huvudscenariot.

Nedan följer en kort sammanfattning av hur de tre klasserna av osäkerheter som definierats i avsnitt 2.8.1 behandlas i referensutvecklingen och därmed i huvudscenariot.

Generell utveckling

Systemosäkerhet, inkluderade FEP: Alla identifierade interna processer behandlas, och inkluderas i enlighet med de riktlinjer som tagits fram i **Processrapporterna** och som sammanfattas i tabellerna 7-2 till 7-6. Yttre förhållanden ingår som ett basfall i form av en modellrekonstruktion av den senaste glaciationscykeln, Weichsel, och i en mer stiliserad variant av huvudscenariot med varianten global uppvärmning. Detta betyder att *alla yttre klimatrelaterade processer/fenomen beaktas* i huvudscenariot. Hur omfattande processerna och fenomenen behandlas begränsas dock till vad som täcks in av de två varianterna. Detta medför bland annat att det inte tas hänsyn till mer extrema glaciala laster än vad som förekommer i referensutvecklingen. FEP relaterade till framtida mänskliga handlingar, FHA, har per definition uteslutits från huvudscenariot. Även FEP relaterade till förändrade initialtillstånd (som ett övergivet, ofullständigt återfyllt och förslutet förvar) har uteslutits.

Konceptuell osäkerhet: Modeller väljs med hänsyn till konceptuell osäkerhet enligt föreskrifter som tagits fram i **Processrapporterna** (sammanfattade i tabellerna 7-2 till 7-6) och i **Klimatrapporten**. I många fall hanteras konceptuella osäkerheter pessimistiskt. De kan också behandlas genom att varianter utformas, som i fallet med modeller för grundvattenflöde. Dessa modeller utgör konceptuella referensmodeller för förvarsutvecklingen i SR-Site. De sammanfattas i **Modellrapporten**.

Dataosäkerhet: Indata till modellering och tillhörande osäkerheter tas från **Datarapporten** för många av de beräkningar som är relaterade till den allmänna utvecklingen i huvudscenariot. Referensdata för initialtillståndet, vilka kan innebära en mängd olika förhållanden, används i enlighet med definitionen av huvudscenariot.

Radiologiska konsekvenser

Alla fall där radiologiska konsekvenser uppkommer behandlas mer uttömmande i de ytterligare scenarierna. Radiologiska konsekvenser och tillhörande osäkerheter i huvudscenariot hänförs till relevant fall i de ytterligare scenarierna.

Ytterligare scenarier baserade på potentiellt bortfall av säkerhetsfunktioner

Ett primärt syfte med valet och analysen av ett antal ytterligare scenarier, baserade på det potentiella bortfallet av säkerhetsfunktioner, är att utvärdera effekten av osäkerheter som inte täcks in i huvudscenariot och att, om det är lämpligt, inkludera ytterligare scenarier i summeringen av den totala risken om denna ytterligare analys av osäkerheten så kräver.

I vart och ett av dessa ytterligare scenarier går man tillbaka till hanteringen av relevanta frågeställningar i huvudscenariot. Hanteringen av tillhörande systemosäkerheter, konceptuella osäkerheter och dataosäkerheter utvidgas eller modifieras på lämpligt sätt.

Generell utveckling

Systemosäkerhet, inkluderade FEP: Alla relevanta FEP som påverkar den aktuella säkerhetsfunktionen inkluderas utgående från FEP-diagrammet och FEP-katalogen för SR-Site.

Konceptuell osäkerhet: Konceptuell osäkerhet, utöver den som täcks in av de konceptuella referensmodellerna som används i huvudscenariot, beaktas.

Dataosäkerhet: Indata utöver de som används i huvudscenariot beaktas, dvs förhållanden i initialtillståndet utöver de i referensinitialtillståndet och yttre förhållanden utöver de i de två varianterna av huvudscenariot.

Endast de aspekter av den generella utvecklingen som är relevanta för den/de aktuella säkerhetsfunktionen/säkerhetsfunktionerna beaktas. Det leder till att analysen av den generella utvecklingen blir mycket mindre omfattande än i huvudscenariot.

Radiologiska konsekvenser

Systemosäkerhet, inkluderade FEP: Alla FEP som beaktas i den generella utvecklingen ingår indirekt, eftersom data för konsekvensberäkningarna tas fram från resultatet av analysen av systemutvecklingen. Alla FEP som är direkt kopplade till radionuklidtransport i de tekniska barriärerna och geosfären är inkluderade i enlighet med riktlinjer i **Processrapporterna** (sammanfattade i tabellerna 7-2 till 7-6). Biosfärsmodellerna diskuteras i /Andersson 2010, Löfgren 2010, Aquilonius 2010, Lindborg 2010/.

Konceptuell osäkerhet: Modeller för radionuklidtransport väljs, under beaktande av konceptuell osäkerhet, enligt riktlinjer i **Processrapporterna** (sammanfattade i tabellerna 7-2 till 7-6). I många fall hanteras konceptuella osäkerheter pessimistiskt. De kan också behandlas genom att varianter utformas, som i fallet med modeller för grundvattenflöde. Dessa modeller utgör konceptuella referensmodeller för de radiologiska konsekvensberäkningarna i SR-Site. De sammanfattas i **Modellrapporten**.

Konceptuella osäkerheter för biosfärsmodellerna diskuteras i /Avila et al. 2010/ och i **Biosfärsrapporten**.

Dataosäkerhet: Alla data för konsekvensberäkningarna redovisas i **Datarapporten**. I de flesta fall kvantifieras indataosäkerheter, ofta även de med ursprung i konceptuella osäkerheter, i form av en uppsättning indatafördelningar. Korrelationer mellan dessa fördelningar beaktas och inkluderas på lämpligt sätt. Osäkerhet i indata till biosfärsmodelleringen behandlas i /Nordén et al. 2010, Andersson 2010, Löfgren 2010, Aquilonius 2010, Lindborg 2010/.

Om den förändrade utvecklingen visar att kapselns integritet inte bryts så postuleras fel kopplade till den aktuella säkerhetsfunktionen och scenariot klassificeras som ett restscenario. Konsekvensberäkningarna för sådana fall ger ofta gränssättande uppskattningar, exempelvis i ett fall där alla kapslar antas bli otäta vid en specifik tidpunkt.

FHA och andra stiliserade scenarier

FHA-scenarier omfattar de FHA-FEP som per definition inte ingår i huvudscenariot. De aspekter av den generella utvecklingen, som inte påverkas av FHA-FEP, antas utvecklas som i huvudscenariot. Det betyder att konceptuella osäkerheter och dataosäkerheter för dessa frågeställningar hanteras som i huvudscenariot. Frågor som är relaterade till FHA-FEP hanteras på ett stiliserat sätt, vilket ger en rimlig täckning av osäkerheter. Fallet med ett öppet och övergivet förvar behandlas på liknande sätt.

2.8.5 Formella expertutfrågningar

En formell expertutfrågning är ett verktyg för att utvärdera osäkerheter i indata till en säkerhetsanalys. I säkerhetsanalysen SR-Can utnyttjades inte formella expertutfrågningar, med undantag för en studie, som utfördes av SSI, om sannolikheten för att stora jordskalv inträffar i närheten av förvaret /Hora och Jensen 2005/. Resultatet av den begränsade studien användes som ett av flera underlag för att bestämma denna sannolikhet i SR-Can.

Under planeringen av SR-Site genomfördes en utvärdering av tänkbara ämnen för expertutfrågningar. Följande kriterier användes för att fastställa om en fråga kunde bli aktuell för utfrågning:

- Frågan ska vara förknippad med stora osäkerheter som har betydande påverkan på den resulterande säkerhetsnivån.
- Den formella expertutfrågningen bedöms kunna bidra till att dessa osäkerheter reduceras utöver vad som uppnås med andra medel som fastställts i analysmetodiken (utvärdering av konceptuella osäkerheter i **Processrapporterna**, av dataosäkerhet i **Datarapporten**, genom kvalitetssäkrad modellering etc, varvid alla dessa utvärderingar leder till en välgrundad och ofta pessimistisk hantering av frågan i säkerhetsanalysen).

Slutsatsen av utvärderingen blev, trots att flera osäkerheter i princip skulle kunna underkastas en formell expertutfrågning, att ingen fråga identifierades för vilken båda dessa punkter gäller.

De fastställda rutinerna för kvalificering av processer och data i SR-Site, de stora forskningsprojekten om kritiska frågeställningar där ofta många forskargrupper deltar, den omfattande platsmodelleringen av expertgrupper med tillhörande grundliga utvärdering av osäkerheter och utlåtande om tilltro, granskningen av externa experter samt den pessimistiska hanteringen av många faktorer i analysen bidrar till denna slutsats.

Grundat på känslighetsanalysen av den beräknade risken i SR-Site uppdateras utvärderingen av tänkbara frågor för expertutfrågningar i avsnitt 13.10.2, vilken utgör en bas för framtida hantering av osäkerhetsfrågor med betydelse för den långsiktiga säkerheten.

2.9 Kvalitetssäkring

SKB tillämpar 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 kvalitetssäkringsplaner utvecklats och införts för Kärnbränsleprojektet, där SR-Site ingår som ett delprojekt, och för projektet SR-Site. Kvalitetssäkringsplanen för projektet SR-Site (SDK-003) bygger på den plan för kvalitetssäkring som tagits fram för projektet SR-Can, men har utvidgats och anpassats för att uppfylla de generella kraven på ett projekt som ger stöd för ansökan om att bygga ett slutförvar. Dessa krav specificeras i sin tur i planen för kvalitetssäkring för Kärnbränsleprojektet (SDK-001). Andra delprojekt som ingår i Kärnbränsleprojektet har sina egna specifika kvalitetssäkringsplaner, vilka styrs av de generella kraven i kvalitetssäkringsplanen för Kärnbränsleprojektet. Därtill ska alla delprojekt som förser projektet SR-Site med indata uppfylla kraven på kvalitetssäkring enligt kvalitetssäkringsplanen för SR-Site.

Följande text grundas på de inledande avsnitten i kvalitetssäkringsplanen för SR-Site.

2.9.1 Allmänt

En kvalitetssäkringsplan för en analys av långsiktig säkerhet för ett förvar för använt kärnbränsle bidrar till säkerställandet av att alla relevanta faktorer har inkluderats och hanteras på lämpligt sätt i analysen. Fastän inget kvalitetssäkringssystem strikt kan säkerställa detta, underlättar specialutformade kvalitetssäkringsplaner och kvalitetssäkringssystem genomförandet av säkerhetsanalysen på ett strukturerat och heltäckande sätt. De hjälper också en granskare att bedöma analysens kvalitet och fullständighet. Kvalitetssäkringsåtgärder är en viktig del för att skapa tilltro till att exempelvis en modellrepresentation för en plats eller process är en lämplig och tillräcklig representation av verkligheten givet säkerhetsanalysens ändamål.

Ett huvudsakligt syfte med en säkerhetsanalys av ett slutförvar är att undersöka om förvaret kan betraktas som radiologiskt säkert över tid. I princip fastställs detta genom att uppskattade utsläpp och påföljande stråldoser jämförs med myndighetsföreskrifternas kriterier.

Ett stort antal faktorer som påverkar den långsiktiga säkerheten måste hanteras med kvalitetssäkrade metoder i analysen. Dessa faktorer – eller egenskaper, händelser och processer, FEP – har sammanställts i en databas vilken också används som ett verktyg för kvalitetssäkring. FEP-databasen och rapporter som ligger till grund för den visar hur specifika FEP inkluderas i analysen eller varför de har uteslutits.

Vid modelleringen av förvarsutvecklingen hanteras många FEP. Detta kräver en vetenskaplig utvärdering av förståelsen av de processer som ingår vid modelleringen, av utformningen av de matematiska modeller som används för att simulera processen eller systemet av kopplade processer baserat på förståelsen av fenomenen, av tolkningen av den matematiska modellen till ett datorprogram, av härledningen av indata och av exekvering av programmet. Alla dessa aspekter måste dokumenteras och kvalitetssäkras.

Under upprättandet av kvalitetssäkringsplanen för SR-Site har standarden ISO 10005 ”Ledningssystem för kvalitet – vägledning för kvalitetsplaner” använts för övergripande vägledning.

2.9.2 Kvalitetssäkringsplanens syfte

Syftet med kvalitetssäkringsplanen är att säkerställa att alla relevanta faktorer för långsiktig säkerhet har inkluderats och hanterats på lämpligt sätt i säkerhetsanalysen SR-Site. I synnerhet har den utformats för att hjälpa till att visa:

- Att alla faktorer som är relevanta för långsiktig säkerhet och som förekommer i tidigare versioner av SKB-databaser och i den internationella NEA FEP-databasen har beaktats i analysen.
- Att uteslutning av någon av dessa faktorer är väl motiverad av en identifierbar expert.
- Att hanteringen av inkluderade faktorer är väl motiverad av identifierbara experter.
- Hur kvantitativa aspekter av analysen hanteras med matematiska modeller och hur modellerna (datorprogram) och användningen av dem har kvalitetssäkrats.
- Hur ändamålsenliga data för kvantitativa frågeställningar i analysen har tagits fram och använts i analysen med kvalitetssäkring och spårbarhet.
- Hur data, modeller och analyser som använts i tidigare analyser i tillämpliga fall kvalificeras för användning i SR-Site.
- Hur rapporterna i säkerhetsanalysen har granskats och godkänts vad gäller korrekt och fullständigt innehåll.

2.9.3 Styrdokument för SR-Site

Ett flertal styrdokument och kvalitetssäkringsrelaterade dokument för projektet SR-Site fastställs i kvalitetssäkringsplanen. Dessa dokument listas i tabell 2-2 och finns i SKB:s interna dokumentationssystem SKBdoc.

Projektet definierades genom att inom SKB fastställa ett projektbeslut (post 1 i tabell 2-2) som beskriver projektets ändamål, leveranser och tidsomfång, nödvändiga förutsättningar vad gäller dataleveranser från relaterade projekt, de aktörer som är involverade i projektet och deras funktioner etc.

En projektplan (post 2 i tabell 2-2) ger mer detaljerade beskrivningar av hur projektets ändamål ska uppnås. Till projektplanen hör ett riskanalysdokument (post 3 i tabell 2-2), vilket identifierar kritiska frågor som kan äventyra att projektets syften uppfylls, en tidsplan (post 6 i tabell 2-2), som beskriver projektaktiviteter och deras inbördes beroenden, och en kvalitetssäkringsplan (post 5 i tabell 2-2) som bygger på den generella kvalitetssäkringsplanen för Kärnbränsleprojektet (post 4 i tabell 2-2). Resten av de dokument som listas i tabell 2-2 ingår i kvalitetssäkringsplanen för SR-Site.

Tabell 2-2. Styr- och kvalitetssäkringsdokument för projektet SR-Site.

Post	Objekt	Språk
1.	Projektbeslut	Svenska
2.	Projektplan	Svenska
3.	Riskanalys för projektet	Svenska
4.	SDK-001 Kvalitetssäkringsplan Kärnbränsleprojektet	Engelska
5.	SDK-003 Kvalitetssäkringsplan SR-Site	Engelska
6.	Tidsplan	Engelska
7.	Lista med experter	Engelska
8.	Granskningsplan för rapporter i SR-Site	Engelska
9.	Mall för granskningskommentarer	Engelska
10.	Instruktion för utveckling och hantering av SKB FEP-databasen – version SR-Site	Engelska
11.	Instruktion för framtagande av processbeskrivningar i SR-Site och SR-Can	Engelska
12.	Instruktion för kvalificering av ”gamla” referenser	Engelska
13.	Plan för kvalitetssäkring av modeller och data för säkerhetsanalysen SR-Site	Engelska
14.	SR-Site **Modellrapport** anvisning	Engelska
15.	Instruktion för leverans av data till SR-Site **Datarapport**	Engelska
16.	Instruktion för beskrivningar av modelleringsuppdrag (task descriptions) för säkerhetsanalysen SR-Site	Engelska
17.	Instruktion för slutkontroll av data som används i beräkningar/modellering i SR-Site	Engelska

2.9.4 Expertbedömningar

Information som baseras på expertbedömningar av olika slag genomsyrar säkerhetsanalyser. Expertbedömningar kan innefatta allting från en forskares tolkning av ett resultat av ett enkelt experiment till en experts bedömning av hur en mänskligt orsakad förstärkt växthuseffekt påverkar den framtida klimatutvecklingen. Det kan också vara en analys av sannolikheten för att en speciell process eller ett speciellt fenomen ska påverka utvecklingen i förvaret. En bedömning kan bestå av allt från ett välmotiverat kvantitativt eller kvalitativt utlåtande i en rapport till en uttömmande och formell utfrågning av en omsorgsfullt utvald panel med ett i förhand fastlagt utfrågningsformulär.

Det finns dessutom frågor där olika experter har skilda uppfattningar. I fall där enighet kring en uppfattning eller ett utlåtande inte kan uppnås är det nödvändigt att ta hänsyn till de skilda uppfattningarna vid analysen. Detta kan exempelvis åstadkommas genom att formulera flera beräkningsfall eller genom att välja det mest pessimistiska förhållningssättet, om ett sådant kan påvisas.

Den största delen av den faktamängd som är baserad på expertbedömningar i SR-Site ges antingen i form av rapporter skrivna av en eller flera experter eller som beslut fattade av generalister vid till exempel sållningen av FEP, valet av scenarier eller vid formuleringen av beräkningsfall. Någon formell utfrågning av en expertpanel har inte skett i SR-Site, se vidare i avsnitt 2.8.5.

Dokumentation av expertbedömningar

För spårbarheten i analysen är det viktigt att tydligt ange var expertbedömningar görs och av vem. För detta ändamål listas alla viktiga experter som på ett eller annat sätt gör bedömningar för SR-Site i ett separat dokument (post 7 i tabell 2-2). Denna lista innehåller information om experternas funktion i SR-Site, ett motiv till varför de valts ut som experter och hänvisningar till var inom SKB som experternas meritlista (CV) finns lagrade. Expertlistan publiceras inte, men görs vid förfrågan tillgänglig för granskande myndigheter.

Hänvisningar till relevanta experter görs sedan där bedömningar används i analysen. För att inte tynga texten med olika hänvisningar av den här typen ges, för denna huvudrapport, listan av bidragande generalister/experter i förordet. I flera av de andra centrala rapporterna, till exempel **Processrapporterna** och **Datarapporten**, görs i förekommande fall hänvisningar till relevanta experter, ofta i tabellform. För de bakomliggande rapporterna kan experterna enkelt identifieras som författaren/författarna av den aktuella rapporten.

Dessutom har denna huvudrapport och övriga SR-Site-rapporter genomgått granskning inom SKB och av externa granskare, vilket dokumenterats i granskningsprotokollen (se avsnitt 2.9.5). Dessa granskare har också tagits med i expertlistan.

Val av experter

I allmänhet har inga formella regler använts vid valet av experter. Generalisterna i säkerhetsanalysens kärngrupp står för en stor del av expertbedömningarna. Dessa personer har arbetat med säkerhet i KBS-3-systemet under ett flertal år och är därför bland de mest erfarna som finns att tillgå för att analysera de olika frågeställningarna som rör systemet. Dock medför detta även risk för partiskhet, vilket understryker betydelsen av externa granskningar av materialet som tas fram inom projektet, se vidare i avsnitt 2.9.5.

Beträffande dokumentation av processförståelse och för val av modeller eller av indata för de kvantitativa delarna av analysen, har ambitionen varit att anlita ledande experter inom respektive område. Granskarna ska vara erkända specialister (dvs kvalificerade och erfarna, vilket ska återspeglas genom deras vetenskapliga publikationer) inom ett relevant vetenskapligt område. Experternas meriter har dokumenterats, vilket ger en tillräcklig motivering för deras deltagande.

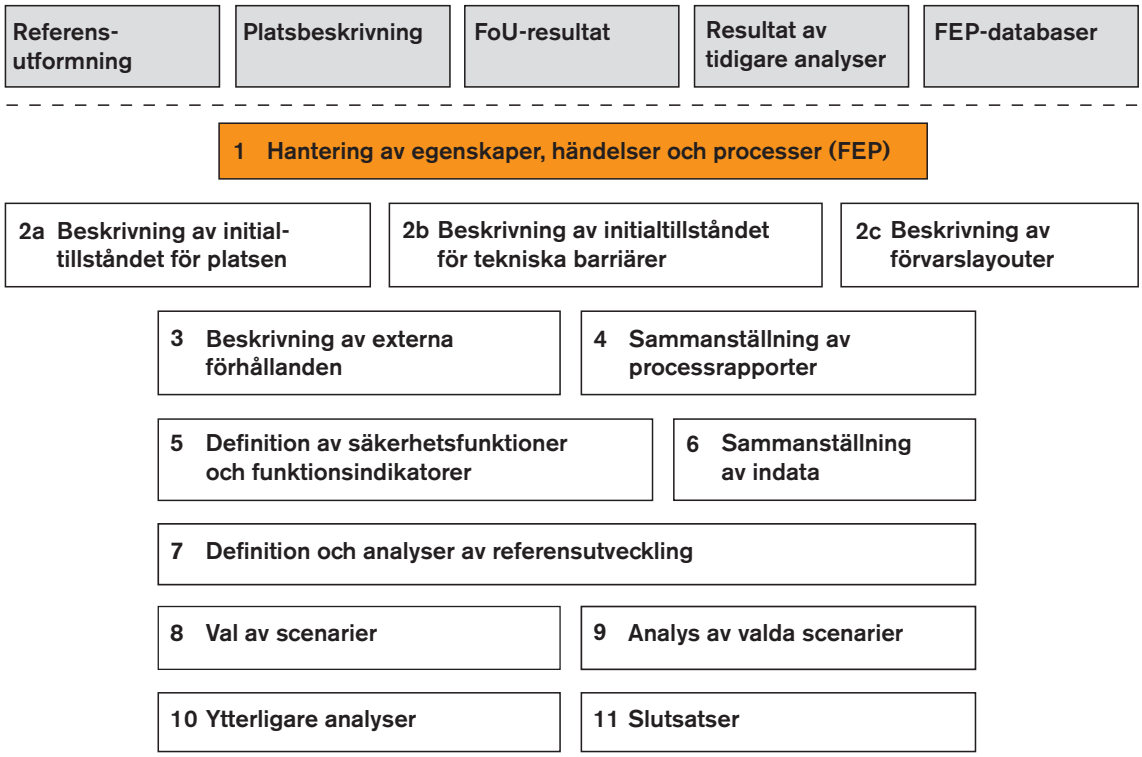
2.9.5 Sakgranskning

Sakgranskning genomförd av utomstående experter (peer review), med efterföljande hantering av granskningskommentarer, är en viktig metod för att vidga den bas från vilken experters åsikter/bedömningar formas i en säkerhetsanalys. Alla rapporter som produceras i projektet SR-Site, har därför genomgått sakgranskning av experter före slutligt färdigställande, i enlighet med en granskningsplan som fastställts för projektet (post 8 i tabell 2-2). Granskningsplanen definierar det dokument som ska underställas granskarna, generella kriterier för godkännande av en rapport, krav på granskarnas kompetens och hur granskningsdokumenten ska hanteras. Dessutom föreskriver granskningsplanen att en granskningsinstruktion tas fram för varje rapport som ska genomgå granskning. Såväl de generella som de rapportspecifika acceptanskriterierna ska här anges, tillsammans med de utvalda granskarna och deras kompetens.

En mall för granskningskommentarer har använts (post 9 i tabell 2-2). Mallen kräver också att författaren till rapporten dokumenterar hur varje kommentar hanteras när rapporten färdigställs. Dessa granskningsutlåtanden lagras i SKB:s interna dokumentationssystem SKBdoc för att säkerställa spårbarhet i granskningsprocessen.

Ett krav på alla dokument som utgör en del av tillståndsansökningarna är att de har genomgått sak- och kvalitetsgranskning. Många av dessa nya dokument måste dock hänvisa till äldre SKB-dokument eller dokument från källor utanför SKB som inte genomgått sak- och kvalitetsgranskning i enlighet med SKB:s rutiner. Exempelvis innehåller processbeskrivningar i **Processrapporterna** i SR-Site många hänvisningar till äldre eller externa dokument av den här typen. En rutin för kvalificering av dokument som används som referenser i rapporter i SR-Site, har därför fastställts (post 12 tabell 2-2). Denna rutin är begränsad till dokument som betraktas som stödjande referenser, dvs dokument som används för att ge stöd för eller motivera ett beslut, ett val eller en behandling av en frågeställning i SR-Site. Rutinen medför att alla resultat eller argument som införs från stödjande referenser, eller åtminstone från dem som saknar en dokumenterad fakta- och kvalitetsgranskning, ska återges med sådan detaljeringsnivå att det är möjligt att analysera tillförlitligheten i resonemanget utan att behöva söka information i de stödjande referenserna. Dessutom ska skälen till varför en stödjande referens bedöms som användbar ur ett kvalitetssäkringsperspektiv dokumenteras i processbeskrivningarna i **Processrapporterna** och i **Klimatrapporten**, se avsnitt 7.3. Resonemanget från och kvalificeringen av de stödjande referenserna har sedan granskats av experter som valts ut för att faktagranska de aktuella rapporterna, till exempel **Processrapporterna**.

3 FEP-hantering



Figur 3-1. *SR-Site-metodiken i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

3.1 Inledning

Mycket av metodiken som beskrevs i föregående avsnitt rör hantering av egenskaper, händelser och processer (Features, Events, Processes, FEP) vid de olika stegen i säkerhetsanalysen. I detta avsnitt ges en mer detaljerad beskrivning av hur FEP hanteras genom hela analysen och av de olika verktyg som används för att säkerställa en systematisk och grundlig hantering.

Ett av huvudsyftena med FEP-hanteringen var att upprätta en katalog över de FEP som måste behandlas i SR-Site-analysen.

3.2 SKB:s FEP-databas

Ett viktigt och formellt verktyg för att säkerställa att alla relevanta faktorer har beaktats i säkerhetsanalysen är databaser över egenskaper, händelser och processer (FEP) som har betydelse för den långsiktiga säkerheten i ett kärnavfallsförvar. SKB:s FEP-databas har tagits fram för SR-Site och detta arbete beskrivs i **FEP-rapporten**. FEP-databasen bygger på resultatet från det FEP-arbete som utfördes i samband med SKB:s två senaste stora säkerhetsanalyser, SR-Can och SR 97, och som beskrivs i FEP-rapporten från SR-Can /SKB 2006b/, i Processrapporten för SR 97 /SKB 1999b/ samt i den stödjande dokumentationen till de interaktionsmatriser som har utvecklats för ett slutförvar enligt KBS-3-modellen /Pers et al. 1999/.

I Processrapporten för SR 97 /SKB 1999b/ identifierades ett stort antal processer av betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet för varje komponent i systemet, dvs bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfären. För varje komponent togs också en uppsättning variabler fram för att beskriva hur komponentens tillstånd utvecklas över tiden. Som ett första steg i utvecklingen av SKB:s FEP-databas samlades dessa identifierade processer och variabler i en FEP-databas i SR 97. Denna databas utgjorde en viktig startpunkt för FEP-hanteringen i SR-Can.

SR 97-databasen jämfördes sedan på ett systematiskt sätt med andra nationella databaser i version 1.2 av NEA:s internationella FEP-databas /NEA 1999b/. Syftet var att säkerställa att alla relevanta faktorer hade beaktats. I SR-Can-versionen av SKB:s FEP-databas delades alla företeelser in i någon av följande klasser:

- Processer inom systemets gränser av betydelse för den långsiktiga säkerheten samt systemets komponentspecifika variabler, vilka behövs för att beskriva komponentens tillstånd vid varje given tidpunkt.
- Faktorer som påverkar förvarets initialtillstånd, antingen direkt relaterade till en särskild frågeställning eller till initialtillståndet i allmänhet.
- Externa faktorer av betydelse för den långsiktiga säkerheten, exempelvis klimatutveckling, klimatrelaterade frågor och mänskligt intrång.

De flesta FEP i version 1.2 av NEA-databasen kunde hänföras till en av dessa kategorier. Återstående FEP karakteriserades som allmänna metodikrelaterade FEP eller bedömdes som irrelevanta för KBS-3-systemet.

Sedan FEP-arbetet inom SR-Can slutfördes har det utkommit en uppdaterad elektronisk version, version 2.1, av NEA:s FEP-databas /NEA 2006/. Jämfört med version 1.2 av NEA:s FEP-databas innehåller version 2.1 FEP från ytterligare två projekt. Som en del av SR-Site har samtliga FEP från de nya projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas klassificerats med hjälp av den metodik som användes i SR-Can. Detta har resulterat i en SR-Site-version av SKB:s FEP-databas. SKB:s FEP-databas omfattar således SR 97-versionen, SR-Can-versionen och SR-Site-versionen. SR 97-versionen innehåller processerna och variablerna från SR 97. SR-Can- och SR-Site-versionerna innehåller samtliga FEP i NEA-databasen och i de nationella databaserna som är kopplade till NEA-databasen, version 1.2 respektive 2.1, inklusive klassificeringen av och egenskaperna hos dessa FEP. En mer detaljerad beskrivning av SKB:s FEP-databas – i synnerhet SR-Site-versionen – finns i **FEP-rapporten**.

3.3 FEP-katalogen för SR-Site

Utifrån den FEP-hantering som genomfördes inför SR-Can och som kortfattat beskrivits ovan, upprättades en FEP-katalog. Denna FEP-katalog innehåller samtliga FEP som behövde hanteras i SR-Can. Katalogen är således i grund och botten en delmängd av de FEP som ingår i SKB:s FEP-databas. Vissa av systemkomponenterna behandlades dock inte i detalj i SR-Can. För dessa systemkomponenter infördes preliminära FEP i FEP-katalogen för SR-Can. De aktuella komponenterna var tunnelpluggar, återfyllningsmaterial för andra utrymmen än deponeringstunnlarna, bottenplattorna i deponeringshålen och borrhålsförslutningar. Vidare togs inte biosfärsprocesser upp i Processrapporten för SR 97. Underlaget för att uppdatera beskrivningarna av dessa i SR-Can var således inte detsamma som för de tekniska barriärerna och geosfären. FEP-katalogen för SR-Can innehåller därför provisoriska FEP för biosfären. Dessa motsvarar de olika delkomponenter i biosfärssystemet som FEP för biosfären i NEA:s FEP-databas har sorterats till.

FEP-katalogen för SR-Site är en utvecklad version av FEP-katalogen från SR-Can. För de systemkomponenter som inte behandlades i detalj i SR-Can, och även för biosfären, har FEP definierats för SR-Site och införts i FEP-katalogen. Sorteringen av de nationella projekt FEP i NEA:s FEP-databas som gjordes till preliminära och provisoriska FEP för dessa systemkomponenter i SR-Can, har setts över och en ny sortering har gjorts till de FEP som nu ingår i FEP-katalogen för SR-Site. FEP-kategorierna som ingår i SR-Site-katalogen anges nedan.

- FEP för initialtillståndet.
- Processer i bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, tunnelplugg, centralområde, toppförslutning, bottenplatta i deponeringshål, borrhålsförslutningar och geosfären.
- Variabler för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, tunnelplugg, centralområde, toppförslutning, bottenplatta i deponeringshål, borrhålsförslutningar och geosfären.
- FEP för biosfären.
- Externa FEP.
- Metodikrelaterade frågor.

Det finns dessutom möjlighet att i FEP-katalogen föra in varje faktor som – oavsett orsak – har identifierats som relevant för säkerhetsanalysen. I FEP-katalogen för SR-Can inkluderades vissa platsspecifika faktorer, som identifierades vid den preliminära säkerhetsanalysen. För Forsmark gällde dessa faktorer vad den eventuella påverkan från det intilliggande kärnkraftverket och kraftledningen till Finland innebär samt effekten av en djupt liggande gruva nära – men utanför – den tektoniska linsen i Forsmark. Under arbetet med SR-Site har inga ytterligare faktorer identifierats som inte täcks av de FEP som redan inkluderats i FEP-katalogen för SR-Site.

Nedan följer en kort beskrivning av varje kategori.

FEP för initialtillståndet

Denna kategori beskriver de avvikelser från det avsedda initialtillståndet som följer av oupptäckta missöden, sabotage, förvar som inte förslutits osv. Avvikelserna används som utgångspunkt för de val av scenarier som beskrivs i kapitel 11. FEP för initialtillståndet i FEP-katalogen för SR-Site är i princip desamma som de i FEP-katalogen för SR-Can. Den enda skillnaden är att de två FEP för initialtillståndet som definierades för återfyllning av andra förvarsdelar i SR-Can-katalogen har ersatts i SR-Site-katalogen med två FEP för initialtillståndet som definierats för centralområdet och två för toppförslutningen.

Det bör påpekas att det avsedda initialtillståndet med toleranser, initialtillståndet i referensfallet, är en av grundstenarna i huvudscenariot. Initialtillståndet i referensfallet för de olika systemkomponenterna beskrivs i **Bränslerapporten, Produktionsrapporterna för kapsel, buffert, återfyllning och förslutning** samt i **Berglinjerapporten** och sammanfattas i kapitel 5. I FEP-katalogen innehåller varje variabelpost, se nedan, också en hänvisning till beskrivningen av initialtillståndet i referensfallet för den aktuella variabeln.

Processer

Dessa FEP är processer som är relevanta för den långsiktiga säkerheten i förvaret för var och en av systemkomponenterna bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, tunnelplugg, centralområde, toppförslutning, bottenplatta i deponeringshål, borrhålsförslutningar och geosfären. För alla interna processer finns en uttömmande dokumentation i ett antal **Processrapporter**, se vidare kapitel 7. Hanteringen av samtliga processer för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning och geosfär sammanfattas i de processtabeller som finns i kapitel 7. För varje systemkomponent finns typiskt omkring 20 processer.

Ett fåtal ändringar i listan över de interna processerna för systemkomponenterna bränsle, kapsel, buffert, återfyllning och geosfären har gjorts jämfört med listan över de processer som ingick i SR-Can. Dessa ändringar föranleddes inte av den kompletterande sorteringen av FEP från de nya projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas, utan har gjorts för att förbättra strukturen och logiken i beskrivningarna. För att till exempel förbättra hanteringen av osäkerheter i den geokemiska utvecklingen av bufferten har vissa mekanismer, som i SR-Can ingick i kombinerade beskrivningar, delats upp till separata processer i SR-Site. Exempel på sådana är järn-bentonit-interaktioner och cementering. Ett annat exempel rör en förändring i listan över geosfärsprocesser. I SR-Can beskrevs vittring och erosion på ytan i Processrapporten för geosfären /SKB 2006d/, men i SR-Site ingår beskrivningen av dessa mekanismer i **Klimatrapporten**. De tas också upp och beaktas i analyserna av, och rapporteringen om, biosfären. För de systemkomponenter som inte behandlades i detalj i SR-Can, dvs tunnelpluggar, centralområde, toppförslutningar, bottenplattan i deponeringshål och borrhålsförslutningar, har FEP för processer till största delen fastställts utifrån listan över processer som definierats för systemkomponenterna buffert och återfyllning. Resultatet från den sortering av FEP från NEA:s FEP-databas som gjordes inför SR-Site användes för att kontrollera att inga relevanta processer saknas i processuppsättningen för dessa systemkomponenter.

Variabler

Dessa FEP är de variabler som behövs för att beskriva utvecklingen för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, tunnelpluggar, centralområde, toppförslutning, bottenplatta i deponeringshål, borrhålsförslutningar och geosfären över tid. De består således i huvudsak av tabeller med definitioner. Identifieringen av variabler har gjorts av de experter som ansvarar för dokumentationen av de processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten. Uppsättningarna av variabler togs fram i samband med dokumentationen av processerna. Anledningen till detta var att man var tvungen att

säkerställa att de var lämpliga för att beskriva alla tänkbara förändringar av barriäregenskaperna, som kan uppstå som en följd av de långsiktiga processerna. Det finns typiskt omkring tio variabler för varje systemkomponent. I FEP-katalogen innehåller varje variabelpost en hänvisning till beskrivningen av initialtillståndet i referensfallet för den aktuella variabeln.

Hanteringen av hur processer och variabler påverkar varandra beskrivs i avsnitt 3.4.

FEP för biosfären

Biosfärsprocesser togs inte upp i Processrapporten för SR 97 /SKB 1999b/ och underlaget för att uppdatera beskrivningarna av dessa i SR-Can var således inte detsamma som för de tekniska barriärerna och geosfären. I SR-Can definierades provisoriska FEP för biosfären och fördes in i FEP-katalogen för SR-Can. För SR-Site har en processrapport för biosfären tagits fram. Rapporten innehåller allmänna beskrivningar av de processer som anses ha betydelse för säkerhetsanalysen. De platsspecifika aspekterna av processerna och hur de hanteras i säkerhetsanalysen beskrivs däremot i de olika ekosystemrapporter som utvecklats för SR-Site /Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010/, se avsnitt 7.1.2. I FEP-katalogen för SR-Site finns en FEP-post för varje biosfärsprocess som definieras i processrapporten för biosfären. Dessa FEP-poster innehåller hänvisningar till såväl motsvarande processbeskrivning i processrapporten för biosfären som till rapporten där hanteringen av processen i SR-Site finns dokumenterad.

Externa FEP

FEP i NEA-databasen som definierades som externa FEP i SR-Can, delades upp i de kategorier som anges nedan. Vid den kompletterande indelningen av FEP från de nya projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas som gjordes för SR-Site, identifierades inte något behov av att modifiera indelningen av externa FEP. Således är kategorierna för externa FEP i både SR-Can och SR-Site:

- klimatrelaterade frågor,
- storskaliga geologiska processer och effekter,
- framtida mänskliga handlingar,
- övriga.

Klimatfrågor och hur de hanteras beskrivs i **Klimatrapporten**. I SR-Can definierades tio klimatrelaterade FEP, som motsvarade de klimatfrågor som beskrevs i Klimatrapporten från SR-Can /SKB 2006c/. Varje projektrelaterad FEP i NEA-databasen som sorterades till dessa klimatrelaterade FEP i SR-Can och deras hantering i SR-Can dokumenterades i FEP-katalogen för SR-Can. FEP-katalogen för SR-Site innehåller huvudsakligen samma FEP för klimatet som FEP-katalogen för SR-Can gör, även om de har strukturerats om något. Den innehåller dessutom ytterligare en FEP – ”denudation”. Denna ytterligare FEP motsvarar geosfärsprocessen ”vittring och erosion på ytan” i SR-Can. Företeelsen har i SR-Site kategoriserats som en klimatrelaterad biosfärsfråga snarare än en geosfärsprocess. I SR-Site har hanteringen av varje projektrelaterad FEP i NEA-databasen setts över och uppdaterats där så behövts. Detta omfattar också de FEP från de nya NEA-projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas som har sorterats till de FEP för klimatet som finns i FEP-katalogen för SR-Site.

Storskaliga geologiska processer och effekter täcktes i SR-Can av två FEP i FEP-katalogen för SR-Can och beskrevs i Processrapporten för geosfären från SR-Can /SKB 2006d/. Liksom för de klimatrelaterade frågorna kontrollerades att relevanta aspekter av de i NEA-databasen ingående projektrelaterade FEP, som sorterats till dessa FEP för storskaliga geologiska processer, omfattades av beskrivningarna av dessa processer i Processrapporten för geosfären /SKB 2006d/. Resultaten från kontrollen dokumenterades i FEP-katalogen för SR-Can. I SR-Site har dokumentationen i FEP-katalogen för SR-Can setts över och uppdaterats där så behövts. Man har då också beaktat de FEP från de nya projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas som har sorterats till dessa FEP för storskaliga geologiska processer.

Framtida mänskliga handlingar och hur de hanteras i säkerhetsanalysen beskrivs i **FHA-rapporten**. I SR-Can definierades sju FHA-FEP, som motsvarade de framtida mänskliga handlingar som beskrevs i FHA-rapporten från SR-Can /SKB 2006e/. Varje projektrelaterad FEP i NEA-databasen som sorterades till dessa FHA-FEP i SR-Can, och deras hantering i SR-Can, dokumenterades i FEP-katalogen för SR-Can. Samma sju FHA-FEP har inkluderats i FEP-katalogen för SR-Site. Dokumentationen

av hanteringen av varje NEA-projektrelaterad FEP, som har sorterats till dessa FEP för SR-Site, har emellertid setts över och uppdaterats där så behövts. FEP från de nya projekten i version 2.1 av NEA:s FEP-databas som har hänförts till dessa FHA-FEP i SR-Site har då också beaktats.

Till kategorin ”övriga” identifierades endast meteoritnedslag i SR-Can, men uteslöts från vidare analys, se avsnitt 6.1. Meteoritnedslag definierades emellertid ändå som en FEP i FEP-katalogen för SR-Can för dokumentationsändamål. Motivet för att utesluta denna FEP från vidare analys dokumenterades i FEP-posten i FEP-katalogen för SR-Can. Granskningen av nya projektrelaterade FEP i version 2.1 av NEA:s FEP-databas har inte pekat ut något behov av modifieringar. För dokumentationsändamål finns därför denna FEP kvar i FEP-katalogen för SR-Site.

Hanteringen av externa FEP beskrivs vidare i kapitel 6.

Metodikrelaterade frågor

Ett antal relevanta frågor som rör analysens faktaunderlag och metodik, identifierades i NEA:s FEP-databas. De flesta av dessa är väldigt allmänna, men infördes även i FEP-katalogen för SR-Can för att den skulle bli så uttömmande som möjligt. Granskningen av nya projektrelaterade FEP i version 2.1 av NEA:s FEP-databas ledde inte till något behov av modifieringar. FEP-katalogen för SR-Site innehåller därför samma metodikrelaterade FEP som FEP-katalogen för SR-Can.

3.4 Kopplingar

FEP är kopplade på flera olika sätt och på flera olika nivåer. Kopplingar mellan processer och variabler förekommer inom en systemkomponent och systemkomponenterna påverkar varandra på flera olika sätt. Nedan följer en beskrivning av olika typer av kopplingar och av de verktyg som används för att dokumentera och åskådliggöra dem.

Influenstabeller

Inom en systemkomponent påverkas varje process av en eller flera av de variabler som beskriver komponentens tillstånd. Processen påverkar i sin tur en eller flera av variablerna. Dessa kopplingar inom en systemkomponent beskrivs med hjälp av influenstabeller, en för varje process i processrapporten. Det görs en skillnad mellan den påverkan som existerar i teorin, men som är tillräckligt obetydlig för att uteslutas från säkerhetsanalysen, och den påverkan som kräver en ingående behandling. Hanteringen av den senare kategorin nämns uttryckligen när hanteringen av processen i fråga fastställs i processrapporterna. För ett exempel på en influenstabell hänvisas till avsnitt 7.3. Influenstabellerna återkopplas från **Processrapporterna** till FEP-katalogen. Kopplingar mellan olika systemkomponenter beskrivs i processbeskrivningarna i **Processrapporterna** under rubriken ”Boundary conditions”, se vidare avsnitt 7.3.

Processdiagram

Utifrån uppsättningarna av variabler och processer och hur de påverkar varandra konstrueras ett processdiagram för varje systemkomponent. Detta görs i FEP-databasen. Diagrammet utgörs huvudsakligen av en tabell, där processerna anges i raderna och variablerna i kolumnerna. Tabellmatrisen består av pilar som åskådliggör påverkan mellan processer och variabler. Olika färger på pilarna anger om den aktuella påverkan hanteras i analysen eller inte.

AMF, Modellrapport

När förvarsutvecklingen utvärderas används ett antal kopplade eller interagerande modeller. Denna uppsättning modeller och beroendet/interaktionen mellan dem beskrivs med hjälp av två modellscheman (assessment model flow charts, AMF). En av dem rör bygg- och driftsfasen och den inledande perioden med tempererat klimat, medan en annan avser permafrostförhållanden och glaciala förhållanden. Dessa beskrivs vidare i avsnitt 7.5. En **Modellrapport** beskriver modellerna med hjälp av AMF-scheman. Såväl AMF-scheman som processtabeller och tabeller, som kopplar samman AMF-scheman och processtabeller, är införda i FEP-databaserna, se avsnitt 7.4 respektive 7.5.

FEP-diagram

På en övergripande nivå är det önskvärt att ha ett verktyg som ger en överblick av hur avgörande faktorer för initialtillståndet, variabler och externa faktorer påverkar förvarets säkerhetsfunktioner. För detta ändamål har ett FEP-diagram utvecklats. Detta beskrivs vidare i avsnitt 8.5, efter en diskussion om förvarssäkerhet och definitionen av ett antal säkerhetsfunktionsindikatorer. FEP-diagrammet är också infört i FEP-databasen med länkar till den processtabell som också har inkluderats i FEP-databasen.

Hantering av kopplingar

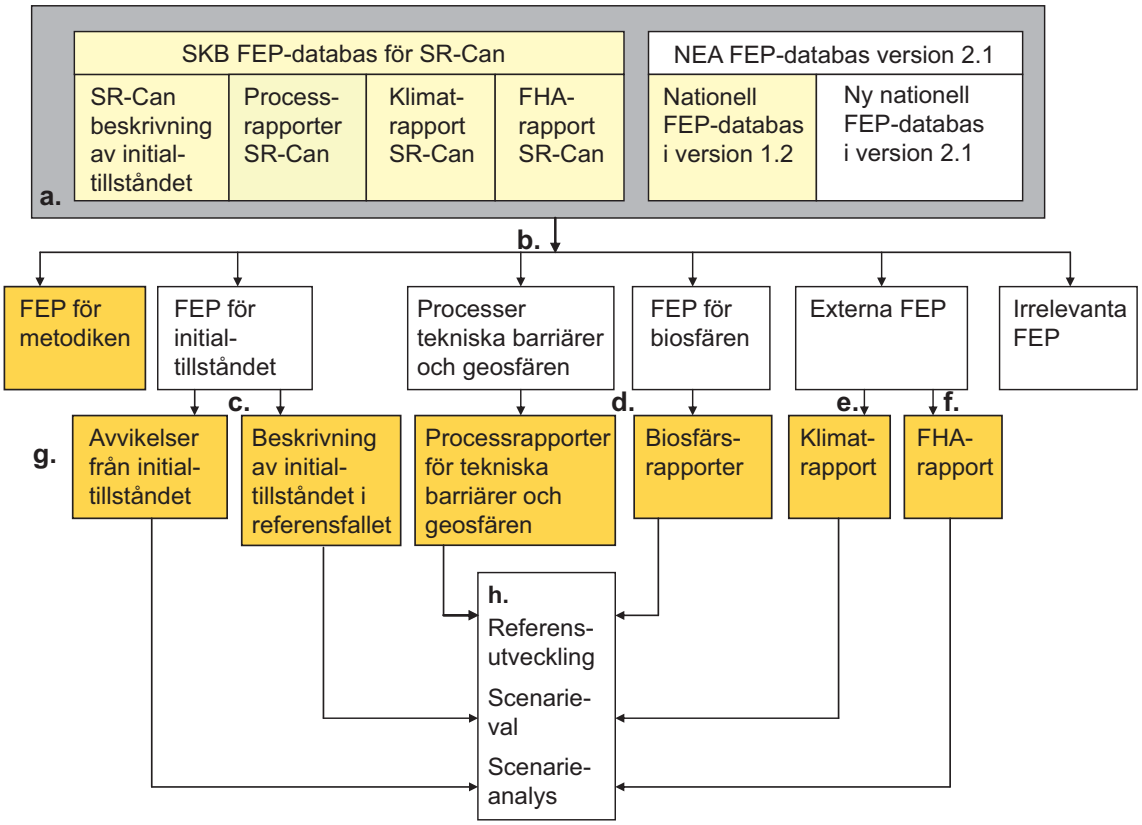
Inom systemet finns ett stort antal kopplingar. Den överväldigande majoriteten av dessa ingår inte direkt i någon av de modeller som används för att kvantifiera systemets utveckling. Motiv för att utesluta kopplingar finns i exempelvis processrapporterna där i) några processer – och därmed också tillhörande kopplingar – utifrån resonemang bedömts vara försumbara ii) inkluderandet eller uteslutandet av interna kopplingar motiveras i influenstabellerna, se avsnitt 7.3.

I många fall ger modelleringen ett gränsvärde för en viss egenskap hos systemet. Detta gränsvärde används sedan för att sätta gränser för liknande säkerhetsrelaterade fenomen utan att använda en detaljerad kopplad modell. Temperaturen i närområdet är ett exempel. Med hjälp av modelleringen visas att buffertens temperatur aldrig överstiger en viss gräns. Detta resultat används sedan för att hävda att långsiktig mineralomvandling i bufferten kan försummas, dvs sambandet mellan temperatur och kemiska reaktioner kan behandlas utan att en fullständigt kopplad modell används. Ytterligare en detalj i det här exemplet gäller hanteringen av buffertens termiska egenskaper. Bufferten förutsätts vara omättad, vilket maximerar den beräknade högsta temperaturen. Kopplingen mellan buffertens mättnadsgrad och temperaturen kan därmed beaktas från säkerhetssynpunkt utan att en kopplad modell används. Många av dessa samband visas i processtabellerna, se tabellerna 7.2 till 7.6 i kapitel 7.

Modelleringen och kopplingarna har därmed inte alltid som syfte att ge en bild av systemet som ur alla synvinklar är realistisk. Syftet är i stället att ge en bild som är adekvat för argumentationen i säkerhetsanalysen – ett tillvägagångssätt som i många fall tillåter att avsevärda förenklingar görs.

De närmare motiven för tillvägagångssättet ges av det faktaunderlag som ligger bakom modellstrategier och antaganden rörande speciella frågeställningar tillsammans med förståelsen för vilka frågeställningar som är av betydelse för säkerheten.

Hanteringen av FEP i SR-Site sammanfattas i figur 3-2.



Figur 3-2. *Hanteringen av FEP i SR-Site.*

a. Utgångspunkten för FEP-hanteringen i SR-Site är FEP i SR-Can-versionen av SKB:s FEP-databas, inklusive FEP-katalogen från SR-Can och tillhörande SR-Can-rapporter, samt de två nationella databaser som är nya i version 2.1 av NEA:s internationella FEP-databas jämfört med version 1.2 som var utgångspunkten för SR-Can-versionen av SKB:s FEP-databas.

b. FEP delas in i tre huvudkategorier: i) initialtillstånd, ii) intern process och iii) externa FEP. FEP kategoriseras även som irrelevanta eller som allmänt metodrelaterade.

c. FEP för initialtillståndet kan antingen i) inkluderas i beskrivningen av initialtillståndet i SR-Site, dvs referensutformningen av KBS-3-förvaret, platsbeskrivningen eller den platsanpassade förvarslayouten eller ii) kategoriseras som avvikelser från initialtillståndet som ska hanteras vidare i scenarievalet.

d. FEP för processer används för att uppdatera SR-Can-uppsättningen av interna processer för det tekniska barriärsystemet och geosfären. Den resulterande processuppsättningen för SR-Site dokumenteras i **Processrapporterna** för SR-Site. FEP för biosfären definieras i **Processrapporten för biosfären** och hanteringen av varje process beskrivs i olika biosfärsrapporter.

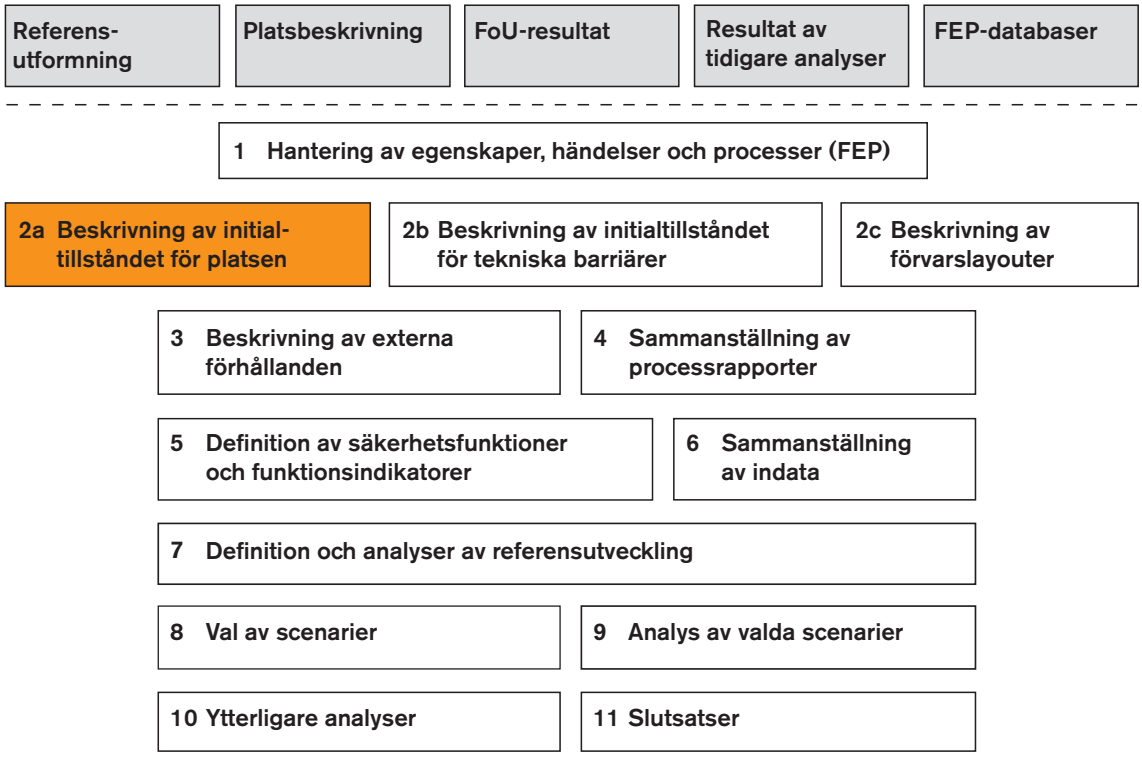
e. Hanteringen av externa FEP avseende långsiktiga klimatförändringar dokumenteras i **Klimatrapporten** för SR-Site. De få externa, storskaliga FEP för geosfären tas upp i **Processrapporten för geosfären**.

f. Hanteringen av externa FEP avseende framtida mänskliga handlingar (FHA) beskrivs i **FHA-rapporten** för SR-Site. Den enda ”övriga” externa FEP, meteoritnedslag, togs ingen hänsyn till i SR-Can på grund av att den bedömdes vara extremt osannolik och detta gäller även för SR-Site. Inga nya ”övriga” externa FEP har identifierats för SR-Site.

g. De FEP som anges i de gula rutorna utgör tillsammans FEP-katalogen för SR-Site.

h. Initialtillståndet för referensfallet, alla långvariga processer och en extern utveckling för referensfallet används för att definiera en referensutveckling för förvarssystemet. Denna utveckling är en viktig grundsten i ett omfattande huvudscenario. En uppsättning ytterligare scenarier tar t ex upp avvikelser från initialtillståndet i referensfallet och den externa utvecklingen för referensfallet samt situationer som rör FHA.

4 Förvarsplatsen i Forsmark



Figur 4-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

4.1 Inledning

En uttömmande beskrivning av förvarssystemets initialtillstånd är en av grundförutsättningarna för säkerhetsanalysen, se avsnitt 2.5.2. Den är också grunden för att utforma förvaret. Det tillstånd som råder i geosfären och biosfären vid början av förvarsbygget är en naturlig startpunkt, eftersom detta relativt ostörda tillstånd dokumenteras i de platsbeskrivande modeller som tagits fram utifrån undersökningsdata från platsen. I en säkerhetsanalys som baseras på observationer gjorda före berguttaget är det dessutom nödvändigt att ta hänsyn till bergets kortsiktiga utveckling, från de ursprungligen ostörda förhållandena till de förhållanden som råder efter berguttaget.

Baserat på dessa överväganden definieras initialtillståndet för geosfären och biosfären i SR-Site som det naturliga ostörda förhållandet vid tidpunkten då förvarsbygget påbörjas, se vidare avsnitt 5.1. En förvarsutformning med en platsspecifik layout utvecklas också utifrån de ostörda förhållanden som finns dokumenterade i platsbeskrivningen, se avsnitt 5.2. Kortsiktiga geosfärsprocesser eller förändringar som beror på berguttaget för förvaret dokumenteras i **Processrapporten för geosfären**, se vidare kapitel 7 i denna rapport, och i **Berglinjerapporten**, se vidare avsnitt 5.2 i denna rapport. Detta innebär att utvecklingen av det naturliga systemet, inklusive den tänkbara utvecklingen av en skadad zon (EDZ), kommer att följas från tidpunkten då berguttaget påbörjas, se avsnitt 10.2.

Överföringen av information från platsundersökningarna vid Forsmark till användningen i säkerhetsanalysen har skett i flera steg.

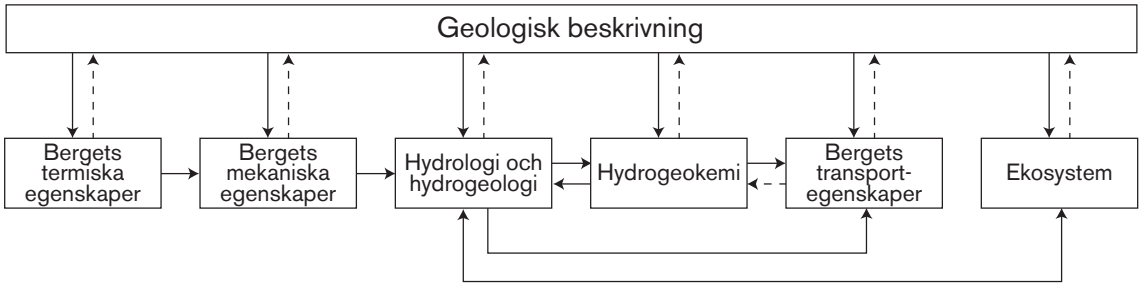
- Fältdata från olika undersökningsaktiviteter, exempelvis flyg- och geofysikaliska studier från ytan, samt tester i de hål som borrats har samlats in och efter kvalitetskontroll lagrats i SKB-databaserna Sicada och GIS.
- Fältdata har tolkats och utvärderats i en tvärvetenskaplig platsbeskrivande modell (Site Descriptive Model, SDM), som är en syntes av geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper hos berggrunden och ytsystemets egenskaper, se figur 4-2. SDM ger en beskrivning av kunskapen om platsens egenskaper inom de olika ämnesområdena.

Den ger även en utvärdering av osäkerheten i dessa beskrivningar. SDM för förvarsplatsen i Forsmark efter det att undersökningarna från ytan slutförts redovisas i en platsbeskrivande huvudrapport, **Platsbeskrivning Forsmark**, och i flera stödjande underlagsrapporter.

- **Platsbeskrivning Forsmark** har använts för att utveckla en platsspecifik utformning av förvaret /SKB 2009b/ i överensstämmelse med fastställda konstruktionsförutsättningar. Detta beskrivs i **Berglinjerapporten** och diskuteras i avsnitt 5.2 i den här rapporten.
- Platsbeskrivningen med tillhörande referenser kan inte alltid användas direkt i säkerhetsanalysen. Det finns behov av att också beakta information som inte är platsspecifik, att hantera osäkerheter som identifierats i platsbeskrivningen och att slutgiltigt välja indata till modellerna i säkerhetsanalysen. Av detta skäl utvärderas alla platsdata som används i SR-Site i **Datarapporten** för SR-Site, där SDM används som indata. **Datarapportens** funktion förklaras i avsnitt 2.5.6 och upplägget för **Datarapporten** diskuteras ytterligare i kapitel 9.

Sammanfattningsvis hanteras kvantitativa platsspecifika indata för SR-Site i **Datarapporten**, så de upprepas inte här. Det finns emellertid ett behov av att sammanfatta förvarsplatsens viktigaste egenskaper och den nuvarande kunskapen om densamma. Med tanke på detta ger återstoden av det här kapitlet en översiktlig beskrivning, som i stort är hämtad från den sammanfattning som ges i kapitel 11 i **Platsbeskrivning Forsmark**. Översikten av ytsystemet som ges i avsnitt 4.10 är, förutom på **Platsbeskrivning Forsmark,** baserad på rapporten som beskriver ytsystemet /Lindborg 2008/ – en av huvudreferenserna till **Platsbeskrivning Forsmark**.

Som en del av den platsbeskrivande modelleringen utvärderades osäkerheten och tilltron till platsbeskrivningen för Forsmark. Denna utvärdering omfattade tilltron till data från platskarakteriseringen, viktiga kvarvarande osäkerheter i platsbeskrivningen, alternativa modeller och hanteringen av dessa, överensstämmelse mellan ämnesområden samt huvudorsakerna till graden av tilltro till den platsbeskrivande modellen. Det övergripande resultatet av denna utvärdering var att man, med hjälp av kvantitativa osäkerhetsuppskattningar och alternativa modeller, fann att de egenskaper hos platsen som är viktiga för både möjligheten att bygga förvaret och för den långsiktiga säkerheten är tillräckligt väl avgränsade. En sammanfattning av analysen ges i kapitel 11 i **Platsbeskrivning Forsmark** och rapporteras utförligare i /SKB 2008b/. Resten av det här kapitlet behandlar kvalitativt tilltron till platsens egenskaper och återstående osäkerheter som en del i redovisningen av platsförståelsen.



Figur 4-2. *De olika ämnesbeskrivningarna i SDM hänger samman genom flera återkopplingsslingor, där det grundläggande geometriska ramverket väsentligen bestäms av geologiska faktorer.*

4.2 Forsmarksområdet

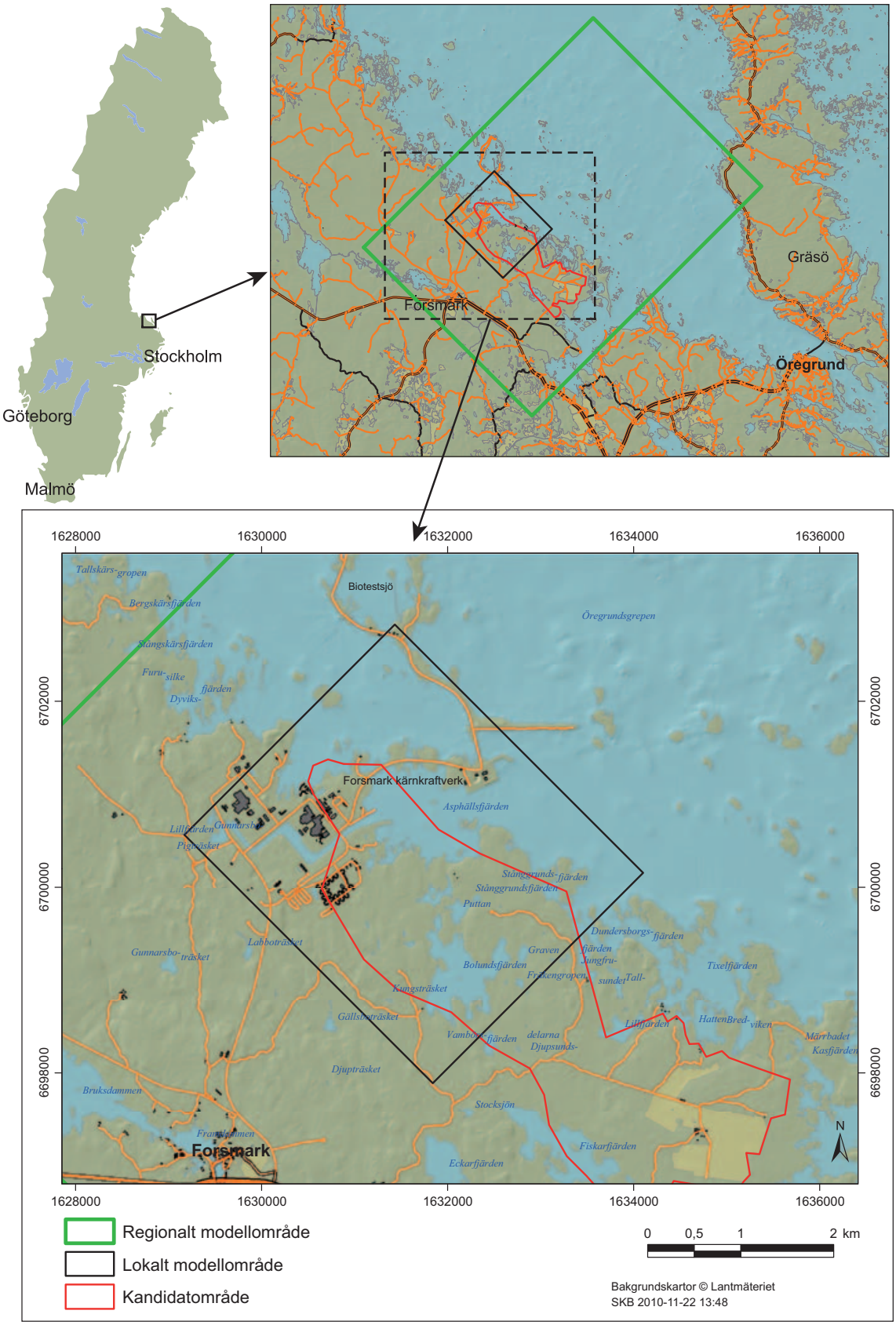
4.2.1 Läge

Forsmarksområdet är beläget i norra Uppland inom Östhammars kommun, cirka 120 km norr om Stockholm, se figur 4-3. Kandidatområdet för platsundersökningen, som är ungefär 6 km långt och 2 km brett, ligger längs med kustlinjen för Öregrundsgrepen – en trattformad vik i Östersjön. Kandidatområdet sträcker sig från Forsmarks kärnkraftverk och tillfartsvägen till SFR (Slutförvaret för kortlivat radioaktivt driftavfall) i nordväst till Kallrigafjärden i sydost, se figur 4-3 och karta i bilaga C.

Den nuvarande berggrundsytan i Forsmarksområdet utgör en del av det subkambriska peneplanet i sydöstra Sverige. Detta peneplan representerar en relativt flack topografisk yta med svag lutning mot öster och uppstod för mer än 540 miljoner år sedan. Kandidatområdet i Forsmark kännetecknas av en småskalig topografi på låg nivå över havet, se figur 4-4. De högst belägna områdena åt sydväst i kandidatområdet ligger cirka 25 m över den nuvarande havsnivån. Hela området ligger under högsta kustlinjen, som utgjorde den högst belägna gränsen mellan land och hav under den senaste nedisningen. Stora delar av kandidatområdet har stigit upp ur Östersjön så sent som under de senaste 2 000 åren. Både den flacka topografin och den ännu pågående strandlinjeförskjutningen på cirka 6 mm per år påverkar i hög grad det nuvarande landskapet, se figur 4-4. Sjöbottnar omvandlas fortlöpande till nya landområden eller sötvattensjöar. Sjöar och våtmarker täcks undan för undan med torv.

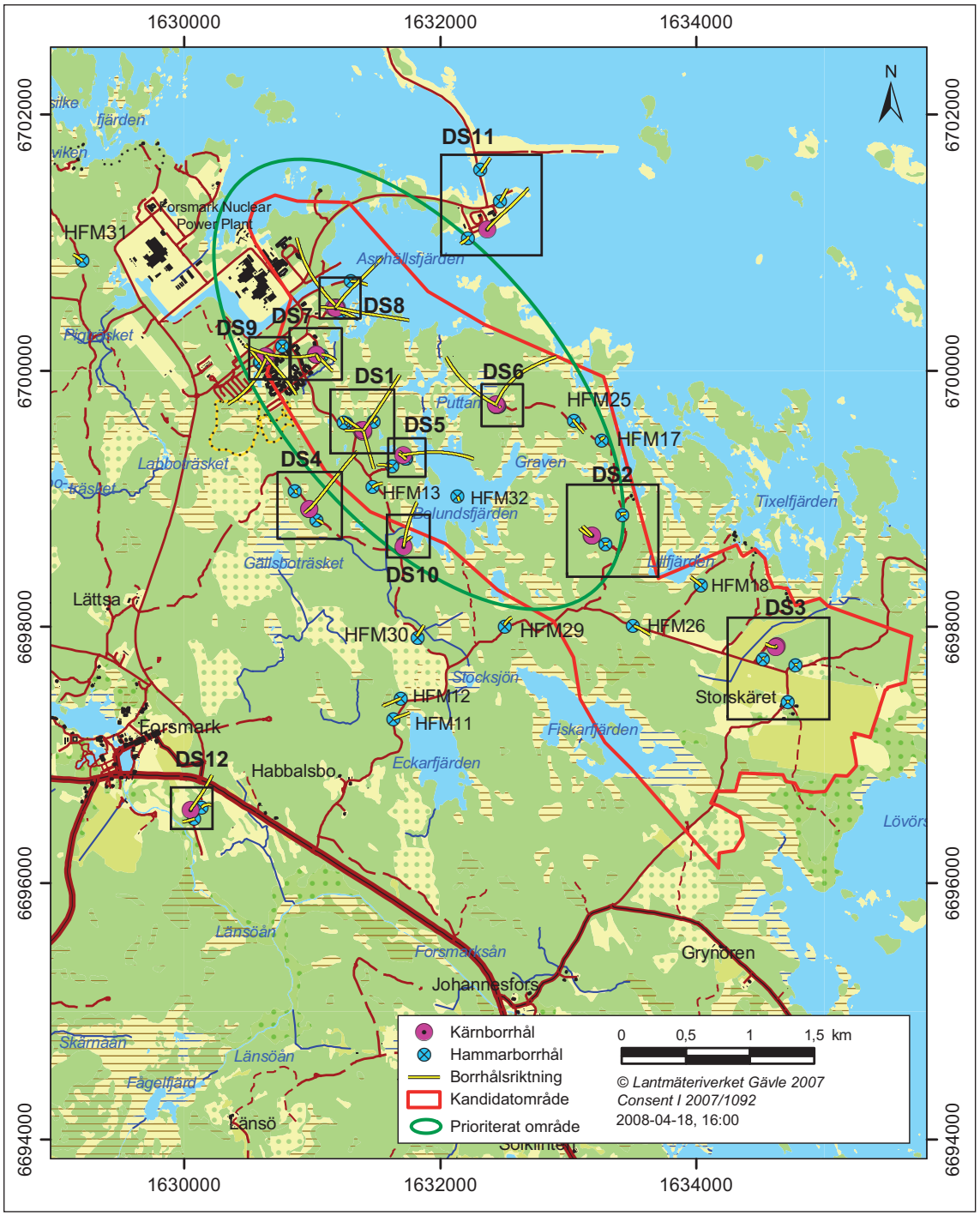
4.2.2 Prioriterat område för förvaret

Den nordvästra delen av kandidatområdet har valts ut som det prioriterade området för förvaret, se figur 4-5 och karta i bilaga C. Karakteriseringar av berggrunden har genomförts i det prioriterade området och dess omgivningar, både genom undersökningar av ytan och genom undersökningar i borrhål, se figur 4-5. Undersökningarna av ytan har omfattat geologisk kartering, olika mark- och flygbaserade geofysiska undersökningar, ytekologiska undersökningar och observationer av exempelvis meteorologiska parametrar samt vattennivåer i sjöar och i Östersjön. Borrhålsdata, som utgör underlag till Forsmarks platsbeskrivning, kommer från 25 kärnborrhål på tolv borrplatser, se figur 4-5. Dessa borrhål når ned till ett djup av cirka 1 000 m och har en total borrhålslängd av cirka 17 800 m. Databasen innehåller också resultat från undersökningar i 38 hammarborrade hål med en total borrhålslängd av cirka 6 500 m, och mer än 100 observationsborrhål i de kvartära avlagringarna, så kallade jordborrhål. Den platsinformation som funnits tillgänglig för att upprätta platsbeskrivningen för Forsmark beskrivs i sin helhet i **Platsbeskrivning Forsmark**.



Figur 4-3. *Läget för Forsmarks kandidatområde (rött) för platsundersökning.*

Figur 4-4. *Foton från Forsmark som visar den flacka topografin och den svagt sluttande kustlinjen, med vikar som under senare tid avsnörts på grund av landhöjningen (figur 1-6 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*



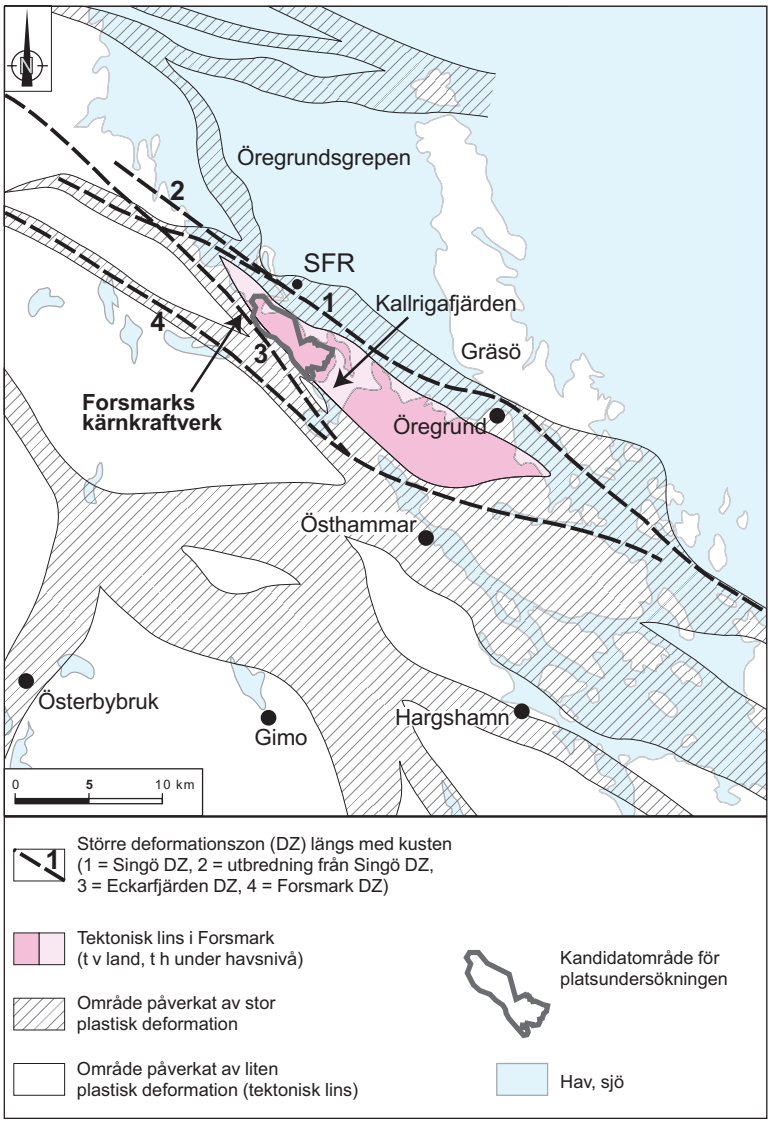
Figur 4-5. *Forsmarks kandidatområde med det prioriterade området i den nordvästra delen (inringat i grönt) och borrplatsernas lägen (figur 11-1 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

4.3 Bergdomäner och tillhörande termiska och bergmekaniska egenskaper

Platsens litologi, dvs förekomst och fördelning av bergarter, talar om hur homogen berggrunden är på platsen. Dessutom ger den information om såväl eventuella mineraltillgångar som om det opåverkade bergets termiska och mekaniska egenskaper. I den platsbeskrivande modellen beskrivs litologin med hjälp av bergdomäner, definierade utifrån sammansättning, kornstorlek, homogenitet samt typ och grad av plastisk deformation.

4.3.1 Bergartssammansättning och indelning i bergdomäner

I Forsmarksområdet är berggrunden kristallin. Den tillhör den fennoskandiska skölden och bildades för mellan 1,89 och 1,85 miljarder år sedan under den svekokarelska bergskedjeveckningen. Berggrunden har påverkats genom både plastisk och spröd deformation. Den plastiska deformationen har resulterat i storskaliga mycket deformerande bälten och mera åtskilda starkt deformerade zoner. Tektoniska linser, i vilka berggrunden är förhållandevis opåverkad av plastisk deformation, omgärdas av de starkt deformerade plastiska bältena. Kandidatområdet ligger i den nordvästligaste delen av en av dessa tektoniska linser. Linsen sträcker sig från nordväst om kärnkraftverket i sydostlig riktning mot området kring Öregrund, se figur 4-6.

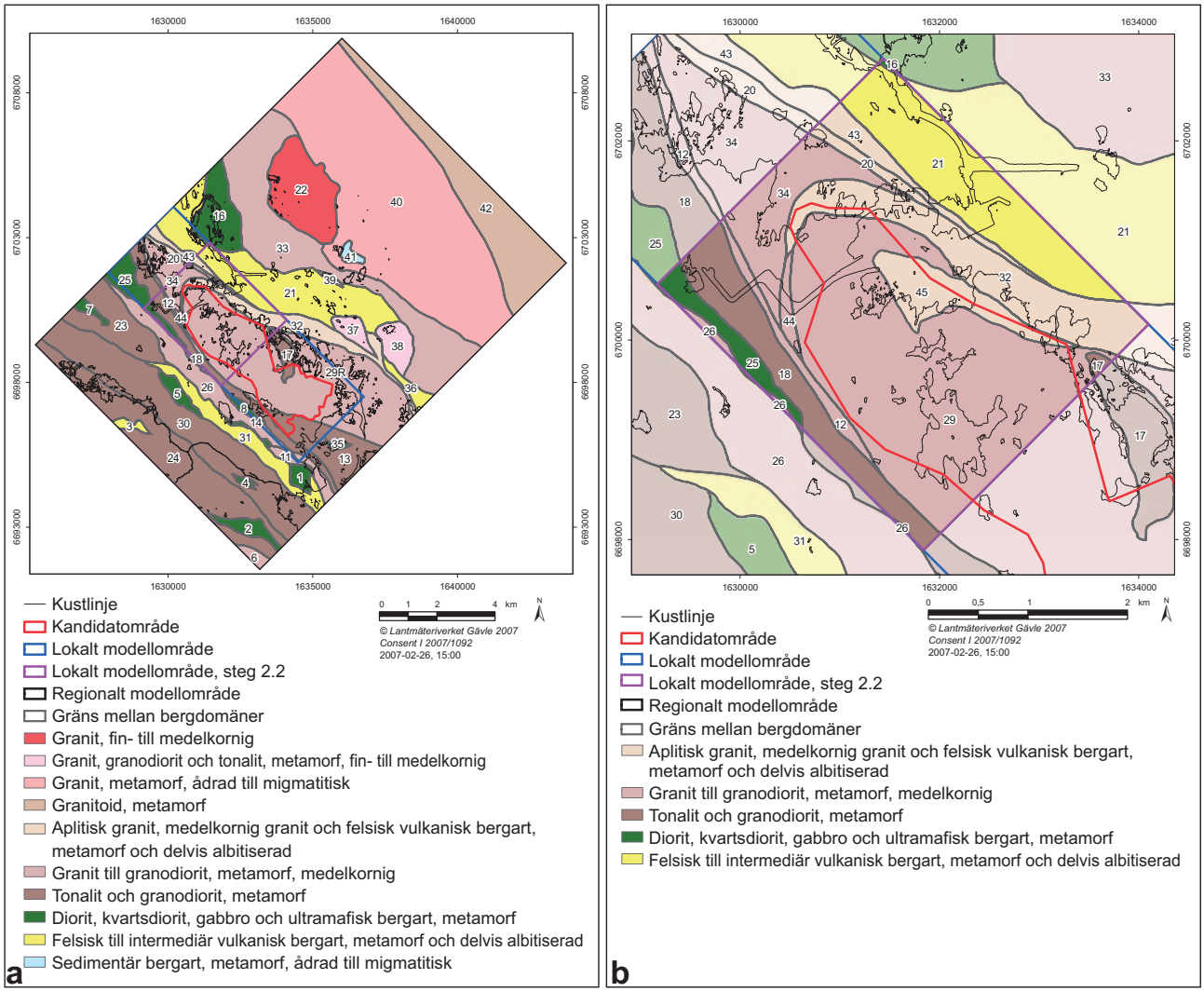


Figur 4-6. *Den tektoniska linsen vid Forsmark och områden påverkade av stark plastisk deformation i Forsmarks omgivning (figur 1-5 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

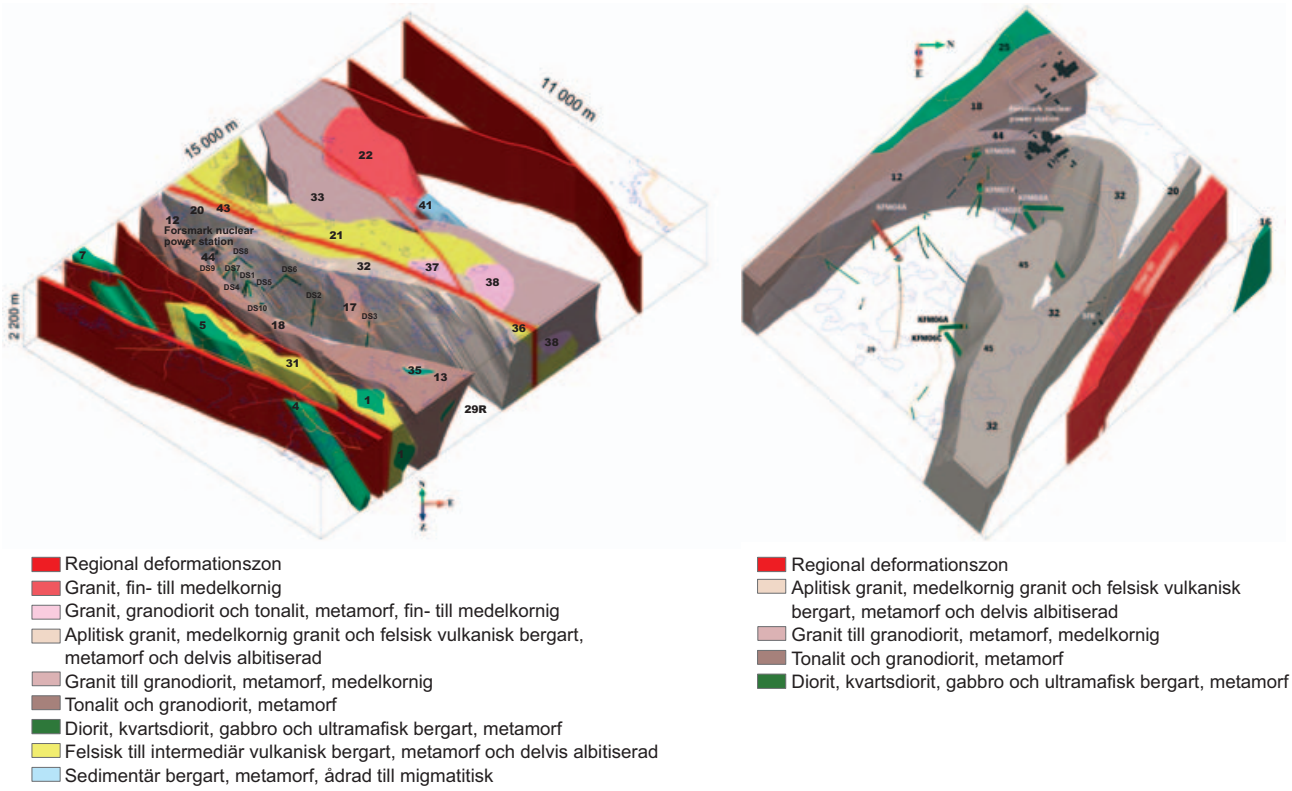
Bergdomäner i den prioriterade volymen

Tack vare sin inre homogenitet kan större delen av linsen inom kandidatområdet beskrivas som två bergdomäner, benämnda RFM029 och RFM045, se figur 4-7. Dessa är också de två bergdomäner som utgör berggrunden i den prioriterade volymen. Den dominerande bergarten i bergdomän RFM029 är en medelkornig metagranit (74 procent av domänvolymen). Underordnade bergarter är pegmatitisk granit eller pegmatit (13 procent), fin- till medelkornig metagranitoid (5 procent) och amfibolit samt andra smärre mafiska till intermediära bergarter (5 procent). Med undantag av amfibolit, som innehåller lite eller ingen kvarts, har de dominerande och underordnade bergarterna ett högt kvartsinnehåll (cirka 20–50 procent).

Bergdomän RFM045 omges av bergdomän RFM029 i den prioriterade volymen, se figur 4-7. Den har en sammanpressad stångliknande geometri, som lutar måttligt till brant ned mot sydost, se figur 4-8. Aplitisk metagranit och medelkornig metagranit, liknande den dominerande bergarten i domän RFM029, är de dominerande bergarterna (67 procent) i denna domän. De underordnade bergarterna utgörs av pegmatit och pegmatitisk granit (14 procent), fin- till medelkornig metagranitoid (9 procent) samt amfibolit och andra smärre mafiska till intermediära bergarter (7 procent).



Figur 4-7. *Bergdomäner som ingår i de tvådimensionella modellerna av berggrunden vid markytan. a) Modell av det regionala modellområdet. b) Modell av det lokala modellområdet (mörkare färger). De olika färgerna representerar den dominerande bergarten i varje domän (figur 5-24 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*



Figur 4-8. *Tredimensionell modell av bergdomäner (numrerade) och regionala deformationszoner (röd färg). Flera domäner, inklusive RFM029, är ofärgade för att lyfta fram det strukturella utseendet på platsen och i den tektoniska linsen. Den dominerande bergarten i varje domän illustreras med hjälp av olika färger (se förklaring). Till vänster: Regional modell som visar den modellerade sydöstra förlängningen av flera domäner (figur 4-15 i /Stephens et al. 2007/). Till höger: Bergdomäner i det prioriterade området, betraktade åt väster ungefär från läget för SFR (figur 4-6 i /Stephens et al. 2007/).*

Bergdomäner utanför den prioriterade volymen

Bergdomäner utanför den tektoniska linsen och den prioriterade volymen lutar brant åt sydväst, vilket följer tendensen hos kustens deformationsbälte, se figur 4-8. De domineras av olika sorters granitoida och övervägande felsiska vulkaniska bergarter samt kvartsfattig diorit till gabbro. I enheterna RFM018 och RFM021 på båda sidor om den tektoniska linsen, se figur 4-7, är berggrund mer inhomogen.

Tilltro

Tilltron är stor till såväl bergdomänernas geometri som deras egenskaper ned till ett djup av 1 000 m inom och i den prioriterade volymens omedelbara närhet. Däremot kvarstår signifikanta osäkerheter beträffande karaktären och geometrin hos bergdomäner utanför den prioriterade volymen, exempelvis i havsområdet.

4.3.2 Mineraltillgångar

Malmtillgångarna i kustområdet i norra Uppland har samband med bergarterna och deras karakteristik. Vid en bedömning av möjliga malmtillgångar drogs slutsatsen att det inte finns någon potential för fyndigheter av metaller och industriella mineraler inom Forsmarks kandidatområde. En möjlig förekomst av järnoxidmineral uppdagades i ett område sydväst om kandidatområdet, huvudsakligen i det felsiska till metavulkaniska berget. Mineralfyndigheterna är dock små och har i dagsläget bedömts sakna ekonomiskt värde /Lindroos et al. 2004/. Felsiskt till metavulkaniskt berg dominerar också i domän RFM021, belägen norr om och utanför kusten vid kandidatområdet, se figur 4-7. Det finns ingen dokumenterad förekomst av järnmineral i tillgängliga data från öarna. Eftersom det mesta av denna bergdomän ligger under Östersjön, varifrån inga mineralogiska data finns, så kan förekomsten av järnoxidmineral inte helt uteslutas i bergdomän RFM021.

4.3.3 Termiska egenskaper

Bergets termiska egenskaper, dvs värmeledningsförmåga och värmekapacitet, har nära samband med litologin, eftersom de beror av mineralsammansättningen. Berggrundens värmeledningsförmåga har bedömts utifrån direkta mätningar och med hjälp av beräkningar baserade på den analyserade mineralsammansättningen. De samband mellan densitet och värmeledningsförmåga, som fastställts från platsspecifika data, stödjer att densitetsdata som mätts upp i borrhål i kan användas för att modellera hur värmeledningsförmågan varierar inom en bergart. Dessa samband har visat sig stämma överens med resultaten från teoretiska beräkningar av densitet och värmeledningsförmåga, vilka baserats på mineralogin för olika bergarter. Värmekapaciteten har bestämts dels genom kalorimetriska mätningar och dels indirekt genom mätningar av värmeledningsförmåga och diffusivitet.

Värmeledningsförmåga, värmekapacitet och temperatur

Bergarterna i bergdomän RFM029 har ett högt kvartsinnehåll (cirka 20–50 procent), vilket innebär höga värden för värmeledningsförmågan. Mätningar i centimeterskala ger värden inom intervallet 3,2 till 4,0 W/(m·K) för den medelkorniga metagraniten, som är den dominerande bergarten i bergdomän RFM029. Det omvandlade granitiska berg som dominerar i bergdomän RFM045 har också hög värmeledningsförmåga, med värden uppmätta inom intervallet 3,6 till 4,0 W/(m·K). Underordnade bergarter i dessa bergdomäner uppvisar emellertid betydligt lägre värden. Detta gäller exempelvis amfibolit som ligger inom intervallet 2,2 till 2,5 W/(m·K). Amfibolit uppträder som smala åderlika skivformiga kroppar och oregelbundna inneslutningar, utdragna i samma riktning som den allmänna stängligheten. Även om vissa av dessa kroppar är mäktigare än några få meter, är slutsatsen att de flesta endast utgör mindre inslag i berget, dvs utgör tunna geologiska enheter. Uppmätta och beräknade termiska konduktiviteter visar också att berg som påverkas av omvandling i form av oxidation har en högre värmeledningsförmåga än motsvarande opåverkade berg.

Hänsyn har tagits till variabiliteten hos värmeledningsförmågan inom varje bergart – och mellan olika bergarter – i stokastisk modellering på domännivå genom att använda rumsliga statistiska modeller av litologi och värmeledningsförmåga. I både bergdomän RFM029 och RFM045 är medelvärdet för värmeledningsförmågan från de stokastiska simuleringarna cirka 3,6 W/(m·K) i femmetersskalan vid en temperatur av 20 °C. Inverkan av berg med låg värmeledningsförmåga – främst från den underordnade bergarten amfibolit, men också från den fin- till medelkorniga metagranitoiden – är speciellt tydlig i RFM045. Den markant lägre änden på det resulterande histogrammet för värmeledningsförmåga i femmeterskalan ger uttryck för detta, se figur 4-9.

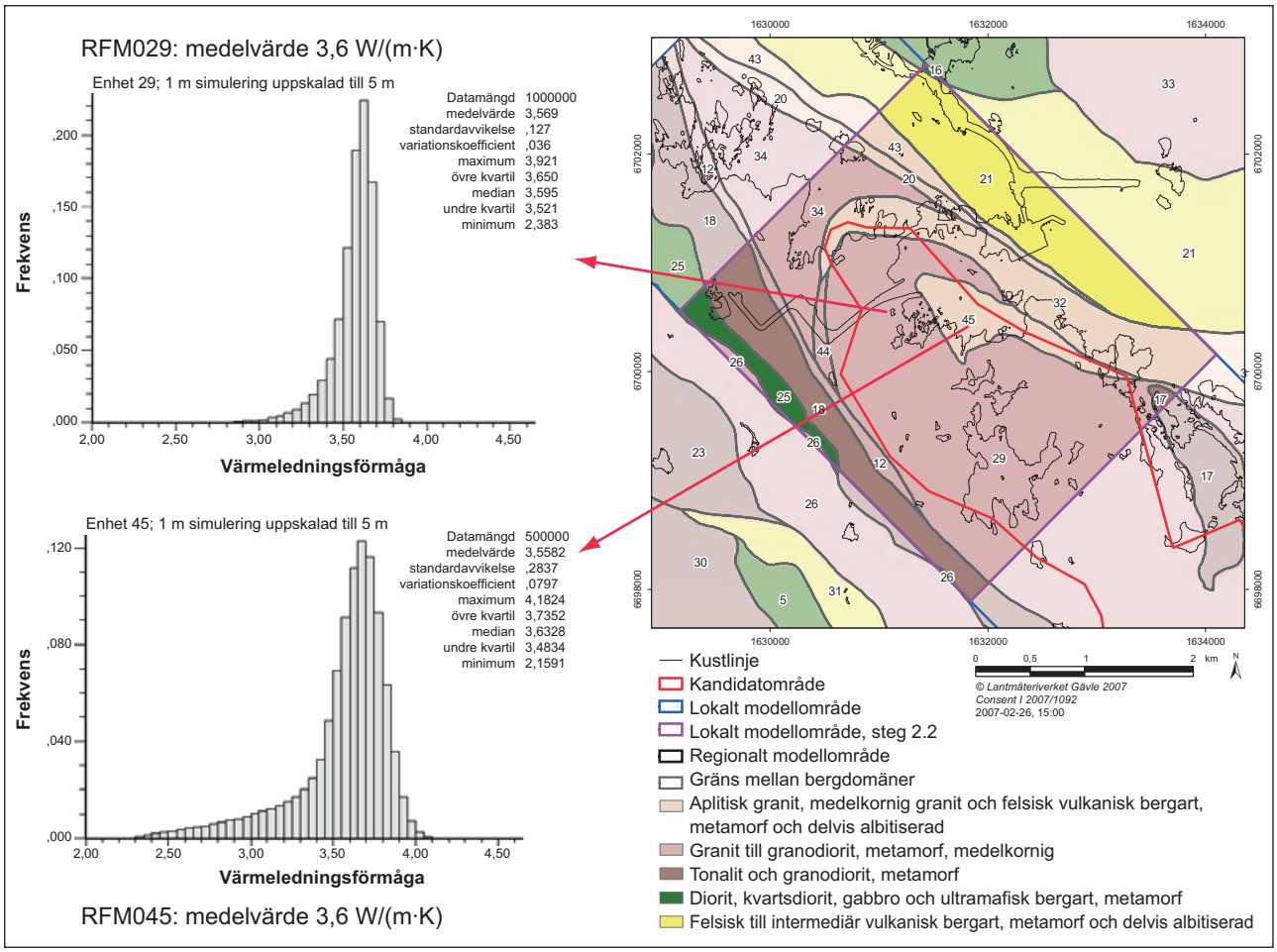
Det medelvärde för värmekapaciteten som tagits fram genom mätningar och simuleringar av värmeledningsförmåga är 2,1 MJ/(m^3·K), både i bergdomän RFM029 och i RFM045. Detta värde gäller för en temperatur på 20 °C, men varierar inte mycket över det temperaturintervall som är av intresse. Medelvärdet för värmekapaciteten hos den dominerande bergarten metagranit ökar med ungefär 29 procent per 100 °C ökning i temperatur. Temperaturen *in situ* utgör det initiala temperaturförhållandet för ett förvar. Den rådande medeltemperaturen på ett djup av 500 m uppskattas utifrån mätningar i åtta borrhål till 11,6 °C.

Tilltro

Det råder generellt sett hög tilltro till den modellerade fördelningen av termiska egenskaper, beroende på den stora mängden termiska data för den homogena bergmassan. Fördelningen av värmeledningsförmågan i bergdomän RFM045 är mer osäker än den i bergdomän RFM029. För domän RFM045 rör dessa osäkerheter både den övergripande fördelningen och dess lägre ände. Osäkerheterna kan relateras till osäkerheter i resultatet från de geologiska simuleringarna, i synnerhet proportionerna mellan olika bergarter och rums- och storleksfördelningen för amfibolit. Även om de utförda geologiska simuleringarna har lyckats återskapa mycket av den heterogenitet som observerats i borrhålen, är det fortfarande något oklart hur representativ borrhålsinformationen är för geologin i domän RFM045. Anledningen till detta är det ringa antalet borrhål, kombinerat med den mer heterogena fördelningen av amfibolit, i denna bergdomän.

4.3.4 Hållfasthet och andra mekaniska egenskaper i intakt berg

Litologin påverkar också direkt den termiska expansionen, den mekaniska hållfastheten och deformationsegenskaperna hos det icke uppspruckna (intakta) berget. Bergets mekaniska hållfasthet och deformationsegenskaper utvärderas från resultat av mätningar på prover från de dominerande bergarterna i RFM029 och RFM045, liksom från den underordnade bergarten pegmatit.



Figur 4-9. *Modellerad värmeledningsförmåga i femmetersskala. Den lägre änden av fördelningen beror huvudsakligen på den underordnade bergarten amfibolit (figur 11-10 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Termisk expansion

Medelvärdet för den uppmätta termiska expansionskoefficienten för de vanligaste metagranitoida bergarterna inom den prioriterade volymen varierar mellan $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ och $7{,}8 \cdot 10^{-6}$ m/(m·K). Medelvärdet för mätningarna av den dominerande medelkorniga metagraniten i RFM029 är $7{,}7 \cdot 10^{-6}$ m/(m·K). Motsvarande värde för den omvandlade metagranit som dominerar i RFM045 är $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ m/(m·K). Modellering av de separata domänerna har inte utförts, men de små skillnaderna i uppmätta värden tyder på en genomsnittlig termisk expansionskoefficient på 7–$8 \cdot 10^{-6}$ m/(m·K) för de olika bergdomänerna.

Hållfasthet och deformationsmodul

Den enaxliga tryckhållfastheten (UCS) och Youngs modul (E) för det intakta berget visar att bergarterna i bergdomänerna RFM029 och RFM045 har hög hållfasthet (UCS > 200 MPa) och är styva (E > 70 GPa). Resultaten för prover som tagits inne i eller i närheten av deformationszoner ligger inom samma intervall som resultaten för prover tagna i berget utanför deformationszonerna.

Tilltro

Det råder i allmänhet hög tilltro till hållfasthets- och deformationsegenskaperna hos de dominerande bergarterna i bergdomänerna RFM029 och RFM045. Det finns en del kvarstående osäkerheter i den enaxliga tryckhållfastheten hos de underordnade bergarterna amfibolit och fin- till medelkornig metagranitoid i dessa bergdomäner. Andelarna av dessa bergarter i bergdomänerna RFM029 och RFM045 inne i den prioriterade volymen är emellertid små.

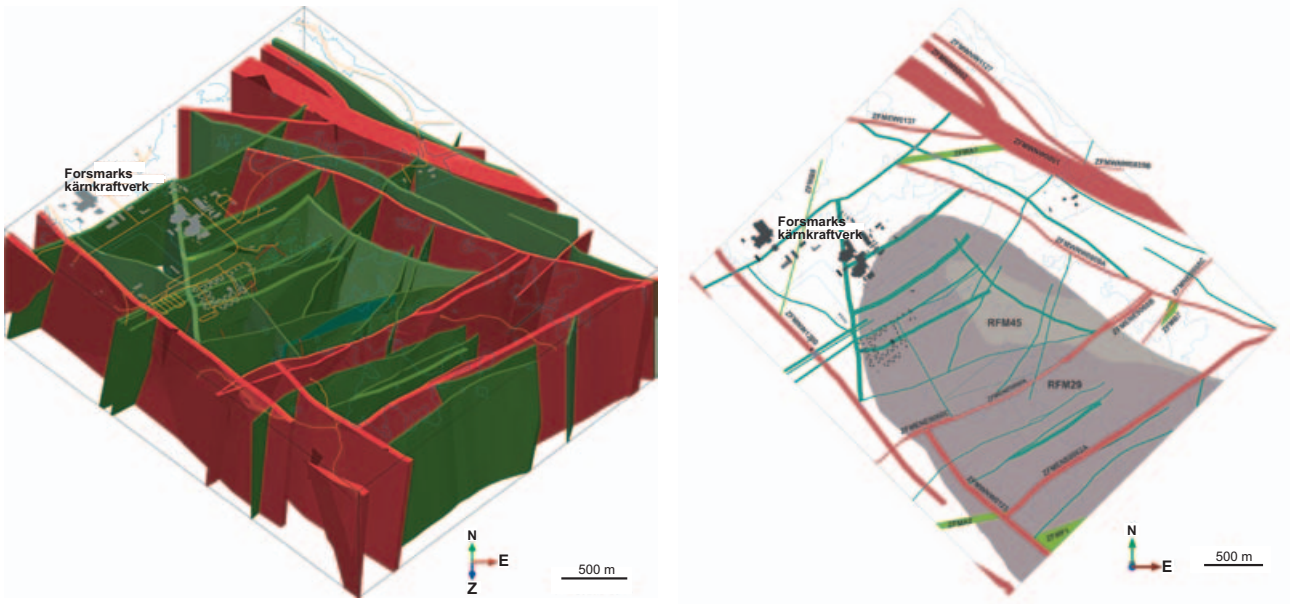
4.4 Deformationszoner, sprickdomäner och sprickor

Deformationszoner och sprickor utgör betydelsefulla egenskaper för förvarsplatsen, eftersom de påverkar den möjliga placeringen av förvaret samt bergets mekaniska stabilitet och grundvattenflödet. Dessutom påverkar tidigare deformationer och deformationszonernas geometri spänningsfördelningen i berget och därigenom även sprickornas egenskaper i volymen.

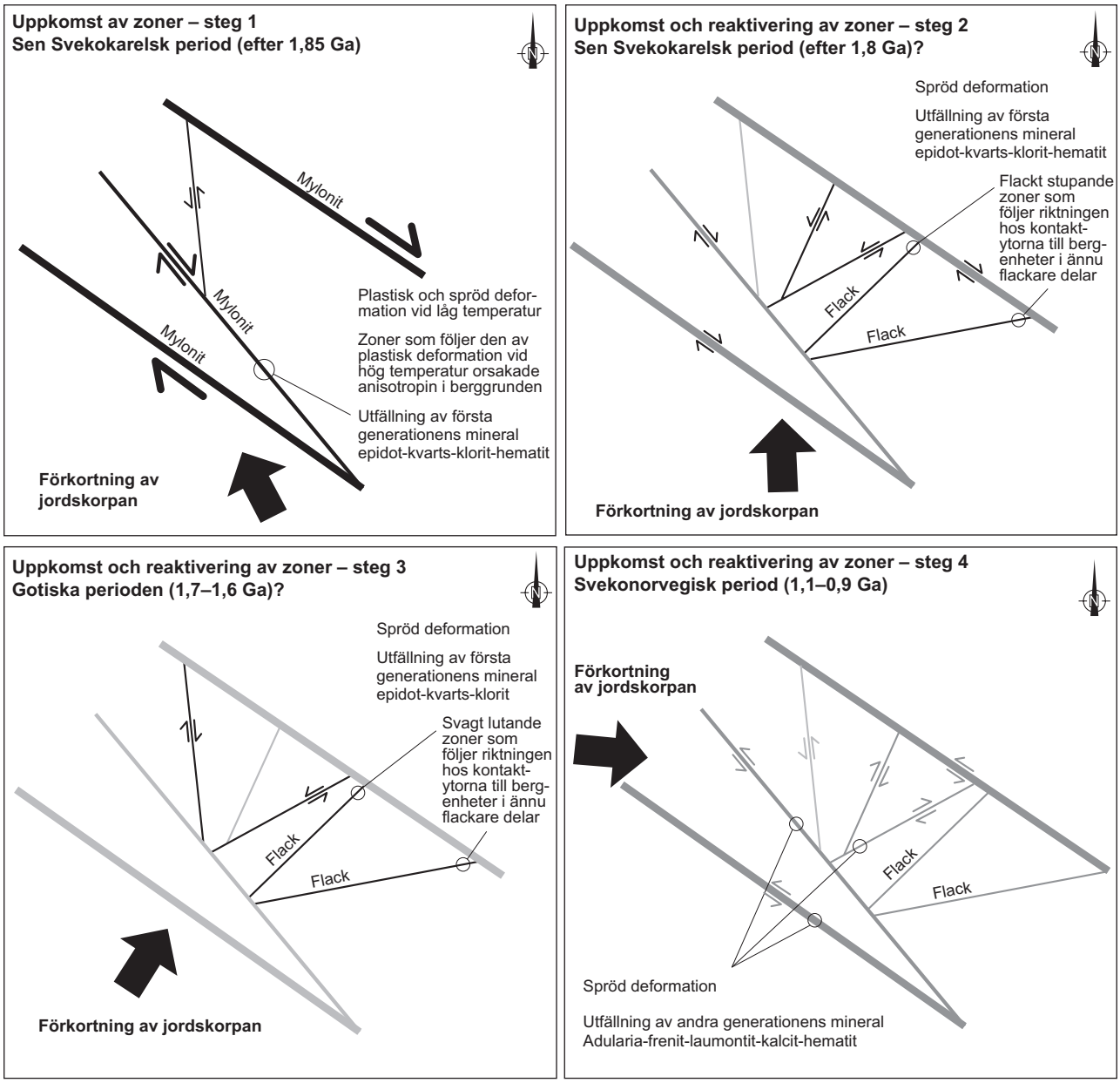
4.4.1 Uppkomst och reaktivering under geologisk tid

I Forsmark har fyra grupper av deformationszoner identifierats med hög tilltro, se figur 4-10. Vertikala och brant SV-stupande zoner – med undergrupper som benämns VNV och NV – uppvisar komplex, plastisk och spröd deformation. Regionala zoner som är längre än 10 km och som ligger utanför kandidatvolymen (t ex Forsmarkzonen, Singözonen och Eckarfjärdszonen) tillhör denna grupp, se figur 4-6. Deformationszonerna i de resterande tre grupperna uppvisar endast spröd deformation och kan benämnas sprickzoner. Vertikala och brant sluttande sprickzoner – med undergrupper som benämns ONO (NO) och NNO – genomkorsar den tektoniska linsen och är vanliga inuti den prioriterade volymen, se figur 4-10. Dessa zoner bildades under perioden med spröda förhållanden och domineras av läkta sprickor och läkta spricknätverk. Svagt sluttande (flacka) sprickzoner förekommer oftare i den sydöstra delen av kandidatområdet, dvs utanför det prioriterade området. Jämfört med de andra tre grupperna är frekvensen av öppna sprickor och krosszoner högre i de flacka zonerna. Den fjärde gruppen består av vertikala och brant stupande sprickzoner. Dessa benämns NNV och domineras även de av läkta sprickor. Eftersom sådana zoner är så sällsynta anses de ha mindre betydelse jämfört med de andra tre grupperna av zoner i Forsmark.

Geokronologiska data för låga temperaturer, datering av sprickmineraler, kinematiska data och beaktande av deformation i ett regionalt perspektiv har använts för att upprätta en konceptuell modell för uppkomsten och reaktiveringen av deformationszoner i samband med förändringar av spänningsförhållandena från den senare delen av den svekokarelska bergskedjeveckningen (cirka 1,85 till 1,75 Ga) fram till kvartärtiden. Den konceptuella modellen tyder på att de olika grupperna och undergrupperna av deformationszoner i Forsmarkområdet hade bildats och redan reaktiverats under proterozoikum, i samband med en rad tektoniska händelser före 900 Ma, se figur 4-11. Ytlineamentens avslutningsmönster och förekomsten av plastisk deformation tyder på att de brant stupande zoner, som benämns VNV och NV, utgör de äldsta diskreta strukturerna på platsen. Slutsatsen dras att de bildades som en



Figur 4-10. *Tredimensionell modell som visar alla de vertikala och brant stupande zonerna i den lokala modellvolymen (a) och en tvådimensionell horisontell yta på 500 m djup i den lokala modellvolymen som omfattar samtliga zoner (b) (figur 5-12 och 5-13 i /Stephens et al. 2007/). Rödmarkerade zoner har en spårlängd på ytan som överstiger 3 000 m och zoner markerade med grönt (a) eller blågrönt (b) har en spårlängd som understiger 3 000 m. Zoner som är markerade med ljusgrönt (b) är flacka.*



Figur 4-11. *Tvådimensionella illustrationer som åskådliggör geodynamiken i regional skala under bildningen och reaktiveringen av de olika grupperna av deformationszoner vid förvarsplatsen i Forsmark. Detta omfattar sen svekokarelsk, plastisk och spröd deformation vid låga temperaturer (stadium 1), sen svekokarelsk spröd deformation (stadium 2), gotisk spröd deformation (stadium 3) och en huvudfas med spröd deformation under den svekonorvegiska bergskedjeveckningen (stadium 4). Bildning av sprickor och sprickzoner under stadium 4 kan inte uteslutas. De olika färgskuggningarna utmed zonerna markerar en antydan till varierande grad av respons (svart är starkast, grått är medelstarkt, ljusgrått svagast) i varje tektoniskt förhållande (figur 5-26 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

reaktion på en förkortning av större partier av jordskorpan i riktning NV-SO till NS under den senare delen av svekokarelska bergskedjeveckningen. Storleken av flera av dessa zoner (t ex Forsmarkzonen, Singözonen och Eckarfjärdszonen) bekräftar att de tillhör huvudgruppen. En annan slutsats är att vissa brant stupande NNV-strukturer har uppkommit under detta stadium av den tektoniska utvecklingen. Förskjutningar längs med branta NV-zoner, såväl som längs med branta ONO- och NNO-zoner, bedöms ha samband med en kompression i en ungefärlig NS-riktning under den senaste delen av den svekokarelska bergskedjeveckningen. Konjugerade samband mellan brant stupande ONO- och NNV-strukturer har samband med en kompression i en ungefärlig NE-SV-riktning och med den senare gotiska tektoniska händelsen (1,7–1,6 Ga). Bedömningen görs att deformationen till följd av kompression utefter de flacka zonerna inträffade under dessa tektoniska episoder. I en sådan

konceptuell modell kan det förväntas att de flacka zonerna både avslutas mot de brant stupande ONO- och NNO-strukturerna och förskjuts av dem. Seismiska reflektionsdata ger visst stöd för båda dessa påståenden. Data visar även att berggrunden i Forsmark har påverkats kraftigt av den svekonorvegiska bergskedjeveckningen (1,1–0,9 Ga).

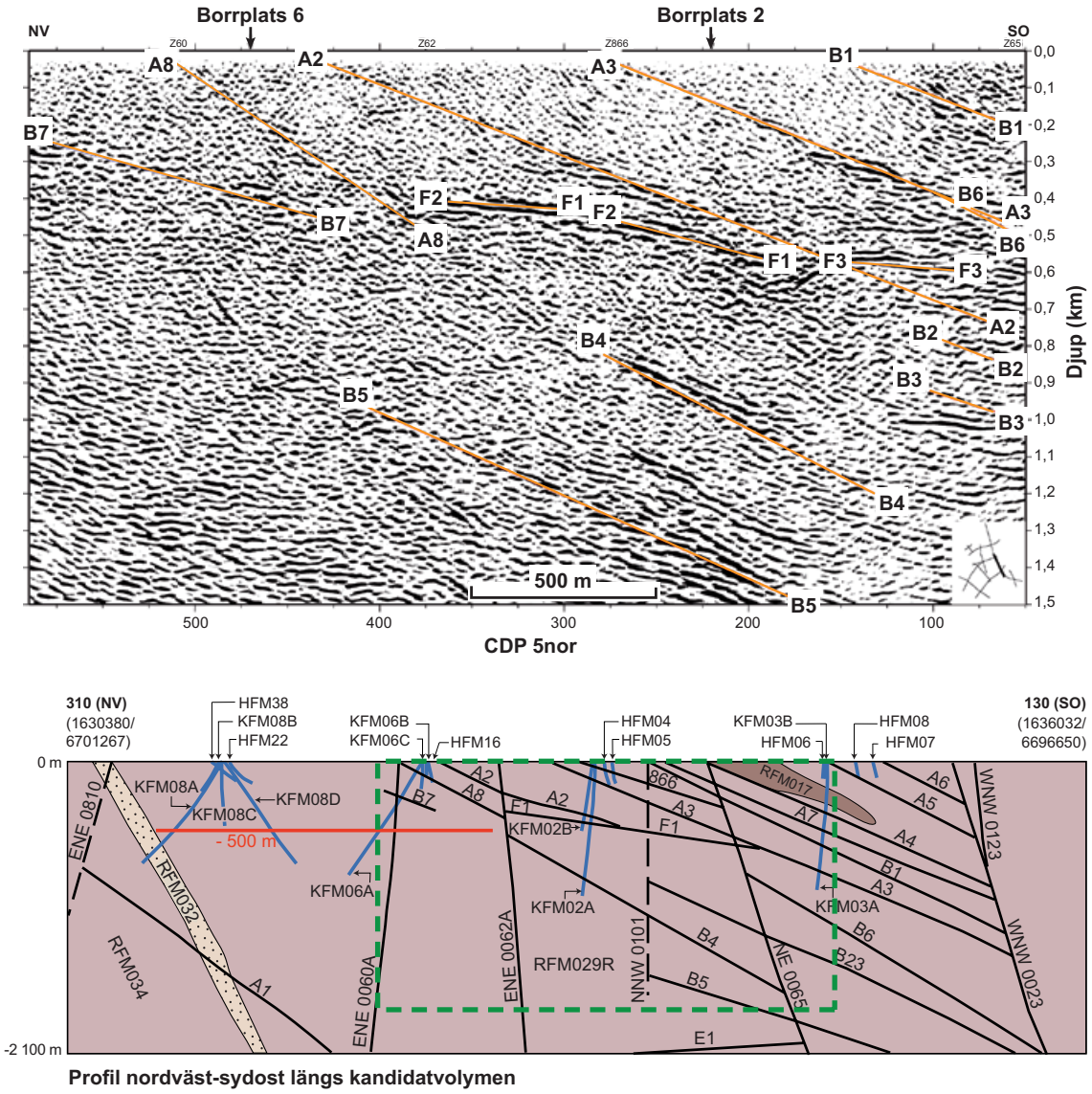
Allt eftersom effekterna av den tektoniska aktiviteten till största delen avtog, fick effekterna av belastning och avlastning vid ytan ökad betydelse. Detta inträffade i samband med avlagringen av sedimentära bergarter och den efterföljande erosionen av dessa bergarter så att den kristallina berggrunden blottlades. I det här avseendet är uppkomsten av sedimentära bassänger under tidsperioden från cirka 1,5 till 1,3 Ga och efter 900 Ma, en nedisningsepisod under den senaste delen av prekambrium kring cirka 650 Ma, utvecklingen av en passiv kontinentalrand under tidig paleozoisk tid och många nedisningar under kvartärperioden samtliga exempel på belastningshändelser under den geologiska utvecklingen av centrala Sverige. Vidare görs även bedömningen att den sedimentära belastningen är en process som, utöver tektoniska händelser, ledde till uppbyggnad av höga bergspänningar i berggrunden. I motsats till detta resulterade avlastning i reaktivering, speciellt av flacka strukturer, i form av uttänjningsbrott och i utvecklingen av kontraktionssprickor. Nya sprickor som är riktade subparallellt med den topografiska ytan vid tiden för avlastning och som saknar tecken på hydrotermal omvandling, så kallade bankningssprickor, kan också ha bildats, se avsnitt 4.10 och figur 4-24. Dessa strukturer uppkom som en reaktion på spänningsfrigörelse i berggrunden. De är mest markanta nära ytan där spänningsskillnaden mellan största och minsta huvudspänningen ($\sigma_1 - \sigma_3$) vid tiden för avlastning var hög, i synnerhet i närheten av äldre flacka zoner.

Den baltiska skölden påverkas för närvarande av två storskaliga deformationsprocesser: plattektonik och landhöjning orsakad av isostatisk återhämtning efter avsmältningen av den senaste fennoskandiska inlandsisen, se **Processrapporten för geosfären**. Den plattektoniska komponenten omfattar också den horisontella spänningsökning i jordskorpan från väster, vilken orsakas av oceanbottenspridning vid mittatlantiska ryggen (ridge push) samt av den spänningsökning på grund av kompressionen som kollisionen mellan den eurasiska och den afrikanska plattan ger upphov till, se även avsnitt 4.5.2.

4.4.2 Deterministiska deformationszoner

I den geologiska modellen ingår strukturer som är 1 000 m eller längre i den deterministiska deformationszonsmodellen, medan strukturer som är kortare än 1 000 m beskrivs i statistiska termer i den geologiska DFN-modellen (modell för diskreta spricknätverk), se avsnitt 4.4.3. Den deterministiska deformationszonsmodellen bygger på en syntes av kunskapen om deformationshistorien i regionen, magnetiska lineament och seismiska reflektionsdata, såväl som sprickdata avseende riktningar, mineralogi och mineralomvandlingar (speciellt från kärnborrhål). De primära ytdata, som ger stöd för förekomsten av brant stupande deformationszoner, utgörs av lågmagnetiska lineament. Dessa har härletts både från högupplösta jordmagnetiska data och från flygdata från helikoptermätningar inom och i omedelbar närhet av det prioriterade området. Seismiska ytreflektionsdata och seismiska data från borrhål (VSP, vertikal seismisk profilering) ger geometriska begränsningar för förekomsten av flacka sprickzoner. Reflektorer som sluttar mot SSO och SO är vanliga i kandidatvolymen. Koncentrationen av dessa är mycket högre i berggrundens övre 2 km i den sydöstra delen jämfört med vad som observeras i den nordvästra delen, dvs i den prioriterade volymen, se figur 4-12. Borrhålsdata visar att flera av de flacka sprickzonerna i den sydöstra delen av kandidatvolymen förekommer längs med (eller nära) kontakten mellan underordnade bergarter – och då i synnerhet amfibolit – och den dominerande bergarten metagranit. Eftersom amfibolitkontakterna följer den tektoniska folieringens riktning, kan de mer frekventa förekomsterna av flacka zoner i den sydöstra delen ha samband med den svagare sydöstliga stupningen av amfiboliten, den tektoniska folieringen och stängligheten i den här delen av kandidatvolymen.

Den lokala modellen, som innehåller den prioriterade volymen, omfattar 60 deterministiskt modellerade deformationszoner. För majoriteten av dessa (> 60 procent) är tilltron till zonernas existens hög, se figur 4-10. Endast två brant stupande zoner med en spårlängd vid markytan på mer än 3 000 m genomkorsar den prioriterade volymen (zon ENE0060A och ENE0062A med sina respektive förgreningar). Ytterligare 22 brant stupande zoner, som antingen uppvisar en spårlängd vid markytan på mellan 1 000 och 3 000 m eller utgör mindre utvidgningar eller anknutna förgreningar till sådana zoner, finns inuti förvarsvolymen på ett djup på 400 till 600 m. Fem flacka zoner, som omfattar zonerna A2 och F1, finns också på ett djup på 400 till 600 m inuti eller omedelbart ovanför förvarsvolymen.



Figur 4-12. *Tilltron till förekomsten av de flacka sprickzonerna förstärks genom en kombination av seismiska reflektionsdata med borrhålsdata. Den övre bilden visar flacka seismiska reflektorer i den sydöstra delen av kandidatvolymen. Den undre bilden visar ett tvärsnitt i riktningen NV-SO genom kandidatvolymen i den strukturella modellen, som visar bergdomäner och deformationszoner. Den övre bildens ungefärliga läge utmärks av gröna streckade linjer i den nedre bilden. Tvärsnitten är inte identiska (figur 11-13 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Den regionala modellen omfattar 72 deterministiskt modellerade deformationszoner, av vilka 29 finns i den lokala modellen. För en mindre andel av zonerna i den regionala modellen (27 stycken) är tilltron till deras existens hög. De resterande zonerna saknar bekräftade geologiska och geofysiska data från borrhål eller utgrävningar. Tilltron till deras existens är därför lägre. Liksom i den lokala modellen dominerar vertikala och brant stupande deformationszoner (48 stycken) jämfört med flacka zoner (24 stycken). Det finns emellertid ett inneboende systematiskt fel vid utvärderingen av förekomsten av flacka zoner, eftersom reflektionsseismiska data saknas för nordöstra halvan av den regionala modellvolymen.

Tilltro

Tilltron till förekomsten av deterministiska deformationszoner i den prioriterade volymen är hög, och förekomsten av oupptäckta deformationszoner som är längre än 3 000 m bedöms vara osannolik. Förutsägbarheten för förekomsten och karaktären av olika grupper eller undergrupper av deformations-

zoner är relaterad till den storskaliga anisotropin i berggrunden som uppstod för över 1,85 miljarder år sedan, när berggrunden låg på medelstora djup i jordskorpan och påverkades av genomträngande plastisk deformation under metamorfiska betingelser vid höga temperaturer.

Den viktigaste kvarvarande osäkerheten i den deterministiska deformationszonsmodellen rör storleken av de flacka sprickzonerna. Emellertid görs bedömningen att denna osäkerhet är tillräckligt avgränsad, eftersom tillvägagångssättet för att i modellen bestämma var dessa zoner slutar har varit att sträcka ut dem till närmaste brant stupande zon. Dessutom är den här osäkerheten inte av grundläggande betydelse för den konceptuella förståelsen av platsen. En annan kvarvarande osäkerhet rör riktningen och storleken av de möjliga deformationszoner som inte har modellerats deterministiskt. Eftersom det inte har varit möjligt att koppla dessa geologiska särdrag till lågmagnetiska lineament eller seismiska reflektorer och eftersom de vanligtvis förekommer utefter korta borrhålsintervall, görs bedömningen att de huvudsakligen utgörs av mindre zoner.

4.4.3 Sprickdomäner, sprickor och DFN-modeller

Analyser av sprickdata har antytt att den rumsliga variationen i sprickors storlek, antal och egenskaper är stor mellan olika bergdomäner, och även inom bergdomän RFM029. Berggrunden mellan de deterministiskt modellerade deformationszonerna har delats in i sprickdomäner med utgångspunkt från en systematisk utvärdering av variationen i sprickfrekvensen med djupet längs varje borrhål. Således är sprickdomäner och deterministiskt modellerade deformationszoner ömsesidigt uteslutande volymer, medan bergdomäner innehåller både och.

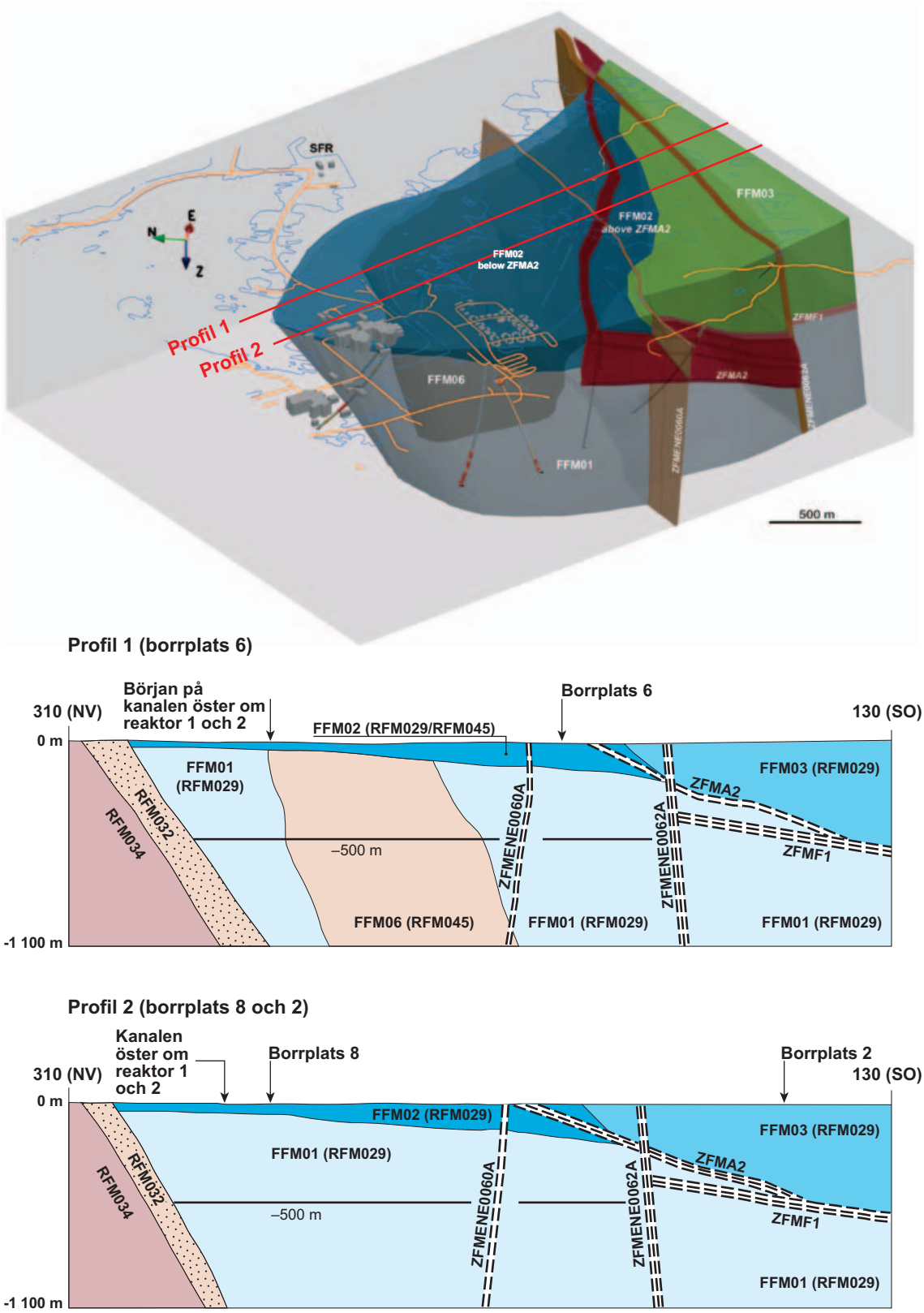
Sprickdomäner

Sprickdomän FFM01 utgör berggrunden på djupet i den prioriterade volymen, nordväst om och i liggväggen till den flacka zonen A2, se figur 4-13. Denna sprickdomän utgör huvuddelen i bergdomän RFM029. Sprickdomän FFM02 omfattar berggrunden nära ytan, ovanför sprickdomän FFM01 och främst i samma berggrundssegment av liggväggen. Sprickdomän FFM02 ligger i båda bergdomänerna RFM029 och RFM045. Berggrunden i FFM01 uppvisar låg frekvens av öppna och delvis öppna sprickor, medan berggrunden i FFM02 kännetecknas av ett komplext nätverk av subhorisontella eller flacka, öppna och delvis öppna sprickor, vilka lokalt koncentreras till mindre zoner. De subhorisontella eller flacka sprickorna är riktade i stor vinkel mot den nuvarande minsta (vertikala) huvudspänningen i berggrunden. Bergvolymen sydost om målvolymen, i hängväggen till zon A2, definieras som sprickdomän FFM03. Den är belägen i bergdomänerna RFM029 och RFM017. Öppna och delvis öppna sprickor i den här domänen är mer jämnt fördelade från ytan ner till ett djup på 1 000 m jämfört med berget nordväst om zon A2. Domänen är rumsligt förknippad med hög frekvens av flacka sprickzoner, som innehåller både öppna och läkta sprickor. En fjärde sprickdomän, FFM06, har definierats i den prioriterade volymen. Analogt med sprickdomän FFM01 ligger den i liggväggen till zon A2 och under FFM02. Den utgör huvuddelen i bergdomän RFM045. Den skiljer sig från FFM01 enbart genom den vitt spridda förekomsten av finkornigt, omvandlat (albitiserat) granitiskt berg, med en något högre halt av kvarts jämfört med det granitiska berg som inte utsatts för omvandling.

Borrhålsdata har visat att riktningen och mineralogin hos sprickor inuti sprickdomänerna FFM01 och FFM06, såväl som i FFM03, liknar de som finns i de närliggande sprickzonerna. Dock gäller inte den här korrelationen i domän FFM02, där det finns ett betydande bidrag från subhorisontella och flacka sprickor, men relativt få flacka zoner. Av detta kan slutsatsen dras att tektoniska processer under regionens geologiska historia har reglerat sprickbildningen på djupet i sprickdomänerna FFM01 och FFM06, medan sprickbildningen i berggrunden nära ytan i sprickdomän FFM02 har uppkommit genom en kombination av tektoniska processer och processer relaterade till spänningsfrigörelse.

Modeller med diskreta spricknätverk

Sprickor och mindre sprickzoner, som inte täcks in av deformationszonsmodellen, hanteras statistiskt med modeller för diskreta spricknätverk (DFN-modeller). Den geologiska DFN-modellen täcker in alla sprickor (öppna, delvis öppna och läkta), eftersom de läkta sprickorna också antas vara potentiella svaghetsplan och möjligen skulle kunna vara plan där det finns flödeskanaler. Dock kan många av de läkta sprickorna mekaniskt och hydrogeologiskt inte särskiljas från det intakta berget.



Figur 4-13. *Vy åt ONO (överst) och vertikalprofiler i riktning NV-SO (mitten och underst) som visar sprickdomänerna och deras förhållande till de flacka deformationszonerna ZFMA2 och ZFMF1 samt de brant stupande zonerna ZFMENE0060A och ZFMENE0062A som är längre än 3 000 m (figur 11-14 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Modellen presenteras som en matematisk beskrivning av sprickor och sprickzoner kortare än 1 km, inte som en modell eller realisering av 3D-objekt. Därmed kan de framtagna modellparametrarna användas för att stokastiskt modellera dessa sprickor vid olika tillämpningar.

DFN-modeller tas fram för varje sprickdomän i den prioriterade volymen, dvs sprickdomänerna FFM01, FFM02 och FFM06, och även för sprickdomän FFM03. Modellerna är baserade på data avseende sprickspårlängd som observerats på berghällar (hos berg i dagen), data framtagna från tolkningen av magnetiska lineament, data framtagna från längderna av mittplansintercepten hos de deterministiska deformationszonerna och data för sprickfrekvenser från borrhål. Inverkan av olika geologiska processer på djupet jämfört med nära ytan gör det svårt att tillämpa geologiska DFN-modeller som bygger på samband mellan storlek och intensitet och som dessutom är baserade på ytdata, på de två sprickdomänerna på förvarsdjup – FFM01 och FFM06 som inte har berg i dagen. Det finns också osäkerheter rörande huruvida de sprickor som representeras av deformationszoner och magnetiska lineament utgör delar av samma population sprickor som representeras av sprickor i berghällar eller som mäts i borrhål. Dessa svårigheter hanteras med hjälp av alternativa modeller för sambandet mellan storlek och intensitet för sprickfördelningen. Detaljer om dessa alternativa modeller och deras respektive osäkerheter beskrivs i avsnitt 6.3 i **Datarapporten**.

Tilltro

Det råder hög tilltro till att berget utanför de deterministiska deformationszonerna inom den prioriterade volymen uppvisar olika karaktär avseende sprickförekomst. Följaktligen råder även hög tilltro till att berggrunden är indelad i en mer uppsprucken ytnära volym (sprickdomän FFM02) ovanför mindre uppspruckna bergvolymer (sprickdomänerna FFM01 och FFM06). Indelningen stöds även av hydrogeologiska och hydrogeokemiska data, se avsnitten 4.6 och 4.8, även om läget för gränsytan mellan FFM02 och sprickdomänerna nedanför fortfarande är förenat med osäkerhet. Den viktigaste kvarvarande osäkerheten rör dock DFN-modellen för simulering av förhållandet mellan storlek och intensitet för sprickor i den potentiella förvarsvolymen, dvs sprickdomänerna FFM01 och FFM06. Huvudanledningen till detta är att det saknas data om sprickstorlekar i dessa underjordiska domäner. Direkta data om sprickstorlekar i dessa domäner kan endast fås från underjordisk kartering, dvs när förvarsbygget nått aktuellt djup. Den här osäkerheten har, liksom frågan om tektonisk kontinuitet, hanterats i olika storleksskalor med hjälp av alternativa DFN-modeller. Dessa alternativ täcker in ett brett intervall och det bedöms att osäkerheterna täcks in av alternativen.

4.4.4 Sprickmineralogi

Noggranna studier av sprickmineralogi och sidobergsförändring har gett information om sprickmineralernas karaktär och frekvens i Forsmark. Kalcit och klorit, delvis kopplade till korrensit, är de utan jämförelse vanligaste mineralerna. Andra vanliga mineraler är laumontit, adular, kvarts, albit och hematit, medan prehnit, pyrit, lermineraler och epidot inte är lika vanliga. Det finns även sällsynta förekomster av exempelvis asfaltit och götit.

De äldre generationerna av mineraler – omfattande epidot, som bildades före 1,1 Ga, och adular, som bildades kring 1,1 Ga eller är äldre – uppvisar inget djupberoende. På liknande sätt uppvisar den sidobergsomvandling som är knuten till dessa mineralgenerationer, och som benämns oxidation, inte heller något djupberoende. Egenskaperna stämmer överens med slutsatsen att dessa mineral och den åtföljande omvandlingen uppkom för länge sedan, när den här delen av berggrunden låg på betydligt större djup. Det yngre mineralet asfaltit, som sannolikt bildades för mellan cirka 500 och 250 miljoner år sedan, förekommer nästan uteslutande i den övre delen av berggrunden längs öppna sprickor. Detta är också fallet för lermineraler och götit som hör till de yngsta mineralerna, förutom vissa förekomster på större djup längs med sprickor i zoner. Eftersom den nuvarande berggrundsytan mer eller mindre är samma yta som det subkambriska peneplanet, tyder den här djupfördelningen av sprickmineraler på att den ytnära berggrunden, dvs den som omfattar sprickdomän FFM02 i den prioriterade volymen, har påverkats av ytnära processer som kan vara relaterade till belastnings- och avlastningscykler under de senaste cirka 500 miljoner åren.

I vissa av sprickbeläggningarna finns uranrika faser. Endast ett litet korn av pechblände har emellertid än så länge detekterats i en sprickbeläggning i en av de deterministiskt modellerade flacka sprickzonerna (ZFMB1) som ligger utanför den prioriterade volymen. Ursprunget för dessa uranrika faser är till stor del okänt, men det går att dra slutsatsen att uran har cirkulerat i spricksystemet under olika perioder under platsens geologiska historia. Det finns också bevis för oregelbunden omfördelning och avlagring av uran längs med permeabla strukturer under Proterozoikum, se avsnitt 4.8.

Sprickor utan mineralbeläggning eller fyllning har observerats i den ytnära delen av berggrunden, men finns även på större djup. Dessa sprickors betydelse och ursprung har varit huvudintresset för en speciell studie /Claesson Liljedahl et al. 2010/. En delmängd sprickor från olika djup och bergdomäner, och som ligger utanför deformationszoner, valdes ut för en mer detaljerad undersökning. Studien visade att huvuddelen av de undersökta sprickorna innehåller sprickmineraler, men att sprickor utan mineraler (5,7 procent av de undersökta sprickorna) finns i berggrunden ovanför 300 meters djup. De flesta av dessa sprickor utan mineraler har registrerats som vattenförande och är även subparallella med närliggande sprickor. Vissa av dessa närliggande sprickor är öppna, men de är mycket små och de är ofta inte förbundna hela vägen genom borrkärnan, varför borrkärnan förblivit obruten.

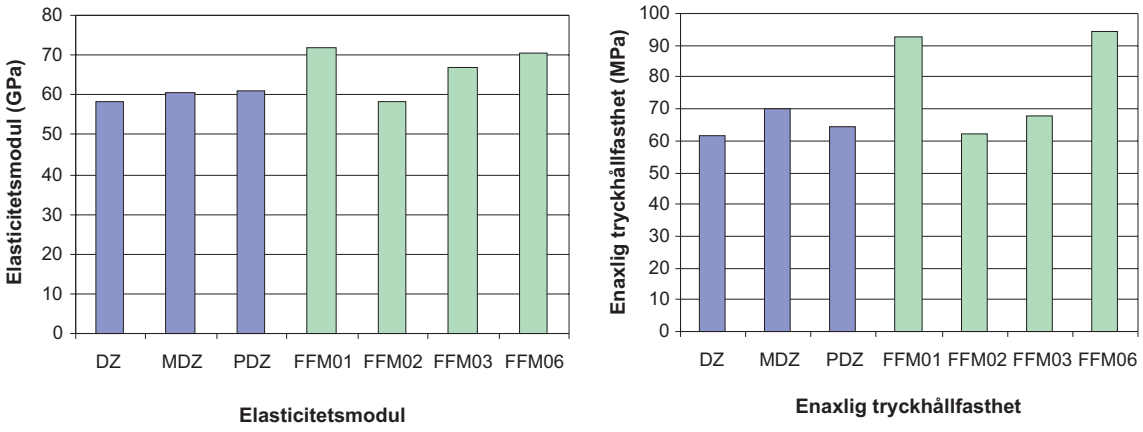
För närvarande finns ingen process identifierad som otvetydigt kan förklara uppkomsten av dessa sprickor utan mineraler. En hypotes är att de bildades under spricköppning eller att de representerar delar av sprickytor som öppnats upp nyligen. Tillräckligt med tid skulle därför inte ha förflutit för att mineralutfällning ska ha hunnit ske på sprickytan. En annan möjlighet är att sprickorna utan mineral representerar fronter av större sprickytor, där mineralutfällning kan ha förhindrats genom ett mycket litet flöde av mättade lösningar längs med de perifera delarna av sprickorna. Det är inte möjligt att bestämma när dessa sprickor uppkommit. Men med hänsyn till att vissa av sprickproven med liknande karakteristiska mycket små sprickor innehåller hydroxyapofyllit, vilket är typiskt för paleozoiska sprickmineraler ur generation 3 /Sandström et al. 2008, 2009/, är det möjligt att sprickorna utan sprickmineral representerar reaktivering av paleozoiska sprickor. Med tanke på det opåverkade utseendet och avsaknaden av sprickmineraler, är det osannolikt att dessa sprickor varit vattenförande under de betydelsefulla episoderna med vätskemigration i området, vilka orsakade riklig utfällning av sprickmineraler. Därför har dessa sprickor med all sannolikhet inte öppnats tidigare än 277 Ma. Mot bakgrund av den subhorisontala riktningen hos de identifierade sprickorna är det troligt att de har reaktiverats under nednötning i samband med sedimenterosion och/eller landhöjning.

4.4.5 Mekaniska egenskaper hos deformationszoner och sprickor

En utvärdering av resultaten från laboratorietester av de mekaniska egenskaperna hos sprickor har visat att deformerbarheten och hållfasthetsegenskaperna hos öppna diskreta sprickor är liknande för olika sprickgrupper. Dessutom är egenskaperna för öppna sprickor i sprickdomän FFM01 och i deformationszoner ganska lika. Empiriska och numeriska analyser av data visar att deformationsmodulen och hållfasthetsegenskaperna hos bergmassan (inklusive sprickor) i sprickdomänerna FFM01 och FFM06 är nästan lika och representativa för ett styvt och starkt berg, se figur 4-14.

Tilltro

Tilltron till de framtagna mekaniska egenskaperna för bergmassan är i allmänhet stor på grund av den stora mängden data som ger stöd för modellen och de små förändringarna av resultaten när nya data tillkommit under de olika modelleringsstegen. Dessutom stämmer resultaten överens med kunskapen om de geologiska förhållandena på platsen. Den största kvarvarande osäkerheten rör sprickornas storskaliga mekaniska egenskaper, eftersom modellen är baserad på testresultat från små prov.



Figur 4-14. *Medelvärden av deformationsmodul och hållfasthetsegenskaper hos bergmassan i sprickdomäner och deformationszoner enligt utvärdering med en empirisk metod (figur 11-16 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****). DZ = deformationszon, MDZ = mindre deformationszon (kortare än 1 000 m), PDZ = möjlig deformationszon.*

4.5 Bergspänning

4.5.1 Spänningsutveckling

Spänningsutvecklingen är starkt relaterad till platsens deformationshistoria. Enligt den konceptuella kunskapen, se avsnitt 4.4, hade de olika grupperna och undergrupperna av deformationszoner på platsen bildats och redan reaktiverats för mer än 900 miljoner år sedan som en reaktion på spänningsförhållanden som påverkats av olika tektoniska händelser utefter en aktiv kontinentalrand. Detta – i kombination med belastnings- och avlastningscykler som har samband med avlagringen och nednötningen av sedimentära bergarter samt med nedisning och isavsmältning – har med all sannolikhet spelat en betydelsefull roll vid utvecklingen av spänningen i Forsmarkområdets berggrund, och då särskilt i berget inom den prioriterade volymen.

Berggrundens karaktär i närheten av ytan i den prioriterade volymen, FFM02, har samband med avlastningen av berget och frigörelsen av spänningar *in situ.* Reaktivering av gamla sprickor – och även bildning av nya sprickor (bankningssprickor) under kvartärperioden – kan tydligt iakttas, åtminstone nära ytan. Berget i den sydöstra delen av kandidatområdet, FFM03, har en hög täthet av flacka sprickzoner som innehåller både öppna och igensatta sprickor. Dessa strukturella särdrag är förenliga med en allmänt spänningsavlastad region.

4.5.2 Spänningsmodell

Bedömningen av spänningstillståndet *in situ* i Forsmark baseras på både direkta mätningar och indirekta observationer. Data från direkta mätningar genom överborrning, hydraulisk spräckning och hydrauliska tester av redan existerande sprickor finns att tillgå för ett antal borrhål i sprickdomänerna FFM01, FFM02 och FFM03. Indirekta observationer från borrhål i samma sprickdomäner omfattar observationer av om borrkärnorna spricker upp i skivor (core disking) och bergutfall från borrhålsväggar. Dessa observationer omfattar en sammanlagd borrhålslängd på cirka 10 km ner till djup av 1 000 m. Dessutom användes uppskattningar av mikrosprickporositet i prover från borrhål som indirekta indikatorer vid spänningsutvärderingen. Både direkta mätningar och indirekta observationer tyder på att riktningen för den största horisontalspänningen generellt ligger i intervallet N120° till 150°. Denna huvudspänningsriktning överensstämmer med den riktning för regional kompression som härletts från seismiska studier. Riktningen stämmer även med den allmänna trenden i nordvästra Europa, och har uppstått på grund av spridningen vid mittatlantiska ryggen.

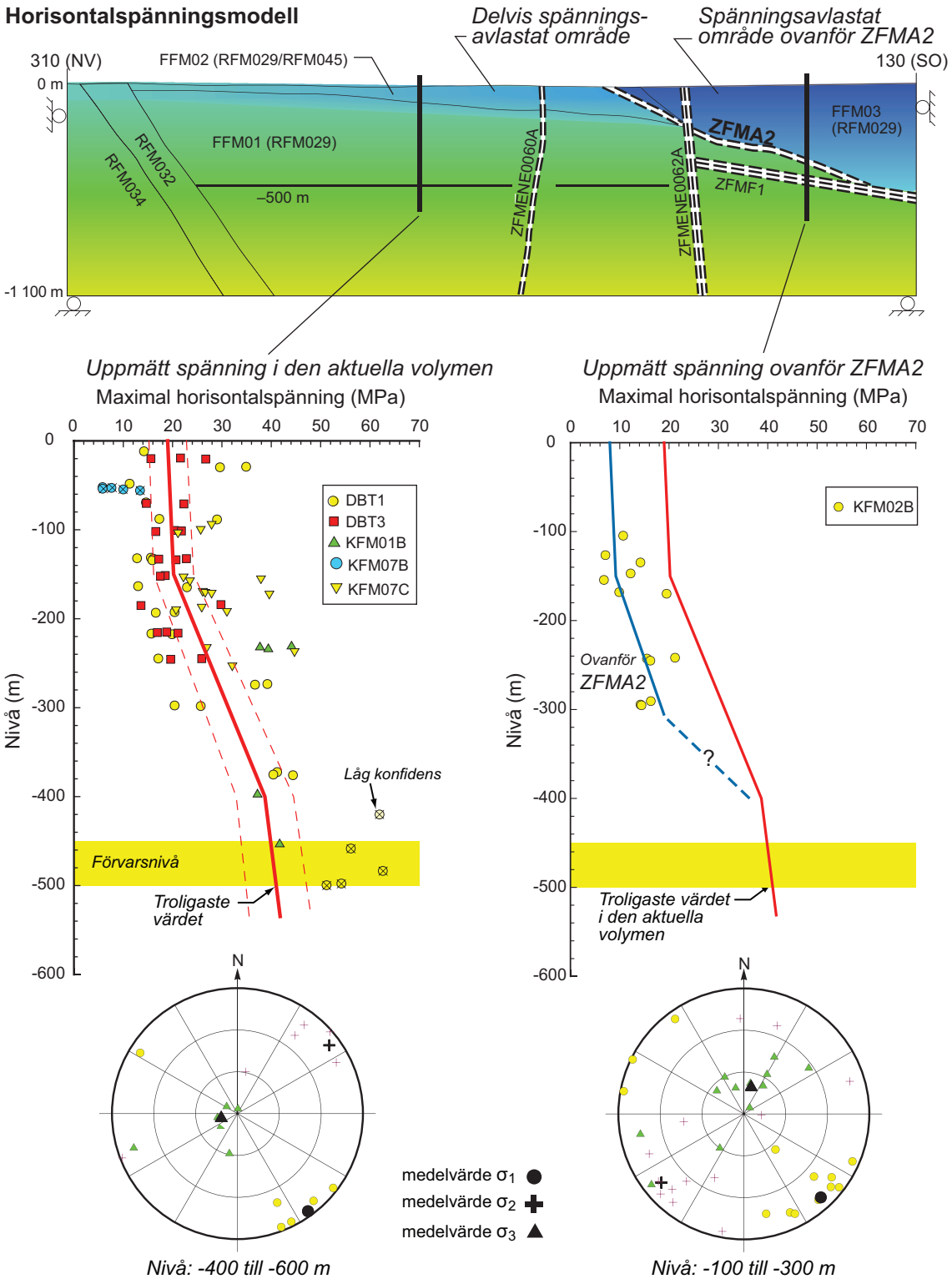
Spänningsmodellen för den prioriterade volymen, se figur 4-15, har utvecklats utgående från data från överborrningsmätningar och utvärderingar av indirekta observationer, kombinerat med kunskapen om de geologiska förhållandena på platsen och en utvärdering av andra externa faktorer som påverkar, såsom topografi, landhöjning och jordskorpans tjocklek. Enligt tillgängliga data och med stöd av

observationer från regionala seismiska studier samt kunskapen om deformationshistorien på platsen är storleken på både de största och minsta horisontalspänningarna större än vertikalspänningen. Ökningen av horisontalspänningarnas storlek med djupet i sprickdomän FFM01 ser ut att korrelera med minskningen av frekvensen av öppna sprickor med djupet och med en motsvarande ökning av bergmassans styvhet. Spänningsmodellen ger de mest sannolika värdena på horisontalspänningarna på ett djup av 500 m i sprickdomän FFM01 i den prioriterade volymen. Dessa uppgår till cirka 41 MPa för den största horisontalspänningen och till cirka 23 MPa för den minsta horisontalspänningen. Den uppskattade vertikalspänningen på det här djupet i sprickdomän FFM01 är cirka 13 MPa. Inga spänningsmätningar har utförts i FFM06. Spänningstillståndet *in situ* förväntas emellertid vara liknande det i FFM01, eftersom den består av en bergmassa med liknande styvhetsegenskaper och ligger bredvid FFM01, nedanför den flacka deformationszonen A2.

Utgående från resultat från numerisk modellering dras slutsatsen att de brant stupande deformationszonerna i den prioriterade volymen endast ger upphov till små störningar i spänningsfältet. Effekten av de flacka zonerna A2 och F1 är mer uttalade med betydligt högre spänningsnivåer under zonerna jämfört med spänningarna ovanför dem. Resultaten visar dessutom att spänningsavlastningen i hängväggen har nått djupare nivåer sydöst om zon A2 jämfört med spänningarna nedanför och nordväst om zonen, dvs i den prioriterade volymen, se figur 4-15. Stöd för detta ges av resultat från överborrningsmätningar som uppvisar en ungefär 50 procent lägre genomsnittlig storlek på horisontalspänningen i berget ovanför zon A2 (sprickdomän FFM03) jämfört med de nivåer som uppmätts på motsvarande djup i den prioriterade volymen. Dessutom stämmer dessa observationer överens med tolkningen att förekomsten av flacka zoner gynnar spänningsavlastning i den sydöstra delen av kandidatvolymen.

Tilltro

På grund av de samstämmiga resultaten från olika mätmetoder och indirekta observationer råder hög tilltro till bergspänningarnas riktningar. De stämmer även överens med regionala seismiska studier. Likaså råder hög tilltro till vertikalspänningens storlek, eftersom uppmätta värden och teoretiska värden baserade på vikten av det överliggande berget stämmer överens. Osäkerheter kvarstår för horisontalspänningarnas storlekar på förvarsdjup. Emellertid användes en lösning med övre gräns för att gränssätta dessa spänningsnivåer. Härigenom bedöms osäkerheten vara tillräckligt väl gränssatt.



Figur 4-15. *Jämförelse av de uppmätta största horisontalspänningsnivåerna i den prioriterade volymen med dem som uppmätts ovanför den flacka deformationszonen A2 (mittbilderna). Lutningsändringen i den prioriterade volymen på ett djup av cirka 150 m motsvarar ungefär gränsytan mellan sprickdomänerna FFM02 och FFM01. Fördelningen av största horisontalspänningar från numerisk modellering illustreras också (övre bilden), där de blå färgtonerna representerar minskade spänningsnivåer till följd av spänningsfrigörelse ovanför zon A2 och i sprickdomän FFM02 jämfört med de ”normala” gröntonade spänningsnivåerna. Orienteringen för de uppmätta huvudspänningarna visas i två lägre hemisfäriska stereografiska projektioner (nedre bilderna). Huvudspänningarna uppvisar generellt överensstämmande riktningar oberoende av djup och rumsligt läge (figur 11-18 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

4.6 Hydrauliska egenskaper i berggrunden

4.6.1 Utveckling

Geologiska data för platsen och dateringen av sprickmineraler antyder att en stor andel (cirka 75 procent) av sprickorna är läkta och att huvuddelen av sprickorna är äldre strukturer, speciellt i de djupare delarna av berggrunden i den prioriterade volymen, dvs sprickdomänerna FFM01 och FFM06. Kalcit förekommer i den yngsta generationens sprickor och deformationszoner, vilka för närvarande är vattenförande. Kalciten kan ha fällts ut under lång tid och även i nutid. Baserat på dessa observationer och indikationer är det konceptuellt tilltalande att tänka sig att de hydrauliska egenskaperna för sprickor kan korreleras med såväl den historiska spröda deformation som skapade och reaktiverade sprickorna, som med bildningen av sprickmineraler under olika historiska perioder. Å andra sidan tyder en analys av transmissivitetsdata som funktion av normalspänning endast på en svag korrelation, om ens någon. Högst sannolikt överskuggar de processer som inträffade under de senaste 1,85 miljarder åren ett uppenbart samband med det nutida spänningsfält som funnits under de senaste cirka 12 miljoner åren. Trots att dessa faktorer beaktas kan korrelationsfrågan vara skalberoende.

4.6.2 Hydrauliska egenskaper hos deformationszoner och sprickdomäner

Deterministiskt modellerade deformationszoner

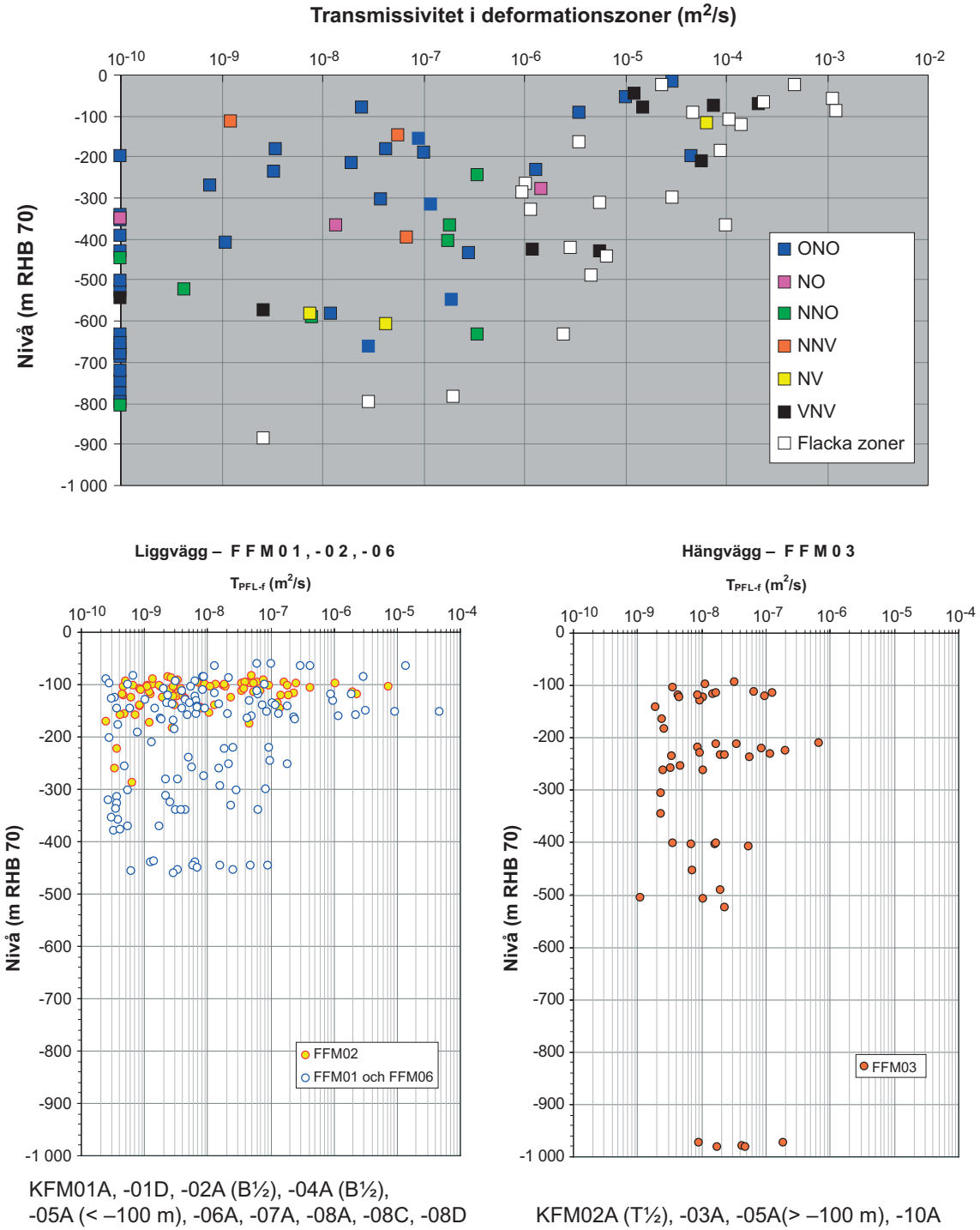
Detaljerad information om läget för deterministiskt modellerade deformationszoner och potentiellt vattenförande sprickor mellan deformationszoner, kombinerad med resultat från högupplösta inflödesmätningar i 22 kärnborrhål och pumptester i 32 hammarborrhål, ger grunden för att bestämma de hydrauliska egenskaperna hos deformationszoner och sprickdomäner i Forsmark. Dessa data begränsar lägena för hydrauliskt förbundna sprickor med hög säkerhet och värden för den sammanvägda transmissiviteten för de hydrauliskt förbundna sprickorna ned till ca 10^{-9} m^2/s. Resultat från injektionstester i enstaka hål och interferenstester i flera hål kompletterar databasen.

Analyser av hydrauliska data har visat att alla deterministiskt modellerade deformationszoner kännetecknas av en betydande minskning i transmissivitet med djupet, oberoende av zonernas orientering. Kontrasten inom berggrundens översta 1000 m är cirka 20 000 gånger, se figur 4-16, övre bilden. Den laterala heterogeniteten är också betydande för varje djup, men mer oregelbunden, vilket tyder på ett kanaliserat flödesfält inom deformationszonsplanen. Dessutom visar data att de flacka deformationszonerna, som företrädesvis förekommer i den sydöstra delen av kandidatområdet, är de mest transmissiva på varje djup, se figur 4-16, övre bilden. De brant stupande deformationszonerna, som går mot västnordväst och nordväst och gränsar mot kandidatområdet, bildar strukturer med en andra ordningens betydelse när det rör sig om transmissivitet. Dessa observationer ger stöd för hypotesen att det råder en uttalad hydraulisk anisotropi i regional skala. De högsta transmissivitetsvärden som observerats är kopplade till deformationszoner som är riktade i stor vinkel mot den minsta huvudspänningen respektive subparallellt mot den största horisontalspänningen.

Modellen tar hänsyn till både den observerade vertikala och laterala heterogeniteten i zonernas transmissivitet. En exponentiell minskning i transmissivitet med ökat djup bestäms utifrån djupberoende hos data. Den laterala heterogeniteten för transmissiviteten representeras statistiskt som en lognormalfördelning på varje djup, baserat på variabiliteten hos observerade data. Detta kvantifieras ytterligare i avsnitt 6.6 i **Datarapporten**.

Sprickdomäner

Den hydrauliska karakteriseringen av berget mellan deformationszonerna ger stöd för uppdelningen av berggrunden i olika sprickdomäner. Därtill ger de hydrauliska värdena stöd för att sprickdomän FFM01, belägen på djupet i den prioriterade volymens berggrund, bör delas in i ytterligare tre djupintervall, se undre vänstra bilden i figur 4-16. Under ett djup av 400 m finns mycket få vattenförande sprickor. Dessa är huvudsakligen subhorisontella med ett medelavstånd från varandra av cirka 200 m. Det bör dock påpekas att frekvensen av vattenförande sprickor under 400 meters djup är så låg att definitionen av ett medelavstånd är högst teoretisk. I djupintervallet 200 till 400 m är frekvensen av vattenförande sprickor något högre och betydligt högre ovanför ett djup av 200 m, inte minst av sprickor med hög transmissivitet. I FFM03 finns det betydligt färre borrhål än vad som krävs för att underbygga en analys av hydrauliska subdomäner. Som visas i figur 4-16 (nedre högra bilden) finns det emellertid även ett visst djupberoende i den här domänen.



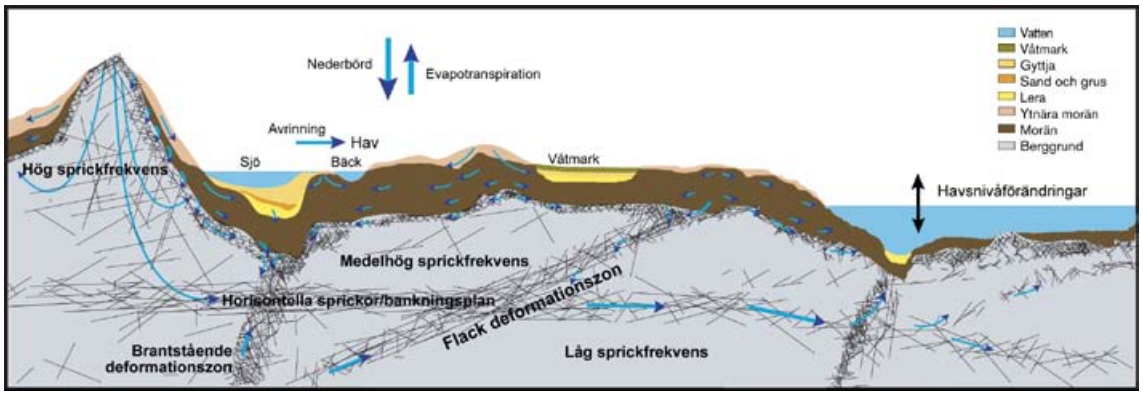
Figur 4-16. *Överst: Härledda transmissivitetsvärden för deformationszoner i relation till djup och riktning (G = flacka zoner). Underst: Härledda transmissivitetsvärden för konnekterade öppna sprickor i relation till djupet i FFM01, FFM02 (vänster) och FFM03 (höger) (figur 11-19 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****). Observera att den undre vänstra bilden innehåller data från tio borrhål medan den undre högra bilden innehåller data från endast fyra borrhål (B½ = undre halvan av borrhålet, T½ = övre halvan av borrhålet).*

De geometriska och hydrauliska egenskaperna hos sprickor i berget mellan de deterministiskt modellerade deformationszonerna representeras av DFN-modeller, som kalibrerats mot sprickfrekvensdata och hydrauliska borrhålsdata. Kalibreringen har gjorts för sprickdomänerna FFM01, FFM02 och FFM03. Sprickdomän FFM06 bedöms ha samma egenskaper som sprickdomän FFM01. Indelningen i hydrauliska subdomäner tar hänsyn till variationen i frekvens och storlek av öppna sprickor som funktion av djupet inom sprickdomän FFM01. Osäkerheter i det hydrauliskt konnekterade spricknätverkets transmissivitet hanteras genom alternativa antaganden rörande de möjliga förhållandena mellan sprickornas transmissivitet och storlek (korrelerat, semikorrelerat och okorrelerat), se avsnitt 8.5.2 i **Platsbeskrivning Forsmark** för detaljerad information. Även om det är svårt att fastställa vilka av dessa modeller som bäst kan återspegla verkligheten så producerar alla tre modellerna liknande transmissivitetsintervall för sprickor med en storlek från 10 till 100 m. Av det skälet är det sannolikt att alla tre modellerna uppvisar liknande flödeskarakteristik. De hydrauliska DFN-modellerna och deras respektive osäkerheter kvantifieras och behandlas mer utförligt i avsnitt 6.6 i **Datarapporten**.

Översta delen av berggrunden

Det finns tre belägg för ett väl konnekterat nätverk av högtransmissiva strukturer i berggrundens översta cirka 150 m i den prioriterade volymen där sprickdomän FFM02 ligger: 1) exceptionellt högt vattenutbyte i hammarborrhålen, se figur 4-17, 2) de nästan likvärdiga grundvattennivåerna i den översta delen av berggrunden och 3) den omfattande och snabba överföringen av förändringar i vattentryck under de storskaliga interferenstester som genomförts i den prioriterade volymen. Slutsatsen är att dessa strukturer utgör stora subhorisontella sprickor, så kallade bankningssprickor, som konstaterats nära ytan, se figur 4-24. Nätverket av strukturer kortsluter tillrinningen ovanifrån såväl som avrinningen underifrån. Detta konceptualiseras hydrogeologiskt som en grund, anisotrop berggrundsakvifer ovanpå ett mäktigare berggrundssegment med akvitardliknande egenskaper, se figur 4-18. Med utgångspunkt från de höga transmissivitetsvärdena antas det att den laterala utsträckningen av berggrundsakviferen ungefärligen motsvarar den laterala utsträckningen av sprickdomän FFM02. Hydrogeologiska data tyder dock på att detta nätverk av strukturer förmodligen sträcker sig åt nordost så långt som till Singözonen.

Figur 4-17. *Två avgörande egenskaper hos berggrunden i det prioriterade området i Forsmark. Vänster: Högt vattenutbyte observeras ofta i berggrundens översta cirka 150 m. Höger: Det stora antalet hela borrkärnor samlade på djupet ger stöd för observationen av få testsektioner med vattenflöde i den djupare berggrunden (figur 8-51 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*



Figur 4-18. *Genomskärningsskiss som åskådliggör teorin för en grund berggrundsakvifer och dess tänkta påverkan på grundvattnets flödessystemet i den allra översta berggrunden inom det prioriterade området. Den grunda berggrundsakviferen är troligen hydrauliskt heterogen, men på många platser har den visat sig vara anisotrop, vilket leder till kortslutning av tillrinningen ovanifrån. Den grunda berggrundsakviferen uppfattas som en viktig avrinningshorisont för grundvattenflödet i deformationszoner som skär markytan. P = nederbörd, E = evapotranspiration, R = avrinning (figur 3-21 i /Follin et al. 2007/).*

Tilltro

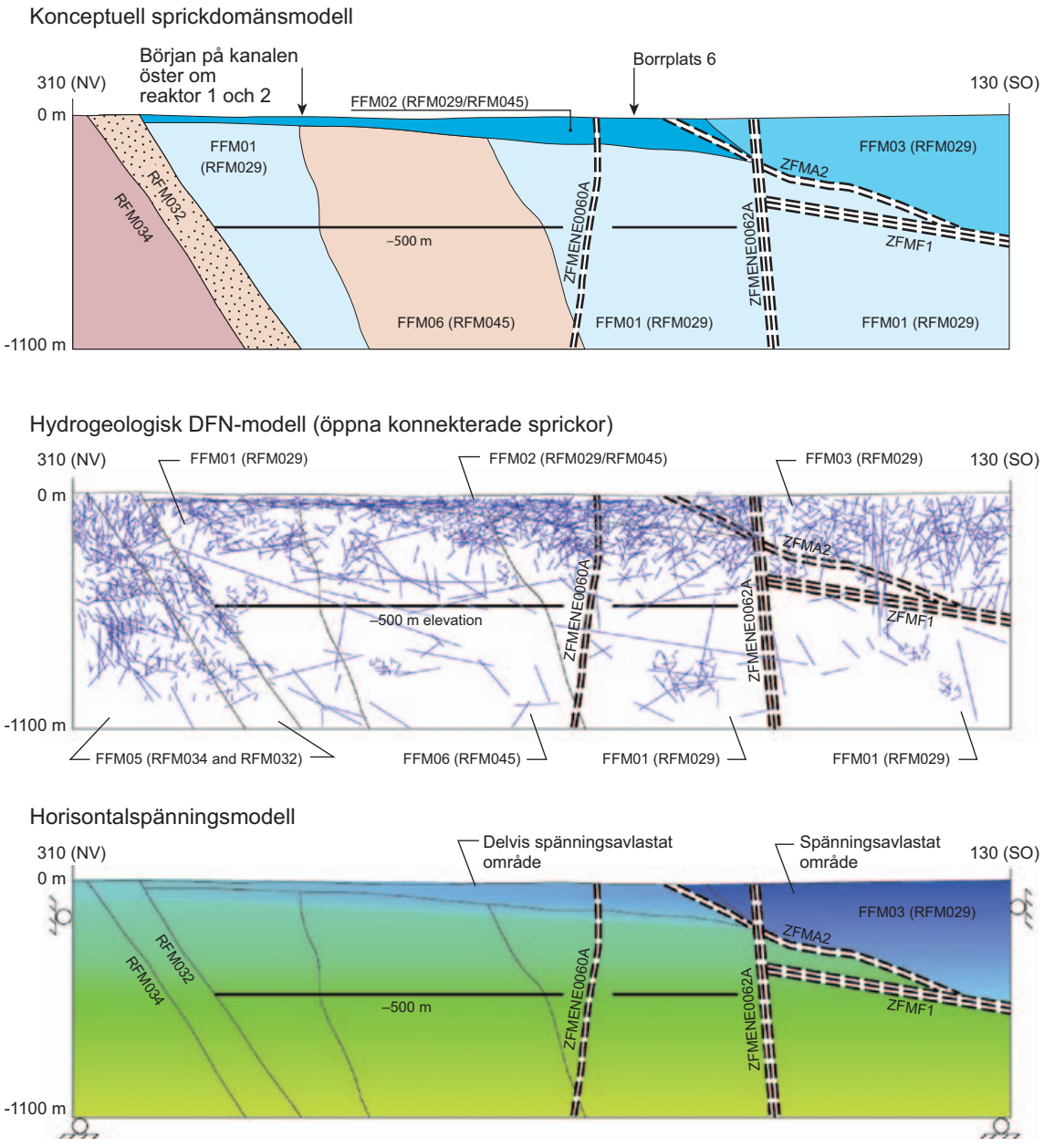
I allmänhet råder hög tilltro till platsens hydrogeologiska berggrundsmodell och bestämningen av de hydrauliska egenskaperna. Den främsta anledningen till detta är överensstämmelsen mellan olika typer av hydrauliska data, vilka alla ger stöd för att det finns anisotropa hydrogeologiska förhållanden i området. Dessa förhållanden är: 1) hög transmissivitet i de flacka sprickzonerna utanför den prioriterade volymen, 2) få konduktiva sprickor på djupet i den prioriterade volymen (FFM01 och FFM06) och 3) ett högtransmissivt system av sprickor (inklusive bankningssprickor) i den ytnära delen av den prioriterade volymen (FFM02), vilka är hydrauliskt konnekterade över långa avstånd. De olika typerna av hydrauliska data stämmer även överens med kunskapen om de geologiska förhållandena och bergspänningarna i Forsmark och får även stöd av data för grundvattnets kemiska sammansättning, se avsnitt 4.8.

Osäkerheter kvarstår vad gäller de hydrauliska egenskaperna hos deformationszoner och sprickor sydväst och nordost om den tektoniska linsen och den prioriterade volymen. De viktigaste av dessa rör de hydrauliska egenskaperna hos den regionala Singözonen belägen nära den tektoniska linsens nordöstra gräns och de hydrauliska egenskaperna längre nedströms om den prioriterade volymen. Även om genomförda interferenstester inte visar på att det finns hydraulisk kontakt mellan den nordöstra delen av den prioriterade volymen och berggrunden på den nordöstra sidan om Singözonen, där SFR-förvaret ligger, kan det inte uteslutas att sådana hydrauliska förbindelser förekommer på andra platser utefter denna regionalt betydelsefulla zon.

Implementeringen av geometrin och de hydrauliska egenskaperna för sprickdomäner, deformationszoner och den grunda berggrundsakviferen i en numerisk modell har visat att modellen stämmer överens med resultat från storskaliga interferenstester, med observerade grundvattennivåer i hammarborrhål och jordrör, samt med koncentrationer av olika ämnen som uppmätts i grundvattenprov från borrhål. Det råder dock viss oklarhet om huruvida de uppmätta grundvattennivåerna är naturliga eller störda genom exempelvis avledning av dräneringsvatten vid SFR. Även om avledningen av dräneringsvatten i SFR är ett osäkert randvillkor, som kan påverka de naturliga grundvattennivåerna, är slutsatsen att den hydrauliska påverkan (avsänkningar) som induceras av testerna utförda mellan hål i den prioriterade volymen är tillräckligt stora för att medge en god kalibrering av de hydrauliska egenskaperna. Grundvattenflödesmodellen ger med dessa kalibrerade egenskaper rimliga nivåer för de hydrauliska gradienterna, medan de gradienter som tolkats från mätningar i fält av det naturliga grundvattenflödet i djupa borrhål är mycket högre. Vanligtvis överskrider de den maximalt möjliga topografiska gradienten på platsen med flera storleksordningar. Omvänt ger mätningar *in situ* av flödeshastigheter i sprickor med hjälp av utspädning av spårämnen flödeshastigheter som ibland är mycket högre än vad som förväntas i en spricka med den rådande transmissiviteten och rimliga hydrauliska gradienter. Skälet till detta är inte helt känt, även om det sannolikt är relaterat till de förenklande antaganden som är nödvändiga för att kunna göra sådana överslagsberäkningar för enskilda flödesledare. Flödeshastigheterna är emellertid som helhet jämförbara med hydrauliska modelleringsresultat där de hydrauliska nätverksmodellerna används.

4.7 Kombination av modeller för sprickdomäner, hydrogeologiska diskreta spricknätverk (DFN) och bergspänning

Sprickdomän FFM03 i hängväggen till de flacka zonerna ZFMA2 och ZFMF1, se figur 4-19, definierades utifrån en antydd jämn fördelning av öppna sprickor mot djupet och ligger intill en bergvolym som innehåller många flacka sprickzoner. Detta skiljer sig helt från egenskaperna i berggrunden längre åt nordväst i liggväggen till dessa flacka zoner. Modelleringsarbete har visat att även hydrauliskt konnekterade öppna sprickor är mer jämnt fördelade i hängväggen fram till de flacka zonerna A2 och F1, se figur 4-19. Dessutom är den största horisontalspänningen lägre i den här domänen jämfört med i berggrundsvolymen längre åt nordväst, se figur 4-19. Den jämna fördelningen av öppna sprickor och förekomsten av flacka sprickzoner stämmer överens med en generellt spänningsavlastad volym. Sprickkarakteristiken kan faktiskt ha hindrat en större uppbyggnad av horisontalspänningar i den här bergvolymen.



Figur 4-19. *Jämförelse av modeller för sprickdomäner, hydrogeologisk DFN och största horisontalspänning utefter en profil i NV-SO riktning i den nordvästra delen av kandidatvolymen (figur 11-21 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Berggrunden i liggväggen till de flacka zonerna ZFMA2 och ZFMF1, se figur 4-19, är betydligt mer inhomogen, särskilt med avseende på fördelningen av öppna sprickor. Det kännetecknet, tillsammans med viss hänsyn till en ökad omvandlingsgrad (albitisering) i sprickdomän FFM06, utgjorde grunden för att dela in volymen i tre olika sprickdomäner (FFM01, FFM02 och FFM06). Ett ökat antal hydrauliskt konnekterade öppna sprickor och en minskad största horisontalspänning kännetecknar den övre delen av berggrunden i liggväggen mot zon A2. Volymen motsvarar mer eller mindre sprickdomän FFM02, se figur 4-19. Det finns en slående överensstämmelse mellan de olika modellerna med avseende på hur intensiteten av hydrauliskt konnekterade öppna sprickor och den spänningsavlastade volymen stämmer överens med den ökade mäktigheten hos domän FFM02 när avståndet minskar till den flacka zonen A2, se figur 4-19. Den här förändringen i förhållande till zon A2 är troligen relaterad till den förhöjda frekvensen av subhorisontella och flacka sprickor i närheten av denna zon. Eftersom dessa strukturer är orienterade med stor vinkel mot vertikalspänningen, vilken motsvarar den minsta huvudspänningen, är miljön gynnsammare för ändringar i apertur hos äldre sprickor och till och med för bildning av nya spänningsavlastningssprickor, och följaktligen för en mer markant spänningsavlastning närmare A2-zonen.

I motsats till detta kännetecknas huvuddelen av sprickdomänerna FFM01 och FFM06 inuti den prioriterade volymen, som inkluderar förvarsvolymen runt 500 m djup, av relativt få öppna sprickor i ett avdelat mönster nära perkolationströskeln för de konnekterade öppna sprickorna. Den största horisontalspänning är också högre. En slutsats är att den låga förekomsten av öppna sprickor gynnar en mer påtaglig uppbyggnad av horisontalspänningen. Egenskaperna hos de hydrauliskt konnekterade öppna sprickorna i volymen medför att grundvattencirkulationen begränsas.

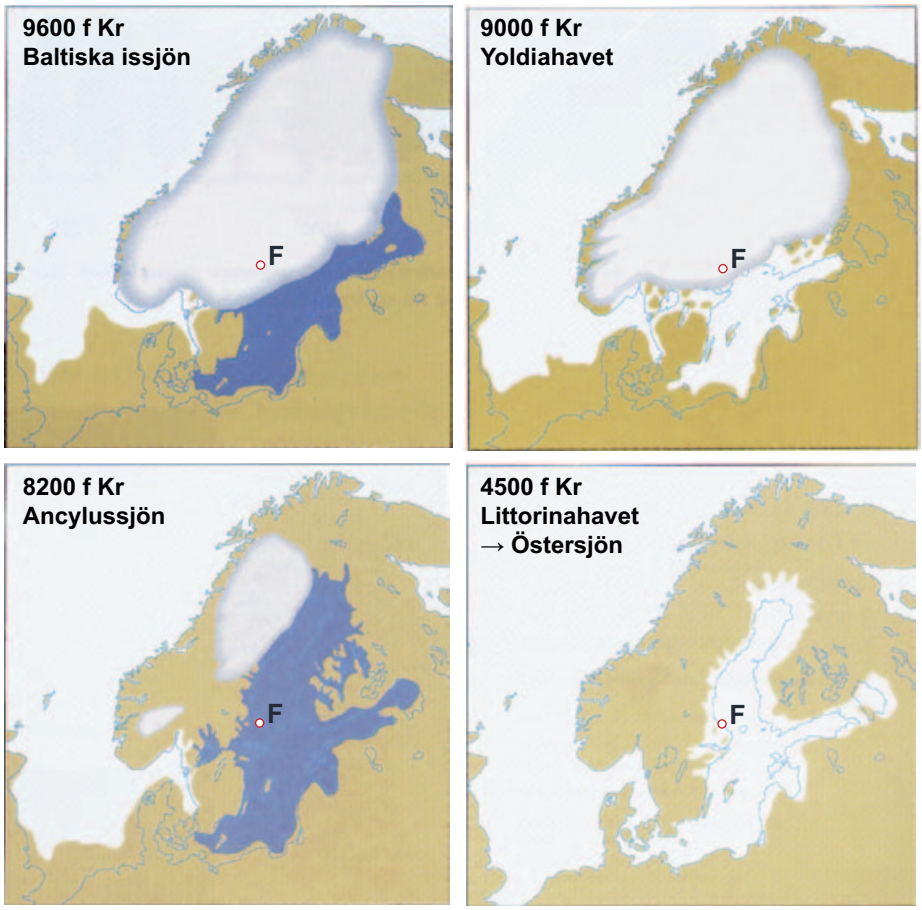
Sammanfattningsvis är en bergvolym med ett begränsat antal öppna sprickor och följaktligen med en låg permeabilitet, förenligt med högre bergspänningar. En sådan berggrunds egenskaper påverkas emellertid av de spänningsavlastande förhållandena nära ytan och nära de flacka äldre strukturerna.

4.8 Grundvatten

4.8.1 Utveckling under kvartärperioden

Ett flertal av de vattentyper som numera förekommer i berggrunden, har samband med gångna klimathändelser under Pleistocen (cirka 2 Ma) och dess interglaciationer, glaciationer, deglaciationer och därmed förbundna förändringar av strandnivån i samband med transgressioner och regressioner. Bland dessa händelser är den senaste glaciationen och den postglaciala perioden (Holocen som inleddes för 10 000 år sedan) de viktigaste för grundvattnets utveckling i den fennoskandiska skölden –och då speciellt i termer av landhöjning och strandlinjeförskjutning – liksom för utvecklingen av Östersjön.

Den postglaciala utvecklingen under Holocen, se figur 4-20, visar att när inlandsisen smälte och drog sig tillbaka från Forsmarksområdet omkring år 8 800 f Kr injekterades glacialt smältvatten hydrauliskt under betydande tryck ned i berggrunden. Det exakta nedträngningsdjupet är okänt och beror av systemets geometri och heterogenitet. Kemiska data och isotopdata från porvatten i bergmatrisen tyder på ett nedträngningsdjup av omkring 550 m i berget sydost om det prioriterade området och som gränsar till den flacka deformationszonen A2. Inga uppenbara signaturer för kallt klimat har däremot återfunnits på dessa djup i den lågkonduktiva prioriterade volymen. Eftersom deglaciationen i Forsmarksområdet sammanföll med slutet av Yoldiaperioden finns det inga tecken på vatten från Yoldiahavet i berggrunden. Ancylussjön (8 800 till 7 500 f Kr) var lakustrin och utvecklades efter deglaciationen. Denna period följdes av det bräckta Littorinahavet (efter år 7 500 f Kr). Under Littorinastadiet var salthalten betydligt högre än i dag och uppnådde ett maximum på omkring 15 promille under perioden 4 500 till 3 000 f Kr. Bräckt havsvatten från Littorinahavet trängde ned i berggrunden, vilket resulterade i en densitetsförändring som påverkade grundvattnet i de mer vattenförande delarna av berggrunden. När de första delarna av Forsmarksregionen därefter höjdes ur havet, vilket inleddes cirka 500 f Kr, bildades sedan – genom tillrinning av nederbördsvatten – ett sötvattenskikt ovanpå saltvattnet på grund av nederbördsvattnets lägre densitet. Som en följd av Forsmarksområdets plana topografi och av den korta period som förflutit sedan landet höjde sig ur havet har ursköljningen av saltvatten varit begränsad. Följaktligen återfinns ett sötvattenskikt enbart på ytligt djup.



Figur 4-20. *Karta över Fennoskandia med några viktiga stadier under Holocenperioden. Fyra huvudstadier karakteriserar utvecklingen av de akvatiska systemen i baltiska bassängen efter den senaste deglaciationen: Baltiska issjön (13 000–9 500 f Kr), Yoldiahavet (9 500–8 800 f Kr), Ancylussjön (8 800–7 500 f Kr) och Littorinahavet (7 500 f Kr till nutid). Sötvatten markeras med mörkblått och marint/bräckt vatten med blekblått. Forsmarksområdet (märkt "F") befann sig troligen vid eller nära kanten på den retirerande inlandsisen under Yoldiahavsstadiet (figur 11-22 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Den kvartära utvecklingen har påverkat grundvattenkemin i Forsmark. Detta gäller speciellt i de mer vattenförande delarna av berggrunden. Ändringar i kemiska förhållanden är emellertid inte begränsade till den postglaciala perioden. I grundvattnet och porvattnet finns det indikationer på förekomsten av gammalt (före Holocen) nederbördsvatten, som har sitt ursprung i ett varmt klimat. Åldern på denna grundvattenskomponent är okänd, men möjligheten finns att den härstammar från tiden före Pleistocen eller är ännu äldre. De hydrogeokemiska förhållandena i Forsmarksområdet kan inte förklaras utan att ta hänsyn till denna äldre komponent. De nuvarande grundvattnen är därför ett resultat av omblandning och reaktioner under en lång geologisk tidsrymd. Till följd av molekylär diffusion är gränserna mellan olika vattentyper inte skarpa, utan avspeglar en variation i de strukturella och hydrauliska egenskaperna.

4.8.2 Grundvattensammansättning och reaktioner mellan vatten och berggrund

Analyser av grundvattenkemiska data uppmätta i prover från kärnborrhål, hammarborrhål och jordborrhål, liksom hydrogeokemisk modellering, har använts för att utvärdera de hydrogeokemiska förhållandena på platsen när det gäller grundvattnets ursprung och vilka processer som kontrollerar vattensammansättningen. Även om datauppsättningen är ganska begränsad har resultaten visat att den nuvarande grundvattensammansättningen i allmänhet ger stöd för hur olika hydrogeologiska förhållanden har uppträtt i den tilltänkta förvarsvolymen, dvs i berggrunden djupt ner i den prioriterade volymen, den allra översta delen av berggrunden i den prioriterade volymen och berget sydost om den flacka zon A2 med dess många flacka sprickzoner.

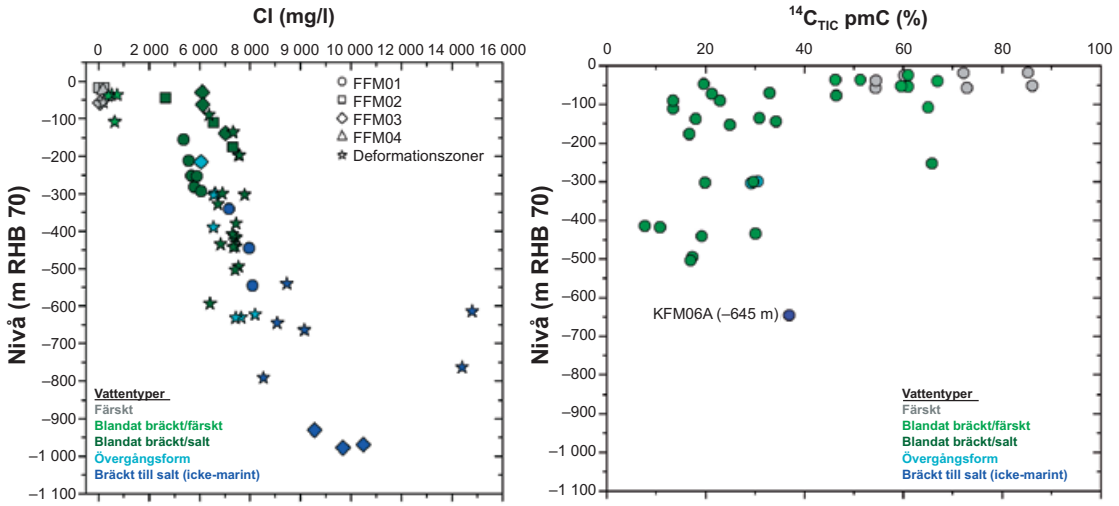
Grundvatten i sprickor

Grundvattnets kemiska sammansättning i de översta 100 till 200 m av berggrunden varierar inom ett brett intervall. Kloridkoncentrationerna ligger i intervallet 200 till 5 000 mg/l, se figurerna 4-21 och 4-22, vilket tyder på en inverkan av både bräckt havsvatten (dvs nuvarande Östersjön eller relikt vatten från Littorinahavet) och nederbördsvatten. I liggväggen till zon A2, inklusive sprickdomän FFM02, kontrolleras detta ytliga system av ett flöde längs mycket transmissiva, subhorisontella sprickor och banknings-sprickor (dvs den ytliga berggrundsakviferen). Via de subhorisontella flödesvägarna sköljs fortfarande det resterande bräckta marina (Littorina) grundvattnet ut. Vidare tyder en stark minskning av tritiuminnehållet på omkring 150 m djup – liksom även kol 14-data, se figur 4-21 – på att dessa ytliga grundvatten har korta uppehållstider, som är i storleksordningen några få årtionden till några få hundratals år.

Vid djup större än cirka 200 m tyder vattensammansättningen på ett bräckt havsvatten med klorid-koncentrationer i intervallet 2 000 till 6 000 mg/l och med en tydlig komponent från Littorinahavet, se figurerna 4-21 och 4-22, såsom framgår av magnesiumkoncentrationer och koncentrationsförhållandet mellan bromid och klorid. Denna vattentyp återfinns ned till ett djup på 600 till 700 m i de transmissiva flacka sprickzonerna i den sydostliga delen av kandidatvolymen, som hör samman med sprickdomän FFM03. Nedträngningsdjupet i sprickdomän FFM01 i den prioriterade volymen med dess låga förekomst av vattenförande sprickor begränsas dock till cirka 300 m. Nedanför dessa djup i FFM01 påvisar vattensammansättningen bräckta till salta icke-marina grundvatten (dvs ingen påverkan från Littorinahavet), vilket avspeglar processer som har inträffat före den tidpunkt då vatten från Littorinahavet trängde in. Dessa djupa vatten uppvisar vidare en ökning av kalcium med djupet. Detta är ett välkänt fenomen som kännetecknar de reaktioner mellan vatten och berg som sker vid allt lägre flöde till stillastående grundvattenförhållanden med ökande djup.

Sammansättning av porvattnet i bergmatrisen

Analyser av sammansättningen av bergmatrisens porvatten stödjer också förekomsten av en låg grundvattenomsättning i sprickdomän FFM01. Porvatten från denna domän har generellt ett lägre kloridinnehåll och är anrikat med syre-18 jämfört med grundvattnen i sprickorna. Detta tyder på ett transient tillstånd mellan porvatten och grundvatten ned till ett djup av åtminstone 650 m, se figur 4-22. En typsignatur med låga koncentrationer av klorid och magnesium samt förhöjda halter av syre-18 har bevarats långt bort från vattenförande sprickor. Detta tyder på att sådana porvatten har utvecklats genom en tidigare mycket långsam omsättning av gamla utspädda grundvatten i några sprickor. Detta överensstämmer också med det fortfarande rådande transienta tillståndet mellan detta porvatten och grundvatten i sprickor från motsvarande djup. Med utgångspunkt från dateringar med klor-36 och helium-4 kan uppehållstiderna bestämmas till mer än 1 Ma.



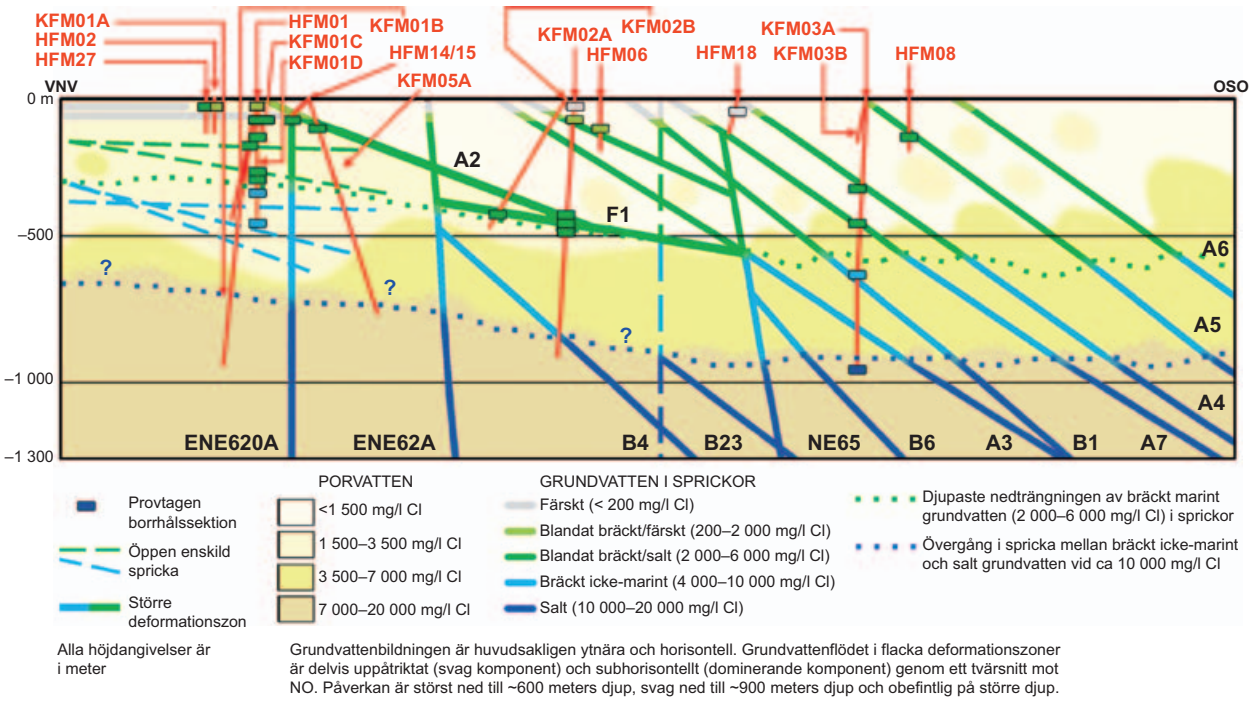
Figur 4-21. *Vänster: Cl som funktion av nivå över havet, uppmätt i grundvatten från de skilda sprick-domänerna och från deformationszoner (från figur 9-5 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****). Höger:* $^{14}C_{TIC}$ *som en funktion av nivå över havet. Det enda analyserade provet från en bräckt icke-marin grundvattentyp tydde på kontamination under provtagningen (figur 9-20 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Sydost om den prioriterade volymen, i hängväggen till zon A2, finns indikationer på nära jämviktstillstånd mellan porvatten och grundvatten i sprickor ned till omkring 200 m under ytan. Detta återspeglar den höga frekvensen av vattenförande, flacka sprickzoner och den snabba omsättningen av stora vattenvolymer i detta område, se figur 4-22. På större djup har porvattnet ett lägre kloridinnehåll än grundvattnet i sprickorna, vilket tyder på ett transient tillstånd ned till ett djup av ungefär 650 m. Det lägre kloridinnehållet och en isotopsignatur som i tilltagande grad utarmas på ^{18}O med ökande djup indikerar att porvattnet i dessa flacka zoner troligen lagrar ett utspätt vatten med en signatur för kallt klimat. De signifikant negativa $\delta^{18}O$-värdena, som har bevarats långt från de vattenförande sprickorna, tyder på att denna signatur för kallt klimat härrör från ett glacialvatten som cirkulerade i sprickorna på dessa djup under en lång tidsperiod. Sedan den senaste deglaciationen har porvattensignaturen ersatts av en signatur av Littorina- och/eller Östersjötyp, vilket framgår från klorid, magnesium och syre-18 i porvattenprover tagna närmare de vattenförande sprickorna.

Pågående reaktioner

Omblandning (både advektion-dispersion och molekylär diffusion) är den huvudsakliga process som har gett upphov till dagens sammansättning av grundvattnet. Men sammansättningen har också påverkats av olika kemiska reaktioner. I synnerhet är alkaliniteten och den redoxbuffrande förmågan hos berggrunden av central betydelse för grundvattensammansättningen och de framtida förändringar som exempelvis beror på eventuell infiltration av utspädda och oxiderade vatten.

Förekomsten av kalksten (kalcit) och omfattande biologisk aktivitet i de kvartära överliggande jordlagren ger upphov till pH-värden i allmänhet över 7, kalciumkoncentrationer för det mesta mellan 50 och 200 mg/l och vätekarbonatkoncentrationer i intervallet 200 till 900 mg/l i de ytnära vattnen (ned till ett djup av cirka 20 m). Koncentrationerna minskar sedan till mycket låga värden på större djup.



Figur 4-22. *Schematisk bild av grundvattensammansättningen längs ett tvärsnitt i riktning VNV-OSO genom kandidatområdet i Forsmark, som den tolkas utifrån hydrogeokemiska data. Läget för de borrhål och sektioner som det tagits prover från visas, tillsammans med de huvudsakliga grundvattentyper i sprickorna som är kännetecknande för platsen. Kloridfördelningens variation med djupet längs med sprickzonerna och enstaka öppna sprickor, liksom underindelningarna av bergmatrisens porvatten baserade på kloridkoncentrationer, visas också. De prickade linjer i olika färger som korsar tvärsnittet representerar de ungefärliga nedträngningsdjupen för de viktigaste grundvattentyperna längs hydrauliskt aktiva sprickzoner (figur 11-23 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Vätekarbonat förekommer emellertid i relativt hög grad i flertalet av de bräckta marina grundvatten, som finns i de övre 600 m av de flacka sprickzonerna sydost om den prioriterade volymen. Bräckta icke-marina grundvatten under 300 m djup i sprickdomän FFM01 har däremot låga vätekarbonatinnehåll.

Den pH-buffrande förmågan i Forsmarks grundvatten på djup större än 100 m förefaller vara bestämd av kalcitsystemet och modellering tyder på att detta vatten är i jämvikt med kalcit. Undersökningar av sprickmineraler visar att kalcit är vanligt förekommande i sprickor och att ingen betydande urlakning har ägt rum som en följd av tidigare glaciationer eller deglaciationer.

Enligt dataanalyser och modellering av redoxsystemet råder det för närvarande reducerande förhållanden på djup större än cirka 20 m. De flesta E_h-värdena bestämda i bräckta grundvatten (på djup mellan 110 och 646 m) verkar kontrolleras av förekomsten av en amorf järnoxyhydroxid med högre löslighet än en rent kristallin fas. Detta tyder på att järnsystemet är förändrat. Denna slutsats stöds av mineralundersökningar som har påvisat förekomsten av finkorniga amorfa till svagt kristallina faser, vilka nu utvecklas mot mer kristallina faser. Koncentrationerna av löst sulfid är genomgående låga. Detta kan möjligen bero på utfällning av amorfa Fe(II)-monosulfider, vilket har samband med aktiviteten hos sulfatreducerande bakterier (SRB). På djup större än 600 m ökar koncentrationerna av löst sulfid, vilket stämmer överens med förekomsten av SRB och med den pågående utfällningen av Fe(II)-monosulfider. Järnsystemet på dessa djup förefaller begränsat av kristallina oxider, huvudsakligen hematit.

Förhöjda koncentrationer av uran har detekterats i grundvatten med en komponent från Littorina-havet. De högsta koncentrationerna hittas i vatten i de flacka sprickzonerna sydost om den prioriterade volymen. Det finns tecken på att dessa förhöjda koncentrationer har samband med lättlösliga uranfraktioner i sprickbeläggningar, som står i kontakt med dessa vatten. Beräkningar av lösligheter hos kemiska förekomstformer stödjer denna slutsats. Resultaten tyder på att det höga uraninnehållet är följden av att dels en amorf (och mycket löslig) uranfas finns närvarande i systemet och dels av de svagt reducerande E_h-värden, som kan tänkas tillåta urankomplexbildning och återgång till jämvikt beroende på E_h och löst karbonat. Tillsammans kontrollerar dessa faktorer reaktionen.

Förekomsten av götit (FeOOH) i några hydrauliskt aktiva sprickor och sprickzoner i den övre delen av berggrunden, huvudsakligen inom de flacka sprickzonerna A2 och F1, tyder på att syresatta vätskor cirkulerat under någon period i det förflutna (möjligen under kvartärtiden). Förekomsten av pyrit i samma zoner antyder att cirkulationen av syresatta vätskor varit koncentrerad utmed kanaler i vilka olika redoxmikromiljöer kan ha bildats. Analys av sprickbeläggningar med avseende på U-isotopserien antyder mobilisering såväl som avsättning av uran i de övre 150 m av berggrunden.

Analyserna av det rådande redoxsystemet i Forsmark har genomgående visat att störningar förorsakade av provtagning (eller borrning) kan ha ändrat de ursprungliga redoxförhållandena i det hydrogeokemiska systemet. Exempel omfattar syrenedträngning och utfällning av amorfa järnoxyhydroxider, på det sätt som indikeras av den kolloidala sammansättningen (se avsnittet nedan) och mineralogiska bestämningar. Dessutom kan ursprunglig E_h och/eller alkalinitet ha blivit förändrade av spolvatten från borrningarna. En ökning i det lösta uraninnehållet och förändringar i sulfidinnehållet kan ha förorsakats av en eller flera av dessa störningar. Trots dessa potentiella störningar är buffringsförmågan hos systemet sådan att en i huvudsak reducerande karaktär upprätthålls. Den slutsats som dras angående spricksystemets möjlighet att buffra redox är att de tidigare oxiderande episoderna inte varit tillräckliga för att uttömma den reducerande förmågan hos sprickmineraler som ännu finns kvar i det ytliga systemet (t ex klorit och pyrit). Någon potentiell ökning av den reducerande förmågan hos sprickmineralerna under historiskt näraliggande tidsperioder med reducerande grundvattenförhållanden är svår att uppskatta, men det kan konstateras att mängderna av sent (kvartärt) bildade mineraler är mycket små.

Löst gas och kolloider

Analyser av gas löst i grundvatten vid Forsmark har visat att gasinnehållet tilltar med djupet. Vattnen är dock långt ifrån övermättade med gas på de djup från vilka proverna togs. De främsta gaskomponenterna är kväve och helium. Metan har också detekterats men då i allmänhet i små mängder (mindre än 0,2 ml/l). För närvarande är det inte känt om metanet är av biotiskt eller abiotiskt ursprung.

Kolloidmängderna i Forsmarks grundvatten är jämförbara med dem som återfunnits i andra granitiska miljöer. Kolloiderna är i huvudsak sammansatta av järn- och svavelföreningar. Uran förbundet med kolloider har hittats i borrhålen KFM02A och KFM06A, vilket överensstämmer med de höga koncentrationer av uran i grundvatten som uppmätts i dessa borrhål. Uraninnehållet i kolloiderna är ungefär 10 procent av urankoncentrationen i grundvattnet. Kolloidal transport är därför ett resultat av, men inte upphovet till, det höga uraninnehållet i grundvattnet.

Tilltro

Det råder i allmänhet hög tilltro till beskrivningen och förståelsen av den rumsliga utbredningen av grundvattensammansättningen. Framför allt beror detta på samstämmigheten mellan olika analyser och modelleringen av kemiska data, men även på överensstämmelsen med den hydrogeologiska och strukturgeologiska förståelsen av området. Vidare förefaller existensen av en ytnära redoxzon vara väletablerad, även om det råder osäkerhet kring tolkningen av data. Den allmänna förekomsten av kalcit pekar dessutom på att det finns buffringsförmåga som motverkar effekterna av nedträngande utspätt grundvatten. En viktig återstående osäkerhet avser ökningen av de sulfidkoncentrationer som uppmätts i det pågående övervakningsprogrammet. Inledande borrning och pumpning kan ha stört systemet eller kanske underlättat sulfatreduktion. Detaljer om grundvattensammansättningen och därmed förbundna osäkerheter och implikationer för SR-Site ges i avsnitt 6.1 i **Datarapporten**.

4.8.3 Grundvattenflöde och överensstämmelse med grundvattensignaturer

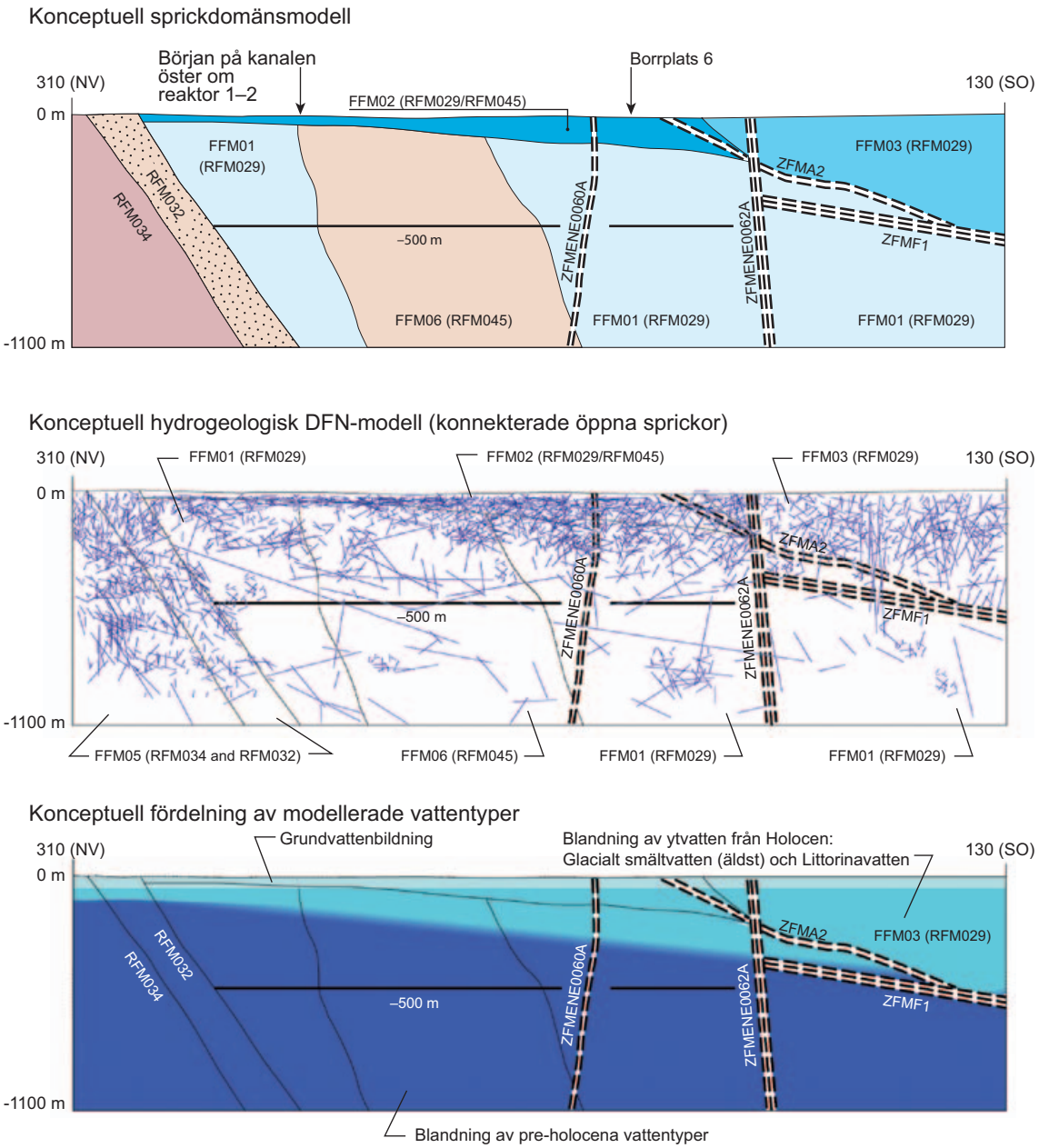
Utvecklingen av grundvattnets sammansättning i Forsmark under de senaste cirka 10 000 åren, dvs under Holocen, har simulerats. Resultaten har sedan jämförts med de uppmätta koncentrationerna av olika ämnen i borrhålen. Den konceptuella modellen för nuvarande fördelning illustreras i figur 4-23 och ska jämföras med den hydrogeokemiska platsbeskrivande modellen som visas i figur 4-22.

Initialvillkoren för de paleohydrogeologiska simuleringarna, som börjar år 8 000 f Kr, definieras utifrån förekomsten av blandningar av skilda referensvatten i berggrunden. Dessa förhållanden härleds med utgångspunkt från analyser av dagens vattensammansättning i sprickor och i porer i bergmatrisen. Analyserna visar att det måste ha funnits gammalt nederbördsvatten med ursprung från både varma och kalla klimathändelser i berggrunden i Forsmarksområdet innan nedträngningen av glacialt smältvatten under den senaste deglaciationen precis före Holocen.

Resultaten från simuleringen med den hydrogeologiska modellen visar rimlig överensstämmelse med uppmätta koncentrationer av klorid, bromid/klorid-förhållandet, $\delta^{18}O$ och vätekarbonatkoncentrationer i borrhålen, se figurerna 8-46 till 8-50 i **Platsbeskrivning Forsmark**. Dessutom förutsäger modellen djupare nedträngning av vatten från Littorinahavet längs de flacka sprickzoner som korsar sprickdomän FFM03 sydost om den prioriterade volymen (ned till ett djup på cirka 500 till 600 m) än i de brant sluttande deformationszoner som korsar sprickdomän FFM01 inuti den prioriterade volymen (ned till ett djup på cirka 300 till 400 m). Fastän den inte matchar de exakta koncentrationerna så förutsäger modellen också högre salthalt i vattnet i sprickorna än i bergmatrisens porvatten, vilket överensstämmer med fältobservationerna, se figur 4-22.

De paleohydrogeologiska simuleringarna stödjer också de hydrokemiska observationerna i ytvatten och ytliga grundvatten. Dessa tyder på att det troligen inte pågår någon utströmning av djupt salthaltigt vatten till det ytliga sötvattnet inom det område som täcks av det väl konnekterade och mycket transmissiva nätverket av sprickor, inklusive bankningssprickor, i berggrundens översta cirka 150 m. Dessutom är simuleringsresultaten samstämmiga med fältobservationerna av relikta marina lämningar, som också omfattar signaturer av djupt saltvatten, i grundvattnet på relativt ytliga djup i de kvartära avlagringarna i avgränsade områden utanför den övre uppspruckna delen av berggrunden. Ett sådant område är sjön Gällsboträsket, vilket sammanfaller med Eckarfjärdszonen, se också avsnitt 4.10.

En omfattande känslighetsanalys utfördes med fokus på heterogeniteten hos de hydrauliska parametrarna inom den prioriterade volymenen. Resultaten visar att modellkalibrering mot hydrokemiska data är känslig för parameterheterogenitet när det gäller berggrundens hydrogeologiska egenskaper, vilket är det förväntade i en bergmassa med få sprickor.



Figur 4-23. *Jämförelse av konceptuella modeller för sprickdomäner, hydrogeologisk DFN (Discrete Fracture Networks) och dagens fördelning av olika referensvatten utefter en profil i riktning NV-SO i den nordvästra delen av kandidatvolymen (figur 11-21 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

4.9 Transportegenskaper i berggrunden

4.9.1 Bergmatrisens egenskaper

Platsbeskrivningens retardationsmodell för berggrunden består av en kvalitativ identifiering och beskrivning av typiska spricktyper och deformationszoner i Forsmark, med hänsyn tagen till processer av betydelse för transporten av lösta ämnen och radionuklider i miljön. Vidare bygger modellen på kvantitativa data som beskriver materialegenskaper och den relativa förekomsten och rumsliga fördelningen av de olika geologiska materialen som bildar bergmatrisen. Modellen bygger också på de relevanta typer av mineralomvandlingar och sekundära mineral som återfinns i samband med sprickor och deformationszoner.

Ingångsvärdena för retardationsmodellen består av formationsfaktorer för transport av lösta ämnen i bergmatrisen, porositet i bergmatrisen, de interna mikroporernas specifika ytor, katjonbyteskapaciteter (CEC) och sorptionsegenskaper hos berg i kontakt med syntetiskt grundvatten av varierande sammansättning. Formationsfaktorer erhålls genom mätningar *in situ* under naturliga spänningsförhållanden, från geofysisk loggning med hög rumslig upplösning i platsundersökningens borrhål, samt från data från laboratoriestudier.

Den begränsade mängd data som finns tillhands för de olika bergmassorna indikerar att det generellt inte finns några skillnader i retardationsegenskaper mellan de bergarter som förekommer i bergdomänerna RFM029 och RFM045. Tar man dessutom hänsyn till variationerna i parametervärdena finns det mycket få tecken på signifikanta skillnader mellan de olika bergarterna. Vad beträffar de huvudsakliga sprickklasserna har det framkommit att antingen ett tunt lager av sprickbeläggning eller ingen beläggning alls har betydelse, eftersom dessa klasser sannolikt är förknippade med en lägre grad av retardation.

De strukturella element i deformationszoner, för vilka retardationsegenskaper har tabellerats, är alla jämförelsevis heterogena till sin struktur. Med hjälp av data över materialegenskaperna identifieras dessa strukturella element som potentiellt starka sänkor för radionuklider som transporteras från ett läckande förvar. Detta ska emellertid beaktas mot bakgrund av att det hydrodynamiska transportmotståndet hos dessa zoner kan vara lägre, vilket ska vägas mot deras ökade mikrostrukturella komplexitet och ytterligare ytor tillgängliga för diffusion.

Tilltro

Värden för porositeten och den effektiva diffusiviteten hos bergmatrisen förefaller relativt väl gränssatta för de viktigaste bergarterna. Även om det finns belägg för kompression av porutrymmen *in situ* i den opåverkade berggrund där matrisen förekommer, kan effekten på materialegenskaperna gränssättas kvantitativt. Osäkerheten ifråga om sorptionen är stor för många specier och specifika sammansättningar av grundvatten och har enbart fastställts semikvantitativt. Sorptionsförmågan för vissa radionuklider i kontakt med speciella grundvatten och bergarter är inte kända eller kan inte anses som statistiskt kvantifierade på grund av otillräckliga provstorlekar. Sorptionsförmågan för U respektive Np under starkt reducerande förhållanden är sannolikt underskattad, beroende på svårigheter att upprätthålla tillräckligt låga redoxpotentialer i laboratorium. Det råder osäkerhet kring fördelningen och mäktigheten hos det omvandlade berg som omger flödesvägarna. Betydelsen av denna egenskap beror emellertid på skillnaderna i egenskaper mellan dessa material och opåverkat berg. Befintliga data pekar på att omvandlat berg i allmänhet är förenat med ökad sorption av de flesta radionuklider. Därför kan denna osäkerhet begränsas av sorptionsegenskaperna hos opåverkat berg. En ytterligare kvantifiering av retardationsegenskaperna och deras tillhörande osäkerheter när det gäller SR-Site-analysen ges i avsnitt 6.7 i **Datarapporten**.

4.9.2 Flödesrelaterade transportegenskaper

Flödesrelaterade transportegenskaper utvärderas som en del av SR-Site-analysen, se avsnitt 10.3.6. Som ett stöd för urvalet av de processer och parametrar som ska beaktas vid modelleringen för säkerhetsanalysen utfördes emellertid också analyser av flödesrelaterade transportegenskaper som en del av den platsbeskrivande modelleringen. Dessa rapporteras i **Platsbeskrivning Forsmark**.

Molekylär diffusion och sorption inne i bergmatrisen betraktas som en viktig mekanism för att begränsa rörligheten hos de radionuklider som finns lösta i grundvattnet. En nyckelparameter för att beskriva processen är kvoten mellan ytan i kontakt med vattenflödet (den flödesvätta ytan) och flödeshastigheten. Generellt gäller att ju större del av ytan som är i kontakt med vattenflödet vid en given flödeshastighet, desto större är interaktionen med både själva sprickytan och bergmatrisen. Kvoten mellan den flödesvätta ytan och flödet betecknas vanligen som det flödesrelaterade transportmotståndet eller F, se vidare avsnitt 10.3.6.

Numeriska simuleringar av flöde och radionuklidtransport gav indikationer på medianvärden för F i storleksordningen 10^6 år/m för ”typiska” flödesvägar i en hundrametersskala på djup större än 400 m i sprickdomän FFM01. Dessutom visar simuleringarna att mindre än 4 procent av de hydrogeologiska DFN-realiseringarna för FFM01 under 400 m djup uppvisar hydraulisk förbindelse av något slag. Simuleringar av andra sprickdomäner (de övre regionerna av FFM01, FFM02 och FFM03) tyder på betydligt lägre F-värden jämfört med FFM01 på djup under 400 m. En analytisk

modellanalys visar att flödesvägarna inom flacka zoner som ZFMA2 uppvisar *F*-värden lägre än 10^3 år/m för transport från förvarsdjup till nära ytan. Å andra sidan finner man för brant stupande deformationszoner (till exempel zon ZFMENE0060A) *F*-värden i storleksordningen 10^5 år/m.

Överslagsberäkningar av effekterna av flödeskanalbildning för tolkningen av hydrauliska borrhålsdata tyder på att kanalbildning inte skulle vara tillräckligt omfattande för att ifrågasätta användbarheten hos de framtagna hydrogeologiska modellerna baserade på platsdata. Vidare dras slutsatsen att ytterligare fysikaliska processer som förbättrar upptaget av lösta ämnen, sådana som radiell diffusion från kanaler av begränsad utbredning och diffusion in i områden med stillastående vatten med åtföljande matrisdiffusion, kan öka fördröjningen väsentligt. Bildning av flödeskanaler kan därför möjligen ha en totalt sett positiv effekt.

Tilltro

Osäkerhet i hydrogeologiska DFN-parametrar och inverkan av kanalbildning kan leda till att frekvensen av flödeskanaler i den prioriterade volymen underskattas. De totala *F*-värdena för typiska flödesvägar genom förvarsvolymen bör emellertid inte skilja sig åt alltför mycket, förutsatt att modellen för sprickors transmissivitet fastställs som rimlig (dvs den ger den ungefärligen rätta storleksordningen vid flödesprognoser). De hydrogeologiska parametrarna för DFN-anpassning avseende sprickor inom förvarsvolymen kan enbart avgränsas tillräckligt genom statistik från kartering av öppna sprickor i tunnlar. Under alla omständigheter är bedömningen att den nuvarande hydrogeologiska DFN-modellen, med dess alternativa beskrivningar av korrelationen mellan transmissivitet och storlek, ger tillräckliga avgränsningar för osäkerheten hos de flödesrelaterade transportegenskaperna. Dessa osäkerheter diskuteras ytterligare i avsnitt 6.6 i **Datarapporten**.

4.10 Ytsystemet

Forsmarksområdet är unikt på många sätt och är inte representativt för en typisk svensk kustlokalisering vid Östersjöns strandlinje. Postglacial landhöjning i kombination med flack topografi, innebär en snabb strandlinjeförskjutning. Denna har resulterat i ett mycket ungt landekosystem, som innehåller ett antal nytillkomna sjöar och våtmarker. Näringsfattiga grunda sjöar med kalkrika sediment är typiska för norra Uppland.

4.10.1 Utveckling under kvartärperioden

Det nuvarande ytsystemet har påverkats starkt av klimatutvecklingen under kvartärperioden. Forsmarksområdet har återkommande varit täckt av inlandsis. Totalt sett har det förekommit omkring 50 glacial/interglacialcykler under kvartärtiden. Det finns belägg för att stora delar av Sverige var fria från is under åtminstone två perioder under Weichsel. Avlagring av sediment i Forsmark kan kopplas till Weichsels glaciala skede samt till perioden under och efter den följande deglaciationen. I den västra delen av kandidatområdet finns en siltig lerig morän med extremt hög grad av konsolidering. Med utgångspunkt från moränens stratigrafiska läge och pollensammansättning dras slutsatsen att avlagringen är äldre än den senaste isframryckningen. Dessutom har man konstaterat att det finns stora sedimentfyllda öppna sprickor i den övre berggrunden som är täckta av morän, se figur 4-24. Avlagringen av dessa sediment dateras tillbaka till ett sent stadium av den glaciala fasen. Det fanns då stora mängder av sedimentrika smältvatten ansamlade under och inuti den retirerande isen. Sprickorna bildades eller reaktiverades under ett sent stadium under den lokala isavsmältningen och anses vara bankningsplan/sprickor som bildades i samband med tryckavlastningen på berggrunden. Under isens fortsatta reträtt avlagrades glaciallera i de låglänta områdena. Avlagringen av denna glaciallera i Forsmark dateras till Yoldiahavets tidsperiod.

Utvecklingen av Östersjön efter den senaste glaciationen har kännetecknats av en pågående strandlinjeförskjutning. Den högsta kustlinjen i nordöstra Uppland kom till under Yoldiahavets stadium (9 500–8 800 f Kr) och var belägen cirka 100 km väster om Forsmark. Vid den tiden var Forsmarksområdet täckt av cirka 150 m vatten. Sedan dess har strandlinjen flyttats tillbaka kontinuerligt och större delen av Forsmarksområdet har höjt sig ur Östersjön under de senaste 2 000 åren. Strandlinjeförskjutningen har haft stor inverkan på fördelningen och omfördelningen av finkorniga kvartära avlagringar. Vågor och bottenströmmar har eroderat, transporterat och åter avlagrat sand, grus och postglacial lera.

Figur 4-24. *a) Skiktad silt i en öppen spricka i den nordvästra delen av det utgrävda området vid borrplats 5. Denna plats var ursprungligen täckt med morän som har avlägsnats. b) Horisontella sprickor längs den mer än 1 km långa kanalen mellan Östersjön och kärnreaktorerna i Forsmark. Dessa sprickor har tolkats som bankningssprickor, som uppstår i samband med tryckavlastningen på berggrunden (figur 11-2 i* ***Platsbeskrivning Forsmark****).*

Att Forsmarksområdet stigit upp ur Östersjön så nyligen betyder att torvbildning har påverkat området endast under en relativt kort tidsperiod. Strandlinjeförskjutningen omvandlar kontinuerligt sjöbottnar till nya landområden eller till sötvattensjöar. Sjöar och våtmarker täcks successivt av kärrtorv, vilken på några lokaler är överlagrad av vitmossetorv. I Forsmark bildas den dominerande torvtypen i rikkärr. Mossar förekommer, men de är få och fortfarande unga. Torv är vanligast i den högst belägna sydvästra delen av området, dvs i det område som har varit över havsnivån tillräckligt länge för att fylla ut havsbassänger och för att torv ska kunna bildas.

Den postglaciala utvecklingen av ekosystem i Forsmark är under de senaste cirka 2 000 åren relativt starkt förknippad med klimatförändringar och strandlinjeförskjutning, men också med mänskliga aktiviteter. Detta diskuteras vidare i avsnitt 4.10.3.

Detaljerade undersökningar, för att utvärdera om det skett någon paleoseismisk aktivitet under den senaste delen av eller efter Weichselglaciationen i och omkring Forsmarksområdet, har utförts i samband med platsundersökningsarbetet. Inte något av de morfologiska huvuddrag som konstaterats har funnits representera senglaciala eller postglaciala förkastningar. Några tecken på deformationer i kvartära sediment, som entydigt satts i samband med seismisk aktivitet, har inte heller påträffats. Utifrån dessa resultat finns det i de geologiska lagerföljderna inga bevis för att större (magnitud > 7 på Richterskalan) jordskalv inträffat.

4.10.2 Beskrivning av ytsystemet

Landskapet i Forsmark utgörs av ett relativt platt peneplan som dateras tillbaka till den prekambriska perioden, dvs före cirka 540 miljoner år sedan. Peneplanet lutar svagt åt öster. Kandidatområdet, se figur 4-3, är nästan helt och hållet beläget under 20 m över nuvarande havsnivå. Trots de små höjdvariationerna böljar den övre ytan av berggrunden över korta distanser, vilket innebär att mäktigheten hos det kvartära sedimenttäcket varierar mycket.

Kvartära avlagringar

Mer än 90 procent av det regionala modellområdet är täckt av kvartära avlagringar. Morän är den dominerande avlagringen, särskilt i de områden som ligger ovanför havsnivån. Postglacial lera, inklusive lergyttja, återfinns främst i de djupare delarna av dalarna på havsbottnen. Enbart mindre förekomster har dokumenterats i den terrestra delen. Postglacialt grus och postglacial sand har återkommande avsatts ovanpå den glaciala leran. Mäktigheten hos de kvartära avlagringarna är i allmänhet större i det marina området (i genomsnitt cirka 8 m) än i det terrestra området (i genomsnitt cirka 4 m). Lergyttja är vanlig vid ytan av de våtmarker som ligger på låg nivå över havet, t ex längs stränderna av sjöarna Fiskarfjärden och Gällsboträsket. Gyttja bildas i sjöar och består framför allt av lämningar från växter som har växt i sjön.

Sjöar och vattendrag

Sjöarna i Forsmark är små (som mest cirka 0,6 km^2) och grunda. Det maximala djupet varierar mellan 0,4 och 2 m. De största sjöarna i området är Fiskarfjärden, Bolundsfjärden och Eckarfjärden, se figur 4-3. Tillrinning av havsvatten till de lägst belägna sjöarna har registrerats under perioder med mycket höga havsvattennivåer. Vidare visar tolkningar av data att sjöarna fungerar som tillrinningskällor till moränakviferer i strandzonen under sommaren, på grund av vattenförluster genom evapotranspiration från denna zon. Den årliga nederbörden och avrinningen är 560 respektive 150 mm.

Inga stora vattendrag flyter genom den centrala delen av kandidatområdet. Bäckarna nedströms sjöarna Gunnarsboträsket, Eckarfjärden och Gällsboträsket är vattenförande under den största delen av året men kan vara torrlagda under långa perioder under torra år, såsom 2003 och 2006. Många bäckar i området har fördjupats avsevärda sträckor i syfte att dränera omgivningen.

Hydrauliska egenskaper hos kvartära avlagringar

Hydrauliska data visar att den horisontella hydrauliska konduktiviteten inne i moränen är signifikant högre än den vertikala konduktiviteten. Vidare är grundvattennivåerna i de kvartära avlagringarna ytliga och beror av topografin. Dessa grundvattennivåer är signifikant högre än nivåerna i de översta delarna av berggrunden inom det prioriterade området, där gradienterna för grundvattennivån är mycket små. Detta tyder på att lokala småskaliga tillrinnings- och avrinningsområden, som omfattar flödessystem för grundvatten begränsade till de kvartära avlagringarna, överlagrar de mer storskaliga flödessystemen som är förbundna med grundvattenflödet i berggrunden. Däremot ligger grundvattennivåerna i berggrunden utanför det prioriterade området och den tektoniska linsen, exempelvis i området kring sjön Eckarfjärden, betydligt högre än nivåerna i de kvartära avlagringarna. Detta innebär att flödessystem som inbegriper berggrunden kan ha lokala utströmningsområden i dessa områden.

Sjösedimenten och den underliggande moränen har låg vertikal hydraulisk konduktivitet. Detta framgår av relationen mellan sjövatten- och grundvattennivåer samt att det finns relikta marina kemiska signaturer under sjöarna, vilka står i kontrast till de söta grundvattnen i strandzonen.

Hydrogeokemi

Moränen och den glaciala leran är rika på kalciumkarbonat ($CaCO_3$). Kalciumkarbonaten har sitt ursprung i paleozoisk kalksten som går i dagen på havsbottnen norr om Forsmarksområdet. Tillsammans med den sentida höjningen av området över havsnivån påverkar detta kemin hos både ytvatten och ytliga grundvatten genom att ge upphov till högt pH och högt innehåll av viktiga komponenter som kalcium och vätekarbonat. Dessutom är ytvattnen rika på kväve och fattiga på fosfor. Detta är karakteristiska egenskaper hos de oligotrofa kalkrika sjöar som är typiska för Forsmarksområdet.

Tolkningen av hydrokemiska data från ytvatten och grundvatten i kvartära avlagringar stödjer slutsatsen av den hydrologiska utvärderingen att utströmning av djupare grundvatten uppträder runt sjön Eckarfjärden. Denna tolkning innebär dessutom att vattenprover tagna vid stranden av sjön Gällsboträsket också har en typsignatur som tyder på inverkan från djupt saltvatten. Vidare pekar en massbalansberäkning för klorid på att det måste finnas en ytterligare kloridkälla i vattnet än den som lagras i de kvartära avlagringarna. Eventuellt skulle kloriden kunna komma från utströmmande djupt grundvatten. Utströmningen av saltare djupt grundvatten vid sjön Gällsboträsket överensstämmer med resultaten av den hydrogeologiska modell som förutsäger utströmning av djupa grundvatten både vid sjön Eckarfjärden och vid sjön Gällsboträsket, se avsnitt 4.8. Båda dessa sjöar ligger längs Eckarfjärdszonen i regionen, se avsnitt 4.4.

Terrestra ekosystem

Forsmarks regionala modellområdes läge nära havet gör havsstranden till ett framträdande kännetecken i öster tillsammans med barrskogar, grunda sjöar, kärr och en del jordbruksmark, se figur 4-4. Landvegetationen påverkas starkt av sådant som är karakteristiskt för de kvartära avlagringarna och av människans landanvändning. Kalkpåverkan tar sig uttryck i floran genom örter och bredbladiga gräs, samt genom ett antal orkidéarter. Förekomsten av skogsbruk under lång tid avspeglar sig i dag i en tämligen hög procentandel av yngre och äldre hyggen i landskapet. Skogar täcker 73 procent av

landytan i Forsmark. De domineras av tall och gran som främst växer på svallad morän. Våtmarker är vanliga och täcker 10 till 20 procent av de tre större avgränsade avrinningsområdena. Huvuddelen av våtmarkerna är lövskogskärr och öppna kärr. Jordbruksmark täcker knappt 5 procent av landarealen och ligger främst i den sydöstra delen av kandidatområdet. Den består av odlingsbar mark och gräsbevuxna områden. En del av den odlingsbara marken och stora delar av ängs- och hagmarken i området har övergetts till en följd av den landsomfattande tillbakagången för jordbruksnäringen som skett under de senaste 60 åren.

Kvantifieringen av reservoarer och flöden av kol och andra grundämnen har visat att vegetationen utgör den största depån för organiskt material. Jorden ackumulerar också organiskt material, men i mycket mindre kvantiteter. Undantaget är våtmarkerna som är betydelsefull för anrikningen av organiskt material och grundämnen som fosfor i den organiska markdepån. I synnerhet ackumulerar de vassdominerade våtområden, som omger många av sjöarna, stora mängder organiskt material och medföljande ämnen. Denna våtmarkstyp är ett steg i utvecklingen av en sjö till ett landområde. Utflödet av kol och organiskt material är låg i jämförelse med de interna flödena i landområdena.

Sjöekosystem

Sjöarna är alla grunda och klassificeras som oligotrofa hårdvattensjöar. De uppvisar höga kalciumnivåer men låga nivåer av näringsämnen, eftersom fosfor fälls ut tillsammans med kalcium. Dessa egenskaper har en stark inverkan på sjöarnas ekosystem. Eftersom djupet är litet nås alla sjöbottnar av solljus och växtlighet uppträder på alla djup. Kransalger dominerar vegetationen. I sjöarna finns olika sorters bottenfauna och de fungerar även som fristad för mindre fiskar. Vanliga fiskarter är abborre och mört, liksom sutare och ruda. Den sistnämnda arten överlever låga syrenivåer och är den enda fisk som förekommer i de mindre sjöarna, där syrenivåerna kan vara mycket låga under vintern.

Modelleringsresultat visar att primärproduktionen överskrider respirationen i många sjöar i Forsmarksområdet– i motsats till typiska svenska sjöar. Primärproduktionen i de större sjöarna omfattar stora kolmängder jämfört med de mängder som tillförs sjöarna från det omgivande avrinningsområdet. Följaktligen finns det en stor potential för att kol, som tillförs dessa sjöar från omgivningarna, tas upp i sjöarnas näringskedja. Enligt modelleringen transporteras emellertid bara en mindre del (7–10 procent) av det genom primärproducenter upptagna kolet uppåt i näringskedjan. Det betyder att merparten av det genom primärproducenter upptagna kolet cirkulerar inom den mikrobiella näringskedjan och transporteras tillbaka in i de abiotiska kolreservoarerna. I de större sjöarna sker en stor del av ackumulationen i sedimenten. Dessa kan sedan utgöra en permanent sänka för föroreningar och radionuklider.

Marina ekosystem

Det marina ekosystemet i Forsmarksområdet är relativt produktivt i en region med annars tämligen låg primärproduktion. Detta beror på att vatten från djupet kommer upp till ytan längs kusten. Salthalten i havsvattnet är låg (cirka 5 promille), beroende på den stora nettotillgången på sötvatten. Den låga salthalten har kraftig inverkan på den marina miljön. Få organismer är anpassade till brackvattenförhållandena, utan snarare till antingen sötvatten eller saltvatten. Därför finns det en blandning av några få sötvattensarter och marina arter i Forsmarksområdet. Den marina floran och faunan i området domineras av bottenlevande organismer som makroalger, kärlväxter och mikroalger. Detrivorer, sniglar och musslor som lever på dött material dominerar både de hårda och de mjuka bottensubstraten. Fiskbeståndet domineras av den marina arten strömming i den pelagiska zonen. Limniska arter, särskilt abborre, dominerar i kustområdena och i de avsnörda vikarna.

Resultat från modelleringar visar att transport från land, sjöar och vattendrag enbart ger ett mindre bidrag av organiskt material till det marina ekosystemet. De största flödena av organiskt material i det marina ekosystemet styrs av advektiva vattenströmmar. Även om delar av kustområdet är heterotrofa är hela området i genomsnitt autotroft, dvs mer kol fixeras i biomassa av primärproducenter än som frigörs från alla organismer. Huvuddelen av kolreservoaren i ekosystemet utgörs av sedimentet, följt av reservoarerna för kol i lösning (DIC och DOC) och i biota. Mängden kol i sediment är omkring 20 gånger större än det i de andra reservoarerna.

Tilltro

Allmänt sett är den platsbeskrivande modellen för ytsystemet baserad på en mycket stor mängd platsdata. Osäkerheter knutna till de underliggande modellerna har utvärderats grundligt. Beskrivningar och modellresultat överensstämmer i de flesta fall med regionala/generiska data och/eller med resultaten från alternativa modeller. De huvudsakliga återstående osäkerheterna är förbundna med beskrivningen av den rumsliga fördelningen av mäktigheten hos det överliggande sedimentlagret och de hydrauliska egenskaperna hos den ytliga berggrunden, speciellt utanför det prioriterade området. Den hydrauliska beskrivningen av den ytliga berggrunden är en del av den hydrogeologiska modellen och ger avsevärt stöd för att det där förekommer mycket transmissiva och sammanhängande strukturer. Även om det generella mönstret för grundvattenflödena betraktas som välkänt, är det svårt att fastställa de exakta gränserna för utströmningsområden för djupa grundvatten. Detta beror på att de geologiska egenskaperna inte är tillräckligt gränssatta och på de heterogena hydrauliska egenskaperna hos de subhorisontella eller flacka strukturer som uppenbarligen styr grundvattenflödet i den ytnära berggrunden. Andra kvarvarande osäkerheter rör den kemiska sammansättningen hos biota, den rumsliga kemiska variationen i de kvartära avlagringarna, såväl som påverkan av kemiska processer på transporten av olika ämnen och kvantitativa uppskattningar av processer sådana som upptag i växter och respiration. Dessa kvarstående osäkerheter bedöms alla vara av relativt liten vikt för såväl den långsiktiga säkerheten som för förvarsutformningen, men osäkerheter som rör påverkan av kemiska processer på transport av olika ämnen ger ett signifikant bidrag till osäkerheter i analysen i SR-Site av dos till människa och miljö, se avsnitt 13.2.

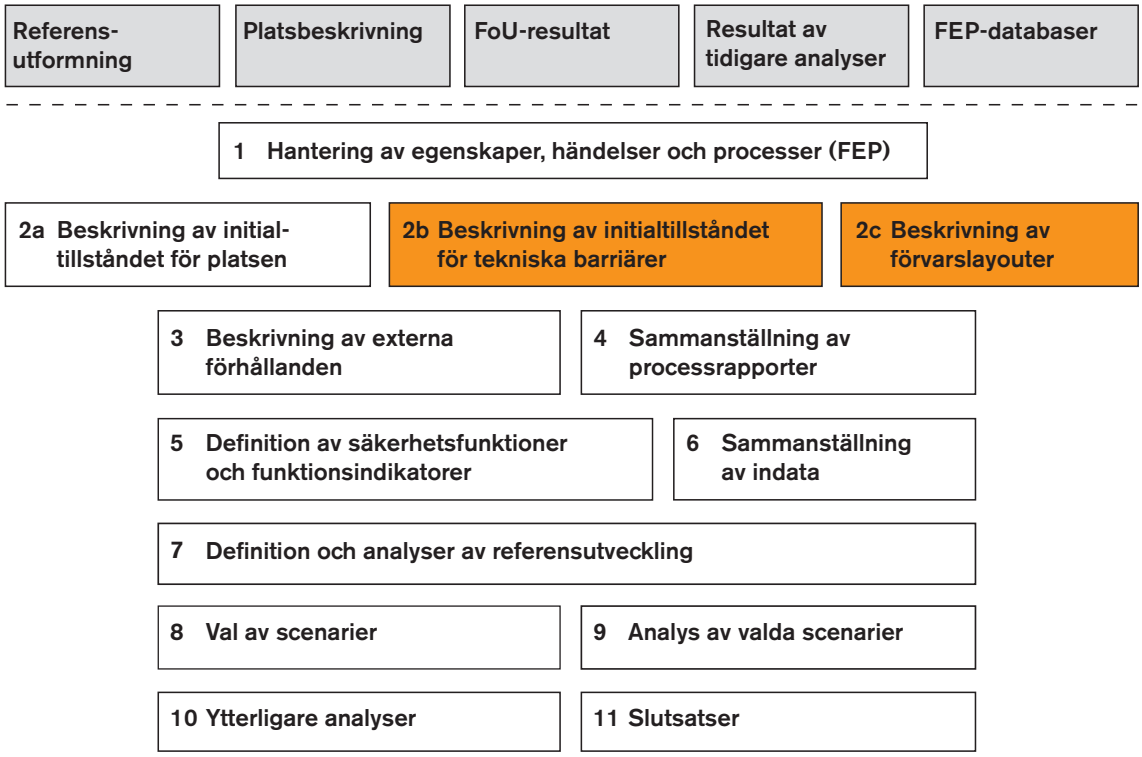
4.10.3 Befolkning och markanvändning

Forsmarksregionen var inte permanent befolkad förrän i slutet av Sveriges förhistoriska period (1100 e Kr). Under medeltiden (1100–1550 e Kr) kännetecknades regionen av små byar. Nya bosättningar skapades i områdena perifert till de äldre. I slutet av medeltiden tillhörde majoriteten av lantbruken i regionen självägande bönder och bara några få gårdar tillhörde kyrkan eller adeln. I början av tidig modern tid (1550–1750 e Kr) påverkade etableringen av järnindustrin i Forsmarksområdet det omgivande landskapet på ett dramatiskt sätt. Produktionen styrdes mot industrins behov; träkolstillverkning, gruvdrift och produktion av foder till djur som användes inom industrin. Befolkningen ökade snabbt och många torpbostäder byggdes i de skogsbevuxna områdena. I torpen bodde människor som var sysselsatta med produktion av träkol.

Under 1700-talet minskade antalet självägande bönder, både på grund av nya ägoindelningar och på det faktum att stora egendomar expanderade. Befolkningen ökade dramatiskt fram till sent 1800-tal. Vid sekelskiftet avtog ökningen och under den senare delen av 1900-talet minskade landsbygdsbefolkningen. Antalet människor sysselsatta inom jordbruket minskade, medan antalet anställda inom industri och hantverk blev allt större.

För närvarande är Forsmarks församling glest befolkad och Forsmarksområdet har inga fasta invånare. Det kärnkraftverk som är beläget omedelbart nordväst om det planerade förvaret utgör emellertid en stor industri med omkring 1 000 anställda, vilket sätter sin prägel på området i dag. Till detta kommer en liten fritidsbefolkning bestående av ägarna till fem semesterstugor. Markanvändningen i församlingen domineras av skogsbruk. Skogsavverkning utgör det enda signifikanta utflödet av biomassa från området. Jordbruket i församlingen är begränsat till omfattningen. Det finns bara ett verksamt jordbruksföretag inom Forsmarksområdet – vid Storskäret.

5 Förvarets initialtillstånd



Figur 5-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

5.1 Inledning

Som anges i avsnitt 2.5 är en omfattande beskrivning av förvarssystemets initialtillstånd en av grundstenarna för säkerhetsanalysen.

Det finns ingen uppenbar definition av tidpunkten för initialtillståndet. För geosfären och biosfären är tillståndet vid tidpunkten då bergarbetena för förvaret inleds en naturlig utgångspunkt, eftersom kunskap om detta relativt ostörda tillstånd finns tillgänglig via den platsbeskrivande modellen som bygger på data från platsundersökningen. Ett alternativ är att för varje deponeringshål beakta det omkringliggande bergets tillstånd vid tidpunkten för deponeringen. Oavsett vilket alternativ som väljs måste den kortsiktiga utvecklingen av berget – från det ostörda tillståndet till efter berguttaget – beaktas i en säkerhetsanalys, som bygger på observationer som gjordes före berguttaget. För biosfären är problemet mindre uttalat, eftersom den inte påverkas i lika hög grad av berguttaget för förvaret.

För det tekniska barriärsystemet är tidpunkten för deponering eller installation en naturlig utgångspunkt när en viss del av systemet, t ex ett enskilt deponeringshål med sin kapsel och buffert, beaktas. Om däremot hela uppsättningen av deponeringshål beaktas kan ingen entydig tidpunkt för deponeringen definieras. Tidpunkten för förslutningen av förvaret är inte heller ett lämpligt val för det tekniska barriärsystemet, eftersom olika delar vid den tidpunkten kommer att ha nått olika stadier av exempelvis termisk och hydraulisk utveckling beroende på när deponeringen gjordes och på den rumsliga variationen hos bergets egenskaper inom förvaret. Det rimligaste tillvägagångssättet bedöms därför vara att definiera tidpunkten för initialtillståndet som den när deponering av använt bränsle med tillhörande kapsel, buffert och återfyllning sker i varje deponeringshål. Med hänsyn tagen till den rumsliga variationen beskrivs sedan den generella utveckling som samtliga deponeringshål genomgår. För vissa delar av utvecklingen, exempelvis den termiska, måste den sekventiella deponeringsföljden beaktas.

I SR-Site definieras initialtillståndet för det tekniska barriärsystemet, utifrån dessa överväganden, som tidpunkten för deponeringen eller installationen. För geosfären och biosfären definieras initialtillståndet som det naturliga ostörda tillståndet vid tidpunkten då berguttaget för förvaret inleds.

I säkerhetsanalysen följs därför utvecklingen av det naturliga systemet, åtminstone med avseende på vissa frågeställningar, från tidpunkten då berguttaget inleds. Kortvariga processer eller förändringar i geosfären, som orsakas av berguttaget för förvaret, dokumenteras därför i **Processrapporten för geosfären**. En integrerad beskrivning av utvecklingen som drivs av dessa processer ges i avsnitt 10.2 i SR-Site som behandlar bygg- och driftskedena för referensutvecklingen.

Initialtillståndet för de tekniska delarna av förvarssystemet erhålls till stora delar från förvarets kravspecifikationer, med tillhörande tillåtna toleranser eller avvikelser. Även tillverknings-, bygg- och kontrollmetoder måste beskrivas för att man i tillräcklig omfattning ska kunna diskutera och hantera hypotetiska initialtillstånd utanför de tillåtna gränserna i kravspecifikationerna. Initialtillståndet för förvarssystemets tekniska delar för SR-Site har sammanställts i ett antal särskilda **Produktionsrapporter**, se vidare avsnitt 5.1.1.

Initialtillståndet för geosfären och biosfären fastställs, som tidigare nämnts, genom platsundersökningar. Fältdata från platsundersökningen analyseras inom platsundersökningsprojektet för att ta fram en platsbeskrivande modell för geosfären och biosfären i Forsmark, såsom rapporteras i **Platsbeskrivning Forsmark** och som sammanfattas i kapitel 4.

Detta kapitel innehåller en beskrivning av initialtillståndet för de tekniska delarna av förvaret med tillhörande osäkerheter. Kapitlet sammanfattar information om de tekniska komponenterna och förvarslayouten från **Produktionsrapporterna** samt resultaten från FEP-analyserna, vilka rapporteras i **FEP-rapporten**. Detaljnivån i detta kapitel ska vara tillräcklig för att de återstående delarna av säkerhetsanalysen ska kunna förstås utan att ovan nämnda referensdokument behöver läsas.

5.1.1 Förhållande mellan konstruktionsförutsättningar, produktionsrapporter och datarapport

Återkoppling från tidigare analyser av den långsiktiga säkerheten är viktiga indata vid detaljeringen av utformningen av KBS-3-förvaret. Återkoppling till utformningen gavs i avsnitt 13.4 i huvudrapporten från SR-Can. Detta vidareutvecklades till krav som benämndes *konstruktionsförutsättningar* i en rapport med namnet ”Design premises for the KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses” /SKB 2009a/. Konstruktionsförutsättningar avser vanligtvis specifikationer av vilka mekaniska belastningar barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning eller acceptanskriterier för de olika bergutrymmena under markytan. Följande tillvägagångssätt tillämpades:

- Referensutformningen som analyserades i SR-Can-analysen användes som utgångspunkt för att fastställa säkerhetsrelaterade konstruktionsförutsättningar för nästa steg av utformningen.
- Ett fåtal konstruktionsstyrande fall – i enlighet med den definition som användes i föreskrifterna SSMFS 2008:21 – kunde tas fram från resultaten från SR-Can-analysen. Fallen avser framför allt kapseln. Utifrån dessa var det möjligt att formulera vissa specifika konstruktionsförutsättningar för kapseln.
- De konstruktionsstyrande fallen inbegriper flera antaganden angående tillståndet hos de andra barriärerna. Dessa antagna förhållanden fastställdes således som konstruktionsförutsättningar för dessa barriärer.
- Avsnitten 13.5 och 13.6 i huvudrapporten för SR-Can ger viktig återkoppling till de flesta frågeställningarna som rör den analyserade referensutformningen. Relevanta delar av denna återkoppling formulerades också som konstruktionsförutsättningar.
- Kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer, som definierades i SR-Can (se vidare avsnitten 8.3 och 8.4 i denna rapport), användes också som underlag för att formulera konstruktionsförutsättningar. Säkerhetsfunktionsindikatorer är dock inte samma sak som konstruktionsförutsättningar. Medan de förra ska upprätthållas genom hela analysperioden, avser de senare initialtillståndet och måste definieras på ett sådant sätt att de ger en marginal för försämring under analysperioden. Grundförfarandet för att fastställa sådana marginaler är att utvärdera om utformningen som analyserades i SR-Can var tillräcklig för att uppnå säkerhet. I de fall denna utformning skulle innebära för strikta krav och i de fall där utformningen bedömdes som otillräcklig eller inte tillräckligt analyserad i SR-Can, genomfördes ytterligare analyser för att generera ett bättre underlag för att fastställa konstruktionsförutsättningarna.

Den beskrivna metodiken tillämpades och genererade ungefär 30 olika konstruktionsförutsättningar för kapseln, bufferten, deponeringshålen, deponeringstunnlarna och återfyllningen samt för stamtunnlarna, transporttunnlarna, tillfartstunnlarna, schakten, centralområdet och förslutningen. De resulterande konstruktionsförutsättningarna sätter gränser för utformningen. Om alla konstruktionsförutsättningar uppfylls, bildar dessa en god grund för att påvisa förvarets säkerhet, i enlighet med analyserna i SR-Can och efterföljande analyser.

Denna återkoppling har utgjort viktiga indata vid den senaste revideringen av KBS-3-förvarets utformning.

Den information som krävdes för analysen av förvarssystemets tekniska komponenter i SR-Site beskrivs i ett antal så kallade **Produktionsrapporter**. Dessa omfattar det använda bränslet, kapseln, bufferten, tunnelåterfyllningen, förslutningen av förvaret och bergutrymmena.

Varje rapport redovisar i) konstruktionsförutsättningarna som ska uppfyllas, ii) referensutformningen som valts för att uppfylla kraven, iii) analyser som bekräftar att referensutformningen verkligen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, iv) produktions- och kontrollrutiner som valts för att åstadkomma referensutformningen, v) analyser som bekräftar att dessa rutiner verkligen åstadkommer referensutformningen och vi) en redovisning av det initialtillstånd som uppnåtts. Den sistnämnda punkten utgör viktiga indata för säkerhetsanalysen.

Det kan bli så att den valda referensutformningen samt tillhörande produktions- och kontrollrutiner ger ett initialtillstånd som bedöms vara gynnsammare för den långsiktiga säkerheten än ett som endast uppfyller konstruktionsförutsättningarna. I SR-Site tas i allmänhet inte hänsyn till sådana tillstånd, som kan vara bättre än förväntat, även om det är det förväntade resultatet av produktionen av det faktiska referenstillståndet som analyseras. Det enda undantaget är kravet på kapselns förmåga att motstå isostatisk belastning. Där överskrider den pessimistiskt antagna högsta belastningen konstruktionsförutsättningarna något, se avsnitt 12.7. En kapselinsats som produceras i enlighet med referensutformningen bedöms emellertid ändå kunna stå emot denna högsta belastning.

Om förbättringen är avsevärd jämfört med konstruktionsförutsättningarna kan det vidare hävdas att detta kan utgöra grunden för framtida uppdateringar av konstruktionsförutsättningarna. Allmänt sett kan konstruktionsförutsättningarna komma att modifieras i framtida skeden av SKB:s program. Anledningarna till sådana modifieringar kan vara resultat från analyser baserade på mer detaljerade platsdata eller en bättre förståelse för de processer som har betydelse för den långsiktiga säkerheten. Återkoppling till de aktuella konstruktionsförutsättningarna ges i avsnitt 15.4.

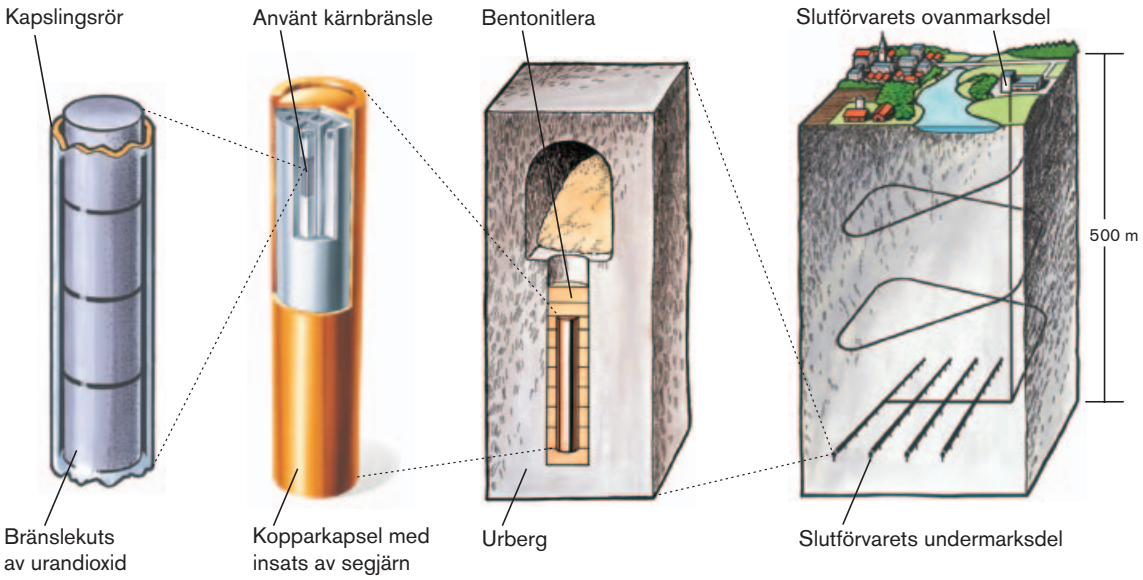
Initialtillståndet som beskrivs i **Produktionsrapporterna** ger kvantitativ information om viktiga indata till säkerhetsanalysen. Dessa utvärderas kritiskt i **Datarapporten**, där indata till säkerhetsanalysen formellt kvalificeras utifrån en bedömning av osäkerheter som påverkar data avseende initialtillståndet.

5.1.2 Översikt av systemet

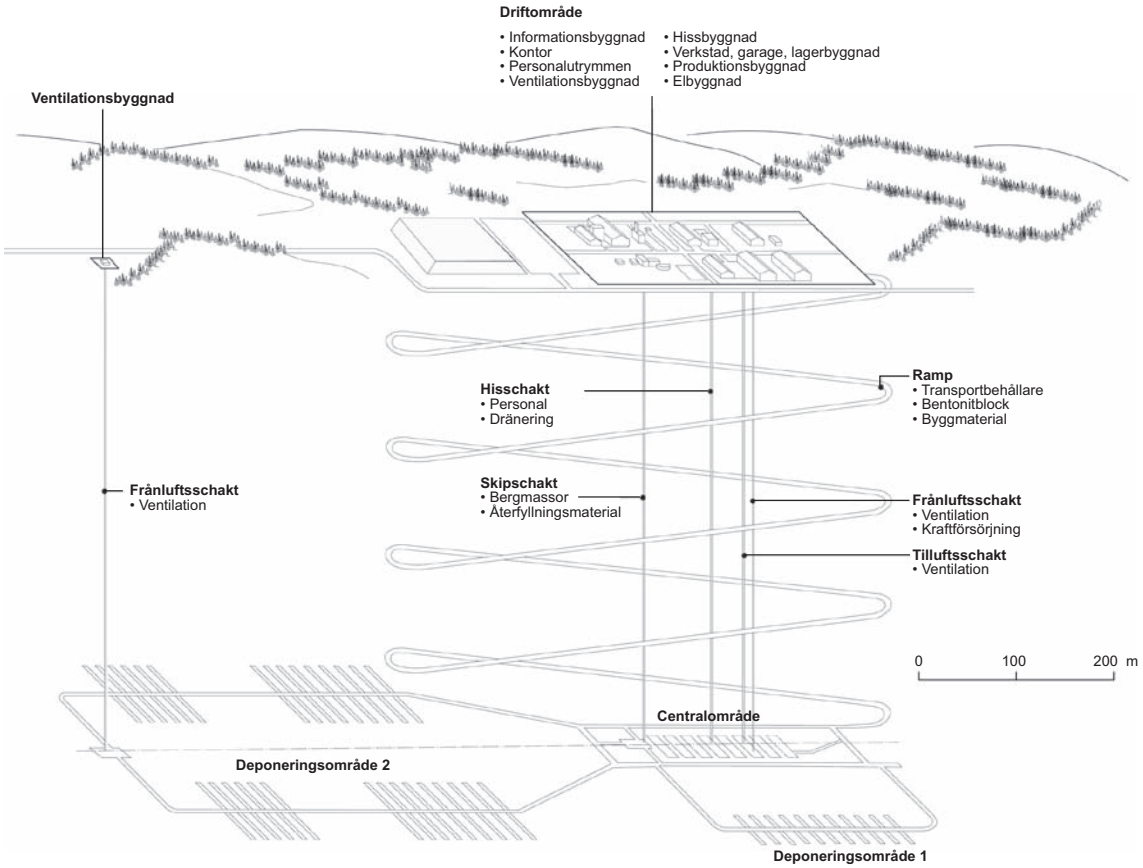
Förvarssystemet baseras på KBS-3-metoden. Korrosionsresistenta kopparkapslar med en lastbärande segjärnsinsats innehåller det använda kärnbränslet. Kapslarna omgärdas av bentonitlera som förhindrar grundvattenflöde och deponeras på ungefär 500 meters djup i grundvattenmättat granitiskt berg, se figur 5-2.

Anläggningens utformning med bergrum, tunnlar, deponeringshål osv baseras på den utformning som ursprungligen presenterades i KBS-3-rapporten /SKBF/KBS 1983/. Utformningen har därefter utvecklats och beskrivits mer detaljerat. Deponeringstunnlarna är sammanbundna via stamtunnlar för transport och kommunikation. En ramp och flera schakt förbinder ovanmarksanläggningen med undermarksanläggningen. Rampen används för tunga och skrymmande transporter och schakten för driftsystem, ventilation samt för transporter av utsprängt berg, återfyllning och personal. De olika delarna av slutförvaret visas i figur 5-3.

Omkring 54 000 använda bränsleelement, motsvarande omkring 12 000 ton använt kärnbränsle (räknat som uran), beräknas uppstå från det svenska kärnkraftsprogrammet (se **Bränslerapporten**). Detta motsvarar omkring 6 000 kapslar i förvaret. Siffrorna bygger på en beräknad drifttid för en reaktor på 50–60 år. SR-Site-analysen baseras därför på ett förvar med 6 000 kapslar, vilket motsvarar omkring 12 000 ton bränsle.



Figur 5-2. *KBS-3-metoden för förvaring av använt kärnbränsle.*



Figur 5-3. *Principiell förvarslayout som visar placeringen av de funktionella områdena under markytan (tillfarts-, central- och deponeringsområde) och anläggningen på markytan.*

För säkerhetsanalysens ändamål har systemet delats upp i ett antal komponenter eller delsystem. Dessa är:

- Det omgivande berget, se kapitel 4.
- Biosfären, se kapitel 4.
- Den platsanpassade förvarslayouten med beskrivningar av alla bergutrymmen, dvs deponeringshål, deponeringstunnlar, transporttunnlar, centralområdet under markytan samt tillfartsschakt och tillfartsramp, se avsnitt 5.2.
- Bränslet (vilket också inkluderar hålrum i kapseln, eftersom starka interaktioner mellan de två uppstår om kapseln förlorar sin integritet), se avsnitt 5.3.
- Segjärnsinsatsen och kopparkapseln, se avsnitt 5.4.
- Bufferten i deponeringshålet, se avsnitt 5.5.
- Återfyllningsmaterialet i deponeringstunneln, se avsnitt 5.6.
- Andra tekniska delar av förvaret, se avsnitt 5.7:
  - Återfyllningsmaterialet i transporttunnlarna, centralområdet under markytan, schakt och ramp.
  - Bottenplattan i deponeringshålet.
  - Förvarspluggar.
  - Undersökningsborrhål med tillhörande förslutningar.

Denna särskilda indelning styrs av en önskan att definiera komponenter som är så homogena som möjligt, utan att införa ohanterligt många komponenter. Homogenitet underlättar både karakteriseringen av en komponent samt struktureringen och hanteringen av de processer som är relevanta för dess långsiktiga utveckling. Även betydelsen för säkerheten har påverkat hur indelningen i olika komponenter har gjorts. I princip behandlas komponenter som är belägna nära den potentiella källtermen, dvs det använda bränslet, och de som har stor betydelse för säkerheten i större detalj än mer perifera komponenter.

5.1.3 FEP för initialtillståndet

Som beskrivs i kapitel 3 är de FEP för initialtillståndet som ingår i FEP-katalogen för SR-Site antingen relaterade till initialtillståndet i referensutformningen eller till avvikelser från det avsedda initialtillståndet i referensutformningen. De förra hanteras i kategorin variabler i FEP-katalogen för SR-Site. I dessa variabelposter ges en hänvisning till beskrivningen i motsvarande **Produktionsrapport** av referensinitialtillståndet för den aktuella variabeln.

De SR-Site FEP för initialtillståndet som rör avvikelser från det avsedda referensinitialtillståndet för kapseln, bufferten och återfyllningen av deponeringstunnlarna eller mer allmänna avvikelser har sammanställts i tabell 5-1. En sådan mer allmän FEP rör svåra missöden såsom brand, explosioner, sabotage och omfattande översvämningar eller andra händelser, som kan inträffa före förslutningen. Sådana händelser utesluts från valet av scenarier. Anledningarna till detta är att i) sannolikheten för sådana händelser är låg och ii) om de inträffar ska de rapporteras till SSM, följderna av dem utvärderas och korrigerande åtgärder eller motåtgärder vidtas i enlighet därmed.

En annan FEP i FEP-katalogen för SR-Site rör effekterna av att förvaret stegvis tas i drift. Detta rör huvudsakligen geosfären och den efterföljande utvecklingen av hela förvaret. Berggrundens hydrologiska tillstånd störs så snart berguttaget för förvaret inleds (en mindre störning skedde redan tidigare i samband med platsundersökningarna). Olika delar av förvaret färdigställs vid olika tidpunkter och kommer därför att utsättas för olika hydrologiska förhållanden, som exempelvis påverkar mättnaden av bufferten och återfyllningen. Eventuell uppträngning av saltvatten kan också variera mellan olika delar av förvaret på grund av den stegvisa utbyggnaden. Andra faktorer som ska beaktas är påverkan från sprängning och trafiken under markytan i de färdigställda delarna av förvaret. Alla dessa frågeställningar utgör en del av den förväntade utvecklingen av förvaret, men fångas inte automatiskt upp i systemet av processer som beskriver förvarsutvecklingen över tid eller av beskrivningarna av initialtillstånden. Eftersom de på ett fullgott sätt måste inkluderas i diskussionen om förvarets utveckling beskrivs de utförligare i analysen av referensutvecklingen i avsnitt 10.2.6.

Andra FEP i FEP-katalogen rör påverkan från ett övergivet, ofullständigt förslutet förvar eller öppna observationsborrhål eller schakt. Dessa frågeställningar beskrivs mer detaljerat i valet av scenarier i kapitel 11.

FEP som rör effekter av monitering som äventyrar den långsiktiga säkerheten analyseras inte ytterligare, eftersom den sortens monitering inte kommer att tillåtas.

Flera FEP rör avvikelser från utformningen, vilka orsakas av oupptäckta missöden under tillverkning, transport, deponering och drift av förvaret osv. Åtgärder för att undvika eller mildra följderna av sådana missöden beskrivs i **Produktionsrapporterna**. I den utsträckning sådana missöden ändå kan inträffa under berguttag, tillverkning, hantering, deponering etc tas de upp i valet av scenarier och i scenarieanalyserna, som beskrivs i kapitel 11 respektive 12.

Endast de FEP som definierats för kapseln, bufferten och återfyllningen av deponeringstunnlar tas upp i tabell 5-1. Utöver dessa FEP innehåller FEP-katalogen motsvarande FEP för initialtillståndet för de övriga systemkomponenterna, dvs bottenplattan i deponeringshålen, pluggar, borrhålsförslutningar, återfyllning i centralområdet, ramp, schakt och andra tunnlar än deponeringstunnlarna. Eftersom dessa systemkomponenter inte är av primär betydelse för förvarets säkerhet har de inte tilldelats några säkerhetsfunktioner. Följderna av avvikelser i deras initialtillstånd analyseras därför inte i detalj, utan tas upp i analysen av referensutvecklingen (se kapitel 10) och beaktas – om så är relevant – i efterföljande delar av analysen.

Tabell 5-1. FEP för initialtillståndet i FEP-katalogen för SR-Site och hur de hanteras i SR-Site.

FEP för initialtillståndet		Hantering i SR-Site	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Kommentar
ISGen1	Större missöden/ olyckor/sabotage	Utesluts. Sannolikheten för sådana händelser är låg. Om de inträffar kommer det att uppdagas innan förvaret försluts, varför motåtgärder och analyser av eventuella effekter på den långsiktiga säkerheten kan baseras på den specifika verkliga händelsen.		
ISGen2	Effekter av stegvis drift	Analyseras utifrån termiska, bergmekaniska och transienta hydrogeologiska simuleringar för ett öppet förvar.		Se avsnitt 10.2.6.
ISGen3	Ofullständig förslutning	Beaktas i valet av scenarier.		Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 14.2 (scenarieanalys).
ISGen4	Moniterings-verksamhet	Utesluts. Moniteringsverksamhet som kan störa förvarets säkerhetsfunktioner kommer inte att tillåtas.		
ISC1	Missöden – kapsel	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer som rör kapselns integritet.	Koppartjocklek Analys av kapsel-utformning	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.6 till 12.8 (scenarie-analyser).
ISC2	Utformnings-avvikelser – kapsel	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer som rör kapselns integritet.	Koppartjocklek Analys av kapsel-utformning	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.6 till 12.8 (scenarie-analyser).
ISBu1	Missöden – buffert	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer som rör buffertens prestanda.	Densitet Geometri	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.2 till 12.4 (scenarie-analyser).
ISBu2	Utformnings-avvikelser – buffert	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer som rör buffertens prestanda.	Densitet Geometri	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.2 till 12.4 (scenarie-analyser).
ISBfT1	Missöden – återfyllning i tunnlar	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer.	Densitet Geometri	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.2 (scenarieanalyser). Transportegenskaper hos defekt återfyllning tas upp i avsnitt 13.7.
ISBfT2	Utformnings-avvikelser – återfyllning i tunnlar	Beaktas i valet av scenarier utifrån säkerhetsfunktionsindikatorer.	Densitet Geometri	Se avsnitten 11.2 (scenarieval) och 12.2 (scenarieanalyser). Transportegenskaper hos defekt återfyllning tas upp i avsnitt 13.7.

5.2 Platsanpassat förvar – bergutrymmen

Bergutrymmena är de hålrum som sprängs ut i berget och som krävs för att rymma den del av den slutliga förvarsanläggningen som ligger under markytan. Bergutrymmena omfattar:

- Hålrummens faktiska geometri och placering.
- Det berg som omger hålrummen och som påverkas av byggarbetet i berget.
- Tekniskt material för att täta och förstärka berget, samt restmaterial från aktiviteter som utförts i slutförvarsanläggningen och som vid deponering, återfyllning eller förslutning finns kvar i och på berget omkring bergutrymmena.

Bergutrymmena bidrar i sig inte till KBS-3-förvarets säkerhet och har inga barriärfunktioner. Placeringen av deponeringsområdena och deponeringshålen – med avseende på bergets termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska egenskaper – är emellertid viktig för att kunna utnyttja berget som en barriär, och således även för förvarets säkerhet. Dessutom kan eventuella skadade zoner (Excavation Damaged Zone, EDZ), samt konstruktionsmaterial och andra kvarlämnade material som finns i berget, påverka bergets och/eller de tekniska barriärernas barriärfunktion. Dessa måste därför vara kända vid utvärderingen av förvarets säkerhet.

Referensutformningen beskrivs i kapitel 4 i **Berglinjerapporten**, medan en mer detaljerad beskrivning av och skäl till utformningen finns i /SKB 2009b/. Utgångspunkten för denna referensutformning är platsspecifik geoteknisk information som har tolkats och utvärderats i en teknisk platsrapport (Site Engineering Report, SER) /SKB 2009c/. Rapporten bygger på de omfattande platsundersökningar samt den utvärdering och modellering av förvarsberget som presenteras i **Platsbeskrivning Forsmark** samt på de fastställda konstruktionsförutsättningarna med avseende på långsiktig säkerhet och andra konstruktionsförutsättningar som anges i **Berglinjerapporten**. En del av projekteringsarbetet har inneburit att bedöma risken för att i praktiken inte kunna åstadkomma denna konstruktion med hänsyn till den aktuella tilltron till och återstående osäkerheten i **Platsbeskrivning Forsmark**, se kapitel 8 i /SKB 2009b/. Vid riskanalysen drogs slutsatsen att inga av konsekvenserna av dessa osäkerheter skulle göra förvaret olämpligt för dess avsedda ändamål. Emellertid identifierades flera osäkerheter som bör få ett svar under nästa projekteringssteg och/eller då förvarets tillfart byggs.

I likhet med de andra produktionsrapporterna, se avsnitt 5.1.1, är förvarsutformningen baserad på konstruktionsförutsättningar som tagits fram med fokus på den långsiktiga säkerheten/SKB 2009a/, utifrån utformningsbeslut som påverkar olika delar av förvarsanläggningen och utifrån vissa mer generella principer /SKB 2007b/ som fastställts av SKB.

5.2.1 Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet

Följande konstruktionsförutsättningar /SKB 2009a/ gäller för bergutrymmena:

Val av förvarsdjup och förvarsområden: Förvarsvolymerna och förvarsdjupen måste väljas där det är möjligt att finna stora volymer berg som uppfyller de specifika kraven på deponeringshålen. Det minsta djupet är fastställt till det som specificeras för ett KBS-3-förvar, dvs 400 m.

Anpassning till de kemiska förhållandena på platsen[7]: Före berguttaget ska grundvattnets sammansättning i bergvolymer som väljs för deponeringshål uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer i SR-Can med avseende på kemiskt gynnsamma förhållanden. Dessa kriterier är: reducerande förhållanden, begränsad salthalt uttryckt i total mängd lösta fasta ämnen (TDS), jonstyrka $[M^{2+}] > 1$ mM, begränsad koncentrationer av K, HS^-, Fe, pH < 11, pH > 4 och $[Cl^-] < 2$ M. Då kvantitativa kriterier inte ges används termen ”begränsad” för att ange vad som är gynnsamma värden för säkerhetsfunktionsindikatorerna.

Minskning av jordskalvsrisken: Det är inte tillåtet att placera deponeringshål närmare än 100 m från deformationszoner med en spårlängd på över 3 km. Så långt som rimligen är möjligt ska deponeringshål väljas så att större skjuvning än vad kapseln kan motstå inte kan uppstå. För att uppnå detta ska ”FPI-kriterierna”, se avsnitt 5.2.2 för en definition, tillämpas vid valet av positioner för deponeringshål.

[7] Konstruktionsförutsättningarna kommer troligen att revideras vid en senare tidpunkt, eftersom SR-Site har reviderat de relaterade säkerhetsfunktionsindikatorerna, se avsnitt 8.3.4.

Anpassning till de hydrologiska förhållandena och transportförhållandena på platsen: 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 volymen vatten som strömmar in i ett godkänt deponeringshål måste vara mindre än 150 m^3. Sprickor som skär deponeringshålen ska ha tillräckligt låg konnekterad transmissivitet (ett specifikt värde kan i nuläget inte ges). Detta villkor uppfylls om villkoren för inflöde till deponeringshålen uppfylls.

Anpassning till de termiska förhållandena på platsen: Buffertens geometri (t ex hålutrymmen), vatteninnehåll och avstånd mellan deponeringshål ska väljas så att temperaturen i bufferten aldrig överstiger 100 °C. (Värmeeffekten från kapseln ska högst uppgå till 1 700 W).

Begränsningar av transmissivitet hos deponeringshålens väggar: Innan kapslarna placeras ut måste den faktiska konnekterade transmissiviteten, integrerad utefter deponeringshålsväggens hela längd och beräknad som medelvärde runt hålet, vara mindre än 10^{-10} m^2/s.

Skadad zon (EDZ) i deponeringstunnlar: Sprängskador ska begränsas och inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet, utefter en betydande del (dvs minst 20–30 m) av deponeringstunneln. Denna effektiva konnekterade transmissivitet beräknas som ett medelvärde över tunnelsulan och ska vara lägre än 10^{-8} m^2/s.

EDZ i schakt och ramper, bergrum och andra tunnlar än deponeringstunnlar: Under toppförslutningens nivå[8] måste den integrerade effektiva konnekterade hydrauliska konduktiviteten hos återfyllningen i tunnlar, ramp och schakt och i den omgivande EDZ-zonen vara mindre 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.

Injektering och förstärkning i deponeringstunnlar: Enbart material med lågt[9] pH (pH < 11) får användas. Ingen kontinuerlig sprutbetong. Ett kontinuerligt system med injekteringsborrhål utanför tunnelprofilen ska undvikas.

Injektering i borrhål, schakt och ramp, bergrum och andra tunnlar än deponeringstunnlar: Endast material med lågt pH (< 11) är tillåtna under toppförslutningsnivån.

Motiv till konstruktionsförutsättningarna finns i konstruktionsförutsättningsrapporten /SKB 2009a/. Som nämns i inledningen, se avsnitt 5.1, måste projekteringen av bergutrymmena säkerställa att konstruktionsförutsättningarna uppfylls. Detsamma gäller den slutliga produkten efter uppförande och kvalitetskontroll.

5.2.2 Förvarsutformning och resulterande layout

Konstruktionsförutsättningarna för de olika bergutrymmena i slutförvarsanläggningen baseras på resultaten av analysen av den långsiktiga säkerheten och beskrivs ovan. Konstruktionsförutsättningarna fastställer den layout och de egenskaper som är acceptabla för bergutrymmena. Målet med bergbygget är att säkerställa att förvarsanläggningens layout:

- Är väl anpassad till förhållandena på platsen.
- Överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna under projekteringens alla faser, såväl som efter avslutad byggnation.

[8] Se t ex figur 5-25.

[9] ”Lågt” avser förhållanden som förväntas i miljöer där det finns cement. Vanligtvis betraktas inte ett pH-värde mindre än 11 som ”lågt”.

Projekteringsetapper

Under alla faser av projekteringen av undermarksanläggningen måste hänsyn tas till osäkerheter avseende förhållandena på platsen. För att fastställa en slutgiltig layout för deponeringstunnlar och deponeringshål måste en stor bergvolym karakteriseras. Karakteriseringen går bara att utföra effektivt från de befintliga bergutrymmena. Det innebär att karakteriseringen detaljeras allt eftersom byggarbetena fortskrider.

De osäkerheter som främst påverkar den slutgiltiga layouten är den geologiska omgivningens rumsliga läge och variabilitet samt hur denna kan påverkas av bergarbeten, även med tanke på bergförstärkning och injekteringsåtgärder. Dessa osäkerheter och förvarsvolymens storlek understryker att den metod som används för att anpassa förvarets slutliga layout till förhållandena på platsen måste integreras med de byggaktiviteter som krävs för att uppföra förvaret.

Utvecklingen av en slutlig layout för förvarsanläggningen utifrån platsanpassning kräver att en iterativ projekteringsprocess, baserad på *Observationsmetoden*, används. Observationsmetoden är en riskbaserad strategi för projektering och byggnation under mark. Metoden tillämpar flexibel ledning och styrning, samt utnyttjar bland annat avancerade övervaknings- och mättekniker. Mer information finns i kapitel 3 i **Berglinjerapporten**.

Den utformning som utvärderas i SR-Site är preliminär. Allt eftersom mer kunskap förvärvas under bergarbetena och den samtidiga detaljerade karakteriseringen, kommer utformningen gradvis att detaljeras. Projekteringen av bergutrymmena i slutförvarsanläggningen delas därför in i flera faser och följs av ett byggskede enligt kapitel 3 i **Berglinjerapporten**. I detta sammanhang beskriver den aktuella referensutformningen D2 /SKB 2009b/ resultaten av ett preliminärt projekteringssteg som bekräftar att det är genomförbart att bygga förvarsanläggningen. Under senare etapper, när projekteringen har nått de detaljerade och slutgiltiga skedena, kan relevanta delar av säkerhetsanalysen behöva uppdateras. Detta behandlas ytterligare i kapitel 15.

Det antas att skillnaderna mellan den faktiska layouten och den layout som är ett resultat av detaljprojekteringen kommer att vara små och att platsanpassningen främst handlar om bergförstärkning, injekteringsåtgärder och den slutliga placeringen av deponeringstunnlar och deponeringshål. Det sistnämnda kräver en karakterisering av bergmassan på plats, vilket är en huvuduppgift för undersöknings-, kontroll- och övervakningsprogrammet. För att verifiera att de borrade deponeringshålen uppfyller alla konstruktionsförutsättningar, så att de kan användas för avsett ändamål, kan ytterligare indata behövas från den övervakning och de kontroller som utförs under perioden från det att byggandet slutförts till dess deponering sker.

Förvarsdjup

Det djup som fastställts för referensutformningen är en kompromiss mellan konstruktionsförutsättningar som rör den långsiktiga säkerheten och byggbarheten av deponeringstunnlar och deponeringshål i förvarsanläggningen. Enligt konstruktionsförutsättningarna bör djupet väljas ”där det är möjligt att finna stora bergvolymer som uppfyller de särskilda kraven på deponeringshål”. Konstruktionsförutsättningarna anger även ett minsta djup på 400 m. Motiven till att identifiera lämpliga bergvolymer för deponering, såväl som djupintervall för slutförvarsanläggningen, beskrivs i stora drag i SER /SKB 2009c/. Dessa motiv har använts för att fastställa ett djupintervall där det är möjligt att hitta bergvolymer som uppfyller de särskilda kraven på deponeringshål och deponeringstunnlar med avseende på:

- Tillgängligt utrymme.
- Sprickfrekvens och frekvens av konnekterade vattenförande sprickor.
- Grundvattentryck.
- Storleksordning och riktning för lokala bergspänningar.
- Bergets initialtemperatur och termiska egenskaper.
- Salthalt och risk för uppträngning av vatten med hög salthalt (upconing).
- Kemiska förhållanden.
- Längder och transportmotstånd för hydrauliska transportvägar till och från förvaret.

Dessa faktorer utvärderas i SER /SKB 2009c/ med hjälp av informationen i **Platsbeskrivning Forsmark**. Vid Forsmark är det i huvudsak platsens hydrauliska förhållanden, dvs frekvensen och förekomsten av vattenförande sprickor och dessas djupberoende, som har betydelse för säkerheten. Byggbarheten beror i huvudsak på bergmekaniska förutsättningar, till exempel sannolikheten för och graden av spjälkning i deponeringshålen före deponering. Under minimidjupet av 400 m har man konstaterat att de förhållanden som påverkar mest är hur tätt de vattenförande sprickorna förekommer samt storleksordningen för de lokala bergspänningarna, medan andra faktorer förändras lite eller måttligt med djupet. På större djup är frekvensen av vattenförande sprickor redan låg och sjunker dramatiskt på djup större än 400 m. Detta tyder på att djup på mer än 450 m kan ha en betydande fördel. Under ett djup av 300 m tycks det inte finnas några fakta som talar för att nivån för den horisontella bergspänningen i sprickdomän FFM01 ökar markant med djupet. En placering av förvaret på ett djup av 400 m eller 500 m ökar därmed inte påtagligt risken för spjälkning på grund av berguttaget i deponeringshålen. Därför ges i SER förslaget att förvaret vid Forsmark placeras på ett djup av mellan 450 m och 500 m.

I den preliminära utformning som tagits fram ligger det maximala djupet för förvarsanläggningen på nivån –470 m, dvs där transporttunnlarna (tunnelsulan) kommer ut från centralområdet. Det minsta djupet (tunneltaket) i referensutformningen ligger på nivån –457 m, dvs i några av deponeringstunnlarna. Placeringen av förvarsanläggningens minsta respektive största djup kommer att baseras på kraven på dräneringssystemet.

Termisk dimensionering – avstånd mellan deponeringshål

Utgångspunkten för den termiska dimensioneringen i referensutformningen är: ett fastlagt minsta avstånd mellan kapslarna, en maximal värmeeffekt från en kapsel av 1 700 W, ett minsta avstånd mellan deponeringshålen av 6 m, ett minsta avstånd mellan deponeringstunnlar av 40 m och en högsta tillåtna maximal temperatur i bufferten på < 100 °C. Detta överensstämmer med de konstruktionsförutsättningar som anger att avståndet mellan deponeringshålen måste vara tillräckligt stort för att hålla temperaturen i bufferten under 100 °C.

Projekteringsmetoden för att uppfylla detta krav beskrivs i /Hökmark et al. 2009/. Det minsta avståndet mellan deponeringshål i referensutformningen vid Forsmark utvärderades i SER. Analysen gav stöd för ett minsta avstånd mellan deponeringshålens centrumpunkter på 6,0 m i bergdomän RFM029 och 6,8 m i bergdomän RFM045.

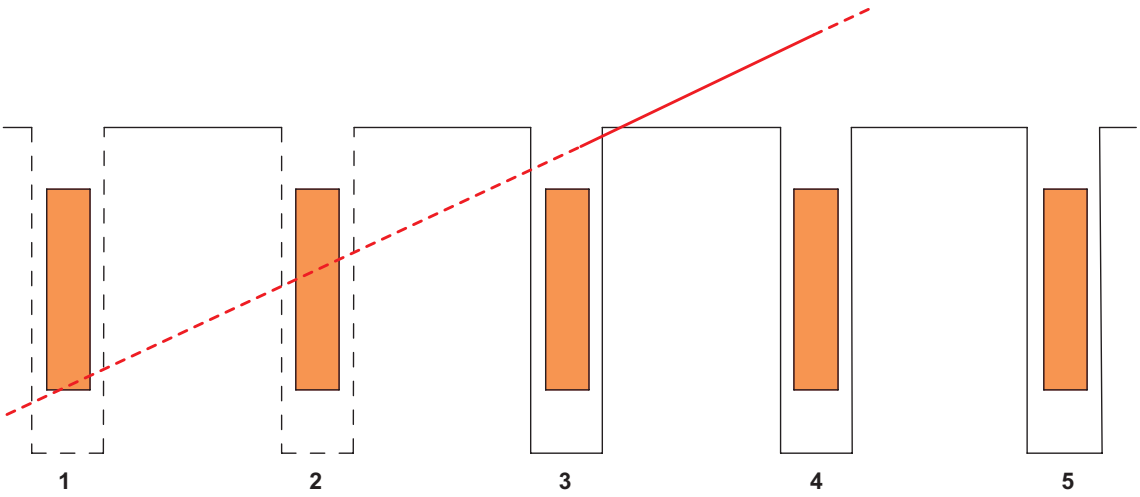
Platsanpassning med avseende på deformationszoner

Layouten är anpassad för att uppfylla de konstruktionsförutsättningar som avser att minska jordskalvsrisken, se avsnitt 5.2.1. I den aktuella volymen finns bara fyra deformationszoner som är stora nog att eventuellt kräva ett respektavstånd: de tre brantstupande zonerna ZFMENE060A, ZFMENE062 och ZFMNW0123, samt den flacka zonen ZFMA2, se kapitel 4.

Långa sprickor får dessutom inte korsa deponeringshål enligt EFPC (Extended Full Perimeter Intersection Criterion). EFPC beskrevs ursprungligen av /Munier 2006/. Vid utvärdering av konsekvenserna av detta kriterium har det emellertid visat sig att det utesluter många deponeringshål som i själva verket bara skärs av relativt korta sprickor. För att förbättra kriteriets prestanda har det nu formulerats om på följande sätt, se även figur 5-4:

- Deponeringspositioner som skärs av en spricka som skär tunnelns hela omkrets, och som även beräknas skära kapselns plats i deponeringshålet, utesluts.
- Deponeringspositioner som skärs av en spricka som skär ytterligare fyra eller flera möjliga deponeringspositioner utesluts.

Av praktiska skäl har emellertid inte den gamla definitionen, dvs att utesluta deponeringshål som skärs av en spricka som även skär tunnelns hela omkrets, ändrats för de betydligt mindre frekventa, potentiellt vattenförande, sprickorna. För dessa sprickor används EFPC som en indikator för höga flöden när förvaret väl förslutits och mättats.



Figur 5-4. *I SR-Site har EFPC ändrats så att deponeringspositioner som skärs av en spricka som skär tunnelns hela omkrets, och som även beräknas skära kapselns plats i deponeringshålet, utesluts (dvs position 1 och 2). För potentiellt vattenförande sprickor gäller fortfarande tidigare kriterium (dvs även position 3 utesluts).*

Enligt kriteriet placeras inte deponeringshål i positioner som skärs av deterministiska deformationszoner som är kortare än 3 km, även om deponeringstunnlar får korsa sådana zoner. Vidare kan den förväntade förlusten av positioner för deponeringshål, på grund av det EFPC som definieras ovan, bara utvärderas stokastiskt med hjälp av DFN-modellen enligt **Platsbeskrivning Forsmark**.

Det reviderade EFPC användes när referensutformningen fastställdes, för att uppskatta den potentiella förlusten av deponeringshål på grund av detta kriterium. Enligt /SKB 2009b/ kan förlusten av positioner ligga på mellan 10 och 25 procent, beroende på vilken DFN-modell som används. I rapporten konstateras även att den faktiska förlusten av positioner bedöms vara mycket mindre, eftersom det finns goda utsikter att hitta effektivare sätt att identifiera sprickor som är för långa.

Bergmekanik och bergförstärkning

Vid referensutformningen tog man hänsyn till de allmänna tekniska riktlinjer för bergmekaniska frågor som anges i SER /SKB 2009c/. Dessa riktlinjer täcker in genomförbarheten både för byggande och för deponering. Med tanke på buffert och återfyllning införs dessutom konstruktionsförutsättningar för en tillåten geometri för deponeringshålen och deponeringstunnlarna, se kapitel 2 i **Berglinjerapporten**. Eventuella förändringar i geometrin, som beror av spjälkning såväl som av prestandan hos borr- och utsprängningsmetoderna, behöver beaktas vid verifiering av hur dessa konstruktionsförutsättningar uppfylls.

Enligt /SKB 2009b/ förväntas de lokala spänningsförhållandena vid Forsmark på förvarsdjup inte vara sådana att de ger upphov till omfattande spänningsorsakade stabilitetsproblem i form av spjälkning i deponeringstunnlarna. Detta konstateras med hjälp av den ”mest sannolika” spänningsmodellen för aktuell layout och aktuella tunnelriktningar. Denna konstruktionsparameter har emellertid en osäkerhet. Vissa uppgifter tyder på en lägre spänningsnivå, medan andra tyder på att spänningsnivån är högre. En utvärdering av alla tänkbara spänningsmodeller tyder på att åtgärder för att minska inverkan av spänningarna med hjälp av förstärkningar, tunnelriktning och tvärsnittsform bör vara tillräckliga för att hålla spjälkningen på acceptabla nivåer. Detta gäller även för tillfartsrampen, centralområdet, stamtunnlarna och transporttunnlarna, även om dessa delar inte alltid kan anpassas till riktningen för den största huvudspänningen. Referensutformningen innehåller bergförstärkningar, som är särskilt avsedda att minska det strukturrelaterade spjälkningsdjupet till en tillåten nivå.

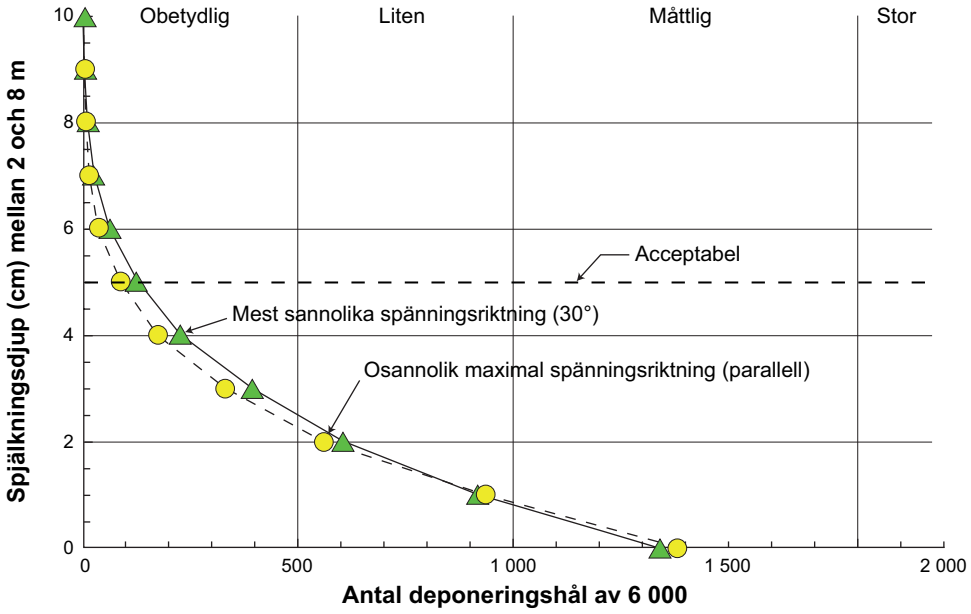
/Martin 2005/ visade att sannolikheten för spjälkning i deponeringstunnlar kan minskas markant – eller till och med elimineras – genom att deponeringstunnlarna riktas parallellt med den största horisontella spänningen. Enligt de riktlinjer som ges i SER ska deponeringstunnlarna placeras parallellt med den största horisontella spänningens riktning, med en avvikelse på högst ± 30 grader, för att markant minska risken för spjälkning. En tredimensionell elastisk spänningsanalys, som beskrivs i projekteringsrapporten /SKB 2009b/, bekräftar att denna riktlinje är adekvat.

För deponeringshål visade de tredimensionella elastiska analyserna att för den ”mest sannolika” spänningsmodellen kommer bara de deponeringstunnlar som har en riktning som avviker mer än 30 grader från den största horisontella spänningens riktning att skapa tangentiella spänningskoncentrationer som är högre än hållfastheten för spjälkning. I dessa situationer kommer spjälkningen att ske ovanför kapselns ovandel. När det gäller den ”mest sannolika” spänningsmodellen tyder resultaten på att cirka 100–200 deponeringshål (av 6 000 stycken) klarar av ett spjälkningsdjup (överberg) på mer än 5 cm, förutsatt att deponeringstunnlarna ligger parallellt med den största horisontella spänningen, med en avvikelse på mellan 0 och 30 grader. För den ”osannolika maximala” spänningsmodellen måste deponeringstunnlarna ligga parallellt med den största horisontella spänningen. Antalet deponeringshål som klarar av ett spjälkningsdjup på mer än 5 cm är emellertid ungefär detsamma, se figur 5-5. Dessutom kan löst bergmaterial från spjälkningen, som sitter kvar på bergväggarna i deponeringshål, rensas bort för att uppfylla kraven på effektiv transmissivitet.

För att använda utrymmet effektivt ligger deponeringstunnlarna i referensutformningen i en riktning mellan azimutvinklarna 123 och 140 grader. Om de ”osannolika maximala” spänningsförhållandena påträffas när berguttaget nått förvarsnivån måste dessa riktningar justeras.

För att förhindra att spjälkning utgör ett säkerhetsproblem vid drift ingår bergförstärkning med sprutbetong i referensutformningen för samtliga bergutrymmen, förutom i deponeringstunnlarna där metalltrådsnät vid behov ska användas.

Visst material i berget eller på bergytor, exempelvis från bergförstärkning, kommer att finnas kvar i förvaret efter förslutning. De uppskattade mängderna anges i tabell 4-1 i **Berglinjerapporten**.



Figur 5-5. *Uppskattat spjälkningsdjup i deponeringshål för de ”mest sannolika” respektive ”osannolika maximala” spänningsförhållandena. För det ”mest sannolika” fallet antas tunnlarna ligga i linje inom 0 till 30 grader med den största horisontella spänningsriktningen, medan deponeringstunnlarna för fallet med ”osannolikt maximum” antas ligga exakt parallellt med den största horisontella spänningen (se figur 8-4 i /SKB 2009b/). Klassificeringen av antalet påverkade hål med “obetydligt”, “litet”, “måttligt” och “stort” avser den riskanalys för utformningen som beskrivs i /SKB 2009b/.*

Anpassning till hydrogeologiska förhållanden

Flera konstruktionsförutsättningar avser begränsningar av inflödet av vatten till olika delar av förvarsanläggningen. Vid projekteringen hanteras detta genom att deponeringshål med för höga inflöden utesluts, genom justering av layouten för andra delar och genom injektering. Injekteringsåtgärder måste i sin tur följa restriktionerna för injekteringsmaterial och placering av injekteringshål. Sammansättningen och mängden av det material som används för bergförstärkning och för injektering anges i tabellerna 4-1 och 4-2 i **Berglinjerapporten**.

Behovet av injektering och motiv för att bedöma mängderna cement, silica sol och tillsatser för referensutformningen (inklusive både den totala mängden och den mängd som blir kvar i berget) beskrivs i avsnitt 7.3 i projekteringsrapporten /SKB 2009b/. I sprickdomän FFM02, som ligger i bergets översta 100–200 m, har berget en relativt hög frekvens av vattenförande sprickor. Relativt omfattande injekteringsåtgärder kommer att behövas i denna del av berget. På djup större än 200 m är frekvensen av vattenförande sprickor i allmänhet låg och minskar med djupet. Injekteringen kan utföras som selektiv förinjektering, med undersökningar i sonderingshål, vid passage av deformationszoner och där diskreta vattenförande sprickor påträffas. På djup större än ungefär 400 m är den observerade frekvensen av vattenförande sprickor mycket låg. Injektering av sprickor och zoner med flöden kommer att ske lokalt och inte ge upphov till kontinuerliga injekteringshål utanför deponeringstunnelns profil. I genomsnitt kommer mindre än 2 procent av sektionerna på 20 m mellan deformationszonerna att kräva injektering, se avsnitt 2.5 i /SKB 2009b/.

När injektering krävs på förvarsnivå antas det att cementbaserad injektering är tillräcklig för att åstadkomma den tätning som krävs. Men för en del vattenförande sprickor och deformationszoner i deponeringstunnlar är det eventuellt inte ändamålsenligt att använda cementbaserad injektering. För att åstadkomma den tätning som krävs användes i referensutformningen alternativ med ny teknik, till exempel med silica sol. Detta har nyligen testats vid Äspölaboratoriet /Funehag 2008/.

Resulterande layout

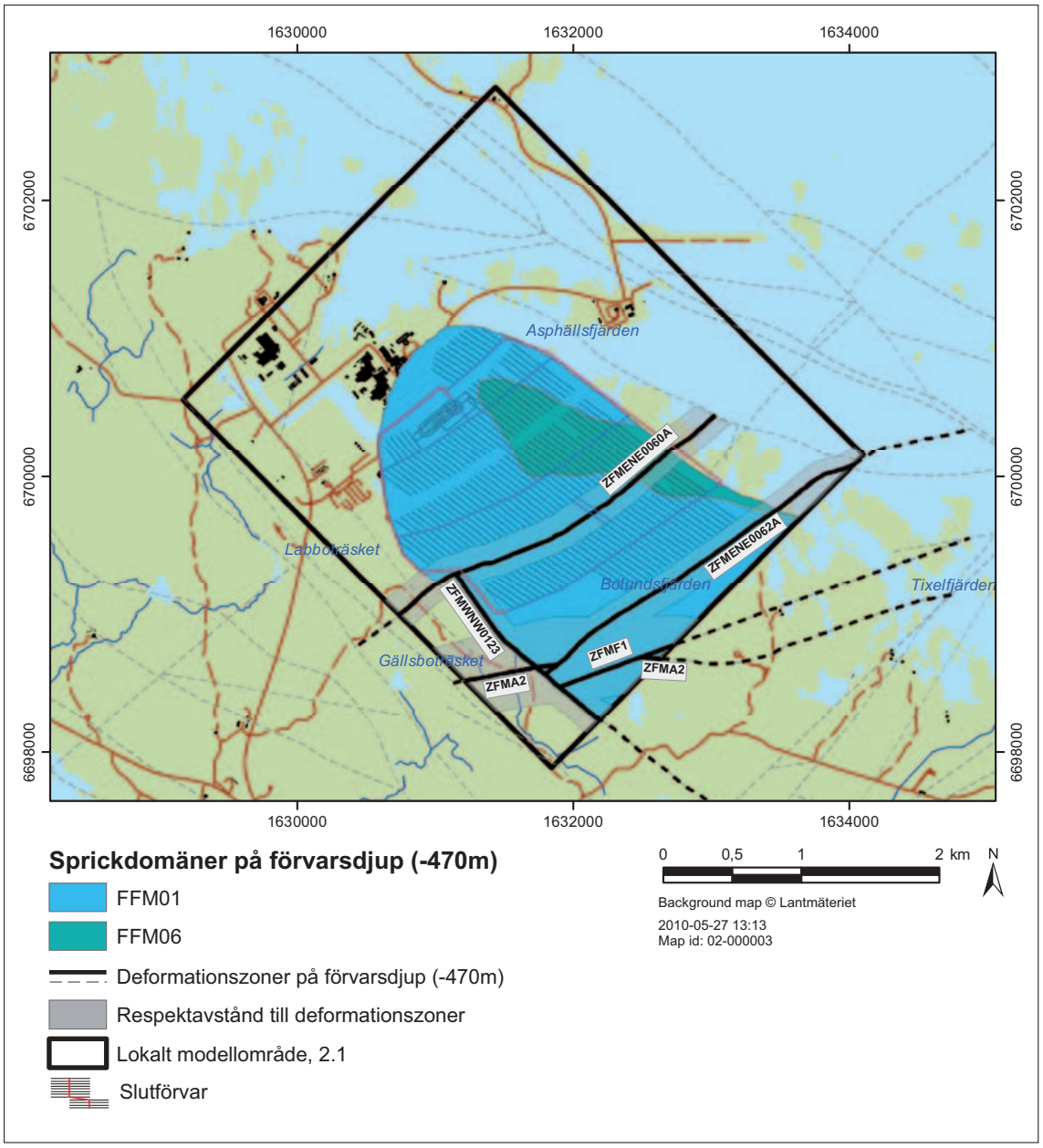
De huvudsakliga frågorna för att platsanpassa den layout för referensutformningen som behandlas ovan är:

- Förvarsdjup.
- Avståndet mellan deponeringshål utgående från termisk dimensionering.
- Respektavstånd relativt modellerade lägen för stora deformationszoner.
- Riktningen för deponeringstunnlar i förhållande till den största horisontella spänningens riktning.
- Uteslutning av olämpliga positioner för deponeringshål.

Med hänsyn till dessa frågor utvecklades en referensutformning för Forsmark, se figur 5-6, i syfte att maximera bruttokapaciteten i förhållande till möjliga deponeringspositioner. Referenslayouten omfattar åtgärder för alla deterministiska deformationszoner som identifierats i den platsbeskrivande modellen. Dessutom finns ett respektavstånd på 100 m för deformationszoner med en spårlängd över 3 km. Enligt layouten finns inga deponeringspositioner inom respektavstånd från någon av dessa zoner. Dessutom korsar inga deponeringspositioner kända deterministiska mindre deformationszoner. Bruttokapaciteten för referensutformningens layout är 7 818 deponeringspositioner, vilket medger en förlust av deponeringspositioner på 23 procent i relation till de cirka 6 000 kapslar som ingår i planen för slutförvarsanläggningen, dvs mer än det förväntade behovet. Referensutformningens layout för slutförvarsanläggningen visas i figur 5-6.

Referensutformningen omfattar inte några extra områden för deponering, förutom den tillåtna förlusten av positioner på 23 procent, men medger användning av andra potentiellt lämpliga bergvolymer för att ge ytterligare deponeringspositioner. Det konstateras även att möjligheterna att utnyttja dessa områden för extra kapacitet behöver motiveras genom ytterligare platsundersökningar och modellering.

Eftersom områden för utbyggnad och områden för deponering måste vara åtskilda under drift, förutses en stegvis metod för att successivt bygga ut deponeringsområdena. En preliminär stegvis utbyggnad av förvarsanläggningen beskrivs i /SKB 2009b/.



Figur 5-6. *Referensutformningens layout för förvaret vid Forsmark, vilken även visar respektavstånd och de deformationszoner som kräver respektavstånd (figur 4-1 i* ***Berglinjerapporten****).*

5.2.3 Initialtillstånd för bergutrymmen

Kapitel 6 i **Berglinjerapporten** innehåller en analys av bergutrymmenas planerade initialtillstånd vid den tidpunkt då deponeringen påbörjas. Analysen baseras på en utvärdering av hur lämpliga nuvarande projekteringsverktyg och planerade byggtekniker är, samt en utvärdering av hur effektiva möjliga kontrollåtgärder och beredskapsåtgärder under och efter utbyggnaden är. Den formella dataanalysen görs i **Datarapporten** för SR-Site. De slutsatser som beskrivs i det här avsnittet ges enbart i informativt syfte.

Förvarsdjup och förvarsområden

Motiv till och en beskrivning av referensutformningen och referenslayouten ges i föregående avsnitt. En analys av hur lämplig denna layout är utgör en del av SR-Site. En återkoppling till framtida etapper av förvarsprogrammet finns i avsnitten 15.5 och 15.6 i denna rapport.

De metoder och tekniker som implementerades under platsundersökningarna bedöms vara tillräckliga för att hantera återstående osäkerheter i den geologiska beskrivningen. Enbart smärre efterjusteringar av de tillgängliga områdena kommer att behövas. Osäkerheterna avseende riktningen för den största horisontella spänningen kan minskas betydligt bara genom att utföra lokala tester på djupet medan tillfarten byggs. Resultatet kan göra det nödvändigt att ändra riktningen på deponeringstunnlarna, men påverkar inte det fastställda djupet och förvarsområdenas allmänna lämplighet.

Kemiska förhållanden på platsen

Förvarsplatsen och dess layout har valts för att uppfylla de fastställda projekteringsförutsättningarna avseende de kemiska förhållandena. En analys av de faktiska kemiska förhållandena och – ännu viktigare – deras framtida utveckling utgör, tillsammans med en analys av betydelsen för säkerheten, en del av SR-Site och beskrivs i kapitel 10 i denna rapport.

Termiska förhållanden

För referensutformningen är det minsta avståndet mellan deponeringstunnlarnas centrumpunkter 40 m. Det minsta avståndet mellan deponeringshålens centrumpunkter är 6,0 m i RFM029 och 6,8 m i RFM045. Även om det inte finns några erfarenheter av uppvärmning av stora bergvolymer, är de analytiska och numeriska tekniker som används för att förutsäga värmeöverföring väl beprövade. Experiment i mindre skala har dessutom bekräftat de tillvägagångssätt som används för att verifiera avståndet mellan deponeringshålen i referensutformningen /Hökmark et al. 2009/. Det råder stor tilltro till den metod för termisk dimensionering som används för referenslayouten och det konstateras även att det finns stor potential för att detaljera utformningen för att ytterligare minska förvarets påverkan, när mer underjordiska data finns att tillgå. Den aktuella utformningens lämplighet har utvärderats ytterligare i SR-Site med hjälp av termiska data och andra egenskaper som analyserats i avsnitten 6.2 och 6.4 i **Datarapporten**, se avsnitt 10.3.4.

Ett effektivt sätt att säkerställa att de termiska egenskaperna fastställts på ett korrekt sätt är att kombinera geologisk kartering med olika mättekniker. De mättekniker och instrument som används för att bestämma bergets termiska egenskaper är väl beprövade. Fler detaljer avseende programmet för att utveckla verktyg för att utvärdera hur termiska egenskaper ska mätas och utvärderas beskrivs i ramprogrammet för detaljundersökningar /SKB 2010b/.

Minskning av jordskalvsrisken

Referensutformningen utvecklades i enlighet med de fastställda konstruktionsförutsättningarna och tar hänsyn till samtliga deterministiska deformationszoner och respektavstånd för deformationszoner med en spårlängd över 3 km. Deponeringspositionerna ligger inte i någon av de deterministiska zonerna och heller inte inom de angivna respektavstånden.

Läget för otillåtna sprickor som skär deponeringshål kan inte på det här stadiet fastställas deterministiskt, men lägena bör vara tillräckligt kända sedan deponeringstunnlarna har byggts och karakteriserats. I aktuella planer övervägs användningen av EFPC, se avsnitt 5.2.2.

Ett effektivt sätt att fastställa omfattningen av otillåtna sprickor och kritiska deformationszoner i bergutrymmen skulle vara att kombinera geologisk kartering med geofysiska tekniker, till exempel P-vågshastighetsmätning och markbaserad radar, se /Cosgrove et al. 2006/ och avsnitt 5.3.4 i **Berglinjerapporten**. De tekniker som redan provats under platsundersökningen bedöms i allt väsentligt vara tillräckliga. I det här skedet kan emellertid ingen särskild metod eller kombination av metoder rekommenderas. Metoden för att identifiera och karakterisera de sprickor som inte får skära deponeringspositionerna är därför preliminär. Vissa osäkerheter råder i referensutformningen avseende hur väl referensmetoden fungerar vad gäller tillämpningen av EFPC. Fler detaljer avseende programmet för att utveckla mätverktyg och metoder för att identifiera och utvärdera otillåtna sprickor som skär deponeringshål beskrivs i ramprogrammet för detaljundersökningar /SKB 2010b/.

Slutsatsen är att det bedöms vara rimligt att EFPC kan användas med gott resultat och att detta antagande kan användas i SR-Site-analysen. Även följden av att inte använda detta kriterium visas i analysen.

Hydrauliska förhållanden runt deponeringshål

De metoder som används för att uppskatta inflödet av grundvatten till bergutrymmena är väl beprövade inom hydrogeologin. Analytiska och numeriska metoder har använts för att uppskatta inflödet i referensutformningen. De numeriska modellerna kalibrerades med hjälp av hydrogeologiska mätningar på platsen. Därför råder tilltro till det uppskattade inflödet till bergutrymmena.

Den totala volym vatten som flödar in i ett godkänt deponeringshål måste vara mindre än 150 m^3 mellan installation av buffert och den tidpunkt då bufferten har vattenmättats. För den nuvarande referensutformningen görs bedömningen att konstruktionsförutsättningarna uppfylls om potentiella deponeringshål med inflöden på mindre än 0,1 l/s godtas. Den potentiella förlusten av deponeringshål på grund av detta kriterium har analyserats /SKB 2009c/. Sammanfattningsvis är den mest sannolika situationen att mycket få deponeringshål kommer att uteslutas på grund av höga inflöden, eftersom de flesta av de få positionerna med högt flöde troligen redan har sorterats bort med hjälp av det (modifierade) EFPC. I det mest extrema fallet, dvs med antagandet att denna utsortering inte är effektiv, skulle ytterligare 6 procent kunna uteslutas på grund av observerade inflöden som är högre än 0,1 l/s.

Det är relativt okomplicerat att mäta inflödet till deponeringshålen och att utvärdera initialtillståndet, se avsnitt 5.3.3 i **Berglinjerapporten**. Om de uppmätta inflödena inte överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna kommer deponeringshålet att uteslutas. Fler detaljer avseende programmet för att välja mättekniker för att utvärdera inflödena av vatten till deponeringshålen samt hur dessa kommer att mätas och utvärderas beskrivs i ramprogrammet för detaljundersökningar /SKB 2010b /.

Urvalskriterierna för deponeringshål kommer även att påverka flödesförhållandena i hålen efter förslutning. Detta gäller både EFPC, som främst har till uppgift att minska verkningarna av jordskalv, och uteslutandet av deponeringshål med höga inflöden.

En framgångsrik tillämpning av EFPC antas också vid de hydrogeologiska simuleringarna, dvs deponeringshål som skärs av sprickor som uppfyller EFPC utesluts. Deponeringshål som skärs av EFPC-sprickor utesluts emellertid oavsett om de skär kapseln eller inte, se figur 5-4 för detaljer.

Följande uteslutningskriterium relaterat till transmissivitet antas också i SR-Site: Ett inflöde av 0,1 l/s kan ske från en lång spricka vid en transmissivitet av $4 \cdot 10^{-9}$ m^2/s /Smith et al. 2007, Appendix B2/. Med tanke på att inflödet kan begränsas av exempelvis skärande sprickor och lokala flödesförändringar i gränssnittet mellan bergmatris och tunnel (skin effects) har det i SR-Site gjorts bedömningen att det är för optimistiskt att anta att alla sprickor med en sådan transmissivitet skulle hittas med hjälp av inflödeskriteriet och därigenom kunna undvikas vid valet av positioner för deponeringshål. Dock bedöms det berättigat att anta att mycket långa och högtransmissiva sprickor skulle upptäckas. I SR-Site antas att sprickor, eller rättare sagt små deformationszoner, med en radie större än 250 m och med en effektiv transmissivitet större än 10^{-6} m^2/s kommer att upptäckas under detaljundersökningarna så att deponeringspositioner som skärs av sådana strukturer kan undvikas. Sådana sprickor skulle kunna orsaka ett inflöde i storleksordningen 25 l/min. Dessutom skulle de vara lätta att upptäcka med hjälp av lokala geofysiska undersökningar och andra metoder som används inom detaljundersökningsprogrammet. Storleksbegränsningen 250 m är densamma som tillämpas vid utvärdering av vilka deponeringspositioner som är känsliga för skjuvrörelser, se avsnitt 10.4.5. Transmissivitetsgränsen på 10^{-6} m^2/s anses vara försiktigt satt, med tanke på egenskaperna hos en sådan spricka, vilka diskuteras ovan. Vid alla hydrogeologiska beräkningar är kriteriet transmissivitet/längd (T/L) inkluderat i EFPC, om inte annat anges. (I avsnitt 14.3 visas att detta extra T/L-kriterium har en mycket mer begränsad inverkan än det ”rena” EFPC.)

Urvalskriterierna för deponeringshål kan komma att revideras utifrån de resultat som framkom vid analysen i SR-Site och som presenteras senare i denna rapport. Detta diskuteras vidare i avsnitten 14.3 och 15.5 i denna rapport.

Deponeringshålens geometri

Resultaten från vertikal fullortsborrning av tio deponeringshål i Äspölaboratoriet användes för att undersöka prestanda hos referensmetoden för att driva deponeringshål. Variabiliteten hos den genomsnittliga tvärsnittsdiametern i förhållande till deponeringshålens medeldiameter ligger väl inom gällande accepterade geometriska toleranser.

Ett effektivt sätt att säkerställa att de geometriska toleranserna uppfylls skulle vara att kombinera kvalitetssäkring av arbetet med mättekniker för att fastställa de befintliga dimensionerna. Det finns metoder och instrument som är potentiellt lämpliga för att mäta deponeringshålens geometri efter berguttaget, exempelvis laserskanning och geodetiska metoder. De nuvarande metoderna betraktas emellertid som konceptuella. Även om de grundar sig på beprövad teknik krävs troligen i viss utsträckning ny teknik och utveckling för att åstadkomma en lämplig fältmetod. Detta behandlas i avsnitt 5.3.2 i **Berglinjerapporten**.

EDZ i deponeringshål

I en omfattande litteraturstudie /Bäckblom 2009/ såväl som i avsnitt 5.3.1 i **Berglinjerapporten** dras slutsatsen att för mekaniska berguttagstekniker vid elastiska bergförhållanden, dvs vertikal fullortsborrning, begränsas den skadade zonens (EDZ) djup till några få centimeter i det berg som omger deponeringshålet. Den hydrauliska konduktiviteten i en sådan zon är i storleksordningen 10^{-10} m/s eller mindre. Tilltron är hög till att elastiska bergförhållanden råder för referensutformningen. Följaktligen bör transmissiviteten för skadade zoner i deponeringshålen vara mindre än 10^{-10} m^2/s – om sådana zoner över huvud taget finns.

Storleksordningen på den effektiva konnekterade transmissiviteten kan förändras på grund av spjälkning. Även om det råder stor tilltro till den metod som använts för att analysera risken för spjälkning vid referensutformningen, finns osäkerheter relaterade till de lokala spänningsförhållandena och till bergets egenskaper. Det begränsar i detta skede möjligheterna att modellera graden av spjälkning och den tillhörande förändringen av transmissivitet. Uppskattningsvis 100–200 deponeringshål (av cirka 6 000) skulle utsättas för spjälkningsdjup som överskrider 5 cm, se figur 5-5. Eftersom analysmetoden är empiriskt baserad kommer ytterligare undersökningar att behöva göras på förvarsnivå för att bekräfta de antaganden som gjorts vid projekteringen. Mer information om programmet för att utveckla metoder och tekniker för att utvärdera spänningen på förvarsnivån beskrivs i /SKB 2010b/.

Om spjälkning inträffar bör löst bergmaterial från konstaterad spjälkning på bergväggarna avlägsnas. Den yttersta beredskapsåtgärden är att utesluta deponeringshålet. Sammanfattningsvis bör spjälkning före deponering inte påverka de godkända deponeringshålens geometri utanför de fastställda marginalerna.

Skadad zon (EDZ) i deponeringstunnlar och andra utrymmen

Den potentiella utvecklingen av en skadad zon i bergutrymmen som kommit till genom borrning och sprängning behandlas i avsnitt 5.2.1 i **Berglinjerapporten**. I /Bäckblom 2009/, en referens till **Berglinjerapporten**, konstateras att skadan enligt många studier är korrelerad med den mängd sprängämnen som använts. Noggrannheten och precisionen vid borrning av spränghålen är lika viktig, och även användningen av exakta tändtider, exempelvis med hjälp av elektroniska detonatorer /Christiansson et al. 2009/. Även lokala geologiska förhållanden och bergets spänningssituation kommer att påverka den uppkomna skadade zonen /Jonsson et al. 2009/.

Det har betydelse om de sprickor som uppstått på grund av berguttaget bildar ett sammanhängande nätverk eller inte. Inga konduktiva EDZ kommer att uppstå om så inte är fallet. Baserat på erfarenheter från drivningen av TASQ-tunneln vid Äspölaboratoriet /Olsson et al. 2004/ gjordes i SR-Can-analysen observationen att det är möjligt att utforma och styra borrningen och sprängningen av tunnlar så att kontinuerlig sprickbildning längs med tunnelns axiella riktning inte utvecklas. Detta har nu visats vid Äspölaboratoriet i TASS-tunneln genom användning av skonsamma sprängningstekniker /Olsson et al. 2009/ och /Ericsson et al. 2009/. Resultaten visade att vederbörlig reglering av borr- och sprängrutinerna resulterade i sprängningsinducerade sprickor med en övervägande radiell riktning och att sådana sprickor inte är kontinuerliga längs med tunnelns axiella riktning över någon betydande sträcka.

Om en sammanhängande zon över huvud taget utvecklas, ligger ett rimligt värde på den hydrauliska konduktiviteten i den skadade zonen i storleksordningen 10^{-8} m/s. Denna storleksordning har erhållits vid flera prov i kristallint berg där berguttaget var av hög kvalitet, och uppmättes genom integrerad mätning under mättade förhållanden längs med tunnelsulan /Bäckblom 2009/. Punktobservationer av den hydrauliska konduktiviteten har gett enskilda resultat som är både lägre och högre. Detta beror på den naturliga variabiliteten hos bergets egenskaper, såväl som av det faktum att skadan är korrelerad

till mängden sprängämne. Det sistnämna varierar längs med öppningens omkrets och även längs med tunnels längsgående del. Egenskaperna hos en skadad zon, som omger ett bergutrymme, förändras om spjälkning inträffar. Resultaten från några större experiment tyder på att den hydrauliska konduktiviteten kommer att vara i storleksordningen 10^{-6} m/s och att sådana zoner sträcker sig ett par decimeter in i det berg som omger bergutrymmet /Bäckblom 2009/.

För närvarande finns det ingen tillförlitlig direkt metod som kan kvantifiera den effektiva konnekterade transmissiviteten längs en tunnel, förutom att bedöma sannolikheten för att ingen kontinuerlig EDZ har utvecklats över huvud taget. SKB planerar att utveckla flera rutiner för att säkerställa att skador i deponeringstunnlarna inte blir mer omfattande än vad som anges i konstruktionsförutsättningarna. Rutiner för att kontrollera och inspektera borrnings-, laddnings-, och tändsekvenserna kommer att utvecklas och inkluderas i kvalitetssäkringsprogrammet för bergutrymmen. Inverkan från berg-förhållandena på EDZ kommer att utvärderas inom ramverket för observationsmetoden och åtföljande observationsprogram, dvs genom att kombinera resultat från geologisk karakterisering, geofysiska tekniker och geologisk modellering. Sannolikheten för spjälkning har dessutom minskats, eftersom deponeringstunnlarna är riktade subparallellt med den största horisontella spänningen.

Om den effektiva konnekterade transmissiviteten som orsakas av EDZ inte uppfyller konstruktions-förutsättningarna är beredskapsåtgärden att ta bort allt löst bergmaterial som finns kvar på berg-väggarna. Den yttersta beredskapsåtgärden är att utesluta deponeringstunneln.

Sammanfattningsvis finns det fullt tillräckliga argument för att transmissiviteten hos den skadade zonen kommer att kunna hållas under den tillåtna nivå som fastställts i konstruktionsförutsätt-ningarna. Studier som utförts visar att en kontinuerlig EDZ inte kommer att utvecklas. Detta till trots är det motiverat att analysera hur transmissiv en EDZ behöver vara för att markant påverka andra säkerhetsfunktioner. Anledningen till detta är att förekomsten av skadade zoner för närvarande bara kan kontrolleras genom indirekta mätningar. Den lokala spänningsminskningen nära tunneln kan dessutom öppna sprickor parallellt med den, vilket analyseras vidare i avsnitt 10.2.2. Ytterligare diskussioner i detta ämne, tillsammans med indata för SR-Site, finns i avsnitt 6.5 i **Datarapporten**.

Deponeringstunnelns geometri

I avsnitt 6.3.2 i **Berglinjerapporten**, dras slutsatsen att konstruktionsförutsättningarna avseende tunnelgeometrin, som styrs av kraven på återfyllningen, sannolikt uppfylls med hjälp av befintlig teknik. Avvikelser kan emellertid inte uteslutas helt och metoder för att inspektera geometrin och hantera eventuella avvikelser behövs. Det finns väl beprövade och demonstrerade tekniker, som är lämpliga för att mäta deponeringstunnlarnas geometri efter berguttag. Om de faktiska dimensionerna inte överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna, är den aktuella beredskapsåtgärden för maximal tvärsnittsyta och maximal volym att lägga på sprutbetong och jämna ut bergytan för att hantera alla slags oregelbundenheter eller infallande berg. Om konstruktionsförutsättningarna för minsta tvärsnitt inte uppfylls på grund av förekomsten av underberg är beredskapsåtgärden att ta bort det med hjälp av mekanisk standardutrustning. Den yttersta beredskapsåtgärden är att utesluta deponeringstunneln.

Injektering, förstärkning och kvarlämnat material

I avsnitt 4.6 i **Berglinjerapporten** dras följande slutsatser:

- Enligt referensutformningen används cement i sprutbetongsförstärkning för att innesluta diverse bergförstärkningselement och i injekteringsblandningar för tätningsändamål. Olika recept som ger ett porvatten med pH < 11 utvecklades med syftet att injektera i bergarter med potential för icke tillåtna inflöden, såväl som för bergförstärkningselement som behöver inneslutas i cement. Sammansättningen och mängden av det material som används för bergförstärkning och för injektering anges i tabellerna 4-1 och 4-2 i **Berglinjerapporten**.
- Mängder av kvarlämnat material som finns i berget från injekteringsåtgärder kommer att utgöra en del av slutförvarsanläggningen. De mängder som beräknas finnas då slutförvarsanläggningen är färdig anges i tabell 4-3 i **Berglinjerapporten**. De uppskattade mängderna innehåller cement, silica fume, silica sol och tillsatser.

- Den förmodade mängden injektering förväntas inte resultera i överlappande borrhål utanför tunnelns profil i sådan grad att dessa kan betraktas som kontinuerliga i förhållande till deponeringstunnelns längd.
- Väl beprövade och tillförlitliga, empiriska, analytiska och numeriska metoder användes för att analysera bergutrymmenas stabilitet och den bergförstärkning som behövs för bergutrymmen i referensutformningens layout. Analysen av deponeringstunnlarna ger slutsatsen att sammanhängande sprutbetong inte behövs för de bergkvaliteter som förutses. Den analyserade sammansättningen och mängden av konstruktionsmaterial som förknippas med bergförstärkning beskrivs i tabell 4-1 i **Berglinjerapporten**.

Deponeringstunnelns inflöden

I avsnitt 6.3.2 i **Berglinjerapporten** kommer man fram till att frekvensen av öppna vattenförande sprickor på förvarsdjup, som uppskattas vara runt 0,005 per meter, pekar på att i genomsnitt mindre än 2 procent av sektionerna på 20 m mellan deformationszonerna kommer att kräva injektering /SKB 2009b/. Emellertid finns det en viss osäkerhet förknippad med injekteringsmetoderna och den mängd arbete som behövs för att lokalisera vattenförande sprickor, särskilt om de har relativt små sprickvidder med kanaliserat flöde. De injekteringsmängder som man beräknar behövs för att minska inflödet till tillåtna nivåer, är baserade på en kombination av cementbaserade injekteringsblandningar och lösningsinjektering med silica sol. De mängder av konstruktionsmaterial från injekteringsarbeten som man beräknar skulle ligga kvar i slutförvaret, visas i tabell 4-2 i **Berglinjerapporten**. Det råder tilltro till förmågan att detektera ifall inflödet till deponeringstunnlarna uppfyller konstruktionsförutsättningarna eller inte. Om inflödet inte uppfyller konstruktionsförutsättningarna kommer efterinjektering att utföras som en beredskapsåtgärd. Mer information om programmet för att utveckla mättekniker för att utvärdera vatteninflödet till deponeringstunnlarna finns i /SKB 2010b/.

5.3 Initialtillstånd för bränslet och kapselns hålrum

5.3.1 Krav på hanteringen av det använda kärnbränslet

Allt använt kärnbränsle från det nu godkända svenska kärnbränsleprogrammet ska deponeras i KBS-3-förvaret. Enbart använt kärnbränsle i oxidform eller med liknande löslighet accepteras för deponering i KBS-3-förvaret. I **Bränslerapporten** fastställdes den maximala anrikningen till 5 procent samt den maximala medelutbränningen av bränsleelementen till 60 MWd/kg U för uranoxidbränsle (UOX) respektive 50 MWd/kg U för bränsle bestående av blandade oxider (MOX).

Det finns ett antal krav på hanteringen av använt kärnbränsle vilka är relaterade till den slutliga deponeringen i KBS-3-förvaret, se kapitel 3 i **Bränslerapporten**. De krav och kriterier för hanteringen som har störst betydelse för den långsiktiga säkerheten är följande:

- De bränsleelement som ska kapslas in i varje enskild kapsel ska väljas ut med avseende på utbränning och ålder så att kapselns totala resteffekt inte kommer att leda till temperaturer som överstiger den högsta tillåtna temperaturen i bufferten. Den totala resteffekten i varje kapsel får inte överskrida 1 700 W.
- De bränsleelement som ska kapslas in ska väljas ut med avseende på anrikning, utbränning, geometri och material så att kriticitet inte uppstår under hanteringen och förvaringen av kapslarna, även om kapslarna vattenfylls. Den effektiva multiplikationsfaktorn (k_{eff}) får inte överstiga 0,95, efter att hänsyn också tagits till osäkerheter.
- Innan bränsleelementen placeras i kapseln ska de torkas för att säkerställa att den tillåtna vattenmängd som angivits som en konstruktionsförutsättning för kapseln inte överskrids. Den mängd vatten som finns kvar i varje kapsel ska vara mindre än 600 g.
- Innan kapseln slutligen försluts ska atmosfären i insatsen ändras så att tillåtna kemiska förhållanden säkerställs. Atmosfären i kapselinsatsen ska bestå av minst 90 procent argon.
- Kontroll bör ske av att doshastigheten vid kapselytan inte överskrider den nivå som används som utgångspunkt vid analysen av den långsiktiga säkerheten. Doshastigheten vid kapselytan får inte överskrida 1 Gy/h.

5.3.2 Bränsletyper och bränslemängder

Bränsle av BWR- och PWR-typ

Huvuddelen av det kärnbränsle som ska deponeras består av använt kärnbränsle från driften av tolv svenska kärnreaktorer, som antingen är av typen kokvattenreaktor (Boiling Water Reactor, BWR) eller av typen tryckvattenreaktor (Pressure Water Reactor, PWR). Bränsletyperna och bränslemängderna härrör från det använda kärnbränsle som förvarades i Clab den 31 december 2007 samt från ett referensscenario för den framtida driften av de tio återstående reaktorerna. I referensscenariot sätts drifttiderna till 50 år för de fyra reaktorerna vid Ringhals och de tre vid Forsmark, samt till 60 år för de tre reaktorerna i Oskarshamn. De två reaktorerna i Barsebäck stängdes efter ungefär 24 respektive 28 års drift. Huvuddelen av det bränsle som används i reaktorerna består av uranoxid (UOX). Från Oskarshamn kommer det att finnas mindre mängder bränsle med blandade oxider (MOX).

För att kunna uppskatta hur många använda bränsleelement som uppstår som följd av den framtida driften av kärnkraftsanläggningarna, måste såväl det planerade riktvärdet för utbränning av bränsleelementen som den termiska effekten vara kända. I allmänhet planerar man vid kärnkraftverken för att öka utbränningen från ungefär 45 MWd/kg U till ungefär 55 MWd/kg U.

Antalet bränsleelement som avlägsnats från de svenska kärnkraftverken och som fanns förvarade i mellanlagret i slutet av 2007, samt det uppskattade totala antalet bränsleelement för referensscenariot avseende framtida drift av reaktorerna anges i tabell 5-2. I tabellen anges också den motsvarande uppskattade mängden uran eller tungmetall uttryckt som initialvikten i ton. Som framgår av tabellen är den totala mängd bränsle som genereras i referensscenariot omkring 11 100 ton (uttryckt som ton U eller HM (heavy metal) i initialbränslet). Observera att detta är något lägre än de 12 000 ton (U eller HM) som anges i tillståndsansökningarna.

Övriga bränslen

Det finns också mindre mängder av andra typer av oxidbränslen från forskningsprogram och från den tidiga delen av kärnkraftsprogrammet vilka ska deponeras i KBS-3-förvaret. Dessa bränslen kallas i fortsättningen *övriga bränslen*.

Mängden övriga bränslen och, om tillämpligt, antalet bränsleelement i mellanlagret, liksom den uppskattade totala mängden uran eller HM, uttryckt som ton initialvikt, anges i tabell 5-3.

Tabell 5-2. Använt kärnbränsle som härrör från drift av kärnkraftverken och som förvaras i mellanlagret, Clab, samt totalmängder som uppskattats för SKB:s referensscenario. Informationen om det bränsle som förvaras i Clab är baserad på Clabs redovisningssystem för kärnämneskontroll.

Bränsletyp	Antal i mellanlager (31 december 2007)	Totalantal för SKB:s referensscenario /SKBdoc 1221567/	Total initialvikt för referensscenariot (ton U eller HM = tungmetall)
Bränsleelement av BWR-typ från drift av kärnkraftverken i Barsebäck, Oskarshamn, Forsmark och Ringhals	21 194[1,2)]	47 498[3,4)]	8 312[5)]
Bränsleelement av PWR-typ från drift av kärnkraftverket i Ringhals	2 552	6 016	2 791[6)]

[1)] Bränslekanalerna har avlägsnats från 1 520 av BWR-elementen.

[2)] Inklusive tre BWR MOX-element som förvarats i Oskarshamns kärnkraftverk.

[3)] Inklusive 83 BWR MOX-element från Oskarshamns kärnkraftverk.

[4)] Inklusive stavkassetter, dvs nedmonterade bränslestavar placerade i stavkassetter.

[5)] Enligt antagande 175 kg U/HM per bränsleelement.

[6)] Enligt antagande 464 kg U per bränsleelement.

Tabell 5-3. Övriga oxidbränslen förvarade i mellanlagret, Clab, samt totalmängder som uppskattats för SKB:s referensscenario. Informationen om det bränsle som förvaras i Clab är baserad på Clabs redovisningssystem för kärnämneskontroll.

Bränsletyp	Antal i mellanlager (31 december 2007)	Totalantal för SKB:s referensscenario	Total initialvikt för referens-scenariot (ton U eller ton HM)
Bränsleelement från den demonterade trycksatta tungvattenreaktorn i Ågesta	222 (1 obestrålad)	222 (1 obestrålad)	20
MOX-enheter via inbyte (BWR)[1)]	184	184	14,1
MOX-enheter via inbyte (PWR)[1)]	33	33	8,4
Bränslerester i specialboxar från Studsvik	19	Ungefär 25	3
Skadat bränsle i skyddsboxar[2)]	0	–	–

[1)] En del använt kärnbränsle från Ringhals och Barsebäck skickades tidigare till La Hague för upparbetning. Detta använda bränsle byttes 1986 ut mot tyskt använt bränsle av MOX-typ i form av lika mängder plutonium.

[2)] Bränsleelement som är skadade på ett sådant sätt att material kan falla av placeras i skyddsboxar under förvaring. För närvarande finns det inte något sådant bränsle. Det finns dock bränsleelement med läckande stavar.

5.3.3 Hantering

Hanteringen av det använda kärnbränslet omfattar följande huvudsteg:

- Transport av bränsleelementen från kärnkraftverket till mellanlagret, Clab (senare Clink).
- Mellanlagring under normalt 30–40 år.
- Urval av bränsleelement för inkapsling, transport till inkapslingsanläggningen och torkning av bränsleelementen.
- Inkapsling, bestående av inplacering i kapseln och atmosfärsbyte i kapselinsatsen innan kopparkapseln försluts.

Mellanlagring och inkapsling av det använda kärnbränslet äger rum i den centrala mellanlagrings- och inkapslingsanläggningen Clink (Central interim storage and encapsulation plant). Clink kommer att bestå av det nuvarande mellanlagret – Clab – och den inkapslingsanläggning som ska byggas i anslutning till Clab. De olika stegen beskrivs mer utförligt i **Bränslerapporten**.

5.3.4 Initialtillstånd

Inkapslat använt kärnbränsle är det använda kärnbränsle som inkapslats för deponering i KBS-3-förvaret. De gaser och vätskor som förekommer i kapselns och bränsleelementens hålrum anses vara en del av det inkapslade använda kärnbränslet. Det inkapslade använda kärnbränslets initialtillstånd avser det använda kärnbränslets egenskaper samt de gaser och vätskor som förekommer i kapselns hålrum när kapseln slutligen försluts och det inte längre är möjligt att hantera de enskilda bränsleelementen.

Radionuklidinventarium

Vid förslutning av det slutliga förvaret kommer historiken som rör utbränning, bestrålning och effekt, liksom bränsleelementens ålder, att vara känd för varje kapsel och radionuklidinventariet kan beräknas enskilt för varje kapsel. För närvarande är det dock inte möjligt att beräkna inventariet i enskilda kapslar. För att ge en tillräcklig uppfattning om variationerna i inventarium mellan kapslarna har man fastställt en uppsättning typkapslar, som omfattas av villkoret att den totala resteffekten för de inkapslade elementen inte får överskrida 1 700 W. Detta villkor kommer att begränsa antalet möjliga kombinationer av bränsleelementens utbränning och ålder och därmed variationen i radionuklidinventarium. Typkapslarna ska på ett representativt och tillräckligt sätt återge kapselns bränslemängd, dess utbränning och ålder samt resulterande radionuklidinventarium i varje kapsel.

Radionuklidinventariet i en kapsel kommer att bero på antalet bränsleelement i kapseln, utbränningen av bränsleelementen och deras ålder när de kapslas in.

Bränsleelementens utbränning och deras antal kommer att vara de parametrar som har störst betydelse för radionuklidinventariet. Ur ett långtidsperspektiv är bränslets ålder vid deponering av mindre betydelse för radionuklidinventariet, eftersom de kortlivade nuklider som har betydelse för resteffekten kommer att ha sönderfallit.

De utvalda åldrarna och utbränningsgraderna hos bränsleelementen i typkapslarna grundar sig på resultaten av en simulering av det inkapslingsförfarande som presenteras i avsnitt 5.2 i **Bränslerapporten**. Följande typkapslar har valts ut som grund för att återge inventariet av radionuklider i enskilda kapslar:

- BWR I: representerar huvuddelen av BWR-kapslarna.
- BWR II: representerar det maximala radionuklidinnehållet i BWR-kapslar.
- BWR III: representerar de delvis fyllda BWR-kapslarna[10].
- BWR-MOX: representerar BWR-kapslar som innehåller bränsleelement av MOX-typ.
- PWR I: representerar huvuddelen av PWR-kapslarna.
- PWR II: representerar det maximala radionuklidinventariet i PWR-kapslar.
- PWR III: representerar de delvis fyllda PWR-kapslarna.
- PWR-MOX: representerar PWR-kapslar som innehåller bränsleelement av MOX-typ.

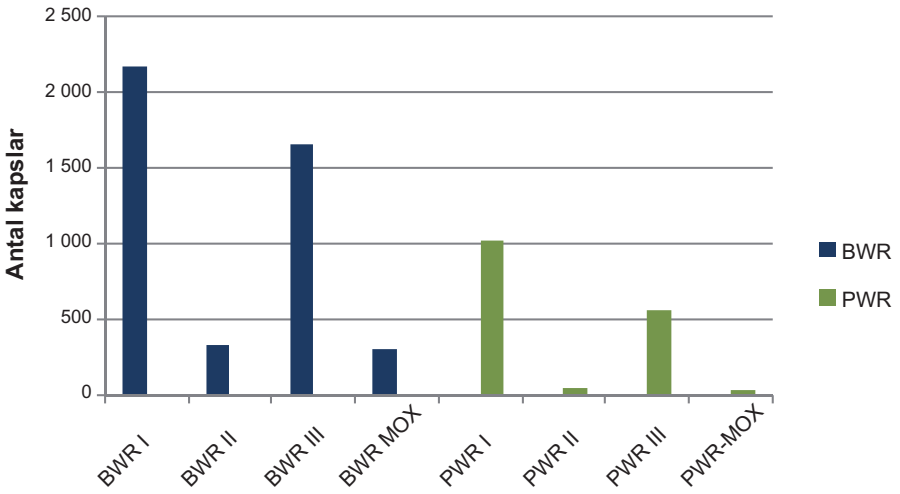
De olika typkapslarnas totalantal visas i figur 5-7.

För att kontrollera att typkapslarna ger en representativ och tillräcklig återgivning av det totala radionuklidinventariet i förvaret har man jämfört det sammanlagda totalinventariet i alla typkapslarna med det totala radionuklidinventarium som beräknats för referensscenariot avseende driften av kärnkraftverken. Det erhållna totala inventariet av tretton radionuklider – som har betydelse för resteffekten, radiotoxiciteten och den beräknade långsiktiga risken – samt det summerade inventariet av alla nuklider presenteras i tabell 5-4. Tabellen visar det sammanlagda inventariet i alla de olika typkapslarna, liksom i alla kapslar i förvaret oberoende av kapseltyp. Som framgår av tabellen överskrider det totala inventariet i typkapslarna i någon mån det totala inventariet i referensscenariot, vilket motiverar denna aspekt av metodiken med typkapslar. Fler detaljer kring dessa beräkningar redovisas i **Bränslerapporten**.

Tabell 5-4. Totalinventariet (Bq) av 13 radionuklider som har betydelse för resteffekt, radiotoxicitet och beräknad långsiktig risk i alla typkapslar och alla kapslar i förvaret (beräknat för inkapslingsåret) jämfört med det totalinventarium som beräknats för kalenderåret 2045 för referensscenariot avseende driften av kärnkraftverken, se tabell 6-3 i Bränslerapporten. Observera att beräkningarna i SR-Site omfattar många fler nuklider än de som tas upp i den här tabellen. Hela nuklidinventariet finns i Datarapporten.

Radionuklid	BWR I	BWR II	BWR III	BWR-MOX	PWR I	PWR II	PWR III	PWR-MOX	Totalt i alla typkapslar	Totalt för referensscenariot
Am-241	$6{,}6\cdot10^{17}$	$1{,}1\cdot10^{17}$	$3{,}9\cdot10^{17}$	$1{,}2\cdot10^{17}$	$3{,}3\cdot10^{17}$	$1{,}5\cdot10^{16}$	$1{,}5\cdot10^{17}$	$1{,}2\cdot10^{16}$	$1{,}8\cdot10^{18}$	$1{,}7\cdot10^{18}$
C-14	$2{,}2\cdot10^{14}$	$3{,}7\cdot10^{13}$	$1{,}5\cdot10^{14}$	$2{,}6\cdot10^{13}$	$7{,}3\cdot10^{13}$	$3{,}3\cdot10^{12}$	$3{,}6\cdot10^{13}$	$2{,}2\cdot10^{12}$	$5{,}5\cdot10^{14}$	$5{,}2\cdot10^{14}$
Cl-36	$1{,}0\cdot10^{12}$	$1{,}9\cdot10^{11}$	$7{,}3\cdot10^{11}$	$1{,}1\cdot10^{11}$	$3{,}4\cdot10^{11}$	$1{,}7\cdot10^{10}$	$1{,}8\cdot10^{11}$	$9{,}6\cdot10^{09}$	$2{,}6\cdot10^{12}$	$2{,}3\cdot10^{12}$
Cs-137	$9{,}3\cdot10^{18}$	$1{,}2\cdot10^{18}$	$6{,}9\cdot10^{18}$	$9{,}3\cdot10^{17}$	$4{,}2\cdot10^{18}$	$1{,}3\cdot10^{17}$	$2{,}1\cdot10^{18}$	$1{,}3\cdot10^{17}$	$2{,}5\cdot10^{19}$	$2{,}3\cdot10^{19}$
I-129	$5{,}6\cdot10^{12}$	$9{,}8\cdot10^{11}$	$3{,}8\cdot10^{12}$	$6{,}7\cdot10^{11}$	$2{,}6\cdot10^{12}$	$1{,}2\cdot10^{11}$	$1{,}4\cdot10^{12}$	$7{,}5\cdot10^{10}$	$1{,}5\cdot10^{13}$	$1{,}4\cdot10^{13}$
Nb-94	$2{,}0\cdot10^{13}$	$3{,}4\cdot10^{12}$	$1{,}3\cdot10^{13}$	$2{,}3\cdot10^{12}$	$6{,}1\cdot10^{14}$	$2{,}6\cdot10^{13}$	$2{,}8\cdot10^{14}$	$1{,}9\cdot10^{13}$	$9{,}8\cdot10^{14}$	$9{,}3\cdot10^{14}$
Pu-238	$5{,}3\cdot10^{17}$	$1{,}0\cdot10^{17}$	$4{,}4\cdot10^{17}$	$6{,}9\cdot10^{16}$	$2{,}5\cdot10^{17}$	$1{,}3\cdot10^{16}$	$1{,}7\cdot10^{17}$	$8{,}0\cdot10^{15}$	$1{,}6\cdot10^{18}$	$1{,}3\cdot10^{18}$
Pu-239	$5{,}6\cdot10^{16}$	$8{,}0\cdot10^{15}$	$3{,}1\cdot10^{16}$	$8{,}8\cdot10^{15}$	$2{,}6\cdot10^{16}$	$9{,}6\cdot10^{14}$	$1{,}1\cdot10^{16}$	$8{,}5\cdot10^{14}$	$1{,}4\cdot10^{17}$	$1{,}4\cdot10^{17}$
Pu-240	$1{,}0\cdot10^{17}$	$1{,}7\cdot10^{16}$	$6{,}6\cdot10^{16}$	$1{,}7\cdot10^{16}$	$4{,}2\cdot10^{16}$	$1{,}9\cdot10^{15}$	$2{,}1\cdot10^{16}$	$1{,}6\cdot10^{15}$	$2{,}7\cdot10^{17}$	$2{,}5\cdot10^{17}$
Pu-241	$4{,}0\cdot10^{18}$	$3{,}7\cdot10^{17}$	$3{,}2\cdot10^{18}$	$4{,}5\cdot10^{17}$	$1{,}9\cdot10^{18}$	$3{,}5\cdot10^{16}$	$1{,}0\cdot10^{18}$	$7{,}2\cdot10^{16}$	$1{,}1\cdot10^{19}$	$1{,}1\cdot10^{19}$
Sr-90	$6{,}2\cdot10^{18}$	$7{,}6\cdot10^{17}$	$4{,}4\cdot10^{18}$	$6{,}0\cdot10^{17}$	$2{,}8\cdot10^{18}$	$8{,}0\cdot10^{16}$	$1{,}3\cdot10^{18}$	$8{,}2\cdot10^{16}$	$1{,}6\cdot10^{19}$	$1{,}6\cdot10^{19}$
U-234	$2{,}2\cdot10^{14}$	$3{,}7\cdot10^{13}$	$1{,}2\cdot10^{14}$	$3{,}0\cdot10^{13}$	$1{,}3\cdot10^{14}$	$5{,}5\cdot10^{12}$	$5{,}4\cdot10^{13}$	$3{,}4\cdot10^{12}$	$6{,}1\cdot10^{14}$	$6{,}0\cdot10^{14}$
U-238	$5{,}4\cdot10^{13}$	$7{,}8\cdot10^{12}$	$3{,}0\cdot10^{13}$	$6{,}5\cdot10^{12}$	$2{,}2\cdot10^{13}$	$8{,}0\cdot10^{11}$	$8{,}8\cdot10^{12}$	$6{,}3\cdot10^{11}$	$1{,}3\cdot10^{14}$	$1{,}3\cdot10^{14}$

[10] För att hålla den maximala värmeeffekten under 1700 W kan inte hela utrymmet utnyttjas i kapslar som innehåller bränsleelement med hög resteffekt.



Figur 5-7. *De olika typkapslarnas totala antal.*

Radionuklidinventariet i de olika typkapslarna för några av de mer betydelsefulla radionukliderna presenteras i tabell 5-4. Fullständigt inventarium finns i **Bränslerapporten** och i **Datarapporten**. Radionukliderna i inventariet återfinns i bränslet, i konstruktionsmaterialen i bränsleelementet, i avlagringen (crud) på bränsleinkapslingen och i styrstavar (PWR-kapslar).

En fraktion av radionuklidinventariet befinner sig i delar som antas frigöra radionukliderna snabbt i händelse av kapselbrott. Denna fraktion utgörs av radionuklider som befinner sig i alla delar av bränsleelementet förutom i bränslematrisen. Vissa ämnen, som ursprungligen bildades i bränslematrisen, är tillräckligt lättrörliga för att en fraktion av nuklidinventariet ska överföras till gapet mellan bränslet och bränsleinkapslingen och därmed bidra till den snabbt frigjorda fraktionen. Storleken av denna fraktion kan, för vissa grundämnen, uppskattas från uppmätt och beräknad frigörelse av fissionsgaser (Fission Gas Release, FGR) som Xe och Kr. Frigörelsen av fissionsgaser är starkt korrelerad till längdvärmeflödet, vilket i sin tur är beroende av kärnreaktorns termiska effekt, antalet bränsleelement och konfigurationen för dessa i reaktorhärden samt hur bränsleelementen utnyttjas under drift. Frigörelsen av fissionsgaser från bränsleelementen i de olika typkapslarna har uppskattats utifrån medelutbränningen av bränsleelementen i kapslarna. Den resulterande frigörelsen av fissionsgaser från bränsleelementen i typkapslarna anges i tabell 5-5.

Av alla relevanta radionuklider är Cl-36 bland de mest lättrörliga och fraktionen Cl-36 i gapet mellan bränslet och bränsleinkapsling är omkring tre gånger så stor som frigörelsen av fissionsgaser. Framför allt visar sig fraktionen med de mobila radionukliderna I-129, Cs-135 och Cs-137 ha en snabbt frigjord fraktion som är, som mest, lika stor som frigörelsen av fissionsgaser. Andra mindre rörliga radionuklider, som ursprungligen bildats i bränslematrisen (t ex Se-79, Sr-90, Tc-99, Pd-107 och Sn-126), visar sig också ha en snabbt frigjord fraktion. Tillgängliga lakningsdata tyder dock på att denna fraktion är mycket liten och inte uppvisar någon korrelation med frigörelsen av fissionsgaser. Den snabbt frigjorda fraktion som användes vid modelleringen i säkerhetsanalysen redovisas för alla nuklider i **Datarapporten**.

Tabell 5-5. Uppskattad frigörelse av fissionsgaser från bränsleelementen i de olika typkapslarna.

BWR-kapslar		**PWR-kapslar**	
Typkapsel	**FGR (%)**	**Typkapsel**	**FGR (%)**
BWR I	1,3	PWR I	2,9
BWR II	2,1	PWR II	7,8
BWR III	2,1	PWR III	7,8
BWR-MOX	2,3	PWR-MOX	2,9

Kriticitet

Bränsleelementen får inte under några omständigheter kapslas in om kriterierna för kriticitet inte kan uppfyllas. Kurvor som beskriver utbränning i förhållande till anrikning för att behålla ett underkritiskt läge och som är avsedda att kontrollera kriticiteten, har beräknats för både BWR- och PWR-kapslar. Vid beräkning av dessa kurvor har alla osäkerheter beträffande benägenheten för kriticitet systematiskt undersökts, enligt principer som tillämpas generellt för all hantering av kärnbränsle /SKBdoc 1193244/. Före inkapsling kontrolleras varje enskilt bränsleelement mot belastningskurvan. Om ett enskilt bränsleelement inte uppfyller acceptanskriterierna vid denna kontroll, kommer hela den utvalda uppsättningen av bränsleelement för inkapsling att inspekteras. Om det inte är möjligt att visa att den utvalda kombinationen av bränsleelement uppfyller kriterierna för kriticitet kommer ett nytt urval att göras. Om det inte skulle vara möjligt att kombinera ett enskilt bränsleelement med andra bränsleelement för att uppfylla kriterierna för kriticitet kan det kapslas in för sig i en egen kapsel. Den yttersta åtgärden kommer att vara en förändring i geometrin, dvs att bygga om bränsleelementet.

Beräkningarna av kriticitet är baserade på kapselns referensutformning, som begränsas av konstruktionsförutsättningar relaterade till kriticiteten. Dessa uttrycks i form av krav på geometrin och materialsammansättningen, se avsnitt 5.4.

Variabler för det använda kärnbränslet

I **Processrapporten för bränsle och kapsel** beskrivs det använda kärnbränslet i form av variablerna i tabell 5-6, som tillsammans karakteriserar det använda kärnbränslet på ett sätt som är adekvat för säkerhetsanalysen. Beskrivningen gäller inte endast själva bränslet, utan också hålrummen i kapseln. I det här avsnittet presenteras värdena på variablernas initialtillstånd.

Geometri

Geometrin hos representativa BWR- och PWR-element presenteras i **Bränslerapporten**. BWR-elementen innehåller mellan 60 och 100 bränslestavar. Bränslestavarna består av zirkoniumlegerade rör, fyllda med cylindriska bränslekutsar. Stavarna är anordnade i kvadratiska grupper som är inneslutna i en bränslekanal. Bränsleelementens tvärsnittsarea är omkring 0,141·0,141 m^2 och den totala längden kan vara upp till omkring 4,4 m. PWR-elementen innehåller 204 eller 264 bränslestavar som är ordnade i kvadratiska grupper. Tvärsnittsarean är cirka 0,214·0,214 m^2 och den totala längden är omkring 4,3 m.

Tabell 5-6. Variabler för bränsle/hålrum i kapsel.

Variabel	Definition
Geometri	Geometriska dimensioner hos bränsleelementets alla komponenter, såsom bränslekutsar och Zircaloyinkapslingen. Denna variabel omfattar även detaljerad geometri, inklusive sprickor i bränslekutsar.
Strålintensitet	Intensiteten hos alfa-, beta, gamma- och neutronstrålning i bränsleelementet som funktion av tid och rum.
Temperatur	Temperatur i bränsleelementet som funktion av tid och rum.
Hydrovariabler (tryck och flöde)	Flöden, volymer och tryck hos vatten och gas i hålrummen i bränslet och kapseln som funktion av tid och rum.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar i bränsleelementet som funktion av tid och rum.
Radionuklidinventarium	Förekomst av radionuklider i de olika delarna av bränsleelementet som funktion av tid och rum. Fördelningen av radionukliderna mellan kutsarnas matris och yta beskrivs också här.
Materialsammansättning	De material som de olika komponenterna i bränsleelementen består av, förutom radionuklider.
Vattensammansättning	Vattensammansättning (inklusive alla radionuklider och lösta gaser) i hålrummen i bränslet och kapseln.
Gassammansättning	Gassammansättning (inklusive alla radionuklider) i hålrummen i bränslet och kapseln.

Strålintensitet

Den högsta erhållna doshastighet som anges i **Bränslerapporten** är 0,18 Gy/h för begränsade områden på kapseln. Den här nivån beräknades för PWR-kapslar som innehåller fyra bränsleelement med en utbränning på 60 MWd/kg U och en ålder av 30 år, vilket skulle ge en mycket högre värmeeffekt än vad som kommer att tillåtas i förvaret. Källstyrkan för ett PWR-element – med en utbränning på 42,2 MWd/kg U efter 34,1 år enligt specifikationerna för typkapslarna – är $1{,}2 \cdot 10^{8}$/s för neutroner och $6{,}8 \cdot 10^{14}$/s för fotoner. En kapsel med fyra sådana element (1 700 MW) ger upphov till en högsta doshastighet av 115 mSv/h på kapselns yta och en högsta doshastighet för neutronstrålningen av 2,9 mSv/h.

Temperatur, hydrovariabler (tryck och flöde) och mekaniska spänningar

Initialtillstånden hos dessa variabler är beroende av den yttre omgivningen och analyseras i förekommande fall i SR-Site. För en intakt kapsel är det endast temperaturen som är relevant.

Materialsammansättning

En översikt av materialen i typiska BWR- och PWR-element ges i tabell 5-7. Det finns utförligare information i **Bränslerapporten** och i **Datarapporten**.

Fyra grundämnen är av särskilt intresse för att bedömda den långsiktiga säkerheten: kväve (N), klor (Cl), nickel (Ni) och niob (Nb). Anledningen är att dessa bildar radioaktiva isotoper via neutroninfångning under drift. Halten av nämnda grundämnen i konstruktionsmaterialen för ett PWR-element av typ Areva 17·17 och ett BWR-element av typ Svea 96 Optima 2 anges i tabell 5-8. Variabiliteten för dessa grundämnen i olika typer av BWR- och PWR-element som ska deponeras har undersökts genom slumpmässigt urval av ett antal bränsletyper och genom jämförelse av mängderna konstruktionsmaterial i dessa bränsleelement med mängderna i Svea 96 Optima 2 respektive Areva 17·17. Slutsatsen är att mängderna kommer att vara lika för alla BWR- respektive PWR-element.

Vatten- och gassammansättning

Innehållet av gaser och väskor beror på resultatet av torkning och gasutbyte. Det finns ingen anledning att anta att vatteninnehållet i kapslarna kommer att överskrida de 600 g som angivits som en förutsättning eller att argoninnehållet kommer att vara under den tillåtna nivån på 90 procent.

Tabell 5-7. Översikt över materialen i typiska BWR- och PWR-element (data baserade på specifikationer från kärnbränsleleverantörerna).

Materialsammansättning	BWR Svea 96 Optima 2	PWR Areva 17·17
	Vikt i ett bränsleelement (kg)	
Bränsle		
U-tot	175	464
O	23	62
Inkapslingsmaterial		
Zirkoniumlegeringar	49	108
Rostfritt stål	–	3
Bränslekanal		
Zirkoniumlegeringar	32	–
Rostfritt stål	8	–
Andra konstruktioner (botten- och topplatta, distansstycken osv)		
Rostfritt stål	5	12
Zirkoniumlegeringar	–	21
Nickellegeringar	1	2

Tabell 5-8. Innehållet av N, Cl, Ni och Nb i konstruktionsmaterialen för typiska BWR- och PWR-element.

Grundämne	Vikt i 1 bränsleelement (kg)						
	BWR Svea 96 Optima 2				PWR Areva 17·17		
	Kapsling	Annat	Bränslekanal	Totalt[1)]	Kapsling	Annat	Totalt[1)]
N	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$5{,}5 \cdot 10^{-3}$	$5{,}8 \cdot 10^{-3}$	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$
Cl		$6 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
Ni	$2 \cdot 10^{-2}$	1,1	0,86	1,99	0,27	2,19	2,46
Nb		$8{,}2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-3}$	1,08	$9 \cdot 10^{-2}$	1,17

[1)] Det totala värdet skiljer sig ibland från summan av de individuella bidragen på grund av avrundning.

5.4 Initialtillstånd för segjärnsinsats och kopparkapsel

5.4.1 Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet

Processen för att definiera konstruktionsförutsättningarna för kapseln är baserad på den översiktliga strategin som diskuteras i avsnitt 5.1.1 och som beskrivs i kapitel 2 i **Produktionsrapporten för kapseln**. Nedan sammanfattas de viktigaste konstruktionsförutsättningarna för kapseln, enligt definition i /SKB 2009a/:

- Kapseln ska motstå en isostatisk belastning på 45 MPa, vilket är summan av maximalt svälltryck och maximalt grundvattentryck.
- Kopparkorrosionsbarriären ska vara intakt efter en 5 cm skjuvrörelse med en hastighet på 1 m/s för buffertmaterialsegenskaper hos en Ca-bentonit[11] med en densitet på 2 050 kg/m^3, för alla positioner och vinklar hos skjuvsprickan i deponeringshålet och för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last.
- En nominell koppartjocklek på 5 cm, även beaktat svetsfogarna.
- Det använda bränslets egenskaper och den geometriska utformningen inuti kapseln ska dessutom vara sådana att kriticitet undviks om vatten skulle tränga in i en kapsel.

Konstruktionsförutsättningen att kapseln ska motstå isostatisk last omfattar även asymmetriska laster till följd av ojämn svällning av bentoniten. Tillfälliga asymmetriska laster kan uppkomma på grund av ojämn mättnad av bufferten eller på grund av oregelbundenheter i deponeringshålet. Oregelbundenheter i deponeringshålet kan även ge upphov till permanenta asymmetriska laster.

Det finns även vissa mer indirekta krav på materialets sammansättning och struktur, och på miljön i den förslutna kapseln. Dessa sammanfattas enligt följande.

- Gammastrålning orsakar hårdhet och sprödhet i segjärn. Kopparinnehåll i segjärn < 0,05 procent.
- Krypduktilitet: kornstorlek < 800 µm, fosforinnehåll i koppar: 30–100 ppm, svavelinnehåll i koppar < 12 ppm.
- Sprödhet hos koppar: Väteinnehåll < 0,6 ppm.
- Dessutom: Ett syreinnehåll på några tiotal ppm kan vara tillåtet i kopparn. Materialet som använts för provtillverkning har haft kravet < 5 ppm, och innan en ändring kan göras måste ytterligare provning genomföras.
- Mängden salpetersyra som kan bildas i insatsen ska begränsas genom att atmosfären i insatsen byts ut så att argonhalten blir > 90 procent. Den tillåtna vattenmängden i insatsen är fastställd till 600 g.

Det finns även konstruktionsförutsättningar för kapseln som beror av det använda bränslet, vilket utgör en ytterligare specificering av kravet att förhindra kriticitet:

- Materialsammansättningen för segjärnet ska vara: Fe > 90 procent, C < 4,5 procent och Si < 6 procent.

Tillverkningen och driften ger följande konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln:

- För att möjliggöra ultraljudsprovning ska medelkornstorleken vara mindre än 360 µm.

[11] Konstruktionsförutsättningarna rör en Ca-bentonit eftersom det pessimistiskt har antagits att referensbentonitmaterialet kommer att ombildas till den styvare Ca-bentoniten innan skjuvrörelsen inträffar.

5.4.2 Referensutformning och produktion

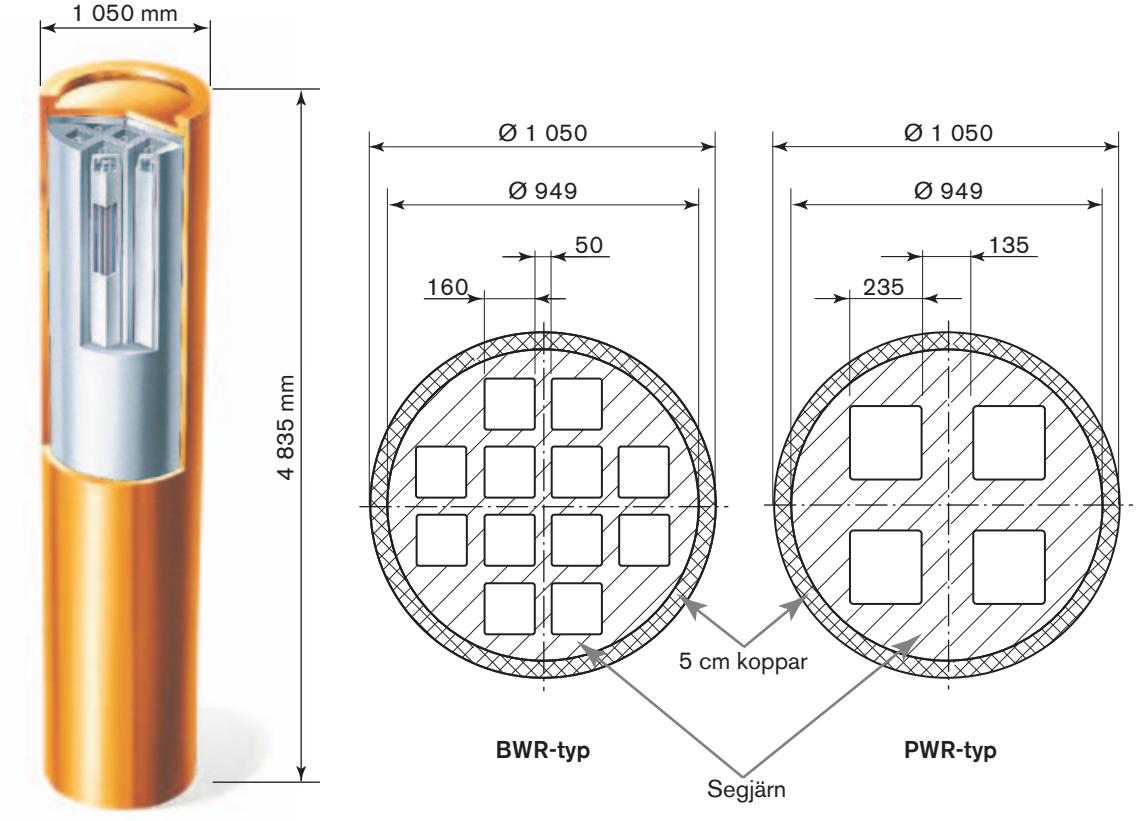
Referensutformningen specificerar den nuvarande kapselutformningen. Referensutformningen ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna och visas vara tekniskt möjlig att producera med tillverkningsmetoderna och att hantera med de metoder som används för inkapsling, transport och deponering. Referensutformningen beskrivs i detalj i kapitel 3 i **Produktionsrapporten för kapseln**, och produktionsmetoderna och kontrollrutinerna beskrivs i kapitel 5 i **Produktionsrapporten för kapseln**. Nedan ges en kort sammanfattning för att visa att produktions- och kontrollmetoderna resulterar i en kapsel som befinner sig inom de gränser som bestäms av referensutformningsparametrarna och på så sätt uppfyller konstruktionsförutsättningarna.

Referensutformning

Referensutformningen beskrivs av en uppsättning konstruktionsparametrar med givna nominella värden och tillåtna toleranser. I korthet består den nuvarande referensutformningen för kapseln av en tät korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. Den förslutna kapseln har en total längd på 4 835 mm och en diameter på 1 050 mm, se figur 5-8. Kopparhöljets tjocklek med tillåten tolerans för referensutformningen är:

- Kopparrör: 49 ±0,3 mm.
- Svetsfogar: 48,5 ±0,7 mm.
- Lock: 50 ±0,6 mm.
- Bottendel: 50 ±1,0 mm.

Två referenskapselutformningar har tagits fram, en för tolv bränsleelement av BWR-typ och en för fyra bränsleelement av PWR-typ, se figur 5-8. Kapselns maximala totalvikt, inklusive bränsle, är 24 600 kg för BWR-typen och 27 000 kg för PWR-typen. Andra typer av bränsleelement, se avsnitt 5.3.2, exempelvis inbytta MOX-element och bränsleelement från Ågesta, ryms i dessa kapselutformningar.



Figur 5-8. *Vänster: Referensutformningen med ett korrosionsbeständigt yttre kopparhölje och en lastbärande insats av segjärn. Höger: Tvärsnitt av insatsutformningar för BWR- och PWR-typerna.*

Kapseln består av en segjärnsinsats med en stålrörskassett för varje bränsleelement, stållock, kopparrör, kopparlock och kopparbottendel, se figur 5-9.

De verifierande analyser som diskuteras i kapitel 4 i **Produktionsrapporten för kapseln** har använts för att identifiera vilka av kapselns egenskaper som är viktiga för olika fall av belastningar och för att ange värden för de tillhörande konstruktionsparametrar för vilka referensutformningen överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna.

Både vid fallet med isostatisk belastning och vid fallet med skjuvbelastning analyseras dessutom skadetåligheten för referensutformningen för att fastställa tillåtna defekter i materialen. Det måste sedan visas att produktions- och kontrollrutinerna resulterar i kapslar som uppfyller dessa specifikationer.

Vid isostatisk belastning visar analysen av skadetåligheten att defekter med en storlek av ungefär 20 mm är tillåtna i den yttre delen av insatsen. Större defekter kan tillåtas i den inre delen utefter hela längden. Sådana defekter växer inte på ett sätt som äventyrar insatsens integritet vid en isostatisk last av 45 MPa. För bottendelen av insatsen kan axiellt riktade sprickliknande defekter med ett djup av upp till 80 procent av materialtjockleken tillåtas.

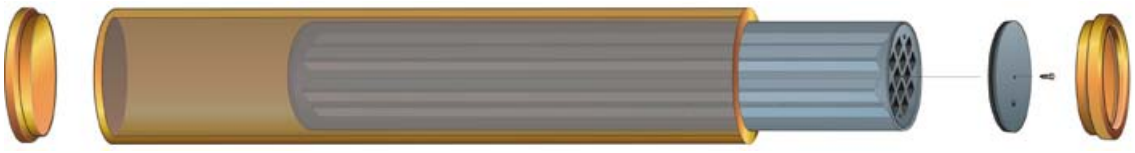
För skjuvlast är det största tillåtna djupet 4,5 mm för sprickliknande ytdefekter med halvelliptisk form. Motsvarande värde för en defekt med halvcirkulär form är 8,2 mm. Insatsen är mindre känslig för inre defekter. Tillåtna defekter kan vara större än 10 mm. Analyserna visar även att resultaten tydligt beror av buffertdensiteten. En lägre buffertdensitet betyder att större defekter kan tillåtas i insatsen.

Tillverkning och kontroll av insatser och stållock

Insatserna gjuts med tolv kanaler för BWR-element eller med fyra kanaler för PWR-element. Kassettens excentricitet i insatsen kontrolleras genom att kassettens läge relativt utsidan av insatsens mäts, både i toppen och i botten av insatsen. Yttre maskinell bearbetning och ultraljudsprovning utförs stegvis för att kontrollera insatserna, vilket följs av en slutlig kontroll av ytan.

Ett mått av avgörande betydelse för den mekaniska hållfasthet som krävs för att motstå maximal isostatisk last är insatsens kantavstånd (dvs avståndet mellan de yttre hörnen av kanalrören och insatsens mantelyta), se figur 5-8. Det angivna kantavståndet är 33,3 ±10 mm. Resultaten från provtillverkningen visar att tillverkade insatser uppfyller specifikationen (misspassning på 3–8 mm). Misspassningen under normal tillverkning antas vara ±5 mm. Sannolikheten för att den specificerade toleransen på ±10 mm överskrids betraktas som försumbar, baserat på det faktum att kassettens excentricitet kontrolleras med hjälp av ultraljudsmätning efter gjutningen, såväl som efter bearbetningen om kassetten inte är centrerad.

Vad gäller storleken på defekter visar resultat från provtillverkningen av insatser att materialet är homogent. I insatserna i demonstrationsserien har endast porositetsansamlingar detekterats i områden där ganska stora defekter (längs ungefär 40 mm av hela längden) kan tolereras. Med oförstörande provningsmetoder (OFP) är sannolikheten 90 procent för att detektera volymdefekter som är cirka 5 mm stora i den ytnära regionen (ner till 50 mm) och mindre än 10 mm i de djupare regionerna. (Dessa detektionsförmågor har fastställts inom ett konfidensintervall på 95 procent.) Vid isostatisk belastning medför de här marginalerna hos OFP för att detektera den tillåtna defektstorleken att sannolikheten för att missa kritiska defekter vid kontroll kan betraktas som små.



Figur 5-9. *Sprängskiss av kapselns komponenter (från vänster: kopparbottendel, kopparrör, insats, stållock till insats och kopparlock).*

Vid analysen av de provtillverkade serierna av BWR-insatser detekterades inga sprickliknande defekter. Med de preliminära kontrollmetoder som används vid oförstörande provning är det möjligt att detektera artificiella sprickliknande ytliga defekter som är 2–3 mm och djupare liggande defekter som är 4–9 mm. Förekomsten av defekter som är orienterade i andra riktningar än radiellt eller längs omkretsen kan inte fastställas, eftersom inga provningstekniker har utvecklas. För skjuvlastfallet ger skadetålighetsanalysen gränser för vilka defektstorlekar som kan accepteras, se avsnitt 5.4.3. Detta medför stränga krav vid både tillverkningen och kontrollen av insatsen. Baserat på dessa resultat och hittillsvarande erfarenheter förväntas dessa ytterligare krav kunna implementeras vid tillverkningen och vid de kontrollmetoder som används för att verifiera resultatet.

Stållocken kommer att tillverkas av stålplåtar och levereras med certifikat som verifierar att den erhållna draghållfastheten uppfyller specifikationerna för konstruktionsparametrarna. Den här parametern har inte närmare undersökts och kontrollerats vid provtillverkningen.

Tillverkning och kontroll av kopparkomponenterna

Extrudering är referensmetoden för varmformning av kopparrören. I kapselfabriken ultraljudsprovas det extruderade röret och maskinbearbetas slutligen till de mått som anges i ritningarna. En slutkontroll med någon form av ytinspektion efter den slutliga maskinbearbetningen kommer att utföras. Locken och bottendelarna tillverkas genom smidning till ett kopparämne som maskinbearbetas till ett lock eller till en bottendel. Bearbetningen av ämnen till lock och bottendelar utförs i två steg med ett mellansteg av oförstörande provning.

Konventionell maskinbearbetning är en välkänd och beprövad industriell process. Därför har metoderna för att kontrollera koppartjockleken inte fastställts och undersökts i detalj av SKB. Generellt har mekaniska kontrollsystem mätosäkerheter som är mindre än 0,1 mm. En möjlighet är att använda ultraljudsprovning. För närvarande uppskattas mätosäkerheterna vara 0,3 mm för koppar med en tjocklek på 50 mm. Baserat på dessa värden bedöms de minsta koppartjocklekarna efter maskinbearbetning vid normal drift vara 48,4 mm för röret, 48,7 mm för bottendelen, 48,1 mm för locket, inklusive en 1 mm djup identitetsmärkning, samt 47,5 mm för svetsfogarna. Detta innebär att den totalt sett minsta tjockleken vid normal drift är 47,5 mm, se tabell 5-9.

Dessutom kan det i det här utvecklingsskedet av kapseltillverkningen inte uteslutas att några kapslar av tusen kan ha områden där den minsta koppartjockleken är reducerad till 45 mm på grund av störningar vid tillverkningen, se tabell 5-9. Detta värde baseras på det faktum att större avvikelser kommer att detekteras när komponenterna hanteras och monteras och kapseln försluts, vilket leder till att kapseln inte godkänns. Erfarenheter tyder på att sådana stora måttavvikelser även kan detekteras med blotta ögat. Sannolikheten för att en kapsel efter maskinbearbetning har en minsta tjocklek som är mindre än 45 mm bedöms därför som försumbar.

Svetsning och kontroll av svetsningen

Locken och bottendelarna svetsas med samma metod – friktionsomrörningssvetsning (Friction Stir Welding, FSW). Bottendelarna svetsas fast i kapselfabriken medan locken svetsas fast (förslutning) i inkapslingsanläggningen.

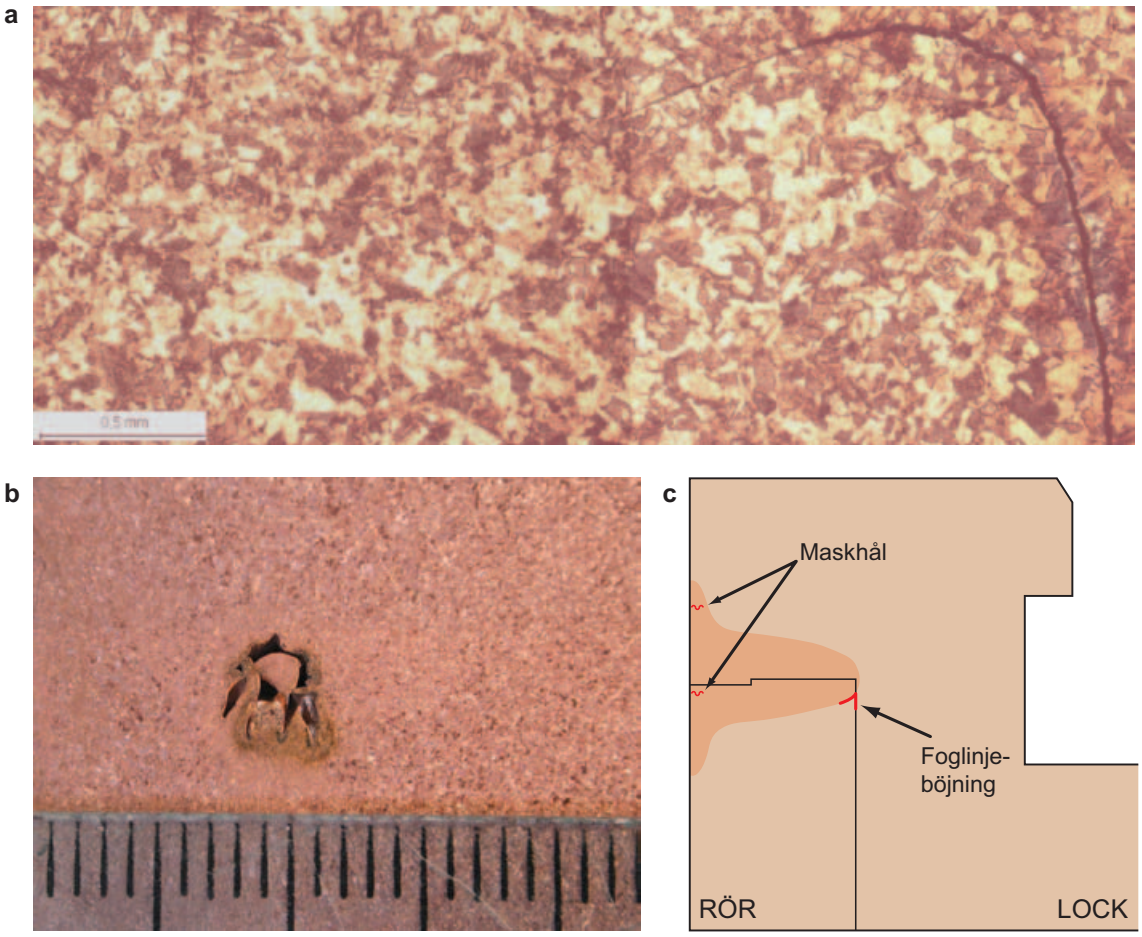
Kontroll av en uppsättning processparametrar i samband med svetsningen säkerställer att den har utförts inom ett så kallat processfönster. Tillvägagångssättet har visat sig ge svetsfogar som uppfyller specifikationen. Svetsprocessen har jämförelsevis få processparametrar och det har visat sig vara möjligt att både kontrollera och övervaka dem. Processen är normalt mycket stabil med en hög grad av repeterbarhet, eftersom den är självjusterande. Den viktiga verktygstemperaturen mäts kontinuerligt och ingångsparametrarna anpassas för att hålla temperaturen inom ett givet intervall.

Förekomsten av defekter i svetsfogarna har undersökts baserat på resultaten av två svetsdemonstrationsserier som utförts under normala driftförhållanden i Kapsellaboratoriet. Normal drift under svetsning betyder att både ingångs- och utgångsvariabler för svetsningen ligger inom ett definierat processfönster, vilket måste vara fallet för att en svetsfog ska kunna bli godkänd. Den enda typen av defekt som har detekterats i svetsfogarna under normal drift är foglinjeböjning (en tät sprickliknande radiellt riktad diskontinuitet med ett gap på < 10 µm, se figur 5-10). De maskhålsliknande defekttyperna (ytnära diskontinuiteter) har endast observerats för svetsförhållanden som inte är normala.

Tabell 5-9. Kopparhöljets minimitjocklek efter maskinbearbetning, dvs ett kopparhölje utan defekter är minst så här tjockt över hela ytan. Tjockleken kan lokalt vara mindre på grund av defekter. Ytterligare information ges i avsnitten 5.3.9, 5.4.9, 5.5.7 och 7.1.5 i Produktionsrapporten för kapseln.

Konstruktionsparameter	Referensutformning (mm)	Initialtillståndsvärde (alla mått i mm)
Tjocklek (mm) – rör – lock, bottendel – svetsfogar	 49,0 50,0 48,5	 Minimum > 47,5 Andel kapslar > 99 procent 45–47,5* Andel kapslar några få per tusen Minimum < 45* Andel kapslar försumbar
Lokalt minskad tjocklek på grund av defekter (mm)	–	< 10 Andel kapslar > 99,9 procent 10–20* Andel kapslar en per tusen > 20* Andel kapslar försumbar

* Värden som endast förekommer under störda driftförhållanden med avseende på både tillverkningsprocesser och kontroll.



Figur 5-10. *a) Fotografi som visar foglinjeböjning (från /SKBdoc 1175162/. b) Fotografi som visar maskhålsdefekt (från /SKBdoc 1175162/). c) Skiss över defektpositioner i svetsfogar svetsade med friktionsomrörningssvetsning (baserad på illustration i* ***Produktionsrapporten för kapseln****).*

I den första demonstrationsserien var de största detekterade defekterna av storleksordningen några millimeter med en största defekt på 5,4 mm i radiell riktning, dvs i korrosionsbarriärens riktning. Den andra serien utfördes med ett förbättrat svetsverktyg och resulterade i mindre defekter med ett största mått på 1,5 mm.

Utvärderingen av svetsprocessens tillförlitlighet, av dess övervakningsfunktioner och av den oförstörande provningen resulterade under normala driftförhållanden i en maximal reduktion av koppartjockleken i svetsfogarna på 10 mm för ett underlag bestående av 12 000 svetsfogar, motsvarande 6 000 kapslar, se tabell 5-9. Resultaten från studier av detektionssannolikheten för OFP-metoderna visar på en detektionsförmåga (med 95 procent konfidensgräns) för foglinjeböjningen på 90 procent för en defekt på 4 mm och nära 100 procent för en defekt på 10 mm.

Sannolikheten för störda driftförhållanden, dvs att minst en av processvariablerna ligger utanför processfönstret, uppskattas vara låg. Sannolikheten för att processvariablerna har sådana värden att de ger upphov till defekter större än 10 mm, och att detta inträffar samtidigt med ett fel i kontrollsystemet, bedöms i nuvarande utvecklingsskede vara mindre än en per tusen kapslar. Detta påstående grundar sig på det faktum att den utvecklade svetsprocessen är mycket tillförlitlig och reproducerbar. Om sådana driftstörningar uppkommer, uppskattas den maximala reduceringen av koppartjockleken inte överskrida 20 mm. Detta är summan av en maximal foglinjeböjning på 10 mm i radiell riktning som sträcker sig över en betydande del av kapselomkretsen i kombination med en maskhålsdefekt (som bör vara tydligt synlig) av samma storlek, se tabell 5-9.

För resten av kopparhöljet, dvs bottendelen, locket och röret, är tillgången på data avseende observerade defekter begränsad. Alla kopparkomponenter som tillverkats mellan januari 2007 och maj 2008 – åtta rör och tjugo lock – har kontrollerats med de preliminära OFP-metoder som utvecklats vid Kapsellaboratoriet. Resultaten av dessa kontroller tyder på att det inte finns några defekter i de extruderade rören eller i de smidda locken och bottendelarna efter den slutliga maskinbearbetningen.

Eftersom de eventuella defekterna i kopparkomponenterna huvudsakligen förväntas vara vinkelräta mot korrosionsbarriären och eftersom inga reella tillverkningsdefekter har upptäckts i kapselkomponenterna, betraktas svetsfogarna i nuläget som de potentiellt tunnaste delarna av kopparhöljet.

Reduktioner av tjockleken kan även uppkomma till följd av ytliga skador under transport, hantering och deponering av kapseln. Den tillgängliga informationen om förekomsten av ytliga skador är begränsad, eftersom det saknas fullskaletester där relevant hanteringsutrustning och transportbehållare används. Sådana tester återstår ännu att göra. Sannolikheten för en kritisk reduktion av korrosionsbarriären på grund av transportskador betraktas emellertid som försumbar, eftersom kapseln skyddas av en transportbehållare. Dessutom kontrolleras kapseln med avseende på ytliga skador när den lyfts från transportbehållaren in i strålskärmen i deponeringsmaskinen i omlastningsstationen på förvarsdjup.

Materialsammansättningen bestäms av tillverkningen av koppargöten tillsammans med påföljande varmformnings- och svetsprocesser. Kopparkvaliteten som används i göten är en ren syrefri koppar av standardkvalitet. Materialsammansättningen i svetsfogarna bestäms huvudsakligen av råmaterialet, men svetsprocessen kan påverkas av exempelvis spårämnen som förs över från svetsverktyget och förändringar i syreinnehållet. Maskinbearbetningen av komponenterna och svetsfogarna har inte någon påverkan på materialsammansättningen.

De analyser av koppargöt som utförts vid provtillverkningen visar att syreinnehållet i göten är avsevärt lägre än den tekniska specifikationen på maximalt 5 ppm.

Materialsammansättningen i svetsfogarna har undersökts i sex prov tagna från tre svetsfogar från svetsdemonstrationsserierna och i tre prov från en svetsfog utförd i argongas. Analyser av svetsfogarna som utförts i luft uppvisade ett medelsyreinnehåll (med standardavvikelse) på 11,1 ppm $\pm$12,2 ppm. Den höga standardavvikelsen kan förklaras av att den högsta uppmätta syrehalten varierar mellan 9 ppm i den del av svetsen som svetsas under konstanta förhållanden och 44 ppm i de överlappande delarna av svetsen. I svetsfogen som utförts i argongas var det högsta uppmätta syreinnehållet 2 ppm. Medelvärdet var 1,8 ppm med en standardavvikelse på 0,4 ppm.

Sammanfattningsvis ligger värdena från svetsfogarna som framställts i argongas långt under det värde på några tiotals ppm som anges i konstruktionsförutsättningarna. Svetsfogarna som utförts i luft har däremot ett förhöjt syreinnehåll i de överlappande svetsfogssektionerna. För närvarande

pågår en utveckling av svetsprocessen för att minimera syreinnehållet. Dessutom undersöks inverkan på svetsens integritet av de oxider som bildas vid gränsen mellan lockets insida och kopparröret. Förutom syre innehåller svetsfogarna även spår av material från verktyget. En avsevärd minskning av denna typ av förorening har skett genom användningen av ett verktyg där PVD-teknik (physical vapour deposition) använts för att belägga ytan med kromnitrid (CrN). Halterna Ni, Co och Cr är lägre än 1 ppm jämfört med genomsnittsvärdena (inklusive standardavvikelser) då ett verktyg utan beläggning används (18 prov från tre svetsar). Halterna av Ni, Co och Cr var då 6,0 ±6,8 ppm, 1,8 ±2,8 ppm respektive 1,6 ±1,8 ppm.

En korrosionsstudie /Gubner och Andersson 2007/ av svetszoner från svetsar utförda i luft och med ett verktyg utan beläggning visar att FSW-verktyget fungerar som en katod i förhållande till koppar. Små partiklar i svetsen fungerar som katoder och omges av koppar. Resultatet blir en mycket liten katod jämfört med den stora kopparanoden. FSW-verktygets stora förmåga att stå emot korrosion kommer att minska korrosionsrisken ytterligare för det omgivande svetsmaterialet. Därför kommer inte små partiklar från FSW-verktyget att bidra till att korrosionen av svetsarna ökar. I studien drogs också slutsatsen att någon negativ påverkan från ytliga kopparoxider inte kunde påvisas.

Kapselmontering

Det sista steget av kapseltillverkningen utgörs av inplaceringen av insatsen i kopparröret, komplett med bottendel. Kapseln monteras i kapselfabriken.

Inkapsling och kontroll av inkapslade kapslar

Inkapslingen av det använda kärnbränslet äger rum i inkapslingsanläggningen. Kärnbränsleelementen väljs ut och torkas innan de placeras i kapseln. Insatsens stållock monteras och atmosfären i insatsen byts ut mot argon. Därefter försluts kapseln genom att kopparlocket svetsas fast. Svetsfogarna kontrolleras innan kapseln lämnar inkapslingsanläggningen. Kapseln placeras i en transportbehållare och transporteras till slutförvaret. Där överförs den till en deponeringsmaskin och placeras i deponeringshålet. SKB:s erfarenheter av svetsningen sammanfattas i föregående avsnitt.

5.4.3 Initialtillstånd

Initialtillståndet avser egenskaperna hos kapslarna när de väl har deponerats i slutförvaret och inte hanteras ytterligare i förvarsanläggningen, se avsnitt 5.1. Slutsatserna rörande initialtillståndet, i synnerhet slutsatserna rörande uppfyllandet av konstruktionsförutsättningarna, tas fram i flera steg i **Produktionsrapporten för kapseln**.

I ett första steg utvärderas överensstämmelsen mellan referensutformningen och konstruktionsförutsättningarna genom en rad analyser, som sammanställs i /Raiko et al. 2010/ och som summeras i avsnitt 4.11 i **Produktionsrapporten för kapseln**. I ett andra steg utvärderas förmågan att med kapselproduktionslinjen tillverka kapslar som överensstämmer med referensutformningen. Kapselproduktionslinjen består av tillverkning av kapslarna, montering av kapslarna i kapselfabriken, samt av inkapsling, transport och deponering. Dessa aktiviteter sammanfattas i kapitel 5 respektive 6 i **Produktionsrapporten för kapseln**.

Slutligen utvärderas överensstämmelsen mellan de deponerade kapslarna och referensutformningen, och därefter överensstämmelsen mellan kapseln i initialtillståndet och konstruktionsförutsättningarna i kapitlen 7.1 respektive 7.2 i **Produktionsrapporten för kapseln**. Utvärderingen sker i huvudsak genom hänvisningar till resultaten i föregående steg.

Isostatisk belastning i förvaret

Konstruktionsförutsättningarna anger att kapseln ska motstå en isostatisk last av 45 MPa, vilket är summan av buffertens maximala svälltryck och maximalt grundvattentryck.

I avsnitt 7.2.1 i **Produktionsrapporten för kapseln** anges att sannolikheten för att kapseln inte uppfyller de konstruktionsförutsättningar som avser isostatiska belastningar anses vara obetydlig. Grunden för denna bedömning kan sammanfattas enligt följande.

- Den belastning som behövs för att den cylindriska delen av en kapsel (utan defekter) helt ska kollapsa har beräknats till 99 MPa och 128 MPa för BWR- respektive PWR-insatser /Raiko et al. 2010/. Resultat från tryckprovningar av verkliga kapslar visar att denna belastning uppgår till ungefär 100 MPa eller högre /Raiko et al. 2010/.
- En analys av kapselns referensutformning, där variabiliteten hos materialdata (sträckgräns, brottgräns och brottseghet) behandlats statistiskt, visar att sannolikheten för lokal plastisk kollaps eller initiering av spricktillväxt till följd av variation i materialegenskaperna är obetydlig. Sannolikheten för lokal plastisk kollaps eller initiering av spricktillväxt är mindre än $1 \cdot 10^{-50}$, se avsnitt 4.3.1 i **Produktionsrapporten för kapseln**.
- De tillåtna defektstorlekarna, baserade på analysen av skadetålighet, är stora. Försök med provtillverkning i full skala visar att det är möjligt att tillverka insatser med stora marginaler avseende defektstorlekar. Dessutom täcker detektionsförmågan hos de oförstörande provningsmetoderna in de tillåtna defekterna med marginal.
- De materialegenskaper som erhålls i de provtillverkade komponenterna är homogena och stämmer överens med de värden som angetts för konstruktionsparametrarna i referensutformningen. Kontrollen av materialegenskaperna utförs med väl beprövade tekniker.
- Kantavståndet hos kassetten i insatsen är ett kritiskt mått för motståndet mot isostatisk belastning. Måttet varierar vid normal tillverkning inom intervallet ±5 mm. Detta betyder, tillsammans med kvaliteten hos de olika kontrollförfarandena under tillverkning och den slutliga ultraljudskontrollen, att sannolikheten för att den tillåtna variationen på ±10 mm ska överskridas kan bedömas vara obetydlig.

Ovanstående slutsatser är baserade på analyser av BWR-insatser. Analyserna av PWR-insatser är begränsade, eftersom tillverkningstekniken för PWR har utvecklats i betydligt mindre utsträckning. Följaktligen är erfarenheten från de olika kontroller som utförts begränsad. Därför har analysen av skadetålighet hos PWR-insatser genomförts med materialdata från tillverkade BWR-insatser. Eftersom PWR-utformningen är mer robust, till följd av den större materialtjockleken i insatsen, går det ändå att anta att även PWR-insatsen kommer att uppfylla konstruktionsförutsättningarna.

Analysen av skadetåligheten hos insatsens bottendel har hittills endast genomförts för sprickliknande defekter och inte för volymdefekter. Utan antagna defekter är emellertid kollapsbelastningarna för botten och den cylindriska delen av insatsen nästan lika stora, vilket tyder på att även de acceptabla volymetriska defekterna är likartade. Från kontrollsynpunkt betraktas detta därför inte som kritiskt.

Data som kan användas i SR-Site för kapselns förmåga att motstå isostatisk belastning kvalificeras formellt i **Datarapporten**, baserat på samma källor som citeras här.

Skjuvbelastning i förvaret

Kapseln ska även motstå skjuvbelastningar som kan uppkomma när sprickor som skär deponeringshål utsätts för sekundära skjuvrörelser till följd av potentiella större jordskalv i närheten av förvaret. I konstruktionsförutsättningarna krävs det att kopparkorrosionsbarriären ska vara intakt efter en 5 cm lång skjuvrörelse med en hastighet på 1 m/s för buffertmaterialsegenskaper hos en Ca-bentonit med en densitet av 2 050 kg/m^3. Detta gäller för alla lägen och vinklar hos skjuvsprickan i deponeringshålet och för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatiska belastningar efter sådana skjuvrörelser.

Avseende uppfyllandet av konstruktionsförutsättningarna för skjuvrörelser dras följande slutsatser:

- Hållfasthetsberäkningar av kapselns beständighet mot skjuvbelastning /Raiko et al. 2010/ verifierar att en kapsel med egenskaper som överensstämmer med specifikationen för referensutformningen motstår den skjuvbelastning som specificeras i det konstruktionsstyrande fallet.
- De materialegenskaper som erhålls i de provtillverkade komponenterna är homogena och stämmer överens med specifikationen för referensutformningen. Kontrollen av materialegenskaperna utförs med väl beprövade tekniker. Resultaten från kontroller av tillverkade kapselkomponenter visar att de angivna värdena för brottseghet och draghållfasthet i den tillverkade serien av insatser liksom töjningen och krypduktiliteten i kopparhöljet överensstämmer med referensutformningen (värden givna i **Produktionsrapporten för kapseln**).

- Enligt analyserna av skadetålighet är de största tillåtna djupen för sprickliknande defekter med halvelliptisk form 4,5 mm. Motsvarande värde för en defekt med halvcirkulär form är 8,2 mm. Insatsen är mindre känslig för inre defekter, vilket gör att defekter som är större än 10 mm kan godtas. Analyserna visar även att resultaten tydligt beror av buffertdensiteten. En lägre buffertdensitet betyder att större defekter kan godtas i insatsen.
- Analysen av skadetålighet leder till tillåtna defektstorlekar som ställer hårda krav på tillverkning och OFP. Baserat på resultaten och erfarenheterna så här långt förväntas det att dessa ytterligare krav kan implementeras vid tillverkningen och provningsmetoderna för verifiering.
- Initialtillståndet för fallet med skjuvbelastning inbegriper inte PWR-insatser, eftersom typiska materialdata för att analysera hållfasthet och skadetålighet ännu inte finns att tillgå. PWR-utformningen är emellertid mer robust på grund av den större materialtjockleken i den gjutna insatsen.

Data som kan användas i SR-Site för kapselns förmåga att motstå skjuvbelastning kvalificeras formellt i **Datarapporten**, baserade på samma källor som citeras här.

Ojämnt tryck från bentonitbuffert

Kapseln kan komma att utsättas för asymmetriska belastningar under olika skeden av förvarsutvecklingen. Detta kan inträffa tillfälligt till följd av ojämn vattenmättnad i bufferten. Permanenta asymmetriska belastningar kan uppkomma till följd av ojämn densitetsfördelning hos den mättade bufferten på grund av oregelbundenheter i deponeringshålens geometriska utformning. De resulterande böjspänningarna i segjärnsinsatsen har utvärderats med förenklade beräkningar /Raiko et al. 2010/ och är lägre än sträckgränsen.

De kapselegenskaper och konstruktionsparametrar som har betydelse för belastningar orsakade av ojämnt tryck från bentonitbufferten är i princip desamma som i fallet med isostatisk belastning. Därför är slutsatserna rörande isostatisk belastning tillämpliga även i det här fallet, dvs deponerade kapslar som överensstämmer med referensutformningen kommer att uppfylla konstruktionsförutsättningarna. En ytterligare inskränkning baseras emellertid på perifera sprickliknande defekter i insatsen. Sådana defekter med ett djup på upp till 48 mm kan accepteras. Analysen av skadetålighet som redovisas i /Raiko et al. 2010/ verifierar att kapselns hållfasthet är tillräcklig för att motstå det ojämna trycket från bentonitbufferten om konstruktionsparametrarna som har betydelse för fallet med isostatisk belastning uppfyller de värden som specificerats för referensutformningen.

Sammanfattningsvis är sannolikheten för att kapseln inte ska motstå belastningarna försumbart låg.

Korrosionspåkänning

En grundläggande funktion hos kapseln är att fungera som en korrosionsbarriär. Den viktigaste korrosionsrelaterade konstruktionsförutsättningen är en nominell koppartjocklek av 5 cm, även då svetsfogarna beaktas. Kopparn i kapseln ska ha hög renhet (> 99,99 procent Cu). För att undvika korrosion vid korngränser ska syrehalten vara lägre än några tiotals ppm.

Rörets, svetsfogarnas, lockets och bottendelens tjocklekar enligt referensutformningen bedöms ligga inom konstruktionsförutsättningen, med nuvarande detaljeringsnivå som anger en nominell koppartjocklek på 5 cm. Referensutformningen uppfyller genom sin specifikation kravet på en högsta syrehalt i kopparhöljet.

Korrosionsbarriärens kvalitet bestäms av kopparhöljets tjocklek och materialsammansättning. Kopparhöljets tjocklek hos en deponerad kapsel bestäms av:

- Tjockleken enligt referensutformningen.
- Prestandan hos de använda teknikerna för maskinbearbetning av kapselns komponenter och svetsfogar.
- Förekomster av defekter som orsakas av varmformning och svetsprocesser.
- Uppkomsten av ytliga skador under transport, hantering i anläggningarna och deponering.

Koppartjockleken för initialtillståndet är således bestämd med en rad olika orsaker till att korrosionsbarriären reduceras. Slutsatser om denna aspekt av initialtillståndet baseras på erfarenheter från prov-

tillverkningen enligt beskrivningen i **Produktionsrapporten för kapseln** och behandlas kortfattat i avsnitt 5.4.2 i denna rapport.

Konstruktionsförutsättningen för korrosionsbarriären uttrycks som en nominell tjocklek av 5 cm. Den minsta koppartjockleken i initialtillståndet ges i tabell 5-9. Detta är korrosionsbarriärens tillverkade och kontrollerade tjocklek efter den slutliga maskinbearbetningen av kapselkomponenterna. Måttangivelsen för initialtillståndets tjocklek tar även hänsyn till förekomsten av lokala inre defekter i kopparhöljet. Det bör observeras att initialtillståndet skiljer sig något från konstruktionsförutsättningen som anger en koppartjocklek på 5 cm, men initialtillståndsvärdena utgör adekvata indata till den fortsatta analysen av korrosionsprocesser i SR-Site.

Defekter kan även uppkomma under hantering och transport av kapseln. Storleken av dessa defekter kan för närvarande inte kvantifieras.

Syrehalten i huvuddelen av kopparhöljet är avsevärt lägre än några tiotals ppm med undantag av de svetsfogar som utförts i luft. I dessa har högre värden uppmätts i de överlappande delarna. Baserat på detta krävs ytterligare undersökningar för att fastställa om svetsprocessen ska utföras i luft eller i argongas.

Lagring av kopparkapslarna under långa tidsperioder före deponering har en försumbar effekt på deras funktionella livslängd efter deponering. Det totala korrosionsangreppet förväntas även efter två års lagring vara mindre än 1 µm, se avsnitt 3.5.4 i **Processrapporten för bränslet och kapseln**.

Data för koppartjocklek som ska användas i SR-Site kvalificeras formellt i **Datarapporten**, baserat på samma källor som citeras här.

Kriticitet

Kapseln ska förhindra kriticitet. Av analysen av benägenheten för kriticitet hos inkapslade använda bränsleelement framgår att den största reaktiviteten uppträder när elementen är placerade nära varandra mot mitten av kapseln, se avsnitt 5.3.4 och /SKBdoc 1193244/ för detaljer. Därför anges ett minsta avstånd mellan kanalrören (centrum-centrumavstånd, C-C) av 210 mm för BWR-insatsen och av 370 mm för PWR-insatsen i referensutformningen. Härigenom uppfyller referensutformningen konstruktionsförutsättningarna i detta avseende. Hittills har dock ingen verifiering av C-C-avståndet mellan utrymmena gjorts genom fysisk mätning i tillverkade insatser. Verifieringsparametern som avser C-C-avståndet återstår att fastställa.

Beräkningarna visar även att av de grundämnen som förekommer i segjärn så är kisel (Si) och kol (C) kraftfullare neutronreflektorer än järn. Halten av dessa ämnen ska hållas under 6 procent (Si) och 4,5 procent (C). Analyser av materialsammansättningarna i det segjärn som används för de fem serietillverkade BWR-insatserna och de tre PWR-insatserna visar att kolinnehållet är lägre än 4,5 procent (med minst en faktor 1,2) och att kiselinnehållet är lägre än 6 procent (med minst en faktor 2,5) i alla tillverkade insatser.

Materialsammansättning och struktur, samt miljön i den förslutna kapseln

Produktionsrapporten för kapseln visar att konstruktionsförutsättningarna med avseende på materialsammansättning och struktur, samt på miljön inuti den förslutna kapseln, kommer att vara uppfyllda för de kontrollerade kapslar som levereras från inkapslingsanläggningen. Här följer en sammanfattning:

- Den högsta tillåtna kopparhalten av 0,05 procent i insatsen verifieras genom konventionell materialanalys under tillverkningen. Detta säkerställer att motsvarande konstruktionsförutsättning är uppfylld.
- Materialsammansättningen i kopparhöljet avseende halter av svavel, fosfor och väte verifieras genom konventionell materialanalys under tillverkningen. Förstörande provning under tillverkning och den efterföljande ultraljudskontrollen verifierar att medelkornstorleken i kopparhöljet kommer att vara mindre än 360 µm. Detta säkerställer att motsvarande konstruktionsförutsättning är uppfylld.
- Utformningen av systemet för att torka bränslet och för att byta ut atmosfären i insatsen i inkapslingsanläggningen säkerställer att det högsta vatteninnehållet uppfyller konstruktionsförutsättningarna.
- Ytan av kopparhöljet får inte utsättas för temperaturer som ligger väsentligt över 100 °C, vilket måste beaktas i instruktionerna för att hantera kapseln i anläggningarna och under transport, såväl som vid detaljutformningen av kapseltransportbehållaren. Eftersom temperaturen är en parameter som är jämförelsevis lätt att mäta kan man verifiera att motsvarande konstruktionsförutsättning uppfylls.

- Doshastigheten på kapselytan har beräknats i /SKBdoc 1077122/. Den högsta erhållna doshastigheten var 0,18 Gy/h på begränsade områden av kapseln. Eftersom resteffekten och strålningen är relaterade till bränsleelementens radioaktivitet går det att sluta sig till att strålningen på kapselytan kommer att vara avsevärt lägre än det acceptabla värdet 1,0 Gy/h, så länge som de bränsleelement som valts ut för inkapsling uppfyller resteffektkriteriet.
- Restspänningar som uppstått i materialet under tillverkningsprocesser, som exempelvis gjutning, värmebearbetning, svetsning eller maskinbearbetning, utgör sekundära spänningar. De saknar yttre drivkraft som skulle kunna få dem att kvarstå efter relaxering eller avspänningsglödgning av materialet. Mätningar av restspänningar i insatser visar att dessa inte har någon praktisk inverkan på gränslasten eller andra högre belastningar som leder till flytning, eftersom restspänningar som uppkommit under tillverkningen förväntas försvinna när materialet flyter, se avsnitt 7.3.2 i /Raiko et al. 2010/. Relevansen hos restspänningar i kopparhöljen är i huvudsak relaterad till risken för att sprickor uppstår genom spänningskorrosion av oförutsedda anledningar eller att elastisk deformation sker. För att analysera den potentiella risken för spänningskorrosion kan en jämförelse mellan primära spänningar (efter krypning) och restspänningar göras. Det konstateras i avsnitt 6.2.10 i /Raiko et al. 2010/ att de primära spänningarna har större betydelse för analysen av sprickbildning genom spänningskorrosion än vad de sekundära restspänningarna har.

5.5 Buffertens initialtillstånd

Produktionsrapporten för bufferten beskriver konstruktionsförutsättningarna, referensutformningen, analyser som verifierar att referensutformningen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, de produktionsmetoder och kontrollrutiner som valts ut för att åstadkomma referensutformningen, analyser som verifierar att dessa procedurer verkligen åstadkommer referensutformningen och en redovisning av det uppnådda initialtillståndet. Följande avsnitt ger en sammanfattning av innehållet i **Produktionsrapporten för bufferten** och i synnerhet av initialtillståndet.

5.5.1 Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet

Buffertens huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln. Detta åstadkoms genom låg hydraulisk konduktivitet, vilket medför att diffusion blir den dominerande transportmekanismen, samt genom ett svälltryck som leder till att bufferten blir självförslutande. Bufferten ska också hålla kapseln på plats i deponeringshålet, dämpa bergets skjuvrörelser och bibehålla sina egenskaper under den tidsperiod som analyseras. Bufferten ska dessutom begränsa den mikrobiella aktiviteten på kapselns yta och filtrera kolloidala partiklar. Bufferten ska inte signifikant försämra övriga barriärers funktion. Kvantitativa konstruktionsförutsättningar ges i /SKB 2009a/ och beskrivs enligt följande.

Efter svällning

- ska svälltrycket vara högre än 2 MPa,
- ska den hydrauliska konduktiviteten inte överstiga 10^{-12} m/s oavsett vilken den dominerande katjonen är och för kloridkoncentrationer upp till 1 M,
- får skjuvhållfastheten inte överskrida den hållfasthet som används i analysen för att verifiera kapselns beständighet mot skjuvbelastningar. Dessa förhållanden gäller för temperaturer ner till 0 °C och för temperaturer upp till 100 °C.

Kraven ovan uppfylls för en mättad buffert som har:

- en densitet i intervallet 1 950–2 050 kg/m^3,
- en montmorillonithalt motsvarande ett torrt buffertmaterial som innehåller 75–90 viktprocent montmorillonit.

Förhållandet mellan montmorillonithalt och kraven på buffertmaterialet diskuteras i /Karnland 2010/. Beträffande materialsammansättningen krävs det också att:

- halten av organiskt kol ska vara lägre än 1 viktprocent,
- sulfidhalten inte får överskrida 0,5 viktprocent av den totala massan, motsvarande ungefär 1 procent pyrit,
- den totala svavelhalten (inklusive sulfid) inte får överskrida 1 viktprocent.

Vattenmättnaden och svällningsprocesserna utgör en del av buffertens långsiktiga utveckling och kan inte kontrolleras vid initialtillståndet. Utifrån analyser av dessa processer kan det i stället ställas krav på initialtillståndets geometri och densitet. Utifrån dessa krav kan sedan en referensutformning härledas och specificeras.

5.5.2 Referensutformning och produktionsmetoder

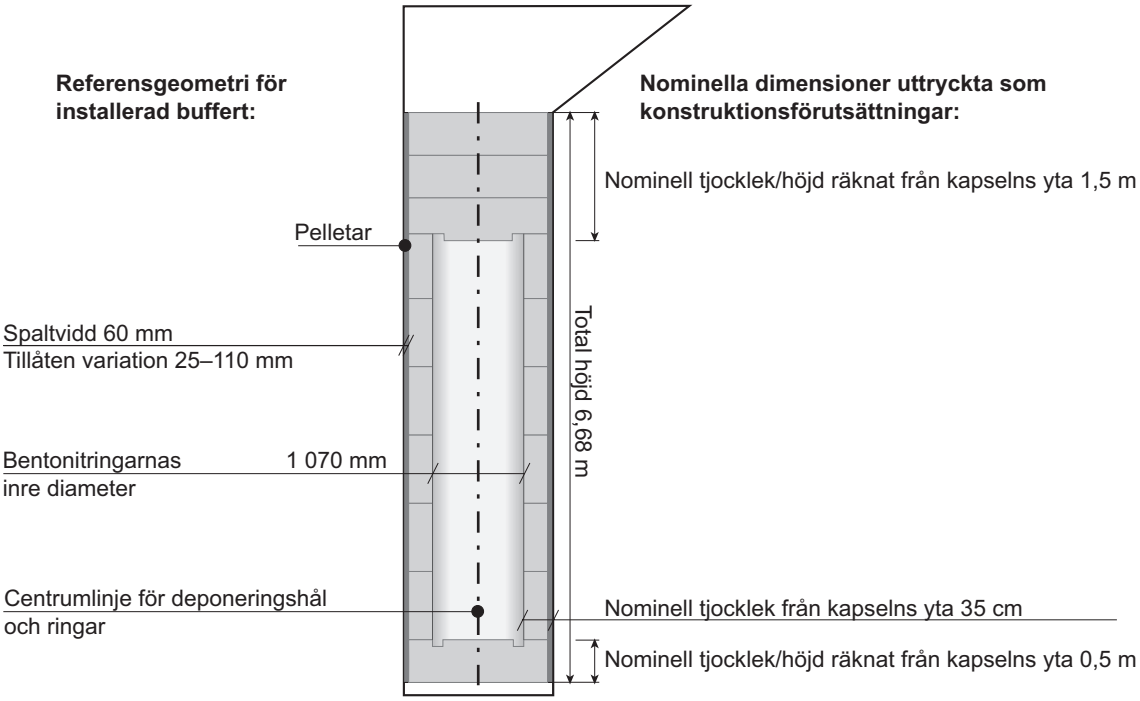
Referensutformning

Referensutformningen av bufferten beskrivs av en uppsättning *konstruktionsparametrar* för vilka nominella värden och tillåtna toleranser ges. Konstruktionsparametrarna kommer att kontrolleras vid produktionen för att bekräfta att den producerade bufferten vid initialtillståndet överensstämmer med referensutformningen och för att ge en uppskattning av buffertens faktiska egenskaper vid initialtillståndet.

Referensutformningen av bufferten består av specifikationer för:

- Materialsammansättningen.
- Det material som är klart för kompaktering.
- De tillverkade blocken och pelletarna.
- Den installerade bufferten.

Referensbuffertens geometri visas i figur 5-11. Bufferten består av ett bottenblock, sex ringar runt kapseln och tre block ovanför kapseln. Bufferten slutar och återfyllningen tar vid på toppen av det tredje blocket ovanför kapseln. Buffertblockens centrumlinje sammanfaller med deponeringshålets centrumlinje. Spalten mellan blocken och bergytan i deponeringshålet fylls med pelletar. Tjockleken av den installerade bufferten kommer runt kapseln att avvika från den nominella tjockleken som är 35 cm. Den installerade buffertens tjocklek beror på deponeringshålets diameter och hur denna varierar längs med hålet samt på ringarnas position inuti hålet. Bufferttjockleken kommer också att påverkas av kapselns läge i ringarna samt av kapselns diameter. Kapseln kommer att centreras i buffertringen.



Figur 5-11. *Referensgeometrin hos den installerade bufferten, se figur 3-3 i* ***Produktionsrapporten för bufferten****.*

Referensbuffertmaterialet är en bentonitlera som uppfyller två grundläggande mineralogiska kriterier. För det första måste montmorillonitinnehållet vara tillräckligt högt för att upprätthålla och bibehålla det lägsta svälltrycket, den högsta hydrauliska konduktiviteten och den tillåtna styvheten och skjuvhållfastheten för det specificerade densitetsintervallet. För det andra måste innehållet av accessoriska mineraler vara lågt.

I SR-Site analyseras två material som överensstämmer med specifikationen som visas i tabell 5-10. Exemplen, MX-80 och Ibeco RWC (kallas Deponit CA-N i SR-Can), kommer båda från stora fyndigheter och bryts av stora bentonitleverantörer. De har olika ursprung och olika dominerande motjon och ska betraktas som relevanta illustrationer av möjliga alternativ som kan användas i förvaret.

De producerade blockens och pelletarnas densitet och homogenitet beror på granulernas storleksfördelning och vatteninnehållet hos det material som ska kompakteras samt på kompakteringstrycket. För att uppnå hög tillförlitlighet vid produktionen måste granulernas storleksfördelning och vatteninnehåll specificeras. Blockens och pelletarnas referensutformning visas i tabell 5-11. De angivna densiteterna är bulkdensiteter, eftersom det är dessa som kommer att kontrolleras vid produktionen.

Kapselns lock och botten är inte jämna utan innehåller fördjupningar och kanter, se avsnitt 5.4.2. Dessa utrymmen måste fyllas med bentonit. Detta görs med särskilt svarvade fasta block.

Bufferten tar upp ytterligare vatten efter installationen och utvecklar ett svälltryck vid slutet av vattenmättnadsprocessen. Detta leder till att bufferten expanderar uppåt och att den överliggande återfyllningen i deponeringstunneln kompakteras i motsvarande grad tills jämvikt uppnås. Referensutformningen, och i synnerhet referensdensiteten, har fastställts med hänsyn tagen till svällningsprocessen så att den erfordrade slutliga densiteten på 1 950–2 050 kg/m^3 uppnås efter svällning. Sådana expansionsberäkningar, vilka bekräftar att buffertens referensutformning uppfyller konstruktionsförutsättningarna, redovisas i **Produktionsrapporten för bufferten** och sammanfattas kortfattat i avsnitt 5.5.3. Expansionsprocessen ingår också i den långsiktiga utvecklingen och redovisas ytterligare i avsnitt 10.3.9 i denna rapport.

Tabell 5-10. Dominerande katjon, katjonbyteskapacitet (CEC) och accessoriska mineraler för MX-80 och Ibeco-RWC /Karnland 2010/.

Beståndsdel	MX-80 R1 (viktprocent)	Ibeco RWC R1 (viktprocent)	Osäkerhet (± viktprocent)
Kalcit + Siderit	0–1	6	1
Kvarts	3	0–1	1
Kristobalit	0–1	0–1	1
Pyrit*	0,24	0,5	0,07
Glimmer	4	6	1
Gips	0–1	0–1	1
Fältspat	4	0–1	2
Dolomit	0	1	1
Montmorillonit	84	81	3
Na^-	75 %	24 %	5
Ca^-	16 %	45 %	5
Mg^-	7 %	29 %	5
K^-	2 %	2 %	1
Organiskt kol*	0,24	0,23	0,05
CEC (mekv/100 g)	75	70	3

* Pyrit och innehåll av organiskt kol baseras på kemiska analyser och inte på röntgendiffraktion.

Tabell 5-11. Referensbuffertblock och referenspelletar.

Konstruktionsparametrar	Nominell utformning	Godtagbar tolerans
Fasta block		
Bulkdensitet (kg/m^3)	2 000	±20
Vatteninnehåll	Som i materialet klart för kompaktering.	Som i materialet klart för kompaktering.
Mått (mm)	Höjd: 500	±1
	Yttre diameter: 1 650	
Ringar		
Bulkdensitet	2 070	±20
Vatteninnehåll	17	+1
	Som i materialet klart för kompaktering.	Som i materialet klart för kompaktering.
Mått (mm)	Höjd: 800	±1
	Översta blockets höjd: 760	
	Yttre diameter: 1 650	
	Inre diameter: 1 070	
Pelletar		
Mått (mm)	16·16·8	–
Bulkdensitet lös fyllning (kg/m^3)	1 035	±40
Vatteninnehåll	17	+1
	Som i materialet klart för kompaktering.	Som i materialet klart för kompaktering.

Produktionshantering och installation

Produktionslinjen för bufferten består av tre huvuddelar:

- Brytning och leverans.
- Tillverkning av block och pelletar.
- Hantering och installation.

Bentonitfyndigheter finns på många platser i världen och brytning och leverans kan skötas av olika företag. De önskade materialegenskaperna specificeras vid beställning. Varje leverans av bentonit följs av ett protokoll från leverantören som beskriver det levererade materialets faktiska sammansättning. För att godta leveransen kontrolleras det levererade materialet. Vid produktionskontrollerna mäts det levererade materialets vatteninnehåll och storleksfördelning för granulerna samt totalvikten. De konstruktionsparametrar som har betydelse för buffertens funktion och som ska kontrolleras omfattar buffertmaterialets mineralogiska sammansättning. Den mineralogiska sammansättningen av bulkmaterialet analyseras slumpmässigt med hjälp av standardröntgendiffraktion. Mineralfördelningen utvärderas med hjälp av en kvantitativ röntgendiffraktionsprogramvara som bygger på Rietveldanalys, se **Produktionsrapporten för bufferten**. Särskilda analyser görs av svavel- och kolinnehåll.

Före kompakteringen justeras vatteninnehållet i materialet till värden som passar den aktuella processen. Referensmetoden för pressning av block är enaxlig pressning.

Efter kompakteringen inspekteras varje blocks vikt och mått (höjd samt inre och yttre diameter). Blockens torrdensitet beräknas från det registrerade vatteninnehållet, vikten och måtten. Blocken maskinbearbetas till angivna mått för att åstadkomma blockstaplar som kan passas väl in i deponeringshålet och den erforderliga installerade bulkdensiteten. Referensmetoden för att tillverka pelletar är att pressa det konditionerade materialet till små pelletar.

En statistisk utvärdering av de block som tillverkats för Prototypförvaret visar att blockdensiteten följer en normalfördelning, se **Produktionsrapporten för bufferten**. För att uppskatta densitetsfördelningen som uppstår vid en tillverkningsprocess anpassad till det utvalda materialet analyserades densiteten hos totalt 25 block (tio ringar och 15 block), som tillverkats från samma bentonitleverans och kompakterats vid samma tillfälle. Resultaten visas i tabell 5-12. Densiteterna som visas i tabell 5-12 har, baserat på nuvarande erfarenhet, den variation i blockdensitet som kan förväntas vid en tillverkningsprocess anpassad till det levererade materialet.

Tabell 5-12. Förväntade bulkdensiteter hos block baserade på mätningar av block tillverkade från samma bentonitleverans och kompakterade vid samma tillfälle. Totalt analyserades 25 block, varav 10 var ringar och 15 fasta block.

Bulkdensitet hos ringar (kg/m^3)				Bulkdensitet hos fasta block (kg/m^3)			
Medel	**Std**	**99,9 % K.I.**		**Medel**	**Std**	**99,9 % K.I.**	
2 070	5,81	2 050	2 088	1 998	5,79	1 978	2 017

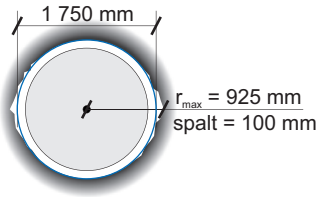
Installationen av bufferten förutsätter att deponeringshål levereras från berglinjen i enlighet med specifikationerna. Provningen och kontrollen av deponeringshålen beskrivs i **Berglinjerapporten**.

Erfarenheter från Prototypförvaret visar att deponeringshålens diameter följer en normalfördelning, se **Produktionsrapporten för bufferten**. Baserat på tre mätningar av diametern på varje nivå, med en ekvidistans på 0,4 m i djupled, fastställdes den genomsnittliga diametern till 1,760 m med en standardavvikelse på 2,02 mm. I Prototypförvaret ställdes borrningsutrustningen in på en större nominell diameter än 1,750 m. När den statistiska variationen hos måtten för ett deponeringshål som borrats i slutförvaret ska beskrivas är det därför rimligt att anta ett medelvärde för diametern på 1,750 m och att, baserat på nuvarande erfarenhet, anta en standardavvikelse på 2,02 mm. Vid Äspölaboratoriet har avvikelsen mätts upp mellan centrumpunkterna för tvärsnitt uppmätta var 40:e cm och en linje som förbinder centrumpunkterna i sektionerna i tunnelgolvet och botten på deponeringshålet. Avvikelsen är i storleksordningen ±10 mm, se avsnitt 6.1.4 i **Produktionsrapporten för bufferten**. Detta kan betraktas som en uppskattning av hur raka hålen är och motsvarande variation i den pelletfyllda spaltens bredd. Spjälkning orsakar en lokal ökning av deponeringshålets radie, såsom visas i figur 5-12. Som angavs i avsnitt 5.2.2 ingick en uppskattning av det potentiella djupet för spjälkningen vid utformningen av förvaret, se figur 5-5.

För att förhindra att bufferten tar upp vatten från fukt i luften eller att den torkar ut om deponeringshålet är torrt, placeras ett buffertskydd i deponeringshålen innan blocken installeras. Bottenblocket installeras och centreras gentemot deponeringshålets centrumlinje. Den nedersta bentonitringen installeras på samma sätt som bottenblocket. Den installerade ringen används för att passa in installationen av nästa ring, så att de placeras i samma horisontella läge ovanpå varandra, med ett rakt och centrerat hål för att deponera kapseln i mitten. Efter installation av det översta ringformade blocket kontrolleras det hål som bildats av blocken.

Kapseln kan sedan deponeras enligt beskrivningen i **Produktionsrapporten för kapseln**.

När kapseln har deponerats installeras de tre översta buffertblocken och de två block som betraktas som en del av återfyllnaden, se avsnitt 5.6. Utifrån blockens mått och läge kan bufferttjockleken och den blockfyllda delen av deponeringshålets volym beräknas. Blockens position används, tillsammans med deras vikt och deponeringshålets mått, som indata för att beräkna den installerade buffertens bulkdensitet och hur denna varierar i deponeringshålet. Innan pelletarna installeras avlägsnas buffertskyddet och de sensorer som placerades i skyddet.



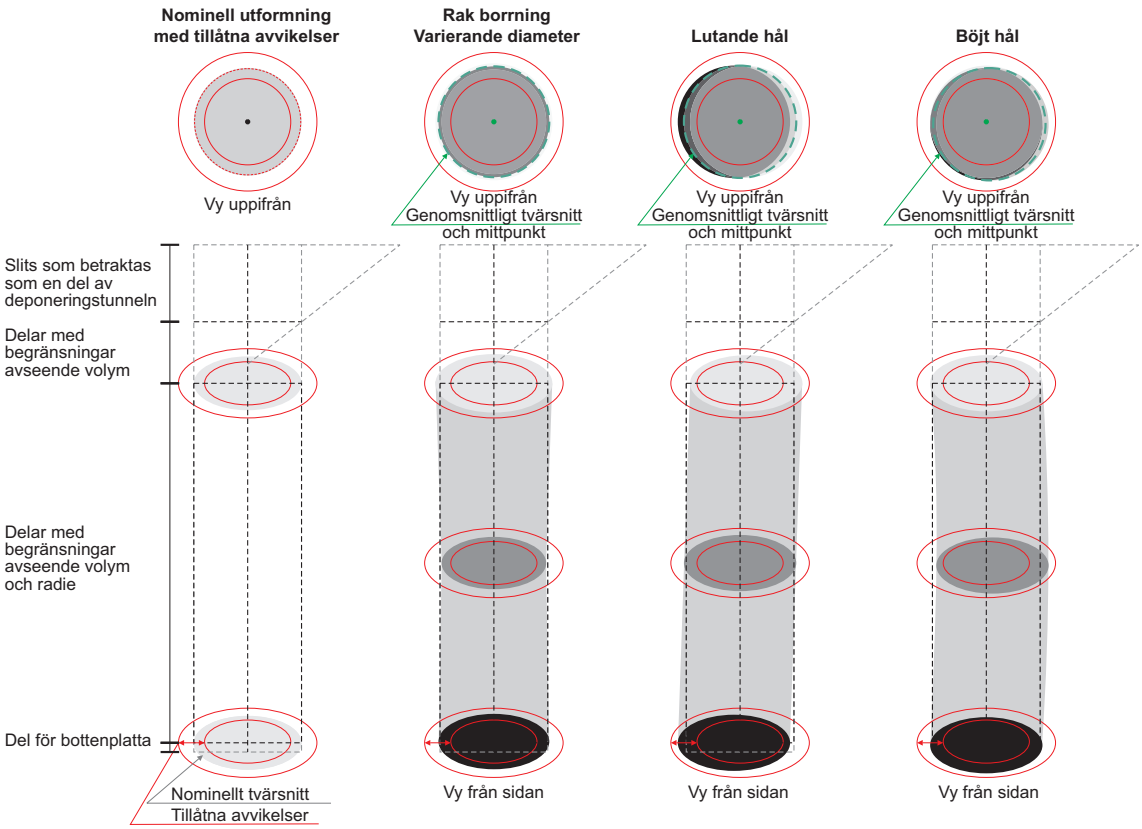
Figur 5-12. *Ökning av deponeringshålets radie på grund av spjälkning och infallande berg i ett deponeringshål med nominell diameter.*

Spalten fylls med pelletar genom att en konisk tratt placeras ovanpå det sist installerade bentonitblocket och pelletarna hälls sedan i deponeringshålet. Så snart spalten har fyllts med pelletar fortsätter återfyllningen av deponeringstunneln så att återfyllningsmaterialet kan förhindra den svällning och expansion av bufferten som kan orsakas av att pelletfyllningen snabbt tar upp vatten. Installation av blocken i enlighet med tabell 5-12 i ett deponeringshål med en genomsnittlig diameter på 1,750 m och en standardavvikelse på 2,02 mm leder till den beräknade installerade densitet som presenteras i tabell 5-13. Vid beräkningarna betraktas variationerna i pelletfyllningens vatteninnehåll och bulkdensitet som försumbara. Pelletarnas bulkdensitet är bestämd till 1 035 kg/m^3 och vatteninnehållet i blocken och pelletarna är bestämt till 17 procent.

Om deponeringshålet inte är rakt kommer mittpunkten för varje enskilt tvärsnitt inte att sammanfalla med hålets genomsnittliga vertikala centrumlinje, se figur 5-13. Som ett resultat kommer inte blocken att vara centrerade vid varje enskilt tvärsnitt och bredden på den pelletfyllda spalten kommer att variera över tvärsnittet.

Tabell 5-13. Resultat från beräkningar av installerad buffertdensitet för olika sektioner av ett deponeringshål.

Sektion runt kapseln				Sektion över och under kapseln			
Torrdensitet, ρ_d (kg/m^3)		Resulterande mättad densitet, ρ_m (kg/m^3)		Torrdensitet, ρ_d (kg/m^3)		Resulterande mättad densitet, ρ_m (kg/m^3)	
Medel	Std	99,9 % K.I.		Medel	Std	99,9 % K.I.	
1 571	4,72	2 000	2 022	1 616	4,73	2 025	2 045



Figur 5-13. Några möjliga orsaker till avvikelser i ett deponeringshåls geometri utan infallande berg. Alla avvikelsetyper kan förekomma i samma deponeringshål. Avvikelserna är skalmässigt överdrivna. (Fasningen diskuteras i återfyllnadsavsnittet.)

Teknikerna för lastning, transport och förvaring av buffertblock och pelletar är väl beprövade från liknande industriella tillämpningar. SKB har erfarenhet av detta från Äspölaboratoriet. Block har förvarats på pallar med en lufttät kåpa under flera månader utan att uppvisa några förändringar i vikt eller vatteninnehåll. Funktionen hos buffertskyddet som placeras i deponeringshålet innan bufferten installeras har testats vid Äspölaboratoriet. Tekniken att fylla den yttre spalten med pelletar har använts med goda resultat vid flera storskaliga tester vid Äspölaboratoriet.

5.5.3 Initialtillstånd

Buffertens initialtillstånd är det tillstånd när hjälputrustningen som användes vid installationen har avlägsnats och buffertens alla beståndsdelar har installerats i deponeringshålet. Grundvatteninflöde i deponeringshålet och hur det påverkar bufferten beaktas inte för initialtillståndet.

De buffertegenskaper som ska överensstämma med konstruktionsförutsättningarna och som är relaterade till den långsiktiga säkerheten är:

- Materialsammansättning.
- Installerad densitet.
- Installerad geometri.

Dessa egenskaper beror i viss utsträckning av varandra. Densiteten bygger till exempel på en given materialsammansättning. I **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** beskrivs bufferten med hjälp av ett antal variabler. De flesta av dessa variablers värden för initialtillståndet bestäms av egenskaperna, vilket visas i tabell 5-14.

Materialsammansättning

Referensutformningen bygger på bentonit med en bestämd montmorillonithalt och en högsta tillåten halt av vissa föroreningar, se avsnitt 5.5.1.

Beträffande konstruktionsförutsättningar förknippade med materialsammansättningen dras slutsatsen att den erfordrade montmorillonithalten och de specificerade gränserna för organiskt kol, sulfid och svavel är uppfyllda vid initialtillståndet. Slutsatsen grundar sig på de redovisade analyserna av de två exempelmaterialens sammansättningar och på de hanterings- och kontrollrutiner som sammanfattas i beskrivningen av hur bufferten tillverkas.

Tabell 5-14. Variablerna för bufferten och deras koppling till buffertens egenskaper.

Variabel	Egenskap	Initialtillstånd
Vatteninnehåll	Materialsammansättning	
Gasinnehåll		
Bentonitsammansättning		
Montmorillonitsammansättning		
Porvattensammansättning		
Hydrovariabler (tryck och flöden)	Materialsammansättning	
Spänningstillstånd	Installerad densitet	
Porgeometri	Installerad densitet	
Buffertgeometri	Installerade dimensioner och geometrisk konfiguration	
Strålningsintensitet	–	Beräknad.
Temperatur	–	Strålningsintensitet på kapselns yta, **Bränslerapporten**, avsnitt 6.6.
		Beräknad.
Strukturella och kvarlämnade material	–	Material och dimensioner hos bottenplattan enligt referensutformningen **Berglinjerapporten**, figur 5-3.

För att utvärdera buffertens funktion på lång sikt behövs en mer detaljerad beskrivning av materialet. Viktiga aspekter vid beskrivningen av materialen är:

- Kemisk sammansättning.
- Mineralogisk sammansättning.
- Korndensitet.
- Specifik yta.
- Granulernas storleksfördelning.
- Vatteninnehåll.

Utöver detta kännetecknas materialets lerfraktion av:

- Strukturformel som omfattar: flakladdning och laddningsfördelning.
- Katjonbyteskapacitet.
- Ursprungliga utbytbara katjoner.
- Laddningsfördelning.

Dessa parametrar beskrivs utförligare i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** och definieras som variabler för bentonitsammansättningen och montmorillonitsammansättningen.

I naturlig bentonit kommer de laddningskompenserande katjonerna sällan från ett enda jonslag, utan är en blandning av både envärda och tvåvärda joner. Svällningsegenskaperna beror i stor utsträckning på flakladdningens storlek och läge, men även på typen av laddningskompenserande katjon. Den dominerande katjonen används därför ofta för att beskriva typen av bentonit, exempelvis natriumbentonit, även om innehållet av andra joner kan vara relativt högt. Kommersiella bentoniter av hög kvalitet innehåller vanligen över 80 procent montmorillonit, vilket förväntas ge olika bentonitprodukter liknande tätningsegenskaper. Assessoriska mineraler i bentonit kan i stor utsträckning variera inom, och i synnerhet mellan, olika fyndigheter. Typiska accessoriska mineraler som kan förekomma är andra leror, fältspater, kvarts, kristobalit, gips, kalcit och pyrit. Kvantitativa gränsvärden har satts upp för sulfid, totalt svavel och organiskt kol, se avsnitt 5.5.1. Inga kvantitativa kriterier för övriga accessoriska mineraler i bentoniten har för närvarande definierats. Den mineralogiska sammansättningen för de material som används för SR-Site presenteras i tabell 5-10.

För att kunna beräkna strålskärmningen samt kontrollera det maximala innehållet av svavel och organiskt kol är det viktigt att fastställa bentonitens totala kemiska sammansättning. Den genomsnittliga kemiska sammansättningen hos bulkmaterialen från tabell 5-10 i form av oxider är för MX-80: 57 procent SiO_2, 18,5 procent Al_2O_3, 3,6 procent Fe_2O_3, 2,3 procent MgO, 1,3 procent CaO, 2,0 procent Na_2O, 0,5 procent K_2O, 0,2 procent TiO_2, 0,3 procent totalt kol, 0,3 procent totalt svavel och 13,7 procent glödförlust. För Ibeco-RWC är motsvarande sammansättning 48 procent SiO_2, 16 procent Al_2O_3, 4,6 procent Fe_2O_3, 2,9 procent MgO, 5,4 procent CaO, 0,7 procent Na_2O, 0,8 procent K_2O, 0,7 procent TiO_2, 1,0 procent totalt kol, 0,7 procent totalt svavel och 20 procent glödförlust.

Initialtillstånden för alla övriga parametrar avseende sammansättningen hos bentonit och montmorillonit, tillsammans med deras betydelse för den långsiktiga funktionen, diskuteras i /Karnland 2010/.

Vatteninnehåll, gasinnehåll och porvattensammansättning

Det finns inga särskilda konstruktionsförutsättningar beträffande vatteninnehåll, gasinnehåll och porvattensammansättning, men dessa egenskaper måste vara kända för den efterföljande analysen. I referensutformningen har man valt ett initialt vatteninnehåll i block och pelletar på 17 procent. Vatteninnehållet fastställs genom en geoteknisk standardmetod. Det ursprungliga vatteninnehållet i buffertmaterialet justeras för att underlätta tillverkningsprocessen. All porer som inte är fyllda med vatten innehåller luft. Den initiala porvattensammansättningen kan beräknas, men inte mätas direkt.

Installerad densitet

Densiteten för en fullt mättad och homogeniserad buffert i deponeringshålet ska ligga i intervallet 1 950 till 2 050 kg/m^3. Initialtillståndet representerar å andra sidan de installerade buffertblocken och pelletarna vid ett vatteninnehåll som ges av tillverkningsprocessen. Parametrarna vid initialtillståndet ska generera en buffert som ligger inom densitetsintervallet för varje tvärsnitt i deponeringshålet,

varvid effekterna av ofullständig homogenisering betraktas som försumbara. Analyserna som presenteras i **Produktionsrapporten för bufferten** har gjorts för att visa hur konstruktionsförutsättningarna för buffertdensiteten uppfylls.

Den installerade buffertdensiteten beror på de installerade blockens och pelletarnas densitet och mått, dvs den installerade buffertmassan, samt på deponeringshålets och kapselns volym. Den påverkan som variationer i kapselns volym och blockens mått har på den installerade buffertdensiteten kan försummas. De viktiga parametrarna är blockens och pelletarnas densitet och deponeringshålets volym. Över ett slumpmässigt utvalt tvärsnitt av deponeringshålet kommer den installerade densiteten att variera på grund av:

- Variationer i deponeringshålets diameter.
- Placeringen av buffertblocken med avseende på deponeringshålets centrumlinje.
- Förekomsten av spjälkning.

Hur variationen i deponeringshålets diameter påverkar den installerade och motsvarande mättade densiteten kan fastställas under antagande att kapseln och ringarna är centrerade över varje tvärsnitt. Detta är fallet om varje sektions mittpunkt sammanfaller med en vertikal linje, dvs om borrningen är rak.

Baserat på fördelningen av blockdensiteterna som visas i tabell 5-12 kan variationen i mättad densitet beräknas för tillåtna ökningar av bredden på den pelletfyllda spalten, eller av deponeringshålets radie, från det nominella värdet. Resultat från sådana beräkningar visas i tabell 5-15. För ett rakt deponeringshål med nominell diameter motsvarar ökningen i den pelletfyllda spaltens bredd det maximalt tillåtna djupet för spjälkning. Antalet deponeringshål där spjälkning av sådant djup kan förekomma, som det bedömdes vid utvecklingen av den befintliga förvarsutformningen /SKB 2009b/, se även figur 5-5, redovisas också i tabell 5-15. Om diametern avviker från det nominella värdet ändras det tillåtna djupet på spjälkningen i enlighet därmed. Om deponeringshålet inte är rakt minskar den tillåtna spjälkningen på motsvarande sätt.

Slutsatsen dras därför att metoderna för att producera bufferten kommer att ge densiteter vid initialtillståndet som i) uppfyller specifikationerna i referensutformningen och ii) leder till densiteter efter mättnad som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för mättad densitet.

Baserat på resultatet i tabell 5-13 förväntas även densiteten vid mättnad och utan spjälkning ligga i intervallet 2 000–2 020 kg/m^3 i sektioner runt kapseln. I sektioner ovanför och under kapseln förväntas densiteten ligga i intervallet 2 025–2 045 kg/m^3. Båda intervallen anges med 99,9 procents konfidensnivå. Det förstnämnda intervallet är snävare än vad som anges i konstruktionsförutsättningarna och är av särskild betydelse vid analysen av skjuvbelastningarna. En låg densitet ger därvidlag upphov till lägre skjuvbelastningar på kapseln. Därmed dras slutsatsen att en övre gräns för buffertdensiteten på 2 020 kg/m^3 för sektionerna runt kapseln kan användas vid analyserna av skjuvbelastningarna på kapseln.

Installerad geometri

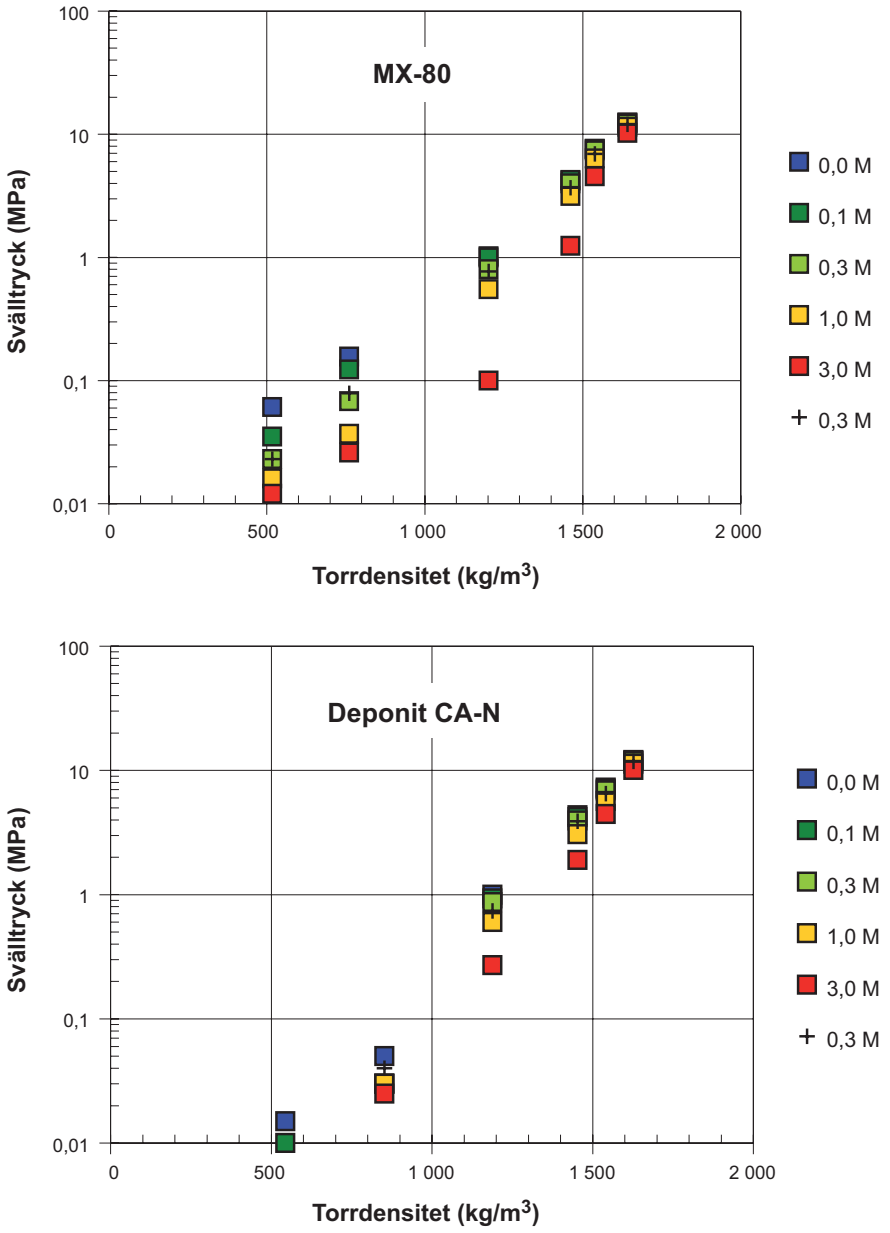
Inverkan av variationer i kapselns inplacering och kapseldiametern på bufferttjockleken kan försummas. Deponeringshålets verkliga diameter kommer att avvika från den nominella. Enligt beskrivningen i produktionsavsnittet visar analysen av mätningar av diametern från Prototypförvaret att standardavvikelsen är 2,025 mm. Konfidensintervallet på 99,9 procent för deponeringshålet är 1,743 < ø < 1,757 m. Om man antar att kapseln är centrerad i deponeringshålet och att det inte förekommer någon spjälkning, erhåller man ett 99,9 procent konfidensintervall för en bufferttjocklek på 34,7 < bufferttjocklek < 35,3 cm.

Tabell 5-15. Resultat från beräkningar av mättad buffertdensitet vid kapselsektionerna för tillåtna ökningar av bredden på den pelletfyllda spalten från det nominella värdet.

Tillåten ökning av den pelletfyllda spaltens bredd (m)	Antal deponeringshål av 6 000 med motsvarande djup för spjälkningen	99,9 procent konfidensintervall för buffertdensiteten vid mättnad (kg/m^3)	(kg/m^3)
0,050	150	1 933	1 948
0,040	200	1 946	1 961
0,030	400	1 959	1 974
0,020	600	1 972	1 988
0,010	950	1 986	2 003

Överensstämmelse mellan referensutformningen och konstruktionsförutsättningarna för svälltryck och hydraulisk konduktivitet

Referensutformningen bygger på en given materialsammansättning och densitet vid installationen hos detta material. Det har ovan visats att konstruktionsförutsättningarna för materialsammansättningen är uppfyllda vid initialtillståndet och att densiteten vid installationen ger en densitet efter mättnad och svällning som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna. I **Produktionsrapporten för bufferten** framgår att en buffert med denna senare densitet uppfyller konstruktionsförutsättningarna med avseende på svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Figur 5-14 visar som ett exempel svälltrycket för materialen MX-80 och Ibeco RWC (Deponit CA-N) när de exponeras för NaCl respektive $CaCl_2$-lösningar. Svälltrycket för referensdensiteten kommer att vara 7–8 MPa för båda materialen. Med hänsyn tagen till de tillåtna variationerna i densitet kan svälltrycket variera mellan 4,5 och 13 MPa, dvs konstruktionsförutsättningen som kräver ett minsta svälltryck på 2 MPa är uppfylld. Se **Produktionsrapporten för bufferten** och /Karnland et al. 2006/ för ytterligare detaljer.



Figur 5-14. *Svälltryck hos MX-80 exponerat för NaCl-lösningar (överst) och Ibeco RWC (Deponit CA-N) exponerat för $CaCl_2$-lösningar (nederst). Koncentration uttrycks som M.*

5.6 Initialtillstånd för återfyllningen i deponeringstunnlarna

Produktionsrapporten för återfyllningen beskriver konstruktionsförutsättningarna, referensutformningen, analyser som verifierar att referensutformningen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, de produktions- och kontrollrutiner som valts ut för att åstadkomma referensutformningen, analyser som verifierar att dessa rutiner verkligen åstadkommer referensutformningen och en redovisning av det uppnådda initialtillståndet. Följande avsnitt ger en sammanfattning av innehållet i **Produktionsrapporten för återfyllningen** och i synnerhet av initialtillståndet.

5.6.1 Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet

Återfyllningen i deponeringstunnlarna är det material som installeras i deponeringstunnlarna för att fylla dem. Återfyllningens syfte och funktion i deponeringstunnlarna är att hålla bufferten på plats och att begränsa grundvattenflödet genom deponeringstunnlarna.

I SR-Site antas det att alla tunnlar i såväl själva förvaret som i rampen och schaktet upp till nivån där toppförslutningen börjar ska fyllas med återfyllningsmaterial.

Följande konstruktionsförutsättningar för återfyllningen i deponeringstunnlarna är relaterade till den långsiktiga säkerheten och redovisas i /SKB 2009a/:

- Advektiv transport i deponeringstunnlarna ska begränsas, vilket uppnås om den hydrauliska konduktiviteten är $< 10^{-10}$ m/s och svälltrycket > 0,1 MPa.
- Uppåtriktad svällning/expansion av bufferten ska begränsas, vilket uppnås om återfyllningens kompaktering och densitet – både för ett initialt torrt tillstånd och efter fullständig vattenmättnad – är tillräckliga för att säkerställa en kompressibilitet som resulterar i en lägsta mättad buffertdensitet runt kapseln i enlighet med givna krav (dvs 1 950 kg/m^3) med tillräcklig marginal för förlust av återfyllning[12] och osäkerheter.
- Återfyllningsmaterialet ska inte innehålla ämnen som kan orsaka skadlig nedbrytning av bufferten eller kapselkorrosion.
- Densiteten och materialsammansättningen ska vara sådan att återfyllningens barriärfunktioner kan upprätthållas under lång tid.

Produktionsrapporten för återfyllningen anger också det allmänna kravet att återfyllningen inte signifikant får försämra barriärernas inneslutande och fördröjande funktion. Förutom de konstruktionsförutsättningar som är relaterade till återfyllningens långsiktiga funktioner ställs för närvarande inga krav på återfyllningen av de övriga barriärernas utformning.

5.6.2 Referensutformning och produktionsrutiner

Referensutformning

Referensutformningen av den installerade återfyllningen visas i figurerna 5-15 och 5-16.

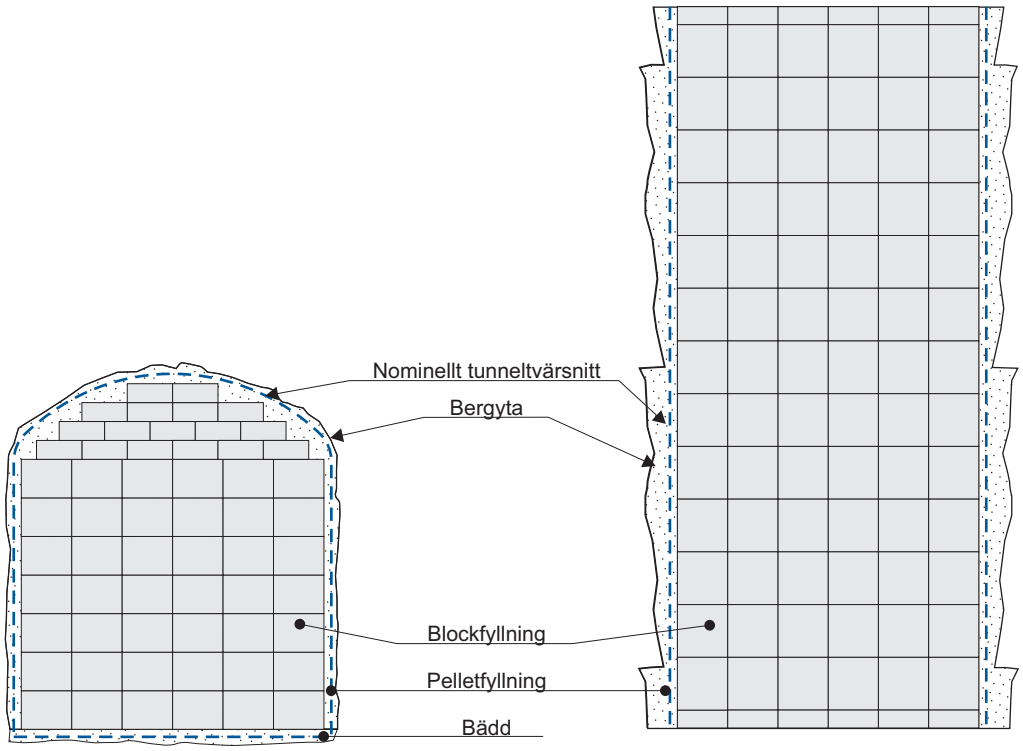
Referensåterfyllningsmaterialet är en bentonitlera med ett montmorillonitinnehåll på 50–60 procent (den tillåtna variationen är 45–90 procent), dvs ett vidare intervall än det som krävs för bufferten. I SR-Site används den bentonit som kallas Milos återfyllning (*Milos BF 04)* i /Olsson och Karnland 2009/ som ett exempel på ett sådant material. Sammansättningen av detta material återfinns i tabell 5-16.

Referensutformningen av blocken, pelletarna och bottenbäddmaterialet visas i tabell 5-17. Konstruktionsparametrarna specificerar de egenskaper som de olika komponenterna ska ha efter installationen. De olika återfyllningskomponenterna har olika densitet. På grund av detta uttrycks densiteterna som torrdensitet och vatteninnehållet specificeras för att underlätta bestämningen av densiteten efter installation i deponeringstunneln.

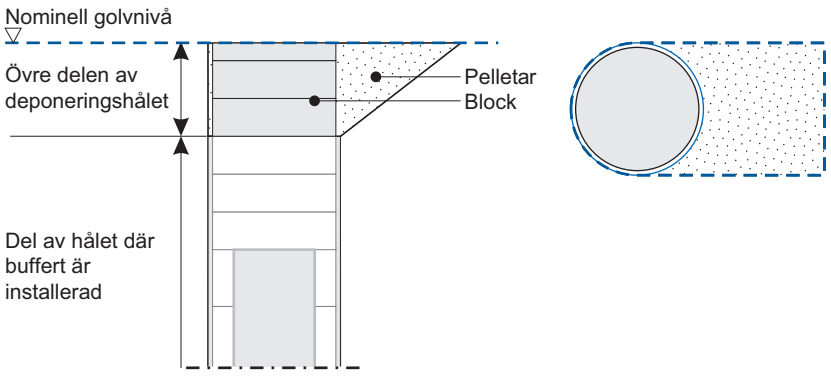
[12] T ex genom erosion efter pluggning av deponeringstunneln.

Den installerade torrdensiteten beror på deponeringstunnelns volym och massan hos återfyllningsmaterialet som installerats i tunneln. Den installerade densiteten beräknas per sprängsalva. Den fastställs från den tillåtna sprängsalvevolymen, blockens och pelletarnas torrdensitet och hur stor andel av volymen som är fylld med block, pelletar och bottenbädd. Ju större del av tunneln som är fylld och ju mindre dödvolym, desto högre är den installerade densiteten.

Den beräknade installerade densiteten för referensutformningen av återfyllningskomponenterna i enlighet med tabell 5-17 och den installerade återfyllningen i enlighet med tabell 5-18, redovisas i tabell 5-19.



Figur 5-15. *Referensgeometri för den installerade återfyllningen i en schematisk tunnel för ett vertikalt (vänster bild) och ett horisontellt (höger bild) tvärsnitt (baserad på illustration i* ***Produktionsrapporten för bufferten****).*



Figur 5-16. *Referensgeometri för återfyllningen i deponeringshålets övre del.*

Tabell 5-16. Dominerande katjon, katjonbyteskapacitet (CEC) och accessoriska mineraler för återfyllningsmaterialet.

Parameter	Nominellt innehåll i Milos återfyllning /Olsson och Karnland 2009/
Montmorillonit	58
Katjoner	Ca (40 %), Mg (48 %), Na (9 %), K (3 %)
CEC (mekv/100 g)	73
Sulfidsvavelinnehåll	~0,03 %
Totalt svavelinnehåll (inklusive sulfider)	0,06 %
Organiskt kol	0,38 %
Kalcit	~8 viktprocent
Glimmer/illit, inklusive illitskikt i I/S (illit/smektit)	6–8 viktprocent
Gips	~0,5 viktprocent
Albit	Inga värden
Ca-plagioklas	~1,5 viktprocent
K-fältspat	5–6 viktprocent
Dolomit	~16 viktprocent

Tabell 5-17. Referensblock, referenspelletar och bottenbäddmaterial klara för installation (baserade på Milos återfyllning).

Konstruktionsparameter	Nominell utformning	Tillåten variation
Block		
Torrdensitet (kg/m^3)	1 700	±50
Vatteninnehåll (%)	17	+2
	Som i materialet klart för kompaktering	Som i materialet klart för kompaktering
Mått (mm^3)	700·667·510	±2·2·2
	700·600·250	±2·2·2
Block i deponeringshålets avfasning[1] (ovanpå kapseln)		
Torrdensitet (kg/m^3)	1 710	±17
Vatteninnehåll (%)	17	±1
Mått (mm)	Höjd: 500	±1
	Diameter 1 650	
Pelletar och bottenbäddspelletar[2]		
Torrdensitet separata pelletar (kg/m^3)	1 700	±50
Mått (mm^3)	~16·16·8	–
Torrdensitet lös fyllning (kg/m^3)	1 000	±100
Vatteninnehåll (%)	17	+2
	Som i materialet klart för kompaktering	Som i materialet klart för kompaktering

[1)] I referensutformningen används buffertblock, och konstruktionsförutsättningarna är de som anges för fasta block i **Produktionsrapporten för bufferten**, tabell 3-4.

[2)] I referensutformningen används samma typ av pelletar till bottenbädden som till spalten mellan blocken och tunnelväggarna. Detta kan komma att ändras.

Tabell 5-18. Referensutformning för återfyllningen efter installation (baserat på Milos återfyllning).

Konstruktionsparametrar	Nominell utformning	Tillåten variation
Block		
Blockdelen i sprängsalvevolymen[1)]	I enlighet med figur 5-15	$V_{block} \geq 60$ %
Fritt utrymme mellan block och tunnelväggar	–	Fritt utrymme ≥ 10 cm
Pelletfyllning i spalten mellan blocken och tunnelväggarna		
Pelletdelen i sprängsalvevolymen	Volymen mellan de installerade blocken och deponeringstunnelns väggar	–
Bottenbädd		
Tjocklek	10 cm från det nominella tunnelgolvet	–
Lutning vinkelrät mot tunnelaxeln	–	< 3 mm/tunnelbredd
Lutning längs med tunnelaxeln	Lutning hos den nominella golvnivån	–
Torrdensitet hos kompakterad bädd	> 1 200 kg/m^3	–

[1)] Inkluderar block i den övre delen av deponeringshålet men inte spalter mellan blocken.

Tabell 5-19. Beräknad installerad torrdensitet för referensutformningen av återfyllningskomponenterna och den installerade återfyllningen. Tunnelvolymen har satts till den största tillåtna.

Parameter	Tunneltvärsnitt	Övre delen av deponeringshålet
Torrdensitet hos block	1 700 kg/m^3	1 710 kg/m^3
Torrdensitet hos pelletar[1)]	1 000 kg/m^3	1 200 kg/m^3
Spaltvolym mellan blocken	2 %	0
Volymen hos pelletfyllningen och bottenbädden	Totalvolym minus block- och dödvolym Nominellt: 25–16,8·(1+0,02) m^3/m Godtagbar: 25–0,60·25(1+0,02) m^3/m	2,56 m^3
Totalvolym	Maximal tillåten utsprängd tunnelvolym 25 m^3/m	5,17 m^3
Beräknad installerad torrdensitet (nominell blockdel av tvärsnittet och största tillåtna tunnelvolym)	1 458 kg/m^3	1 457 kg/m^3
Beräknad installerad torrdensitet (tillåten blockdel av tvärsnittet och största tillåtna tunnelvolym)	1 408 kg/m^3	–

[1)] För tunneltvärsnitten används samma densitet för pelletfyllningen mellan blocken som för tunnelväggarna samt bottenbädden.

Produktion

Produktionslinjen för återfyllningen består av tre huvuddelar:

- Brytning och leverans.
- Tillverkning av block, pelletar och bottenbäddmaterial.
- Hantering och installation.

Detaljerade uppgifter om produktionen återfinns i **Produktionsrapporten för återfyllningen**.

Medelstora och storskaliga tester har utförts för att testa tillgängliga tekniker för att hantera bentonitpelletarna/bentonitgranulaten och kompakteringstekniker för att få en stabil bädd. Tester har också gjorts för att testa funktionen hos en installerad bädd, dvs när bädden belastades med återfyllningsblock (sättningar etc) och vatten strömmade från berget /Wimelius och Pusch 2008/. Testerna utfördes med två bentonitmaterial, Minelco granuler och Cebogel pelletar. De storskaliga testerna utfördes i en konstgjord tunnel. Betongblock användes i stället för bentonitblock, eftersom testet främst fokuserade på att studera installationen av bottenbädden och hur denna betedde sig.

5.6.3 Initialtillstånd

Återfyllningens initialtillstånd är tillståndet då hela deponeringstunneln är återfylld. Grundvatteninflöde i deponeringstunneln och hur detta påverkar återfyllningen beaktas inte för initialtillståndet. Vid detta utvecklingsskede utgör det presenterade initialtillståndet för återfyllningen det resultat av konstruktionsparametrarna som kan förväntas baserat på erfarenhet och resultat från provtillverkningen.

De egenskaper som rör utformningen och för vilka det krävs uppfyllelse av konstruktionsförutsättningarna för den långsiktiga säkerheten är:

- Materialsammansättning.
- Installerad densitet.
- Installerad geometri.

I **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** beskrivs återfyllningen med hjälp av ett antal variabler. De flesta av dessa variablers värden för initialtillståndet bestäms av egenskaperna vid projekteringen. Förhållandet mellan variablerna och konstruktionsparametrarna är i stort sett det samma som för bufferten (se tabell 5-14).

Materialsammansättning

Materialsammansättningen för återfyllningsmaterialet i SR-Site presenteras i tabell 5-16.

Installerad densitet

Densiteten hos återfyllningsblocken och återfyllningspelletarna efter installation återfinns i tabell 5-20. Den installerade torrdensiteten, massan och porositeten som ska användas i SR-Site har beräknats baserat på initialtillståndsvärdena för återfyllningens och deponeringstunnelvolymernas konstruktionsparametrar. Resultaten visas i tabell 5-21. Värdena för referensutformningen ges som jämförelse.

Installerad geometri

Återfyllningens geometri beror av de utsprängda tunnelvolymerna. Måtten återfinns i **Berglinjerapporten**.

Uppfyllande av konstruktionsförutsättningarna

Hydraulisk konduktivitet och svälltryck: Enligt konstruktionsförutsättningarna ska återfyllningens hydrauliska konduktivitet vara mindre än 10^{-10} m/s och svälltrycket högre än 0,1 MPa. De materialspecifika förhållandena mellan salthalt, hydraulisk konduktivitet och svälltryck har fastställts för salthalter på 1 procent och 3,5 procent (vilket motsvarar havsvatten). Resultaten visas i figurerna 5-18 och 5-19. Den genomsnittliga installerade torrdensiteten kommer för referensutformningen att överskrida 1 450 kg/m^3, vilket ger en avsevärd marginal i förhållande till de torrdensiteter som krävs i enlighet med resultaten i figurerna 5-18 och 5-19. För högre densiteter minskar den hydrauliska konduktiviteten medan svälltrycket ökar. Under långa perioder kan lägre salthalt än de 3,5 procent som användes i figurerna förväntas, se avsnitten 10.3.7 och 10.4.7. För lägre salthalt minskar den hydrauliska konduktiviteten medan svälltrycket ökar. Således förväntas den hydrauliska konduktiviteten och svälltrycket hos referensåterfyllningsmaterialet, vid den installerade densiteten, uppfylla konstruktionsförutsättningarna samtidigt som det finns marginal för densitetsförluster.

Motstånd mot buffertsvällning: Enligt konstruktionsförutsättningarna ska återfyllningen begränsa uppåtriktad svällning/expansion av bufferten. Densitet och buffertdensitetsförlust på grund av uppåtriktad svällning/expansion har utvärderats genom beräkningar som i huvudsak baserats på buffertens svällningsegenskaper samt återfyllningens svälltryck och kompressibilitet. Även inverkan av torra förhållanden i tunneln har undersökts. En redovisning av dessa beräkningar ges i avsnitt 10.3.8 i denna huvudrapport.

Skadliga effekter på buffert och kapsel som uppstår på grund av buffertsammansättningen: Enligt konstruktionsförutsättningarna får återfyllningsmaterialet inte innehålla några ämnen som kan orsaka skadlig nedbrytning av bufferten eller kapselkorrosion. För närvarande ger analysen av den långsiktiga säkerheten varken ämnen eller begränsningar som konstruktionsförutsättningar. Baserat på specifikationerna av referensmaterialet analyseras i SR-Site den påverkan sammansättningen hos återfyllningsmaterialet har på buffertnedbrytning och kapselkorrosion.

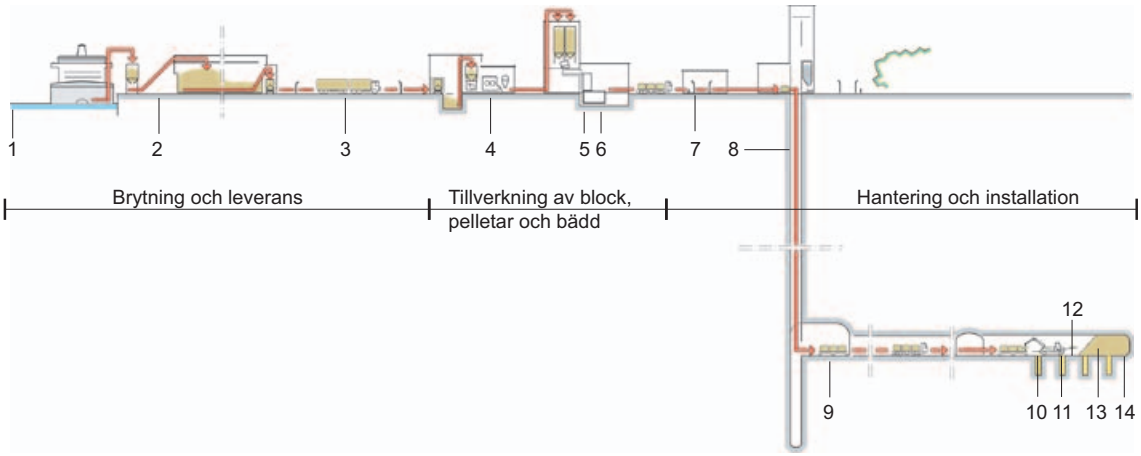
Skadliga effekter på buffert och kapsel som uppstår på grund av förlust av återfyllningsmaterial: Under driften kan en del av återfyllningsmaterialet i redan färdigställda och pluggade deponeringstunnlar gå förlorat på grund av kanalbildning och erosion. Materialförluster kan också förekomma senare under den tidsperiod som ingår i analysen, både under och efter mättnad av återfyllningen. Ingen av dessa materialförluster har ännu kvantifierats till fullo. I figur 5-20 visas marginalerna för kvoten mellan den installerade torrdensiteten och den densitet som krävs för att med avseende på olika andelar återfyllningsblock av tunnelvolymen uppfylla konstruktionsförutsättningarna för att begränsa uppåtriktad buffertsvällning/-expansion (dimensionerande densitet). Försöken omfattar två material, dels referensmaterialet i SR-Site Ibeco RWC-BF (Milos återfyllning) och dels Asha. Marginalen är 15–25 procent för Milos återfyllning och 20–33 procent för Asha.

Tabell 5-20. Konstruktionsparametrar för återfyllningen vid initialtillståndet.

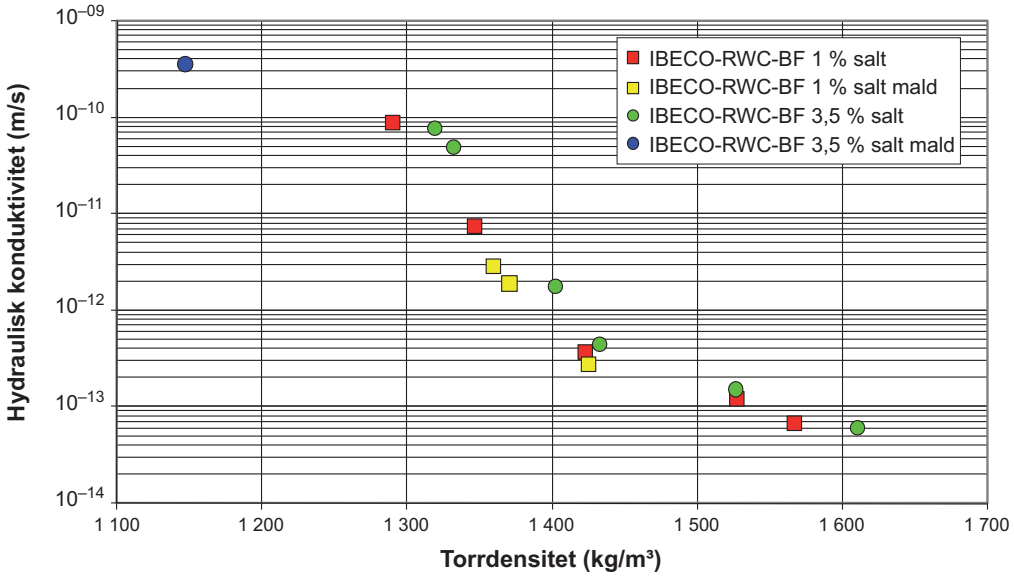
Konstruktionsparameter	Referensutformning	Initialtillstånd
Montmorillonitinnehåll	45–90 viktprocent	45–65 viktprocent (58 %)
Torrdensitet hos block (kg/m^3)		
– tunnelsektion	1 700 ±50 kg/m^3	1 700 ±50 kg/m^3
– övre delen av deponeringshål	1 710 ±17 kg/m^3	1 710 ±17 kg/m^3
Torrdensitet hos pelletfyllning (kg/m^3)	1 000 ±100 kg/m^3	1 000 ±100 kg/m^3
Torrdensitet hos kompakterad bottenbädd (kg/m^3)	> 1 200 kg/m^3	> 1 200 kg/m^3
Blockdel av tunnelvolymen	Nominell: Figur 5-15	Genomsnittlig: 74,1 %
	Godtagbar: ≥ 60 %	Min 67,3 % och max 78,7 %

Tabell 5-21. Torrdensitet, installerad mängd och luftvolym vid återfyllningens initialtillstånd.

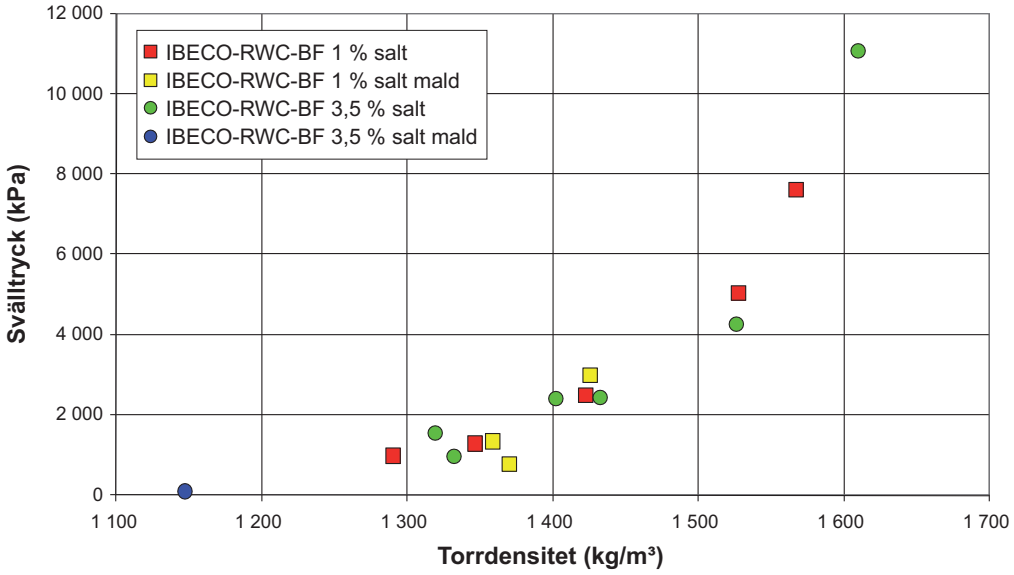
Parameter	Initialtillstånd	
	Medelvärde	Intervall
Torrdensitet (kg/m^3)	1 504	1 458–1 535
Mängd per meter tunnel (ton)	34,14	32,85–36,44
Porositet	0,46	0,44–0,48
Vattenmängd per meter tunnel (ton)	5,80	5,56–6,20
Luftvolym per meter tunnel (m^3)	4,62	4,00–5,70



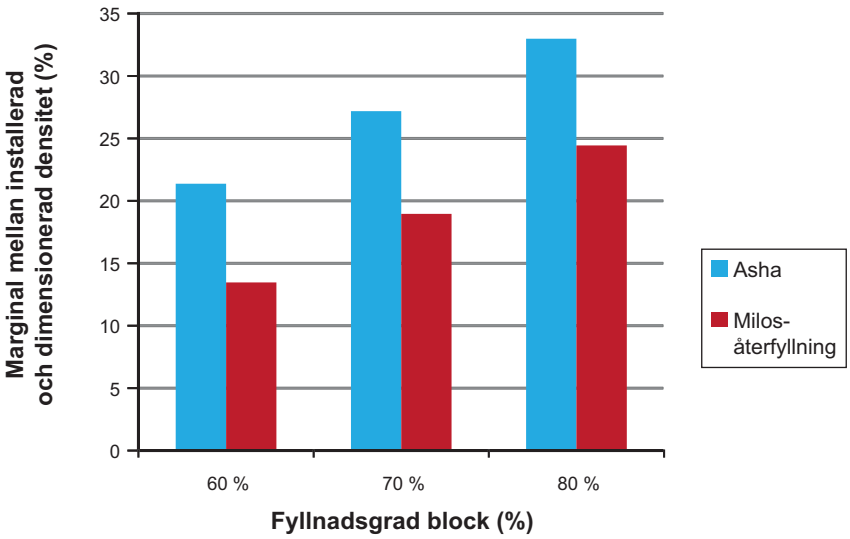
Figur 5-17. *Illustration av produktionslinjen för återfyllning från leverans av materialet till installationen i deponeringstunneln. 1. Brytning och leverans för utskeppning. 2. Materialleverans och mellanlagring i hamn. 3. Transport till och lagring vid produktionsanläggningen. 4. Konditionering av återfyllningsmaterialet. 5. Pressning av block. 6. Pressning av pelletar. 7. Mellanlagring på marknivå. 8. Transport till och lagring på förvarsnivå. 9. Beredning av deponeringstunneln. 10. Installation av återfyllningsmaterialet i uteslutna deponeringshål. 11. Installation av återfyllning i den övre delen av deponeringshålet. 12. Installation av bottenbädden. 13. Installation av block. 14. Installation av pelletar.*



Figur 5-18. *Hydraulisk konduktivitet för Ibeco RWC-BF som funktion av torrdensiteten. ”Malet” avser ett material som malts en extra gång före kompaktering /Johannesson et al. 2010/.*



Figur 5-19. *Svälltrycket för Ibeco RWC-BF som funktion av torrdensiteten. ”Malet” avser ett material som malts en extra gång före kompaktering /Johannesson et al. 2010/.*



Figur 5-20. *Marginal för kvoten mellan den installerade och den dimensionerande densiteten för Milos återfyllning och Asha och olika andelar blockfyllning av tunnelvolymen. Beräknad från data i avsnitt 4.4 i* ***Produktionsrapport för återfyllningen****. Marginalen kan betraktas som den mängd återfyllning som kan förloras utan att äventyra konstruktionsförutsättningen att återfyllningen ska säkerställa att buffertdensiteten förblir högre än minimivärdet i utformningen.*

5.7 Initialtillstånd för förvarsförslutningen och andra tekniska komponenter i förvaret

I det här avsnittet beskrivs initialtillståndet för de övriga tekniska komponenterna i förvaret. Dessa definieras för SR-Site-ändamål i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** enligt följande:

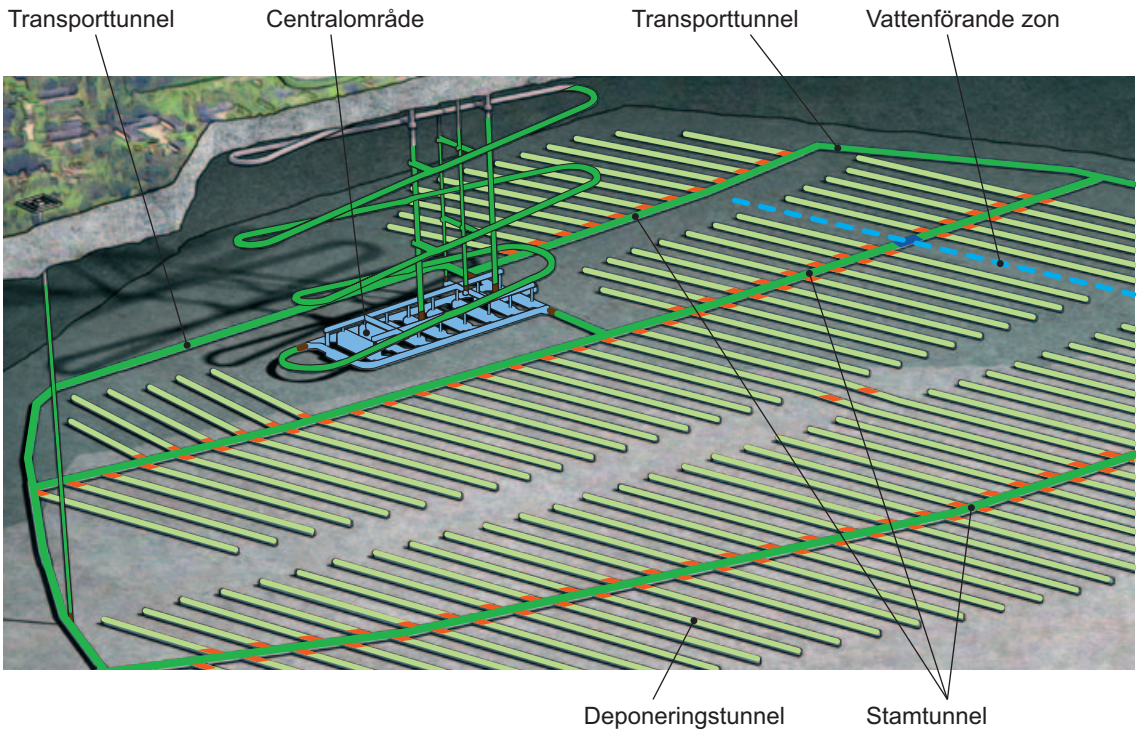
1. Pluggar i deponeringstunneln: behandlas i **Produktionsrapporten för återfyllningen**.
2. Centralområde: behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
3. Toppförslutning: behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
4. Bottenplatta i deponeringshål: behandlas i **Berglinjerapporten**.
5. Borrhålsförslutningar: behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.

I **Produktionsrapporten för förslutningen** behandlas referensutformningen och produktionen av ovanstående och även nedanstående komponenter samt deras initialtillstånd:

6. Förslutning av stamtunnlar och transporttunnlar.
7. Förslutning av ramp och schakt under toppförslutningen.
8. Pluggar (förutom pluggar i deponeringstunnlar).

I SR-Site behandlas dock förslutningen av alla tunnlar på förvarsdjup, liksom rampen och schakten under toppförslutningen, som tunnelåterfyllning enligt nuvarande referensutformning. Betongen som används i pluggarna har samma sammansättning som betongen i pluggarna i deponeringstunnlarna.

Syftena med förslutningskomponenterna är i allmänhet att begränsa grundvattensflödet genom bergutrymmen, att sörja för mekanisk inneslutning och att förhindra oavsiktligt intrång i förvaret. Ett undantag i detta avseende är bottenplattan i deponeringshålen som endast har till syfte att underlätta installationen av kapseln och bufferten. Figur 5-21 visar olika typer av förslutningar och pluggar såsom de framställs i **Produktionsrapporten för förslutningen**.



Figur 5-21. *Referensutformningar för förslutningar och pluggar i olika typer av bergutrymmen (figur 3-1 i* ***Produktionsrapporten för förslutningen****).*

5.7.1 Konstruktionsförutsättningar relaterade till långsiktig säkerhet

Konstruktionsförutsättningar har formulerats enligt följande /SKB 2009a/:

- Under toppförslutningsnivån måste den integrerade och effektiva konnekterade hydrauliska konduktiviteten hos återfyllnaden i tunnlar, ramper och schakt och i den omgivande EDZ vara mindre än 10^{-8} m/s. Detta värde behöver inte upprätthållas i sektioner där t ex tunneln eller rampen passerar mycket transmissiva zoner[13]. Det finns ingen begränsning av den hydrauliska konduktiviteten i centralområdet.
- Det finns ingen begränsning av den hydrauliska konduktiviteten i toppförslutningen.
- Toppförslutningens djup kan anpassas till det förväntade permafrostdjupet under analysperioden, men får inte vara djupare än 100 m ovanför förvarsdjupet.
- Endast material med lågt[14] pH (< 11) är tillåtna under toppförslutningsnivån.
- Övriga främmande material måste begränsas – men de mängder som beaktades i SR-Can hade ingen betydelse.
- Borrhål måste förslutas, så att de inte i onödan försämrar förvarets inneslutnings- eller fördröjningsförmåga. 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 hålet exempelvis går genom mycket transmissiva zoner.

[13] Enligt en utförligare förklaring i /SKB 2009a/ kommer inte ett kort avsnitt med en hydraulisk konduktivitet som är högre än den hos det sedvanliga förslutningsmaterialet att ha någon inverkan på flöden till eller från förvaret.

[14] Även om pH 11 inte är ”lågt” generellt sett är det lågt med avseende på cementbaserade material.

5.7.2 Referensutformning

Deponeringstunnelpluggar

Deponeringstunnelpluggarnas huvudfunktion är att stänga till deponeringstunnlarna, hålla återfyllningen på plats och förhindra att vatten rinner förbi pluggen innan stamtunneln har återfyllts och vattenmättats. Dessa pluggar har utformats speciellt med hänsyn till buffertens och återfyllningens egenskaper och funktion. Pluggens detaljutformning är under utveckling, men den vattentäta föreseglingen av högkompakterad bentonit kommer att installeras i en slits som tagits ut ur tunnelväggen på ett skonsamt sätt. Slitsen är så djup att alla eventuella flödesvägar som orsakats av störningen vid berguttaget skärs av.

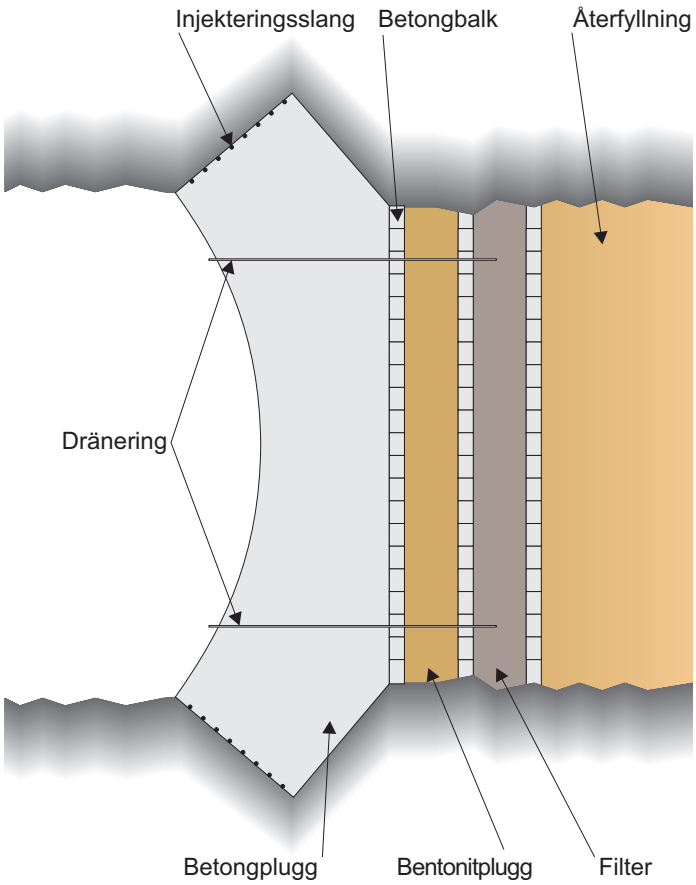
Pluggar i deponeringstunnlarna består av flera delar som på olika sätt bidrar till att under livstiden upprätthålla pluggarnas funktioner under härdningsfasen, tätningsfasen och fasen efter förslutning, se **Produktionsrapport för återfyllningen**. Referenspluggens olika delar visas i figur 5-22.

Övriga pluggar

Övriga pluggar i förvaret kan ha olika ändamål och bidrar inte till säkerheten. Det är endast pluggar till deponeringstunnlar som behandlas speciellt i SR-Site.

Centralområde

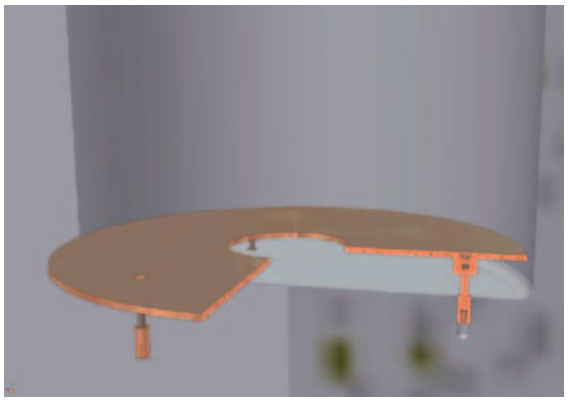
Den enda funktion som förslutningen av bergutrymmena i centralområdet har, se figur 5-3, är att ta upp utrymme utan någon annan konstruktionsförutsättning än att förhindra väsentlig konvergens och sättningar hos det omgivande berget. Med hänsyn till detta används för referensutformningen krossad sprängsten som placeras i horisontella skikt och sedan kompakteras.



Figur 5-22. *Plansnitt av pluggens referensutformning.*

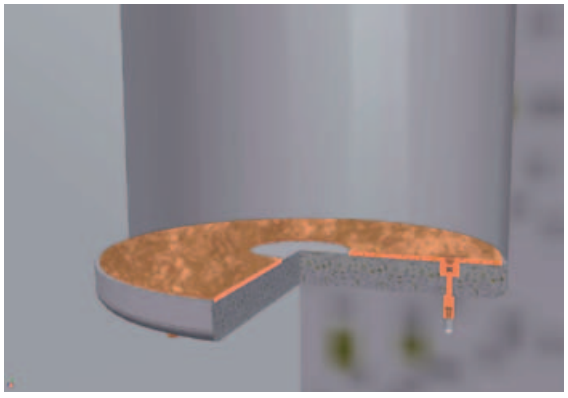
Bottenplatta

Referensmetoden för borrning av deponeringshål kommer inte att ge upphov till en plan botten. För att åstadkomma en tillräckligt plan botten i deponeringshålet installeras en bottenplatta. Referensbottenplattan består av en betongplatta tillverkad av cement med lågt pH samt en undre och en övre kopparplatta. Vid installationen fästs tre bultar i berget i botten av deponeringshålet. Den 20 mm tjocka undre kopparplattan placeras över bultarna. Bultarna används sedan för att justera kopparplattan så att den kommer i horisontellt läge. Därefter hälls betongen genom ett hål i mitten av den undre kopparplattan så att ett 150 mm tjockt skikt bildas. Slutligen placeras den 10 mm tjocka övre kopparplattan i deponeringshålet. Bottenplattan visas i figur 5-23. En utförlig beskrivning av bottenplattan ges i /Wimelius och Pusch 2008/.



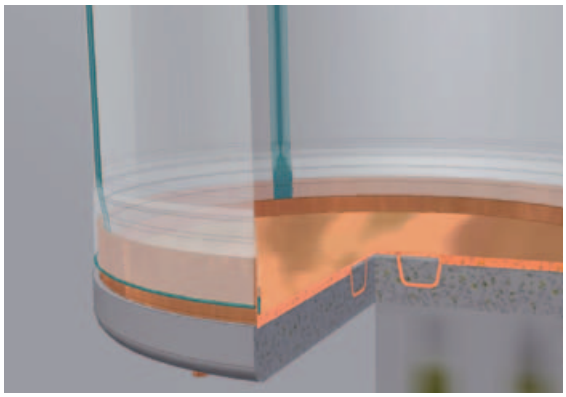
Bottenplattan av koppar vilar på bultar som fixerats i berget.

Tjocklek	20 mm
Diameter	1 710 mm
Håldiameter	450 mm
Nominell vikt	382 kg



Betongplatta som gjuts genom hålet på bottenplattan.

Tjocklek	150 mm
Nominell vikt	650 kg
Betongsammansättning	se tabell 5-1



Övre kopparplatta med fastsättningsanordningar och en kant som underlättar för installationsutrustningen för bufferten.

Tjocklek	~10 mm
Diameter	1 710 mm
Nominell vikt	246 kg

Figur 5-23. *Bottenplattan i deponeringshålet (från* ***Berglinjerapporten****).*

Borrhålsförslutningar

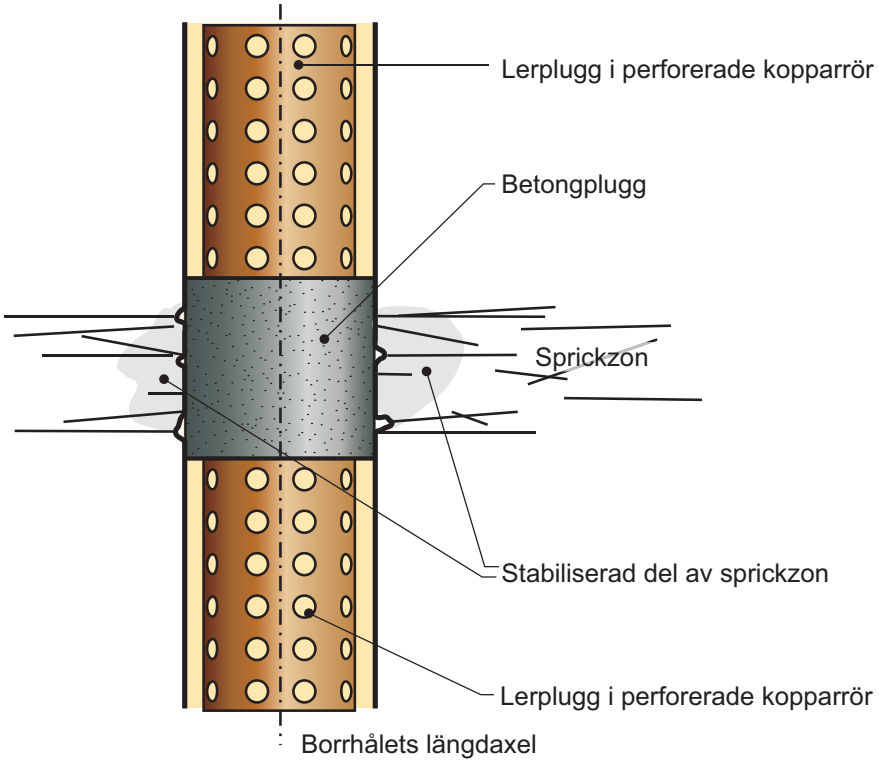
Ett antal undersökningsborrhål, hål som borrats både från ytan och från bergutrymmen, måste tätas vid förslutningen av slutförvaret. I layouten av slutförvarsanläggningen tar man hänsyn till borrhålens läge för att säkerställa att de borrhål som är förbundna med ytan inte korsar några bergutrymmen. Dessutom får inte deponeringshål skärs av några undersökningsborrhål. Borrhålsförslutningens geometri bestäms huvudsakligen av de borrade hålens dimensioner. Längden på de borrhål som utgår från markytan varierar mellan ett par meter till mer än 1 000 m och diametern är i intervallet från 56 till 120 mm. Borrhålen som utgår från tunnlar förväntas vara några hundra meter långa med en diameter på 56 till 76 mm. De ytligaste delarna av borrhålen kan ha större diametrar. Vissa borrhål kan vara mer eller mindre horisontella.

Hårt kompakterad bentonit kommer att användas där täta förslutningar behövs och cementstabiliserade pluggar kommer att gjutas på de ställen där borrhålen passerar genom sprickzoner, se figur 5-24. Borrhålspluggen kommer att bestå av cylinderformade färdigkompakterade lerblock placerade inuti perforerade kopparrör.

För referensutformningen har MX-80-bentonit valts ut. För att förhindra erosion under installationsskedet torkas bentoniten i förväg till ett vatteninnehåll på omkring 6 procent och kompakteras sedan till en torrdensitet på 1 900 kg/m^3. Bentonitpluggarna är placerade i perforerade kopparrör som sammanfogas när de förs in i hålen. Kopparrören ger ett mekaniskt skydd mot nötning i installationsskedet. För ett borrhål med en diameter på 80 mm har det perforerade kopparröret i referensutformningen en ytterdiameter av 76,1 mm och en innerdiameter av 72,1 mm. Rören har en perforeringsgrad av 50 procent med hål på 10 mm i diameter för att låta bentoniten svälla ut i utrymmet mellan röret och berget.

Längs de sektioner där borrhålen passerar vattenförande sprickzoner skulle bentoniten eventuellt kunna erodera. På sådana ställen fylls hålen därför med kvartsbaserad betong som är ett genomsläppligt och erosionsbeständigt material, se figur 5-24. Närmare detaljer ges i/Pusch och Ramqvist 2007/.

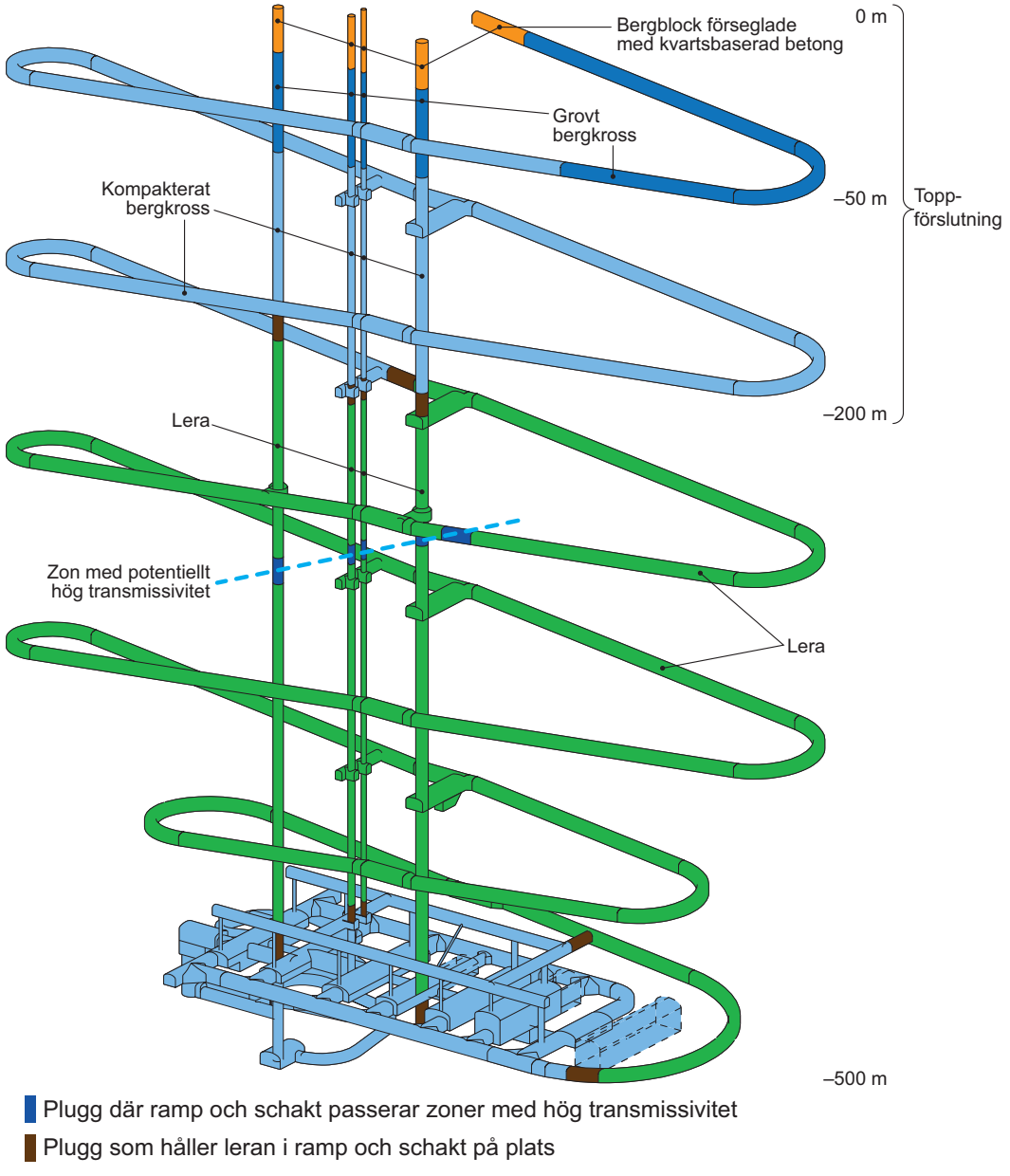
Den övre delen av borrhål som är förbundna med ytan kommer att tätas med ett material som kan motstå det svälltrycket från leran och som ger beständighet mot mekanisk inverkan som erosion och nedisningar.



Figur 5-24. *Planskiss över konstruktionen av betongpluggar i delar där borrhålet passerar vattenförande sprickor. I referensutformningen består lerpluggen av bentonit.*

Förslutning av stamtunnlar, ramp och schakt

För att uppfylla konstruktionsförutsättningarna kommer förslutningen i stamtunnlar och transporttunnlar att vara baserad på samma principer – block och pelletar – som återfyllningen i deponeringstunnlar, även om materialet och densiteten kommer att vara annorlunda. En översikt av referensutformningen för förslutningen i stamtunnlar och transporttunnlar ges i avsnitt 5.6. I referensutformningen återfylls rampen och schakten med lera upp till ett djup på 200 m där toppförslutningen börjar. Bestämningen av toppförslutningens djup beror på förekomsten av vattenförande strukturer och det förväntade permafrostdjupet i Forsmark. Figur 5-25 visar de delar av ramp och schakt som tillhör toppförslutningen, de djupare delarna återfyllda med lera samt placeringen av pluggar i ramp och schakt.



Figur 5-25. *Toppförslutning, de lerfyllda delarna av ramp och schakt och placeringen av pluggar i ramp och schakt.*

Toppförslutning

För att uppfylla det krav som anger att ”förslutning i den övre delen av rampen, schakten och borrhålen ska förhindra oavsiktligt intrång i förvaret” kommer rampen och schakten, från ett djup på –200 till –50 m från nollnivå, att fyllas med bergkross med en maximal partikelstorlek av 200 mm. Bergfyllningen måste kompakteras ordentligt för att minimera självkompaktering under egenvikt och jordlagret /Pusch 2008/. De översta 50 metrarna av rampen och schakten ska enligt planerna återfyllas med mycket grovt bergkross, som måste kompakteras ordentligt för att minimera självkompaktering. De ytligaste delarna av rampen och schakten kommer att fyllas med tämligen välinpassade block av kristallint berg. Med en god – men inte perfekt – inpassning av blocken undviks valvbildning, och de öppna utrymmena mellan bergblocken anses inte påverka sättningar i påtaglig grad. Referensutformningen för förslutning av den övre delen av rampen och schakten visas i figur 5-25.

5.7.3 Produktionsrutiner

Förslutning av förvaret kommer, med undantag från vissa borrhål som måste förslutas tidigare, inte att äga rum förrän allt använt kärnbränsle har deponerats. Detta betyder att förslutningsverksamheten ligger långt fram i tiden. Hittills har SKB prioriterat utvecklingen av återfyllning och pluggar i deponeringstunnlarna. Utvecklingen av förslutningar för stamtunnlar och transporttunnlar samt för rampen och schakten under toppförslutningens nivå har ännu inte utvecklats, men kommer troligen att likna förslutningarna av deponeringstunnlarna. Av detta skäl hänvisar detta avsnitt till **Produktionsrapporten för återfyllningen**.

Före förslutning av något bergutrymme kommer olika konstruktioner, till exempel vägbäddar, byggkomponenter och installationer, att tas bort som en del av avvecklingen, och bergutrymmet kommer att rengöras. Rutinerna för denna verksamhet har ännu inte fastställts.

Förutom avveckling är huvudstegen för förslutningen av förvaret följande:

- Återfyllning och vid behov installation av pluggar i alla ventilationsschakt som befinner sig långt från centralområdet.
- Återfyllning och vid behov installation av pluggar i stamtunnlar och transporttunnlar.
- Installation av pluggar där transporttunnlarna ansluter till centralområdet.
- Återfyllning av centralområdet.
- Installation av pluggar där centralområdet ansluter till schakt och ramp.
- Återfyllning och vid behov installation av pluggar i rampen och de återstående schakten.
- Installation av toppförslutning.

Borrhålsförslutningar installeras vid lämpliga tillfällen före eller under övriga förslutningsverksamheter.

Produktionen av bottenplattan kommer att bygga på tillgänglig kunskap och sedvanlig teknik. SKB förutser inga svårigheter att tillverka och installera den enligt referensutformningen.

5.7.4 Initialtillstånd

Initialtillståndet för förslutningen är det tillstånd när allt förslutningsmaterial i ett särskilt bergutrymme eller borrhål är installerat och borrhålet, bergutrymmet, schaktet eller tunneln har förslutits. Hänsyn har inte tagits till inflöde av grundvatten till ett bergutrymme eller ett borrhål och dess påverkan på förslutningen i initialtillståndet. Detta utvärderas i stället som en del av SR-Site, se kapitel 10.

För att uppfylla konstruktionsförutsättningarna för den långsiktiga säkerheten behöver krav ställas på följande:

- Materialsammansättning.
- Installerad massa (densitet).
- Installerad geometri.

Enligt punkt 1–5 i avsnitt 5.7.1 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** kännetecknas förslutningskomponenterna av ett antal variabler. De flesta av dessa variablers värden för initialtillståndet bestäms av konstruktionsegenskaperna. För de lerfyllda delarna är förhållandena mellan variablerna och konstruktionsparametrarna i grunden desamma som för bufferten, se tabell 5-14.

Materialets sammansättning, installerad mängd, installerad geometri

Huvudkomponenterna i den installerade pluggen i deponeringstunneln och de parametrar som ska granskas vid produktionen visas i tabell 5-22, och måtten visas i figur 5-26. I det här utvecklingsskedet ska de presenterade resultaten ses som exempel. För vissa parametrar är det för närvarande varken möjligt eller meningsfullt att presentera data.

Initialtillståndet hos de övriga komponenterna vid förslutningen av de olika bergutrymmena och borrhålen visas i tabell 5-23. I det här utvecklingsskedet beskrivs förslutningsegenskaperna som en sammanställning av rimliga värden på vissa huvudparametrar som kan uppskattas med utgångspunkt från rådande resultat och erfarenheter.

Bottenplattans initialtillstånd beskrivs i avsnitt 5.7.2.

Uppfyllelse av konstruktionsförutsättningarna

Beträffande återfyllningen i stamtunnlar, ramp och schakt kommer samma material och liknande produktionsrutiner som för återfyllningen i deponeringstunnlar att användas. Eftersom den maximalt tillåtna hydrauliska konduktiviteten hos återfyllningen i deponeringstunneln är två storleksordningar lägre än den i stamtunnlar, ramp och schakt, och eftersom konstruktionsförutsättningarna för återfyllningen i deponeringstunnlarna förutsätts vara uppfyllda enligt avsnitt 5.6.3, antas det att förutsättningarna även uppfylls för stamtunnlar, ramp och schakt.

Angående borrhålsförslutningarna har SKB, i samarbete med Posiva och som en del av SKB:s Fudprogram, tagit fram koncept för att försluta långa och korta borrhål. Koncepten grundar sig på de som prövades i Stripa och användes i SFR och som bedöms fungera i både brant och svagt stupande borrhål /Pusch och Ramqvist 2007/.

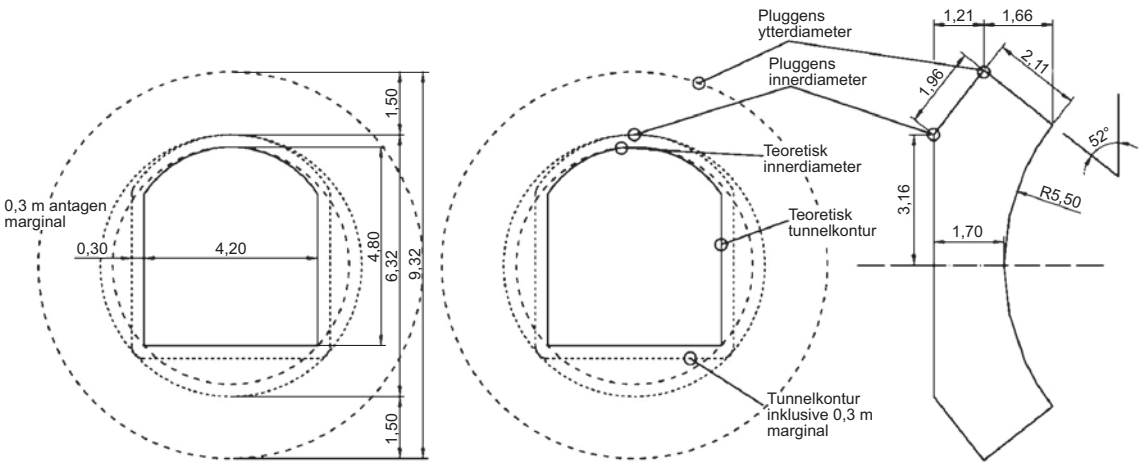
Tabell 5-22. Huvudkomponenterna och konstruktionsparametrarna för den installerade pluggen.

Komponent/konstruktionsparameter	Nominell utformning	Godtagbara variationer
Betongplugg		
Betong	Betongblandning med lågt pH B200 (200 kg bindemedel/m^3) enligt recept i **Produktionsrapporten för återfyllningen**.	Kommer att fastställas enligt standarder för sedvanlig betong.
Armering	Kvalitet K500ST[1)].	Enligt standard.
	Mängd och geometri enligt armeringsritning[1)].	Enligt armeringsritning[1)].
Mått	Enligt ritning[2)] (se figur 5-26).	Enligt ritning[2)].
Vattentät förslutning		
Tjocklek	0,71 m.	±10 mm.
Materialsammansättning	Se avsnitt 5.6.2 om återfyllning.	Se avsnitt 5.6.2 om återfyllning.
Installerad torrdensitet	1 900 kg/m^3.	Ännu inte fastställd.
Filter		
Installerad torrdensitet	> 1 900 kg/m^3.	Ännu inte fastställd.
Tjocklek	0,7 m.	Tolerans på 5 %.
Balkar[3)] och andra förtillverkade komponenter		
Betong i balkar	Betongblandning med lågt pH.	Kommer att fastställas enligt standarder för sedvanlig betong.
Armering i balkar	Stål av standardkvalitet.	Enligt standard.
Material till dräneringsrör	Titan.	Enligt standard.
Mått på dräneringsrör	Ännu inte fastställt.	Ännu inte fastställt.

[1)] Armeringen kan utelämnas eller också kan mängderna bestämmas enligt sedvanliga utformningsprinciper.

[2)] Det kommer att tas fram detaljerade ritningar enligt sedvanliga rutiner.

[3)] Kommer att utformas enligt sedvanliga rutiner.



Figur 5-26. *Betongpluggens mått. Berget innanför den teoretiska inre kanten har inte tagits med i beräkningarna av hur den mekaniska belastningen från pluggen tas upp av berget. Skillnaden på 0,3 m mellan den teoretiska och den verkliga tunnelkonturen utgör stickningsvinkeln, som är ett resultat av utsprängningen. Den skadade zonen är djupare i tunnelns golv och därför bör pluggen förankras djupare i berget under tunnelgolvet.*

Tabell 5-23. Förslutningens initialtillstånd i de olika bergutrymmena och borrhålen.

	Material	Volym (m^3)	Installerad torrdensitet (kg/m^3)	Densitet hos fasta partiklar (kg/m^3)	Porositet (%)	Torrvikt hos installerad förslutning (ton)	Integrerad hydraulisk konduktivitet (m/s)
Stamtunnlar	Lera	390 000	1 460	2 780	47,5	569 400	$< 10^{-8}$
Transporttunnlar	Lera	225 000	1 460	2 780	47,5	328 500	$< 10^{-8}$
Centralområde	Bergkross	125 000	1 900	2 670	28,8 % i det kompakterade bergkrosset; 100 % i crown space	237 500	10^{-5}
Ramp (upp till nivå – 200 m)	Lera	115 000	1 460	2 780	47,5	167 900	$< 10^{-8}$
Schakt (upp till nivå – 200 m)	Lera	25 000	1 460	2 780	47,5	36 500	$< 10^{-8}$
Toppförslutning	Bergkross	95 000	1 600	2 670	40,1 % i det kompakterade bergkrosset; 100 % i crown space	152 000	10^{-1}
Borrhål	Lera, koppar, betong	För geometri, se avsnitt 5.7.2	1 630 (lera)	2 780	28,1		$< 10^{-8}$
Pluggar	Armerad betong						

Exempel på resultat som rapporteras i /Pusch och Ramqvist 2007/ är:

- Långtidstesten visar att en höggradig svällning och homogenisering erhålls efter 10–20 dagar. Det uppmätta genomsnittliga svälltrycket mot berget för den initiala torrdensiteten på 1 905 kg/m^3 i lerpluggen är 2 800 kPa i sötvatten och 600 kPa i saltvatten (Äspölaboratoriet). Efter mättnad och expansion in i utrymmet mellan röret och borrhålsväggen kommer lerpluggen att uppnå en densitet på 2 025 kg/m^3 vilket motsvarar en torrdensitet på 1 630 kg/m^3. Mätning av den hydrauliska konduktiviteten hos leran mellan rör och berg visade att den var lägre än $9 \cdot 10^{-13}$ m/s för mättning och perkolation med sötvatten och $2 \cdot 10^{-12}$ m/s för saltvatten.
- Det går att plugga igen den övre änden av djupa borrhål med hjälp av kopparpluggar och pluggar av kvartsbaserad betong, som båda kan stå emot axialtryck på mer än 30 MPa. Skjuvhållfastheten och deformationsmodulerna hos pluggar av kvartsbaserad betong kan förbättras avsevärt genom inblandning av centimeterstora kvartsfragment.
- Funktionen hos denna typ av pluggar har undersökts och demonstrerats. När det gäller betongpluggar har den uppmätta hållfastheten vid tester i full skala uppvisat en god överensstämmelse med predikterade värden från laboratorieförsök. När det gäller lerpluggar visar undersökningar i borrhål som har varit igenpluggade i många år att pluggarna är mycket homogena. I denna undersökning visas även att svällförmågan och den hydrauliska konduktiviteten överensstämmer väl med förutsägelserna.

Det har även visats i tester att leror med Na som den huvudsakliga adsorberade katjonen bör användas, eftersom Ca-mättad lera inte expanderar så lätt genom perforeringen i kopparröret under mättnadsskedet, varken i sötvatten eller i saltvatten.

5.8 Övervakning – ”monitering”

Uppförande och drift av förvaret kommer att orsaka störningar på förvarsplatsen. Aspekter som rör säkerheten kommer att hanteras i säkerhetsanalysen. Det är viktigt att övervaka störningarna för att öka kännedomen om förvarsplatsen och det tänkta förvaret i enlighet med vad som beskrivs utförligare i ramprogrammet för detaljundersökningar /SKB 2010b/. Det ställs dock inga rättsliga krav på övervakning efter förvarets förslutning. Ett av de grundläggande kraven är att ett slutförvar ska kunna fylla sin funktion utan underhåll eller övervakning. Analysen av den långsiktiga säkerheten och uppfyllandet av tillämpliga regler görs enligt dessa antaganden. Monitering efter förslutning kan fortfarande övervägas men får då inte försämra förvarets säkerhetsfunktioner. SKB:s moniteringsstrategi är under utveckling men är i stort sett densamma som den som presenterades i SR-Can-rapporten /SKB 2006a/. Det betyder att den då citerade rapporten, /Bäckblom och Almén 2004/ fortfarande ger en aktuell sammanfattning av den rådande SKB-strategin i detta hänseende.

5.8.1 Övervakning för att beskriva utgångsförhållanden

Många av de undersökta parametrarna på förvarsplatsen som nederbörd och grundvattennivåer uppvisar ett mönster av mer eller mindre uttalade tidsmässiga variationer. Exempel på sådana variationer är förändringar i temperatur och nederbörd beroende på årstid. Klimatförändringar kan ge långsiktiga förändringar eller trender när det gäller meteorologiska parametrar, vilket kan orsaka variationer hos en eller flera andra parametrar. Undersökningar och verksamhet under jord kan dessutom i sig själva ge upphov till förändringar eller variationer hos vissa parametervärden.

Som fastställdes i den övergripande SKB-strategin för övervakning /Bäckblom och Almén 2004/ och som dessutom beskrivs utförligt i ramprogrammet för detaljundersökningar /SKB 2010b/, är ändamålet med att bestämma utgångsförhållandena vid undersökningarna av förvarsplatsen från ytan att definiera ett referenstillstånd. När de förändringar som orsakats av förvarsutveckling jämförs med detta referenstillstånd kan de identifieras och särskiljas från naturliga och av människan framkallade tidsmässiga och rumsliga variationer i förvarsmiljön.

Beskrivningen av utgångsförhållandena är i huvudsak identisk med den platsbeskrivande modellen, **Platsbeskrivning Forsmark**, och grundar sig på data som erhållits från platsundersökningsprogrammet. En del av denna karakterisering gäller egenskaper som varierar med tiden. Därför inleddes ett övervakningsprogram som täcker in både geovetenskapliga och ekologiska parametrar under platsundersökningarna, se avsnitt 2.4 i **Platsbeskrivning Forsmark** och /SKB 2007a/. Med några få undantag har detta program fortgått sedan platsundersökningarna i Forsmark avslutades och kommer att fortgå när berguttaget under jord påbörjas.

5.8.2 Övervakning av inverkan från uppförandet av förvaret

Moniteringen av inverkan från uppförandet av förvaret kommer att ingå som en del av detaljundersökningsprogrammet /SKB 2010b/, som kommer att genomföras när berguttaget under jord påbörjas. Syftet med moniteringen är att undersöka hur uppförande och drift av förvaret påverkar miljön. Dessa observationer kan också ge tillgång till data, som har betydelse för hydrogeologisk och hydrogeokemisk modellering samt verifiering av sådana modeller. Det är tänkt att moniteringen ska bygga på det befintliga övervakningsprogram som beskrivs i det tidigare avsnittet. Innan detaljundersökningarna genomförs kommer man att bedöma det befintliga övervakningsprogrammets lämplighet och se över det vid behov. Särskild fokus kommer att läggas på det faktum att programmet är avsett att genomföras under mycket lång tid, samtidigt som det fortfarande ska lämpa sig för huvudsyftet att fastställa byggandets och driftens inverkan på miljön. Allt eftersom byggandet och driften fortgår kommer det att finnas behov av att regelbundet omvärdera urvalet av moniteringsparametrar, moniteringsobjekt och mätfrekvenser. Programmet bör också uppfylla de krav som ställs från miljökontrollprogrammet och kontrollen av uppförandet av förvaret.

5.8.3 Kontrollprogram för uppförande och drift av förvaret

Innan förvaret byggs kommer ett kontrollprogram att tas fram med syftet att säkerställa att konstruktionsförutsättningarna och andra krav på bygg- och driftverksamheten uppfylls. Kontrollprogrammet kommer att beakta:

- Leveranser av material.
- Utförande.
- Kontroll av anläggningen i dess slutliga skick och dess slutliga funktion, jämfört med utformningen och specificeringen av driftverksamheten.

Kontrollprogrammet med tillhörande kvalitetsdokumentation utgör grunden för att bedöma om bygg- och driftarbetet uppfyller de angivna konstruktionsförutsättningarna och kraven på effektivitet och kvalitet. Kontrollprogrammets syften och innehåll kommer att definieras innan byggverksamheten under jord påbörjas, men kommer att utvecklas och anpassas utifrån vunna erfarenheter.

5.8.4 Övervakning efter avfallets deponering

Förslutningen av förvaret är en process som utförs i på varandra följande steg från att stänga igen en deponeringstunnel till att stänga igen ett eller flera deponeringsområden för att därefter försluta hela förvaret. Monitering, som den beskrivs i det tidigare avsnittet, är tänkt att fortgå tills allt avfall har deponerats och förslutningen av förvarsanläggningen påbörjas. Moniteringssystemen kommer att avvecklas successivt vid förslutning. I det här skedet bör man överväga i vilken utsträckning själva förslutningsprocessen behöver övervakas.

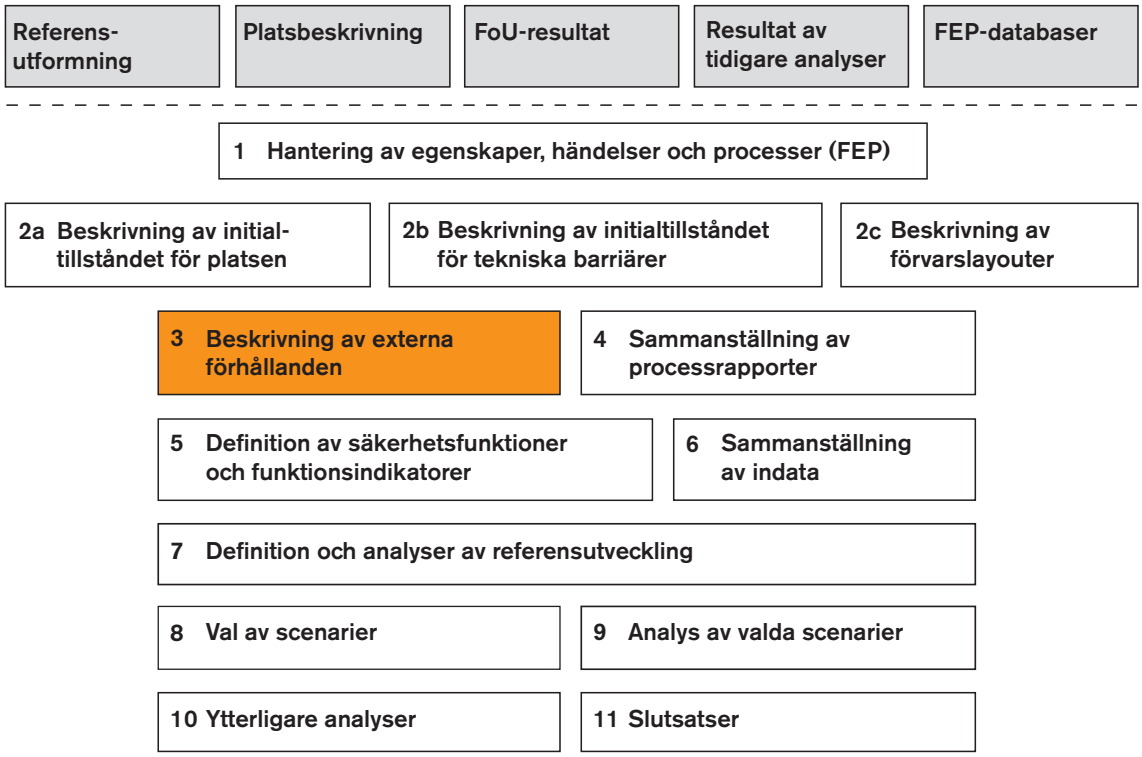
Avsikten är inte att övervaka de tekniska barriärsystemen, dvs kapsel, buffert och återfyllning, för slutdeponerat avfall, eftersom utplacering av instrumentering och de nödvändiga kabelledningarna till sensorer sannolikt försämrar de tekniska barriärernas säkerhetsfunktioner.

Som nämnts tidigare ställs det inga rättsliga krav på övervakning efter förslutning. Enligt /Bäckblom och Almén 2004/ kan det uppkomma motiv för övervakning i slutförvarsskedet, såsom verifiering av kraven på kärnämneskontroll. Omfattningen av moniteringsprogrammet i slutförvarsskedet kommer i stor utsträckning att avgöras av beslut som fattas vid, eller strax före, förslutning. Det är lämpligt att alla beslut om övervakning i slutförvarsskedet fattas av beslutsfattaren vid förslutningstillfället.

Om monitering i slutförvarsskedet övervägs bör dock tillämpliga regler från Strålsäkerhetsmyndigheten beaktas. (SSMFS 2008:21 *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.”* Vidare anges i de allmänna råden till denna paragraf att: *”Det bör framgå av säkerhetsredovisningen för anläggningen enligt 9 § att åtgärderna antingen har en liten och försumbar inverkan på slutförvarets säkerhet eller att åtgärderna medför en förbättring av säkerheten, jämfört med fallet att åtgärderna ej vidtagits.”*

Eftersom det för närvarande inte finns någon plan för monitering efter förslutning och eftersom det inte bör finnas behov av sådan övervakning för att säkerställa säkerheten, tas i SR-Site ingen hänsyn till monitering sedan avfallet placerats ut. Det antas också att sådan övervakning, om den skulle utföras, inte skulle ha någon menlig inverkan på den långsiktiga säkerheten.

6 Hantering av externa förhållanden



Figur 6-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

6.1 Inledning

De yttre förhållandena vid förvarsplatsen kommer att förändras avsevärt under den tidsperiod som säkerhetsanalysen omfattar. Yttre förhållanden beskrivs av externa FEP som tillhör en av huvudkategorierna i FEP-katalogen för SR-Site, se kapitel 3 och **FEP-rapporten**. Externa FEP delas in i följande undergrupper:

1. Klimatrelaterade frågor.
2. Storskaliga geologiska processer och effekter.
3. Framtida mänskliga handlingar.
4. Övriga (endast meteoritnedslag har identifierats i denna grupp).

Till de geologiska processer som kan anses vara externa FEP hör vittring, erosion, sedimentation, tektonisk upplyftning (till skillnad från landhöjning som orsakas av glacial belastning och avlastning, se nedan) och plattektonik. I mycket långa tidsperspektiv, miljoner till hundratals miljoner år, kommer plattektoniska rörelser, tektonisk upplyftning eller subsidens av jordskorpan (inklusive nednötning av berggrundsytan genom vittring och erosion) att påverka både geosfären och jordens klimatsystem.

De episoder av tektonisk upplyftning som bildade den nuvarande fennoskandiska topografin inträffade huvudsakligen under tertiär (1,8–65 miljoner år sedan). Den skandinaviska fjällkedjan och sydsvenska höglandet, med centrum i det småländska landskapet, bildades som en följd av dessa episoder, se t ex /Lidmar-Bergström och Näslund 2002/. Även om den tektoniska höjningen var som störst väster om Forsmark, påverkades ändå platsen i viss utsträckning. Genom ökad erosion och vittring ledde upplyftningsepisoderna under tertiär till att den förhistoriska jämna berggrundsyta, som uppkommit i kristallin berggrund före kambrium, åter exponerades. Även om denna jämna berggrundsyta, kallad det subkambriska peneplanet, är något uppsprucken längs stora sprickzoner i Forsmarksområdet, har de storskaliga tektoniska förhållandena varit stabila under de senaste 1,8 miljoner åren /Lidmar-Bergström och Näslund 2002, Olvmo 2010/. Under denna period har i stället isostatiska förändringar, orsakade av glacial belastning och avlastning, varit avgörande för hur platsen har förskjutits i vertikalled.

/Riis 1996/ menar att den hastighet med vilken berggrunden nöttes ner till följd av erosion och vittring under Pliocen-Pleistocen (en 5 miljoner år lång period som slutade kort innan den nuvarande) i allmänhet har varit lägre än 100 m per miljon år i Sveriges kustområden. Detta värde anger den generella nivåsänkningen av berggrundsytan och inbegriper därför inte högre erosionshastigheter längs till exempel dalar och sprickzoner i berggrunden. Slutsatsen överensstämmer med resultat som visar att förvarsplatsen i Forsmark ligger inom de intakta delarna av det subkambriska peneplanet, med mycket låg relief /Olvmo 2010/. Detta medför att den framtida icke-glaciala denudationen förväntas vara mycket låg, i tidsperspektiv på både 100 000 år och 1 miljon år (upp till 5 m per miljon år i Forsmarksområdet). Även den glaciala erosionen uppskattas vara relativt långsam i Forsmarksområdet – i storleksordningen 1–2 m per glaciationscykel, se avsnitt 3.5 i **Klimatrapporten**. Detta gäller särskilt lokalt ovanför förvaret, eftersom förvarsplatsen inte ligger i en lokal dalsänka eller större sprickzon. Sammanfattningsvis uppskattas den totala landnednötningen under analysperioden på en miljon år vara i storleksordningen upp till 20 m i Forsmark.

Huvudeffekten av denna sänkning av markytan är att permafrost kan nå närmare förvaret under perioder med periglaciala klimatförhållanden. Med utgångspunkt från kriterierna för frysning av bufferten, se avsnitt 8.3.2, och återfyllningsmaterialen, se avsnitt 8.4.4, och de uppskattade djupen för motsvarande isotermer i de relevanta framtida klimatscenarierna, se avsnitten 10.4.1 och 12.3, är dock de förändringar av externa förhållanden som orsakas av vittring och erosion av mindre betydelse för förvarets säkerhet under analysperioden. Deras inverkan på geosfären i närheten av förvaret och på baltiska sköldens nuvarande tillstånd redovisas i **Klimatrapporten** och i **Processrapporten för geosfären** och behandlas inte vidare i detta kapitel.

Klimatförändringar eller klimatrelaterade förändringar, såsom den pågående strandlinjeförskjutningen, är de viktigaste externa faktorerna som påverkar förvaret i ett tidsperspektiv som sträcker sig från tiotals år till hundratusentals år. De flesta långsiktiga processer som är relevanta för säkerheten och som sker i biosfären och geosfären, påverkas av klimatförändringar och klimatrelaterade förändringar. Därför måste säkerhetsanalysen behandla alla tänkbara klimatförändringars möjliga inverkan på förvarets säkerhet. Klimatrelaterade frågor berörs ytterligare i avsnitt 6.2.

En annan huvudgrupp av externa FEP som kan påverka förvaret, är framtida mänskliga handlingar. Dessa kan delas in i handlingar vid eller i närheten av förvarsplatsen. Exempel på framtida mänskliga handlingar är utvinning av tillgångar från berggrunden samt regionala eller globala handlingar, exempelvis sådana som leder till allvarlig förorening. Framtida mänskliga handlingar behandlas vidare i avsnitt 6.3.

Den tredje gruppen av externa FEP i FEP-katalogen innehåller enbart FEP-posten ”meteoritnedslag”. Meteoritnedslag har uteslutits från fortsatta analyser, eftersom sannolikheten är mycket liten att en meteorit som är tillräckligt stor för att skada förvaret, verkligen kommer att träffa jorden. För föremål med en storlek på ungefär 1 km beräknas sannolikheten till i storleksordningen en kollision per 500 000 år /Morbidelli et al. 2002/. Motsvarande sannolikhet för föremål som orsakar kratrar med en diameter på mer än 1 km uppgår till omkring en kollision per 10 000 år /Melosh 1989/. Sannolikheten att nedslaget faktiskt sker vid förvarsplatsen är signifikant lägre. Till exempel har /Hartmann 1965/ redovisat en uppskattad frekvens i storleksordningen 10^{-13} per km^2 och år för nedslag som orsakar kratrar med en diameter över1 km. Eftersom kraterns djup är omkring en tredjedel av dess diameter, måste kratern vara större än 1 km för att kunna exponera förvaret. Berget skulle dock kunna spricka upp till förvarsdjup av mindre nedslag. Dessutom skulle ett sådant nedslag orsaka stora skador på den lokala och regionala biosfären, inklusive människor /Collins et al. 2005/. Dessa direkta effekter av ett meteoritnedslag bedöms vara betydligt allvarligare än de möjliga radiologiska konsekvenserna.

6.2 Klimatrelaterade frågor

6.2.1 Allmän klimatutveckling

Naturliga klimatförändringar orsakas av faktorer utanför jordens klimatsystem samt av komplexa återkopplingsmekanismer inom jordens klimatsystem. Exempel på externa naturliga faktorer som påverkar klimatet i det tidsperspektiv som är aktuellt för säkerhetsanalysen, är förändringar i solinstrålning. Dessa orsakas i sin tur av variationer i bland annat jordens banparametrar och av vulkanism och solaktivitet, se avsnitten 2.1 till 2.3 i **Klimatrapporten**. Utöver naturliga

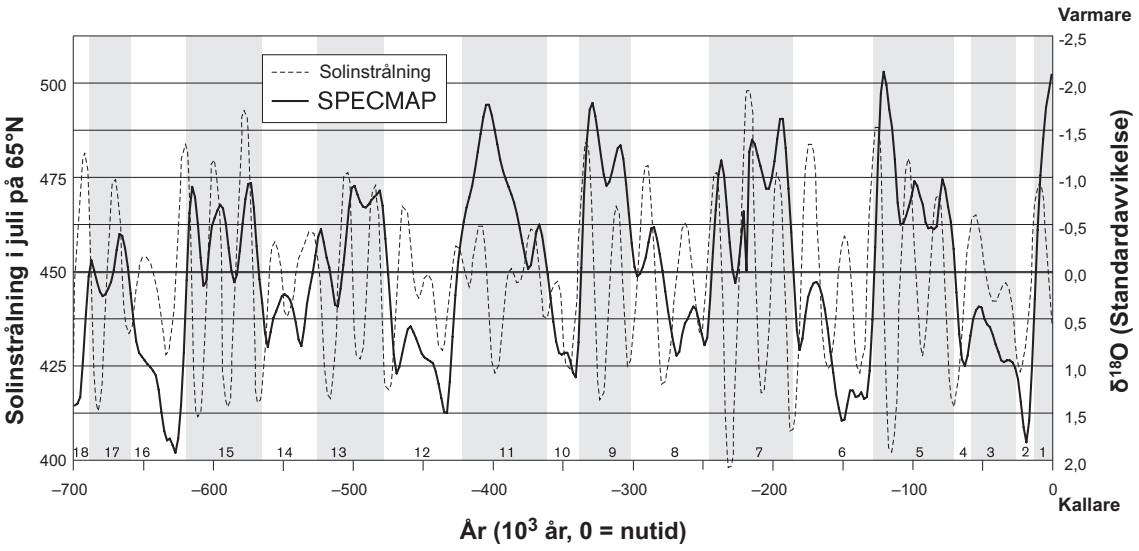
klimatförändringar påverkas klimatet även av mänskliga aktiviteter, exempelvis av förbränning av fossila bränslen, vilka leder till en ökad koncentration av växthusgaser i atmosfären. Jordens klimatförändringar orsakas av inre dynamiska förändringar i atmosfärens och havens cirkulation, tillväxt och avsmältning av inlandsisar. De är även relaterade till återkopplingsmekanismer mellan bland annat temperatur-vattenånga, is-albedo, vegetation-albedo och vegetation-nederbörd.

Jordens klimatsystem är även intimt förknippat med kolcykeln, dvs det fortsatta kolutbytet och de fortsatta kolreaktionerna i den terrestra biosfären, atmosfären och hydrosfären samt i sediment, där de senare innehåller fossila bränslen. Det finns viktiga återkopplingsmekanismer för flödena mellan olika kolkällor och många av dessa har betydelse för klimatet. Global uppvärmning kan till exempel minska upptaget av kol i den terrestra biosfären, vilket i sin tur skulle kunna leda till högre halter av koldioxid i atmosfären exempelvis /Cox et al. 2006/. För en mer detaljerad beskrivning av jordens klimatsystem, dess komponenter och samverkan, se /Thorne och Kane 2006/.

Tidigare klimatförhållanden

Under de senaste cirka 2,5 miljoner åren har flera perioder med tillväxt och avsmältning av inlandsisar inträffat på norra halvklotet. De perioder under vilka inlandsisar växer till och drar sig tillbaka kallas glacialer. Varma klimatperioder, när inlandsisarnas storlekar ungefär motsvarar de nuvarande, kallas interglacialer. En glaciationscykel består av en glacial och en interglacial. Glaciationscykler innehåller även kortare perioder med kallare och varmare klimat som kallas stadialer respektive interstadialer. Inom glaciationsskedet kan inlandsisars utbredning variera avsevärt.

Under de senaste 700 000 åren har omkring 100 000 år långa glaciationscykler haft en avgörande inverkan på hur klimatet varierat. Dessa cykler består generellt av en lång period med successivt kallare förhållanden, ofta i steg, åtföljd av en snabb övergång till ett varmt interglacialt klimat. Under de glaciala perioderna har inlandsisar och glaciärer – genom upprepade framryckningar och tillbakadraganden – successivt växt till och uppnått en maximal utbredning. Detta har följts av en övergång till ett varmt klimat, under vilket inlandsisarna snabbt smält bort för att nå en utbredning som liknar den nuvarande. Under de kalla glacialerna täckte dessa inlandsisar upp till omkring en tredjedel av jordens totala landområde (nästan 47 miljoner km^2). Detta kan jämföras med nuvarande förhållanden, där inlandsisar och glaciärer täcker omkring 10 procent (15 miljoner km^2) av landytan. Ett exempel på proxydata som visar globala klimatförändringar som skett under de senaste 700 000 åren visas i figur 6-2.



Figur 6-2. *$\delta^{18}O$-variation från borrkärnor ur djuphavssediment uttryckt som antal standardavvikelser från ett långtidsmedelvärde från /Imbrie et al. 1984/. $\delta^{18}O$-variationer avspeglar havstemperaturen och den mängd vatten som bundits i inlandsisar och glaciärer. De grå och vita fälten anger varma respektive kalla perioder.*

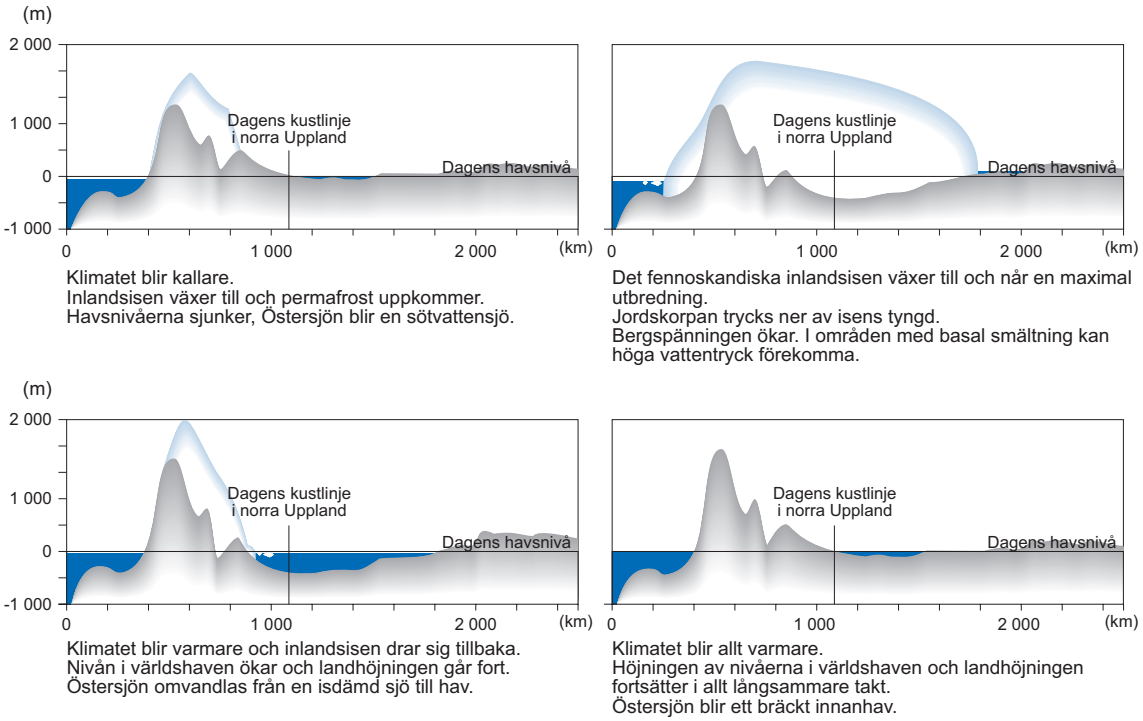
Glaciationer i Sverige

Under glaciala perioder expanderar dalglaciärer i den skandinaviska fjällkedjan och bildar så småningom en inlandsis som i steg växer sig större. På grund av det kalla klimatet har permafrost vanligen utvecklats i landskapet innan det täcks av inlandsis. Under den senaste glaciationscykeln nådde inlandsisen sin maximala utbredning för omkring 20 000 år sedan. Tillväxten skedde generellt sett i en serie av expansionsfaser avbrutna av varma interstadialer med en mer begränsad isutbredning, se avsnitt 4.2 i **Klimatrapporten**.

När inlandsisen växer till orsakar isens vikt en isostatisk nedpressning av jordskorpan, se avsnitt 3.3 i **Klimatrapporten**, /Lund och Näslund 2009/ och /Whitehouse 2009/. Samtidigt som inlandsisar och glaciärer expanderar sker en eustatisk sänkning av den globala havsnivån när vatten förflyttas från oceanerna till de landbaserade ismassorna. Nettoresultatet av den eustatiska komponenten (havsnivåvariationen) och den isostatiska komponenten (vertikala förändringar av litosfären) ger en specifik utveckling av den vertikala strandnivån. Beroende på de eustatiska och isostatiska processernas relativa hastighet kan strandnivån på en plats antingen höjas eller sänkas. Detta ger i sin tur upphov till en transgression respektive regression av havet. Under och efter en period av isavsmältning utsätts stora delar av Sveriges kustregioner för isostatiskt återhämtning. Denna leder till en allmän höjning av strandlinjen, ibland avbruten av kortare transgressionsperioder.

Ändringar i strandlinjens läge på grund av eustatiska och isostatiska processer kommer i framtiden att ändra de hydrologiska förhållandena vid Forsmark. Kommande perioder med islast och tillhörande isostatiska förändringar kommer också att ändra bergspänningarna. Ändringar i spänningstillståndet, som uppstått genom belastning och avlastning av is, kan på vissa platser i Sverige leda till instabilitet i berggrunden /Lund et al. 2009/ och glacialt inducerade skalv /Fälth et al. 2010/.

Dessutom är inlandsisens bottenförhållanden viktiga för såväl de hydrogeologiska randförhållandena som för de resulterande spänningsförhållandena. I figur 6-3 visas en förenklad bild av händelseförloppet när en inlandsis växer till och drar sig tillbaka längs ett tvärsnitt från den norska kusten och österut.



Figur 6-3. *Förenklad bild av händelseförloppet när en inlandsis växer till och drar sig tillbaka tvärs över Skandinavien från norska kusten och österut. Observera att skalan på y-axeln är starkt överdriven.*

Klimatförändringar förorsakade av människan

Förutom de naturligt förekommande processerna beskrivna ovan, har människans utsläpp av växthusgaser identifierats av t ex /IPCC 2007/ som en bidragande orsak till klimatförändringar, se avsnitten 5.1 och 5.2 i **Klimatrapporten**. I studier där både så kallade jordmodeller med intermediär komplexitet (Earth Models of Intermediate Complexity) och mer sedvanliga globala cirkulationsmodeller för atmosfären och oceaner (Atmosphere-Ocean Global Circulation Models) använts, förutses att den nuvarande interglaciala perioden blir mycket lång /BIOCLIM 2003, 2004, IPCC 2007, Kjellström et al. 2009/. Resultaten från modellsimuleringarna indikerar att utsläppen av växthusgaser, tillsammans med kända framtida förändringar i jordens banparametrar, leder till en långsiktig förändring av mönstret hos de glaciationscykler som iakttagits tidigare. Förändringen förutses kvarstå tills nivåerna på de utsläppta växthusgaserna i det ytliga systemet hav-atmosfär avlägsnas för att avskiljas till litosfären, samt tills jordens banparametrar åter blir gynnsamma för initiering av glaciationer. Frågeställningarna kring den antropogena påverkan på klimatet i dessa långa tidsperspektiv är behäftade med stora osäkerheter. Detta gäller till exempel kunskapen om kolets kretslopp, storleken av de totala utsläppen och deras inverkan på klimatet samt upptaget av kol till litosfären /IPCC 2007/. För att hantera sådana osäkerheter analyseras i SR-Site två klimatutvecklingar som beskriver framtida klimat dominerat av olika grad av global uppvärmning, se avsnitten 5.1 och 5.2 i **Klimatrapporten**.

6.2.2 Inverkan på förvarets säkerhet

Klimatrelaterade förändringar, som variationer i strandnivå och tillväxt och avsmältning av permafrost och inlandsisar, ändrar inte enbart förhållandena på ytan, utan även förhållandena i berget. Frysning, strandlinjeförskjutning och förekomsten av inlandsisar kommer att ändra bergets permeabilitet, vattenomsättningen samt grundvattnets tryck, flöde och kemiska sammansättning. Islasten ändrar bergspänningarna och under olika glaciationsskeden kommer huvudspänningarnas storleksordning att ändras. Vid grunda djup (till exempel förvarsdjup) är de spänningar som orsakas av islasten tillräckligt stora för att ändra riktningen hos huvudspänningarna, medan detta inte är fallet vid större djup. I allmänhet behöver de sammanlagda effekterna av kontinuerlig klimatutveckling beaktas, men det finns också mer speciella fenomen av betydelse för förvarets säkerhet som behöver analyseras. Med utgångspunkt bland annat från resultaten av tidigare säkerhetsanalyser omfattar dessa:

- Det maximala hydrostatiska tryck som kan råda på förvarsdjup under glaciala förhållanden.
- Permafrost- och frysdjup, vilket påverkar frysning av förvarets olika delar samt grundvattnets flödesmönster.
- En eventuell nedträngningen av syrerikt grundvatten till förvarsdjup under glaciala förhållanden.
- En eventuell nedträngningen av utspätt grundvatten till förvarsdjup under glaciala och långvariga tempererade klimatförhållanden, vilken skulle kunna leda till erosion av buffertlera och återfyllningsmaterial.
- Grundvattnets salthalt på förvarsdjup under glacialt, periglacialt och tempererat klimattillstånd, där det sistnämnda även inkluderar en period av global uppvärmning.
- Glacialt inducerat skalv.
- Faktorer som påverkar fördröjning i geosfären, såsom höga grundvattenflöden och mekanisk påverkan på permeabiliteten.

6.2.3 Hantering av den osäkra den långsiktiga klimatutvecklingen

Tidpunkten för och omfattningen av framtida klimatförändringar är osäkra i de tidsperspektiv som hanteras i säkerhetsanalysen, se **Klimatrapporten**. Dessutom tillkommer osäkerheter genom den osäkra effekten och varaktigheten av människans påverkan på klimatet i dessa tidsperspektiv. I en tidsskala av 100 000 år och mer är det inte möjligt att förutssäga en specifik framtida klimatutveckling med den tillförlitlighet som behövs för analysen av förvarets långsiktiga säkerhet. Emellertid kan det *intervall* inom vilket klimatet i Sverige skulle kunna variera i framtiden förutsägas med tillräcklig tillförlitlighet, baserat bl a på paleoklimatologisk information. I stället för att fokusera på den mest sannolika framtida klimatutvecklingen är strategin i säkerhetsanalysarbetet att identifiera, beskriva och analysera detta intervall, inklusive dess ytterligheter. Inom dessa gränser är det möjligt att definiera ett antal karakteristiska klimatförhållanden. Dessa möjliga klimatförhållanden kan representeras av ett antal klimatstyrda processtillstånd /Boulton et al. 2001/, där ett klimattillstånd definieras som *en klimatbestämd miljö, i vilken en uppsättning karakteristiska processer som har betydelse för förvarssäkerheten förekommer*. De klimattillstånd som är av relevans för Forsmark är:

- Ett tempererat klimattillstånd.
- Ett periglacialt klimattillstånd.
- Ett glacialt klimattillstånd.

Syftet med att identifiera dessa klimattillstånd är att skapa ett ramverk för att analysera klimatrelaterade processer av betydelse för förvarets säkerhet. Klimattillståndens varaktighet varierar med både tid och plats. Varje klimattillstånds varaktighet beror både på globala klimatförändringar och mer regionala och lokala faktorer. Ordningsföljden mellan klimattillstånden under en typisk glaciationscykel kommer i allmänhet att följa ett cykliskt mönster, se figur 6-4. Om ett förvar för använt kärnbränsle uppfyller säkerhetskraven oberoende av det rådande klimattillståndet, och de möjliga övergångarna mellan dem, så är osäkerheten beträffande deras precisa utsträckning i tid och rum av mindre vikt.

Även om det inte är möjligt att förutsäga en specifik framtida klimatutveckling med tillräcklig noggrannhet för säkerhetsanalysens behov, är det mycket sannolikt att de tre klimattillstånden kommer att uppträda upprepade gånger under den en miljon år långa analysperioden. Det innebär i sig att rimliga framtida klimatutvecklingar behöver täcka in dessa tillstånd. Det är dessutom möjligt att gränssätta de förhållanden som eventuellt kan inträffa under respektive klimattillstånd. Huvudscenariot för säkerhetsanalysen omfattar en rimlig ordningsföljd mellan de angivna klimattillstånden, som beskrivs i en klimatutveckling baserad på en upprepning av förhållanden rekonstruerade för den senaste glaciala cykeln, se kapitel 4 i **Klimatrapporten**. Denna klimatutveckling kompletteras sen av ytterligare fem tänkbara framtida klimatutvecklingar, se kapitel 5 i **Klimatrapporten**, vilka tillsammans täcker in den bredd av klimatvariationer som är tänkbara för tidsperioden som analyseras i säkerhetsanalysen, se avsnitt 5.6 i **Klimatrapporten**.

För att uppfylla myndighetskraven är det särskilt viktigt att analysera de sekvenser av klimattillstånd som innebär störst risk vid ett specificerat scenario med radioaktivt utsläpp från förvaret. Med utgångspunkt från resultaten av tidigare analyser är det sannolikt att de största riskerna förekommer under tempererade klimatperioder. Typiska situationer med hög risk är i) ett terrest system som har ackumulerat radioaktiva utsläpp under lång tid, möjligen i havssediment innan dessa höjts ur havet, och där marken senare används som jordbruksmark och ii) en brunn som borrats i berget nära förvaret och som används för hushållsändamål.

Figur 6-4. *Klimattillstånden avlöser varandra i ett cykliskt mönster. För säkerhetsanalysens behov görs en betydligt mer detaljerad och realistisk bild av hur klimattillstånden kan avlösa varandra under en glaciationscykel. Metoden och resultatet från att ta fram denna mer detaljerade bild beskrivs i* ***Klimatrapporten****.*

Det är också viktigt att inkludera de tänkbara klimattillstånd och sekvenser som har den största förväntade inverkan på förvarssäkerheten genom att de försämrar barriärernas säkerhetsfunktioner. Företeelser som kan påverka barriärernas säkerhetsfunktioner nämns ovan. De potentiellt allvarligaste konsekvenserna är relaterade till perioder med kallt klimat, inklusive perioder då en isfront passerar förvarsplatsen och perioder med permafrost.

Hanteringen av klimatutvecklingen utvecklas ytterligare i kapitel 11 i samband med valet av scenarier och i avsnitt 12.1.3 som en introduktion till analyserna av de valda scenarierna.

6.2.4 Dokumentation

De klimatrelaterade tillstånd och processer som är relevanta för den långsiktiga säkerheten hos ett KBS-3-förvar i Forsmark beskrivs i **Klimatrapporten**, en av huvudreferenserna för säkerhetsanalysen SR-Site, se avsnitt 2.5.12. Syftet med **Klimatrapporten** är att ge en beskrivning av klimatsystemet samt att dokumentera det vetenskapliga kunskapsläget för de klimatrelaterade processer som är relevanta för den långsiktiga säkerheten hos ett KBS-3-förvar i den utsträckning som krävs för att behandla dem på ett lämpligt sätt i säkerhetsanalysen. Klimatrapporten sammanställer även resultat från de simuleringar av inlandsis, strandlinjeförskjutning och permafrost som används för att konstruera de olika klimatutvecklingar som sedan ligger till grund för vidare analyser. **Klimatrapporten** innehåller även en beskrivning av denudationsprocesser, dvs vittring och erosion som nöter ner markytan. Rapporten innehåller fem kapitel:

1. Inledning.
2. Klimatsystemet.
3. Klimat- och klimatrelaterade processer.
4. Rekonstruktion av den senaste glaciationscykeln och konstruktion av en framtida glaciationscykel för säkerhetsanalysen.
5. Kompletterande möjliga klimatutvecklingar.

I inledningskapitlet ges bl a en utförligare beskrivning av angreppssättet som tillämpas för att kunna hantera klimat i säkerhetsanalysarbetet. Kapitlet som beskriver klimatsystemet innehåller en översikt av kunskaperna om jordens klimatsystem och dess komponenter, samt en kort beskrivning av de klimatförhållanden som kan förväntas inträffa i Sverige i ett tidsperspektiv på 100 000 år. Med utgångspunkt från denna sammanfattning identifieras klimatrelaterade processer som är av vikt för den långsiktiga säkerheten hos ett KBS-3-förvar. Dessa processer beskrivs i kapitel 3, ”Klimatrelaterade processer”, i den utsträckning som krävs för att behandla dem på ett lämpligt sätt i säkerhetsanalysen. I kapitel 3 beskrivs även de simuleringar som gjorts för att rekonstruera dessa parametrar för den senaste glaciala cykeln. I kapitel 4 presenteras bland annat ett exempel på en tänkbar framtida klimatutveckling som omfattar perioden för en glaciationscykel (cirka 120 000 år). Denna referensutveckling baseras på en rekonstruktion av förhållanden under den föregående glaciationscykeln och innehåller en beskrivning av de identifierade klimattillstånden och processerna. Slutligen presenteras i kapitel 5 en rad alternativa framtida klimatutvecklingar vilka beskriver situationer som har en potentiellt större påverkan på förvarets funktion än referensutvecklingen, till exempel med tjockast tänkbara inlandsisar över Forsmark. **Klimatrapporten** ger även en utförligare beskrivning av strategin för att hantera långsiktiga klimatförändringar i linje med vad som beskrivits ovan.

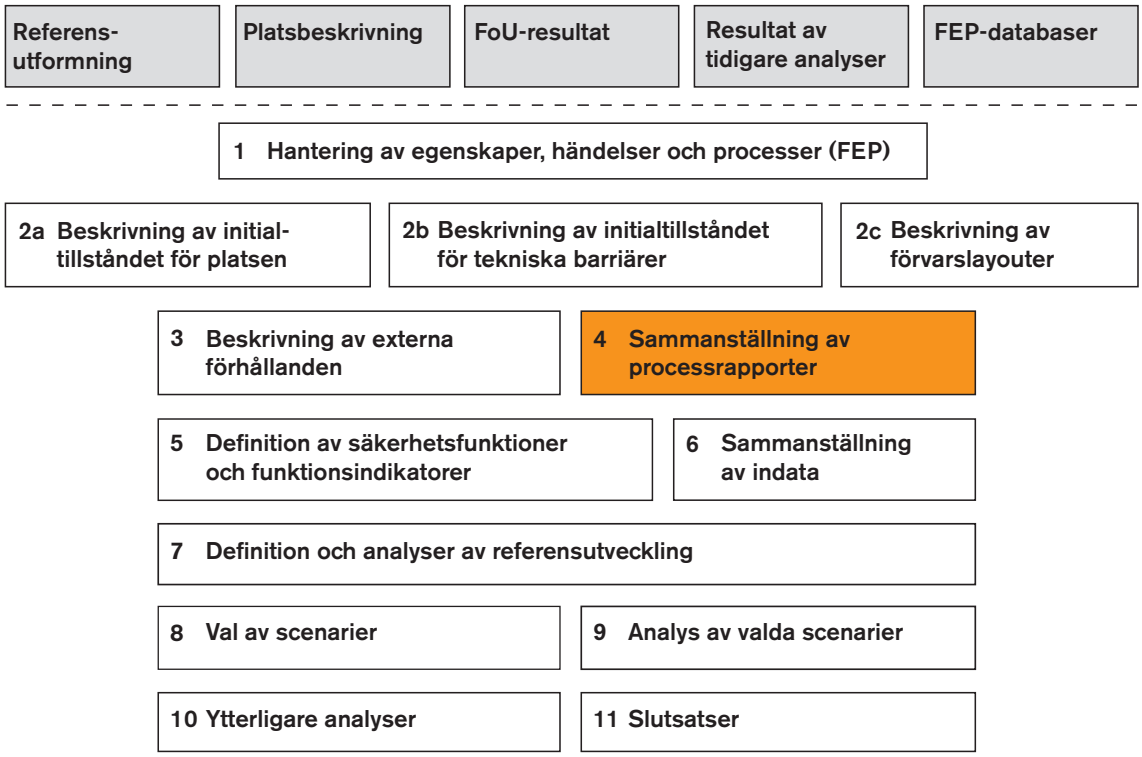
Som tidigare beskrivits i **FEP-rapporten** har innehållet i **Klimatrapporten** kontrollerats mot FEP-databaser som upprättats inom andra organisationers säkerhetsanalyser. **Klimatrapporten** följer så långt det är möjligt mallen för dokumentation av processer som anses vara interna för förvarssystemet, se avsnitt 7.3. Emellertid behandlas en rad komplexa klimatrelaterade frågor snarare än en enstaka process. Sådana frågor är i) utveckling av permafrost, ii) inlandsisens dynamik, iii) inlandsisars hydrologi, iv) isostatiska förändringar och strandlinjeförskjutning samt v) denudation. Varje klimatrelaterad fråga inbegriper en uppsättning processer som tillsammans resulterar i beskrivningen av ett system eller en egenskap. ”Inlandsisars dynamik” utgör till exempel resultatet från flera termiska, hydrologiska och mekaniska processer, men kan – med tanke på samspelet mellan isen och berggrunden – betraktas som en enhet.

6.3 Framtida mänskliga handlingar

Ett stort antal externa FEP som har samband med framtida mänskliga handlingar (future human actions, FHA) identifierades som ett resultat av den kontroll mot NEA:s internationella databas som utfördes i samband med arbetet med SR-Can och den kompletterande kontroll som utfördes för SR-Site (beskriven i kapitel 3), se även **FEP-rapporten**. Dessa FEP omfattar aktiviteter som berg-borrning, gruvdrift, allvarlig miljöförstöring, underjordsbrytning i samband med urbanisering och avsiktligt eller oavsiktligt intrång i förvaret. I SR-Can utfördes en enkel kontroll av identifierade FEP mot analysresultaten från de scenarier baserade på framtida mänskliga handlingar som studerades i samband med säkerhetsanalysen SR 97 /SKB 1999a/. Majoriteten av de FEP som identifierats var omhändertagna i SR 97-analyserna. Den senare studien utfördes utan kontroll mot NEA-databasen.

Strategin för att hantera och analysera framtida mänskliga handlingar i SR-Can /SKB 2006e/ utformades utifrån den strategi som utvecklades för SR 97 och utifrån erfarenheter från SR 97, FEP-kontrollen i SR-Can och genomgång av viss relevant litteratur som publicerats efter SR 97. Strategin för SR-Site har utvecklats något ytterligare utgående från erfarenheter från SR-Can och mer aktuell litteratur. Den kompletterande FEP-kontrollen som utfördes i SR-Site gav emellertid inte någon ny information att ta hänsyn till. Utvecklingen av strategin för att hantera mänskliga handlingar i SR-Site beskrivs i **FHA-rapporten** tillsammans med analyser av några representativa fall. En sammanfattning ges i avsnitt 14.2.

7 Hantering av interna processer



Figur 7-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

7.1 Inledning

En djupgående förståelse och hantering av de processer som äger rum över tid i förvarssystemet är grundläggande för säkerhetsanalysen. De primära informationskällorna för detta är resultaten från årtionden av forsknings- och utvecklingsarbete, som utförts av SKB och andra organisationer. I ett vidare perspektiv bygger dessa resultat i sin tur på kunskap som växt fram under århundraden av vetenskaplig och teknisk utveckling. Forsknings- och utvecklingsarbetet har lett till att en rad processer som äger rum i de tekniska barriärerna och inom de naturliga system som är av vikt för säkerheten på lång sikt, har kunnat identifierats samt till förståelsen för dessa. För säkerhetsanalysens ändamål sammanställs den relevanta kunskapen om processerna i de tekniska barriärerna och i berget i flera **Processrapporter**. För varje process finns även en anvisning för hur den ska hanteras i säkerhetsanalysen. Likaså ingår de kortsiktiga processer och förändringar i geosfären som uppkommer till följd av berguttaget för förvaret.

Det här kapitlet beskriver hur processer dokumenteras i **Processrapporterna** i SR-Site, samt principerna för hur de hanteras i säkerhetsanalysen med hänsyn tagen till relevanta osäkerheter. Format för att grafiskt åskådliggöra systemet med kopplade processer diskuteras i avsnitt 7.2. Formatet för att dokumentera processer i processrapporterna för SR-Site beskrivs i avsnitt 7.3. I avsnitt 7.4 ges en översikt av hanteringen av alla processer i SR-Site, baserad på materialet i **Processrapporterna**.

7.1.1 Identifiering av processer

Identifieringen av relevanta processer har pågått oavbrutet under många år och grundas på resultat från forskning och utveckling, resultat av tidigare säkerhetsanalyser etc. I SR 97-analysen identifierades den uppsättning processer som skulle hanteras i säkerhetsanalysen /Pers et al. 1999/. Den uppsättningen var utgångspunkten för att identifiera processer i SKB:s senaste säkerhetsanalys, SR-Can.

Som nämns i kapitel 3 kopplades, vid en avstämning mot innehållet i den internationella FEP-databasen som utfördes för SR-Can-analysen, ett stort antal FEP samman med uppsättningen av relevanta processer i SKB-databasen. Detta ledde även till att ytterligare några processer

med betydelse för de tekniska barriärerna eller för geosfären identifierades. Den uppdaterade avstämningen inför SR-Site ledde inte till att några nya processer identifierades.

I SR-Can-analysen reviderades och detaljerades uppdelningen av systemet i delar, vilket ledde till den uppdelning som presenteras i avsnitt 5.1.2. Återfyllningen av deponeringstunneln ingår som en separat systemdel, i stället för att som i SR 97 beskrivas tillsammans med bufferten. Dessutom infördes delarna ”bottenplatta i deponeringshål”, ”pluggar”, ”borrhålsförslutningar” och ”återfyllning av andra förvarsutrymmen”. Inga processrapporter togs emellertid fram för dem, eftersom de i allmänhet inte har någon kritisk betydelse för säkerheten. I SR-Site ingår de i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**.

7.1.2 Processer i biosfären

En s k interaktionsmatris för biosfären togs fram i SAFE-projektet /Kautsky 2001/. Resultatet av det arbetet och dess fortsatta utveckling har använts när platsundersökningsprogrammet planerats. Arbetet har även gett viktig information för utvecklingen av modeller för radionuklidtransport och exponering av människor för radionuklider. Som nämns i avsnitt 3.3 omfattar inte Processrapporten för SR 97 processer i biosfären. Det fanns därför inte samma grund för att uppdatera de beskrivningarna i SR-Can som för de tekniska barriärerna och geosfären.

För SR-Site har en processrapport för biosfären tagits fram /SKB 2010c/. Den rapporten innehåller allmänna beskrivningar av de processer som anses ha betydelse för säkerhetsanalysen, medan de platsspecifika aspekterna av processerna och hur dessa hanteras i säkerhetsanalysen beskrivs i de olika ekosystemsrapporterna som tagits fram för SR-Site /Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010/.

7.2 Format för processrepresentationer

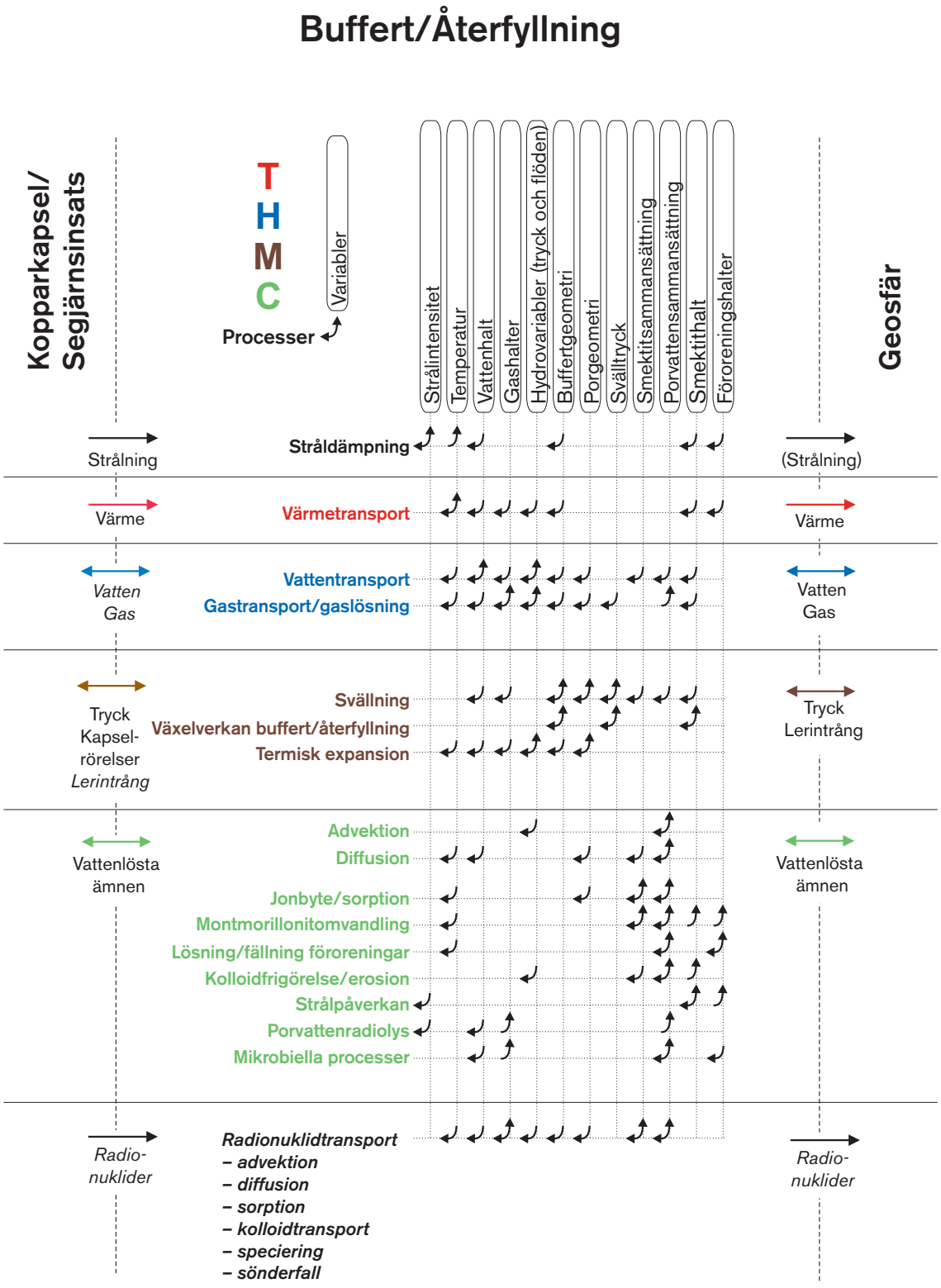
För säkerhetsanalysens ändamål delas förvarssystemet in i flera systemdelar. Varje del kännetecknas av ett antal specificerade tidsberoende fysikaliska variabler, se avsnitt 3.3. Inom en specifik systemdel verkar flera processer över tiden för att förändra systemets tillstånd, dvs ändra variablerna. Exempel från bufferten är värmetransport, vattenupptag, svällning, kemisk omvandling och jonbyte.

Kopplingen mellan processerna utgör ett nätverk av sammankopplade processer och variabler. Systemet av kopplade processer måste hanteras i säkerhetsanalysen. Kopplingar mellan systemdelar hanteras vid behov med de tidsberoende randvillkoren i gränssnittet mellan delarna.

Variabler, processer och deras beroenden kan representeras grafiskt på olika sätt. I SR 97 utgjordes representationen av processdiagram, ett för varje systemdel. Figur 7-2 visar buffertens processdiagram i SR 97. Diagrammet visar även vilka variabler som påverkar varje process, såväl som vilken påverkan en specifik process har på uppsättningen variabler. Likaså beskrivs interaktioner över systemdelens gränser. Ett annat exempel på grafisk representation är interaktionsmatrisen exempelvis /Skagius et al. 1995/. I båda dessa representationer koncentreras en stor informationsmängd i grafisk form. Både interaktionsmatriser och processdiagram har historiskt sett – och även i SR-Site – använts för att påtvinga ett strukturerat arbetssätt vid identifieringen av relevanta processer och barriäregenskaper samt deras beroenden.

Fördelarna med den strukturerade behandlingen av processer och variabler i processdiagrammen utnyttjas vid dokumentationen av processer i **Processrapporterna** för SR-Site. För varje process presenteras en tabell som, för varje variabel i systemdelen, beskriver om den påverkar eller påverkas av processen i fråga, se vidare avsnitt 7.3. För en given process motsvarar tabellen således pilarna för den processen i figur 7-2. Tabellformatet medger även att kommentarer infogas och ger således en mer fullständig beskrivning än pilarna i diagrammet. Påverkan dokumenteras i samband med tabellen.

Det finns dock en gemensam svårighet med interaktionsmatriser och processdiagram: Det är svårt att förstå systemets utveckling genom att studera de grafiska representationerna. Den grafiska informationen i diagrammen eller matriserna har därför inte använts direkt i säkerhetsanalysen, för att exempelvis åskådliggöra utvecklingen av systemet. Interaktionsmatriserna och processdiagrammen förmedlar ett (korrekt) intryck av komplexitet, men ofta utan klar vägledning rörande den



Figur 7-2. *SR 97-versionen av processdiagrammet för bufferten. Termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer anges i den vänstra kolumnen. Variablerna ges i översta raden. Påverkan mellan variabler och processer visas med pilar i diagrammet. Processer och interaktioner som är kursiverade äger endast rum om kopparkapselns integritet bryts.*

relativa betydelsen av olika typer av systemutveckling. Detta är till viss del relaterat till att ingen åtskillnad görs mellan de olika tidsskedena av förvarsutvecklingen. De flesta processer och typer av påverkan på barriäregenskaperna är endast relevanta i några av de många tidsskeden som måste beaktas i säkerhetsanalysen. FEP-katalogen i SR-Site kan generera processdiagram och – om så behövs – utvecklas så att även interaktionsmatriser kan genereras. Ingen av dessa representationer är dock av central betydelse i de fortsatta analyserna i SR-Site.

Den grafiska representationen av processer i SR-Site ges i form av tabeller, i vilka hanteringen av processerna under olika tidsskeden förklaras. Detta presentationssätt utvecklas vidare i avsnitt 7.4.

7.3 Format för processdokumentation

I processrapporterna för SR-Site dokumenteras alla de processer i bränslet, kapseln, bufferten, återfyllningen och berget som har konstaterats vara relevanta för den långsiktiga säkerheten i ett KBS-3-förvar enligt diskussionen i avsnitt 7.1.1. Dessutom dokumenteras processer för systemdelarna bottenplatta i deponeringshål, tunnelpluggar, centralområde, toppförslutning och borrhålsförslutningar i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** för SR-Site. Dessa processer ingick inte i motsvarande rapporter för SR-Can. Som nämnts i avsnitt 7.1.2 behandlas processer i biosfären i olika biosfärsrapporter och processbeskrivningarna följer inte det format som används i processrapporterna för övriga systemdelar. Den främsta orsaken till denna skillnad är att beskrivningen av processerna i biosfären omfattar en rad olika vetenskapliga ämnesområden, till skillnad från de ämnesspecifika beskrivningarna av t ex geosfärsprocesserna.

Syftet med processrapporterna är att dokumentera det vetenskapliga kunnandet om processerna i den omfattning som krävs för att behandla dem på ett adekvat sätt i säkerhetsanalysen SR-Site. Därför är dokumentationen ur ett vetenskapligt perspektiv inte helt uttömmande eller detaljerad, eftersom detta varken behövs för säkerhetsanalysens ändamål eller är möjligt att genomföra inom ramen för en analys.

Ett ytterligare syfte är att fastställa en strategi för att hantera varje process i säkerhetsanalysen och att demonstrera hur hänsyn tas till osäkerheter givet det valda hanteringssättet.

I allmänhet ges alla argument, tillsammans med underlag för beslut och stödjande referenser, i processbeskrivningen under tillämpliga rubriker. Dessutom dokumenteras det i **Processrapporterna** vilken expert (eller vilka experter) som har sammanställt den grundläggande informationen för varje process och vilken expert (eller vilka experter) som varit involverade i beslutet om hanteringen i säkerhetsanalysen. Alla dessa experter finns med i SR-Site-förteckningen över experter, vilket krävs enligt kvalitetssäkringsplanen för säkerhetsanalysen SR-Site, se avsnitt 2.9.4.

Alla identifierade processer dokumenteras enligt en mall, i vilken alla rubriker i huvudsak är desamma som de rubriker som använts i SR-Can-versionerna av rapporterna. Mallen redovisas nedan.

Översikt/Allmän beskrivning

Under denna rubrik ges en allmän beskrivning av kunskapen om processerna. Beskrivningen av de flesta processerna grundar sig på motsvarande innehåll i SR-Can-versionen av processrapporterna, men innehållet har granskats och vid behov uppdaterats.

Beroenden mellan process och variabler

För varje systemdel anges en uppsättning fysikaliska variabler som definierar systemets tillstånd, se avsnitt 3.3. För varje process, som identifierats enligt avsnitt 7.1.1, redovisas en influenstabell under denna rubrik, med dokumentation om hur processen påverkas av den angivna uppsättningen fysikaliska variabler och hur processen påverkar variablerna. Dessutom anges det i tabellen hur varje typ av påverkan hanteras i SR-Site. I samtliga fall där påverkan föreligger men inte hanteras i analyserna, ges en förklaring till detta i tabellen och/eller i processbeskrivningen. I det senare fallet finns en hänvisning till texten i tabellen. Ett exempel på en influenstabell ges i tabell 7-1.

Tabell 7-1. Influenstabell för processen ”värmetransport” i geosfären.

Variabel	Variabelns påverkan på processen			Processens påverkan på variabeln		
	Föreligger påverkan? (Ja/Nej Beskrivning)	**Tidsperiod/ Klimat-tillstånd**	**Hantering av påverkan (Hur?/Om inte – varför?)**	**Föreligger påverkan? (Ja/Nej Beskrivning)**	**Tidsperiod/ Klimat-tillstånd**	**Hantering av påverkan (Hur?/Om inte – varför?)**
Temperatur i berggrunden	Ja. Temperatur-gradienter utgör drivkraften för värmetransport. Värmeledning och värmekapacitet är temperaturberoende.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Ja.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).
		Tempererat	Platsberoende temperatur och termiska egenskaper. Hänsyn tagen till termiska egenskapers temperaturberoende i dimensionerings-beräkningar. Annars termiska egenskaper för konstant temperatur.		Tempererat	Utdata från beräkningar.
		Periglacialt Glacialt	Se Tempererat klimattillstånd ovan och **Klimatrapporten**.		Periglacialt Glacialt	Utdata från beräkningar, se även avsnitt 2.2 i **Processrapporten för geosfären** och **Klimatrapporten**.
Grundvatten-flöde	Ja.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via temperatur.	–	Se avsnitt 3.1 Grund-vattenflöde i **Processrapporten för geosfären**.
		Tempererat Periglacialt Glacialt	Påverkan av konvektion försummas; litet bidrag jämfört med värmeledning.			
Grundvatten-tryck	Ja.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via temperatur.	–	Se avsnitt 3.1 Grund-vattenflöde i **Processrapporten för geosfären**.
		Tempererat	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			
		Periglacialt Glacialt	Se Tempererat klimattillstånd ovan och **Klimatrapporten**.			
Gasfasflöde	Ja.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via temperatur.	–	Se avsnitt 3.2 Gas-flöde/upplösning i **Processrapporten för geosfären**.
		Tempererat	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			
		Periglacialt Glacialt	Se Tempererat klimattillstånd ovan **och Klimatrapporten**.			
Förvarets geometriska utformning	Ja. Påverkar värme-flödet från förvaret. Avstånd mellan kapslar särskilt betydelsefullt i närområdet.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej.	–	–
		Tempererat	Ingår i modellen.			
		Periglacialt Glacialt	Ingår i permafrostmodel-len (se **Klimatrapporten**).			
Sprick-geometri	Ja.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via bergspänningar och temperatur.		Se mekaniska processer i kapitel 4 i **Processrapporten för geosfären**.
		Tempererat	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			
		Periglacialt Glacialt	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			

Variabel	Variabelns påverkan på processen			Processens påverkan på variabeln		
	Föreligger påverkan? (Ja/Nej Beskrivning)	**Tidsperiod/ Klimat-tillstånd**	**Hantering av påverkan (Hur?/Om inte – varför?)**	**Föreligger påverkan? (Ja/Nej Beskrivning)**	**Tidsperiod/ Klimat-tillstånd**	**Hantering av påverkan (Hur?/Om inte – varför?)**
Berg-spänningar	Nej.	–	–	Nej. Men indirekt via temperatur.		Se mekaniska processer i kapitel 4 i **Processrapporten för geosfären**.
Matris-mineraler	Ja. Bestämmer termiska egenskaper.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej.	–	–
		Tempererat	Användning av platsspecifika termiska egenskaper.			
		Periglacialt Glacialt	Användning av platsspecifika termiska egenskaper i permafrostmodell (se **Klimatrapporten**).			
Sprick-mineraler	Ja. Marginellt och lokalt.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via temperatur och grundvatten-sammansättning.	–	Se kemiska processer i kapitel 5 i **Processrapporten för geosfären**.
		Tempererat	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			
		Periglacialt Glacialt	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan (**Klimatrapporten**).			
Grundvatten-sammansätt-ning	Nej.	–	–	Nej. Men indirekt via temperatur.	–	Se kemiska processer i kapitel 5 i **Processrapporten för geosfären**.
Gassamman-sättning	Nej.	–	–	Nej.	–	–
Byggnads-material och kvarlämnat material	Nej.	–	–	Nej.	–	–
Vatten-mättnad	Ja. Påverkar omfattning och storlek av konvektiv värmetransport.	Byggskede/ drift	Värmetransport försummas (se avsnitt 2.1.7 i **Processrapporten för geosfären**).	Nej. Men indirekt via temperatur.	–	–
		Tempererat	Påverkan försummas; liten betydelse jämfört med annan påverkan.			
		Periglacialt Glacialt	Se Tempererat klimattillstånd ovan och **Klimatrapporten**.			

En påverkan kan försummas av flera olika skäl, t ex:

- Liten faktisk betydelse.
- Liten betydelse jämfört med annan påverkan.
- Kan inordnas under en annan typ av påverkan (utan att nödvändigtvis bedöma vilken av typerna som har störst betydelse).

Randvillkor

Här behandlas randvillkoren för varje process. Dessa avser gränserna för den relevanta systemdelen. För buffertprocesser utgörs exempelvis gränserna av gränsytorna mellan bufferten och kapseln, deponeringshålets väggar, återfyllningen och bottenplattan i deponeringshålet. De processer för vilka randvillkoren måste beskrivas är i allmänhet relaterade till transport av material eller energi över gränsytorna. Diskussionen om randvillkor för kemiska processer som äger rum i en systemdel, såsom illitisering i bufferten, avser exempelvis randvillkoren för de relevanta transportprocesser som äger rum i bufferten, dvs advektion och diffusion.

Modellstudier/experimentella studier

Här sammanfattas modellstudier och experimentella studier av processen. Den här dokumentationen utgör huvudkällan till information för många av processerna.

Naturliga analogier/observationer i naturen

Om relevant, dokumenteras naturliga analogier och/eller observationer i naturen om processen under denna rubrik.

Tidsperspektiv

Den tidsskala eller de tidsskalor under vilka processen sker dokumenteras här, om sådana tidsskalor kan definieras.

Hantering i säkerhetsanalysen SR-Site

Under denna rubrik beskrivs hanteringen i säkerhetsanalysen SR-Site. För det mesta kan processen antingen:

- försummas baserat på informationen under de tidigare rubrikerna,
- försummas under förutsättning att ett speciellt villkor är uppfyllt, t ex att buffertdensiteten ligger inom ett angivet intervall,
- inkluderas genom modellering.

Följande aspekter behandlas, även om det inte finns ett fastställt format för dokumentationen.

Tidsperioder: Under vilka tidsperioder är processen relevant för systemutvecklingen? Exempelvis kan de relevanta tidsperioderna för bufferten vara:

- Återmättnadsfasen, som sträcker sig från tidpunkten för deponering tills dess att bufferten är helt vattenmättad.
- Den uppvärmda fasen, som sträcker sig från tidpunkten för deponering och den följande ungefär 1 000 år långa perioden med förhöjd temperatur i bufferten.
- Den långsiktiga tidsskalan som sträcker sig över den en miljon år långa analysperioden och som omfattar de varierande förhållandena i berggrunden som orsakas av klimatvariationer och andra långsiktiga variationer i miljön.

Genom att dokumentera processens relevans för tillämpliga tidsperioder kan man förenkla process-systemet genom att processen försummas under tidsperioder då den inte är relevant.

Randvillkor: Hur hanteras randvillkoren? Beaktas exempelvis rumsligt och tidsmässigt varierande kemiska och hydrauliska förhållanden?

Påverkan på och kopplingar till andra processer: Här behandlas hantering av den dokumenterade påverkan; likaså behandlas kopplingar till andra processer i systemdelen.

Specialfallen med kapselbrott och jordskalv som förändrar de geometriska förhållandena hos deponeringshål och tunnlar. Dessa specialfall medför förändrade förhållanden som kan påverka många processer – i synnerhet vad gäller bränslet, kapseln, bufferten och återfyllningen. De måste därför behandlas separat. Kapselbrott och jordskalv som är så kraftiga att de kan påverka deponeringshålens och tunnlarnas geometrier förväntas inte ske under den flera tusen år långa perioden efter deponering då tempererade förhållanden sannolikt råder. Detta innebär att specialfallen inte är relevanta för många ”tidiga” processer.

Med hjälp av informationen under denna underrubrik knyts alla processer till en hanteringsmetod och vid behov tas användbara modeller fram, se vidare i avsnitt 7.4.

Hantering av osäkerheter i SR-Site

Givet det valda hanteringssättet för varje process i säkerhetsanalysen SR-Site sammanfattas här hanteringen av olika typer av osäkerheter kopplade till processen.

Osäkerheter i mekanistisk förståelse: Osäkerheten i den allmänna förståelsen av processen behandlas baserat på tillgänglig dokumentation och med syfte att ge ett svar på frågeställningen: Ingår de grundläggande vetenskapliga mekanismer som styr processen och förstår man dem i den grad som krävs för det valda hanteringssättet? Alternativa modeller används ibland för att åskådliggöra den här typen av osäkerhet.

Osäkerheter kopplade till förenklingar i modellen: Oftast innehåller den kvantitativa representationen av en process förenklingar. Dessa kan utgöra en avgörande källa till osäkerhet i beskrivningen av systemets utveckling. För en specifik konceptuell modell används ibland alternativa modeller eller alternativa tillvägagångssätt till förenkling för att åskådliggöra den här typen av osäkerhet.

Osäkerheter i indata: Den uppsättning indata som krävs för att kvantifiera processen för den föreslagna hanteringen dokumenteras. Den fortsatta hanteringen av betydelsefulla indata och osäkerheter i indata beskrivs i **Datarapporten**, till vilken hänvisning görs om det är relevant.

Lämplighet hos referenser som ger stöd för hanteringen i SR-Site

Under denna rubrik redovisas lämpligheten hos referenserna i ett kvalitetssäkringsperspektiv. Redogörelsen är begränsad till de referenser som ger stöd för det valda hanteringssättet. Referenserna utvärderas vid sakgranskningen av **Processrapporterna**, tillsammans med de argument och motiv till det valda hanteringssättet som ges i de föregående underavsnitten i processbeskrivningen, se även avsnitt 2.9.5.

Referenser

En lista med referenser som används i dokumentationen av processer ges i slutet av rapporterna.

7.4 Processtabeller

För att sammanfatta processhanteringen i säkerhetsanalysen har en tabell tagits fram för att visa hanteringen av varje process, med utgångspunkt från den hantering som dokumenterats i **Processrapporterna**. Beskrivningen har delats in i olika tidsskeden i tillämpliga fall. Det finns en tabell per systemkomponent. I tabellen hänförs processen antingen till en modell med vars hjälp den kvantifieras, eller också förses den med en kort beskrivning i ord av hur den ska hanteras. Processtabellerna i SR-Site för bränslet, kapseln, bufferten, återfyllningen i deponeringstunnlarna samt geosfären presenteras i avsnitten 7.4.1 till 7.4.5.

I avsnitt 7.5 visas med hjälp av två flödesscheman hur de olika modelleringsaktiviteterna hänger samman.

7.4.1 Bränslet och kapselns inre

Tabell 7-2. Processtabell för bränslet och kapselns inre som beskriver hur bränsleprocesser och processer som sker i kapselns inre hanteras för intakta kapslar och i specialfallen med otäta kapslar (kursiv text). Gröna fält avser processer som försummas eller saknar betydelse för den aktuella perioden. Röda fält avser processer som kvantifieras genom modellering i säkerhetsanalysen. Orangea fält avser processer som försummas om ett särskilt villkor uppfylls. Den valda hanteringen motiveras i Processrapporten för bränslet och kapseln. En översikt av alla modelleringsaktiviteter, med hänvisning till avsnitt i denna huvudrapport där resultaten diskuteras, ges i avsnitt 7.5. En stor del av denna information finns också i tabellens slutkolumn.

	Intakt kapsel	Post för intakt kapsel i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Otät kapsel	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
F1. Radioaktivt sönderfall	Termisk modell.	Sönderfall, värmealstring.	COMP23.	Vid termisk beräkning, se avsnitt 10.3.4, vid beräkning av nuklidtransport, se avsnitt 13.4.1.
F2. Stråldämpning/värmealstring	Termisk modell.	Sönderfall, värmealstring.	Försummas när utsläpp sker efter perioden med förhöjda temperaturer.	Vid termisk beräkning, se avsnitt 10.3.4.
F3. *Inducerad fission (kriticitet)*	Försummas eftersom mängden moderator inuti kapseln före kapselbrott är otillräcklig.	–	Försummas eftersom sannolikheten är försumbart liten om hänsyn tas till utbränningen av bränslet.	Se även avsnitt 13.3.
F4. Värmetransport	Termisk modell.	Värmeledning.	Försummas när utsläpp sker efter perioden med förhöjda temperaturer.	Vid termisk beräkning, se avsnitt 10.3.4.
F5. *Vatten- och gastransport i kapselhålrum, kokning/kondensation*	Ej relevant.	–	Beskrivning i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.3.1, integrerad med andra relevanta processer; förenklade, pessimistiska antaganden om fördröjning i skadad kapsel beroende på brottyp.	Se **Radionuklidtransportrapporten**.
F6. Mekaniskt brott på bränsle-kapslingen	Ej relevant.	–	Pessimistiskt antagande.	
F7. Strukturell utveckling av bränslematris	Ej relevant.	–	Försumbar för de bränsletyper och den utbränning som gäller för SR-Site.	
F8. *Advektion och diffusion*	Ej relevant.	–	Beskrivning i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.3.1, Integrerad med andra relevanta processer; förenklade, pessimistiska antaganden om fördröjning i skadad kapsel beroende på brottyp.	Avser diffusion och advektion i kapselns inre, se kapitel 13. Se även process F17.
F9. Radiolys av restgaser/syra-bildning	Försummas eftersom det bildas försumbara mängder av korroderande ämnen.	–	Ej relevant.	Se **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.5.2.

	Intakt kapsel	Post för intakt kapsel i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Otät kapsel	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
F10. *Radiolys av vatten*	Försummas.	–	Försummas med undantag av bränsle-upplösning, se den processen.	Det ursprungliga vatteninnehållet förbrukas genom bildning av salpetersyra eller vid korrosion av segjärn.
F11. *Metallkorrosion*	Ej relevant.	–	Modellerad i COMP23.	Se avsnitten 13.4.1 och 13.5.2, underrubrik ”Frigörelse av aktiveringsprodukter”.
F12. *Upplösning av bränsle*	Ej relevant.	–	Modellerad som konstant, pessimistisk upplösningshastighet i COMP23.	Se kapitel 13.
F13. *Upplösning av gapinventarium*	Ej relevant.	–	Pessimistisk, omedelbar.	Se avsnitt 13.4.1.
F14. *Speciering av radionuklider, kolloidbildning*	Ej relevant.	–	COMP23.	Utfällning/upplösning hanterad med COMP23, koncentrationsgränser anges i **Datarapporten**. Se kapitel 13.
F15. Heliumbildning	Försummas eftersom den bildade helium-mängden inte kan öka trycket inuti kapseln tillräckligt mycket för att påverka dess mekaniska stabilitet.	–	Ej relevant.	Se **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.5.8**.**
F16. Kemisk förändring av bränsle-matrisen	Ej tillämpligt.		Försummas eftersom den inte bedöms öka bränslets upplösningshastighet.	
F17. *Radionuklidtransport*	Ej relevant.		COMP23.	Kapselns inre behandlas som en omblandad tank vid alla transport-beräkningar redovisade i kapitel 13.

7.4.2 Kapsel

Table 7-3. Processtabellen för kapseln som beskriver hur kapselprocesser hanteras för intakta kapslar och i specialfallet med otät kapsel (kursiv text). Gröna fält avser processer som försummas eller saknar betydelse för den aktuella perioden. Röda fält avser processer som kvantifieras genom modellering i säkerhetsanalysen. Orangea fält avser processer som försummas om ett särskilt villkor uppfylls. Den valda hanteringen motiveras i Processrapporten för bränslet och kapseln. En översikt av alla modelleringsaktiviteter, med hänvisning till avsnitt i denna huvudrapport där resultaten diskuteras, ges i avsnitt 7.5. En stor del av denna information finns också i tabellens slutkolumn.

	Intakt kapsel	Post för intakt kapsel i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Otät kapsel	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
C1. Stråldämpning/värmealstring	Stråldämpning: De ursprungliga strålnivåerna angivna i **Produktionsrapporten för kapseln** kommer från beräkningar i **Bränslerapporten**. Värmealstring: Ingår i integrerad modellering av termisk utveckling; termisk modell.	Sönderfall, värmealstring.	Försummas när utsläpp sker efter perioden med förhöjda temperaturer.	Se avsnitten 5.3.4 (Initiala strålnivåer) och 10.3.4 (Termisk utveckling).
C2. Värmetransport	Ingår vid integrerad modellering av termisk utveckling; termisk modell.	Värmeledning.	Försummas när utsläpp sker efter perioden med förhöjda temperaturer.	Se avsnitt 10.3.4.
C3. Deformation av segjärnsinsats	Isostatiska laster och skjuvlaster modelleras vid designanalys av kapseln, se avsnitt 5.4.3. (Ojämna laster beroende på ojämn svällning och på att deponeringshålet inte är tillräckligt rakt inberäknas.) Betraktas som orsak till kapselbrott när isostatiska laster eller skjuvlaster på kapseln överskrider de laster som anges i konstruktionsförutsättningarna.	Isostatisk last. Bergskjuvning.	Beskrivs i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 3.4.2, tillsammans med andra relevanta processer; förenklade, pessimistiska antaganden om fördröjning i skadad kapsel beroende på brottyp.	Se avsnitten 10.3.13 (Tempererat klimattillstånd), 10.4.5 (Stora jordskalv) och 10.4.9 (Isostatiskt tryck för glacial last).
C4. Deformation av kopparkapsel genom yttre tryck	Isostatiska laster och skjuvlaster modelleras vid designanalys av kapseln, se avsnitt 5.4.3. (Ojämna laster beroende på ojämn svällning och på att deponeringshålet inte är tillräckligt rakt inberäknas.) Betraktas som orsak till kapselbrott när isostatiska laster eller skjuvlaster på kapseln överskrider laster enligt konstruktionsförutsättningarna.		Försummas.	Se speciellt avsnitt 10.4.5 (Stora jordskalv).
C5. Termisk expansion (både segjärnsinsats och kopparkapsel)	Försummas, eftersom den termiska expansionen ger upphov till försumbara spänningar i materialen.	–	Försummas.	
C6. *Koppardeformation från inre korrosionsprodukter*	Ej relevant.	–	Beskrivs i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.3.1, tillsammans med andra relevanta processer; förenklade, pessimistiska antaganden om fördröjning i skadad kapsel beroende på brottyp.	Se **Radionuklidtransportrapporten**.
C7. Strålpåverkan	Försummas på grundval av den fastställda gränsen för insatsens kopparinnehåll (kopparföroreningar ökar risken för strålskador). Ingen strålpåverkan på kopparhöljet.	–	Försummas.	

	Intakt kapsel	Post för intakt kapsel i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Otät kapsel	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
C8. *Korrosion av segjärns-insats*	Ej relevant.	–	Beskrivs i **Processrapporten för bränslet och kapseln**, avsnitt 2.3.1, tillsammans med andra relevanta processer; förenklade, pessimistiska antaganden om fördröjning i skadad kapsel beroende på brottyp.	Se **Radionuklid-transportrapporten**.
C9. *Galvanisk korrosion*	Ej relevant.	–	Försummas, eftersom påverkan från galvanisk korrosion under syrefria, reducerande förhållanden ligger inom felmarginalen för segjärnsinsatsens korrosionshastighet.	Se **Radionuklid-transportrapporten**.
C10. Sprickbildning i segjärnsinsatsen genom spänningskorrosion	Försummas, eftersom sprickbildning genom spännings-korrosion anses osannolik och det inte heller skulle få några konsekvenser för insatsens stabilitet ifall spänningskorrosion skulle uppkomma.	–	Försummas.	
C11. Korrosion av koppar-kapsel	I allmänhet modelleras korrosion med utgångspunkt från antaganden om massbalans och transportkapacitet, medan reaktionshastigheter inte beaktas. Sulfid i buffert och återfyllning modelleras. Mikrobiellt producerad sulfid i bufferten begränsas pessimistiskt av tillförseln av näringsämnen för mikrober. Initialt syre i buffert: Pessimistiskt antas att allt syre korroderar koppar, medan syreförbrukningen från buffertens pyrit och i berg försummas. Initialt syre i tunnelåterfyllning: Förbrukning i berg och av mikrober beaktas. Eventuell nedträngning av syre: Integrerad hantering av berg-, återfyllnings- och buffertförhållanden. Gropfrätning (syrekorrosion): Beskrivs som ojämn allmän korrosion. Korrosion orsakad av strålning: Försumbara korrosionsdjup. Kloridkorrosion: Försummas om pH > 4 och $[Cl^-] < 2$ M. Korrosionseffekter på kallbearbetat material försummas på grund av ringa konsekvenser, om ens några. Korrosion från vatten modelleras som hypotetiskt fall.	Korrosion.	Ej relevant för otät kapsel.	Se avsnitten 10.3.13 och 10.4.9.
C12. Sprickbildning genom spänningskorrosion, koppar-kapsel	Försummas på grund av den kombinerade effekten av mycket låga (om ens förekommande) koncentrationer av processfrämjande substanser samt den otillräckliga tillgången på oxidanter.	–	Försummas.	
C13. Jordströmmar – Läck-strömskorrosion	Försummas på grund av att ingen korrosionsökning sker vid yttre elektriska fält.	–	Försummas.	
C14. Utfällning av salter på kapselytan	Försummas på grund av de ringa konsekvenserna och endast medan vattenmättning av bentonit pågår.	–	Försummas.	
C15. Radionuklidtransport	Ej relevant.	–	COMP23.	Se kapitel 13.

7.4.3 Buffert

Tabell 7-4. Processtabell för bufferten som beskriver hur buffertprocesser hanteras i olika tidsskeden och i specialfallet jordskalv. Gröna fält avser processer som försummas eller saknar betydelse för den aktuella perioden. Röda fält avser processer som kvantifieras genom modellering i säkerhetsanalysen. Orangea fält avser processer som försummas om ett särskilt villkor uppfylls. Den valda hanteringen motiveras i Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen. En översikt av alla modelleringsaktiviteter, med hänvisning till avsnitt i denna huvudrapport där resultaten diskuteras, ges i avsnitt 7.5. En stor del av denna information finns också i tabellens slutkolumn.

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Intakt kapsel					
Bu1. Stråldämpning/värme-alstring	Försummas, eftersom doshastigheten är alltför låg för att ha någon betydelse för bufferten.	Försummas, eftersom doshastigheten är alltför låg för att ha någon betydelse för bufferten.	Ej relevant.	–	
Bu2. Värmetransport	Termisk modell.	Termisk modell.	Ej relevant.	Värmeledning.	Se avsnitt 10.3.4.
Bu3. Frysning	Försummas, eftersom detta kräver permafrostförhållanden.	Försummas om buffert-temperaturen > −4 °C. I övriga fall en gränssättande konsekvensberäkning.	Ej relevant.	Frysning, expansion.	Förvarstemperatur på lång sikt erhålls från modellering av permafrostdjup, se avsnitt 10.4.3.
Bu4. Upptag och transport av vatten vid omättade förhållanden	THM-modellen för buffert och återfyllning.	Ej relevant enligt definition.	Ej relevant.	Mättnad.	Se avsnitt 10.3.8.
Bu5. Vattentransport vid mättade förhållanden	Försummas vid omättade förhållanden. För mättade förhållanden är behandlingen densamma som den som avser lång sikt.	Försummas om den hydrauliska konduktiviteten < 10^{-12} m/s, eftersom diffusion då dominerar.	Se process Bu9.	Advektion.	Angående konsekvenserna av kolloider som frigörs från bufferten, se avsnitt 10.4.9, underrubrik ”Kapselkorrosion vid en delvis eroderad buffert”.
Bu6. Gastransport/upplösning	Genom upplösning.	(Genom upplösning.) Ingen gasfas antas förekomma.	(Genom upplösning.) Ingen gasfas antas förekomma.	–	
Bu7. Kanalbildning/erosion	Kvantitativ uppskattning med en empirisk modell.	Ej relevant, se även Bu18.	Ej relevant.	Kanalbildning/erosion.	Se avsnitt 10.2.4.

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Bu8. Svällning/mass-omfördelning	THM-modellering av buffert och återfyllning inklusive interaktion mellan buffert och återfyllning samt termisk expansion.	Integrerad utvärdering av erosion, konvergens, korrosionsprodukter, kryp, svälltrycksförändringar på grund av jonbyte och salthalt, kapselsjunkning.	Del av integrerad utvärdering av buffert/kapsel/berg.	Svällning.	Initial mättnad/svällning: Se avsnitt 10.3.9. Tempererade förhållanden på lång sikt: Se avsnitt 10.3.12. Effekter av salthalt på svälltryck diskuteras i avsnitten 10.3.9, 10.4.8 och 12.2.2. Effekten av jonbyte på svälltryck diskuteras i avsnitt 12.2.2. Jordskalv: Se avsnitt 10.4.5. Konsekvenserna av kolloider som frigörs från bufferten (erosion) diskuteras i avsnitt 10.4.9, underrubriken ”Kapselkorrosion vid en delvis eroderad buffert” och täcks in av ett stiliserat fall som beskrivs i avsnitt 10.3.9. Kapselsjunkning behandlas i avsnitten 10.4.8 och 12.2.4.
Bu9. Flyttillstånd	Ej relevant.	Försummas eftersom flyttillstånd orsakat av en kort stöt inte kan uppstå i bentonit med hög densitet beroende på höga effektivspänningar.	Försummas eftersom flyttillstånd orsakat av en kort stöt inte kan uppstå i bentonit med hög densitetberoende på höga effektivspänningar.		Se avsnitt 10.4.8, underrubriken ”Flyttillstånd”.
Bu10. Advektiv transport av lösta ämnen	Förenklade antaganden om masstransport av lösta ämnen under mättnad.	Försummas om den hydrauliska konduktiviteten < 10^{-12} m/s.	Se process Bu9.	Advektion.	Se process Bu5.
Bu11. Diffusiv transport av lösta ämnen	Kemimodell (mättade skedet med förhöjd temperatur; omättade skedet beaktas ej).	Kemisk modell.	Ingen specifik behandling.	Diffusion.	Skedet med förhöjd temperatur: Se avsnitt 10.3.10. Tempererade förhållanden på lång sikt: avsnitt 10.3.12. Glaciationscykel: Se avsnitt 10.4.8, underrubrik ”Kemisk utveckling av buffert och återfyllning vid ändrade grundvattensammansättningar”.
Bu12. Sorption (inklusive jonbyte)	Kemisk modell (mättade skedet med förhöjd temperatur; omättade skedet beaktas ej).	Kemisk modell.	Ingen specifik behandling.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process Bu11.

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Bu13. Omvandling av föroreningar	Kemisk modell (mättade skedet med förhöjd temperatur; omättade skedet beaktas ej).	Kemisk modell.	Ingen specifik behandling.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process Bu11.
Bu14. Speciering och reaktioner i vattenlösning	Kemisk modell (mättade skedet med förhöjd temperatur; omättade skedet beaktas ej).	Kemisk modell.	Ingen specifik behandling.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process Bu11.
Bu15. Osmos	Utvärdering genom jämförelse med empiriska data.	Utvärdering genom jämförelse med empiriska data.	Ingen specifik behandling.	Osmos.	Initial mättnad/svällning: Se avsnitt 10.3.9. Tempererade förhållanden på lång sikt: Se avsnitt 10.3.12. Glaciationscykel: Se avsnitt 10.4.8, underrubrik ”Effekter av saltvatten på buffert och återfyllning”.
Bu16. Omvandling av montmorillonit	Modell beräkningar (varma, mättade skedet; omättade skedet beaktas ej).	Uppskattningen baseras på belägg i naturen.	Del av integrerad utvärdering av buffert/kapsel/berg.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Skedet med förhöjd temperatur: Se avsnitt 10.3.10, underrubrik ”Mineralomvandling”, täcker även in den tempererade perioden på lång sikt.
Bu17. Interaktion mellan järn och bentonit	Försummas eftersom järn inte kommer i kontakt med bentonit.	Beaktas endast vid otät kapsel. Eventuell förlust av buffertens funktion.	Beaktas endast vid kapselbrott. Eventuell förlust av buffertens funktion.		
Bu18. Frigörelse av montmorillonitkolloider	Försummas om den totala katjonladdningen är > 4 mM. I annat fall utförs modellering.	Försummas om den totala katjonladdningen är > 4 mM. I annat fall utförs modellering.	Ingen specifik behandling.	Kolloidfrigörelse.	Tempererade förhållanden på lång sikt: Se avsnitt 10.3.12. Glaciationscykel: Se avsnitt 10.4.8, underrubrik ”Kolloidfrigörelse från buffert och återfyllning”.
Bu19. Strålningsinducerade omvandlingar	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	–	
Bu20. Radiolys av porvatten	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	–	

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Bu21. Mikrobiella processer	Försummas under omättade förhållanden, eftersom omfattningen av reaktioner i vattenlösning är begränsad. För mättade förhållanden är hanteringen densamma som den som avser lång sikt.	Kvantitativ uppskattning av sulfatreduktion, begränsas av tillförseln av näringsämnen för mikrober i grundvatten.	Ingen specifik behandling.	Korrosion.	Sulfatreduktion ingår i korrosionsberäkningen, avsnitt 10.4.9.
Bu22. Cementering	Diskuteras i samband med Process Bu16 ”Omvandling av montmorillonit”	Diskuteras i samband med Process Bu16 ”Omvandling av montmorillonit”.	Ingår i integrerad utvärdering av buffert/kapsel/berg.		
Otät kapsel					
Bu6. Otät kapsel. Gastransport/upplösning	*(Inga kapselbrott förväntas under denna period.)*	Kvantitativ uppskattning baserad på empiriska data.	Kvantitativ uppskattning baserad på empiriska data.	–	Se avsnitt 13.8.2.
Bu19. Otät kapsel. Strålningsinducerade omvandlingar	Försummas, eftersom doshastigheten utanför kapseln är alltför låg för att ge någon effekt.	Effekten av α-strålning från nuklider från en otät kapsel uppskattas.	Effekten av α-strålning från nuklider från en otät kapsel uppskattas.	–	Effekten av α-strålning från nuklider uppskattas i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**, avsnitt 3.5.12. Där dras slutsatsen att konsekvenserna kan försummas.
Bu23. Transport av kolloider	Försummas om densiteten vid mättnad > 1 650 kg/m^3, annars gränssättande beräkning. *(Inga kapselbrott förväntas under denna period.)*	Försummas om densiteten vid mättnad > 1 650 kg/m^3, annars gränssättande beräkning.	Försummas om densiteten vid mättnad > 1 650 kg/m^3, annars gränssättande beräkning.	–	Se avsnitt 13.5.3.
Bu24. Speciering av radionuklider	*(Inga kapselbrott förväntas under denna period.)*	Antaganden baseras på empiriska data.	Antaganden baseras på empiriska data.	–	Se kapitel 13.
Bu25. Transport av radionuklider i vattenfas	*(Inga kapselbrott förväntas under denna period.)*	COMP23.	COMP23. Reducerad diffusionsväg.	–	Se kapitel 13. Jordskalv: Se avsnitt 13.6.
Bu26. Transport av radionuklider genom gasfas	*(Inga kapselbrott förväntas under denna period.)*	Kvantitativ uppskattning.	Kvantitativ uppskattning.	–	Se avsnitt 13.8.

7.4.4 Återfyllning i deponeringstunnlar

Tabell 7-5. Processtabell för återfyllningen som beskriver hur återfyllningsprocesser hanteras under olika tidsskeden. Gröna fält avser processer som försummas eller saknar betydelse för den aktuella perioden. Röda fält avser processer som kvantifieras genom modellering i säkerhetsanalysen. Orangea fält avser processer som försummas om ett särskilt villkor uppfylls. Den valda hanteringen motiveras i Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen. En översikt av alla modelleringsaktiviteter, med hänvisning till avsnitt i denna huvudrapport där resultaten diskuteras, ges i avsnitt 7.5.

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Intakt kapsel				
BfT1. Värmetransport	Förenklat antagande.	Förenklat antagande.	–	
BfT2. Frysning	Försummas, eftersom detta kräver permafrostförhållanden.	Försummas om bufferttemperaturen > –2 °C. I övriga fall en diskussion.	Ingår ej, eftersom frysning i återfyllning är knuten till fördröjning.	Konsekvenserna inte lika allvarliga som för bufferten.
BfT3. Vattenupptag och vattentransport vid omättade förhållanden	THM-modellen för buffert och återfyllning.	Ej relevant enligt definition	Mättnad.	Pelletarna ingår i modellen.
BfT4. Vattentransport vid mättade förhållanden	Försummas under omättade förhållanden. För mättade förhållanden är behandlingen densamma som för den som avser lång sikt	Ingår i geosfärsmodelleringen.	Advektion.	Utvärdering av effekterna på konduktiviteten till följd av kemisk utveckling och massomfördelning/massförlust och av eventuella förändringar av de hydrauliska gradienterna vid permafrost och glaciation.
BfT5. Gastransport/upplösning	THM-modellen för buffert och återfyllning.	(Genom upplösning.)		Förekomsten av en instängd gasfas beaktas vid modelleringen av återfyllningens mättnad (gäller inte bufferten).
BfT6. Kanalbildning/erosion	Kvantitativ uppskattning med en empirisk modell.	Ej relevant, se även BfT16.	Kanalbildning/erosion.	Se även vattentransport för mättade förhållanden.
BfT7. Svällning/massomfördelning	THM-modellering av buffert och återfyllning inklusive interaktion mellan buffert och återfyllning samt homogenisering i tunnel.	Integrerad utvärdering av erosion, konvergens, kryp, svälltrycksförändringar på grund av jonbyte, salthalt och omvandling.	Svällning (buffert).	Avvikelser i den mängd buffert och återfyllning som deponeras initialt och mättning av buffert före tunnelåterfyllning behandlas i avsnitt 10.3.9. Effekten av salthalt behandlas i avsnitten 10.3.9 och 10.4.8. Effekten av erosion behandlas i avsnitt 10.4.8.
BfT8. Flyttillstånd	Ej relevant.	Ej relevant.	–	Konsekvenserna inte lika allvarliga som för bufferten. Behandlas i avsnitt 10.4.8.

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
BfT9. Advektiv transport av lösta ämnen	Förenklade antaganden om masstransport av lösta ämnen under mättnad.	Ingår i geosfärsmodelleringen. Fall utan transportväg genom återfyllningen beaktas.	Advektion.	Se ”Vattentransport vid mättade förhållanden”.
BfT10. Diffusiv transport av lösta ämnen	Det tidiga skedet studeras inte specifikt, eftersom förhållandena i återfyllningen kommer att vara jämförbara med dem för den långsiktiga utvecklingen.	Kemisk modell.	Diffusion.	Period med förhöjd temperatur: Se avsnitt 10.3.10. Tempererade förhållanden på lång sikt: avsnitt 10.3.12. Glaciationscykel: Se avsnitt 10.4.8, underrubrik ”Kemisk utveckling av buffert och återfyllning vid ändrade grundvattensammansättningar”.
BfT11. Sorption (inklusive jonbyte)	Det tidiga skedet studieras inte specifikt, eftersom förhållandena i återfyllningen kommer att vara jämförbara med dem för den långsiktiga utvecklingen.	Kemisk modell.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process BfT10. Se även osmos.
BfT12. Omvandling av föroreningar	Effekten från oorganisk reduktion av syre modelleras.	Kemisk modell.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process BfT10.
BfT13. Speciering och reaktioner i vattenlösning	Det tidiga skedet studieras inte specifikt, eftersom förhållandena i återfyllningen kommer att vara jämförbara med dem för den långsiktiga utvecklingen.	Kemisk modell.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	Se process BfT10.
BfT14. Osmos	Den hydrauliska konduktiviteten i THM-modellen utvald för att hantera salthaltens inverkan.	Utvärdering genom jämförelse med empiriska data.	Osmos.	Hantering av saltvatteninträngning på lång sikt.
BfT15. Omvandling av montmorillonit	Modellberäkningar (varma, mättade skedet; omättade skedet beaktas ej).	Modellberäkningar.	Reaktioner i porvatten och lera, sorption.	
BfT16. Kolloidfrigörelse	Försummas om den totala katjonladdningen är > 4 mM. I annat fall utförs modellering.	Försummas om den totala katjonladdningen är > 4 mM. I annat fall utförs modellering.	Kolloidfrigörelse.	Förlust av återfyllning behandlas i avsnitt 10.4.8.
BfT17. Strålningsinducerade omvandlingar	Försummas, eftersom doshastigheten i återfyllningen är alltför låg för att ge någon effekt.	Försummas, eftersom doshastigheten i återfyllningen är alltför låg för att ge någon effekt.	–	
BfT18. Mikrobiella processer	Utesluts (effekten på syreförbrukning beaktas ej)	Hänsynstaganden till massbalans.		

	Återmättnad/period med förhöjd temperatur	Långsiktigt efter mättnad och vid normal temperatur	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Otät kapsel				
BfT5. Otät kapsel. Gastransport/upplösning	*Försummas, eftersom gasvolymer (från buffert) antas vara alltför låga för att nå fram till återfyllningen under denna period.*	*Försummas pessimistiskt eftersom transport skulle fördröja radioaktiva utsläpp och minska buffertrycket. Återfyllningen skulle fungera som en sänka för gas.*	–	*Gasutsläpp från kapseln.*
BfT19. Bildning och transport av kolloider	*Se geosfären (inga kapselbrott förväntas under denna period).*	*Se geosfären.*	–	*Kallas ”kolloidtransport” för bufferten. Se motsvarande geosfärsprocess.*
BfT20. Speciering av radionuklider	*Antaganden baserade på empiriska data (inga kapselbrott förväntas under denna period).*	*Antaganden baseras på empiriska data.*	–	Se kapitel 13.
BfT21. Transport av radionuklider i vattenfas	*COMP23 (inga kapselbrott förväntas under denna period).*	*COMP23.*	–	Se kapitel 13.
BfT22. Transport av radionuklider genom gasfas	*Förbigås (inga kapselbrott förväntas under denna period).*	*Förbigås.*	–	Se avsnitt 13.8.

7.4.5 Geosfären

Tabell 7-6. I processtabellen för geosfären ges en beskrivning av hur processer hanteras i olika tidsskeden/klimattillstånd och i specialfallet jordskalv. Gröna fält avser processer som är försumbara eller saknar betydelse. Röda fält avser processer som kvantifieras genom modellering i säkerhetsanalysen. Orangea fält avser processer som är försumbara på grund av att de omfattas av ett särskilt villkor. Skälen till hanteringen anges i Processrapporten för geosfären. En översikt av alla modelleringsaktiviteter, med hänvisning till avsnitt i denna huvudrapport där resultaten diskuteras, ges i avsnitt 7.5. En stor del av denna information finns också i tabellens slutkolumn. Modellakronymer förklaras i tabell 7-7.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge1. Värmetransport	Försummas, eftersom känslighetsstudier visar att det krävs mycket speciella utsprängnings-/deponeringsförlopp för att värmealstring ska inverka.	Modellering av maximal kapseltemperatur, utvärdering av fördelningen i maxtemperatur bland kapslarna och temperaturfördelningen i berget.	Platsspecifika 2D-uppskattningar av temperaturfördelningen med djupet.	Platsspecifika 1D-uppskattningar av subglaciala permafrost- och frysningsdjup.	Ej relevant.	Raden ”Temperatur”.	Tempererat: Se avsnitt 10.3.4. Permafrost och glacialt: Se avsnitt 10.4.3.
Ge2. Frysning	Ej relevant.	Ej relevant.	Platsspecifika 2D-uppskattningar av permafrost- och frysningsdjup.	Platsspecifika 1D-uppskattningar av subglaciala permafrost- och frysningsdjup.	Ej relevant.	Raden ”Temperatur”.	Se avsnitt 10.4.3.
Ge3. Grundvattenflöde	Modellering av inflöde, vattennivåsänkning och saltvattenuppträngning under antagande om mättat grundvattenflöde med hjälp av DarcyTools. MIKE-SHE används för en detaljerad simulering av effekterna av vattennivåsänkningen.	Modellering av återfyllningens återmättnad med hjälp av DarcyTools och mättat grundvattenflöde i olika skalor med hjälp av ConnectFlow.	Modellering av mättat grundvattenflöde i storregional skala med hjälp av DarcyTools.	Modellering av mättat grundvattenflöde i storregional skala under framryckningar och tillbakadraganden av inlandsisar med och utan permafrost, med hjälp av DarcyTools.	Ingen specifik behandling av inverkan på grundvattenflödet, men förenklade beräkningar av radionuklidtransport utförda (se Ge24).	Raden ”Grundvattenflöde”.	Bygg-/driftskedet: Se avsnitt 10.2.3. Tempererat: Se avsnitt 10.3.6. Permafrost och glacialt: Se avsnitt 10.4.6.
Ge4. Gasflöde/ upplösning	Försummas utgående från argument som stödjer antagandet om omättade områdens ringa påverkan på inflöden till tunnlar.	Ingår i förenklad form i beräkningarna av återfyllningens återmättnad. Försummas för andra beräkningar utgående från antagandet att gas som bildats i förvaret snabbt kan passera genom geosfären utan att orsaka tryckuppbyggnad.	Försummas i SR-Site utgående från antaganden att gas, som kan vara instängd under permafrosten, kommer att ha en liknande påverkan på grundvattenflödet som ett något tjockare permafrostskikt. Dessutom kan gas passera genom ständigt ofrusen mark (talik), i förekommande fall.	Försummas i SR-Site utgående från antagandet att gas bildad i förvaret snabbt kan passera genom geosfären utan att orsaka tryckuppbyggnad (utan förekomst av permafrost).	Ej relevant.	(Raden ”Grundvattenflöde”).	Se avsnitt 13.8.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge5. Förskjutningar i intakt berg	3DEC-modellering av effekter i närområdet vid drivning av tunnlar och deponeringshål.	3DEC-modellering av termiska spänningar och deformationer i när- och fjärrområdet.	3DEC-modellering av reducerad horisontalspänning till följd av nedkylning	3DEC-modellering av närområdet. Abaqus-modellering av fjärrområdet.	Ingår i modelleringen av skjuvrörelser.	Raden ”Bergspänningar”.	Bygg-/driftskede: Se avsnitt 10.2.2. Tempererat: Se avsnitt 10.3.5. Permafrost och glacialt: Se avsnitt 10.4.4.
Ge6. Reaktivering – förskjutning längs befintliga diskontinuiteter	3DEC-modellering av reaktivering som orsakats av berguttag.	3DEC-modellering av reaktivering orsakad av termisk belastning (närområde). Utvärdering av reaktivering baserad på 3DEC-modellering av spänningsutveckling (fjärrområde). Uppskattning av sannolikheten för jordskalv (konsekvensanalys, se ”Jordskalv”).	3DEC-modellering av sprickors reaktivering orsakad av minskade värmeinducerade spänningar, spänningstillstånd genom uppkomst av så kallad forebulge och portryck under ogenomträngligt permafrostskikt (närområde). Utvärdering av reaktivering baserad på spänningsutveckling enligt Abaqus, reducerad termisk spänning enligt 3DEC och uppskattningar av porvattenövertryck (fjärrområde). Uppskattning av sannolikheten för jordskalv (konsekvensanalys, se ”Jordskalv”).	3DEC-modellering av reaktivering orsakad av inlandsis (närområde). Analys av reaktivering baserat på Abaqus spänningsmodell och uppskattningar av porövertryck. Uppskattning av sannolikheten för jordskalv (konsekvensanalys, se ”Jordskalv”).	Tillämpning av konstruktionsföreskrifter (respektavstånd och avstånd mellan kapslar). Analys av resterande sannolikhet för kapselbrott till följd av skjuvrörelser.	Raden ”Sprickstruktur”.	Se process Ge5. Integrerad behandling av påverkan från jordskalv i avsnitt 10.4.5.
	Seismicitet orsakad av byggnation försummas, eftersom berguttaget sker för långsamt för att orsaka något annat än möjligen lokala och begränsade instabiliteter.					Raden ”Sprickstruktur”.	
Ge7. Sprickbildning	Utvärdering av EDZ. 3DEC-modellering av risken för spjälkning. Observationer (APSE) rörande storlek och form hos den bildade uppspruckna (spjälkade) zonen omkring deponeringshål.	3DEC-modellering av risken för spjälkning. Observationer rörande storlek och form hos den bildade uppspruckna (spjälkade) zonen omkring deponeringshål.	Termiska effekter modelleras och försummas under förutsättning att det endast sker marginella förändringar av det mekaniska tillståndet. Utvärdering av hydraulisk spräckning under ett ogenomträngligt permafrostlager.	3DEC-modellering av risken för sprickbildning på grund av inlandsis (närområde). Utvärdering av risken för hydraulisk spräckning.	Försummas med utgångspunkt från avsaknaden av observationer av skador omkring öppna tunnlar på ytligt djup, förorsakade av jordskalv i förkastningar på relevanta avstånd.	Raden ”Sprickstruktur”.	Se process Ge5.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge8. Kryp	Ej relevant. Täcks in av reaktivering orsakad av byggnation.	Försummas på grund av obetydlig konvergens av deponeringshål vid förväntade bergspänningar.	Försummas på grund av obetydlig konvergens av deponeringshål vid förväntade bergspänningar.	Försummas på grund av obetydlig konvergens av deponeringshål vid förväntade bergspänningar.	Ej relevant.	–	Se även avsnitt 10.3.5.
Ge9. Vittring och erosion på ytan	Beskrivningen som rör hanteringen av denna process har överförts till **Klimatrapporten**. (Indexnumren för efterföljande processer har inte ändrats för att säkerställa överensstämmelse med **FEP-rapporten**.)						
Ge10. Erosion/sedimentation i sprickor	Försummas på grund av de alltför låga flödeshastigheterna i icke-injekterade sprickor.	Försummas eftersom förväntade hydrauliska gradienter och skjuvkrafter är för små för att orsaka betydande erosion.	Försummas, eftersom förväntade hydrauliska gradienter och skjuvspänningar är för små för att orsaka betydande erosion.	Försummas, eftersom förväntade hydrauliska gradienter och skjuvspänningar är för små för att orsaka betydande erosion.	Ej relevant.	–	–
Ge11. Advektiv transport/blandning av lösta ämnen	Advektion och dispersion av salt ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools. Blandningars sammansättning utvärderas med utgångspunkt från modelleringen av grundvattenflöde samt platskännedom.	Advektion och dispersion av salt ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med ConnectFlow. Blandningars sammansättning utvärderas med utgångspunkt från modelleringen av grundvattenflöde samt platskännedom.	Advektion och dispersion av salt ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools. Blandningars sammansättning utvärderas med utgångspunkt från modelleringen av grundvattenflöde samt platskännedom.	Advektion och dispersion av salt ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools. Blandningars sammansättning utvärderas med utgångspunkt från modelleringen av grundvattenflöde samt platskännedom. Modellering av syreinträngning baserad på modellering av grundvattenflödet, matrisdiffusion och reaktioner med matrismineraler.	Ej relevant.	Raderna ”Grundvattenflöde, och Grundvattnets salthalt”.	Bygg-/driftskede: Se avsnitt 10.2.5. Tempererat: Se avsnitt 10.3.7. Permafrost och glacialt: Se avsnitt 10.4.7.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge12. Diffusiv transport av lösta ämnen i sprickor och bergmatris	Diffusion av salt mellan rörligt och orörligt grundvatten ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools.	Diffusion av salt mellan rörligt och orörligt grundvatten ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med ConnectFlow.	Diffusion av salt mellan rörligt och orörligt grundvatten ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools.	Diffusion av salt mellan rörligt och orörligt grundvatten ingår i modelleringen av mättat grundvattenflöde med DarcyTools. Modellering av syrenedträngning baserad på modellering av grundvattenflödet, matrisdiffusion och reaktioner med matrismineraler.	Ej relevant.	(Raden ”Grundvattensammansättning”).	Se process Ge11.
Ge13. Speciering och sorption	Ej relevant.	Förenklad K_d-metod för modellering av radionukliders sorption. Speciering beaktas vid valet av K_d-värden.	Förenklad K_d-metod för modellering av radionukliders sorption. Speciering beaktas vid valet av K_d-värden.	Förenklad K_d-metod för modellering av radionukliders sorption. Speciering beaktas vid valet av K_d-värden.	Ej relevant.	Raden ”Grundvattensammansättning”.	Se **Datarapporten**.
Ge14. Reaktioner grundvatten/bergmatris	Försummas, eftersom dessa reaktioner anses vara mindre betydelsefulla jämfört med effekterna av reaktioner med sprickmineral.	Försummas, eftersom dessa reaktioner anses vara mindre betydelsefulla jämfört med effekterna av reaktioner med sprickmineral.	Försummas eftersom dessa reaktioner anses vara mindre betydelsefulla jämfört med effekterna av reaktioner med sprickmineral.	Modellering av syrenedträngning baserad på modellering av grundvattenflödet, matrisdiffusion och reaktioner med matrismineraler.	Ej relevant.	Raden ”Grundvattensammansättning”.	Glacial period: Se avsnitt 10.4.7, underrubrik ”Glaciation och redoxförhållanden”.
Ge15. Upplösning/utfällning av sprickmineral	Grundvattensammansättningen i sprickor modelleras med utgångspunkt från resultatet av modelleringen av grundvattenflödet, antagande om lokal jämvikt med mineraler samt platskännedom.	Grundvattensammansättningen i sprickor modelleras med utgångspunkt från resultatet av modelleringen av grundvattenflödet, antagande om lokal jämvikt med mineraler samt platskännedom.	Grundvattensammansättningen i sprickor modelleras med utgångspunkt från resultatet av modelleringen av grundvattenflödet, antagande om lokal jämvikt med mineraler samt platskännedom.	Grundvattensammansättningen i sprickor modelleras med utgångspunkt från resultatet av modelleringen av grundvattenflödet, antagande om lokal jämvikt med mineraler samt platskännedom.	Ej relevant.	Raden ”Grundvattensammansättning”.	Se process Ge11.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge16. Mikrobiella processer	Modellering av diffusiv transport av metan och väte, massbalans-beräkningar för organiskt material och utvärdering av möjliga mikrobiella processer.	Modellering av diffusiv transport av metan och väte, massbalans-beräkningar för organiskt material och utvärdering av möjliga mikrobiella processer.	Modellering av diffusiv transport av metan och väte, massbalans-beräkningar för organiskt material och utvärdering av möjliga mikrobiella processer.	Modellering av diffusiv transport av metan och väte, massbalans-beräkningar för organiskt material och utvärdering av möjliga mikrobiella processer.	Ej relevant.	Raden ”Grundvatten-sammansättning”.	Bygg-/driftskede: avsnitt 10.2.5. Tempererad period: avsnitt 10.3.7.
Ge17. Nedbrytning av injekteringsmedel	Försummas, eftersom förväntade effekter uppkommer under tempererat tillstånd.	Generisk modellering av påverkan på kemiska förhållanden i sprickor och förändringar av den hydrauliska konduktiviteten i injekteringsborrhål.	Ingen specifik hantering. Extra-polering av resultaten från tempererat tillstånd.	Ingen specifik hantering. Extra-polering av resultaten från tempererat tillstånd.	Ej relevant	Raden ”Grundvatten-sammansättning”.	Tempererad period: avsnitt 10.3.7.
Ge18. Kolloidprocesser	Försummas på grund av obetydlig inverkan på geokemiska förhållanden.	Försummas på grund av obetydlig inverkan på geokemiska förhållanden.	Försummas på grund av obetydlig inverkan på geokemiska förhållanden.	Försummas på grund av obetydlig inverkan på geokemiska förhållanden.	Försummas på grund av obetydlig inverkan på geokemiska förhållanden.	–	Se **Processrapporten för geosfären**.
	Inverkan på radio-nuklidtransport är inte relevant på grund av intakta barriärer.	Gränssättande beräkningar av radionuklidtransport med kolloider.	Gränssättande beräkningar av radionuklidtransport med kolloider.	Gränssättande beräkningar av radionuklidtransport med kolloider.	Inverkan av jordskalv på kolloidala processer behandlas inte, men förenklade beräkningar för radionuklid-transport görs (se Ge24).	–	–
Ge19. Bildning/ upplösning/ reaktion av gasformiga ämnen	Blandningarnas sammansättning modelleras med utgångspunkt från modellering av grundvattenflödet, antagande om lokal jämvikt med mineraler samt platskännedom. Detta påverkar koncentrationerna av löst CO_2.	Modellering av diffusiv transport av metan och väte.	Modellering av diffusiv transport av metan och väte.	Ingår i modellering av syreförbrukningen. Modellering av diffusiv transport av metan och väte.	Ej relevant.		Glacial period: Se avsnitt 10.4.7, underrubrik ”Glaciation och redoxförhållanden”.

Process	Bygg-/driftskede	Tempererat klimattillstånd	Periglacialt klimattillstånd	Glacialt klimattillstånd	Jordskalv	Post i FEP-diagrammet (se avsnitt 8.5)	Hänvisningar till avsnitt i denna rapport (i tillämpliga fall) och övriga anmärkningar
Ge20. Bildning av metanis	Ej relevant.	Ej relevant.	Försummas utgående från platskännedom, kombinerat med en utvärdering av möjligheten för hydratbildning.	Försummas utgående från platskännedom, kombinerat med en utvärdering av möjligheten för hydratbildning.	Ej relevant	Raden ”Grundvatten-sammansättning”.	–
Ge21. Saltutfrysning	Ej relevant.	Ej relevant.	Modellering av transport av utfryst salt.	Ej relevant.	Ej relevant.	Raden ”Grundvattnets salthalt”.	Permafrost: Se avsnitt 10.4.7, underrubrik ”Utveck-ling under periglaciala förhållanden”.
Ge22. Strålnings-påverkan (berg och injektering)	Försummas på grund av alltför låga strålningsflöden.	Försummas på grund av alltför låga strålningsflöden.	Försummas på grund av alltför låga strålningsflöden.	Försummas på grund av alltför låga strålningsflöden.	Ej relevant.	–	Se **Processrapporten för geosfären**.
Ge23. Jordströmmar	Försummas, eftersom förväntade elektriska potentialfält är alltför små för att ha någon påverkan på grundvattenflöde eller transport av lösta ämnen.	Försummas, eftersom förväntade elektriska potentialfält är alltför små för att ha någon påverkan på grundvattenflöde eller transport av lösta ämnen.	Försummas, eftersom förväntade elektriska potentialfält är alltför små för att ha någon påverkan på grundvattenflöde eller transport av lösta ämnen.	Försummas, eftersom förväntade elektriska potentialfält är alltför små för att ha någon påverkan på grundvattenflöde eller transport av lösta ämnen.	Ej relevant.	–	Se **Processrapporten för geosfären**.
Ge24. Transport av radionuklider i vattenfas	Ej relevant, eftersom de tekniska barriärerna är intakta.	Advektion, dispersion, matrisdiffusion, sorption och radio-aktivt sönderfall ingår i integrerad modellering med FARF31 och MARFA.	Advektion, dispersion, matrisdiffusion, sorption och radio-aktivt sönderfall ingår i integrerad modellering med FARF31 och MARFA.	Advektion, dispersion, matrisdiffusion, sorption och radio-aktivt sönderfall ingår i integrerad modellering med FARF31 och MARFA.	Ingen fördröjning av radionuklider i geosfären tillgodoräknas, dvs geosfärens fjärrområde kortsluts.	Ingår inte explicit i den aktuella versionen.	Se kapitel 13, speciellt avsnitt 13.4.2.
Ge25. Transport av radionuklider i gasfas	Ej relevant, eftersom de tekniska barriärerna är intakta.	Utvärderas genom att bortse från geosfärens barriärfunktion.	Utvärderas genom att bortse från geosfärens barriärfunktion.	Utvärderas genom att bortse från geosfärens barriärfunktion.	Ej relevant.	Ingår inte explicit i den aktuella versionen.	Se avsnitt 13.8.

7.4.6 Tillkommande systemdelar

Det har också tagits fram processtabeller för tunnelpluggarna, centralområdet under jord, toppförslutningen, bottenplattan i deponeringshålet och borrhålsförslutningarna. Tabellerna ingår i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Eftersom dessa komponenter har mindre betydelse för säkerheten har processtabellerna inte tagits med i huvudrapporten. I det följande ges en sammanfattning av hur processer i de tillkommande systemdelarna hanteras i SR-Site.

Pluggar i deponeringstunnlar

Syftet med pluggen i deponeringstunneln är att återställa de hydrauliska förhållandena i en deponeringstunnel efter att kapslarna har installerats och tunneln har återfyllts. Det är viktigt att pluggen kan motstå tryckgradienten och begränsa allt utflöde av vatten från deponeringstunneln till den öppna transporttunneln. Pluggens mättnadsgrad och mekaniska utveckling under driftskedet behandlas vid THM-modelleringen av buffert och återfyllning. Betongdelen kommer så småningom att brytas ned och det kan inte uteslutas att en mer porös lokal volym bildas. Den mekaniska effekten av att återfyllningen tränger in i den volymen täcks också in av dessa THM-beräkningar. Volymens hydrauliska påverkan behandlas inte i SR-Site, eftersom den kommer att skärmas av med återfyllning på båda sidor. Nedbrytningen av betongen kommer också att inverka på de geokemiska förhållandena i förvaret. Denna fråga behandlas vid modelleringen av den geokemiska utvecklingen.

Centralområde

Mättnaden av centralområdet efter förslutningen av förvaret ingår vid THM-modelleringen av buffert och återfyllning. Efter mättnad har de flesta processerna liten eller ingen betydelse för slutförvarets funktion. Den geokemiska utvecklingen, och då främst påverkan från bergförstärkningar, behandlas. Det gäller även mekaniska interaktioner mellan centralområdets återfyllning och pluggarna i transporttunnlarna.

Toppförslutning

Processerna i toppförslutningen har begränsad betydelse för slutförvarets funktion. Vid THM-modelleringen görs en uppskattning av mättnadstiden. Den mekaniska interaktionen med den underliggande återfyllningen modelleras inte specifikt, men processen behandlas på samma sätt som interaktionen mellan tunnelpluggen och återfyllningen.

Bottenplatta i deponeringshål

Det enda syftet med bottenplattan är att den ska fungera som ett hjälpmedel vid installationen av kapseln och bufferten. Bottenplattan kan dock påverka bufferten mekaniskt, kemiskt och hydrauliskt. De mekaniska effekterna kan uppstå både under mättnadsfasen och på lång sikt när cementen har brutits ned. Detta beaktas vid THM-modelleringen av buffert och återfyllning. Den kemiska påverkan av cementens nedbrytning är densamma som vid reaktionen mellan tunnelpluggen och återfyllningen. När bottenplattan brutits ned kommer den att ha en högre hydraulisk konduktivitet. Detta beaktas vid beräkningarna av radionuklidtransporten.

Borrhålsförslutningar

Borrhålsförslutningarna liknar i många avseenden bufferten. Följande processer är av särskilt intresse och behandlas därför i SR-Site.

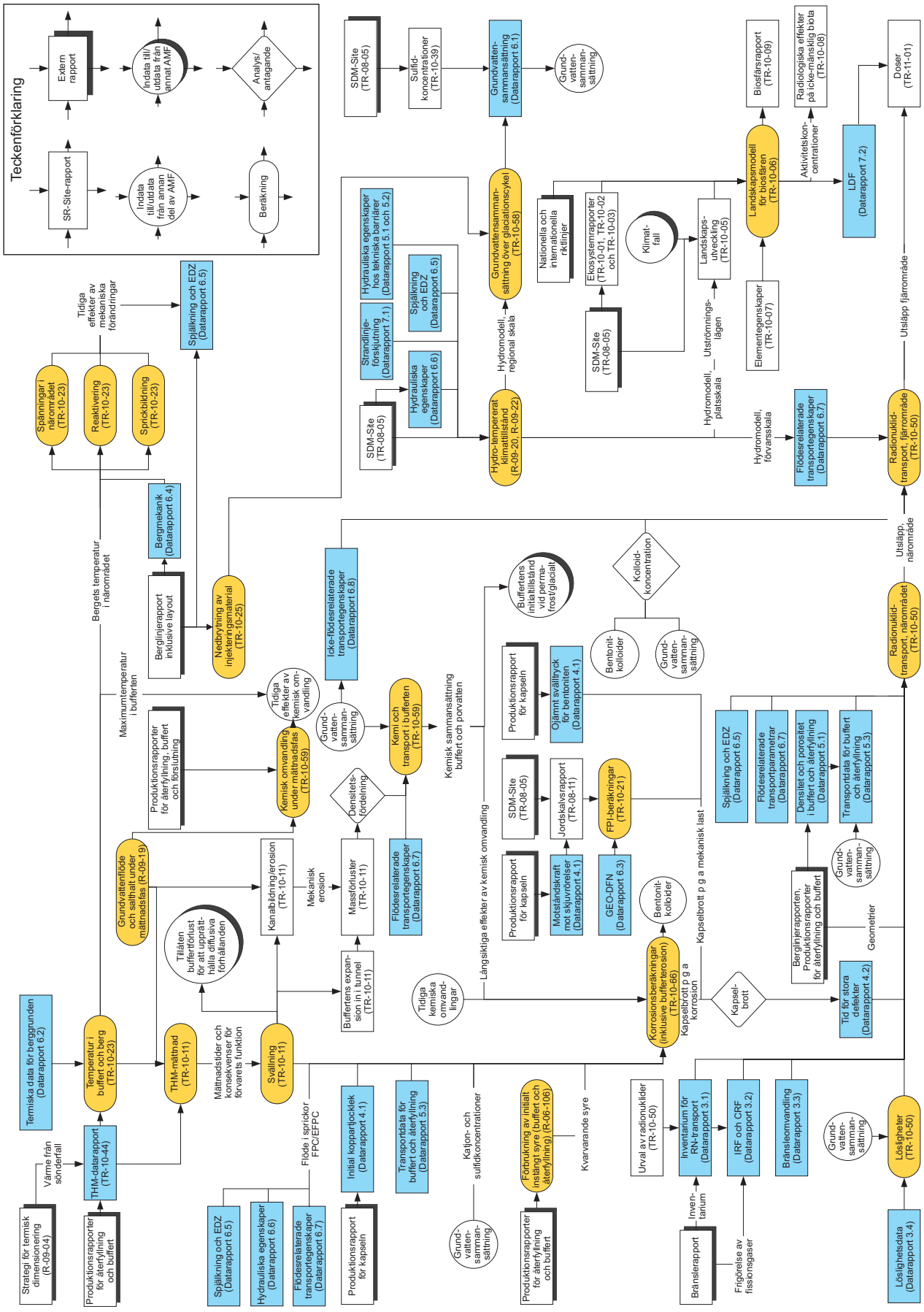
1. Frysning; de övre delarna av förslutningarna kommer under alla omständigheter att utsättas för låga temperaturer.
2. Upptag av vatten; tidsskalan för bevätning av förslutningen utvärderas.
3. Homogenisering under mättnad, särskilt interaktionen mellan bentonit och perforerad koppar.
4. Homogenisering efter en lokal förlust av bentonit – om bentonitkolloider bildas.

De kemiska interaktionerna mellan bentonit och betong behandlas inte specifikt. Samma resonemang förs som för interaktionen mellan tunnelplugg och återfyllning.

7.5 Modellscheman (assessment model flow charts, AMF)

För att ge en översikt av de modeller som används vid utvärderingen av förvarsutvecklingen och beroendet/interaktionen mellan dem har två modellscheman (AMF-scheman) tagits fram. Ett av AMF-schemana rör bygg- och driftskedet och den inledande perioden med tempererat klimat, se figur 7-3. Ett annat avser permafrostförhållanden och glaciala förhållanden, se figur 7-4. Data, som har kvalificerats i **Datarapporten**, är markerade med blå färg och modelleringar, som presenterats i **Modellrapporten**, är markerade med gul färg.

Modellrapporten beskriver modellerna i dessa AMF-scheman. Tabell 7-7 ger kopplingar mellan processerna i processtabellerna, de modelleringsaktiviteter som beskrivs med AMF-schemat och det avsnitt om referensutvecklingen (kapitlen 10, 12 och 13) där modelleringen redovisas.



Figur 7-3. *AMF-schemat för bygg-/driftskedet och den initiala tempererade perioden efter förslutning. Se huvudtexten för närmare förklaring.*

Figur 7-4. *AMF-schemat för permafrostförhållanden och glaciala förhållanden.*

Tabell 7-7. Kopplingar mellan processtabeller, AMF-schemat (figur 7-3) och beskrivningen här i huvudrapporten. Bygg-/driftskede och tempererat tillstånd. Modelleringsaktiviteterna i den vänstra kolumnen motsvarar de gula rutorna i figur 7-3.

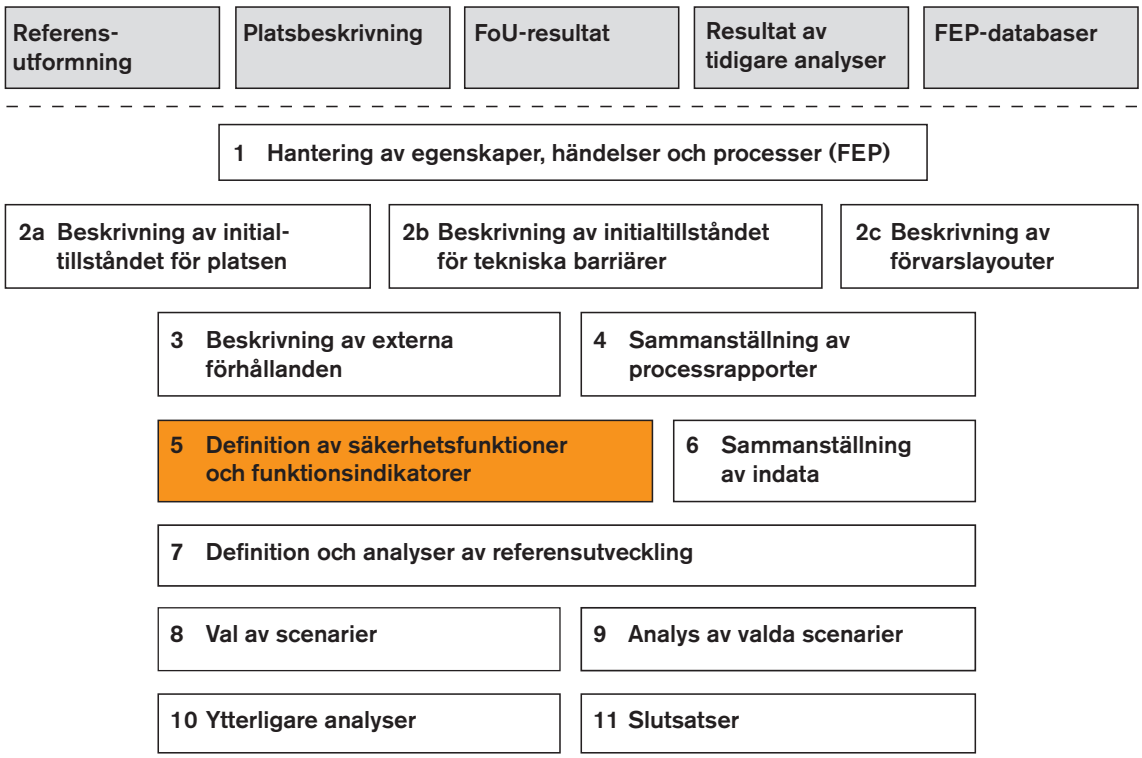
Modelleringsaktivitet i AMF-schemat	Ingående processer som tagits upp i processtabellerna i avsnitt 7.4	Kod	Avsnitt där modellering redovisas	Anmärkning	Modelleringsrapport	
					Referens	I AMF-schema
Temperatur hos buffert och berg	F1, F2, Bu1, Bu2, Ge1	3DEC	10.3.4	Sönderfall och värmealstring modelleras i form av exponentiella uttryck som anpassas till resultaten från detaljerade beräkningar.	/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
THM-mättnad (buffert och återfyllning)	Bu2, Bu4, BfT3	Abaqus	10.3.8		/Åkesson et al. 2010a/	TR-10-11
Spänningar i närområdet (geosfären)	Ge5	3DEC	10.2.2 (Bygg-/driftskede) 10.3.5 (Initialt tempererat)		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
Reaktivering	Ge6	3DEC	10.2.2 (Bygg-/driftskede) 10.3.5 (Initialt tempererat)		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
Sprickbildning (spjälkning)	Ge7	3DEC	10.2.2 (Bygg-/driftskede) 10.3.5 (Initialt tempererat)		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
FPI-beräkningar: Beräkningar av förekomsten av FPI-sprickor i deponeringstunnlar (se avsnitt 5.2.2)	Rör initialtillståndet.	Matlab	10.4.5		/Munier 2010/	TR-10-21
Kemiska omvandlingar under återmättnad (geosfären)	Ge13, Ge15	PHAST	10.2.5		/Sena et al. 2010/	TR-10-59
Nedbrytning av injekteringsmedel	Ge17	CodeBright	10.3.7 (Initialt tempererat) (Nämns även i 10.2.5 Bygg-/driftskede)		/Grandia et al. 2010a/	TR-10-25
Grundvattnets flöde och salthalt under återmättnad	Ge3	DarcyTools	10.2.3		/Svensson och Follin 2010/	R-09-19
Svällning	Bu8, BfT7	Abaqus, CodeBright	10.3.9		/Åkesson et al. 2010a/	TR-10-11
Kemiska förhållanden och migration i buffert	Bu11, Bu12, Bu13, Bu14	PHAST	10.3.10 (förhöjda temperaturer), 10.3.12 (långsiktigt)		/Sena et al. 2010/	TR-10-59
Förbrukning av initialt inneslutet syre (buffert och återfyllning)	BfT12	PHAST	10.2.5		/Grandia et al. 2006/	TR-06-106
Korrosionsberäkningar (inklusive beräkningar av bufferterosion)	Bu18, C11	Analytiska uttryck (Excel)	10.2.5 (Bygg-/driftskede) 10.3.13 (Initialt tempererat)		/SKB 2010d/	TR-10-66
Hydrologi tempererat tillstånd	BfT4, Ge3, Ge11	ConnectFlow	10.3.6		/Joyce et al. 2010/ /Selroos och Follin 2010/	R-09-20 R-09-22
Grundvattensammansättning under en glaciationscykel	Ge13, Ge14, Ge15, Ge19	PHREEQC	10.3.7 (tempererat)		/Salas et al. 2010/	TR-10-58

Modelleringsaktivitet i AMF-schemat	Ingående processer som tagits upp i processtabellerna i avsnitt 7.4	Kod	Avsnitt där modellering redovisas	Anmärkning	Modelleringsrapport	
					Referens	I AMF-schema
Lösligheter	F14	Simple functions			**Radionuklidtransport-rapporten**	TR-10-50
Radionuklidtransport i närområdet	F17, Bu25, BfT21 (De tre ovanstående omfattar delprocesserna F1, F12, F13, F14, Bu11, Bu12, BfT9, BfT10 och BfT11)	COMP23	Kapitel 13		**Radionuklidtransport-rapporten**	TR-10-50
Radionuklidtransport i fjärrområdet	Ge24, består av delprocesserna Ge11, Ge12, Ge13 och F1	FARF31, MARFA	Kapitel 13		**Radionuklidtransport-rapporten**	TR-10-50
Landskapsmodell för biosfären	Processer i biosfären	Ecolego, MIKE_SHE, Pandora, ERICA	13.2		/Avila et al. 2010/	TR-10-06

Tabell 7-8. Kopplingar mellan processtabeller, AMF-schemat, figur 7-4, och beskrivningen här i huvudrapporten. Permafrost och glacialt tillstånd. Modelleringsaktiviteterna i den vänstra kolumnen motsvarar de gula rutorna i figur 7-4.

Modelleringsaktivitet i AMF-schemat	Ingående processer som tagits upp i processtabellerna i avsnitt 7.4	Kod	Avsnitt i referens-utvecklingen som innehåller en beskrivning av modelleringen	Anmärkning	Modellrapport	
					Referens	I AMF-schema
Permafrostmodellering	F1, F2, Ge1	Numerisk permafrost-modell	10.4.1, 10.4.3		**Klimatrapporten**, detaljer i /Hartikainen et al. 2010/	TR-10-49, detaljer i TR-09-17
Modellering av inlandsisen	Externa processer, se **SR-Site Klimatrapport.**	UMISM	10.4.1		**Klimatrapporten**	TR-10-49
GIA-modellering (Global Isostatic Adjustment)	Externa processer, se **SR-Site Klimatrapport.**	Numerisk GIA-modell	10.4.1		**Klimatrapporten**, detaljer i /SKB 2006/	TR-10-49, detaljer i TR-06-23
FPI-beräkning: Beräkning av förekomsten av FPI-sprickor som skär deponeringshål (se avsnitt 5.2.2)	Rör initialtillståndet.	Matlab	10.4.5		/Munier 2010/	TR-10-21
Spänningar i närområdet (geosfären)	Ge5	3DEC	10.4.4		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
Reaktivering	Ge6	3DEC	10.4.4		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
Sprickbildning	Ge7	3DEC	10.4.4		/Hökmark et al. 2010/	TR-10-23
Grundvattensammansättning under en glaciationscykel	Ge3, Ge11, Ge12, Ge21	PHREEQC	10.4.7		/Salas et al. 2010/	TR-10-58
Hydrologi glacialt tillstånd	Ge3, Ge11	DarcyTools	10.4.6		/Vidstrand et al. 2010/	R-09-21
					/Selroos och Follin 2010/	R-09-22
Hydrologi, isläge II	Ge3, Ge11	ConnectFlow	10.4.6		/Joyce et al. 2010/	R-09-20
Nedträngning av syre under den glaciala perioden	Ge11, Ge15	PHREEQC, PHAST, analytiska uttryck	10.4.7		/Sidborn et al. 2010	TR-10-57
Fall med frysning av buffert och återfyllning	Bu3, BfT2		10.4.8		/Birgersson et al. 2010/	TR-10-40
THC-utveckling	Bu11, Bu12, Bu13, Bu14	PHAST	10.4.8		/Sena et al. 2010/	TR-10-59
Korrosionsberäkningar (inklusive beräkningar av bufferterosion)	Bu18, C11	Analytiska uttryck (Excel)	10.4.9		/SKB 2010d/	TR-10-66
Lösligheter	F14	Simple functions			**Radionuklidtransportrapporten**	TR-10-50
Radionuklidtransport i närområdet	F17, Bu25, BfT21 (De tre ovanstående omfattar, som delprocesser, F1, F12, F13, F14, Bu11, Bu12, BfT9, BfT10 och BfT11.)	COMP23	Kapitel 13		**Radionuklidtransportrapporten**	TR-10-50
Radionuklidtransport i fjärrområdet	Ge24, består av delprocesserna Ge11, Ge12, Ge13 och F1.	FARF31	Kapitel 13		**Radionuklidtransportrapporten**	TR-10-50
		MARFA				
Landskapsmodell för biosfären	Biosfärsprocesser.	Ecolego, MIKE_SHE, Pandora, ERICA	13.2		/Avila et al. 2010/	TR-10-06

8 Säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer



Figur 8-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

8.1 Inledning

8.1.1 Differentierade säkerhetsfunktioner i SR-Site

Som nämnts i avsnitt 2.1 är den primära säkerhetsfunktionen i KBS-3-konceptet att helt innesluta det använda kärnbränslet i kopparkapslar under hela analysperioden, som är en miljon år i SR-Site. Om en kapsel skulle skadas är den sekundära säkerhetsfunktionen att fördröja utsläpp från kapslarna. De två frågorna inneslutning och fördröjning är därför av fundamental betydelse under hela analysen. Det bör noteras att inneslutningsfunktionen är mer framträdande i KBS-3-konceptet än i många andra förvarskoncept för använt kärnbränsle eller högaktivt avfall, exempelvis /Nagra 2002, Andra 2005/. Detta återspeglas också i säkerhetsanalysens metodik och struktur, som i jämförelsevis stor utsträckning är inriktad på förvarets inneslutningsförmåga.

I säkerhetsanalysen SR-Can infördes mer differentierade säkerhetsfunktioner för ett KBS-3-förvar. Dessa användes för att styra in analysen på viktiga frågor för långsiktig säkerhet, för att redovisa referensutvecklingen på ett strukturerat sätt och som grund för valet av scenarier. Det tillvägagångssättet sågs som en positiv utveckling vid granskningen av SR-Can-analysen /SKI/SSI 2008/ och är också väl i linje med den internationella utvecklingen inom området säkerhetsanalysmetodik /NEA 2009/.

Detta kapitel handlar om differentiering av säkerhetsfunktioner för ett KBS-3-förvar för SR-Site, som i sin tur bygger på arbetet i SR-Can-analysen. Säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för dessa, som visar på säkra förhållanden i förvaret, introduceras i avsnitt 8.2. Säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier relaterade till inneslutning och fördröjning diskuteras i avsnitten 8.3 respektive 8.4. I avsnitt 8.5 beskrivs ett FEP-diagram. Diagrammet visar kopplingarna mellan viktiga initialtillståndsförhållanden, långsiktiga processer och säkerhetsfunktioner. FEP-diagrammet knyter således ihop mycket av informationen som ges i det här kapitlet, i kapitlen 5 och 7 samt de externa faktorer som beskrivs i kapitel 6.

Säkerhetsfunktionerna och deras indikatorer och kriterier används för att ge struktur åt säkerhetsutvärderingen när den långsiktiga utvecklingen av förvaret utvärderas i kapitel 10. De spelar också en avgörande roll i valet och analyserna av scenarier i kapitlen 11 respektive 12.

8.1.2 Hantering av utspädning

Utspädning betraktas ibland som en säkerhetsfunktion i samband med avfallshantering. Utspädning betraktas dock inte som en säkerhetsfunktion för KBS-3-systemet. De huvudsakliga skälen till detta är att utspädning i grunden inte kan påverkas genom utformningen av förvaret och endast i viss grad genom valet av plats. Inte desto mindre spelar utspädning en viktig roll vid en realistisk uppskattning av följderna av ett potentiellt utsläpp från förvaret. En plats vid kusten kan förväntas stå under vatten under långa tidsperioder. Utspädning av tänkbara utsläpp i havsvatten kan då dramatiskt minska de beräknade årliga effektiva doserna och därmed de med dem förknippade radiologiska riskerna.

Den framtida utvecklingen av klimatet och klimatrelaterade förhållanden, som kommer att vara bestämmande faktorer för utspädning, är emellertid osäker. Många klimatrelaterade parametrar kan variera med flera storleksordningar. Fastän långa perioder av utsläpp till havet kan förutspås, kommer dessa också att avbrytas av perioder med utsläpp till terrestra ekosystem. De kan också avbrytas av perioder då tidigare utsläpp, som upplagrats i havssediment till följd av strandlinjeförskjutning, kommer att finnas i terrestra system. Förhållandena på land kommer sannolikt att vara förknippade med de högsta enskilda riskerna. Diskussionen om huruvida förvaret uppfyller kraven måste grundas på dessa ogynnsamma men, i ett långt tidsperspektiv, inte osannolika förhållanden.

Utspädning behöver inkluderas i kvantitativa analyser av brunnar, men även i det fallet kommer nivåerna inte att kunna kontrolleras genom förvarsutformning eller genom att man beaktar platsens betydelse.

Ett besläktat fenomen rör det faktum att förvaret har en rumslig utsträckning och att det omgivande berget och de ytnära hydrogeologiska systemen kommer att omfördela potentiella utsläpp från förvaret innan människor exponeras för dem. Dessa fenomen måste inkluderas i kvantifieringen av följderna av potentiella utsläpp. Omfördelningseffekterna kan dock inte på ett enkelt sätt beskrivas som positiva eller negativa.

8.2 Allmänt om säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Det övergripande kriteriet för att utvärdera säkerheten för förvaret är det riskkriterium som utfärdats av SSM. Kriteriet fordrar att ”den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken”. Detta är ett övergripande kriterium som kräver information från ett stort antal analyser på lägre nivåer. Den slutliga riskberäkningen är det samlade resultatet av olika modellutvärderingar baserade på en stor uppsättning indata.

Säkerhetsfunktioner

En detaljerad och kvantitativ förståelse och utvärdering av förvarssäkerhet kräver en utförligare beskrivning av hur de huvudsakliga säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning” upprätthålls med hjälp av förvarets komponenter. Grundat på förståelsen av komponenternas egenskaper och utvecklingen av systemet på lång sikt kan flera säkerhetsfunktioner som är underordnade inneslutning och fördröjning identifieras.

I det här sammanhanget definieras en *säkerhetsfunktion* kvalitativt som ett sätt på vilket en förvarskomponent bidrar till säkerhet. Till exempel ska kapslar motstå isostatiska laster i förvaret utan att inneslutningsfunktionen bryts**.** En säkerhetsfunktion, som är relaterad till kapseln och underordnad inneslutning, skulle därför vara kapselns förmåga att *motstå isostatiska last*.

Säkerhetsfunktionsindikatorer

För att kvantitativt utvärdera säkerheten är det önskvärt att relatera eller uttrycka säkerhetsfunktioner som mätbara eller beräkningsbara storheter, ofta i form av barriärvillkor.

När det gäller kapselfunktionen att motstå isostatiska laster i förvaret är den totala isostatiska lasten, med bidrag från buffertens svälltryck och det hydrostatiska trycket, en lämplig storhet att använda för att utvärdera i vilken utsträckning denna säkerhetsfunktion uppfylls. Den isostatiska lasten sägs vara en *säkerhetsfunktionsindikator*[15] (safety function indicator) för den nämnda säkerhetsfunktionen för kapseln. En säkerhetsfunktionsindikator är således en mätbar eller beräkningsbar storhet, med vilken en säkerhetsfunktion kan utvärderas kvantitativt.

Kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

För att fastställa om en säkerhetsfunktion upprätthålls eller inte är det önskvärt med kvantitativa kriterier mot vilka säkerhetsfunktionsindikatorerna kan utvärderas under den tidsperiod som täcks in av säkerhetsanalysen.

Situationen skiljer sig emellertid från säkerhetsutvärderingar av många andra tekniska eller industriella system i ett betydelsefullt avseende: Prestandan hos förvarssystemet – eller delar av det – förändras i allmänhet inte stegvis, i motsats till exempelvis fallet med en pump eller ett elsystem som kan kännetecknas som antingen fungerande eller inte fungerande (dock möjligen med övergångstillstånd med ofullständig funktion). Förvarssystemet kommer att utvecklas kontinuerligt. I många avseenden kommer det inte att finnas en skarp skiljelinje mellan acceptabel prestanda och ett icke fungerande system på delsystemsnivå eller med avseende på detaljerade barriäregenskaper.

Det finns således många säkerhetsfunktionsindikatorer för vilka ingen gräns för acceptabel prestanda kan ges. Koncentrationer i grundvattnet av ämnen som orsakar korrosion på kapseln, eller av ämnen som är skadliga för bufferten, är exempel på den här typen av faktorer som är relaterade till inneslutning. Vanligtvis behandlas de i mer komplexa analyser, där flera parametrar sammantaget avgör exempelvis kapselns korrosionshastighet. De flesta indikatorer relaterade till fördröjning är också av den här typen.

Inte desto mindre kommer det här kapitlet att visa att det finns vissa kritiska barriäregenskaper för vilka kvantitativa gränser för säker funktion kan sättas. För inneslutning är ett uppenbart villkor kravet att kopparkapseln inte får ha en genomgående defekt någonstans, dvs koppartjockleken måste vara större än noll över hela kapselytan. Utöver detta direkta mått på inneslutningsprestanda kan flera tilläggskriterier specificeras kvantitativt. Dessa är till exempel relaterade till maximitemperaturen hos bufferten och till krav på buffertens densitet och svälltryck, vilka ger buffertegenskaper som är gynnsamma för att upprätthålla inneslutning. De flesta av dessa avgör om specifika, potentiellt skadliga, processer kan uteslutas från analysen. Med hänvisning till ovanstående exempel med isostatiska laster i förvaret har designanalysen av kapseln visat att kapseln motstår en isostatisk last på 45 MPa. Kravet att den isostatiska lasten inte får överskrida 45 MPa utgör i det här fallet således ett *kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator*.

Samband mellan övergripande säkerhet och enskilda säkerhetsfunktioner

Det är viktigt att notera att en avvikelse från ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator inte betyder att förvaret är osäkert, utan snarare att noggrannare analyser och ytterligare data behövs för att kunna utvärdera säkerheten.

Kriterierna är ett hjälpmedel för att fastställa om säkerheten upprätthålls. Om kriterierna är uppfyllda underlättas säkerhetsutvärderingen. Om alla kriterier relaterade till kapselbrott är uppfyllda medför detta att det övergripande riskkriteriet är uppfyllt, förutsatt att alla typer av kapselbrott har identifierats. Att alla kriterier relaterade till bufferten, återfyllningen och berget är uppfyllda är inte en garanti för att det övergripande riskkriteriet är uppfyllt. Kapseln kan ändå skadas, vilket kan leda till utsläpp av radionuklider. Å andra sidan kan riskkriteriet mycket väl uppfyllas samtidigt som ett eller flera av kriterierna inte uppfyllts. Om ett kriterium inte skulle vara uppfyllt innebär det att situationen behöver studeras ytterligare. Fler analyser kan behövas för att fastställa följderna på delsystemsnivå eller systemnivå.

[15] Vid valet av termen ”säkerhetsfunktionsindikator” noterades det att termen ”säkerhetsindikator” (safety indicator) i det här sammanhanget normalt refererar till utsläpp av radionuklider eller resulterande doser /Becker et al. 2002/. Därför undveks denna term.

Ett exempel är kriteriet att laddningskoncentrationen av katjoner i grundvattnet ska vara högre än 4 mM, $\Sigma q[M^{q+}] > 4$ mM, för att bufferterosion ska kunna uteslutas. Om detta kriterium inte är uppfyllt måste bufferterosion utvärderas kvantitativt. Dess följder med avseende på reducerad buffertdensitet måste undersökas vidare genom analyser av buffertens svälltryck och hydrauliska konduktivitet. Förändringar av de senare faktorerna kan i sin tur ha inverkan på exempelvis kapselkorrosion. En kedja av analyser initieras därför genom att den första säkerhetsfunktionen bryts, men det slutliga resultatet av en eventuellt ökad korrosionshastighet utgör inte nödvändigtvis en oacceptabel påverkan på inneslutningsförmågan.

Hantering av marginaler

Relaterat till ovanstående kan ett kriterium definieras så att det inbegriper en betydande marginal till oacceptabel prestanda.

Maximitemperaturkriteriet för bufferten, som satts till 100 °C för att undvika mineralomvandling, är ett exempel på ett kriterium med betydande marginal. Detta har dokumenterats i avsnitt 3.5.9 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Ett skäl till den stora marginalen är att omfattningen av mineralomvandling ökar gradvis med temperaturen. Det är därför inte möjligt att fastställa en skarp gräns under vilken omvandling inte sker. I stället fastställs ett kriterium under vilket man kan bortse från omvandling i säkerhetsanalysen, för alla praktiska syften och under långa tidsperioder.

Ett exempel på ett kriterium med mindre marginal är kravet att den totala laddningskoncentrationen av katjoner i grundvattnet ska vara högre än 4 mM för att erosion/kolloidbildning av bufferten ska kunna uteslutas. Här föreligger en skarpare initiering av säkerhetsfunktionen och det är möjligt att formulera ett kriterium med mindre marginal.

För de kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer som används i SR-Site har inte något systematiskt tillvägagångssätt använts för marginaler när kriterierna fastställts. Det enda gemensamma kravet på alla kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är att säkerhetsfunktionen, till vilken kriteriet är kopplat, ska vara uppfylld om kriteriet följs, grundat på den vetenskapliga förståelsen av det aktuella fenomenet. För användning i säkerhetsanalysen är marginalen för varje indikator av intresse. Därför behandlas marginaler för alla definierade indikatorkriterier relaterade till inneslutning och fördröjning i avsnitten 8.3.5 respektive 8.4.6.

Storheter för säkerhetsfunktionsindikatorer

För en del säkerhetsfunktioner finns det viss frihet i valet av storheter för de indikatorer som används för att representera säkerhetsfunktionen.

I den aktuella versionen är till exempel buffertdensiteten indikatorn för att kvantifiera buffertsäkerhetsfunktionen ”förhindra transport av kolloider genom buffert”. Man kunde även ha valt buffertens porstorlek, som är ett mer direkt mått på säkerhetsfunktionen. För ett specifikt bentonitmaterial är porstorleken dock direkt relaterad till densiteten och buffertdensiteten är av intresse för många andra frågeställningar i säkerhetsanalysen. Därför valdes densitet som säkerhetsfunktionsindikator i det här fallet.

Det finns andra liknande exempel. Detta gäller i synnerhet för bufferten för vilken många egenskaper är beroende av varandra och därmed i viss grad utbytbara.

Härledning av säkerhetsfunktioner, indikatorer och kriterier

För att uppsättningen säkerhetsfunktioner och tillhörande indikatorer och kriterier ska vara användbara i säkerhetsanalysen måste de vara tillräckligt omfattande. Det är därför viktigt att vara systematisk vid härledningen av dessa storheter.

De grundpelare på vilka härledningen av säkerhetsfunktioner bygger är:

- De två huvudsakliga säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning, som ligger till grund för utformningen av KBS-3-förvaret.
- Den vetenskapliga förståelsen av den långsiktiga utvecklingen av ett KBS-3-förvar.

Under årtiondena av forskning relaterad till den långsiktiga säkerheten hos ett KBS-3-förvar har säkerhetsfunktioner eller barriärkrav diskuterats och fastställts successivt.

Resultaten av detta arbete har använts i SR-Site. Likaså har alla kapsel- och buffertprocesser, som identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten och som dokumenterats i **Process-rapporterna,** beaktats i syfte att fastställa om en säkerhetsfunktion relaterad till processen skulle kunna definieras – idealt tillsammans med en indikator och ett kriterium, se vidare i avsnitten 8.3.1 och 8.3.2, underrubriker ”Ytterligare överväganden”.

Liksom för den uppsättning processer som befunnits vara betydelsefulla för långsiktig säkerhet kan man aldrig entydigt hävda att uppsättningen säkerhetsfunktioner i säkerhetsutvärderingen är fullständig. Uppsättningen säkerhetsfunktioner kan vara mer eller mindre färdigutvecklad och återspeglar mognadsgraden för den vetenskapliga förståelsen av det analyserade systemet. Säkerheten hos KBS-3-systemet har studerats under årtionden. Några nya skadliga processer, som skulle kunna utgöra en bas för att formulera ytterligare säkerhetsfunktioner, har inte identifierats under de senaste åren. Principen om att utforma ett jämförelsevis enkelt system bestående av naturligt förekommande material med välkända långsiktiga egenskaper, som i fallet med KBS-3, främjar dessutom härledningen av en fullständig och färdigutvecklad uppsättning säkerhetsfunktioner.

Kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är inte liktydiga med konstruktionsförutsättningar

Det bör noteras att kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer inte är desamma som konstruktionskriterier, som formaliserats till konstruktionsförutsättningar enligt diskussionen i kapitel 5. Kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är tänkta att uppfyllas under hela den en miljon år långa analysperioden, medan konstruktionsförutsättningar avser förvarets initialtillstånd.

Konstruktionsförutsättningar måste definieras med tillräcklig marginal för att medge att systemkomponenterna kan försämras under analysperioden med bibehållen säkerhet, dvs att alla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna idealt är uppfyllda även i slutet av analysperioden. Ett tydligt exempel på detta är kapselns koppartjocklek. Kapseln är utformad med 5 cm tjock koppar för att medge korrosion, medan kriteriet för säkerhetsfunktionsindikatorer kräver att tjockleken inte är noll någonstans, eftersom detta är kriteriet för att inneslutningen bryts.

Det finns även flera konstruktionsförutsättningar som hänför sig till gränser för innehåll av skadliga ämnen i de tekniska komponenterna i förvaret, exempelvis innehållet av fosfor och syre i kopparmaterialet samt buffertens pyritinnehåll. Dessa egenskaper bestäms av tillverknings- och kontrollförfarandena för den aktuella komponenten och ges som initialtillståndsförhållanden för säkerhetsanalysen. Egenskaperna måste inkluderas i analysen av relevanta skadliga processer i säkerhetsanalysen, vilket för de tre ovanstående exemplen skulle vara i analysen av kapselkorrosion. De är dock inte nödvändigtvis lämpliga som säkerhetsfunktionsindikatorer, eftersom de inte ändras över tid på annat sätt än genom att förbrukas genom de skadliga processerna.

Situationen är dock annorlunda för motsvarande säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier som är relaterade till framtida förhållanden i geosfären, t ex koncentrationer av i grundvattnet lösta ämnen som är skadliga för bufferten eller kapseln. Dessa kan endast i begränsad omfattning påverkas konstruktionsmässigt eller genom val av plats och är således mer relevanta att inkludera som funktionsindikatorer för långsiktig säkerhet.

Samband mellan säkerhetsfunktioner

Säkerhetsfunktionerna är relaterade till varandra. Alla säkerhetsfunktioner i bufferten ger antingen stöd för en säkerhetsfunktion hos kapseln eller så bidrar de till fördröjning i bufferten. Till exempel ger säkerhetsfunktionen ”begränsa advektiv transport” i bufferten stöd för kapselsäkerhetsfunktionen ”utgöra korrosionsbarriär”, och bidrar även till fördröjning i bufferten eftersom advektion är en effektivare transportmekanism än diffusion. På liknande sätt ger alla säkerhetsfunktioner för berget antingen direkt stöd för en säkerhetsfunktion hos kapseln, indirekt stöd via en buffertsäkerhetsfunktion eller också bidrar de till fördröjning i berget.

Sammanfattning

Följande definitioner har införts:

- En säkerhetsfunktion utgör ett sätt på vilket en förvarskomponent bidrar till säkerhet.
- En säkerhetsfunktionsindikator är en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos en förvarskomponent som anger i vilken utsträckning en säkerhetsfunktion uppfylls.
- Ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator är ett kvantitativt gränsvärde. Om säkerhetsfunktionsindikatorn till vilken det är relaterat uppfyller kriteriet så upprätthålls motsvarande säkerhetsfunktion.

Säkerhetsfunktioner är ett hjälpmedel för att utvärdera säkerheten, men att alla kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer ska vara uppfyllda är varken nödvändigt eller tillräckligt som säkerhetsargument. De olika kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna fastställs dessutom med varierande marginaler till acceptabla prestanda.

Kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är relaterade till – men inte identiska med – konstruktionsförutsättningar. Medan de senare är relaterade till förvarets initialtillstånd, och framför allt till de tillverkade komponenterna, ska de förra vara uppfyllda under hela analysperioden och är inte bara relaterade till de tillverkade komponenterna utan även till det naturliga systemet.

Uppsättningen säkerhetsfunktioner som används i SR-Site har tagits fram utgående från den dokumenterade erfarenhet som byggts upp under årtionden av forskning relaterad till KBS-3-förvarets långsiktiga säkerhet.

8.3 Säkerhetsfunktioner för inneslutning

Säkerhetsfunktioner, funktionsindikatorer och, i tillämpliga fall, funktionsindikatorkriterier presenteras nedan. Alla definierade storheter sammanfattas i figur 8-2 i slutet av det här avsnittet med hjälp av funktionsbeteckningarna som införs under underrubrikerna i de följande avsnitten (Can1, Can2 etc). Kriterierna som presenteras nedan är ofta valda med ett försiktigt förhållningssätt. Vidare studier och teknisk utveckling kan komma att visa att vissa av kriterierna kan relaxeras för framtida säkerhetsanalyser. Likaså kan nya kriterier komma till.

8.3.1 Kapsel

Can1. Utgöra korrosionsbarriär

Kapselns integritet kan äventyras på antingen mekanisk eller kemisk väg. Ett uppenbart krav för kapselns integritet är att kapslarnas kopparhölje inte får genomträngas. Detta kan uttryckas som att den minsta koppartjockleken över hela kapselytan ska vara större än noll.

$$d_{\min}^{Cu} > 0$$

Så länge detta kriterium är uppfyllt för alla kapslar är inneslutningen fullständig och inga utsläpp sker.

Can2. Motstå isostatisk last

En central säkerhetsfunktion för kapseln är dess förmåga att motstå isostatiska laster i förvaret.

Maximala isostatiska laster i ett förvar uppskattades i SR-Can-analysen till att inte överskrida 45 MPa, med bidrag från bentonitens svälltryck och det hydrostatiska trycket på deponeringsdjupet under en nedisning /SKB 2006a/. Därför är en konstruktionsförutsättning att kapseln ska motstå 45 MPa isostatisk last, se vidare avsnitt 5.4.1. Utvärderingen av konstruktionen och tillverkningsförfarandena för uppsättningen deponerade referenskapslar ledde till slutsatsen att de kommer att uppfylla den här konstruktionsförutsättningen, se avsnitt 5.4.3.

Den isostatiska lasten på kapseln används därför som en säkerhetsfunktionsindikator i SR-Site. Konstruktionsförutsättningen 45 MPa används som motsvarande säkerhetsfunktionsindikatorkriterium. Detta betyder inte nödvändigtvis att en kapsel kollapsar om lasten överskrider 45 MPa,

eftersom pessimistiskt valda kriterier i konstruktionsanalyser av kapseln används vid utvärdering av resultaten av de underliggande hållfasthetsberäkningarna och vid analyserna av skadetålighet. Detta återspeglas av resultaten från två trycktester av kapselattrapper där kollaps inträffade kring 130 MPa /Raiko et al. 2010/.

I SR-Site kommer det därför att strikt antas att kapslar motstår isostatiska laster upp till 45 MPa, utgående från resultaten av designanalysen. För potentiella laster som överskrider 45 MPa krävs en mer ingående prövning av resultaten av designanalysen.

Can3. Motstå skjuvlast

En annan central säkerhetsfunktion för kapseln är dess förmåga att motstå skjuvrörelser i sprickor som skär kapselns deponeringshål.

Konstruktionsförutsättningen som är kopplad till skjuvrörelser ges i avsnitt 5.4.1: ”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/m^3, och 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 isostatiska laster.”

Utvärderingen av konstruktionen och tillverkningsförfarandena för uppsättningen deponerade referenskapslar ledde till slutsatsen att de kommer att uppfylla denna konstruktionsförutsättning, se avsnitt 5.4.3.

Inget kriterium gällande skjuvrörelser har formulerats för kapselns säkerhetsfunktionsindikator, eftersom inga ytterligare detaljerade mekaniska analyser av kapseln utförs i säkerhetsanalysen. I stället används resultaten från kapselns designanalys och det leder till följande säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för andra delar av systemet:

- För bufferten får inte densiteten överskrida 2 050 kg/m^3.
- För geosfären får inte storleken hos skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshål överskrida 5 cm och deras hastighet får inte överskrida 1 m/s. Dessutom får inte temperaturen i förvaret vara lägre än 0°C när sådana skjuvrörelser sker för att beräkningarna i designanalysen ska vara strikt tillämpbara.

Om dessa villkor är uppfyllda, antas i säkerhetsanalysen att kapseln inte kommer att gå sönder på grund av skjuvrörelser. Det räcker att endast ett av villkoren inte är uppfyllt för att en mer detaljerad prövning av resultaten av designanalysen måste genomföras.

Ytterligare överväganden

En översiktlig granskning av alla långsiktiga kapselprocesser genomfördes för att kontrollera om fler säkerhetsfunktioner kunde identifieras baserat på processer som är relevanta för långsiktig säkerhet. Resultatet blev som följer:

- Kapseln dämpar strålningen från bränslet och reducerar därmed strålnivåerna utanför kapseln (process C1 i tabell 7-3). En funktion som är relaterad till den här egenskapen kunde i princip definieras. Detta gjordes emellertid inte, eftersom dämpningsfunktionen är uppfylld initialt. Därmed är den trivialt uppfylld på lång sikt så länge kapseln är intakt (strålningsnivåer minskar snabbt med tiden medan dämpningsstyrkan i kapseln är oförändrad). Strålningseffekterna utanför kapseln är relaterade till processer som påverkar inneslutningsfunktionen, vilket betyder att de i huvudsak är irrelevanta vid kapselbrott.
- Kapseln transporterar värme från insidan till utsidan (process C2 i tabell 7-3). Effektiv värmeöverföring säkerställer att maximitemperaturerna inuti kapseln begränsas, medan värmeöverföringen inte påverkar de utvändiga temperaturerna. Dessa bestäms i stället av egenskaper hos bufferten och berget och även av den värme som avges från bränslet. En funktion som är relaterad till den här egenskapen kunde i princip definieras. Detta gjordes inte eftersom maximitemperaturer inuti kapseln normalt nås tio år efter deponering. Under denna tidsperiod förändras inte kapselns värmeöverföringsegenskaper. Därför är det inte relevant att använda den här egenskapen som en långsiktig säkerhetsfunktion.

- Följande processer är relaterade till säkerhetsfunktioner:
  - C3 ”Deformation av segjärnsinsats” genom funktionerna Can2 och Can3 (se figur 8-2).
  - C4 ”Deformation av kopparkapsel till följd av yttre tryck” genom funktionerna Can2 och Can3.
  - C6 ”Koppardeformation till följd av inre korrosionsprodukter” genom funktion Can4, definierad i avsnitt 8.4.2 och figur 8-3.
  - C8 ”Korrosion av segjärnsinsats” genom funktion Can4.
  - C9 ”Galvanisk korrosion” genom funktion Can4.
  - C11 ”Korrosion av kopparkapsel” genom funktion Can1.
  - C15 ”Radionuklidtransport” genom funktion Can4.
- Följande processer har inte gett upphov till att säkerhetsfunktioner definierats, eftersom de bedömts vara utan betydelse för den långsiktiga säkerheten vid utvärderingen i **Process-rapporten för bränslet och kapseln**:
  - C5 ”Värmeutvidgning (både segjärnsinsats och kopparkapsel)”.
  - C7 ”Strålningseffekter”.
  - C10 ”Sprickbildning i segjärnsinsats genom spänningskorrosion”.
  - C12 ”Sprickbildning i kopparkapsel genom spänningskorrosion”.
  - C13 ”Jordströmmar – läckströmskorrosion”.
  - C14 ”Avsättning av salter på kapselyta”.
    För dessa processer noteras följande:
  - Skälen till att bortse från dessa processer gås åter igenom i avsnitt 14.4 där man avser verifiera att FEP som utelämnats i tidigare delar av säkerhetsanalysen är försumbara i ljuset av den genomförda scenarie- och riskanalysen.
  - Ingen av dessa processer, även om de skulle ha en signifikant inverkan på säkerheten, leder till att nya säkerhetsfunktioner tillkommer. I stället leder de till att fler säkerhetsfunktions-indikatorer, och eventuella kriterier för dessa, införs för redan existerande funktioner. Till exempel har processen C14 ”Avsättning av salter på kapselyta” en (försumbar) inverkan på den existerande funktionen Can1 ”Utgöra korrosionsbarriär”. Hade den bedömts vara betydelsefull för den långsiktiga säkerheten skulle den ha utvärderats i de följande analyserna tillsammans med andra processer som berör funktionen Can1.

Så länge inneslutningen är intakt kan möjligheten att kriticitet uppstår uteslutas. Därför formuleras inte någon säkerhetsfunktion avseende kriticitet för en oskadad kapsel, se vidare i avsnitt 8.4.

Det finns även flera konstruktionsförutsättningar relaterade till kopparhöljets och segjärnsinsatsens materialsammansättning. Dessa omfattar begränsningar för syre- och fosforinnehållen i koppar-materialet och för kopparinnehållet i segjärnet. Alla dessa konstruktionsförutsättningar utvärderas vid bestämningen av initialtillståndet för förvaret. Resultaten från utvärderingen används sedan som förutsättningar i analysen av den långsiktiga utvecklingen. Konstruktionsförutsättningarna ändras inte med tiden och de är således inte lämpliga som indikatorer för säkerhet. Dessutom är alla dessa förutsättningar relaterade till processer som påverkar existerande funktioner.

8.3.2 Buffert

Buff1. Begränsa advektiv transport

En viktig säkerhetsfunktion för bufferten är att begränsa transporten av lösta kopparkorroderande ämnen till kapseln och potentiella radionuklidutsläpp från kapseln. Materialet i bufferten som omger kapseln har valts för att förhindra advektiv transport i deponeringshålet. En riktlinje är att den hydrauliska konduktiviteten i bufferten ska uppfylla, se avsnitt 3.3.2 i **Processrapport för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:

$k^{Buff} < 10^{-12}$ m/s

Kravet gäller alla delar av bufferten, dvs variabiliteten inom bufferten måste vara sådan att kravet är uppfyllt överallt.

För alla rimliga hydrauliska gradienter i förvaret betyder detta villkor att transport i bufferten kommer att domineras av diffusion. Den hydrauliska konduktiviteten är starkt korrelerad till buffert-densiteten, till de adsorberade jonslagen och till jonstyrkan i det omgivande grundvattnet.

Buffertens homogenitet säkerställs till viss del genom det faktum att bufferten är tillverkad av ett lermaterial som sväller när det vattenmättas. Därför formuleras ett svälltryckskriterium, se avsnitt 3.4.1 i **Processrapport för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:

$P_{Swell}^{Buff} > 1$ MPa

Kravet gäller alla delar av bufferten, dvs de förekommande variationerna inom bufferten måste vara sådana att kravet uppfylls överallt.

Diffusionsstyrd transport i bufferten, i kombination med att bufferten är i nära kontakt med väggen i deponeringshålet, uppnås om svälltryckskriteriet är uppfyllt. Detta bidrar till att öka transportmotståndet i gränsytan mellan buffert och berg, se vidare i avsnitt 8.3.4.

Buff2. Reducera mikrobiell aktivitet

Sulfidproduktionen genom sulfatreducerande bakterier, som initialt finns i bufferten, begränsas normalt på lång sikt till försumbara nivåer genom deras beroende av tillgången till näringsämnen i grundvattnet.

I särskilda övergångssituationer kan tillgången på näringsämnen ändå vara betydande, exempelvis till följd av nedbrytning av byggmaterial och materialspill i förvaret. I sådana fall är buffertens funktion att reducera aktiviteten hos initialt förekommande mikrober. Resultat från studier med kompakterad bentonit, som utförts under *in situ*-förhållanden i Äspölaboratoriet, tyder på att den producerade sulfiden (vid en buffertdensitet på 1 800 kg/m^3) skulle ge upphov till mindre än 2 µm kopparkorrosion under 1 000 år om mikroberna ges fri tillgång till näringsämnen, se avsnitt 3.5.4 i **Processrapporten för bränslet och kapseln**. Aktiviteten minskar med ökad densitet. Den kvantitativa hanteringen av en situation av den här typen skulle dock bero av många faktorer. Det betyder att även om buffertdensiteten är en användbar indikator för denna buffertfunktion kan ett strikt kriterium för buffertdensitet inte formuleras. (Densitetsvariationer i bufferten bör också tas hänsyn till.)

Ovanstående rör mikrober som finns initialt i bufferten. För att förhindra att ytterligare mikrober tränger in, är en buffertdensitet som är mycket lägre än referensdensiteten (1 950 till 2 050 kg/m^3) tillräcklig.

Buff3. Dämpa bergets skjuvrörelser

En annan säkerhetsfunktion hos bufferten är att skydda kapseln från bergrörelser, i synnerhet från följderna av skjuvrörelser hos berget. Även här spelar buffertdensiteten en avgörande roll. Som nämnts i avsnitt 8.3.1, har följande konstruktionsförutsättning fastställts:

$\rho_{Bulk}^{Buff} < 2\,050$ kg/m^3 (säkerställa skydd av kapsel mot bergrörelse)

Buff4. Motstå omvandling (temperaturkrav)

Bufferttemperaturen får inte överskrida 100 °C för att begränsa kemiska omvandlingar, se avsnitt 3.5.9 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**.

$T^{Buffer} < 100$ °C

Buff5. Förhindra kapselsjunkning

Svälltrycket bör också vara tillräckligt högt för att förhindra att kapseln sjunker ned i deponeringshålet. Detta skulle få kapseln att komma i direktkontakt med berget (eller betongbottenplattan i deponeringshålet) och därmed sätta buffertens funktion ur spel.

Faktorn som primärt bestämmer kryphastigheten och den resulterande kapselsjunkningen är den nivå för den mobiliserade skjuvhållfastheten (skjuvspänning dividerat med skjuvhållfasthet) som leder till ökad kapselsjunkning. Skjuvhållfastheten minskar med minskande svälltryck. Analyser /Åkesson et al. 2010a/ av kapselsjunkning i ett deponeringshål för ett intervall av buffertdensiteter, och därmed olika svälltryck, tyder på att den totala sjunkningen blir mindre än 2 cm för svälltryck ner till 0,1 MPa, se vidare i avsnitt 3.4.1 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Baserat på dessa beräkningar formuleras försiktigtvis följande kriterium för säkerhetsfunktionsindikatorn:

$P_{Swell}^{Buff} > 0{,}2$ MPa (förhindra kapselsjunkning)

Buff6. Begränsa tryck på kapsel och berg

a. Gräns för svälltryck

Konstruktionsförutsättningen för isostatisk last på kapseln har bestämts under antagandet att buffertens svälltryck inte kommer att överskrida 15 MPa. Detta är svälltrycket för en mättad buffert med densiteten 2 050 kg/m^3 för en pessimistiskt vald grundvattensammansättning utan joner. Denna svälltrycksgräns är alltså angiven som ett funktionsindikatorkriterium för bufferten.

$P_{Swell} < 15$ MPa

b. Buffertfrysning

Om bufferten fryser är det inte uteslutet att skadligt höga tryck utvecklas på grund av den expanderande vattenvolymen. Därför får inte bufferttemperaturen bli lägre än frystemperaturen för en vattenmättad buffert. Den lägsta bufferttemperaturen kommer att förekomma i gränsytan mellan buffert och berg, varför temperaturgränsen gäller för denna kontaktyta. Eftersom värmen som frigörs från kapslarna kan ha betydelse, beroende på tiden som förflutit sedan förslutning av förvaret, är det nödvändigt att beakta placeringen av deponeringshål i utkanten av deponeringsområdet där temperaturen kommer att vara lägst. Experiment har verifierat att upprepade cykler av frysning och tining inte påverkar egenskaperna hos den frostfria bufferten /Birgersson et al. 2010/.

Om grundvattnet i berget kring bufferten fryser leder den avtagande temperaturen i bufferten till att svälltrycket minskar med temperaturen med ungefär 1,2 MPa/°C. Vid en kritisk temperatur T_c försvinner svälltrycket helt. T_c beror på svälltrycket vid 0 °C. När bufferttemperaturen är lägre än den kritiska temperaturen T_c börjar is att bildas i bufferten. T_c är således den temperatur vid vilken frysning påbörjas, medan fullständig frysning äger rum vid mycket lägre temperaturer. För en typisk buffert med en densitet i intervallet 1 950 till 2 050 kg/m^3 ligger T_c i intervallet –4 till –11 °C, se vidare i avsnitt 3.2.2 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**. Temperaturen –4 °C används därför som funktionsindikatorkriterium:

$T^{Buffer} > -4$ °C

Sammanfattningsvis minskar trycket då temperaturen sjunker från fryspunkten för vatten som omger bufferten ner till den kritiska temperaturen. Under den kritiska temperaturen kan vattnet i bufferten börja frysa. Om bufferten fryser kan trycket som kapseln och berget utsätts för öka, vilket är en fråga som kräver separata analyser.

Andra krav

Halten av ämnen som kan orsaka korrosion på kapseln ska vara låg i bufferten. Förutom oundvikliga initiala syreförekomster kan pyritinnehållet ge upphov till ett problem på lång sikt. Pyrit är ett ämne som frigör sulfid och därför orsakar korrosion på kapseln, om det inte oxideras av t ex initialt förekommande eller inträngande syre. Dock har inget absolut kriterium angetts för mängden pyrit. Korrosionseffekterna för uppmätta mängder måste utvärderas kvantitativt. Eftersom pyrit också kan förbruka initialt förekommande eller inträngande syre i förvaret är utvärderingen av effekterna av förekomsten av detta material i bufferten komplex.

Observera också att konstruktionsförutsättningarna för bufferten omfattar en begränsning av sulfidhalten till 0,5 viktprocent av den totala massan, motsvarande ungefär en procent pyrit.

Ytterligare överväganden

En översiktlig granskning av alla långsiktiga buffertprocesser genomfördes för att kontrollera om fler säkerhetsfunktioner kunde identifieras med utgångspunkt från de processer som är relevanta för långsiktig säkerhet, på samma sätt som beskrivs för kapseln i avsnitt 8.3.1. Resultatet blev följande:

- Vattenmättnaden hos bufferten som beskrivs i processen ”Upptag och transport av vatten under omättade förhållanden”, process Bu4 i tabell 7-4, är en nödvändig förutsättning för att säkerhetsfunktionen ”Begränsa advektiv transport” ska uppfyllas. Så länge bufferten är omättad behövs dock inte säkerhetsfunktionen. Därför har ingen separat säkerhetsfunktion definierats för den här processen.

- Processen Bu11 ”Diffusiv transport av olika specier” styr både kapselns korrosionshastighet och den eventuella transporten av radionuklider. Den avgörande frågan är emellertid om diffusion är den dominerande transportmekanismen, vilket täcks in av säkerhetsfunktionen ”Begränsa advektiv transport”. Därför har ingen separat säkerhetsfunktion definierats för endast diffusionsprocessen.
- Processen ”Sorption (inklusive jonbyte)” är betydelsefull för fördröjningen av radionuklider från en otät kapsel. Den här processen kan ge upphov till en säkerhetsfunktion. Detta diskuteras vidare i avsnitt 8.4.3.
- Processerna ”Omvandling av föroreningar” och ”Speciering och reaktioner i vattenlösning” är avgörande för att bestämma de kemiska förhållandena i bufferten. Härigenom kommer de att inverka på flera andra processer, men dessa har ingen direkt inverkan på säkerheten och ingen säkerhetsfunktion har definierats.
- Följande processer är relaterade till säkerhetsfunktioner:
  – ”Värmetransport” genom funktion Buff4 (se figur 8-3).
  – ”Frysning” genom funktionerna Buff6 och R4.
  – ”Vattentransport under mättade förhållanden” genom funktion Buff1.
  – ”Kanalbildning” genom funktion Buff1 (indirekt).
  – ”Gastransport/upplösning” genom fördröjningsfunktionen Buff9 (se figur 8-3).
  – ”Svällning/omfördelning av massa” genom funktionerna Buff1, Buff2 och Buff5.
  – ”Advektiv transport av olika specier” genom funktion Buff1.
  – ”Montmorillonitomvandling” genom funktionerna Buff4 och R1.
  – ”Kolloidbildning” genom funktion R1.
  – ”Mikrobiella processer” genom funktion Buff2.
  – ”Kolloidfiltrering” genom fördröjningsfunktionen Buff7 (se figur 8-3).
  – ”Cementering” inkluderar ”förstyvning” genom funktion Buff3.
- Följande processer har inte lett till att säkerhetsfunktioner definierats, eftersom de bedömts vara utan betydelse för den långsiktiga säkerheten i utvärderingen i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:
  – ”Stråldämpning/värmealstring”.
  – ”Radiolys av porvatten”.
  – ”Strålningsinducerade omvandlingar”.
  – ”Flyttillstånd”.
  För dessa processer noteras följande:
  – Skälen till att man bortser från dessa processer gås åter igenom i avsnitt 14.4. Man avser där verifiera att FEP som utelämnats i tidigare delar av säkerhetsanalysen går att försumma i ljuset av den genomförda scenarie- och riskanalysen.
  – Ingen av dessa processer leder till att nya säkerhetsfunktioner tillkommer, även om de skulle ha signifikant inverkan på säkerheten. I stället medför de att fler säkerhetsfunktionsindikatorer, och eventuella kriterier för dessa, införs för redan existerande funktioner.

Det finns även flera konstruktionsförutsättningar som är relaterade till materialsammansättningen i bufferten. Dessa omfattar en begränsning av innehållen av sulfid, totalt svavel och organiskt material. Alla dessa konstruktionsförutsättningar utvärderas när initialtillståndet för förvaret fastställs. Resultaten av utvärderingen används sedan som förutsättningar i analysen av den långsiktiga utvecklingen. Konstruktionsförutsättningarnas värden ändras inte med tiden och de är således inte lämpliga som indikatorer på säkerhet. Dessutom är alla dessa förutsättningar relaterade till processer som påverkar existerande funktioner.

8.3.3 Återfyllning i deponeringstunnlar

BF1. Motverka buffertexpansion

Buffertens svällning kommer att leda till uppåtriktad expansion med en resulterande kompaktering av återfyllningen. Kompressionen måste motverkas av återfyllningen för att hålla buffertdensiteten inom de önskade gränsvärdena. Den mekaniska växelverkan mellan bufferten och återfyllningen beror på många faktorer och behandlas i **Produktionsrapporten för återfyllningen** och vid THM-modelleringen av bufferten, återfyllningen och andra komponenter /Åkesson et al. 2010a/. Den här funktionen utvärderas som en del av analysen av buffertens förmåga att på lång sikt begränsa

advektiv transport. Utvärderingen omfattar studier av buffertens densitetsminskning genom dess uppåtriktade svällning in i återfyllningen. Buffertindikatorerna, som är relaterade till begränsning av advektiv transport, används därför för att utvärdera den här återfyllningsfunktionen. I allmänhet är det fördelaktigt med hög densitet hos återfyllningen för att funktionen ska upprätthållas. Eftersom det finns många faktorer som påverkar processen kan inte ett enstaka kriterium definieras.

I återfyllningen ska koncentrationen av ämnen som kan orsaka korrosion av kapseln vara låg. Liksom för bufferten finns oundvikligen en viss mängd initialt inneslutet syre i återfyllningen. Koncentrationen av pyrit kan också orsaka problem på lång sikt. Dock har ingen absolut begränsning angetts för den här koncentrationen. Korrosionseffekterna av uppmätta halter måste utvärderas kvantitativt.

8.3.4 Geosfär

Många aspekter av bergets säkerhetsfunktioner kan i allmänhet inte täckas in med enkla kriterier, utan det krävs mer komplexa analyser där den kombinerade effekten av flera faktorer bestämmer utfallet. Ändå är det möjligt att identifiera förhållanden som bör vara gynnsamma för såväl inneslutning som fördröjning liksom förhållanden som i slutänden skulle vara skadliga för de tekniska barriärernas säkerhetsfunktioner. Exempelvis diskuterades detta i rapporten om geovetenskapliga lämplighetsindikatorer och kriterier för val och utvärdering av plats /Andersson et al. 2000/. Fler slutsatser drogs i avsnitten 13.6 och 13.7 i huvudrapporten för SR-Can.

Säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer för berget som är relaterade till kemiska, mekaniska, hydrogeologiska och termiska förhållanden diskuteras kvalitativt nedan. Kvantitativa gränsvärden för indikatorer ges då det är möjligt.

R1. Tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden

Flera karakteristiska egenskaper hos grundvattnensammansättningen är avgörande för att kunna tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden för förvaret.

Reducerande förhållanden

Ett fundamentalt krav är att förhållandena är reducerande. Ett nödvändigt villkor är avsaknad av löst syre i grundvattnet, eftersom alla tecken på att syre förekommer skulle tyda på att förhållandena är oxiderande. Förekomsten av reduktionsmedel som reagerar snabbt med O_2, såsom Fe(II) och sulfid, är tillräcklig för att visa att förhållandena är reducerande. Andra indikatorer för redoxförhållanden, som negativ redoxpotential, är inte alltid väldefinierade och är sålunda mindre användbara. Redoxpotential är dock ändå ett mått på tillgången på alla kinetiskt aktiva oxiderande substanser.

Detta krav säkerställer att korrosion av kapseln orsakad av löst syre i grundvattnet undviks. Om kapselns integritet bryts är reducerande förhållanden avgörande för att säkerställa en låg upplösningshastighet för bränslematrisen, för att säkerställa gynnsamma lösligheter för flera radioaktiva grundämnen och även för att, för vissa grundämnen, säkerställa redoxtillstånd som är gynnsamma för sorption i bufferten, återfyllningen och berget.

Utöver löst O_2 kan andra oxiderande komponenter i grundvatten beaktas, exempelvis nitrat och sulfat. Dock kan nitrat och sulfat endast bli reaktiva om mikrober finns närvarande och reducerar dem. Detta kräver i sin tur att det finns både näringsämnen och reducerade substanser, såsom löst väte, metan eller organiska föreningar. Löst syre kan däremot reagera direkt, exempelvis med kopparkapseln eller med det använda bränslet.

Jonstyrka, salthalt

Grundvattnets salthalt får varken vara för hög eller för låg. Den totala laddningskoncentrationen av katjoner måste vara högre än 4 mM för att frigörelse av kolloider från buffert och återfyllning ska undvikas, vilket ger följande samband, se avsnitt 3.5.11 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:

$\Sigma q[M^{q+}]^{GW} > 4$ mM

Ett kriterium som baserar sig på laddningsekvivalenter i stället för på koncentrationen av specifika joniserade specier har fördelen att effekten av jonbytesjämvikten ryms i ett enda kriterium. Dessutom visar modellering /Neretnieks et al. 2009/ att koncentrationen av Ca^{2+} minskar i lakvattnet vid gränsytan mellan bentonit och grundvatten under det övergående jonbytesförloppet. Principen om laddningsneutralitet kräver emellertid att den ekvivalenta laddningskoncentrationen förblir konstant.

Grundvatten med höga jonstyrkor skulle kunna ha negativ påverkan på buffertens och återfyllningens egenskaper, i synnerhet på svälltrycket och den hydrauliska konduktiviteten i återfyllningen. I allmänhet utgör jonstyrkor motsvarande NaCl-koncentrationer av ungefär 35 g/l (0,6 M NaCl) en övre gräns för att upprätthålla återfyllningens egenskaper. Motsvarande gräns för bufferten är omkring 100 g/l (1,7 M NaCl). Gränsen för tillåten jonstyrka är emellertid i högsta grad beroende på materialegenskaperna för dessa komponenter (se avsnitt 5.5.3 och, för detaljer, /Karnland et al. 2006/).

Kolloidkoncentrationer

Koncentrationen av naturligt förekommande kolloider ska vara låg för att undvika att dessa bidrar till transporten av radionuklider. Kolloiders stabilitet minskar avsevärt om laddningskoncentrationen för katjoner överskrider några millimol per liter. Villkoret som diskuterats ovan för stabilitet för bufferten och återfyllningen ($\Sigma q[M^{q+}]^{GW} > 4$ mM) är därför även tillräckligt för att hålla koncentrationen av dispergerade kolloider i grundvatten på en låg nivå.

Koncentrationer av skadliga ämnen

När det gäller kapselkorrosion ska grundvattnets koncentrationer av andra korrosiva ämnen, i synnerhet sulfid (HS^-), vara låga. Dessutom ska grundvattnet ha låga koncentrationer av näringsämnen som kan användas av sulfatreducerande bakterier för produktion av sulfid. Dessa är löst väte, metan och organiskt kol. Tidigare utvärderingar visat att det för en intakt buffert skulle krävas betydligt högre halter av sulfid i grundvattnet för att orsaka problem än vad som någonsin observerats i svenska grundvatten. Den kvantitativa omfattningen av sådan korrosion beror också på grundvattenflödet kring deponeringshålet och på transportegenskaperna hos sprickor som skär hålet.

Dessutom är det önskvärt med låga grundvattenhalter av ämnen som äventyrar buffertens och återfyllningens långsiktiga stabilitet, i synnerhet kalium och järn, se avsnitt 3.5.10 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**.

pH

För pH kan ett kriterium formuleras med buffert- och återfyllningsstabilitet som utgångspunkt, se avsnitt 3.5.9 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:

$pH^{GW} < 11$

Detta är uppfyllt för alla naturliga grundvatten i Sverige. Byggnadsmaterial och materialspill i förvaret, i synnerhet betong, skulle dock lokalt kunna förorena grundvattnet så att höga pH-värden uppstår.

Undvika kloridkorrosion

Ytterligare ett krav är att kombinationen av låga pH-värden och höga kloridhalter ska undvikas för att utesluta kloridkorrosion av kapseln. Kravet uttrycks i följande kvantitativa kriterium:

$pH^{GW} > 4$ och $[Cl^-]^{GW} < 2$ M

Grunden för detta kriterium finns dokumenterad i avsnitt 3.5.4 i **Processrapporten för bränslet och kapseln**.

R2. Tillhandahålla gynnsamma hydrogeologiska och transportrelaterade förhållanden

För att berget ska kunna tillhandahålla gynnsamma hydrogeologiska och transportrelaterade förhållanden ska det flödesrelaterade transportmotståndet (F) i flödesvägar som leder in i och ut från förvaret vara tillräckligt högt. Begränsad transmissivitet för vattenförande sprickor i kombination med små gradienter resulterar i begränsade flöden och högt transportmotstånd i de vattenförande sprickorna.

Dessutom har geosfären en viktig funktion för att kontrollera transportmotståndet i gränsytan mellan berg och buffert. Denna egenskap beror på tre faktorer: i) diffusiva förhållanden i bufferten, ii) begränsat flöde i sprickor som skär deponeringshålet och iii) en gynnsam (begränsad) kontaktyta över vilken utbytet av lösta ämnen kan ske. De första två faktorerna uttrycks med hjälp av de säkerhetsfunktioner som är relaterade till transportförhållanden i bufferten och berget och som uttrycks ovan. Den tredje faktorn erhålls med i) en intakt buffert i nära kontakt med deponeringshålets vägg, vilket i sin tur uppnås med hjälp av buffertens svälltryck, och ii) en begränsad öppning i sprickorna som skär deponeringshålet. Den senare faktorn kan öka betydligt genom termisk spjälkning av deponeringshålets bergvägg. En lämplig indikator för den här säkerhetsfunktionen är den ekvivalenta flödeshastigheten, Q_{eq}, som är ett gemensamt mått på alla ovanstående faktorer.

Sammanfattningsvis krävs följande för att berget ska ha gynnsamma hydrogeologiska och transportrelaterade förhållanden:

a) Ett högt flödesrelaterat transportmotstånd, F, i flödesvägar (konnekterade sprickor) från markytan ner till förvaret och i flödesvägar som leder bort från förvaret.
b) Låg ekvivalent flödeshastighet i gränsytan mellan buffert och berg, Q_{eq}.

Det är inte möjligt att sätta kvantitativa gränser för någon av dessa indikatorer, utan de kräver integrerade analyser av platsspecifika hydrogeologiska förhållanden och hydrogeologisk utveckling. (Som tumregler kan F-värden högre än 10^4 år/m och Q_{eq}-värden lägre än 10^{-4} m^3/år betraktas som gynnsamma.)

R3. Tillhandahålla mekaniskt stabila förhållanden

Den mekaniska stabiliteten i berget kan i de flesta avseenden inte utvärderas på ett enkelt sätt. Dock kan två huvudorsaker till tänkbara mekaniska brott på kapslarna identifieras. Dessa är kollaps till följd av isostatisk last och kapselbrott till följd av jordskalv vilka orsakar sekundära rörelser hos sprickor som skär deponeringshål, se avsnitt 8.3.1. En starkt bidragande faktor bakom den första orsaken kan vara höga grundvattentryck av det slag som kan uppkomma under en glaciation.

Att hantera den senare typen av kapselbrott kräver en komplex utvärdering av skjuvrörelser för en rad olika mekaniska lastsituationer. För att utvärdera följderna av sådana rörelser har följande villkor för sekundära skjuvbelopp och skjuvhastigheter i sprickor vid deponeringshål fastställts med hjälp av konstruktionsförutsättningarna för kapseln och designanalysen av kapseln (se ovan):

$d_{shear} < 5$ cm

$v_{Shear} < 1$ m/s.

R4. Tillhandahålla gynnsamma termiska förhållanden

Utvärderingen av säkerheten förenklas om vattnet i förvarets olika komponenter inte fryser. Det är emellertid inte ett absolut krav att frysning inte får ske. Till exempel är frysning en del av den förväntade utvecklingen för grundvattnet ner till ett typiskt djup av 100–200 m under permafrostförhållanden. Då förväntas även förslutningen i tillfartsschaktet och i rampen frysa.

Temperaturen vid vilken grundvattnet fryser på förvarsdjup bestäms av grundvattnets sammansättning och det hydrostatiska trycket. Emellertid är grundvattenfrysning som sådan i allmänhet inte nödvändigtvis negativ för den långsiktiga säkerheten. Ett undantag rör fallet med långsiktig bufferterosion i sådan omfattning att ett vattenfyllt hålrum bildas i deponeringshålet. Frysning av vatten i ett sådant hålrum kan leda till att trycket på kapseln blir högre. Frystemperaturen är –0,3 °C för destillerat vatten vid ett hydrostatiskt tryck motsvarande ett förvarsdjup på 450 m.

Som nämnts i avsnitt 8.3.2 är kriteriet för säkerhetsfunktionsindikatorn avseende buffertfrysning –4 °C. Bergtemperaturen på förvarsdjup får därför inte falla under detta värde.

Dessutom utförs, som även nämns ovan, analyserna av den mekaniska påverkan från skjuvrörelser för materialegenskaper som gäller för temperaturer ner till 0 °C. Denna temperatur sätts därför som ett annat indikatorkriterium, som måste utvärderas i samband med analysen av följderna av sprickors skjuvrörelser.

Ytterligare överväganden

De övergripande säkerhetsfunktionerna för berget – som uttrycks som att de tillhandahåller gynnsamma kemiska, mekaniska, hydrologiska och termiska förhållanden – är allmänna till sin natur. Säkerhetsfunktionsindikatorerna och, i förekommande fall, indikatorkriterier har i stor utsträckning sitt ursprung i kapsel- eller buffertprocesser. Undantagna är de indikatorer som är relaterade till hydrogeologiska förhållanden och transport. Dessa härleds i stället ur bergets egenskaper.

En genomgång av geosfärsprocesserna förväntas därför inte ge upphov till fler säkerhetsfunktioner än de generella kategorier som redan identifierats eftersom alla geosfärsprocesser hör till någon av dessa kategorier, och även eftersom geosfärsprocesserna själva i allmänhet inte genererar indikatorer och indikatorkriterier. Detta blev också resultatet av en översiktlig granskning av geosfärsprocesserna.

Formulering av säkerhetsfunktioner som avser att förhindra framtida mänskliga handlingar (Future Human Actions, FHA) med skadliga effekter på berget, och i synnerhet intrång i förvaret, har övervägts. Egenskaper hos berget som är relaterade till sannolikheten för framtida mänskliga handlingar (tillgångar på mineraler eller termisk energi) och till ansträngningarna/resurserna som krävs för intrång i förvaret (djup, tätning) beaktas vid lokaliseringen och utformningen av förvaret. Dessa faktorer ändras dock inte över tid i den långsiktiga säkerhetsanalysen, och betraktas därför inte som lämpliga som grund för att formulera säkerhetsfunktioner. De har dock inkluderats i analysen av FHA-scenarier.

8.3.5 Sammanfattning av säkerhetsfunktioner relaterade till inneslutning

Säkerhetsfunktionen och tillhörande indikatorer och kriterier som härletts i föregående avsnitt sammanfattas i figur 8-2. I tabell 8-1 sammanfattas marginalerna för lämplig funktion hos kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till inneslutning. Se även avsnitt 8.2, underrubrik ”Hantering av marginaler”.

8.4 Säkerhetsfunktioner för fördröjning

Flera av de ovanstående säkerhetsfunktionerna och de tillhörande indikatorerna och kriterierna är endast relaterade till systemets inneslutande egenskaper. Detta är speciellt fallet för de tre kapselfunktionerna Can1–Can3.

Om kapselns integritet bryts blir flera andra fenomen och processer som rör frigörelsen och transporten av radionuklider, dvs som rör den fördröjande funktionen hos systemet, relevanta.

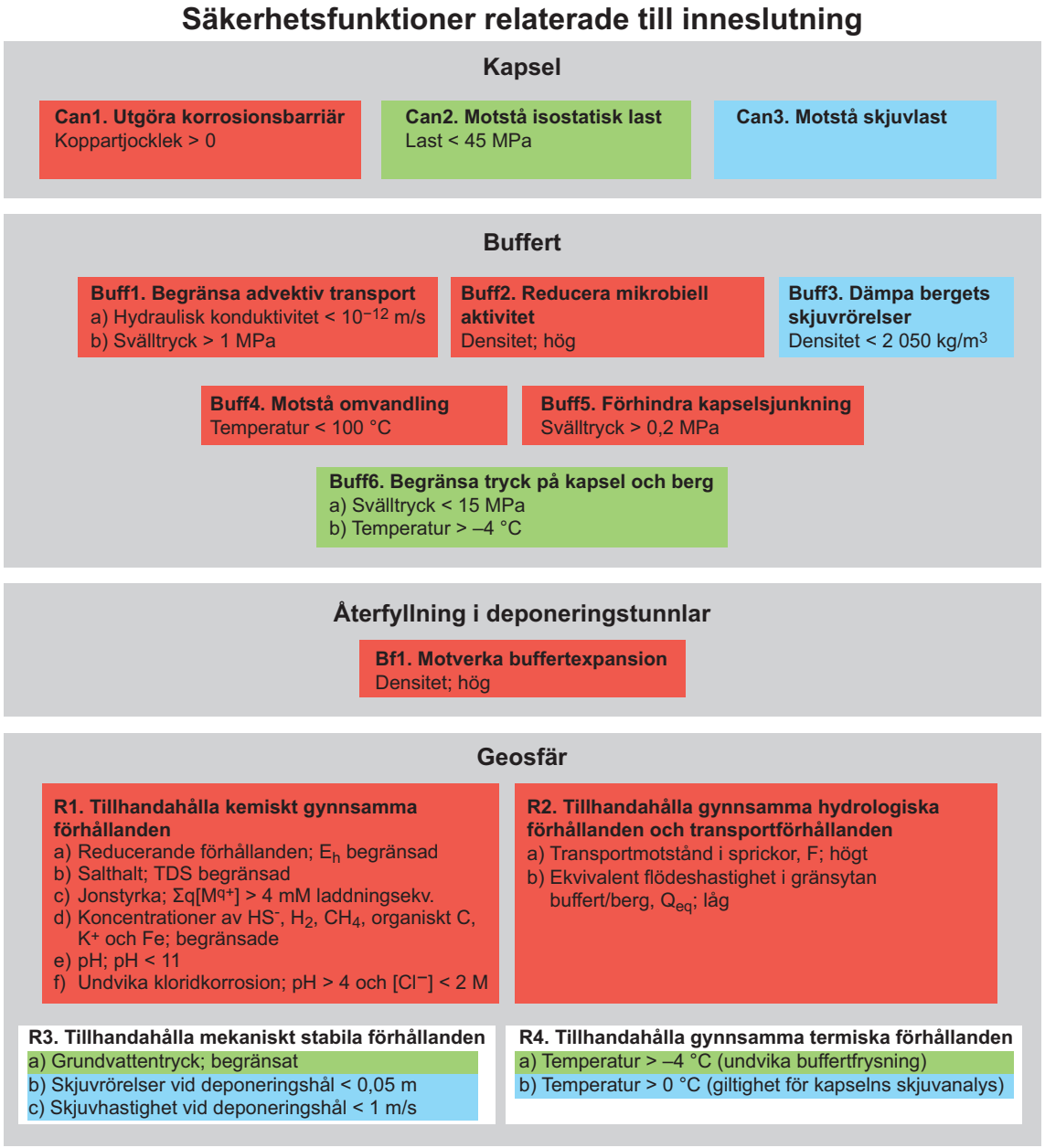
Om ett kapselbrott skulle inträffa begränsas och fördröjs utsläpp med hjälp av funktioner, funktionsindikatorer och – i förekommande fall – funktionsindikatorkriterier enligt nedanstående. Alla definierade storheter sammanfattas i figur 8-3 i slutet av detta avsnitt.

8.4.1 Bränsle

F1. Innesluta radionuklider

Bränslematrisen kan inte påverkas genom utformningen av förvaret. Inte desto mindre har bränsletyperna som ska deponeras en matrisstruktur som är mycket stabil i förvarsmiljön. Bränsletyperna fyller därför en viktig funktion genom att de innesluter radionuklider. Bränsleomvandlingshastigheten är en lämplig indikator för denna säkerhetsfunktion. Omvandlingshastigheten är lägre för reducerande förhållanden. Att tillhandahålla reducerande förhållanden är därför en säkerhetsfunktion hos berget också från fördröjningssynpunkt.

Även de strukturella metalldelarna hos bränsleelementen innehåller radionuklider. Korrosionshastigheten för dessa metaller är därför också en indikator för bränslets inneslutande förmåga.



Figur 8-2. *Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till inneslutning. Då kvantitativa kriterier inte kan ges används termer som ”stor”, ”liten” och ”begränsad” för att indikera gynnsamma värden på säkerhetsfunktionsindikatorerna. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner Can1 (rött), Can2 (grönt) och Can3 (blått).*

Tabell 8-1. Sammanfattning av marginaler för kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till inneslutning.

Indikator	Kriterium	Kommentarer om marginaler
Minsta koppartjocklek	0	Ingen marginal av uppenbara skäl.
Isostatisk last på kapsel	45 MPa	Kriterium från konstruktionsförutsättningar. Har i design-analys visats vara uppfyllt med en marginal som kan vara stor (upp till ungefär 100 MPa) för total kollaps. Se vidare i /Raiko et al. 2010/.
Skjuvning		
Skjuvavstånd i sprickor Högsta buffertdensitet Skjuvhastighet Lägsta temperatur	5 cm 2 050 kg/m^3 1 m/s 0 °C	Uppsättning kriterier från konstruktionsförutsättningar. Har i designanalys visats vara uppfyllda, men 5 cm skjuvning är utan marginal för beräknade fel för de mest ogynnsamma spricklokaliseringarna och vinklarna för den högsta buffert-densiteten. För buffertdensiteter erhållna vid utvärderingen av referensutformningen kan marginalen vara stor i många situationer, fastän dessa inte utvärderades fullständigt i designanalysen. Se vidare i /Raiko et al. 2010/.
Buffertens hydrauliska konduktivitet	10–12 m/s	Marginalen är relaterad till den hydrauliska gradienten och diffusiviteten för aktuella specier. Marginalen är stor.
Buffertens svälltryck	1 MPa	Då svälltrycket minskar ökar sannolikheten att det bildas flödesvägar i bufferten. Det finns en påverkan från den hydrauliska gradienten och möjligen av salthalten. Laboratorieprov visar på kanalbildning vid ~60 kPa, dvs marginalen till observerad felaktig funktion är stor.
Högsta bufferttemperatur	100 °C	Graden av mineralomvandlingar i bufferten är relaterad till både temperaturen och till varaktigheten av den termiska pulsen. Eftersom den termiska pulsens varaktighet är kort (i en geologisk tidsskala) är marginalen stor.
Buffertens högsta svälltryck (för begränsning av isostatisk last på kapsel)	15 MPa	Bidrar till isostatisk last på kapseln. Se ovan för diskussion om marginaler till gränsvärden för isostatisk last.
Buffertens frystemperatur	–4 °C	Fryspunkten för kompakterad bentonit är starkt beroende av densiteten. För lägsta tillåtna buffertdensitet är fryspunkten ca –4 °C. För normal buffertdensitet är fryspunkten lägre än –6 °C, vilket har visats både experimentellt och teoretiskt /Birgersson et al. 2010/. För ett givet temperaturfall under fryspunkten skulle bara en del av vattnet i bentoniten övergå till is. Detta medför att en eventuell tryckuppbyggnad sker gradvis med sjunkande temperatur och uppgår till mindre än 13,5 MPa/°C, vilket definierar fasgränsen mellan is och flytande vatten. Dessutom kommer fryspunkten för buffertens porvatten ytterligare att sänkas på grund av det hydrostatiska trycket på förvarsdjup och av i grundvattnet lösta salter.
Buffertens minsta svälltryck (för förhindrande av kapselsjunkning)	0,2 MPa	Modellering har utförts för svälltryck ned till 80 kPa, för vilket värde följderna av kapselsjunkning kan betraktas som acceptabla.
Grundvattnets jonstyrka (undvika bufferterosion)	$q[M^{q+}] > 4$ mM	Den experimentella marginalen för detta värde är en faktor två. Det kan också finnas andra faktorer som kan begränsa erosion.
Grundvattnets pH	< 11	Värdet är en praktisk gräns. Varaktigheten av förhållandena med förhöjt pH och massbalanser för involverade reaktioner måste utvärderas när följderna analyseras.
Grundvattnets pH och klorid-koncentration (för att undvika kloridkorrosion hos koppar)	pH > 4 och $[Cl^-]^{GW}$ < 2 M	Ingen marginal för initiering av kloridkorrosion, men mycket stor marginal till de förhållanden som någonsin förväntas i grundvatten på förvarsdjup i Forsmark.

F2. Utfällning

Många av de farligaste radionukliderna har begränsade lösligheter i förvarsmiljön vilket ger en viktig begränsning för radionuklidutsläpp från en otät kapsel. Lösligheterna för aktuella grundämnen är lämpliga indikatorer för denna säkerhetsfunktion.

Många lösligheter för grundämnen är lägre under reducerande förhållanden. Därför utgör tillhandahållande av reducerande förhållanden även i detta avseende en säkerhetsfunktion hos berget.

F3. Undvika kriticitet

Bränslets egenskaper och den geometriska placeringen i kapseln ska vara sådana att kriticitet undviks om vatten skulle tränga in i en otät kapsel. Det finns emellertid inget meningsfullt enkelt kriterium som kan användas för en sådan utvärdering. Kvalitativt ska bränslets reaktivitet vara låg och det är en konstruktionsförutsättning att den effektiva multiplikationsfaktorn (k_{eff}) för det inkapslade bränslet i en vattenfylld kapsel inte får överstiga 0,95, med hänsyn tagen också till osäkerheter.

Dessutom ska kapselinsatsen ha en gynnsam geometrisk utformning och materialsammansättning för att förhindra kriticitet. Detta återspeglas genom geometriska begränsningar för kapselutformningen och genom begränsningar av innehållet av kol och kisel i segjärnsinsatsen.

8.4.2 Kapsel

Can4. Tillhandahålla transportmotstånd

Efter ett kapselbrott måste vatten nå bränslet och radionuklider transporteras ut ur kapseln för att ett utsläpp ska ske. Typen av kapselbrott bestämmer om det finns kvarvarande fysiska hinder i kapseln för att transportera vatten och radionuklider. Fastän kapseln inte är utformad för att tillhandahålla sådant transportmotstånd kan den avsevärt begränsa utsläppshastigheten, åtminstone under en begränsad tidsperiod efter kapselbrott.

Fördröjningen efter kapselbrott till initiering av ett utsläpp (t_{delay}) och en tidsperiod för expansion av ett initialt brott i sådan utsträckning att alla transportmotstånd har gått förlorade (t_{large}) kan för vissa feltyper användas som indikatorer för denna säkerhetsfunktion.

Can5. Undvika bränslekriticitet

Som nämnts ovan ska kapselns geometriska utformning och materialsammansättning vara av sådan art att de bidrar till att förhindra kriticitet.

8.4.3 Buffert

Funktioner som är gemensamma med inneslutningsfunktioner

Bufferten har en viktig funktion även för fördröjning genom att den begränsar advektiv transport. Kriterierna för hydraulisk konduktivitet och svälltryck gäller alltså även för fördröjning. För att bibehålla sina gynnsamma egenskaper måste bufferten även motstå omvandling, för vilket det finns ett temperaturkriterium. Bufferten måste förhindra kapselsjunkning, som kan sätta dess funktion ur spel. Detta säkerställs genom ett kriterium för svälltryck. Se vidare avsnitt 8.3.2.

Buff7. Filtrera kolloider

Bufferten ska dessutom vara tillräckligt tät för att förhindra att kolloider transporteras genom den. Detta krav ställs på bufferten för att bränslekolloider inte ska kunna spridas från en defekt kapsel. Därigenom kommer utsläppen av flera av de mest betydelsefulla radionukliderna att begränsas av deras lösligheter. Detta krav har lett till följande kriterium, se avsnitt 3.5.4 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**:

$\rho_{Wet}^{Buff} > 1\,650$ kg/m^3

Buff8. Sorbera radionuklider

Begränsad advektion i bufferten, så att diffusion är den dominerande transportmekanismen, är av primär betydelse även för radionuklidtransport. Detta säkerställs genom samma säkerhetsfunktioner som för inneslutning. Därtill kan sorption av radionuklider i bufferten tillhandahålla en viktig begränsning av uttransport av radionuklider. I en intakt buffert begränsas vattenrörelse genom bufferten kraftigt genom den diffusionsdominerade transporten. I jämförelse med vatten fördröjs radionuklidtransporten ännu mer:

- Genom långsammare diffusion, vilken kan orsakas av en lägre diffusionskoefficient i fritt vatten, och genom elektrostatisk påverkan på porer som skenbart är tillgängliga för diffusion (anjon-exklusion).
- Genom växelverkan med lerytan, vilket leder till sorption (uttrycks som K_d).

De grundämnesspecifika effektiva diffusionskoefficienterna (D_e) och sorptionskoefficienterna (K_d) är lämpliga indikatorer för denna säkerhetsfunktion.

Buff9. Medge gasgenomströmning

Bufferten måste medge att gas, som produceras inuti en potentiellt defekt kapsel, kan komma ut. Gastransportegenskaperna är relaterade till buffertens svälltryck, där ett lägre svälltryck är en fördel. Kvantitativa gränser för en gynnsam buffertfunktion i detta avseende kan dock inte formuleras på detta stadium. En begränsning skulle vara relaterad till den potentiella skadan på förvaret på grund av trycket eller på grund av frigörelse av gas under övertryck. De buffertfrågor som är relaterade till gastransport hanteras vid analysen av utvecklingen hos en defekt kapsel i avsnitt 13.8.

8.4.4 Återfyllning i deponeringstunnlar

BF2. Begränsa advektiv transport

Återfyllningen bör inte bli en passage med lågt transportmotstånd för radionuklider. För att detta ska vara uppfyllt måste återfyllningen ha ett visst svälltryck för att säkerställa täthet och homogenitet och en begränsad hydraulisk konduktivitet. De kvantitativa kriterierna är följande:

$$P_{Swell}^{Backfill} > 0{,}1 \text{ MPa}$$

och

$$k^{Backfill} < 10^{-10} \text{ m/s}$$

Grunden för dessa kriterier finns dokumenterad i avsnitten 4.3.1 respektive 4.2.2 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen**.

Det finns även ett krav på att återfyllningen i deponeringstunnlarna inte får frysa. Liksom för bufferten beror den kritiska temperaturen på svälltrycket. Det erforderliga svälltrycket i återfyllningen är omkring 3 MPa enligt avsnitt 5.6.3. I avsnitt 4.1.2 i **Processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen** formuleras följande kriterium:

$$T^{Backfill} > -2 \text{ °C}$$

Detta baseras på rent vatten. Salthalten i Forsmark kan reducera frystemperaturen ytterligare. För återfyllning i deponeringstunnlar är detta krav primärt relaterat till fördröjningsfunktionen, eftersom i) frysning kan skada tunnelväggarna och därmed skapa nya transportvägar för radionuklider och ii) transportegenskaperna för en fryst och tinad återfyllning kan vara mindre gynnsamma än egenskaperna före frysning.

BF3. Sorbera radionuklider

Liksom för bufferten kan sorption av radionuklider i deponeringstunnelns återfyllning begränsa uttransporten av radionuklider. Sorptionskoefficienterna (K_d) är lämpliga indikatorer för denna säkerhetsfunktion.

8.4.5 Geosfär

Funktioner gemensamma med inneslutningsfunktioner

Geosfärens säkerhetsfunktioner för fördröjning är relaterade till gynnsamma i) kemiska förhållanden och ii) hydrologiska och transportrelaterade förhållanden. De flesta av de relevanta funktionerna och funktionsindikatorerna är desamma som för inneslutning:

- Ett viktigt kriterium relaterat till grundvattnets sammansättning är kriteriet för reducerande förhållanden, vilket i synnerhet har betydelse för att upprätthålla en stabil bränslematris och låga lösligheter. Därtill spelar indikatorer kopplade till jonstyrka en roll, huvudsakligen för att säkerställa gynnsamma förhållanden för fördröjning i bufferten.
- Vad gäller hydrologiska och transportrelaterade förhållanden är krav på höga transportmotstånd och låga ekvivalenta flödeshastigheter desamma som för motsvarande funktioner för inneslutning.

R2c. Diffusion och sorption i bergmatrisen

Diffusion och sorption i bergmatrisen ger viktiga bidrag till fördröjning av radionuklider i geosfären. De grundämnesspecifika effektiva diffusiviteterna (D_e) och sorptionskoefficienterna (K_d) är lämpliga funktionsindikatorer.

R2d. Låga kolloidkoncentrationer

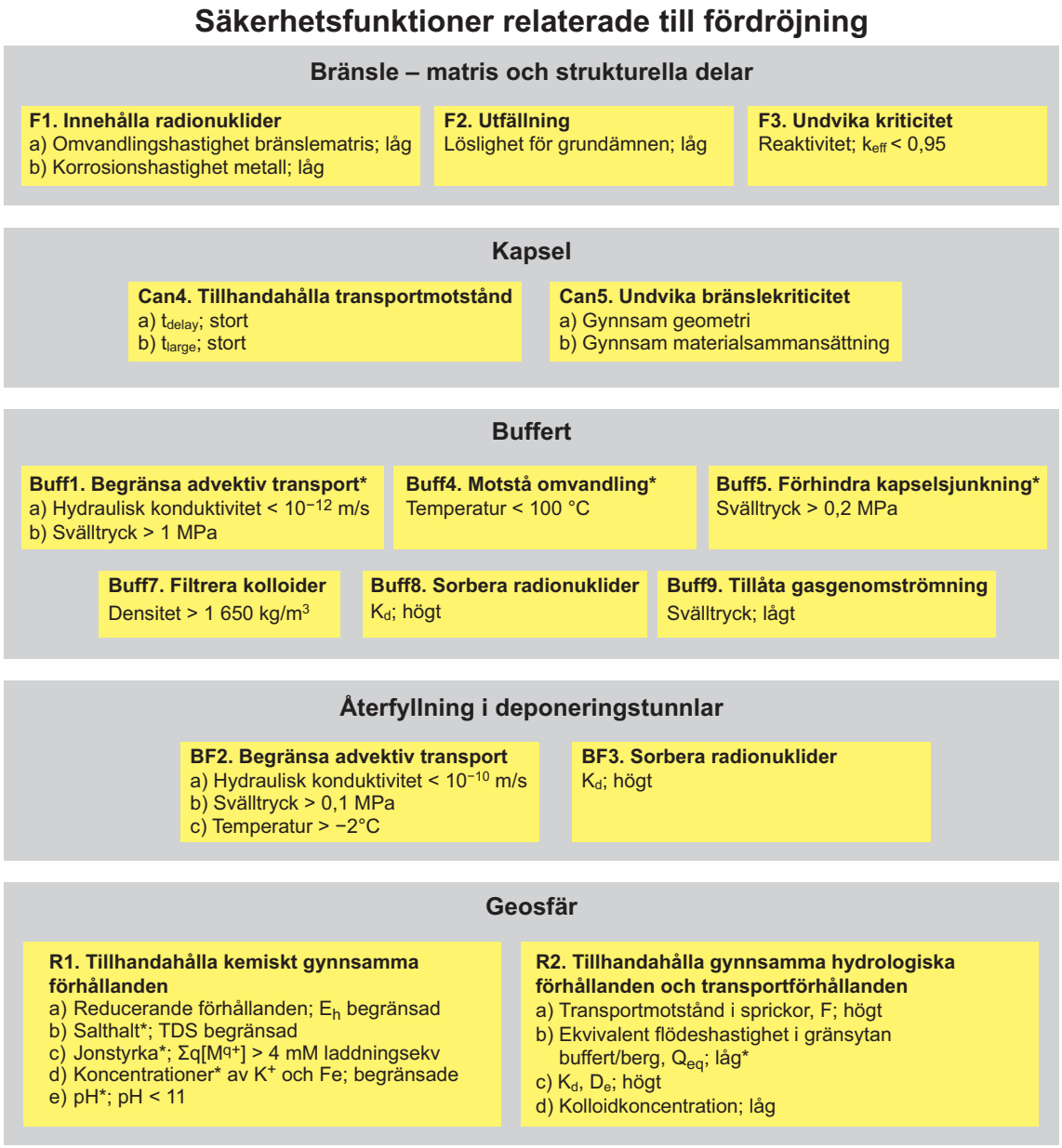
Kolloider som rör sig med vattenflödet i sprickor kan transportera radionuklider som är sorberade på kolloidytan. Det är därför gynnsamt med låga kolloidhalter.

8.4.6 Sammanfattning av säkerhetsfunktioner relaterade till fördröjning

Säkerhetsfunktionerna och tillhörande indikatorer och kriterier som härletts i föregående avsnitt sammanfattas i figur 8-3. I tabell 8-2 sammanfattas de marginaler utifrån vilka kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer för inneslutning har fastställts.

Tabell 8-2. Sammanfattning av marginaler för kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till fördröjning.

Indikator	Kriterium	Kommentarer om marginaler
Bränslets reaktivitet	$k_{eff} < 0,95$	Fastställda enligt principer som allmänt tillämpas för hantering av kärnbränsle, se vidare i **Bränslerapporten**.
Återfyllningens hydrauliska konduktivitet	$k < 10^{-10}$ m/s	Kriteriet har definierats för säkerställande av begränsad total transport (inte för att garantera diffusion). Marginalen beror till stor del av bergets egenskaper.
Återfyllningens svälltryck	$P_{sw} > 0,1$ MPa	Kanalbildning har iakttagits vid ~60kPa, men för gradienter som är mycket större än de som förväntas i förvaret.
Återfyllningens temperatur	> –2 °C	Enligt tabell 5-21 kommer den lägsta densiteten i ett tvärsnitt av återfyllningen att vara 1 458 kg/m^3. Enligt figur 5-19 skulle detta ge ett svälltryck på ~2,5 MPa och en kritisk temperatur på −2 °C.



Figur 8-3. *Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till fördröjning. När kvantitativa kriterier inte kan ges används termerna ”stor”, ”liten” och ”begränsad” för att indikera gynnsamma värden för säkerhetsfunktionsindikatorerna. Säkerhetsfunktioner markerade med asterisk (*) gäller även inneslutning, se figur 8-2.*

8.5 Faktorer som påverkar tidsutvecklingen för säkerhetsfunktionsindikatorer – FEP-diagram

Som tidigare nämnts bestäms den allmänna utvecklingen av förvarssystemet, och speciellt utvecklingen av säkerhetsfunktionsindikatorer, av systemets initialtillstånd, av flera kopplade interna processer och av yttre påverkan på systemet.

För säkerhetsanalysens ändamål är det önskvärt med en översikt av alla dessa faktorer och deras inbördes beroenden. Detta uppnås i SR-Site-analysen genom att ett FEP-diagram tas fram.

Ett FEP-diagram innehåller viktiga initialtillståndsegenskaper, viktiga processer, yttre påverkan, säkerhetsfunktionsindikatorer och sambanden mellan dessa.

Figur 8-4 visar ett FEP-diagram för ett KSB-3-förvar med faktorer som är viktiga för inneslutningen. Figuren visar initialtillståndsfaktorer (t ex den initiala koppartjockleken), processer (t ex korrosion), säkerhetsfunktionsindikatorer (t ex koppartjocklek över tid) och kriterier för säkerhetsfunktions-indikatorer (t ex tjocklek > 0). Streckade linjer indikerar påverkan som äger rum i händelse av att ett kriterium för säkerhetsfunktionsindikatorer inte är uppfyllt.

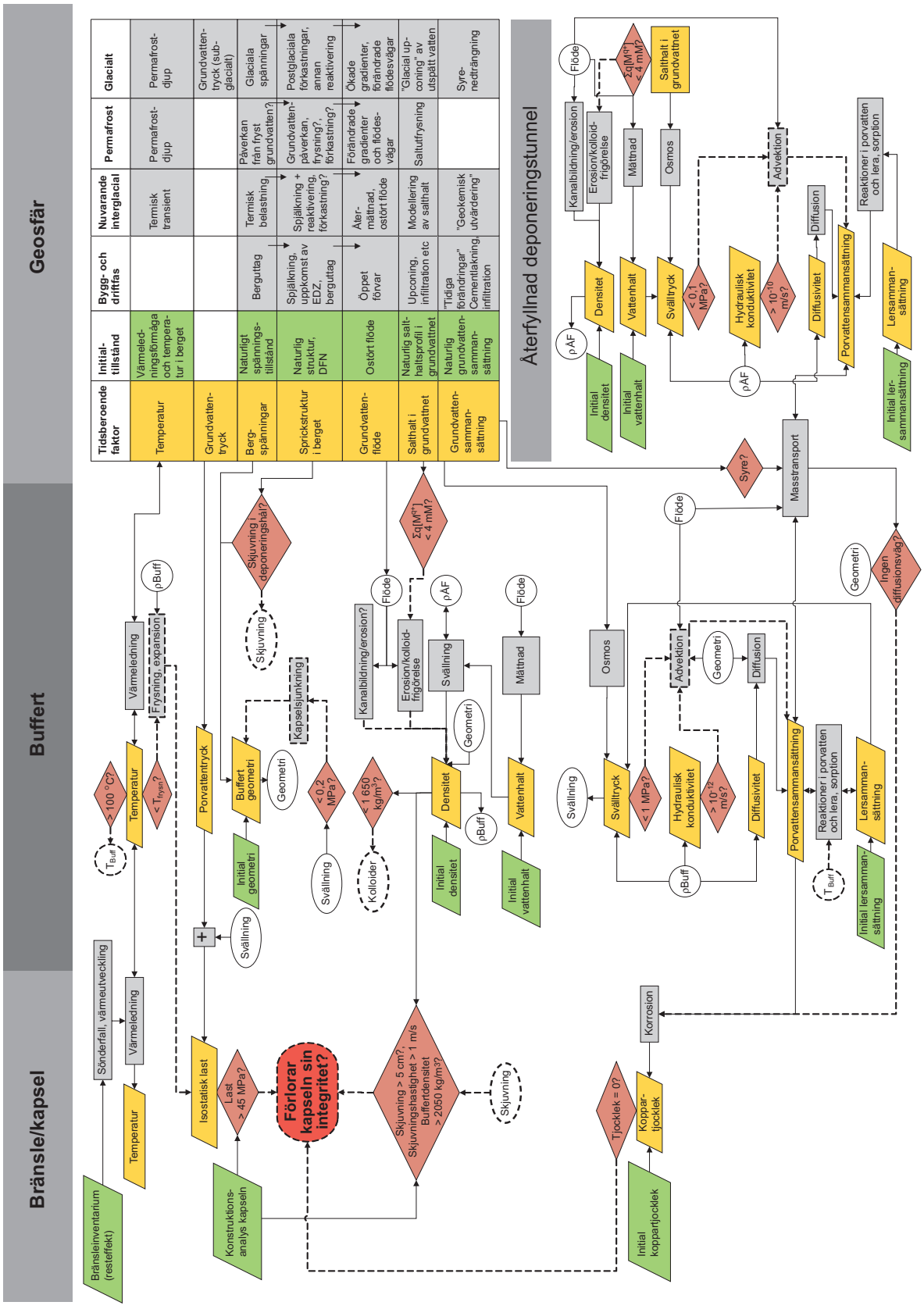
FEP-diagrammet innehåller följande komponenter.

- Alla variabler som definierats som inneslutningsrelaterade säkerhetsfunktionsindikatorer och deras kriterier, dvs de som anges i figur 8-2. I stället för att listas separat beskrivs alla variabler som uttrycker en komponent i grundvattnets sammansättning gemensamt som ”grundvatten-sammansättning” i FEP-diagrammet.
- Ytterligare variabler som behövs för att beskriva systemets utveckling och säkerhet, men som inte betraktas som säkerhetsfunktionsindikatorer, t ex porvattentrycket i bufferten.
- Alla identifierade bränsle-, kapsel-, buffert- och återfyllningsprocesser relaterade till inneslutning, förutom de som kan försummas enligt **Processrapporterna**. Vissa processer i processtabellen har dock slagits ihop till en enda process, vilket anges i de sista kolumnerna i processtabellerna, se tabellerna 7-2 till 7-5.
- Geosfärsprocesser och dito variabler som slagits ihop till ett begränsat antal fenomen som styr systemets utveckling. Hopslagningen beskrivs i processtabellen för geosfären, se tabell 7-6. Hopslagningen inkluderar även yttre påverkan på systemet genom indelning av geosfärsprocess-beskrivningar i sådana som kan appliceras vid klimattillstånden tempererat, permafrost och glacialt.
- Kopplingar och påverkan mellan variablerna och processerna.

FEP-diagrammet är användbart för att ge en översikt av alla betydelsefulla säkerhetsrelaterade faktorer, t ex vid valet (se kapitel 11) och analysen (se kapitel 12) av scenarier utgående från säkerhetsfunktionsindikatorer.

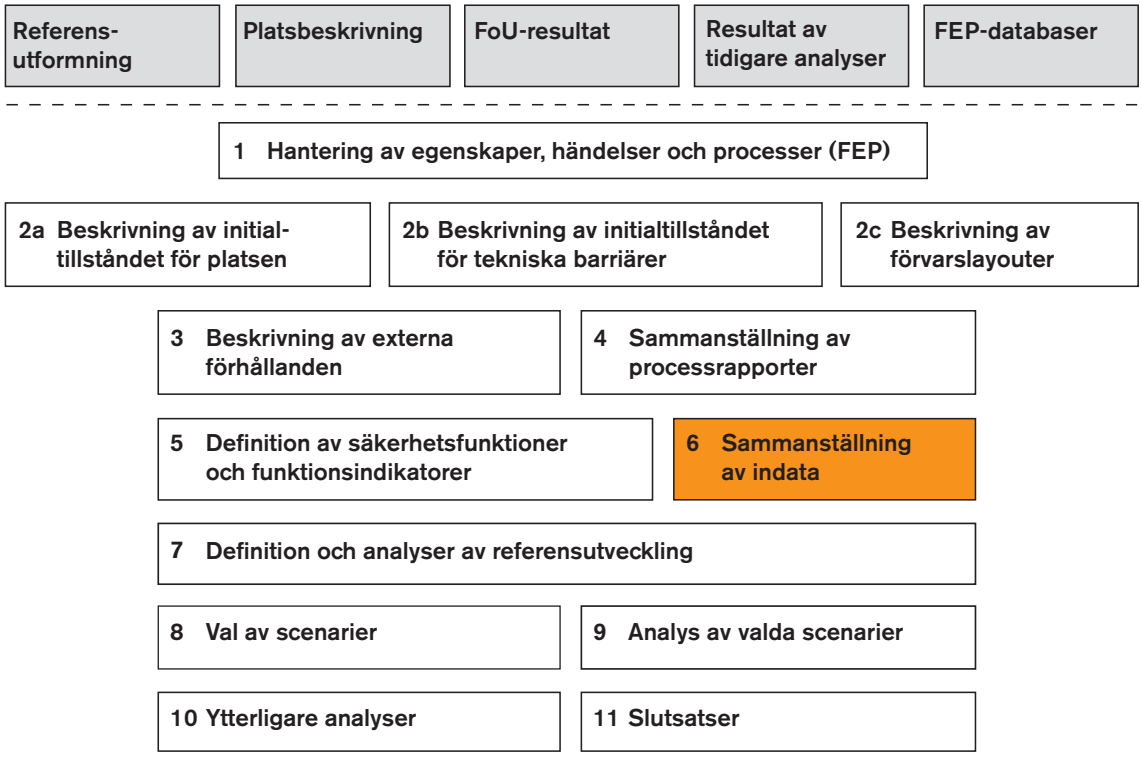
Biosfären är inte representerad i FEP-diagrammet, eftersom inga säkerhetsfunktioner är knutna till biosfären. Geosfären är inte lika detaljerad som de tekniska delarna av systemet, eftersom de flesta av kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer är relaterade till de tekniska delarna. Faktorer som endast hör till fördröjning har inte inkluderats. De flesta fördröjningsfaktorerna är emellertid viktiga också för inneslutning och är därför inkluderade indirekt.

Sammanfattningsvis ger FEP-diagrammet en översikt av förhållandet mellan initialtillståndsfaktorer, variabler, processer och säkerhetsfunktionsindikatorer. Diagrammet underlättar för en expert att analysera systemet kvalitativt och det används i kombination med andra källor för scenarieval och analys i SR-Site.



Figur 8-4. *FEP-diagram för SR-Site med faktorer som är relevanta för inneslutningsfunktionen. Färgmarkeringar:* ***Initialtillståndsfaktorer****,* ***Variabler****,* ***Processer****,* ***Säkerhetsfunktionsindikatorer****. Heldragna linjer: kontinuerlig påverkan. Streckade linjer: påverkan om en säkerhetsfunktionsindikator inte uppfylls. Cirklar: avbrutna linjer för påverkan (för att öka läsbarheten).*

9 Sammanställning av indata



Figur 9-1. *SR-Site-metoden i elva steg (se avsnitt 2.5) med det aktuella steget markerat.*

9.1 Inledning

Alla indata till säkerhetsanalysens kvantitativa delar är behäftade med osäkerheter. Kvaliteten på resultatet av varje beräkning i analysen beror – tillsammans med andra faktorer – dels på kvaliteten hos indata, dels på hur strikt osäkerheten hos dessa indata har hanterats. Därför krävs ett metodiskt tillvägagångssätt för att bestämma indata och deras tillhörande osäkerheter, samt för att därefter hantera dessa osäkerheter.

Mängden indataparametrar till säkerhetsanalysen är mycket stor. Vissa osäkerheter hos indata kommer i hög grad att påverka osäkerheten hos de utdata som har betydelse för säkerheten. Andra osäkerheter hos indata kommer knappast alls att påverka osäkerheten hos utdata. Ett exempel på det senare fallet är transportegenskaperna hos de radionuklider som aldrig ger något signifikant bidrag till den totala dosen. Det är därför lämpligt att identifiera de indata som i hög utsträckning påverkar resultatet och använda dessa insikter när resurser ska avsättas för att fastställa och, då så är möjligt, minska osäkerheterna. Det är även viktigt att ha stor tilltro till de data som används för slutsatsen att vissa nuklider aldrig kommer att bidra till dosen.

9.2 Syftet med Datarapporten för SR-Site

Syftet med **Datarapporten** är att sammanställa indata, med tillhörande osäkerhetsuppskattningar och för en stor mängd förhållanden, för de analyser och beräkningar som görs i SR-Site. För att identifiera källan till osäkerheterna har data utvärderats med hjälp av standardiserade metoder. Metoderna har anpassats med hänsyn till betydelsen hos dessa data. Målet har varit att identifiera orsaken till osäkerheterna. I rutinerna har indata från leverantörer särskiljts från de bedömningar som gjorts av analysgruppen.

9.2.1 Bakgrund

Från och med säkerhetsanalysen SR 97 har en standardiserad metod använts för att härleda indata till säkerhetsanalysen. Data som är relevanta för att beräkna frigörelse och transport av radionuklider presenterades i Datarapporten för SR 97 /Andersson 1999/. Denna rapport granskades av myndigheterna som en del av den allmänna granskningen av SR 97 /SKI/SSI 2001/. Efter SR 97 har både SKB /Hedin 2002a, 2003/ och myndigheterna /Wilmot och Galson 2000, Wilmot et al. 2000, Hora 2002, Hora och Jensen 2002/ genomfört studier som är relevanta för processen för att härleda data vid beräkningar i säkerhetsanalyser.

Resultaten av dessa studier och det allmänna utvecklingsarbete som utförts rapporterades och användes första gången i interimversionen av Datarapporten för SR-Can /SKB 2004a/. Rapporten visade hur metodiken för säkerhetsanalyser utvecklats sedan SR 97. Interimversionen av SR-Can följdes av SR-Can-analysen och Datarapporten för SR-Can /SKB 2006f/ som i mycket högre grad innehöll platsspecifika data. Även Datarapporten för SR-Can /SKB 2006f/ granskades av myndigheterna /Dverstorp och Strömberg 2008/. Den allmänna slutsatsen från den granskningen var att Datarapportens struktur och mallar utgör en lämplig grund för att tillhandahålla de data som behövs för analysen. Myndigheterna drog emellertid även slutsatsen att det inte gjordes någon klar åtskillnad mellan de data som ingick i Datarapporten och de data som rapporterades på annat sätt. Det var inte heller tillräckligt tydligt vilka åsikter som kom från de experter som levererat data och vilka som kom från SR-Can-gruppen. Myndigheterna identifierade dessutom fall där processen för att välja ut data inte var transparent och ansåg även att det var svårt att spåra hur data användes senare i analysen.

9.2.2 Instruktioner för att uppfylla syftet

Med utgångspunkt från myndigheternas granskning och andra rön har en särskild instruktion, *”Leverans av data till SR-Site Datarapport”*, tagits fram som en del av kvalitetssäkringsplanen för säkerhetsanalysen SR-Site. Instruktionen har skrivits med avsikt att underlätta en systematisk och spårbar kvalificering av data, där myndigheternas kommentarer har använts som grund för att förbättra metodiken.

9.3 Datainventarium

Representationen av processer som är relevanta för säkerheten i modeller, se avsnitt 7.4, ger en uppsättning modeller som används för att kvantifiera systemets utveckling. Till dessa hör modeller för radionuklidtransport och riskberäkningar. Datakraven för dessa modeller utgör i princip det indatainventarium som ska hanteras i säkerhetsanalysen. De olika parametrarnas betydelse varierar emellertid i hög grad. Av de data för samtliga hundratals indataparametrar som måste kvalitetssäkras, är bara en begränsad delmängd behäftad med en sådan osäkerhet att den blir kritisk för säkerhetsanalysen och således kräver en detaljerad kvantifiering. Dessa data har identifierats genom känslighetsanalyser av beräkningsresultat med hjälp av indata inom preliminära intervall, ofta från tidigare utvärderingar. Ett antal beräkningar har genomförts med avseende på både inneslutning och fördröjning. Beräkningsresultatens känslighet har sedan fastställts, med avseende på indataparametrarnas osäkerhet och naturliga variabilitet. Utvärderingar av beräkningsresultaten och känslighetsanalyser med avseende på det allmänna förloppet och radionukliddosen samt den därmed förknippade risken, som ges i SR-Can-projektet och därpå följande analyser, har använts för att kontinuerligt uppdatera listan med data som är i behov av rigorös kvalificering för SR-Site-analysen. Den slutgiltiga listan för SR-Site finns i **Datarapporten**.

I många fall består indata till SR-Site-modelleringen av sannolikhetsfördelningar. Erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser ger information om vilken del av fördelningen som bidrar mest till den radiologiska risken. Oftast är det den övre eller nedre änden av datafördelningarna som ger det största bidraget. Detta är till hjälp vid bestämningen av indata, eftersom analytikern då vet att så länge den relevanta änden beskrivs noggrant, är den detaljerade formen på den återstående fördelningen mindre viktig, eller till och med utan betydelse.

9.4 Instruktioner för leverans av data

En särskild instruktion, *”Leverans av data till SR-Site Datarapport”*, har tagits fram som en del av kvalitetssäkringsplanen för säkerhetsanalysen SR-Site, se avsnitt 2.9.

9.4.1 Leverantörer, kunder och Datarapportgruppen för SR-Site

Instruktionerna berör två parter, leverantörerna och kunden.

- Leverantörerna levererar kvalificerade data till **Datarapporten**. Leverantörerna utgörs av de grupper som tar fram data enligt rapporterna för de platsbeskrivande modellerna, **Produktionsrapporterna**, och andra underlagsdokument. Författaren som skriver text för **Datarapporten** å leverantörens vägnar benämns leverantörens representant. Leverantörens representanter ska representera respektive grupp och inte enbart förlita sig på sina egna åsikter.
- Kunden är – i vidare bemärkelse – SR-Site-gruppen, som ansvarar för att genomföra säkerhetsanalysen SR-Site. Hela gruppen är i allmänhet inte inblandad i alla ämnesområden, utan varje ämnesområde representeras av en grupp personer med särskild kunskap och speciellt ansvar. Författaren som skriver text för **Datarapporten** å SR-Site-gruppens vägnar benämns kundens representant. Kundens representanter ska representera SR-Site-gruppen och inte enbart förlita sig på sina egna åsikter.

En Datarapportgrupp, som är en del av SR-Site-gruppen, administrerar **Datarapporten** och skriver den allmänna text i **Datarapporten** som inte berör specifika data. En lista över de personer som är representanter för leverantör och kund, samt medlemmar av Datarapportgruppen och SR-Site-gruppen med ansvar för olika ämnesområden har tagits fram, se avsnitt 2.9.4. Kunden, leverantören och/eller Datarapportgruppen kan i vissa fall representeras av en och samma person. Om så är fallet, har åtgärder vidtagits för att involvera de grupper de representerar, eller andra experter, vid hanteringen av texten.

9.4.2 Användning av instruktionen

Sedan kund- och leverantörsrepresentanterna för ett visst avsnitt av **Datarapporten** identifierats och accepterat sina uppgifter, presenteras vanligtvis instruktionerna för det specifika avsnittet vid ett möte mellan representanterna för leverantören och kunden samt en medlem av Datarapportgruppen. Det aktuella avsnittet och tillhörande data utarbetas sedan i flera steg:

- Kunden skriver enligt instruktionerna de avsnitt som beskriver uppgiften och erfarenheterna från SR-Can etc.
- Sedan de godkänts av Datarapportgruppen skickas dessa avsnitt till leverantören, som därefter enligt instruktionerna förväntas bidra med den text som avser data samt deras variabilitet och osäkerhet.
- Dessa steg kan upprepas flera gånger.
- Slutligen har delar av SR-Site-gruppen och leverantören ett möte för att diskutera leveransen för hela ämnesområdet. Detta möte, vid vilket ett formellt protokoll upprättas, benämns Datakvalificeringsmöte. Vid mötet fattas ett formellt beslut om vilka data som rekommenderas för användning vid modelleringen i säkerhetsanalysen SR-Site. Mötet kan även ge upphov till granskningskommentarer, som ska hanteras av leverantören eller av kunden.

9.5 Kvalificering av indata

Data som har nära samband inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Site kategoriseras som tillhörande ett av många olika ämnesområden. För varje ämnesområde omfattar datakvalificeringsprocessen flera steg som resulterar i en text med en standarddisposition. Enligt instruktionerna skrivs vissa av avsnitten i dessa steg av kunden, medan andra skrivs av leverantören. Stegen beskrivs kortfattat nedan. Mer information finns i **Datarapporten** för SR-Site. Dessa steg har tillämpats konsekvent vid kvalificeringen av indata till SR-Site.

Modellering i SR-Site

I detta avsnitt definierar *kunden* vilka data som efterfrågas från leverantören och ger en kort förklaring av hur data för ämnesområdet används i SR-Site. Informationen har till uppgift att noggrant definiera indata och förklara i vilket sammanhang dessa data kommer att användas. Ett formellt motiv till varför dessa modeller används vid utvärderingen ges i **Modellrapporten**.

Erfarenheter från SR-Can

I detta avsnitt ger *kunden* en kort sammanfattning av hur data för ämnesområdet användes i SR-Can. Erfarenheterna från SR-Can förväntas fungera som ett av underlagen för att definiera de indata som krävs vid modelleringen i SR-Site. Observera att det i stort sett har varit samma grupper som ansvarar för säkerhetsanalyserna SR-Site och SR-Can. Överföringen av erfarenheterna från SR-Can till SR-Site innebär således ingen större arbetsbörda. Sammanfattningen av hur data användes i SR-Can ska följa dispositionen nedan:

- modellering i SR-Can,
- förhållanden under vilka data användes i SR-Can,
- känslighet för analysresultaten i SR-Can,
- alternativ modellering i SR-Can,
- korrelationer som användes vid modelleringen i SR-Can,
- identifierade begränsningar för de data som användes vid modelleringen i SR-Can.

En mer detaljerad vägledning om vad sammanfattningen ska innehålla avseende var och en av dessa punkter finns i instruktionerna.

Leverantörens kommentarer till dataanvändning i SR-Site och SR-Can

I detta avsnitt har *leverantören* tillfälle att kommentera de två avsnitten ovan. Leverantören ska fokusera på att hjälpa SR-Site-gruppen att välja ett lämpligt tillvägagångssätt för modelleringen och undvika att upprepa fel och sprida missuppfattningar från SR-Can eller från tidigare säkerhetsanalyser. Även om en viss person har rollen både som leverantör och som kund, kan han eller hon ändå kommentera användningen av data i SR-Site och SR-Can.

Informationskällor och dokumentation av datakvalificeringen

Detta avsnitt, som skrivs av *leverantören*, ägnas åt att redovisa de viktigaste källorna för data, liksom att kategorisera olika datauppsättningar utgående från deras spårbarhet och transparens. Datakällor kan bestå av SKB-rapporter, SKB-databaser och offentlig information. Även interna SKB-dokument kan vara viktiga för kvalificeringen av data. En korrekt hänvisning till alla underliggande dokument ska göras genomgående i **Datarapporten**.

Leverantören ska kategorisera data antingen som kvalificerade data eller som stödjande data. Kvalificerade data har tagits fram inom och/eller i enlighet med det aktuella ramverket för datakvalificering, medan stödjande data har tagits fram utanför och/eller utan att följa detta ramverk. Data kan även kategoriseras som stödjande om de inte är helt representativa för förvarsplatsen i Forsmark eller för KBS-3-förvaret. Data som hämtas från litteratur som granskats av sakkunniga (peer review) intar en särskild ställning, eftersom dessa kan betraktas som kvalificerade även om de tagits fram utanför SKB:s ramverk för datakvalificering. Sådana data kategoriseras emellertid inte med säkerhet som kvalificerade, eftersom de möjligen inte är representativa eller har brister i något annat avseende. Data som nyligen tagits fram av SKB, till exempel vid platsundersökningarna, ska *a priori* betraktas som kvalificerade. Innan data formellt kategoriseras som kvalificerade måste emellertid en mängd överväganden göras. Detta beskrivs i detalj i instruktionerna. Data som tas fram utanför ramarna för datakvalificering ska *a priori* betraktas som stödjande data.

Förhållanden som levererade data representerar

Data för de olika ämnesområdena påverkas i allmänhet av olika förhållanden. Med förhållanden avses initiala förhållanden, randvillkor, barriärernas tillstånd och andra omständigheter som eventuellt kan påverka de data som ska uppskattas. Under processen för att kvalificera de data som senare används vid säkerhetsanalysen, är det viktigt att redovisa de förhållanden under vilka data samlades in samt att jämföra dessa förhållanden med dem som är intressanta för säkerhetsanalysen. *Leverantören* tillhandahåller denna information.

Konceptuell osäkerhet

Leverantören redovisar här den konceptuella osäkerheten hos ämnesområdets data. Två typer av konceptuell osäkerhet ska behandlas. Den första avser hur väl data och de modeller som de används i representerar den fysiska verkligheten, medan den andra avser den konceptuella osäkerhet som införs under insamlingen, tolkningen och förädlingen av data.

Dataosäkerhet kopplat till noggrannhet, systematisk avvikelse och representativitet

Leverantören diskuterar här dataosäkerheten i form av noggrannhet, systematisk avvikelse (bias) och representativitet. Sådan osäkerhet kan uppstå både vid insamlingen av data, till exempel vid platsundersökningarna, och vid den efterföljande förädlingen av data, till exempel vid den platsbeskrivande modelleringen. Denna dataosäkerhet innefattar varken konceptuell osäkerhet eller naturlig variabilitet.

Rumslig och tidsmässig variabilitet

Leverantören behandlar här rumslig och tidsmässig variabilitet hos insamlade data. Den naturliga variabiliteten ska i så hög grad som möjligt särskiljas från dataosäkerheten, vilken behandlas i avsnittet ovan.

Korrelationer

För att probabilistiska indata ska hanteras korrekt krävs att all korrelation och alla funktionella beroenden mellan dessa data identifieras och kvantifieras. I förekommande fall beskrivs de av *leverantören*. Under det omfattande arbetet med FEP-databasen och **Processrapporterna** har emellertid de flesta korrelationerna och funktionella beroendena mellan olika parametrar identifierats. Där så är lämpligt har dessa korrelationer och funktionella beroenden vanligtvis även implementerats i säkerhetsanalysens modeller. Korrelationer och funktionella beroenden kan även ha använts vid insamling, tolkning och förädling av data. Till exempel har data för fördelningskoefficienter för sorption inte samlats in för alla relevanta radionuklider. För de specier för vilka observationer saknas, kommer den levererade fördelningskoefficienten för sorption att ha uppskattats utifrån data som erhållits för en eller flera liknande specier.

Resultat av leverantörens datakvalificering

I detta avsnitt presenterar *leverantören* data som anses lämpliga som utgångspunkt för urval av indata som ska användas i SR-Site. En fullständig redovisning ska ske av den allmänna processen för datareduktion, för att utvärdera olika datauppsättningar och till slut välja ut rekommenderade data för leverans till SR-Site-gruppen. Instruktionerna är i huvudsak som följer:

- Om kvalificering av data redan har utförts och redovisats i stödjande dokument räcker det att ge en kort sammanfattning av processen för urval av levererade data. I andra fall kan de data som redovisas i stödjande dokument behöva tolkas om och förfinas ytterligare mot bakgrund av dessa instruktioner och/eller annan information. Om så är fallet ska processen för omtolkning och förädling av data dokumenteras i sin helhet.
- De datauppsättningar som leverantörens representant rekommenderar SR-Site-gruppen att använda ska presenteras i form av punktvärden, sannolikhetsfördelningar, medel- eller medianvärden med standardavvikelser, percentiler och/eller intervall, eller annan lämplig form.
- Om ingen sannolikhetsfördelning kan levereras men befintliga data har en stor variabilitet och/eller osäkerhet, kan datafördelningen i stället redovisas som ett intervall. Intervallets innebörd måste emellertid beskrivas, till exempel om det representerar samtliga möjliga värden, samtliga ”realistiskt möjliga” värden eller bara de mest sannolika värdena.
- Observera att i många fall måste i något skede numeriska data tillskrivas sannolikhetsfördelningar för att utgöra indata till en probabilistisk modellering i säkerhetsanalysen. Om leverantören inte kan leverera en definierad fördelning, utan till exempel levererar en bästa uppskattning, ett övre samt ett nedre gränsvärde för data, kan det bli SR-Site-gruppens uppgift att omvandla sådan information till sannolikhetsfördelningar. Detta kan vara motiverat eftersom SR-Site-gruppen kan ha en bättre förståelse för hur formen på de uppskattade fördelningarna – och särskilt deras ändområden – påverkar modelleringsresultaten. SR-Site-gruppen kan även i vissa fall ha en bättre förståelse för statistiken bakom den föreslagna fördelningen.

- Om det är omöjligt att uttrycka osäkerheten på annat sätt än genom ett urval av alternativa datauppsättningar eller genom pessimistiska antaganden, är detta tillåtet om leverantören tydligt dokumenterar detta tillsammans med ett motiv till varför detta tillvägagångssätt använts.
- Om de inte publiceras på annat ställe måste de numeriska värden som hänför sig till de individuella datauppsättningarna och/eller datapunkterna lagras i en databas.

Mer information finns i instruktionerna.

SR-Site-gruppens bedömningar

I detta avsnitt dokumenterar *kunden* genomgången av data från leverantören och gör en bedömning av datakvalificeringen. Denna text ska skrivas i nära samarbete med personer i SR-Site-gruppen som har särskild kunskap och speciellt ansvar. Om olösta frågor kvarstår bestämmer SR-Site-gruppen den slutliga formuleringen.

I de fall då SR-Site-gruppen måste föreslå sannolikhetsfördelningar baserade på data som levererats i tidigare avsnitt ges motivet till detta här. Typiska val är om man ska föreslå en fördelning i logaritmisk skala eller i otransformerad skala, om man ska använda en trunkerad eller icke-trunkerad fördelning och vilken form fördelningen ska ha. Basen, formen och trunkeringen av fördelningen kan påverka såväl den beräknade risken som extremvärdenas inflytande över analysresultatet. Därför är det viktigt att iaktta försiktighet vid valet av fördelning. För kritiska data, där valet av fördelning påverkar analysresultatet i stor utsträckning, kommuniceras den valda fördelningen med de personer som ska utföra den efterföljande modelleringen, med SR-Site-gruppen och med leverantörernas experter.

Data som rekommenderas för SR-Site-modelleringen

Baserat på all tillgänglig information, men även på behoven för SR-Site-modelleringen, har SR-Site-gruppen gjort ett slutligt val av data. Många gånger består valet av väldefinierade sannolikhetsfördelningar, inklusive naturlig variabilitet, dataosäkerhet och annan osäkerhet. I vissa fall kan punktvärden väljas om spridningen i data är liten. Valet ska vara fullständigt dokumenterat och resulterande data ska vara presenterade i tabellform. Där så krävs, ska även riktlinjer ges för hur utvalda data bör användas i den efterföljande modelleringen. Motiveringar och riktlinjer bör hållas korta, så att detta avsnitt huvudsakligen består av data i tabellform som lätt kan extraheras vid modelleringen av säkerhetsanalysen SR-Site.

Under den slutgiltiga urvalsprocessen av data har leverantören konsulterats ytterligare en gång vid ett *datakvalificeringsmöte*. Vid detta möte har det formella beslutet fattats om vilka data som rekommenderas för användning i SR-Site-modelleringen och mötet har protokollförts som en del av SKB:s kvalitetssäkringssystem. Det formella beslutet har godkänts av representanterna för leverantörsgruppen och för SR-Site-gruppen.

9.6 Slutlig kontroll av data som används vid beräkningar och modellering för SR-Site

Levererade, kvalitetssäkrade indata måste även användas på korrekt sätt vid modelleringen. Vanliga fel som kan förekomma då data används är att i) det inte är den slutliga versionen av datauppsättningen som används, ii) fel och felskrivningar görs då data matas in i programkoden och iii) en felaktig datauppsättning används (till exempel en grundvattensammansättning för tempererade förhållanden i stället för en för permafrostförhållanden).

Sedan **Datarapporten** färdigställts är det modellörens uppgift att kontrollera att de slutgiltiga datauppsättningarna använts. Vid detta arbete kontrollerar modellören även att det inte förekommer några felaktigheter eller felskrivningar från inmatningen av data till koden. En särskild instruktion, *”Slutlig kontroll av data som används vid beräkningar och modellering för SR-Site”*, har tagits fram som en del av kvalitetssäkringsplanen för säkerhetsanalysen SR-Site.