

September 2019



Fud-program 2019

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1104-8395

ID 1873202

September 2019

Fud-program 2019

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

Svensk Kärnbränslehantering AB

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

© 2019 Svensk Kärnbränslehantering AB

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken har till uppgift att ta hand om kärnavfallet och det använda kärnbränslet från kärnkraftsreaktorerna. Enligt kärntekniklagen ska tillståndshavarna till reaktorerna vart tredje år upprätta ett allsidigt program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Tillståndshavarna har genom avtal delegerat till SKB att utarbeta dessa Fud-program och lämna in dem till Strålsäkerhetsmyndigheten. Här presenterar SKB Fud-program 2019 som tagits fram i samverkan med kärnkraftsföretagen.

När Fud-program 2019 överlämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten pågår granskning av tillståndsansökan avseende en utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, hos myndigheten, samt huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen. SKB:s ansökningar om tillstånd att få bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark och en inkapslingsanläggning i Oskarhamn var föremål för huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen hösten 2017 och i januari 2018 överlämnade såväl domstolen som Strålsäkerhetsmyndigheten sina yttranden över ansökningarna till regeringen. Under våren 2019 lämnade SKB in de kompletterande underlag till regeringen som domstolen efterfrågade i sitt yttrande. För att undvika dubbel redovisning görs i föreliggande Fud-program, vid behov, hänvisningar till ansökningar eller andra redovisningar som lämnats till regeringen, Strålsäkerhetsmyndigheten och Mark- och miljödomstolen.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, är det förvar som kommer att tas i drift sist. I detta Fud-program redovisas en utvärdering av säkerheten efter förslutning för det föreslagna förvarskonceptet. Utvärderingen ger underlag för den fortsatta utvecklingen av SFL avseende både lokalisering och utformning av barriärer. I programmet presenteras också lokaliseringsfaktorer och en stegvis lokaliseringsprocess för SFL.

Sedan redovisningen av Fud-program 2016 har två reaktorer ställts av. Nu pågår avveckling av fyra reaktorer och inom en snar framtid kommer ytterligare två reaktorer att ställas av och avvecklas. I Fud-programmet redogörs för hanteringen av mycket lågaktivt kärnavfall, som uppkommer i samband med avveckling och rivning. En övergripande beskrivning av kapaciteten i SKB:s transport-system redovisas också.

Detta Fud-program har i stort sett samma struktur som Fud-program 2016 och förutom de tillkommande avsnitt som kort redogjorts för ovan finns också ett avsnitt som särskilt uppmärksammar hur kompetensförsörjning ska säkras på lång sikt. Eftersom SKB:s verksamhet kommer att pågå i ytterligare cirka 70 år innan uppdraget att omhänderta radioaktivt avfall och använt kärnbränsle är slutfört är kompetensförsörjning en strategiskt viktig fråga.

SKB:s organisation har under året anpassats för att säkert och effektivt kunna projektera och uppföra anläggningarna i KBS-3-systemet samt det utbyggda SFR under det förestående decenniet. Forskning och utveckling kommer att bedrivas i den omfattning som behövs för att avfallsprogrammet i sin helhet ska uppfylla krav på säkerhet efter förslutning, strålskydd under driften av anläggningarna samt begränsad påverkan på yttre miljö.

Stockholm i september 2019
Svensk Kärnbränslehantering AB



Eva Halldén
Vd



Ella Ekeröth
Beställare Fud-program 2019

Sammanfattning

Den svenska kraftindustrin har under drygt 50 år producerat elektricitet med kärnkraft. Enligt kärntekniklagen ska de som har tillstånd till kärnteknisk verksamhet svara för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle som uppkommer i verksamheten. De ska även svara för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för detta. I detta Fud-program 2019 presenterar tillståndshavarna för de svenska kärnkraftsreaktorerna och Svensk Kärnbränslehantering (SKB), som på uppdrag av sina ägare svarar för hantering och slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet, sina planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2020–2025. Programmet består av tre delar:

- Del I Verksamhet och handlingsplan.
- Del II Avfall och slutförvaring.
- Del III Utveckling av kärntekniska anläggningar.

Del I Verksamhet och handlingsplan

I del I Verksamhet och handlingsplan beskrivs verksamheten och handlingsplanen för att ta hand om och slutförvara använt kärnbränsle och kärnavfall från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Där ges också motiv till den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta nya anläggningar i drift. De anläggningar som är i drift i dag är Mellanlagret för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), lokala markförvar vid kärnkraftverken samt fartyget m/s Sigrid.

För slutförvarssystemet för det använda kärnbränslet, KBS-3-systemet, återstår att bygga och driftsätta en ny anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet i anslutning till Clab och ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, samt att utveckla och tillverka behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle.

För omhändertagande av låg- och medelaktivt kärnavfall behöver SFR byggas ut. Ytterligare ett slutförvar, Slutförvaret för långlivat avfall (SFL), ska uppföras och tas i drift och behållare för transporter av långlivat avfall anskaffas. Vidare behöver kärnkraftverkens avfallshantering anpassas så att avvecklingen av reaktorer kan genomföras enligt plan. Där ingår även att bygga nya och bygga ut befintliga markförvar för att ta hand om mycket lågaktivt avfall.

Reaktorernas drifttider är en viktig faktor för planeringen av kärnavfallsprogrammet. Efter beslut 2015 har nu Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 ställts av, medan för Ringhals 1 och Ringhals 2 pågår planering för avställning 2020 respektive 2019. För övriga sex reaktorer är den planerade drifttiden 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4. De yngsta reaktorerna, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, kommer därmed att vara i drift till 2045 enligt den planering som reaktorinnehavarna har i dag.

Plan för genomförande

Uppförande och drifttagning av nya kärntekniska anläggningar utgår från en stegvis beslutsprocess som har sin grund i kärntekniklagen och SSM:s föreskrifter. Förfarandet innebär bland annat att alltmer detaljerade säkerhetsredovisningar successivt ska lämnas till SSM.

- Först ska ansökningar om tillstånd enligt kärntekniklagen och tillåtlighet enligt miljöbalken att få bygga, inneha och driva en ny kärnteknisk anläggning lämnas till SSM respektive Mark- och miljödomstolen.
- För att påbörja uppförande av en kärnteknisk anläggning måste en ansökan om detta lämnas till SSM för godkännande.
- Inför provdrift respektive rutinmässig drift behöver förnyad respektive kompletterad säkerhetsredovisning lämnas till och godkännas av SSM.

Inför Fud-program 2019 pågår två tillståndsärenden i Mark- och miljödomstolen och hos Strålsäkerhetsmyndigheten, ett för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle (SKB inväntar regeringsbeslut för inkapslingsdelen och Kärnbränsleförvaret) och ett för utbyggnaden av SFR för drift- och rivningsavfall. Under tillståndsprövningen finns osäkerheter i tidsplanerna för dessa anläggningar, men inte desto mindre finns genomarbetade planer utifrån aktuella förutsättningar.

Planerna för den nya anläggningsdelen för inkapsling i anslutning till Clab är att uppförandet inleds cirka 2024. När det gäller Kärnbränsleförvaret är byggstart planerad till 2022. Båda anläggningarna planeras kunna tas i drift 2031.

Det använda kärnbränslet mellanlagras i dag i Clab. SKB har tillstånd att lagra 8 000 ton använt kärnbränsle, vilket enligt dagens prognoser kommer att nås vid årsskiftet 2023/2024. SKB har därför, som en del av ansökan om att uppföra och driva inkapslingsdelen vid Clab, även ansökt om att öka mellanlagringskapaciteten till 11 000 ton.

Enligt SKB:s nuvarande planering kan utbyggnaden av SFR starta under 2023 och driften kan inledas 2029. Arbetet med att nedmontera och riva de sju reaktorer som ställs av först startar innan det utbyggda SFR är i drift. Detta medför att det kortlivade rivningsavfallet behöver mellanlagras. Även under perioden då utbyggnaden pågår finns behov av att mellanlagra kortlivat driftavfall.

SFL är det slutförvar som är planerat att tas i drift sist. Fram till drifttagning finns det flera viktiga milstolpar som ska passeras: val av plats, analys av säkerheten efter förslutning, framtagning av ansökningar och uppförande. SKB planerar att lämna in tillståndsansökningar om att få uppföra, inneha och driva SFL 2030 för att förvaret ska kunna tas i drift omkring 2045.

Forskning och utveckling

SKB:s och tillståndshavarnas planering av framtida forsknings- och utvecklingsinsatser för slutförvaren utgår från handlingsplanen där den stegvisa beslutsprocessen utgör grund för viktiga milstolpar. De milstolpar som är kopplade till beslutsstegen i form av ansökningar och säkerhetsredovisningar styr när kunskap och utveckling av teknik behöver ha nått en viss nivå, medan SSM:s godkännande styr när SKB kan påbörja uppförande respektive drift av anläggningar. När SKB lämnar in ansökningarna för att få bygga en anläggning är syftet att visa att vi har kunskap och förmåga att konstruera den så att den uppfyller myndigheternas krav. Även när SKB har nått den mognadsgrad i forskning och utveckling som krävs för att få tillstånd enligt kärntekniklagen behövs i den kommande stegvisa prövningen fortsatt forskning och teknikutveckling. Det innebär vidareutveckling av den teknik och de system som behövs för att kunna uppföra och sedan driftsätta anläggningen samt forskning för att reducera kvarstående osäkerheter i analyserna av säkerheten efter förslutning av slutförvar som stöd för fortsatt utveckling och optimering av anläggningen. I del I Verksamhet och handlingsplan beskrivs de viktigaste kvarstående forsknings- och utvecklingsfrågorna, och de planerade insatserna under Fud-perioden redovisas mer utförligt i del II Avfall och slutförvaring.

Frågor om bevarande av information och kunskap om slutförvar och om utvecklingen av andra koncept för slutförvaring, speciellt deponering i djupa borrhål, har varit återkommande under alla år av samråd inför ansökningarna för inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret. SKB fortsätter därför arbetet om hur information och kunskap om slutförvaren över generationer långt in i framtiden kan bevaras. SKB fortsätter även bevakningen av utvecklingen inom områdena borrhåll och deponering i djupa borrhål.

För att kunna ta hand om radioaktivt avfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnads-effektivt sätt har SKB utvecklat ett systematiskt arbetssätt för att genomföra den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta i drift nya anläggningar. Däri ingår att säkerställa att det finns resurser och kompetens också på lång sikt.

Del II Avfall och slutförvaring

Det omfattande forsknings-, utvecklings- och planeringsarbete som bedrivits under fyra decennier har medfört att många frågor av betydelse för kärnavfallsprogrammet har behandlats och klarats av. I del II Avfall och slutförvaring presenteras behovet av fortsatt forskning, utveckling och demon-

stration under Fud-perioden för de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. Där finns också korta beskrivningar av nuläget per område.

Behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser kan delas in i tre huvudsakliga grupper:

- Behov av ökad processförståelse, det vill säga den vetenskapliga förståelsen för processer som påverkar slutförvarssystemet och därmed grunden för att bedöma deras betydelse för säkerheten efter förslutning.
- Behov av kunskap och kompetens kring utformning, konstruktion, tillverkning och installation av de barriärer och komponenter som ska användas i anläggningarna.
- Behov av kunskap och kompetens kring kontroll och provning för att verifiera att systemets barriärer och komponenter uppfyller kraven.

Slutförvaret för långlivat avfall

Slutförvaret för långlivat avfall är det förvar som kommer att tas i drift sist. Ett förslag till förvarskoncept finns vilket under perioden 2015–2019 har genomgått en utvärdering med avseende på säkerheten efter förslutning. Säkerhetsvärderingen utgör ett viktigt underlag för den fortsatta utvecklingen av förvarskonceptet liksom framtagande av acceptanskriterier för avfallet och lokaliseringen av förvaret. Utgångspunkter för lokaliseringen är de grundläggande krav som finns i miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen samt SKB:s erfarenheter från tidigare genomförda lokaliseringsprocesser.

Låg- och medelaktivt avfall

Låg- och medelaktivt avfall kommer att slutförvaras i SFR eller SFL beroende på avfallens innehåll av kortlivade respektive långlivade radionuklider. Viktiga insatser under Fud-perioden är att: i) fortsätta arbetet kring hur organiska ämnen påverkar radionuklidtransporten i slutförvarsmiljö, ii) fördjupa kunskapen om radionuklidinventariet, det gäller såväl prognosticerade avfallsmängder som avfallens innehåll av radionuklider, med särskilda insatser kring bestämning av svårsmätbara nuklider, samt iii) vidareutveckla avfalls- och avfallstransportbehållare både för långlivat och kortlivat rivningsavfall.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat och högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen av bränslet kommer att ske i täta kopparkapslar i berggrunden. Bränslet är svårslösligt i vatten vilket gör att även om en kapsel skulle bli otät i förvaret skulle det ta avsevärd tid innan radionuklider från bränslet skulle kunna spridas i berget. Kunskapen om bränslets löslighet är därför avgörande för analysen av säkerheten efter förslutning och är ett område där ytterligare insatser kommer att ske under Fud-perioden.

Det använda kärnbränslet mellanlagras i vattenbassänger i väntan på deponering i Kärnbränsleförvaret. För att den framtida hanteringen av det använda kärnbränslet ska ske på ett säkert sätt pågår kontroller och utredningar om hur bränslets egenskaper förändras under mellanlagringen, vid transporter, under inkapsling samt vid deponering i Kärnbränsleförvaret.

Kapsel för använt kärnbränsle

I Kärnbränsleförvaret är kopparkapseln den inneslutande barriären. Fortsatt arbete rör såväl forskning kring kopparkapselns egenskaper i slutförvarsmiljö som teknikutveckling för att kunna producera kapslarna, verifiera dem mot ställda krav och hantera dem inom KBS-3-systemet.

För analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning finns frågor avseende korrosion och kopparkrypning som behöver utredas vidare. Sulfidkorrosion är den viktigaste korrosionsprocessen (för de fall då bufferten eroderats bort ger processen ett dominerande riskbidrag i analysen av säkerhet efter förslutning), och SKB fortsätter arbetet med att få en bättre förståelse för detaljerna i korrosionsmekanismen. SKB bedriver också arbete för att förstå och kunna beskriva strålningsinducerad korrosion och spänningskorrosion, liksom för att modellera lokal korrosion, med särskilt fokus på perioden med omättad bentonitbuffert.

För beskrivningen av materialegenskaperna hos koppar är den viktigaste forskningsfrågan en utvecklad förståelse för hur tillsats av fosfor till kopparn leder till gynnsamma krypegenskaper, och SKB fortsätter arbetet både experimentellt och teoretiskt. SKB planerar också insatser för att studera eventuell inträngning av väte i koppar, och om detta i så fall påverkar materialegenskaperna i någon signifikant utsträckning.

Inom konstruktion, tillverkning, kontroll och provning av kapseln kommer bland annat följande att genomföras: i) utveckla kravbilden för kapselns delar och bedöma om kraven kan uppfyllas bland annat vid förändrade konstruktionsförutsättningar, ii) beskriva hur härdningsmekanismer vid tillverkning av koppardelarna påverkar kapselns hållfasthet, iii) förtydliga såväl kraven på materialsammansättningen i kapselns delar som strategin för kvalitetssäkring av materialsammansättningen, iv) undersöka hur gjutningsmetoder påverkar insatsmaterialet, samt v) fortsätta verifieringen av svetsproceduren för förslutning av kapseln och även förbereda för kvalificering av svetsen.

Cementbaserade material

Cementbaserade material förekommer i avfallsmatriser, barriärer och konstruktioner i SFR och SFL. I alla förvar används cementbaserade material i pluggar, bergförstärkning och vid injektering.

Cementbaserade material har en central funktion i upprätthållande av säkerheten efter förslutning av förvaren SFR och SFL. SKB bedriver ett kontinuerligt arbete med syfte att vidmakthålla och förstärka kunskapen och förmågan att modellera utvecklingen av cementmaterialens egenskaper över tid. Fortsatt forskning kommer att genomföras bland annat kring gastransport genom cementbaserade material.

Inför utbyggnaden av SFR och inför uppförande av SFL och Kärnbränsleförvaret genomförs ett omfattande utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och material till de olika förvaren.

Lerbarriärer och förslutning

Barriärer av lera finns i SFR (mellan berget och betongsilon) och kommer att finnas i Kärnbränsleförvaret (buffert och återfyllning), och SFL (återfyllning i bergssal för historiskt avfall) i syfte att begränsa vattenflödet runt kopparkapslar med använt kärnbränsle och avfallskollin med låg- och medelaktivt avfall.

Bentonitbarriärerna förekommer i form av block och pellets. För funktionen i förvaren efter förslutning är det egenskaperna i vattenmättad och homogeniserad bentonit som är avgörande. Fortsatta insatser planeras för att bättre kunna beskriva både homogeniseringsprocessen och barriärernas egenskaper efter vattenmättnad. Insatser för att bättre förstå gassammansättning och mikrobiell aktivitet under den omättade perioden, främst för att kunna uppskatta eventuell påverkan på kopparkapseln, behövs. För att bättre förstå orsakerna till kanalbildning och erosion av material efter installation, har ett program med både experiment och modellering initierats. Detta kommer att fortsätta under Fud-perioden.

SKB behöver även öka kunskapen om olika lermaterial och vidareutveckla metoder för mätning av bentonitens egenskaper. Inför återfyllning av tunnlar behövs fortsatta insatser kring vattenhantering vid installation. För att verifiera att installation av buffert och återfyllning fungerar som avsett behöver fullskaliga tester genomföras under jord.

Prototyper eller principlösningar finns framme för deponeringsprocessen i Kärnbränsleförvaret, där bland annat deponeringsmaskin, återfyllningsrobot och transportsystem för buffert- och återfyllnadskomponenter ingår. Processen kommer att bli automatiserad och för att styra och övervaka deponeringen utvecklas ett överordnat styrsystem.

Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvarsanläggningar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden över den tid som avfallet behöver hållas isolerat.

Under de senaste åren har modellerna för grundvattenflöde i berg utvecklats. Numera är processer för geokemiska egenskaper och transportegenskaper integrerade i dessa. Fortsatta insatser handlar om att vidareutveckla och testa dessa nya verktyg och bredda användningsområdena.

Jordskalv i närheten av Kärnbränsleförvaret skulle kunna orsaka skjuvrörelser längs sprickor som skär kapselpositioner och forskningen som bedrivs syftar till att säkerställa att risken för jordskalv och de negativa effekterna på förvarssystemet inte är underskattade. När det gäller karaktärisering och modellering av bergmassan behöver den grundläggande förståelsen för de mekaniska egenskaperna hos enskilda sprickor och spricksystem kompletteras, liksom hur dessa egenskaper påverkar till exempel hydrogeologiska och geokemiska egenskaper i berget.

Enligt den valda referensmetoden kommer tunnarna i Kärnbränsleförvaret att sprängas ut, men en utredning av alternativa metoder, till exempel mekanisk brytning, pågår med syfte att åstadkomma ett planare golv med mindre sprängskadezon på omgivande berg. För att verifiera undersöknings- och uttagsmetoder och säkerställa att de ger önskade resultat, behöver tester genomföras i full skala under jord.

Ytekosystem

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar i första hand till att ge underlag för beräkningar av potentiell stråldos till människa och miljö i analysen av säkerheten efter förslutning för de olika förvarerna. Programmet ger också underlag för miljöövervakning, bedömningar av eventuella miljöförändringar och för analyser av säkerheten i anläggningar i drift.

De viktigaste kvarstående frågorna inom ytekosystem är i) upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider i olika organismer, ii) temporal och spatial heterogenitet i landskapet, iii) transport- och ackumulationsprocesser, iv) radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos till exempel kol, klor, molybden, nickel och hos radionukliderna i urans sönderfallskedja.

Klimat och klimatrelaterade processer

Det övergripande syftet med arbetet om klimatfrågor är att förse säkerhetsanalyserna med vetenskapligt underbyggda scenarier för framtida klimatutveckling, till grund för utvärderingen av förvarens säkerhet efter förslutning. För de olika förvarskoncepten finns specifika frågor som beror av framtida klimatutvecklingar som ska besvaras i säkerhetsanalyserna.

De framtida klimatutvecklingarna baseras dels på vår kunskap om klimatets historia (framför allt den senaste glaciationscykeln, Weichselglaciationen), dels på modellering av det framtida klimatet.

Övergripande handlar arbetet om klimatfrågor därför om att utveckla processförståelse, ta fram klimat-historia, uppdatera klimatscenarier och validera de modeller som används för att beskriva spännvidden av de klimat och klimatrelaterade processer som slutförvaren kan komma att utsättas för under kommande 100 000 till 1 miljon år.

Det finns frågor med bäring på alla tre slutförvarerna, som behöver studeras vidare för att minska osäkerheter och underbygga trovärdigheten i analysen av säkerhet efter förslutning för de olika förvarerna. De rör framför allt: i) historiska klimatförändringar under Weichsel och holocen, ii) havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning, iii) ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av glacial erosion, iv) validering av permafrostmodell, samt v) variabilitet hos klimat och inlandsisar under de kommande en miljon åren. Utöver ovanstående punkter om framtida studier, planeras både fortsatt datainsamling från bergborrhålet vid inlandsisen på Grönland och fortsatta väderstationsobservationer på och framför inlandsisen.

Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar

I del III Avveckling av kärntekniska anläggningar, presenteras planeringen för avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och SKB:s anläggningar.

Tillståndshavaren för en kärnteknisk anläggning har ansvaret för avvecklingen av anläggningen enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen, finansieringslagen och SSM:s föreskrifter. För det radioaktiva

avfallet sträcker sig ansvaret tills att det är friklassat eller tills att SSM har godkänt förslutning av aktuellt slutförvar, och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt kärntekniklagen.

Inför avveckling måste erforderliga tillstånd finnas. Enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen samt gällande förordningar, tillståndsvillkor och föreskrifter ska bland annat följande dokument utarbetas inför och i vissa fall löpande under avvecklingen: avvecklingsplan och avvecklingsstrategi, avfallsplan, säkerhetsredovisning, underlag enligt Euratomfördragets artikel 37, delmoment- eller delprojektanmälan, avvecklingsrapport samt kontrollprogram för friklassning.

När anläggningen/anläggningsdelarna friklassats kan konventionell rivning och återställning av mark genomföras.

Tidsplaner för avvecklingen av de svenska kärnkraftverken styrs av de planerade drifttiderna för kärnkraftverken. Enligt gällande planer ska Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågesta vara friklassade till 2028. Kärnkraftsföretagens planering är att starta nedmontering och rivning så snart som möjligt efter slutlig avställning där förutsättningar såsom tillgänglighet av mellanlager och slutförvar för rivningsavfall påverkar planeringen.

För att effektivisera arbetet med avvecklings- och avfallsfrågor har arbetsområden fördelats mellan de olika aktörerna på såväl företagsnivå som på koncernnivå. Tillståndshavarna avvecklar sina kärnkraftsreaktorer och SKB:s huvuduppgift är att få till stånd slutförvar för rivningsavfall enligt tillståndshavarnas behov. SKB genomför också transporter av använt kärnbränsle och kärnavfall från kärnkraftverken till mellanlager och slutförvar.

Avveckling av kärntekniska anläggningar i Sverige kommer att pågå ända fram till 2070-talet, då anläggningarna för omhändertagande av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall ska avvecklas. Avvecklingsverksamheten kommer att genomföras i tre huvudsakliga etapper; en på 2020-talet, en på 2040-talet och den slutliga på 2070-talet. En av utmaningarna är därför att säkerställa tillgång till kompetens för alla avvecklingsetapper, eftersom behovet av avvecklingskompetens mellan etapperna kommer att vara begränsat i Sverige.

Innehåll

Del I Verksamhet och handlingsplan

1	Introduktion	19
1.1	Förutsättningar	19
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	19
1.1.2	Grundläggande principer	20
1.1.3	Reaktorernas planerade drifttider	21
1.1.4	Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet	22
1.2	Program för forskning, utveckling och demonstration	23
1.2.1	Fud-program 2016	24
1.2.2	Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2016	25
1.2.3	Fud-program 2019	25
1.3	Finansiering	27
2	Beskrivning av avfallssystemet	29
2.1	Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall	29
2.1.1	Anläggningar för kortlivat avfall	29
2.1.2	Anläggningar för långlivat avfall	33
2.2	Anläggningar inom KBS-3-systemet	35
2.3	Transportsystemet	38
2.4	Kärnämneskontroll	39
3	Plan för genomförande	41
3.1	Huvudtidsplan för kärnavfallsprogrammet	41
3.2	Genomförandeplan för mycket lågaktivt avfall	42
3.2.1	Nuläge	42
3.2.2	Övergripande planering	45
3.2.3	Behandling av mycket lågaktivt avfall	46
3.2.4	Mellanlagring och uppställning av mycket lågaktivt avfall	48
3.2.5	Markförvar	49
3.3	Genomförandeplan för låg- och medelaktivt avfall	49
3.3.1	Nuläge	49
3.3.2	Övergripande planering	50
3.3.3	Kortlivat avfall	50
3.3.4	Långlivat avfall	53
3.4	Genomförandeplan för använt kärnbränsle	57
3.4.1	Nuläge	58
3.4.2	Övergripande planering	58
3.4.3	Mellanlagring	60
3.4.4	Inkapsling	61
3.4.5	Slutförvaring	62
3.5	Genomförandeplan för avveckling av kärntekniska anläggningar	64
3.5.1	Översikt avveckling	65
3.5.2	Nuläge och övergripande planering	65
3.6	Genomförandeplan för transporter	67
3.6.1	Nuläge	67
3.6.2	Övergripande planering	68
3.6.3	Transport av låg- och medelaktivt avfall	68
3.6.4	Transport av använt bränsle	69
3.6.5	Specialtransporter	70
3.7	Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar	70
3.7.1	Kärnkraftsreaktorernas drifttider	70
3.7.2	Drifttagning av det utbyggda Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	71
3.7.3	Slutförvaring av mycket lågaktivt rivningsavfall	72
3.7.4	Lokalisering och drifttagning av slutförvaret för långlivat avfall	72

3.7.5	Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink	73
3.7.6	Horisontell deponering – KBS-3H	74
4	Fortsatt forskning och utveckling	75
4.1	Planerade insatser för respektive slutförvar och Clink	75
4.1.1	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	76
4.1.2	Slutförvaret för långlivat avfall	77
4.1.3	Kärnbränsleförvaret och Clink	79
4.2	Låg- och medelaktivt avfall	80
4.2.1	Processförståelse	81
4.2.2	Radionuklidinventarium	81
4.2.3	Hantering av avfallet	81
4.2.4	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	82
4.3	Använt kärnbränsle	82
4.3.1	Processförståelse	82
4.3.2	Bränsleintegritet, bränslekaraktärisering och bränsleinformation	83
4.3.3	Kriticitet, strålning och kärnämneskontroll	83
4.4	Kapsel för använt kärnbränsle	84
4.4.1	Processförståelse	84
4.4.2	Konstruktion	84
4.4.3	Tillverkning, kontroll och provning	85
4.5	Cementbaserade material	85
4.5.1	Processförståelse	85
4.5.2	Utformning av betongkonstruktioner och material	86
4.6	Lerbarriärer och förslutning	87
4.6.1	Processförståelse	88
4.6.2	Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning	89
4.6.3	Deponering och installation av buffert och återfyllning	89
4.6.4	Förslutning av borrhål och förvar	89
4.7	Berg	90
4.7.1	Processförståelse	90
4.7.2	Produktion, verifiering och kontroll	92
4.8	Ytekosystem	92
4.9	Klimat och klimatrelaterade processer	93
4.10	Övervakning under uppförande och drift	93
4.11	Avveckling	95
4.11.1	Avfallshantering	95
4.11.2	Tillståndprocesser	95
4.11.3	Resurser och samordning	96
4.12	Övriga områden	96
4.12.1	Bevarande av information och kunskap genom generationer	96
4.12.2	Andra metoder för slutförvaring	99
5	Arbetsätt, resurser och kompetens	103
5.1	Forskning	103
5.1.1	Mål för forskning	103
5.1.2	Styrning av forskning	103
5.1.3	Forskningens framtida inriktning	103
5.1.4	Granskning, öppenhet och insyn	105
5.2	Teknikutveckling	105
5.2.1	Mål för teknikutveckling	105
5.2.2	Styrning av teknikutveckling	105
5.2.3	Teknikutvecklingsprocess	106
5.2.4	Konstruktionsförutsättningar	107
5.2.5	Kvalitetssäkring, styrning och kontroll	108
5.3	SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	108
5.3.1	Äspölaboratoriet	108
5.3.2	Kapsellaboratoriet	111

5.4	Arbetsverktyg	111
5.4.1	Databaser	111
5.4.2	Modell- och beräkningsverktyg	112
5.4.3	Platsundersökningar och platsmodeller	112
5.4.4	Kvalitetssäkring	113
5.5	Resurser och kompetens	113
5.5.1	Behov av kompetens och resurser	113
5.5.2	Uppbyggnad och bevarande av kompetens	114
5.5.3	Kompetensnätverk och leverantörer	115
5.5.4	Samarbeten	116
5.5.5	Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt	118

Del II Avfall och slutförvaring

6	Slutförvaret för långlivat avfall	125
6.1	SFL säkerhetsvärdering	125
6.1.1	Syfte med och nivå på analysen	125
6.1.2	Utgångspunkt för analysen	126
6.1.3	Metodik och tillämpning	128
6.1.4	Resultat	135
6.1.5	Diskussion och slutsatser	138
6.1.6	Områden där kunskapsläget behöver förbättras	142
6.2	Lokalisering av SFL	143
6.2.1	Krav i lagar och föreskrifter rörande lokalisering	143
6.2.2	Lokaliseringsfaktorer för SFL	145
6.2.3	Befintligt lokaliseringsunderlag	149
6.2.4	Principiella lokaliseringsalternativ	156
6.2.5	SKB:s slutsatser och föreslagen lokaliseringsprocess	158
7	Låg- och medelaktivt avfall	161
7.1	Processförståelse	161
7.1.1	Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cellulosa	161
7.1.2	Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedel	162
7.1.3	Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cementtillsatsmedel	163
7.1.4	Gasbildning från korrosion av aluminium och zink	163
7.1.5	Mikrobiell gasproduktion	164
7.1.6	Svällning av jonbytarmassor	164
7.2	Radionuklidinventarium	165
7.2.1	Referensinventarium	165
7.2.2	Metodikutveckling för svärmätbara nuklider	166
7.2.3	Osäkerheter i radionuklidinventariet	167
7.3	Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR	168
7.4	Hantering av reaktortankar och stora komponenter	169
7.5	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	169
7.5.1	Avfallsbehållare för avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB	169
7.5.2	Avfallsbehållare för rivningsavfall	170
7.5.3	Avfallstransportbehållare för nya avfallsbehållare	170
8	Använt kärnbränsle	171
8.1	Bränsleupplösning	171
8.2	Radionuklidspeciering och lösligheter	174
8.3	Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet	175
8.4	Bränslekaraktärisering, resteffekt och strålning	177
8.5	Bränsleinformation och optimering inför inkapsling	179
8.6	Kriticitet	179
8.7	Kärnämneskontroll	180

9	Kapsel för använt kärnbränsle	185
9.1	Korrosion	185
9.1.1	Sulfidkorrosion	185
9.1.2	Korrosion under oxiderande förhållanden	188
9.1.3	Kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten	190
9.1.4	Strålningsinducerad korrosion	191
9.1.5	Spänningskorrosion	193
9.1.6	Verifiering av olika kopparmaterial för korrosionskänslighet	194
9.2	Materialegenskaper kapselmaterial	194
9.2.1	Kopparkrypning	195
9.2.2	Väteförsprödning	197
9.2.3	Strålningseffekter på koppar och segjärn	198
9.3	Konstruktion	199
9.4	Tillverkning, kontroll och provning	200
9.4.1	Utformning och bearbetning av koppardelar	200
9.4.2	Gjutning av kapselns insats	202
9.4.3	Svetsning	205
9.4.4	Kontroll och provning	206
10	Cementbaserade material	209
10.1	Cementbaserade material – utveckling efter förslutning	209
10.1.1	Grundvattenpåverkan	209
10.1.2	Modellering av gastransport	210
10.1.3	Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall	211
10.1.4	Påverkan från korrosion av metalliskt avfall	211
10.1.5	Bentonitens inverkan på cementbaserade material	212
10.1.6	Inverkan av tillsatsmaterial	213
10.1.7	Frysning	214
10.1.8	Inre och yttre laster	215
10.2	Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR	215
10.2.1	Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA	216
10.2.2	Bergssal för reaktortankar, BRT	219
10.2.3	System för gastransport	220
10.3	Utformning av betongkonstruktioner och material till SFL	221
10.3.1	Betongkonstruktioner	221
10.3.2	Kringgjutning av avfallsbehållare	222
10.3.3	Grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av BHK med betong	222
10.4	Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret	223
10.4.1	Plugg till deponeringstunnlar	223
11	Lerbarriärer och förslutning	227
11.1	Bentonitmateriallets utveckling efter installation fram till mättnad	228
11.1.1	Gasfasens sammansättning under den omättade perioden	228
11.1.2	Kanalbildning/erosion	229
11.1.3	Vattenupptag	230
11.1.4	Svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum	232
11.1.5	Ångcirkulation	234
11.1.6	Mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden	235
11.2	Bentonitmateriallets egenskaper i mättat tillstånd	237
11.2.1	Materialsammansättning	238
11.2.2	Svälltryck och hydraulisk konduktivitet	238
11.2.3	Skjuvhållfasthet	239
11.3	Bentonitmateriallets utveckling efter vattenmättnad	239
11.3.1	Sulfidbildning och sulfidtransport	239
11.3.2	Kolloidfrigörelse/erosion	242
11.3.3	Självläkning av bentonit	246
11.3.4	Mineralstabilitet	246

11.4	Utformning av barriärer	248
11.4.1	Buffert i Kärnbränsleförvaret	249
11.4.2	Återfyllning i Kärnbränsleförvaret	249
11.4.3	Utformning av lerbarriärer i SFL	249
11.5	Tillverkning samt kontroll och provning av buffert- och återfyllningskomponenter	250
11.5.1	Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial	250
11.5.2	Tillverkning av buffertkomponenter	252
11.5.3	Tillverkning av återfyllningskomponenter	253
11.6	Deponering och installation av buffert och återfyllning	253
11.6.1	Deponering	254
11.6.2	Installation av buffert	255
11.6.3	Installation av återfyllning	255
11.7	Borrhålsförslutning	256
11.8	Förslutning	258
11.8.1	Förslutning av Kärnbränsleförvaret	258
11.8.2	Förslutning av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	259
12	Berg	261
12.1	Karaktärisering och modellering av bergets egenskaper	261
12.1.1	Bergmassans mekaniska egenskaper	261
12.1.2	Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning	263
12.1.3	Bergspänningar	264
12.1.4	Modellering av diskreta spricknätverk	265
12.2	Seismisk påverkan på förvarens säkerhet	267
12.2.1	Seismisk övervakning	268
12.2.2	Undersökningar av glacialt inducerade förkastningar	269
12.2.3	Modellering av seismisk påverkan på slutförvar	271
12.3	Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen	272
12.3.1	Utveckling av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen	272
12.3.2	Processer som påverkar den hydrokemiska miljön	274
12.3.3	Transportegenskaper och processer som påverkar ämnestransport i berget	275
12.3.4	Klimatets inverkan på processer i geosfären	277
12.4	Detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering	280
12.4.1	Metodik för detaljundersökningar	280
12.4.2	Modelleringsmetodik inom detaljundersökningar	281
12.4.3	Kritiska strukturer och volymer	282
12.4.4	Jordströmmar i Forsmarksområdet	283
12.5	Tunnelproduktion	284
12.5.1	Injektering	284
12.5.2	Tunneldrivning för deponeringstunnlar	284
12.5.3	Borrning av deponeringshål	285
13	Ytekosystem	287
13.1	Översikt	287
13.2	Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer	288
13.3	Temporal och spatial heterogenitet i landskapet	290
13.4	Transport- och ackumulationsprocesser	292
13.5	Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen	294
14	Klimat och klimatrelaterade processer	297
14.1	Historiska klimatförändringar	297
14.1.1	Klimat under Weichsel och holocen	298
14.1.2	Övergångar mellan olika klimattillstånd i slutet av en glaciation	299
14.2	Inlandsisars dynamik och beteende	300

14.3	Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning	302
14.4	Ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av glacial erosion	305
14.5	Validering av permafrostmodell	306
14.6	Variabilitet hos klimat och inlandsisar under de kommande en miljon åren	307
14.7	Beskrivning av inlandsisars hydrologi från Greenland Analogue Project (GAP)	309

Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar

15	Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar	315
15.1	Begrepp och krav	315
15.2	Ansvar och arbetsfördelning	317
15.2.1	Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB	317
15.2.2	Arbetsfördelning inom Uniper	319
15.2.3	Arbetsfördelning inom Vattenfall	319
15.3	Nationell och internationell samordning	320
15.3.1	Industrigemensam samordning	320
15.3.2	Samordning Uniper	320
15.3.3	Samordning Vattenfall	321
15.4	Resurser och kompetens	321
16	Planering för avveckling inom Uniper	323
16.1	Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling	323
16.2	OKG Aktiebolags planering för avveckling	324
16.2.1	Oskarhamn 1 och Oskarhamn 2	325
16.2.2	Oskarhamn 3 och gemensamma anläggningar	326
17	Planering för avveckling inom Vattenfall	329
17.1	Ringhals AB:s planering för avveckling	330
17.2	Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling	332
17.3	Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn	334
18	Planering för avveckling av SKB:s anläggningar	337
18.1	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle	337
18.2	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	337
18.3	Slutförvaret för långlivat avfall	338
18.4	Kärnbränsleförvaret	338
19	Fortsatta aktiviteter inom avveckling	339
19.1	Industrigemensamt utvecklingsarbete	339
19.1.1	Långlivat avfall	339
19.1.2	Hantering av BWR-reaktortankar och stora komponenter	339
19.1.3	Utveckling av betongkonstruktioner och material till SFL	339
19.1.4	Mycket lågaktivt avfall	340
19.1.5	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	340
19.1.6	Icke-reguljära bränslen	340
19.1.7	Harmoniserad tillståndsprocess	341
19.1.8	IT-stöd för avvecklingsdokumentation	341
19.1.9	Internationellt utvecklingsarbete	342
19.1.10	Metodutveckling för svårmätbara nuklider	342
19.2	Utveckling inom Uniper	342
19.3	Utveckling inom Vattenfall	344
	Referenser	347
	Bilaga Förkortningar	379

Del I

Verksamhet och handlingsplan

- 1 Introduktion
- 2 Beskrivning av avfallssystemet
- 3 Plan för genomförande
- 4 Fortsatt forskning och utveckling
- 5 Arbetsätt, resurser och kompetens

Del I – läsanvisning

I del I av Fud-program 2019, beskrivs verksamhet och handlingsplan för att ta hand om och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Utifrån handlingsplanen motiveras och sammanfattas de planerade insatserna inom forskning och utveckling som behövs för att genomföra de återstående delarna av systemet och för att avveckla kärnkraftsreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar. Där beskrivs också det systematiska arbetssätt som SKB har utvecklat för att genomföra den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna realisera planen och ta hand om radioaktivt avfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnadseffektivt sätt.

I del I ingår även en beskrivning av kunskapsläget och planerade insatser inom två övriga områden som är av intresse för SKB, nämligen frågeställningar kring informationsbevarande över generationer och utvecklingen inom områdena borrhål och deponering i djupa borrhål.

1 Introduktion

Den svenska kraftindustrin har under drygt 50 år producerat elektricitet med kärnkraft. År 1964 togs Ågestareaktorn, landets första kommersiella kärnkraftsreaktor, i drift. Sedan dess har ett system byggts upp, för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och kärnavfallet från driften av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Systemet består hittills av Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), lokala markförvar samt fartyget m/s Sigrid och transportbehållare.

För att kunna ta hand om det använda kärnbränslet på ett långsiktigt säkert sätt återstår det att bygga och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. Därefter följer drift av systemet och när allt använt kärnbränsle deponerats kan anläggningarna avvecklas och slutförvaret förslutas.

I KBS-3-systemet ingår Clab med en anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet, behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och ett slutförvar för kapslar med använt kärnbränsle. Förutom dessa anläggningar behövs ett system för produktion av kapslar samt buffert- och återfyllningsmaterial.

För omhändertagande av det låg- och medelaktiva drift- och rivningsavfallet behöver SFR byggas ut. Vidare behöver ytterligare ett slutförvar, Slutförvaret för långlivat avfall (SFL), byggas och behållare för transporter av långlivat avfall tillverkas och införskaffas.

Genomförandeplanen i detta Fud-program beskriver de övergripande planerna för att realisera de återstående delarna av avfallssystemet och anpassa befintliga anläggningar på ett sådant sätt att människa och miljö skyddas – i dag och i framtiden. Fud-programmet beskriver också den planering som pågår för de reaktorer som ska avvecklas på 2020-talet.

1.1 Förutsättningar

1.1.1 Gällande regelverk och SKB:s uppdrag

Enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen, KTL) ska den som har tillstånd till kärnteknisk verksamhet svara för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle som uppkommer i verksamheten. Den som har tillstånd att driva en kärnkraftsreaktor ska även svara för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för detta. Tillståndshavaren är också skyldig att på ett säkert sätt avveckla sina anläggningar när verksamheten upphört.

Tillståndshavare för kärnkraftsreaktorerna i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals och Barsebäck är Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB och Barsebäck Kraft AB. Dessa företag benämns fortsättningsvis reaktorinnehavarna.

Svensk Kärnbränslehantering AB ägs av Vattenfall AB, OKG Aktiebolag, Forsmarks Kraftgrupp AB och Sydkraft Nuclear Power AB (tidigare E.ON Kärnkraft Sverige AB). På uppdrag av sina ägare svarar SKB för hantering och slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. För detta ändamål äger och driver SKB ett transportsystem och anläggningar för avfallshantering.

Reaktorinnehavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer. SKB har i detta sammanhang fått i uppdrag av reaktorinnehavarna att delta i planeringen av kommande avveckling. SKB medverkar genom att samordna generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt rivningsavfall.

Enligt kärntekniklagen ska reaktorinnehavarna i samråd utarbeta ett program för sin forsknings- och utvecklingsverksamhet. Programmet ska också beskriva de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Ett sådant program för forskning, utveckling och demonstration (Fud-program) ska lämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) vart tredje år. Efter remiss till myndigheter och intresseorganisationer granskas och utvärderas programmen av SSM. De granskas även av Kärnavfallsrådet. SSM och Kärnavfallsrådet lämnar sina synpunkter till regeringen, som tar ställning till om programmen uppfyller de krav som ställs i kärntekniklagen och om eventuella riktlinjer ska ges avseende den fortsatta verksamheten.

Det är SKB som på uppdrag av reaktorinnehavarna och i samarbete med dessa utarbetar Fud-programmen och lämnar dem till SSM.

Reaktorinnehavarna är enligt kärntekniklagen även skyldiga att svara för kostnaderna för sina förpliktelser. Lagen (SFS 2006:647) om finansiering av kärntekniska restprodukter (finansieringslagen) syftar till att säkerställa finansieringen. Enligt finansieringslagen är reaktorinnehavarna skyldiga att betala en avgift till en fond som förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden. På uppdrag av reaktorinnehavarna upprättar SKB i enlighet med finansieringslagen en kostnadsberäkning vart tredje år (avsnitt 1.3).

Förutom kärnavfall som SKB tar emot från reaktorinnehavarna tar SKB också emot radioaktivt avfall från sjukvård, forskning och övrig industri. Detta regleras genom avtal mellan SKB och de företag som har ansvar för detta avfall. SKB har för närvarande avtal med AB SVAFO, Studsvik Nuclear AB, Cyclife Sweden AB¹, European Spallation Source ERIC (ESS) och Westinghouse Electric Sweden AB (WSE).

1.1.2 Grundläggande principer

Hantering av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Radioaktivt avfall är material som avger joniserande strålning som är skadlig och är avfall (enligt 15 kap. 1 § miljöbalken) eller som det inte finns någon planerad och godtagbar användning för. Kärnavfall är radioaktivt avfall som bildas i kärnkraftverk och andra kärntekniska anläggningar. Radioaktivt avfall kan även komma från sjukhus, industri och forskning.

Inriktningen för arbetet med omhändertagande av det använda kärnbränslet och det radioaktiva avfallet har dessutom fastställts genom en lång rad politiska beslut och uttalanden som kan sammanfattas i följande punkter:

- Det använda kärnbränslet och kärnavfallet från de svenska reaktorerna ska slutförvaras inom Sveriges gränser med berörda kommuners medgivande.
- Sverige ska inte slutförvara använt kärnbränsle eller radioaktivt avfall från andra länder.
- Det använda kärnbränslet ska inte uppgrävas.
- Slutförvar ska etableras av de generationer som dragit nytta av den svenska kärnkraften.

SKB planerar för geologisk slutförvaring av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet. Andra strategier som att till exempel skjuta upp det använda kärnbränslet i rymden, deponera det i världshavens djuphavsbottnar eller begrava det i inlandsisen har också studerats men förkastats. Flertalet länder och organisationer som IAEA och OECD/NEA är i dag överens om att geologisk deponering är en lösning som uppfyller alla krav på säker slutförvaring och genomförbarhet. Vidare stöds geologisk deponering i EU:s gemenskapsramverk för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall².

¹ Tidigare Studsvik Nuclear Environmental AB.

² Rådets direktiv 2011/70/Euratom av den 19 juli 2011 om inrättande av ett gemenskapsramverk för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall.

Nedanstående principer ligger till grund för utformningen av SKB:s slutförvar:

- Förvaren ska förläggas till en långsiktigt stabil geologisk miljö.
- Förvaren ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för framtida generationer.
- Förvarens säkerhet ska baseras på flera barriärer (flerbarriärsprincipen).
- Tekniska barriärer ska i första hand bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Barriärerna ska fungera passivt, det vill säga utan ingripande av människan och utan tillförsel av energi eller material.
- Förvaren ska utformas på ett sådant sätt att säkerheten inte är beroende av aktiva åtgärder som underhåll och reparationer efter förslutning.

Flerbarriärsprincipen är en grundläggande och internationellt vedertagen säkerhetsprincip för slutförvaring. Den innebär att ett slutförvars säkerhet efter förslutning ska baseras på flera barriärer som har till uppgift att innesluta, förhindra eller fördröja spridningen av de radioaktiva ämnena i avfallet. Vilka barriärer och övriga komponenter som behövs i ett slutförvar beror till stor del på innehållet av radioaktiva ämnen, deras halveringstider och avfallets övriga egenskaper. Det innebär att kraven på barriärerna och deras beständighet i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall blir annorlunda än de för slutförvaren för använt kärnbränsle respektive långlivat radioaktivt avfall.

Ovanstående principer har tillsammans med en rad andra överväganden, som till exempel att ett förvar rent tekniskt ska vara möjligt att konstruera, lett till att SKB valt KBS-3-metoden³ för slutförvaring av använt kärnbränsle. SKB har inom ramen för Fud-programmen vid flera tillfällen genomfört utvärderingar av olika strategier och system för att ta hand om det använda kärnbränslet. I den senaste utvärderingen (SKB 2014f) redovisar SKB bakgrund och motiv till valet av KBS-3-metoden i förhållande till andra metoder. Utvärderingen gjordes mot uppställda krav, såväl övergripande och samhällseliga krav som miljö-, säkerhets- och strålskydds krav.

Metoden, vars utveckling påbörjades under slutet av 1970-talet, kan sammanfattas på följande sätt:

- Det använda kärnbränslet placeras i kopparkapslar med hög tålighet mot korrosion i förvarsmiljön. De cirka fem meter långa kapslarna har en insats av segjärn som förstärker stabiliteten.
- Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera – ett naturligt förekommande mineral som sväller i vatten, skyddar kapseln vid mindre berg rörelser och skärmar av kapseln från grundvatten rörelser, vilket begränsar hur mycket korroderande ämnen i grundvattnet som kan nå kapseln.
- Leran absorberar också radioaktiva ämnen som kan frigöras om kapslarna skulle skadas. Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberg med långsiktigt stabila förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör kärnbränslet och de radioaktiva ämnens kemiska egenskaper, till exempel deras svåröslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan.

Internationellt är KBS-3-metoden en av de metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle där utvecklingen kommit längst. Metoden genomförs i Finland (avsnitt 5.5.4) och den, eller varianter av den, övervägs som slutförvaringsmetod i flera andra länder, bland annat Kanada, Sydkorea, Storbritannien, Taiwan och Tjeckien.

1.1.3 Reaktorernas planerade drifttider

Reaktorernas drifttider är en viktig faktor för planeringen av kärnavfallsprogrammet. Utifrån de planerade drifttiderna görs prognoser för de mängder kärnavfall och använt kärnbränsle som ska omhändertas samt när i tiden behov för mellanlagring och slutförvaring uppstår.

³ KBS-3-metoden har fått sitt namn då den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet (Kärnbränslecykelns slutsteg, Använt kärnbränsle, SKBF/KBS, 1983).

Planeringen för avfallssystemet baseras på reaktorinnehavarnas aktuella planeringsförutsättningar. Under 2015 fattades beslut om förtida avställning av fyra reaktorer, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 och Ringhals 2, vilka samtliga togs i drift under 1970-talet. Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 har ställts av medan Ringhals 1 och Ringhals 2 planeras att ställas av i slutet av 2020 respektive 2019. För övriga sex reaktorer är den planerade drifttiden 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4. De yngsta reaktorerna, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, kommer därmed att vara i drift till 2045 enligt den planering som reaktorinnehavarna har i dag.

1.1.4 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet

Omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet styrs till stor del av avfallens egenskaper. Avfallet delas in i kategorier efter graden av radioaktivitet (mycket lågaktivt, lågaktivt, medelaktivt eller högaktivt) och efter aktivitetens livslängd (kort- eller långlivat avfall). Graderna av radioaktivitet styr hur avfallet hanteras fram till slutförvaring. Det medelaktiva avfallet och det högaktiva använda kärnbränslet kräver en strålskärmad hantering medan det mycket lågaktiva och det lågaktiva avfallet kan hanteras utan strålskärmning. Hur slutförvaringen ska utformas styrs till stor del av om avfallet är kortlivat eller långlivat då det har betydelse för den tid barriärernas funktion behöver upprätthållas.

Hur stor mängd avfall som uppkommer och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Avfallsmängderna är beroende av reaktorernas drifttid, tillgänglighet och andra driftförhållanden. SKB:s avfallssystem är utformat för dagens reaktorer och baseras på respektive reaktorinnehavares prognoser.

Mycket lågaktivt avfall

Avfall som håller en dosrat under 0,5 mSv/h och där den övervägande delen radionuklider är kortlivade med en halveringstid som är kortare än cirka 30⁴ år klassificeras som mycket lågaktivt avfall. Detta avfall uppstår både under drift och rivning av kärnkraftverken. Under drift genereras det främst under revisioner, underhålls- och serviceinsatser men även till följd av inspektioner av anläggningarna. Den mycket lågaktiva delen av rivningsavfallet består av nedmonterade system och strukturdelar samt skydds- och saneringsutrustning.

Hantering av mycket lågaktivt avfall bestäms av materialslag och aktivitetens innehåll och sker huvudsakligen på plats på kärnkraftverken. Mer komplex hantering exempelvis förbränning och smältning sker på andra ställen. Slutförvaringen av mycket lågaktivt avfall sker i dag huvudsakligen i markförvar. Enligt nuvarande tillstånd kommer cirka 37 000 kubikmeter kortlivat driftavfall att slutförvaras i markförvar vid Forsmarks, Oskarshamns och Ringhals kärnkraftverk.

Låg- och medelaktivt avfall

Det låg- och medelaktiva avfallet kan vara kort- eller långlivat. Kortlivat avfall innehåller till en övervägande del radionuklider med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år⁴ och endast en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Långlivat avfall innehåller huvudsakligen radionuklider med långa halveringstider. Att ett avfall klassas som långlivat är för att det innehåller en stor mängd långlivade nuklider. Detta är helt oberoende av mängden kortlivade nuklider som avfallet innehåller.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och rivning av kärntekniska anläggningar. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Rivningsavfallet består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Kortlivat avfall deponeras i dag i SFR. Enligt nuvarande prognoser kommer cirka 180 000 kubikmeter avfall att slutförvaras i SFR. Huvuddelen av det kortlivade avfallet kommer från kärnkraft-

⁴ Kortlivad radionuklid definieras enligt IAEA Safety Standards, Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide, No GSG-1 som en radionuklid med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år.

verken. Övrigt kortlivat avfall kommer i dag från Clab och senare från Clink⁵ samt från anläggningar som tillhör Studsvik Nuclear AB, AB SVAFO och Cyclife Sweden AB.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade härdkomponenter, reaktortankar från tryckvattenreaktorer (PWR) och styrstavar från kokvattenreaktorer (BWR). De långlivade radionukliderna bildas av stabila grundämnen i till exempel stål när dessa utsätts för stark neutronbestrålning från reaktorhärden. Den totala mängden långlivat låg- och medelaktivt avfall uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter, varav cirka en tredjedel kommer från kärnkraftverken. Resten härrör från det historiska avfallet som i dag förvaras av AB SVAFO samt från anläggningar som drivs av andra företag (avsnitt 1.1.1). SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet i SFL.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet utgör en mindre del av den totala volymen avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller dock den helt dominerande mängden av all radioaktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle är högaktivt och kräver strålskärmning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen planeras ske i Kärnbränsleförvaret.

Det använda bränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt) vilket gör att det måste kylas för att inte överhettas. Resteffektens storlek beror framför allt på utbränningsgraden (hur mycket energi som utvunnits ur kärnbränslet) och hur lång tid som gått sedan det togs ut ur reaktorn. I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna har utbränningen av bränslet ökat successivt sedan reaktorerna togs i drift. Motivet är att få ett så effektivt utnyttjande av bränslet som möjligt. En konsekvens av ökad utbränning är ökad resteffekt vilket är av betydelse vid mellanlagring och slutförvaring.

KBS-3-systemets anläggningar dimensioneras för en total mängd använt kärnbränsle motsvarande cirka 6 000 kapslar. En kapsel innehåller cirka två ton bränsle. Mängden använt kärnbränsle anges som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet.

Nästan allt bränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret kommer från de svenska kärnkraftverken. Men det finns även små mängder använt kärnbränsle som kommer från avslutade upp- och utvecklingsavtal, andra typer av reaktorer samt Studsviks AB:s bränsleverksamhet. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från Ågesta samt cirka två ton bränslerester från Studsvik Nuclear AB:s undersökningsverksamhet mellanlagras i dag i Clab. I Clab lagras även 23 ton Mox-bränsle (mixed oxide fuel) som har erhållits från Tyskland i utbyte mot det bränsle som i ett tidigt skede sändes till Frankrike (La Hague) för upparbetning. Sverige har även skickat en mindre mängd använt bränsle från den första reaktorn i Oskarshamn som har upparbetats i Sellafield i England. Inget bränsle eller radioaktivt avfall från den hanteringen kommer att återsändas till Sverige.

1.2 Program för forskning, utveckling och demonstration

Kärntekniklagen reglerar Fud-programmens periodicitet och omfattning. Dessa ska lämnas in vart tredje år till SSM och redovisa de åtgärder som behövs för att ta hand om det radioaktiva avfallet. Programmet ger dels en översikt av samtliga åtgärder som behövs dels en mer detaljerad redovisning av de åtgärder som planeras för under de närmaste sex åren.

SSM granskar och utvärderar den planerade forsknings- och utvecklingsverksamheten, redovisade forsknings- och utvecklingsresultat, alternativa hanterings- och förvaringsmetoder samt planerade åtgärder. Som en del i beredningen skickar SSM programmet på remiss till andra myndigheter och organisationer för att inhämta synpunkter. Efter genomförd granskning skickar SSM sitt yttrande och Fud-programmet till regeringen. Även Kärnavfallsrådet lämnar sin självständiga bedömning av programmet till regeringen. Regeringen beslutar slutligen om programmet uppfyller de krav som ställs i kärntekniklagen och om eventuella riktlinjer för den fortsatta verksamheten.

⁵ En anläggningsdel för inkapsling av använt kärnbränsle i kopparkapslar som kommer byggas i anslutning till Clab och som drivs som en integrerad anläggning Clink (Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle).

Fud-programmen syftar till att visa att reaktorinnehavarna uppfyller sina skyldigheter enligt kärntekniklagen. De är ett strategiskt verktyg för reaktorinnehavarna att successivt redovisa sina övergripande strategier och planer och få dem granskade.

Utvecklingen av KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle har pågått sedan slutet av 1970-talet. Metoden redovisades 1983 i en rapport som utgjorde underlag för ansökningarna om att ta de senast byggda kärnkraftsreaktorerna i drift. Då den nya kärntekniklagen trätt i kraft i februari 1984 kompletterades ansökningarna med SKB:s första program, FoU-program 84, som därmed också blev ett ansökansunderlag. Regeringen gav i juni 1984 reaktorinnehavarna laddningstillstånd för reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3. I beslutet skrev regeringen att KBS-3-metoden ”i sin helhet i allt väsentligt befunnits kunna godtas med hänsyn till säkerhet och strålskydd”. KBS-3-metoden har sedan dess legat till grund och utgjort planeringsförutsättning för SKB:s Fud-program. Parallellt har SKB följt utvecklingen av andra metoder och vid ett antal tillfällen utvärderat dessa i förhållande till KBS-3-metoden.

Fud-programmets fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s verksamhet har legat. I Fud-program 2010 fanns en kort sammanfattning av de program som SKB har presenterat fram till och med 2007. Därefter har en sammanfattning gjorts av det närmast föregående Fud-programmet.

1.2.1 Fud-program 2016

Inför Fud-program 2016 hade SKB och reaktorinnehavarna samråd med SSM. Syftet var att säkerställa att de villkor som regeringen ställt inför Fud-program 2016 skulle uppfyllas. Villkoren avsåg utveckling av avvecklingsplaner och rivningsstudier samt ett tydligare och mer strukturerat Fud-program som klargör hur forsknings- och utvecklingsåtgärder planeras, motiveras och utvärderas i syfte att uppfylla ställda krav. För att uppfylla villkoren gavs Fud-program 2016 en ny struktur i fyra delar.

I del I, Verksamhet och handlingsplan, beskrevs avfallssystemet och handlingsplanen för att ta i drift och slutligen avveckla de verksamheter som behövs för att slutförvara det radioaktivt avfallet och det använda kärnbränslet. Utifrån handlingsplanen motiverades och sammanfattades de planerade insatserna inom forskning och teknikutveckling under Fud-perioden (2017–2022). I denna del beskrevs också det systematiska arbetssätt som SKB har utvecklat för att genomföra nödvändig forskning, utveckling och demonstration.

I del II, Avfall och slutförvaring, beskrevs de planerade forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna för det låg- och medelaktiva avfallet, det använda kärnbränslet och förvarssystemens olika delar. Det nuvarande kunskapsläget redovisades översiktligt och hänvisningar gjordes till mer detaljerad resultatredovisning i underlagsrapporter.

I del III, Avveckling av kärntekniska anläggningar, presenterades planeringen för avvecklingen av kärnkraftsreaktorerna och SKB:s anläggningar. Här beskrevs de beroenden och den flexibilitet som finns i systemet samt planerat utvecklingsarbete.

I del IV, Övriga frågor, beskrev kunskapsläget och planerade insatser inom två övriga områden som är av intresse för SKB, frågeställningar kring informationsbevarande över generationer och utvecklingen inom borrhål av och deponering i djupa borrhål.

SSM:s sammanfattande bedömning av Fud-program 2016 var att den redovisade forsknings- och utvecklingsverksamheten är tillräckligt allsidig och de planerade åtgärderna för hantering av kärnavfall och använt kärnbränsle samt avveckling och rivning av de kärntekniska anläggningarna är ändamålsenliga för att uppfylla kärntekniklagen. SSM konstaterade att det finns ett fortsatt långsiktigt behov av forskning och utveckling inom hantering och slutförvaring av kärnkraftens restprodukter samt avveckling och rivning av kärnkraftverken. Vidare angav SSM att SKB behöver utveckla beskrivningen av kärnämneskontroll.

Regeringen beslutade att programmet uppfyllde kärntekniklagens krav och ställde som villkor för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten att redovisningen ska omfatta forskning och utveckling avseende avveckling, nedmontering och rivning samt hantering och slutförvaring av kärnkraftens restprodukter. I regeringsbeslutet stod också att SKB i kommande Fud-program ska behålla

den struktur och indelning som använts för Fud-program 2016. Vidare efterfrågades en beskrivning av hur kompetensutveckling och kompetensförsörjning ska säkras i ett långtidsperspektiv, planer och strategier för långlivat avfall samt en systemövergripande beskrivning av logistiken för hantering av rivningsavfall och transporter.

1.2.2 Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2016

Låg- och medelaktivt avfall

När Fud-program 2019 redovisas pågår ett tillståndsärende i Mark- och miljödomstolen och hos SSM avseende utbyggnaden av SFR för drift- och rivningsavfall.

I december 2014 lämnade SKB in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för utbyggnad av SFR. Dessa ansökningar har granskats och SKB har löpande svarat på kompletteringsbegäranden från myndigheter och remissinstanser. I januari 2019 tillstyrkte SSM att SKB ges tillstånd enligt miljöbalken att bygga ut SFR. Huvudförhandlingen i Mark- och miljödomstolen genomförs hösten 2019. SSM yttrar sig till domstolen i sin roll som remissinstans.

Under 2015–2019 genomfördes en värdering med avseende på säkerheten efter förslutning för föreslaget slutförvarskoncept för SFL. Resultaten indikerar att förvarskonceptet har förutsättningar att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning, givet att platsen uppvisar tillräckligt goda egenskaper vad gäller att begränsa ämnestransport i berget.

I Fud-program 2016 beskrevs planerna för mellanlagring av långlivat avfall i det utbyggda SFR. Denna strategi har ändrats och i nuvarande planer kommer mellanlagring ske antingen på reaktorinnehavarnas kraftverksområden eller på annan plats.

Även strategin för hur reaktortankarna från BWR och PWR ska deponeras har ändrats sedan föregående Fud-program. Då var planerna att deponera reaktortankarna från BWR och PWR hela i det utbyggda SFR respektive SFL. Enligt nuvarande planering kommer BWR-reaktortankarna att segmenteras. Det finns också ett inriktningsbeslut att segmentera PWR-reaktortanken från Ringhals 2. Delarna från reaktortankarna kommer att mellanlagras på respektive kraftverksområde (eller på annan plats). När slutförvaren är etablerade transporteras de segmenterade reaktortankarna till respektive slutförvar för deponering. Beslut gällande reaktortankarna för Ringhals 3 och 4 kommer att fattas närmare utvecklingen av dessa reaktorer.

KBS-3-systemet

Hösten 2017 hölls huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen för KBS-3-systemet. I januari 2018 lämnade både SSM och domstolen sina respektive yttranden till regeringen. SSM tillstyrkte SKB:s ansökan enligt kärntekniklagen. Domstolen var positiv på flera viktiga punkter, men efterlyste mer underlag om kopparkapslarna. SKB lämnade ytterligare underlag till regeringen i april 2019 och väntar nu på regeringens beslut vad gäller tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen.

1.2.3 Fud-program 2019

Fud-program 2019 har i huvudsak samma struktur som Fud-program 2016. Syftet med strukturen är att tydliggöra de planerade åtgärdernas koppling mot de övergripande målen. Del IV, Övriga områden, som fanns i Fud-program 2016 utgår och ingår nu i del I. Fud-program 2019 är därmed indelat i tre delar:

- Del I Verksamhet och handlingsplan.
- Del II Avfall och slutförvaring.
- Del III Utveckling av kärntekniska anläggningar.

Fud-program 2019 riktar sig främst till sakkunniga och beslutsfattare på myndigheter men även till andra intressenter som är kunniga i kärnavfallsfrågor. Experters behov av information i specifika frågor tillmötesgår i referenser.

Förhållandet mellan innehållet i Fud-programmet och ansökningshandlingar för nya anläggningar behöver vara tydligt. SKB har ambitionen att undvika dubbelredovisning och SSM har uttryckt sin åsikt att de inte vill föregripa yttranden i eventuella tillståndsärenden i samband med granskning och utvärdering av Fud-programmet. Dokumentationen inom tillståndsprövningarna kommer att beskriva majoriteten av kvarvarande forsknings- och utvecklingsbehov inom KBS-3-systemet. I Fud-programmet ges därför en mindre detaljerad beskrivning av dessa frågor med referenser till inlämnad dokumentation inom respektive tillståndsärende.

Sammanfattningsvis bör dubbelredovisning undvikas för att undvika dubbel prövning inför regeringsbeslut och av tillståndsgiven verksamhet hos SSM. En översiktlig beskrivning av pågående och planerad forskning ges i Fud-programmet och en mer detaljerad beskrivning av utvecklingen inför uppförande av nya anläggningar ges i de planer och program som ingår i ansökningshandlingarna för respektive anläggning.

För att undvika dubbelredovisning till SSM hänvisas till följande redovisningar:

- De ansökningar med kompletteringar som SKB har lämnat in om ett system för slutförvaring av använt kärnbränsle.
- De ansökningar med kompletteringar som SKB lämnat in om utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR).
- Studier och planer för avveckling av kärnkraftsreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar.
- Säkerhetsredovisningar (SAR) och återkommande helhetsbedömningar för Clab och SFR.
- De regelbundna planrapporterna.

Ansökningarna enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet lämnades in 2011. Där redovisas den verksamhet som ska leda fram till bygge, drift och slutlig deponering. I ansökningarna ingår också resultat från analyser av säkerheten under drift och efter förslutning. SKB har lämnat in sex kompletteringar till Mark- och miljödomstolen med anledning av de remissynpunkter som inkommit. SKB har också löpande svarat på frågor och begäranden om kompletteringar och förtydliganden från SSM.

En ansökan enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen lämnades in 2006. Ansökan kompletterades 2009 med avseende på en sammanslagning av inkapslingsanläggningen med Clab till en integrerad anläggning, Clink. 2011 gjordes ytterligare en komplettering med de delar av ansökningarna som berör KBS-3-systemet. Under sin granskning av ansökan begärde SSM 2012 in kompletteringar. Dessa besvarade SKB genom att lämna in en uppdatering av den förberedande preliminära säkerhetsredovisningen i slutet av 2014 och kompletteringar av ansökningarna till både SSM och Mark- och miljödomstolen i mars 2015. I den sistnämnda kompletteringen ingår även ett tilläggsyrkande för att utöka mellanlagringen i Clab till 11 000 ton använt kärnbränsle.

Kungörelse av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen gjordes i januari 2016. Huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen hölls hösten 2017 och i januari 2018 lämnade både SSM och Mark- och miljödomstolen sina yttranden till dåvarande Miljö- och energidepartementet (från 1 april 2019 Miljödepartementet). I skrivelser från departementet den 1 juni 2018 gavs SKB tillfälle att komplettera ärendet enligt de frågor som Mark- och miljödomstolen har identifierat avseende kapselns egenskaper och den långsiktiga säkerheten (korrosionsformer och andra processer). I juni 2018 fattade Oskarshamns kommun ett positivt beslut i vetofrågan och godkände uppförande av Clink. SKB besvarade i april 2019 begäranden om kompletteringar till Miljödepartementet.

I slutet av 2014 lämnade SKB in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för utbyggnad av SFR och för närvarande pågår tillståndsprövningar. Kompletterande underlag i prövningarna lämnades in 2015–2017. I januari 2019 tillstyrkte SSM att SKB ges tillstånd enligt miljöbalken att bygga ut SFR. Huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen sker under hösten 2019.

SKB är, som tillståndshavare, skyldig att lämna olika redovisningar till SSM för de anläggningar som är i drift. Detta gäller i dag Clab och SFR. Redovisningarna utgörs främst av anläggningarnas säkerhetsredovisningar och återkommande helhetsbedömningar av strålsäkerheten som ska göras minst vart tionde år.

Varje kärnteknisk anläggning har en avvecklingsplan som tas fram innan anläggningen uppförs och därefter hålls aktuell tills anläggningen är avvecklad. Respektive tillståndshavare anmäler principiella förändringar till SSM och redovisar planen på nytt till myndigheten samtidigt med den återkommande helhetsbedömningen.

En annan redovisning som kopplar till Fud-programmet är planrapporten (avsnitt 1.3). Där redovisas den beräknade framtida kostnaden för att ta hand om det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet samt att avveckla kärnkraftsreaktorerna. Kostnadsredovisningen baseras på de planer som redovisas i Fud-programmet.

1.3 Finansiering

Kostnaderna för att ta hand om kärnkraftverkens driftavfall betalas löpande av reaktorinnehavarna, medan finansieringen av kärnavfallsprogrammet i övrigt bygger på att reaktorinnehavarna avsätter medel i en särskild fond, Kärnavfallsfonden. Det senare regleras i finansieringslagen och tillhörande förordning.

Vart tredje år upprättar SKB en kostnadsberäkning, planrapport, på uppdrag av reaktorinnehavarna. Redovisningen lämnas in till Riksgäldskontoret⁶ som granskar SKB:s beräkning och lämnar förslag på avgifter och säkerheter. Avgifterna och säkerheternas storlek beslutas av regeringen. Reaktorinnehavarna betalar in medlen till Kärnavfallsfonden. Enligt regeringens föreskrifter får dessa medel placeras på räntebärande konto i Riksgäldskontoret, i skuldförbindelser utfärdade av staten och säkerställda bostadsobligationer. En del av fonden kan även placeras i företagsobligationer och aktier.

Vid årsskiftet 2018/2019 fanns cirka 69 miljarder kronor i reaktorinnehavarnas andelar av Kärnavfallsfonden (marknadsvärdet). Därutöver har cirka 44 miljarder kronor (i dagens prisnivå) använts för bland annat lokalisering, platsundersökningar, uppbyggnad och drift av dagens system och för forsknings- och utvecklingsarbete. Under åren 2018 till 2020 är den genomsnittliga avgiften 5,0 öre per producerad kilowattimme el för de kärnkraftverk som är i drift. Barsebäck Kraft AB betalar en årlig avgift på 543 miljoner kronor under samma period.

Förutom att betala avgifter, ställer reaktorinnehavarnas moderbolag säkerheter för att täcka de avgifter som ännu inte är betalda. För de reaktorer som är i drift ställs även en säkerhet för det fall att fonden inte skulle komma att räcka på grund av oplanerade händelser. Totalt uppgår säkerheterna till 44 miljarder kronor.

⁶ Riksgäldskontoret övertog SSM:s ansvar enligt finansieringsförordningen den 1 september 2018.

2 Beskrivning av avfallssystemet

Sveriges avfallssystem kan delas in i två huvuddelar: systemet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall samt systemet för omhändertagande av det använda kärnbränslet (KBS-3-systemet). Samtliga anläggningar i KBS-3-systemet kommer att drivas av SKB. I systemet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall finns både anläggningar som drivs i reaktorinnehavarnas och andra avfallsproducenters regi (lokala markförvar och mellanlager) och anläggningar som drivs, eller kommer att drivas, i SKB:s regi (SFR, SFL).

SKB ansvarar för transportsystemet, som är gemensamt för det låg- och medelaktiva avfallet och det använda kärnbränslet. Transporterna sker huvudsakligen till sjöss, eftersom kärnkraftverken och SKB:s anläggningar ligger vid kusten. Undantag är Ågestaverket där transport av rivningsavfallet kommer att ske på landsväg.

Figur 2-1 ger en översikt av det kompletta systemet för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall och använda kärnbränsle. Bilden visar flödet från reaktorinnehavarna och andra avfallsproducenter via mellanlager och behandlingsanläggningar till olika typer av slutförvar. Helt dragna linjer representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar. Nedanstående avsnitt ger en beskrivning av samtliga befintliga och planerade anläggningar i systemet.

2.1 Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall

Systemet för kortlivat låg- och medelaktivt avfall är delvis redan byggt. SKB:s slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, togs i drift 1988. Dessutom finns det ett antal lokala anläggningar som drivs av kärnkraftsföretagen, till exempel markförvar för avfall med mycket låg aktivitet. Det finns även anläggningar belägna i Studsvik som ägs av AB SVAFO, Cyclife Sweden AB och Studsvik Nuclear AB. Dessa anläggningar omfattar behandlingsanläggningar, mellanlager och markförvar.

SKB har ansökt om tillstånd att bygga ut SFR för att få plats för tillkommande kortlivat drift- och rivningsavfall.

Det långlivade avfallet ska slutförvaras i SFL som kommer att vara den sista av SKB:s anläggningar att tas i drift.

2.1.1 Anläggningar för kortlivat avfall

Behandling av avfall

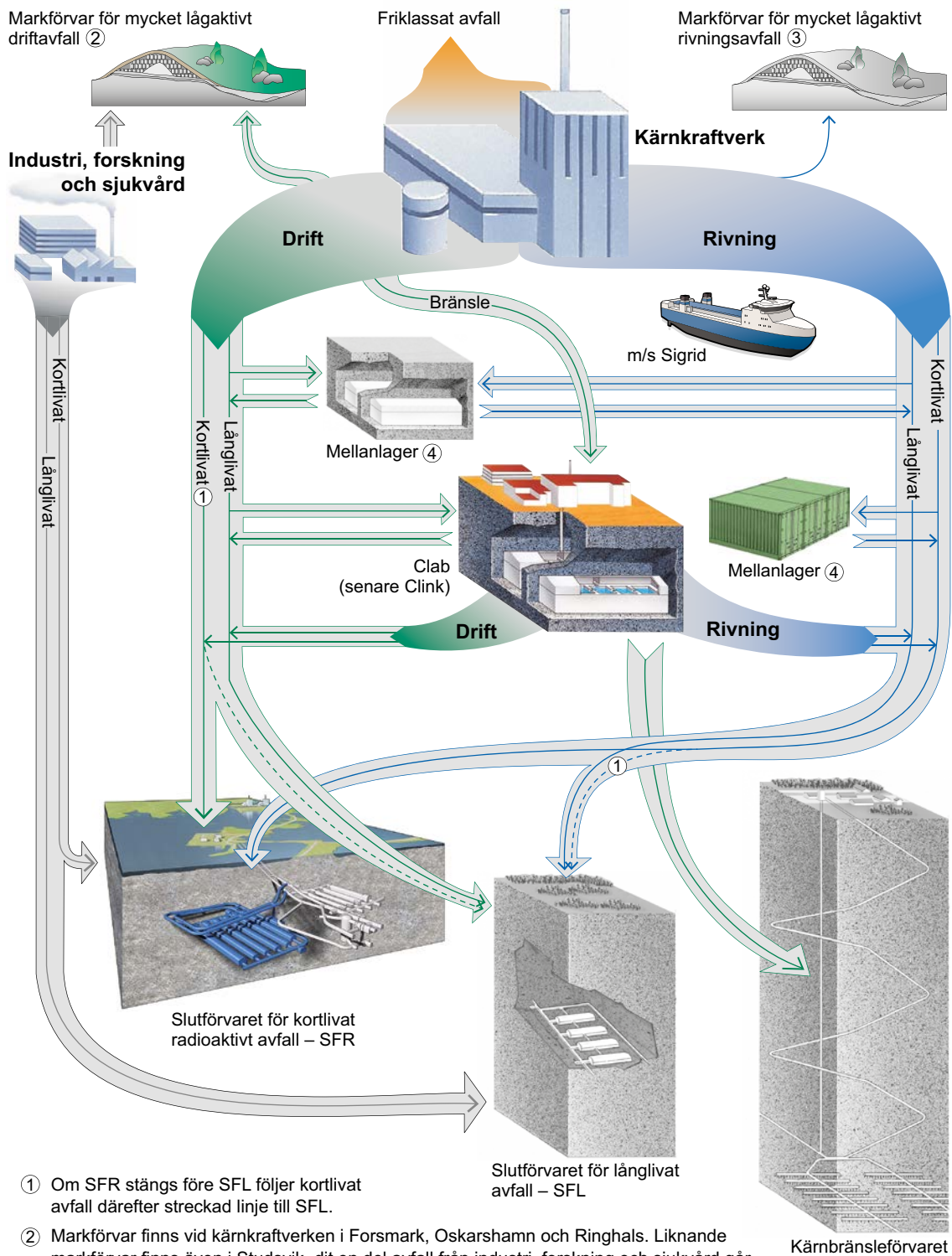
Vid kärnkraftverken, i Studsvik och på Clab finns behandlingsanläggningar för kortlivat avfall. Här behandlas och förpackas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för friklassning, deponering i SFR eller i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara att friklassa materialet, reducera volymen, koncentrera aktiviteten, solidifiera eller konditionera materialet.

Mellanlager

Vid kärnkraftverken finns anläggningar för mellanlagring av kortlivat avfall. Det finns buffertlager för driftavfall inför vidare hantering såsom behandling och packning. Det finns även buffertlager för färdiga avfallskollin inför transport till och deponering i SFR.

Nedmontering och rivning av de första sju reaktorerna⁷ planeras att starta innan SFR-utbyggnaden kan ta emot rivningsavfall. Detta innebär att den befintliga mellanlagringskapaciteten för kortlivat avfall kommer att behöva utökas. Planerna för detta beskrivs i avsnitt 3.3.3. Ett nytt mellanlager för lågaktivt avfall kan utgöras av en hårdgjord yta eller en enklare byggnad för uppställning av ISO-containrar. För medelaktivt avfall krävs en byggnad med strålskärning.

⁷Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågestareaktorn.



- ① Om SFR stängs före SFL följer kortlivat avfall därefter streckad linje till SFL.
- ② Markförvar finns vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Liknande markförvar finns även i Studsvik, dit en del avfall från industri, forskning och sjukvård går.
- ③ Möjligt alternativ för mycket lågaktivt rivningsavfall. Slutligt beslut om hantering av mycket lågaktivt rivningsavfall är ännu ej fattat.
- ④ Mellanlager lokalt på kärnkraftverken eller annan plats. Mellanlagring av långlivat avfall sker i dag vid kärnkraftverken, i Clab och i Studsvik.

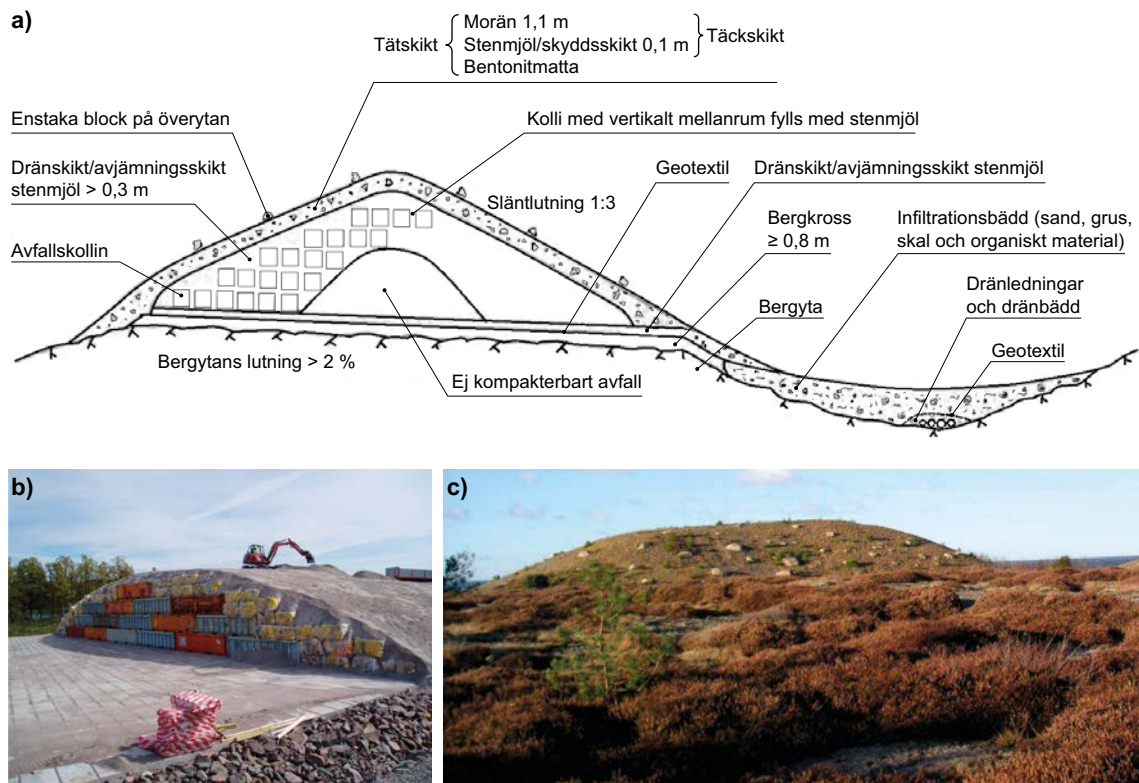
Figur 2-1. Systemet för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall och använda kärnbränsle. Heldragna linjer representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar.

Markförvar

Delar av det lågaktiva avfallet innehåller mycket låg aktivitet. I dag deponeras detta avfall i de befintliga markförvar som är licensierade för driftavfall. Dessa finns på industriområdena vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Enligt nuvarande praxis krävs att området står under institutionell kontroll i cirka 30 år efter att det sista avfallet deponerats. Markförvaren som i dag finns på kraftverksområdena är endast licensierade för driftavfall.

Avfall som får deponeras i markförvar innehåller till övervägande del kortlivade radionuklider med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år, det vill säga på motsvarande sätt som i SFR. Såväl aktiviteten i enskilda kollin som den totala aktiviteten som tillåts i ett markförvar är dock avsevärt lägre än i SFR.

Markförvarens konstruktion skiljer sig något mellan förläggningsplatserna för att passa den lokala geologin. Samtliga markförvar bygger på ett flerbarriärssystem som fördröjer spridning av radioaktiva ämnen tills aktiviteten klingat av. Liksom i de geologiska förvaren krävs ett vattenflöde för att radionukliderna ska transporteras ut ur markförvaret till biosfären. Vattenflöden genom markförvaren begränsas primärt genom att de är belägna över grundvattennivån och genom att de har försetts med en tät övertäckning (figur 2-2). Markförvaren konstrueras med dränerande material runt och mellan kollina med avfall och en passiv avrinning mot en infiltrationsbädd. Infiltrationsbäddens konstruktion, med exempelvis skalgrus, bidrar med effektiv fastläggning av radionuklider för att fördröja transport till dess att radioaktiviteten har klingat av. Infiltrationsbädden har en kontrollerad dränering mot en recipient för att säkerställa god utspädning av radionuklider i det mindre sannolika fallet att övriga barriärer fallerar.



Figur 2-2. a) Schematisk beskrivning av Ringhals markförvarskonstruktion. b) Exempel på markförvar under pågående deponeringskampanj. c) Ringhals markförvar.



Figur 2-3. Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, består av två bergssalar för betongtankar (1-2BTF), en bergssal för lågaktivt avfall (1BLA), en bergssal för medelaktivt avfall (1BMA) och en silo för medelaktivt avfall. a) Vy över ovanmarksdelen, b) SFR under mark, c) bergssal, d) vy över silotopp.

Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall

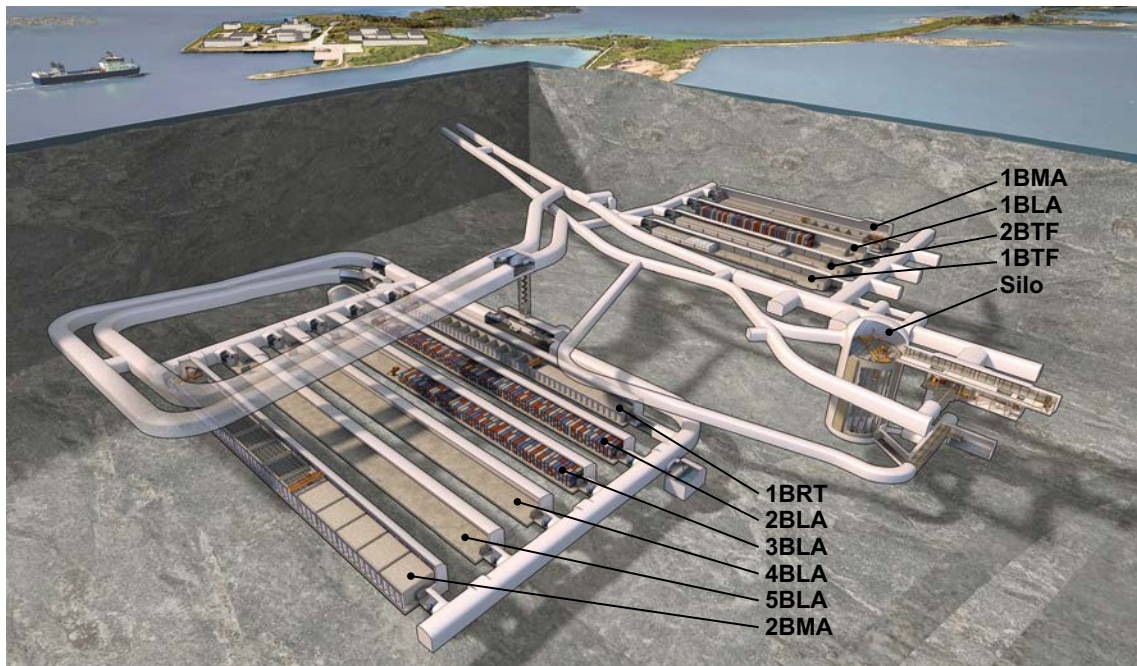
SFR ligger vid Forsmarks kärnkraftverk (figur 2-3). Förvaret är placerat under Östersjön med cirka 60 meter bergtäckning. Från hamnen i Forsmark leder två, kilometerlånga, tillfartstunnlar till förvarsområdet. Förvarsutrymmena utgörs i dag av fyra 160 meter långa bergssalar och ett 70 meter högt förvarsutrymme där en betongsilo byggts. Anläggningens totala lagringskapacitet är 63 000 kubikmeter.

Säkerheten efter förslutning för SFR baseras på att *begränsa* mängden långlivade radionuklider i förvaret samt på *fördröjning* av radionuklider i de tekniska och naturliga barriärerna. Utformningen av varje bergssal är anpassad utifrån aktivitetsnivån på det avfall som deponeras. I en av de fyra bergssalarna förvaras lågaktivt avfall. I två av bergssalarna förvaras medelaktivt avfall med lägre aktivitetsnivåer. Det medelaktiva avfallet med högre aktivitet placeras i den fjärde bergssalen eller i betongsilon. Silon kommer att innehålla huvuddelen av aktiviteten i SFR.

Avfallet i SFR kommer främst från kärnkraftverken, Clab, Studsvik och Ågesta medan en mindre del kommer från industri, sjukvård och forskning. Vid årsskiftet 2018/2019 hade cirka 40 000 kubikmeter avfall deponerats.

När SFR byggdes var avsikten att anläggningen skulle ta emot avfall fram till och med 2010. Genom att kärnkraftverken drivits vidare kommer SFR:s driftskede att pågå under längre tid än vad som ursprungligen avsågs, vilket ställer nya krav på underhållet av anläggningen. Underhållsprogrammet inkluderar förutom avhjälpan och förebyggande underhåll även identifiering, hantering och förebyggande av åldersrelaterad påverkan.

I dag slutförvaras endast driftavfall i SFR. SFR:s lagringskapacitet kommer att utökas för att ge plats för tillkommande kortlivat avfall från både drift och rivning. SKB har ansökt om att få bygga ut anläggningen med ytterligare cirka 117 000 kubikmeter lagringskapacitet till att totalt rymma cirka 180 000 kubikmeter avfall. Figur 2-4 visar SFR som det enligt nuvarande planer kommer att se ut när det är fullt utbyggt.



Figur 2-4. När SFR är fullt utbyggt kommer det att rymma ytterligare sex bergssalar; fyra för lågaktivt avfall (2–5BLA), en för medelaktivt avfall (2BMA) och en bergssal för reaktortankar (1BRT).

2.1.2 Anläggningar för långlivat avfall

Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken finns i dag möjlighet att segmentera vissa förbrukade hårdkomponenter för att därefter kunna placera dessa i stältankar för lokal mellanlagring. Detta har tidigare genomförts i samband med uppgraderingar av reaktorerna, men genomförs för närvarande främst som en del av avvecklingsprojekten. Reaktortankarnas interndelar från Barsebäck 1 och Barsebäck 2 är segmenterade. Motsvarande arbete har även gjorts på Oskarshamn 2 medan segmenteringen pågår på Oskarshamn 1. Den planeras vara klar under våren 2020.

AB SVAFO utreder för närvarande förutsättningarna för att hantera så kallat historiskt avfall som härrör från forskning och utveckling inom de svenska kärnforskningsprogrammen. Utredningen ska analysera hur de olika avfallsfraktionerna ska hanteras och vilka möjligheter som finns för hantering och slutförvaring.

Mellanlager

SKB planerar att driftsätta SFL omkring 2045. Fram till dess behöver det långlivade avfallet mellanlagras. I dag mellanlagras den största delen av det långlivade avfallet på kraftverken, i Clab och i Studsvik. Clab är främst avsett för mellanlagring av använt kärnbränsle men i bassängerna mellanlagras även kassetter med långlivat driftavfall (styrstavar från BWR och andra hårdkomponenter).

Det långlivade avfall som uppkommer från rivning av de första reaktorerna bedöms kunna rymmas i befintliga mellanlager vid kraftverken alternativt på annan plats.

Forsmarks Kraftgrupp AB driver ett mellanlager i en byggnad på kraftverksområdet för både kort- och långlivat avfall som uppkommit i samband med revisioner och effekthöjningar. Det långlivade avfallet består av segmenterade interndelar och har placerats i stältankar. I dag mellanlagras cirka 20 stältankar med långlivat avfall som senare ska deponeras i SFL.

OKG Aktiebolag driver ett mellanlager för långlivat avfall i ett särskilt bergrum på Simpevarps-halvön (BFA). Drifttillståndet innehas av OKG Aktiebolag, men BFA är godkänt för mellanlagring av hårdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. I dag lagras avfall från Oskarshamns kärnkraftverk och Clab i BFA. BFA bedöms ha tillräcklig kapacitet för det långlivade avfall som uppkommer vid rivningen av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

Ringhals AB driver ett mellanlager i en byggnad som bedöms ha tillräcklig kapacitet för det långlivade avfall som uppkommer vid rivningen av Ringhals 1 och Ringhals 2.

Barsebäck Kraft AB driver ett mellanlager i en byggnad på kraftverksområdet där långlivat avfall från Barsebäck 1 och Barsebäck 2 lagras. Avfallet består av segmenterade interndelar som placeras i ståltankar inför mellanlagringen. För att kunna friklassa Barsebäck Kraft AB:s område innan SFL tas i drift planeras ståltankarna att transporteras till ett externt mellanlager. Transporterna planeras att utföras under den period som nedmontering och rivning av reaktorerne pågår.

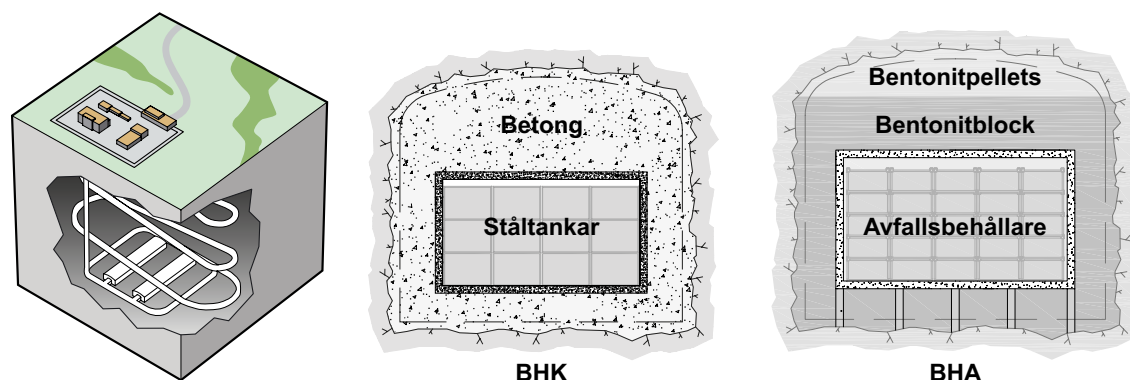
Slutförvar för långlivat avfall

SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet på ett relativt stort djup. Detta slutförvar (SFL) kommer att vara den slutförvarsanläggning i kärnavfallssystemet som tas i drift sist. Lokaliseringen av förvaret är ännu inte beslutad. SFL:s förvarsvolym kommer att vara relativt liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar. Den erforderliga lagringskapaciteten uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter.

Utvecklingen av förvaret är i ett tidigt skede. SKB har tagit fram ett förvarskoncept som rymmer två förvarsdelar, en för hårdkomponenter och segmenterade PWR-reaktortankar från kärnkraftverken och en för historiskt avfall. Säkerheten efter förslutning för det föreslagna förvarskonceptet för SFL baseras på *fördröjning* av radionuklider i de tekniska och naturliga barriärerna.

Hårdkomponenterna, vilka är metalliskt avfall, utgör cirka en tredjedel av volymen, men innehåller (initialt) huvuddelen av radioaktiviteten. Förvarsdelen för hårdkomponenter planerar SKB att utforma med en teknisk barriär av betong.

Det historiska avfallet lagras och hanteras av AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB i Studsvik. Ytterligare avfall tillkommer från Cyclife Sweden AB och övrig svensk forskning, industri och sjukvård. För denna förvarsdel föreslår SKB att den tekniska barriären utformas av bentonit och betong. Förvarskonceptet illustreras i figur 2-5.



Figur 2-5. Preliminär anläggningsutformning (t v) och föreslaget förvarskoncept för SFL med en bergssal för hårdkomponenter (BHK) och en bergssal för historiskt avfall (BHA).

2.2 Anläggningar inom KBS-3-systemet

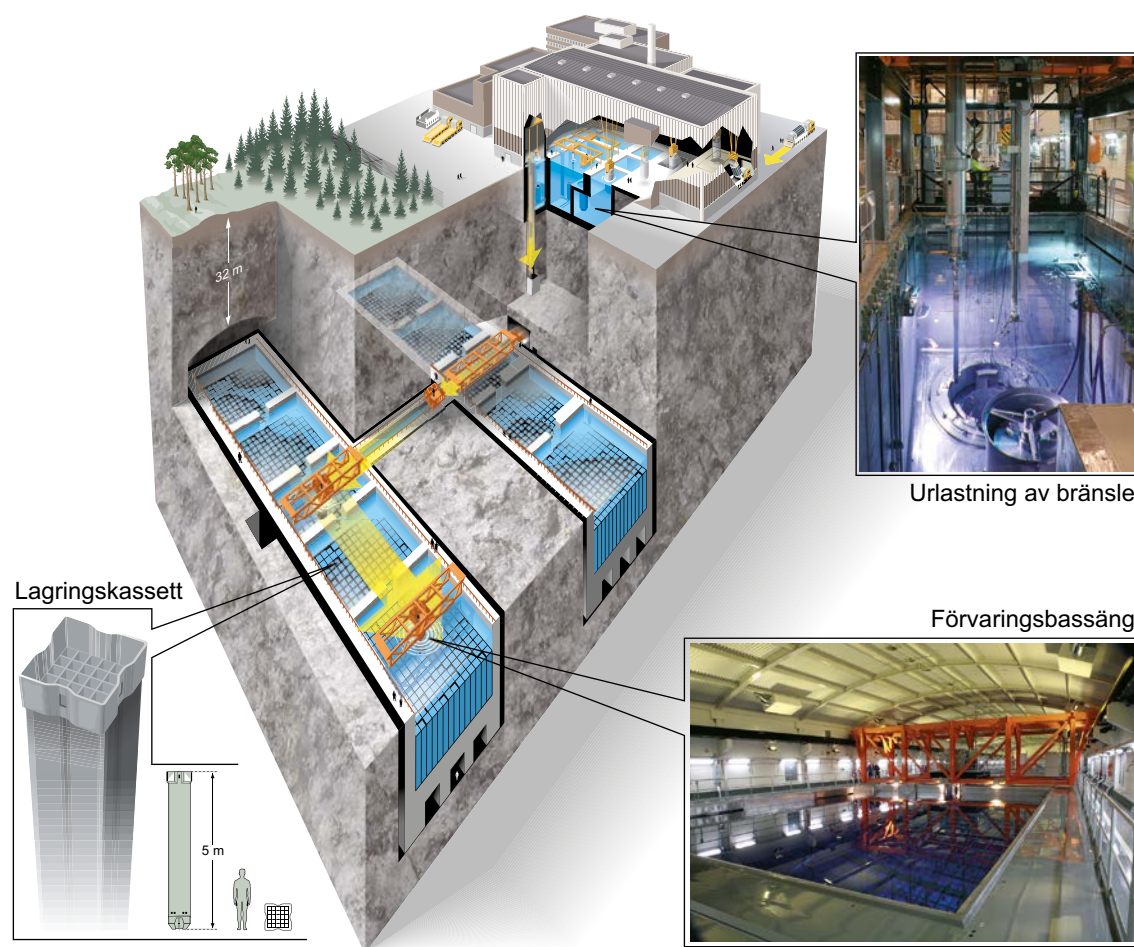
SKB:s centrala mellanlager för använt kärnbränsle i Oskarshamn, Clab, har varit i drift sedan 1985. SKB har ansökt om tillstånd för att bygga en anläggningsdel för inkapsling av kärnbränslet i anslutning till Clab samt ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, i Forsmark. Därutöver planerar SKB att bygga en anläggning för maskinbearbetning, montering och kvalitetssäkring av kopparkapslarna.

Centralt mellanlager för använt kärnbränsle

Clab är lokaliserat vid kärnkraftverket i Oskarshamn. Anläggningen består av en mottagningsdel i marknivå och en förvaringsdel drygt 30 meter under markytan. I mottagningsdelen tas transportbehållarna med det använda kärnbränslet emot och lastas ur under vatten. Bränslet placeras därefter i lagringskassetter. Kassetterna förs med en bränslehiss ner till förvaringsdelen där det använda kärnbränslet mellanlagras i vattenbassänger (figur 2-6).

Det finns två typer av kassetter för använt kärnbränsle, normalkassetter och kompaktkassetter. De två kassettyperna har samma yttre mått, men en kompaktkassetten rymmer fler bränsleelement.

Själva lagringsutrymmet består av två bergrum med cirka 40 meters avstånd från varandra. De förbinds med en vattenfylld transportkanal. Varje bergrum är ungefär 120 meter långt och innehåller fyra lagringsbassänger och en reservbassäng. Bränslets överkant står åtta meter under vattenytan. Vattnet i bassängerna tjänar både som strålskärm och kylmedel. Vid bassängkanten är strålningsnivån så låg att personalen kan vistas där utan strålskydd.



Figur 2-6. Det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, Clab.

Clab har nu varit i drift i mer än 30 år och uppgraderingar av system och utbyten av komponenter kommer att bli nödvändiga i framtiden. Ett antal projekt pågår eller har nyligen genomförts, bland annat uppgradering av kylkedjan för att få ökad kylkapacitet, byte av brandlarmssystem och anpassningar i anläggningen för att kunna ta emot en ny typ av transportbehållare.

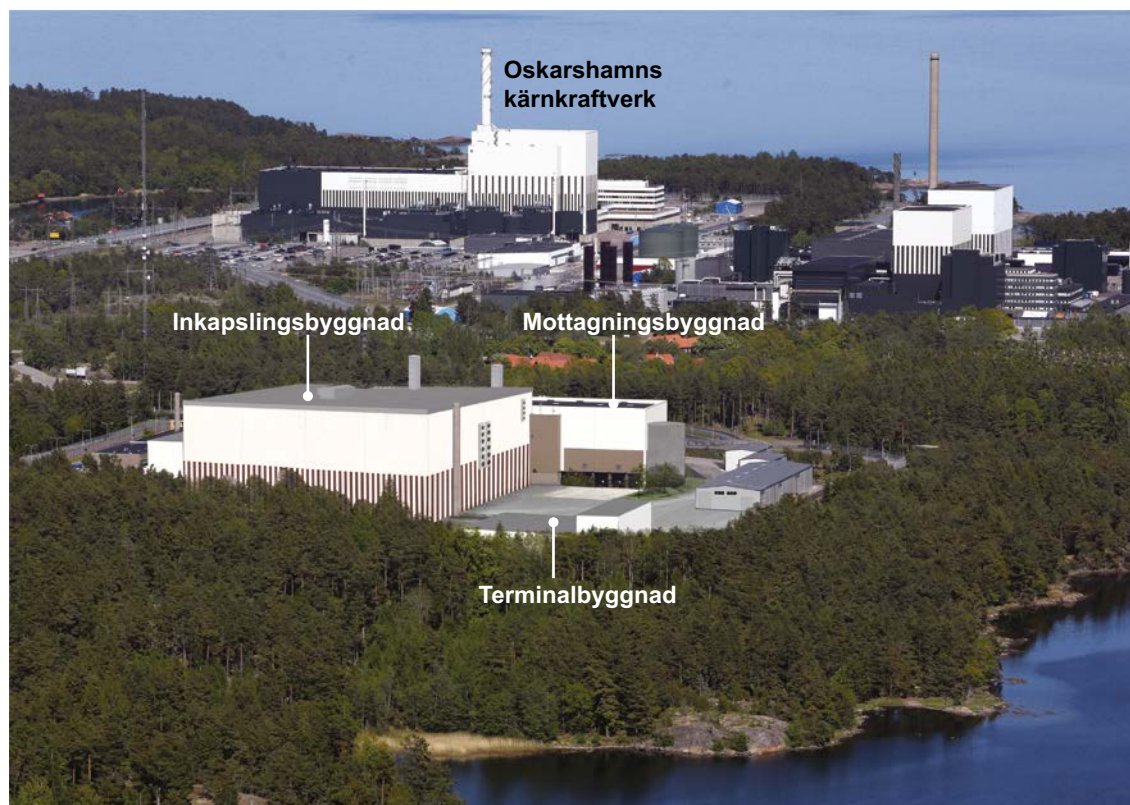
Vid årsskiftet 2018/2019 fanns 7 002 ton bränsle (räknat som ursprunglig mängd uran) i anläggningen. SKB har tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle i Clab. Enligt dagens prognoser beräknas denna lagringsmängd nås cirka 2023/2024. Bassängerna kan rymma totalt cirka 11 000 ton bränsle under förutsättning att de hårdkomponenter som i dag lagras i Clab lastas ur anläggningen och förvaras på annan plats. Under 2015 ansökte SKB enligt kärntekniklagen och miljöbalken, om att utöka den tillåtna mängden till 11 000 ton använt kärnbränsle. Detta hanteras som en del av ansökningarna för hela KBS-3-systemet. Ansökan i sin helhet ligger nu hos regeringen för beslut om tillåtlighet respektive tillstånd.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

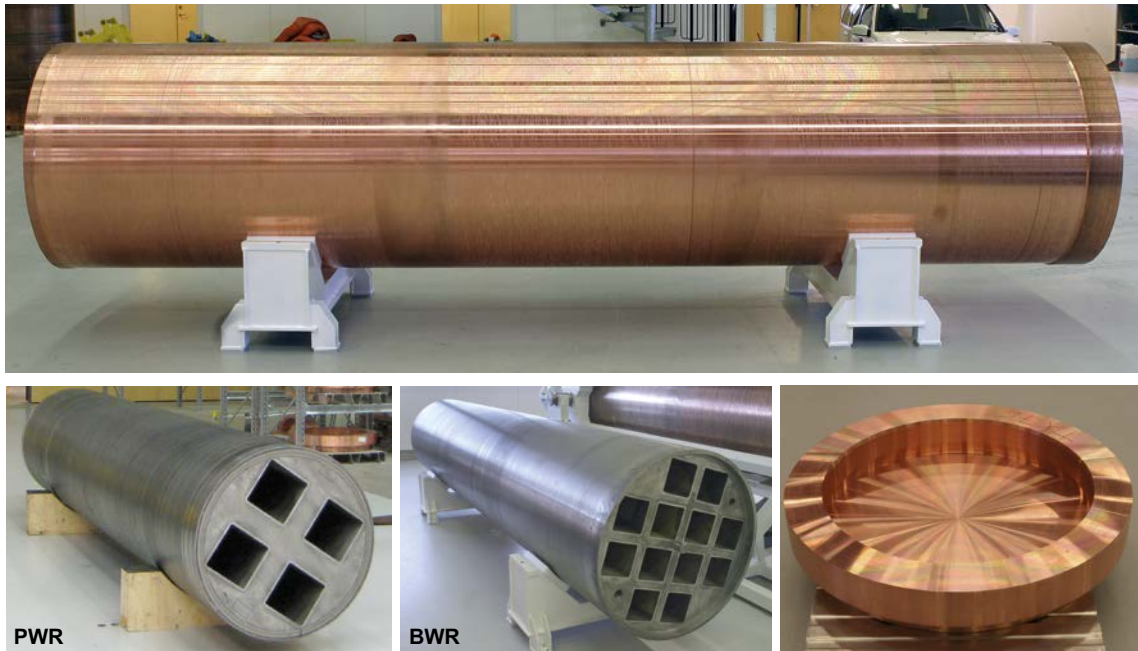
Innan det använda kärnbränslet deponeras ska det kapslas in i kopparkapslar. SKB planerar att göra detta i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab (figur 2-7). När denna inkapslingsdel sammankopplats med Clab kommer de båda anläggningsdelarna att drivas som en integrerad anläggning, Clink.

Kapseln som ska användas består av ett kopparhölje och en insats av segjärn (figur 2-8). Det behövs två typer av insatser, en som rymmer tolv bränsleelement från BWR och en som rymmer fyra bränsleelement från PWR. Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras, se avsnitt 1.1.4. Dessa kan placeras i någon av de två insatstyperna.

Kapselns olika delar, insats, kopparhölje och lock kommer att produceras av olika underleverantörer. SKB kommer att behöva en anläggning för slutgiltig maskinbearbetning, montering och kontroll av kapselkomponenterna. Denna kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning.



Figur 2-7. Bildmontage som visar den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle, Clink.



Figur 2-8. Kopparkapsel med insatser av segjärn för PWR och BWR och kopparlock. Kapselns längd, diameter och koppartjocklek är 4,835 meter, 1,05 meter respektive 0,05 meter. En kapsel med en BWR-insats väger totalt cirka 24,6 ton varav andelen koppar väger 7,4 ton, insatsen 13,6 ton och bränsleelementen 3,6 ton.

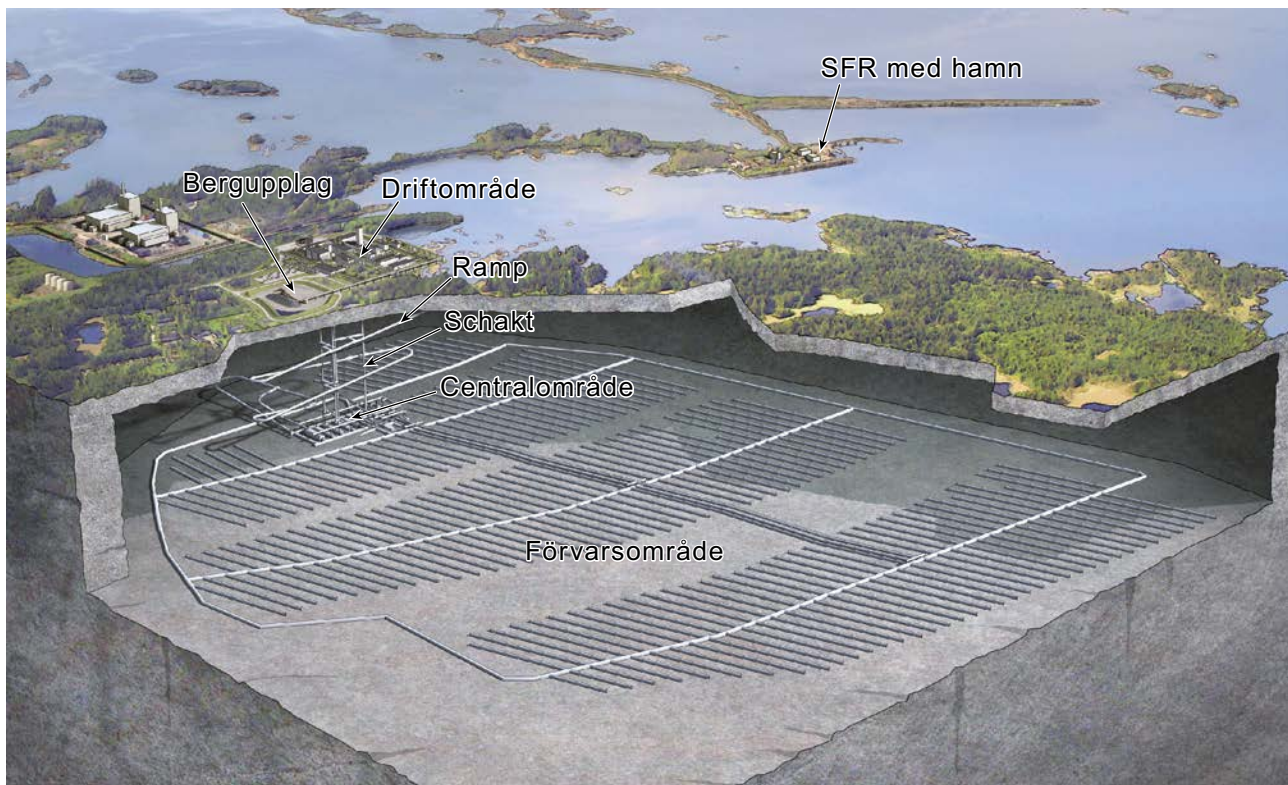
I inkapslingsdelen kommer det att finnas ett antal stationer för olika arbetsmoment där all hantering av bränslet sker fjärrmanövrerat och med strålskärning. Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet placeras i en transportkassett och förs upp i bränslehissen från förvaringsbassängerna under mark.

De bränsleelement som ska placeras tillsammans i en kapsel, väljs ut på ett sådant sätt att den totala värmeeffekten i kapseln inte blir för stor. De valda bränsleelementen torkas i en strålskärnad hanteringscell och lyfts över till kapseln. Luften i kapseln byts ut mot argon innan den försluts. Förslutningen av kopparkapseln görs med friktionssvetsning (FSW, friction stir welding). Kontroll sker både av svetsens yta och att svetsparametrarna hållits inom gällande gränser. Om svetsen godkänns förs kapseln vidare till stationen för maskinbearbetning där kapseln bearbetas till dess slutliga dimensioner. I nästa steg flyttas kapseln till nästa station där förslutningssvetsen kontrolleras med oförstörande provning. Vid behov rengörs kapseln innan den placeras i en speciell transportbehållare för transport till Kärnbränsleförvaret. Clink dimensioneras för att kunna fylla och försluta 200 kapslar per år.

Kärnbränsleförvaret

Arbetet med att finna en lämplig plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle pågick i flera decennier. I slutet av platsvalsprocessen stod valet mellan Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Efter utvärderingar av platsundersökningarna valde SKB Forsmark som plats för Kärnbränsleförvaret. Berget i Forsmark bedömdes ge bättre förutsättningar för att åstadkomma ett långsiktigt säkert förvar efter förslutning. Säkerheten efter förslutning för Kärnbränsleförvaret baseras i första hand på fullständig *inneslutning* av kärnbränslet i kopparkapslar och i andra hand på *fördröjning* av radionuklider i omgivande ler- och bergbarriärer om någon kapsel skulle skadas.

Slutförvarsanläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel (figur 2-9). Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden. Dessutom finns förbindelser till ovanmarksdelen i form av en ramp för fordonstransporter och schakt för hissar och ventilation.



Figur 2-9. Illustration av möjlig utformning av Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

Deponeringsområdena, som tillsammans utgör förvarsområdet, kommer att ligga cirka 470 meter under marknivån. Varje område består av ett stort antal deponeringstunnlar med borrhålor i botten. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen och utformningen av infrastruktur på förvarsnivån, bestäms utifrån bergets egenskaper. Viktiga egenskaper är bland annat läget av stora deformationszoner, förekomst av stora eller mycket vattenförande sprickor och bergets värmeledningsförmåga. Anläggningen ovan mark består av driftområde, bergupplag, eventuella ventilationsstationer och förråd.

Anläggningen dimensioneras för en total mängd använt kärnbränsle motsvarande cirka 6000 kapslar med en deponeringskapacitet på 200 kapslar per år. Kapslarna förs ner till deponeringsnivån via rampen med ett transportfordon. Därefter lastas de om till en deponeringsmaskin för att transporteras ut till deponeringsområdet och slutligen deponeras. Kapslarna placeras i deponeringshålen omgivna av bentonitlera. När samtliga kapslar i tunneln deponerats fylls tunneln igen med lera som kommer att svälla vid kontakt med vatten. Slutligen försluts deponeringstunneln med en betongplugg. När allt bränsle har deponerats fylls även övriga utrymmen igen och anläggningarna ovan mark avvecklas.

2.3 Transportsystemet

SKB:s transportsystem byggdes upp under 1980-talet. Det består av fartyget m/s Sigrid, specialfordon för landtransporter och olika typer av transportbehållare för bränsle och radioaktivt avfall. Fartyget och fordonen används både för transporter av låg- och medelaktivt avfall och för använt kärnbränsle. De olika transportbehållarna är specifikt utvecklade för den avfallstyp de är avsedda för.

M/s Sigrid togs i drift 2014. Hon ersatte m/s Sigyn som användes för transporter under cirka 30 år. Det nya fartyget har, liksom det gamla, dubbla botten och dubbel bordläggning. Konstruktionen skyddar lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Normalt gör fartyget mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken, Studsvik, SFR och Clab.

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken, Clab och Studsvik till SFR. Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärning och kan därför transporteras i ISO-containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärning och merparten gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Avfallet transporteras i transportbehållare med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt avfallet är (figur 2-10).

I dag transporteras en del av det långlivade avfallet, styrtstavar från BWR, från kärnkraftverken till Clab. De transporteras i en transportbehållare med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål. Även det använda kärnbränslet transporteras från kärnkraftverken till Clab i behållare med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar. Dessa behållare är dessutom försedda med kylflänsar för att kyla bort den värme som alstras på grund av bränslets resteffekt.

2.4 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll (Safeguards) syftar till att säkerställa att kärnämnen och kärntekniska anläggningar inte används för framställning av exempelvis kärnvapen. Kärnämneskontrollen är en följd av att Sverige anslutit sig till icke-spridningsfördraget (NPT). Genom fördraget har Sverige åtagit sig att underställa hela sitt kärnenergiprogram internationell kontroll och ha ett system för kärnämneskontroll. I Sverige utförs kärnämneskontroll av det internationella kärnenergiorganet (IAEA), Euratom och SSM. Kärnämneskontrollen regleras både nationellt och internationellt och gäller alla anläggningar där kärnämne hanteras.

SKB:s anläggningar ska uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll. Det innebär bland annat att det ska finnas administrativa system för bokföring och redovisning av kärnämnesinventariet i anläggningarna, samt tekniska system för kontroll och bevakning av att kärnämne inte avleds. All hantering och bearbetning av kärnämne ska redovisas och det ska inte finnas någon möjlighet att bedriva otillåten verksamhet i anläggningarna.

I dag bedrivs kärnämneskontroll på Clab sedan många år tillbaka enligt beprövade rutiner, SSM:s föreskrifter och europeiska kommissionens förordningar.



Figur 2-10. M/s Sigrid samt dagens transportbehållare för kortlivat radioaktivt avfall (ATB) för hårdkomponenter (TK) och använda bränsleelement (TB).

När KBS-3-systemet i sin helhet tas i drift kommer samtliga ingående anläggningar och transportsystemet att omfattas av ett sammanhållet system för kärnämneskontroll för att säkerställa att inget kärnämne avleds. Kontroller kommer att behövas för att verifiera det kärnämne som ska slutförvaras, för att säkerställa att det kapslas in och att det slutligen placeras i slutförvar.

Förutom det använda kärnbränslet finns det visst avfall från svenska historiska kärntekniska anläggningar som innehåller små mängder kärnämne som ska deponeras i SFL. Även detta kärnämne omfattas av kärnämneskontroll. I dag lagras avfallet i ett mellanlager för låg- och medelaktivt avfall (AM, Aktivt mellanlager) vid Studsvik där AB SVAFO är tillståndshavare.

Myndigheterna och kontrollorganen har satt upp regelverk för kärnämneskontrollen, men dessa regelverk är inte fullt utvecklade för inkapslingsanläggningar och geologiska slutförvar. SKB deltar sedan flera år i internationella samarbeten med bland andra IAEA, Europeiska kommissionen och SSM för att bidra till utvecklingen av principer och metoder för kärnämneskontroll i dessa nya typer av anläggningar. Detta samarbete fortgår i olika grupperingar inom de olika organen. Framtagning av nya regelverk och rekommendationer pågår, och det finns förslag på hur kärnämneskontroll kan bedrivas på ett effektivt sätt.

Det är viktigt att parallellt utveckla den tekniska utformningen i anläggningarna och transportsystemet så att den anpassas för en säker och effektiv kärnämneskontroll under driftskedet, se avsnitt 3.3.4 och 3.4.5. Utformning av metoder för kärnämneskontroll efter förslutning av förvaren kommer SKB att kunna bidra med först under drift- och avvecklingskedena. SKB bedömer att anläggningarna kan utformas och verksamhet bedrivas så att det inte försvårar möjligheterna till kärnämneskontroll efter förslutning.

3 Plan för genomförande

I detta kapitel redovisas planeringen för att uppföra och ta i drift nya och utbyggda anläggningar. I kapitlet beskrivs också reaktorinnehavarnas och SKB:s handlingsplaner avseende avveckling av kärntekniska anläggningar.

Kapitlet inleds med en kort redovisning av planerna för att genomföra kärnavfallsprogrammet enligt nuvarande huvudtidsplan. Därefter beskrivs handlingsalternativ och åtgärder för att hantera större förändringar av planeringsförutsättningarna.

3.1 Huvudtidsplan för kärnavfallsprogrammet

SKB:s planering för nya anläggningar utgår från en stegvis beslutsprocess som har sin grund i SSM:s föreskrifter. Föreskrifterna anger, baserat på internationella rekommendationer från bland annat IAEA och OECD/NEA, att utveckling och tillståndsgivning av kärntekniska anläggningar ska ske genom en process där kraven på anläggningen, dess utformning och tekniska lösningar successivt fastställs. Planering för nya anläggningar utgår från de olika tillstånd och medgivanden som erfordras enligt denna stegvisa process och stegen utgör milstolpar. De viktigaste milstolparna, vilka är gemensamma för de planerade anläggningarna, är:

- **Tillstånd enligt kärntekniklagen och tillåtlighet enligt miljöbalken att få bygga, inneha och driva en ny kärnteknisk anläggning** – baserad på en förberedande preliminär säkerhetsredovisning (F-PSAR) och en miljökonsekvensbeskrivning (MKB). I F-PSAR redovisas kraven på säkerhet och strålskydd för anläggningen och verksamheten och hur de kan uppfyllas. Under tillståndsprövningen granskas ansökningarna av SSM och Mark- och miljödomstolen. Berörd kommun ska tillstyrka verksamheten. Beslut om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen meddelas av regeringen. Mark- och miljödomstolen meddelar därefter tillstånd och villkor enligt miljöbalken.
- **Godkännande av att få påbörja uppförande** – då tillstånd erhållits enligt kärntekniklagen måste en ansökan om uppförande lämnas in till SSM för godkännande om att få påbörja uppförandet. Ansökan förser SSM med den information som behövs för att myndigheten ska kunna bedöma om den projekterade anläggningen och verksamheten i uppförande- och driftskedet kommer att uppfylla SSM:s föreskrifter och beslutade tillståndsvillkor. För ett slutförvar ingår även en redovisning av säkerheten efter förslutning. Ansökan inför uppförande behöver innehålla följande handlingar:
 - Ansökan (toppdokument), beskriver tillståndsärendet.
 - Beskrivning av kvalitetssäkring av ansökningshandlingarna.
 - Utveckling och ändringar sedan föregående steg i tillståndsprövningen.
 - Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) som redogör för anläggningens utformning, hur verksamheten anordnas och hur kraven uppfylls. PSAR ska godkännas av SSM.
 - Säkerheten under uppförande (Suus) som beskriver hur uppförandet ska genomföras, inklusive hur verksamheten ska bedrivas, för att hantera de säkerhets- och kvalitetsfrågor under uppförandet, som har betydelse för driftskedet och efter förslutning.
 - Övriga dokument som SSM efterfrågat till exempel planer för forskning och utveckling till kommande steg i tillståndsprövningen och undersökningsprogram för Kärnbränsleförvaret.
 - Avvecklingsplan.
- **Godkännande av säkerhetsredovisningen inför provdrift respektive rutinmässig drift** – baserad på successiva redovisningar av förnyad respektive kompletterad säkerhetsredovisning (SAR). Säkerhetsredovisningen ska sammantaget visa hur anläggningens säkerhet är anordnad och ska avspegla anläggningen som den är byggd, analyserad och verifierad samt visa hur gällande krav på dess konstruktion, funktion, organisation och verksamhet är uppfyllda. SAR ska godkännas av SSM.
- **Godkännande av säkerhetsredovisningen inför förslutning av förvaren** – baserad på en omarbetad säkerhetsredovisning (SAR) och en plan för förslutning och avveckling. Även denna redovisning ska godkännas av SSM.

Driftperioden för ett slutförvar inleds med provdrift som innebär att radioaktivt avfall deponeras. Efter provdriften övergår verksamheten i en förvaltningsfas under så kallad rutinmässig drift. Den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnteknisk anläggning ska minst vart tionde år göra en ny systematisk helhetsbedömning av säkerhet och strålskydd. I samband med dessa görs också en genomgång och sammanställning av läget inom de kunskapsområden som är väsentliga för strålsäkerheten.

De ovanstående milstolparna består av två delar: dels SKB:s sammanställning av ansökningar och/eller säkerhetsredovisningar, dels SSM:s och/eller andra myndigheters godkännande av dessa efter genomförd prövning.

Figur 3-1 visar den övergripande tidsplanen, inklusive tidpunkter för kommande ansökningar, för kärnavfallsprogrammet. Planer för markförvar finns i figur 3-6.

3.2 Genomförandeplan för mycket lågaktivt avfall

I dag finns de anläggningar som behövs för hantering av mycket lågaktivt avfall men vid avvecklingen av kärnkraftsreaktorer kommer volymerna avfall som ska hanteras att öka väsentligt. De kommande avvecklingarna har aktualiserat frågan om hantering av de större volymerna av detta avfall som kommer att genereras. SSM har uttryckt en förväntan på en mer specifik redovisning av mycket lågaktivt avfall jämfört med tidigare Fud-program. I Fud-program 2019 ges en mer detaljerad beskrivning av hanteringen och planeringen för den delen av det lågaktiva avfallet som har mycket låg aktivitet, än i tidigare Fud-program.

3.2.1 Nuläge

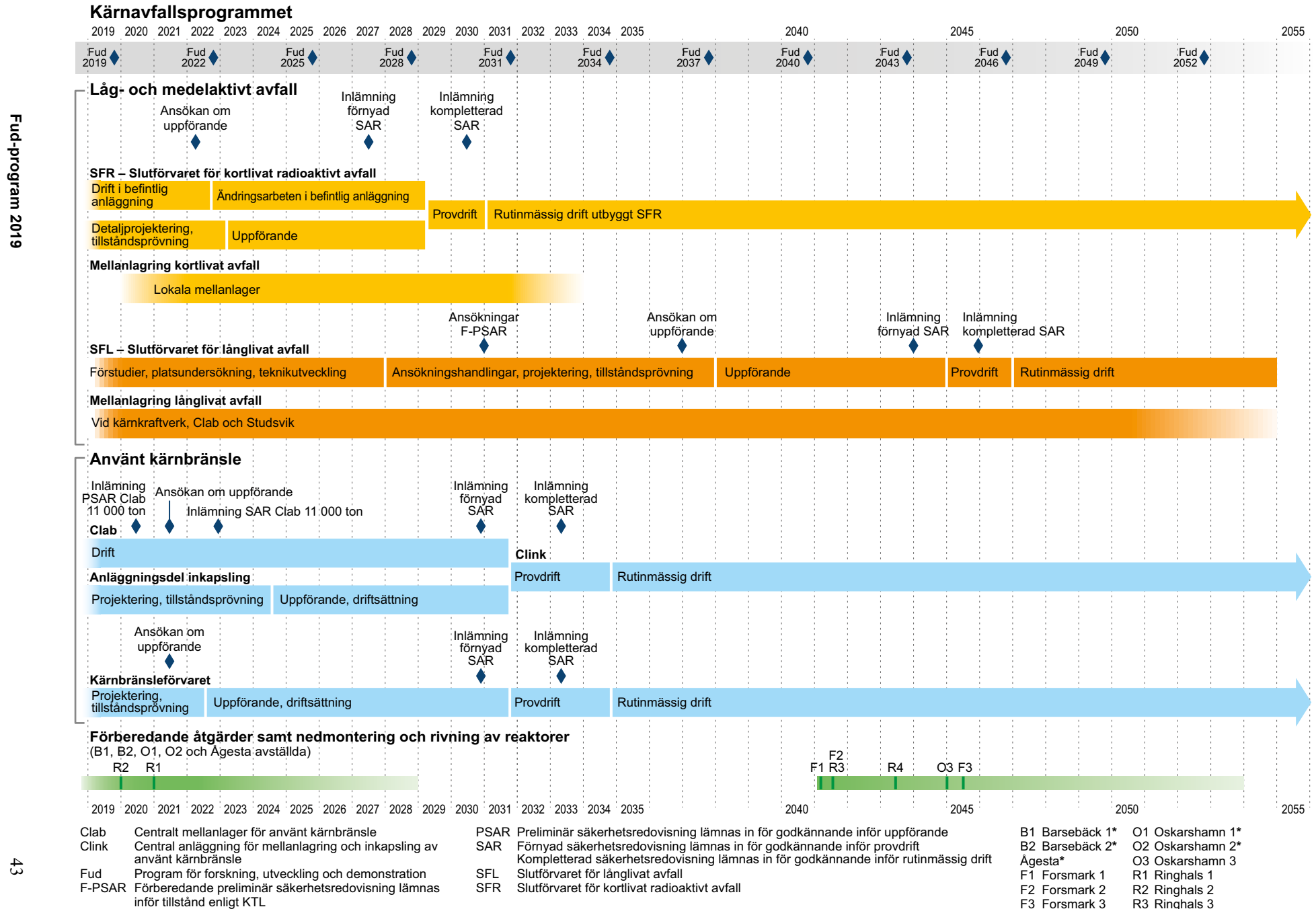
Det mycket lågaktiva avfallet som uppstår under drift kommer ursprungligen från material som samlats upp på kontrollerat område⁸ på kärnkraftverken. Efter källsortering kan en del av materialet friklassas och de utsorterade fraktionerna hanteras på olika sätt. Avfall som inte kan friklassas deponeras i markförvar vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals eller i SFR. Figur 3-2 visar hur det mycket lågaktiva avfallet sorteras i två fraktioner, kompakterbart respektive icke-kompakterbart avfall. För det mycket lågaktiva avfallet som uppkommer under drift är viktfordelningen cirka 45 procent metall, 40 procent mjukavfall och 15 procent inert avfall. Den största volymen utgörs dock av mjukavfall.

Metaller kan ofta dekontamineras direkt på kärnkraftverken med enkla tekniker där avfallet torkas av, spolats av eller blästras för att därefter friklassas. Metallfraktioner med en mer komplex geometri kan smältas eftersom smältprocessen både homogeniserar och dekontaminerar avfallet. Om det totala radionuklidinnehållet i det smälta materialet är tillräckligt lågt kan avfallet friklassas, annars deponeras det i markförvar.

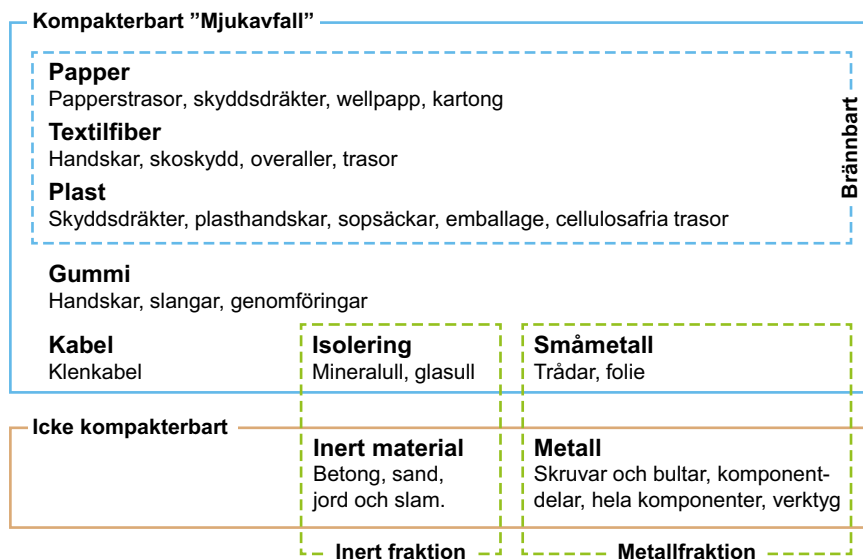
Vissa metallfraktioner lämpar sig varken för dekontaminering på kärnkraftverket eller smältning. Detta gäller bland annat komponenter med komplexa strukturer och blandade material exempelvis galvaniserat material vars zinkinnehåll skapar arbetsmiljöproblem vid smältanläggningen. I de fall effektiva behandlingsalternativ saknas, deponeras metaller i markförvar efter eventuell kompaktering eller segmentering för att reducera volymen (figur 3-3).

Mycket lågaktivt avfall i form av betong, sand, jord och slam (inert material) är också svårt att dekontaminera och används i största möjliga mån till att fylla ut tomrum i avfallskollin. Ett exempel visas i figur 3-3 där sand från blästring används för att toppfylla en container med annat mycket lågaktivt avfall.

⁸ En lokal eller plats där verksamhet bedrivs ska utgöra kontrollerat område om en arbetstagare kan få sådana årliga stråldoser att den effektiva dosen överskrider 6 mSv eller om radioaktiv kontamination av betydelse från strålskyddssynpunkt kan spridas till omgivande lokaler eller arbetsplatser (SSMFS 2018:1, 4 kap, 3§).



Figur 3-1. Övergripande tidsplan för SKB:s kärnavfallsprogram och planer för avveckling av reaktorer.



Figur 3-2. Indelning av mycket lågaktivt avfall i olika fraktioner.



Figur 3-3. T v metallfraktion till markförvar packad i halvhöjds ISO-container; t h toppfylld med blästersand för att utnyttja volym och minimera tomrum (montering av lock tillkommer innan deponering).

Mjuka material kan vara svåra att dekontaminera. Närmare två tredjedelar av det mycket lågaktiva avfallet som uppstår under drift består av plast i form av saneringsdukar, handskar eller andra typer av skydd för att begränsa kontaminationsspridning. En fjärdedel av avfallet består av cellulosa eller textil, såsom saneringsdukar och skyddsoveraller. Resterande delen, knappt tio procent, utgörs av isolering, metallfolier och kablar.

Behandlingen av mjuka material hos de avfallsproducenter som har eget markförvar bygger på kompaktering av avfallsbalar med målsättning att volymoptimera utnyttjandet av markförvaret. Avfallsbalarna emballeras med plastfolie (figur 3-4). En delmängd av det mjuka materialet är brännbart (figur 3-2), och kan brännas vid en anläggning för kontrollerad förbränning av radioaktivt material i Studsvik. De analyser av bästa möjliga teknik som genomförts i samband med tillståndsprövningar kopplade till nuvarande markförvar för driftavfall indikerar dock att markförvar är bästa möjliga teknik för stora delar av det mycket lågaktiva avfallet. Bedömningen är gjord med hänsyn till såväl strålskyddsaspekter som ekonomiska och miljömässiga aspekter. Möjligheten att förbränna avfall nyttjas därför främst av de avfallsproducenter som saknar markförvar. Övriga producenter använder sig av förbränning endast då avfallet av någon anledning lämpar sig mindre väl för markförvaring.



Figur 3-4. Tv balpress för kompaktering av mjukavfall; t h färdigpressad avfallsbal.

Avfallsproducenter utan tillgång till markförvar nyttjar extern eller lokal behandling av avfallet inför att det deponeras i bergssalen för lågaktivt avfall (BLA) i SFR. Dessa avfallsproducenter producerar under drift mycket små volymer avfall.

På kärnkraftverken finns i dag dedikerade ytor och lokaler för uppställning av mycket lågaktivt avfall. Dessa har etablerats för att deponeringen i markförvar ska kunna ske i kampanjer vilket dels förbättrar säkerheten, dels ger bättre ekonomiska förutsättningar för drift av markförvar.

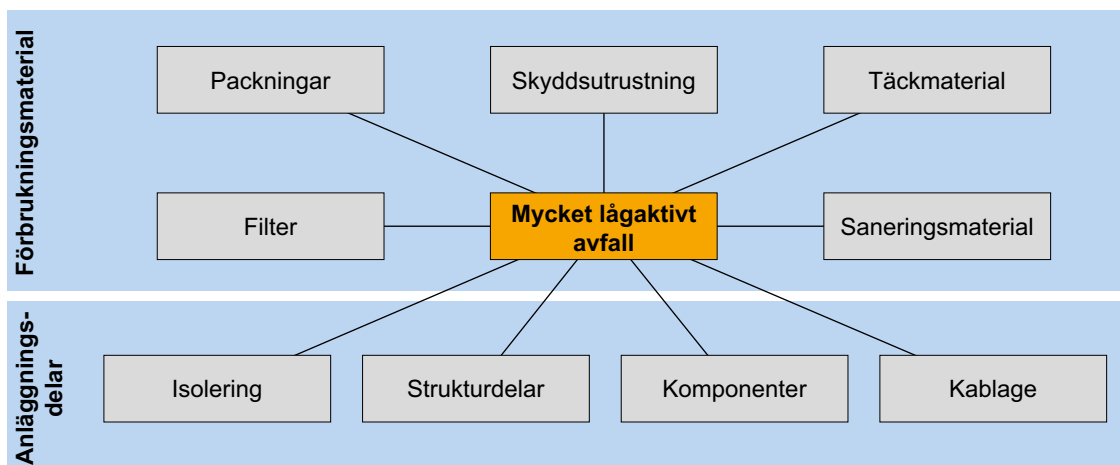
3.2.2 Övergripande planering

Under ett normalt driftår deponeras 50–100 ton mycket lågaktivt avfall per reaktor i markförvaren. Vid avveckling av en reaktor genereras uppskattningsvis 250–500 ton mycket lågaktivt avfall per år under en period av cirka 10 år. Prognoserna för mycket lågaktivt rivningsavfall innehåller stora osäkerheter och en översyn av både uppskattade totalmängder och fördelning mellan olika avfallskategorier kommer att genomföras. Internationella erfarenheter visar att det kan uppstå större mängder mycket lågaktivt avfall och material som behöver friklassas än beräknat.

Under avveckling av kärntekniska anläggningar sker nedmonteringen av system och komponenter i en ordning som ger en effektiv avfallshantering. Detta gör att avfallet kommer att ha en mer homogen sammansättning vad gäller radioaktivitet än motsvarande driftavfall. Rivningsarbetet sker dessutom i en anläggning där vissa av de mest kontaminerade systemen är dekontaminerade och där kortlivade radionuklider vanligtvis har klingat av under ett par års tid. Det mycket lågaktiva rivningsavfallet kommer därmed att vara mer förutsägbart än driftavfall som skapas på motsvarande plats i anläggningen. Figur 3-5 sammanfattar källorna, i huvudsak förbrukningsmaterial och anläggningsdelar, till det mycket lågaktiva avfallet.

För att hantera de stora volymerna mycket lågaktivt avfall som produceras vid nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorerna ser avfallsproducenterna ett behov av markförvar för deponering av stora delar av detta avfall.

Dagens markförvar är enbart licensierade för driftavfall. För närvarande har Ringhals en pågående ansökan för att få tillstånd att utöka sitt markförvar för driftavfall. När det gäller rivningsavfallet så pågår det förstudier för att analysera möjligheten att utöka markförvaren vid Oskarshamns och Ringhals kärnkraftverk. Utökningen skulle då licensieras för både drift- och rivningsavfall.



Figur 3-5. Källor till mycket lågaktivt avfall fördelade över förbrukningsmaterial och anläggningsdelar.

Tidsplaner för planerade expansioner/nyetableringar av markförvar presenteras i figur 3-6.

Alternativ till markförvar är deponering av det mycket lågaktiva avfallet i bergrum för lågaktivt avfall (BLA) i SFR. BLA är en mer avancerad anläggning än ett markförvar och kan ta emot avfall med högre aktivitetsinnehåll än det mycket lågaktiva avfallet. Ett annat alternativ som utreds av avfallsproducenterna är om delar av avfallet kan förbrännas i konventionella avfallsförbränningsanläggningar. En förutsättning för förfarandet är att de restprodukter som bildas är friklassade.

En mötesserie mellan SSM och avfallsproducenterna initierades 2017 med syftet att skapa en gemensam plattform för att diskutera frågeställningar relaterade till omhändertagandet av mycket lågaktivt avfall. Efter hand har dialogen breddats och fler aktörer som potentiellt skulle kunna ta emot delar av avfallet har involverats (Cyclife Sweden AB, olika förbränningsanläggningar och branschorganisationen för konventionell avfallshantering, Avfall Sverige).

De planerade insatserna för omhändertagande av det mycket lågaktiva avfallet från drift och rivning kan i nuläget sammanfattas i följande punkter:

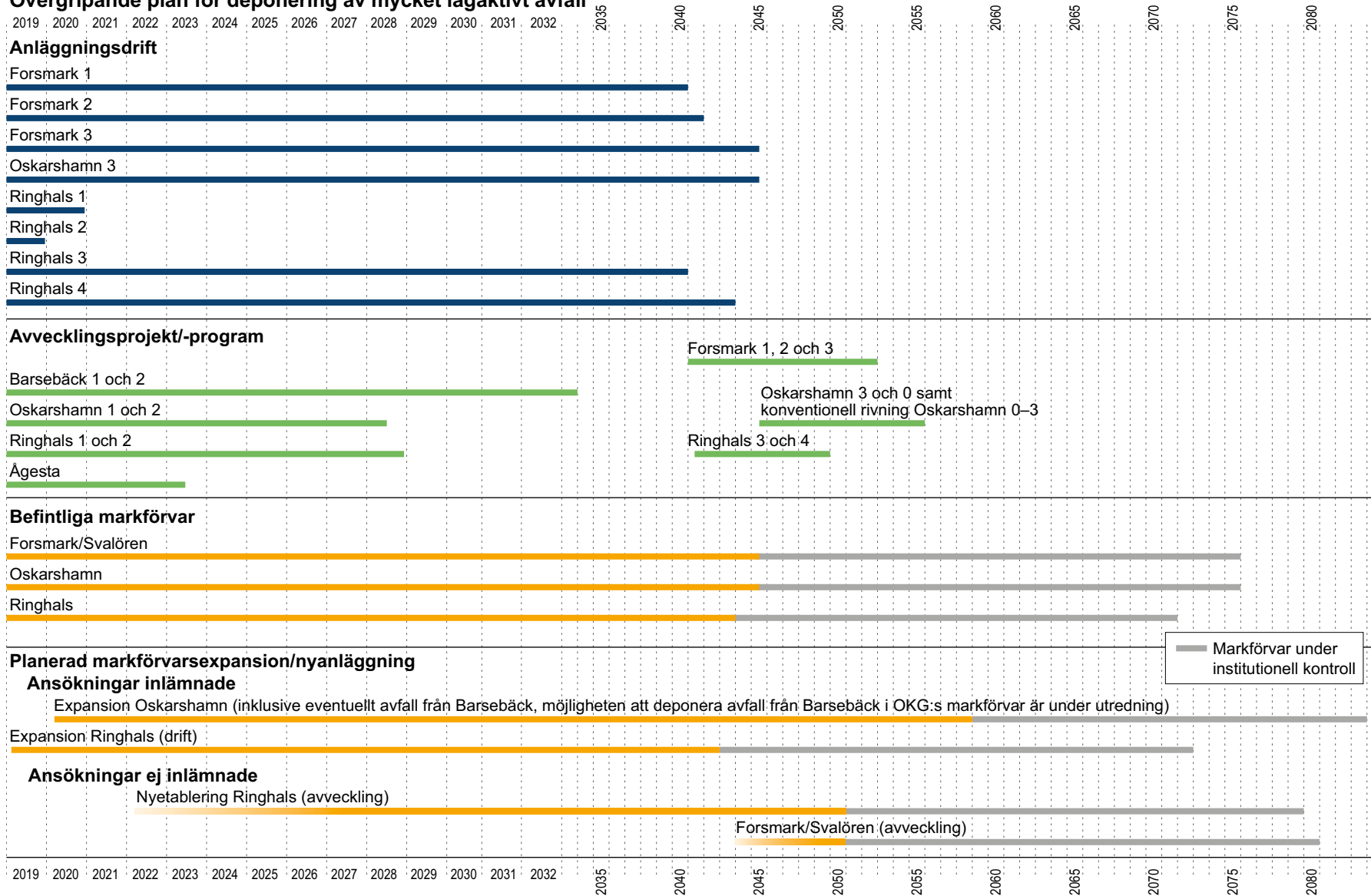
- Kontinuerligt förbättringsarbete hos avfallsproducenterna för att minska mängden avfall bland annat genom bättre källsortering, effektivare sortering av insamlat material, av- och omemballering av inkommande gods och zonindelning av arbetsområden under revisioner.
- Uppföljning av ansökan för att expandera det existerande markförvaret vid Ringhals och uppföljning av uppdaterad analys av bästa möjliga teknik för Svalörens markförvar vid Forsmark.
- Expansion av markförvaret vid Oskarshamnsverket för att inrymma avfall från resterande drift och rivningsavfall. Möjligheten att deponera avfall från Barsebäck i OKG:s markförvar är under utredning (avsnitt 16.1).
- En översyn av möjligheten att etablera ett nytt markförvar för rivningsavfall vid Ringhals.
- Utbyggnad av SFR där delar av det mycket lågaktiva avfallet kan deponeras.

3.2.3 Behandling av mycket lågaktivt avfall

Radioaktivitetsnivån för det mycket lågaktiva avfallet ligger mellan friklassat material, det vill säga material som återförs till det konventionella kretsloppet, och det material som behöver slutförvaras till följd av sitt aktivitetsinnehåll.

Kravbild för mycket lågaktivt avfall har förändrats över tid till följd av bland annat ändrad syn på kretsloppstänkande, ändrad kravbild kopplad till strålningsrisker, och tekniska landvinningar vad gäller nya hanteringsmöjligheter. Det finns därför ett behov av en samsyn mellan avfallsproducenter och SSM om hur gällande kravbild för mycket lågaktivt avfall ska tolkas. Reaktorinnehavarna kommer gemensamt att ta fram underlag för att belysa helheten när det gäller behandling och annan hantering av mycket lågaktivt avfall. Målet är ett robust och flexibelt system som sanktioneras av rådande tillsynsmyndigheter.

Övergripande plan för deponering av mycket lågaktivt avfall



Figur 3-6. Övergripande plan för deponering av mycket lågaktivt avfall i existerande och planerade expansioner/nyetableringar av markförvar. Tidsangivelser i figuren är schematiska, för exakta angivelser hänvisas till planeringen för respektive anläggning. Oskarshamn 0 avser ett antal gemensamma serviceanläggningar.

Det ska i sammanhanget noteras att en förändrad behandling och hantering av det mycket lågaktiva avfallet har en påverkan även på SFR, eftersom delar av det mycket lågaktiva avfallet i nuläget finns inkluderat i de volymer som prognostiseras för 2–5BLA, se vidare under avsnitt 3.7.3.

Avfallsproducenterna kommer under Fud-perioden att arbeta med att utveckla olika aspekter kopplade till uppkomst och behandling av det mycket lågaktiva avfallet:

- Förändrad/utökad sortering kan potentiellt vara en del av en förbättrad hantering av mycket lågaktivt avfall. För att kunna utvärdera vad det skulle innebära kommer konsekvenser i form av exempelvis investeringar, dosbudget och utbildningsbehov att utredas.
- Tekniker för att dekontaminera mycket lågaktivt avfall till friklassningsbart material förbättras över tid. Detta faktum, tillsammans med det kraftigt ökande behovet av effektiv friklassning i samband med avveckling av de tidiga kommersiella kärnkraftsreaktorerna leder till ett utvecklingsbehov inom friklassningsområdet. Utvecklad friklassning ses därför som ett viktigt steg i att förbättra hanteringen av mycket lågaktivt avfall. Som ett led i detta har en branschövergripande grupp med syfte att utveckla olika aspekter av friklassningsprocessen initierats. Slutsatserna från gruppen kommer att ligga till grund för strategiska vägval såväl som för investeringsbeslut.
- Tester för att ersätta engångsskyddsplast (täckplast) med skyddsplåtar alternativt flergångsskyddsplast (liknande presenningar) har genomförts i syfte att begränsa mängden avfall som uppkommer, minska plastanvändning samt öka graden av återanvändning. Arbetet kommer att fortsätta under Fud-perioden.
- Avfallsproducenterna arbetar kontinuerligt med att utveckla friklassningsprocessen genom översyn av resurs- och kompetensbehov, processer och rutiner för sortering/separering och förutsättningar i form av lokaler och utrustning samt metodikutveckling. Erfarenhetsöverföring mellan avfallsproducenterna genomförs. Ett utvecklingsarbete för att effektivisera mättekniken som används vid friklassning av mjuka avfallsfraktioner kommer att genomföras.
- Genom att uppskatta avfallsmängder i olika fraktioner blir det möjligt att sätta dessa i relation till eventuella miljövinster, risker och kostnader för att införa specifika åtgärder. Kunskap om avfallsmängder i olika fraktioner är även en förutsättning för att kunna mäta och följa upp effekten av införda åtgärder. Avfallsproducenterna avser därför att arbeta med att uppdatera och förfina befintliga prognoser för såväl driftavfall som rivningsavfall.

3.2.4 Mellanlagring och uppställning av mycket lågaktivt avfall

De reaktorinnehavare som har tillgång till markförvar har också ett lokalt system för tillfällig uppställning av avfall eftersom deponering i markförvaren sker i kampanjer. Befintliga uppställningsytor har kapacitet att rymma den volym avfall som krävs för effektiv hantering vid deponeringskampanjerna. Detta motsvarar den avfallsmängd som uppstår under fem till tio normala driftsäsonger för reaktorerna som finns på respektive anläggning.

Deponeringen i markförvar kommer även fortsättningsvis att baseras på kampanjvis deponering. Kapaciteten i befintliga uppställningsytor väntas därför vara tillräcklig för det avfall som skapas under den fortsatta driften av samtliga kärnkraftverk. Eventuellt kan väderskyddade uppställningsytor komma att behövas på de platser där avvecklingsprojekt ska påbörjas i närtid för att hantera den större mängd avfall som väntas uppstå.

Figur 3-7 visar uppställningsytan på Ringhals kärnkraftverk. Det är ett robust väderskydd som säkerställer att avfallet och emballaget bibehåller sin integritet fram till deponering i markförvar.

Avfallsproducenter utan tillgång till markförvar planerar för mellanlagring av det mycket lågaktiva avfallet tillsammans med övrigt kortlivat lågaktivt avfall (avsnitt 3.3.3).



Figur 3-7. Oves Lada, uppställningsyta för bland annat mycket lågaktivt avfall vid Ringhals kärnkraftverk.

3.2.5 Markförvar

Markförvar utgör en viktig del av dagens system för deponering av avfall vars aktivitetsinnehåll gör att det inte kan återföras till samhällets konventionella kretslopp, men där strålskyddsaspekter inte heller motiverar deponering i ett geologiskt förvar. Tillståndsprövningar för deponering i markförvar och för expansion av existerande markförvar har aktualiserat frågor om bland annat förvarens mekaniska stabilitet och vilka fraktioner (exempelvis brännbart avfall) som kan deponeras i markförvar och under vilka förutsättningar.

Under Fud-perioden kommer bästa möjliga teknik för samtliga avfallsfraktioner inom kategorin mycket lågaktivt avfall att beskrivas av avfallsproducenterna. I denna analys ingår en översyn av frågeställningar om markförvarens förmåga att upprätthålla stabilitet och funktion över tid, samt fortsatta utredningar av alternativa hanteringsmetoder för de olika avfallsfraktionerna. Analysen av bästa möjliga teknik för det mycket lågaktiva avfallet kommer att hållas aktuell och uppdateras i samband med kommande Fud-program. Den primära målsättningen är i första hand att slutgiltigt klargöra om avfallsproducenterna och tillsynsmyndigheterna kan enas om förutsättningarna för en utökad användning av markförvar. I samband med detta bör den delen av det mycket lågaktiva avfallet som inte kommer att kunna markförvaras under kvarvarande drift och avveckling att definieras.

Då det i dag råder en otydlighet kring markförvarens sluttillstånd kommer ett utvecklingsarbete att genomföras under Fud-perioden, för att utreda juridiska frågeställningar och vilket regelverk som ska tillämpas i samband med avslutad institutionell kontroll. Inriktningen på arbetet kommer att bestämmas i samråd med SSM genom fortsatt dialog inom den mötesserie mellan SSM och avfallsproducenterna som initierades 2017.

3.3 Genomförandeplan för låg- och medelaktivt avfall

3.3.1 Nuläge

Verksamheten för låg- och medelaktivt avfall består dels av den löpande hanteringen av befintligt avfall, dels av arbetet för att realisera de återstående delarna av det system som behövs för att slutligt omhänderta avfallet på ett långsiktigt säkert sätt. Verksamheten drivs främst av SKB men i vissa delar även av reaktorinnehavarna. De slutförvar som SKB planerar att etablera för låg- och medelaktivt avfall omfattar en utbyggnad av SFR och uppförande av SFL.

Nuläget för arbetet med att realisera återstående delar av systemet för låg- och medelaktivt avfall kan sammanfattas i följande punkter:

- Ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken för att bygga ut SFR lämnades in i slutet av 2014 och för närvarande pågår tillståndsprövningarna. Kompletterande underlag i prövningarna lämnades in under 2015–2017. I december 2017 kungjorde SSM, och Mark- och miljödomstolen vid Nacka tingsrätt ansökan om att få bygga en tillbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, i Forsmark med en ny anläggningsdel för i huvudsak rivningsavfall. I januari 2019 yttrade sig SSM till Mark- och miljödomstolen att ansökan om utbyggnad av SFR uppfyller miljöbalkens krav på tillåtlighet. Huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen sker under hösten 2019.
- Inför utbyggnaden av SFR hanteras frågor kring tillståndsprövningarna parallellt med fortsatt teknikutveckling, projektering och byggförberedelser.
- En utvärdering av säkerheten efter förslutning för förslaget förvarskoncept för SFL har genomförts under perioden 2015–2019. Säkerhetsvärderingen utgör ett viktigt underlag för den fortsatta utvecklingen och redovisas i kapitel 6.
- Utredningar har genomförts för planering av den lokaliseringsprocess som ska leda fram till ett platsval för SFL. Processen tar sin utgångspunkt i de grundläggande krav på lokalisering som finns i miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen och beaktar erfarenheter från SKB:s tidigare genomförda lokaliseringsprocesser. Planeringen för lokaliseringsprocessen redovisas i kapitel 6.

3.3.2 Övergripande planering

De slutförvar som SKB planerar att etablera för låg- och medelaktivt avfall omfattar en utbyggnad av SFR och uppförande av SFL. Reaktorinnehavarna av de reaktorer som avvecklas innan det utbyggda SFR tas i drift har för avsikt att anordna temporära mellanlager för det kortlivade rivningsavfallet. Reaktorinnehavarna planerar att mellanlagra det långlivade rivningsavfallet lokalt antingen på kraftverken eller på annan plats.

Avvecklingsplaneringen för de sju reaktorerna som kommer att avvecklas under 2020-talet bedrivs av respektive reaktorinnehavare. SKB samverkar med de olika avvecklingsprojekten i centrala frågor som rör avfallshantering, exempelvis acceptanskriterier och typbeskrivningar för rivningsavfall och transporter.

Figur 3-8 illustrerar en översiktlig tidsplan för hanteringen av låg- och medelaktivt avfall, tillsammans med viktiga milstolpar. För att tydliggöra kopplingen mot avvecklingen av reaktorerna, Clink, SFL och SFR ingår även detta i figuren.

3.3.3 Kortlivat avfall

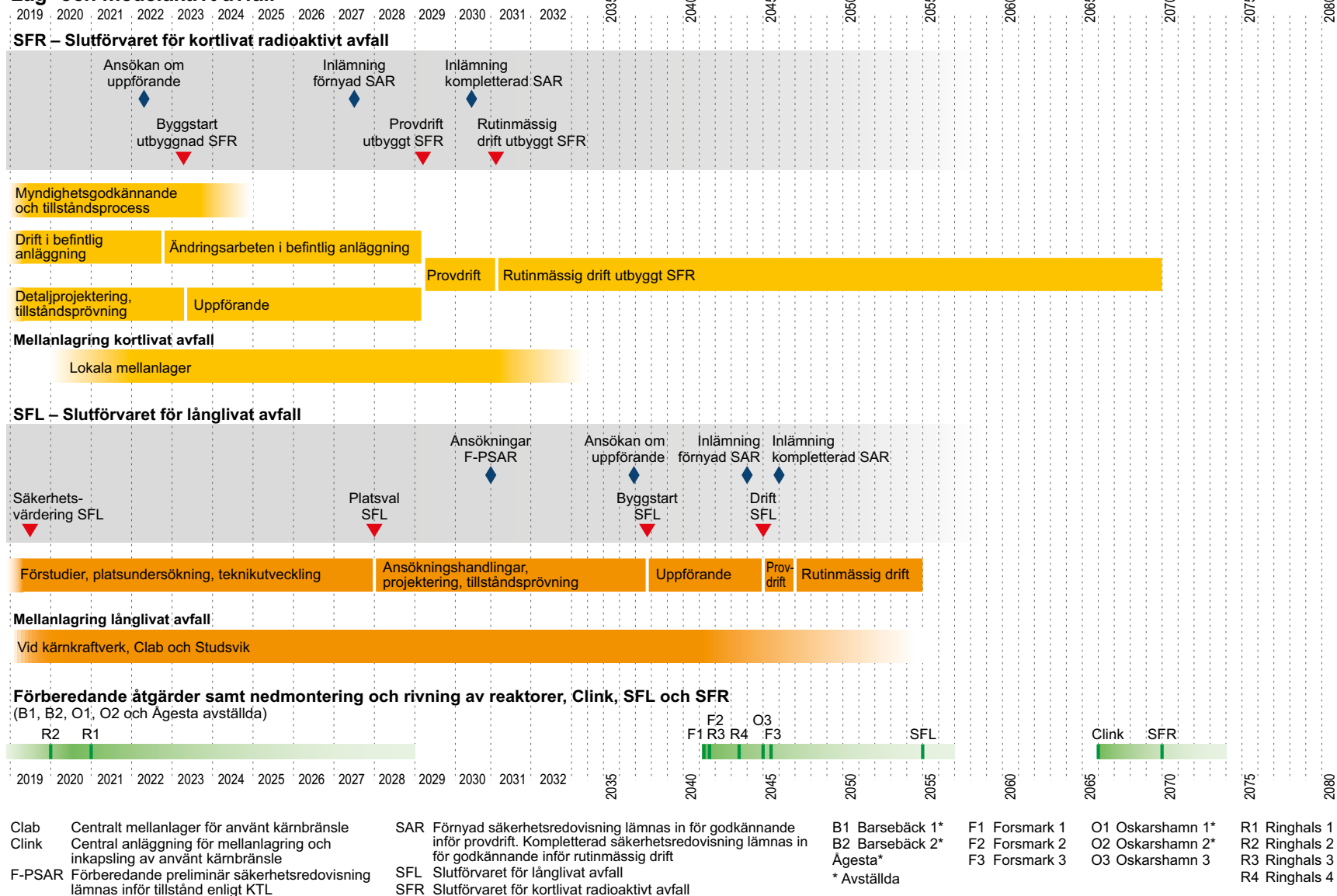
Mellanlagring av kortlivat avfall

Arbetet med att nedmontera och riva de sju första reaktorerna startar innan det utbyggda SFR är klart för drift. Barsebäck Kraft AB, OKG Aktiebolag och Ringhals AB planerar därför att mellanlagra det kortlivade rivningsavfallet huvudsakligen på kraftverksområdena men även andra platser kan bli aktuella. Det kommer även att finnas behov av att mellanlagra driftavfall under perioden då utbyggnaden av SFR pågår, då det kommer vara ett deponeringsstopp i anläggningen under denna period. Om det från kraftverken finns behov av deponering under utbyggnaden skulle ett deponeringsfönster kunna planeras in efter genomförda bergarbeten, det vill säga efter ungefär halva den totala uppförandetiden.

Dessutom beräknas en förvarsdel i det befintliga SFR, bergssalen för lågaktivt avfall, nå sin kapacitet inom ett par års tid. Det innebär att tillkommande mängder av denna typ av avfall måste mellanlagras på kraftverken tills SFR är utbyggt.

I Fud-program 2016 planerade reaktorinnehavarna att deponera reaktortankarna från BWR hela. Denna strategi har ändrats och i nuvarande planer kommer reaktortankarna att segmenteras (kapitel 17). De segmenterade reaktortankarna kommer att mellanlagras med övrigt medelaktivt kortlivat rivningsavfall.

Låg- och medelaktivt avfall



Figur 3-8. Tidsplan för låg- och medelaktivt avfall samt rivning av kärnkraftverken.

Barsebäck Kraft AB har befintliga lager som kan användas för mellanlagring, men den befintliga kapaciteten behöver utökas för det kortlivade avfallet som uppstår vid nedmontering och rivning av Barsebäck 1 och Barsebäck 2. Barsebäck Kraft AB har utrett behovet och resultatet visar att lagringskapaciteten kan utökas på den egna anläggningen. Det nya mellanlagret planeras att etableras i inledningen av nedmontering och rivning av reaktorerna.

OKG Aktiebolag bedömer att lagringskapaciteten behöver utökas för att kunna mellanlagra kortlivat avfall från fortsatt drift av Oskarshamn 3 samt avveckling av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2, vilket uppkommer innan det utbyggda SFR kan tas i drift.

Ringhals AB har befintliga lager som kan användas för mellanlagring, och utgångspunkten är att denna kapacitet är tillräcklig även för att hantera det kortlivade avfall som uppkommer vid rivning av Ringhals 1 och Ringhals 2.

Forsmarks Kraftgrupp AB har befintliga lager som kan användas för mellanlagring. Bedömningen är att tillräcklig kapacitet finns för mellanlagring av driftavfall. Detta gäller under förutsättning att utbyggnaden av SFR genomförs enligt aktuell tidsplan. Rivningsavfall behöver inte mellanlagras eftersom det inte uppkommer förrän det utbyggda SFR tagits i drift.

AB SVAFO planerar att uppföra en ny byggnad för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall från den egna verksamheten. Mellanlagret kommer att ligga i Studsvik och planeras att vara i drift kring 2021. Miljötillstånd för mellanlagret beviljades av Mark- och miljödomstolen i januari 2017. Tillstånd enligt kärntekniklagen krävs inte eftersom mellanlagret betraktas som en anläggningsändring enligt SSM. Anmälan om anläggningsändring samt preliminär säkerhetsredovisning lämnades till SSM i juni 2019.

När det utbyggda SFR tas i drift kommer drift- och rivningsavfallet att transporteras från samtliga mellanlager till SFR för slutförvaring.

Utbyggnad av SFR

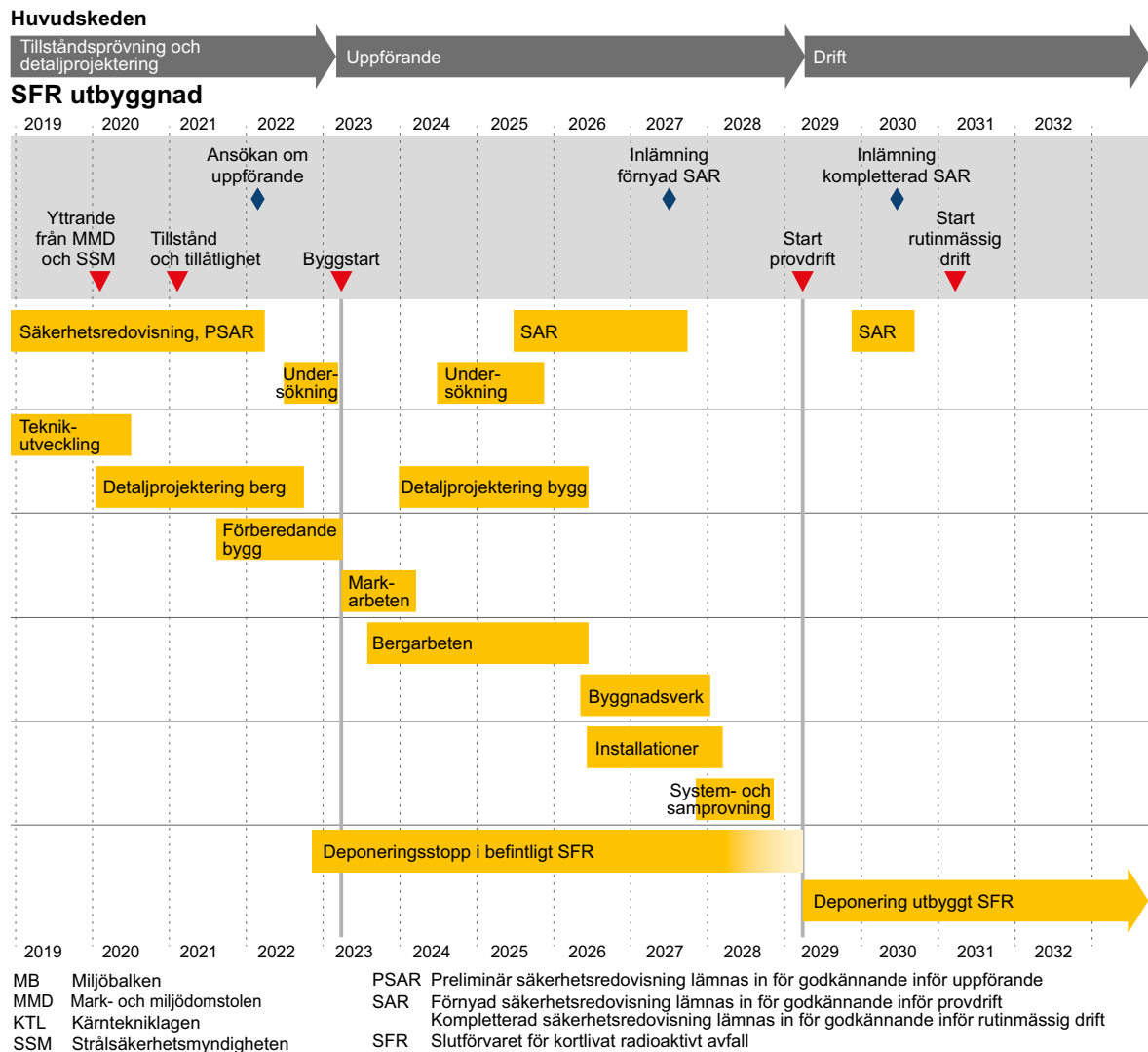
En ansökan om att få bygga ut SFR och även kunna slutförvara rivningsavfall i anläggningen lämnades in i december 2014. Enligt SKB:s nuvarande planering, som anpassats till att tillståndsprövningarna bedöms ta längre tid än vad som tidigare avsatts, förväntas utbyggnaden kunna starta under 2023, och provdrift inledas 2029. En översiktlig tidsplan för utbyggnad av SFR presenteras i figur 3-9.

Tillståndsprövning och projektering för utbyggt SFR

För närvarande pågår tillståndsprövningen för ansökningarna enligt miljöbalken och kärntekniklagen. Handläggningen av ansökningarna åligger Mark- och miljödomstolen vid Nacka tingsrätt och SSM, varefter Östhammars kommun och regeringen har att ta beslut. Initiativet ligger till stor del hos dessa instanser och tidsåtgången beror på deras handläggnings- och beslutstider. SKB:s uppgift består i att lämna kompletterande uppgifter om detta önskas samt förbereda och medverka i huvudförhandlingen i Mark- och miljödomstolen. Samtidigt fortsätter SKB utvecklingsarbetet med förvarets barriärer och upphandling för detaljprojektering. Efter erhållna tillstånd enligt miljöbalken och kärntekniklagen planeras upphandling av entreprenader och när alla tillstånd vunnit laga kraft påbörjas utbyggnaden av SFR.

Under Fud-perioden kommer en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) att upprättas. Denna är en del i ansökan om uppförande och lämnas in till SSM först efter att regeringens tillstånd erhållits enligt kärntekniklagen och beslut om tillåtlighet enligt miljöbalken.

Under senare delen av tillståndsprövningarna genomförs byggförberedelser och förberedande undersökningar inför byggstart. Förutsatt att tillståndsprövsprocessen inte drar ut på tiden förväntas nödvändiga tillstånd erhållas så att utbyggnaden av SFR kan inledas enligt tidsplanen, 2023. För att börja utbyggnaden av SFR ska tillstånd om uppförande erhållas från SSM.



Figur 3-9. Översiktlig tidsplan för utbyggnad av SFR.

Uppförande och driftsättning av utbyggt SFR

Skedet omfattar aktiviteterna bygge, provdrift och överlämning till rutinmässig drift. Under delar av byggförberedelserna och under bygget kommer SKB att införa deponeringsstopp i anläggningen. Samtidigt som SFR byggs ut kommer uppgraderingen av den befintliga anläggningen att göras, bland annat med hänsyn till att drifttiden förlängts i förhållande till den ursprungligt planerade. SKB planerar att lämna in en förnyad SAR under 2027. Provdraft med deponering av avfall i den utbyggda delen av SFR antas kunna starta cirka två år senare. 2030 avser SKB att lämna in en kompletterad SAR. Enligt SKB:s bedömning kan ett godkännande om rutinmässig drift fås i början av 2031.

3.3.4 Långlivat avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utgörs huvudsakligen av fem kategorier:

- Kraftigt neutronbestrålad hårdkomponenter. Avfallet uppkommer både vid underhåll och vid nedmontering och rivning av reaktorer.
- Styrstavar från BWR-reaktorer. Förbrukade styrstavar uppkommer dels under driften av reaktorer, dels vid nedmontering av sluthärden när reaktorer avvecklas.

- Reaktortankar från PWR-reaktorer. Avfallet uppkommer vid rivning av reaktorer.
- Långlivat avfall från verksamheter i Studsvik samt från sjukvård, forskning och industri. Avfallet från verksamheter som genererar små avfallsvolymer hanteras vanligtvis genom Studsvik Nuclear AB:s och Cyclife Sweden AB:s försorg. Detta avfall uppkommer successivt och är inte knutet till driften av eller avvecklingen av kärnkraftverken.
- Historiskt avfall från forskning och utveckling inom de svenska kärnforskningsprogrammen. Avfall från försvaret till exempel mörkersikten. Detta avfall hanteras och mellanlagras av AB SVAFO.

Planeringen för omhändertagandet av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet syftar till ett sammanhållet system för hantering och slutlig förvaring. Planeringen för systemets olika delar redovisas under respektive rubrik nedan.

Mellanlagring av långlivat avfall

SKB planerar för att driftsätta SFL runt 2045. Då flera reaktorer kommer att rivnas innan slutförvaret står färdigt behöver långlivat avfall som uppstår vid rivningen mellanlagras. Reaktorinnehavarna bedömer i dag att det finns tillräcklig mellanlagringskapacitet lokalt vid kraftverken.

För att kunna friklassa Barsebäcksverket innan SFL tas i drift behövs däremot ett nytt mellanlager på annan plats dit de i dag lokalt lagrade stältankarna kan transporteras. Barsebäck Kraft AB överväger flera olika möjligheter där mellanlagringen kan ske. Borttransporten planeras att utföras under den period då nedmontering och rivning av reaktorerna pågår.

AB SVAFO driver ett mellanlager för låg- och medelaktivt avfall (AM, Aktivt mellanlager) som rymmer både eget långlivat avfall och avfall från andra tillståndshavare, exempelvis Studsvik Nuclear AB. Detta mellanlager har inte kapacitet att ta emot mer avfall. AB SVAFO planerar därför att uppföra en ny byggnad för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall. Mellanlagret kommer att ligga i Studsvik och planeras att vara i drift omkring 2021.

Befintliga och planerade mellanlager nyttjas tills det finns möjlighet att transportera avfallet till SFL. För detta behövs, förutom ett driftsatt SFL, även en licensierad transportbehållare.

Behandling av långlivat avfall

Det kan komma att bli aktuellt med konditionering av det långlivade avfallet innan deponering i SFL. Innan slutlig konditionering kan genomföras behöver acceptanskriterier fastställas för det långlivade avfallet. Utvecklingen av preliminära acceptanskriterier för det långlivade avfallet fortsätter under Fud-perioden utifrån bland annat resultaten från den genomförda säkerhetsvärderingen. Två huvudspår för det långlivade avfallet ingår i nuvarande planering. Det ena är stabilisering av metalliskt avfall från kraftverken i stältankar och det andra är omlastning och konditionering av avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB i behållare kompatibla för SFL (Pettersson 2013). Konditionering kan inte göras förrän acceptanskriterierna är fastställda. Enligt nuvarande planer kommer, vid behov, slutlig konditionering att göras i samband med deponeringen i SFL. Tidpunkten är även fördelaktig ur strålsäkerhetssynpunkt eftersom avfallet då har klingat av under en längre tid.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL

SFL är det förvar som SKB planerar att ta i drift sist. Fram till drifttagning finns det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom platsundersökningar och val av plats, analys av säkerheten efter förslutning, framtagning av ansökningar och uppförande. En översiktlig tidsplan för arbetet med SFL presenteras i figur 3-10. Tidsplanen bygger på ett scenario där SFL lokaliseras till en av de platser som SKB har kännedom om sedan tidigare. Skulle mer omfattande platsundersökningar krävas bedömer SKB att tidpunkten för driftsättning av SFL kommer att skjutas framåt i tiden. Ett sådant scenario utvecklas vidare i avsnitt 3.7.4. SKB planerar att lämna in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att få uppföra, inneha och driva SFL cirka 2030. Enligt planeringen kommer slutförvaret att kunna tas i drift cirka 2045. För att tillgodose kärnkraftsföretagens behov bedöms förvaret behöva vara i drift i cirka tio år.

Huvudskeden

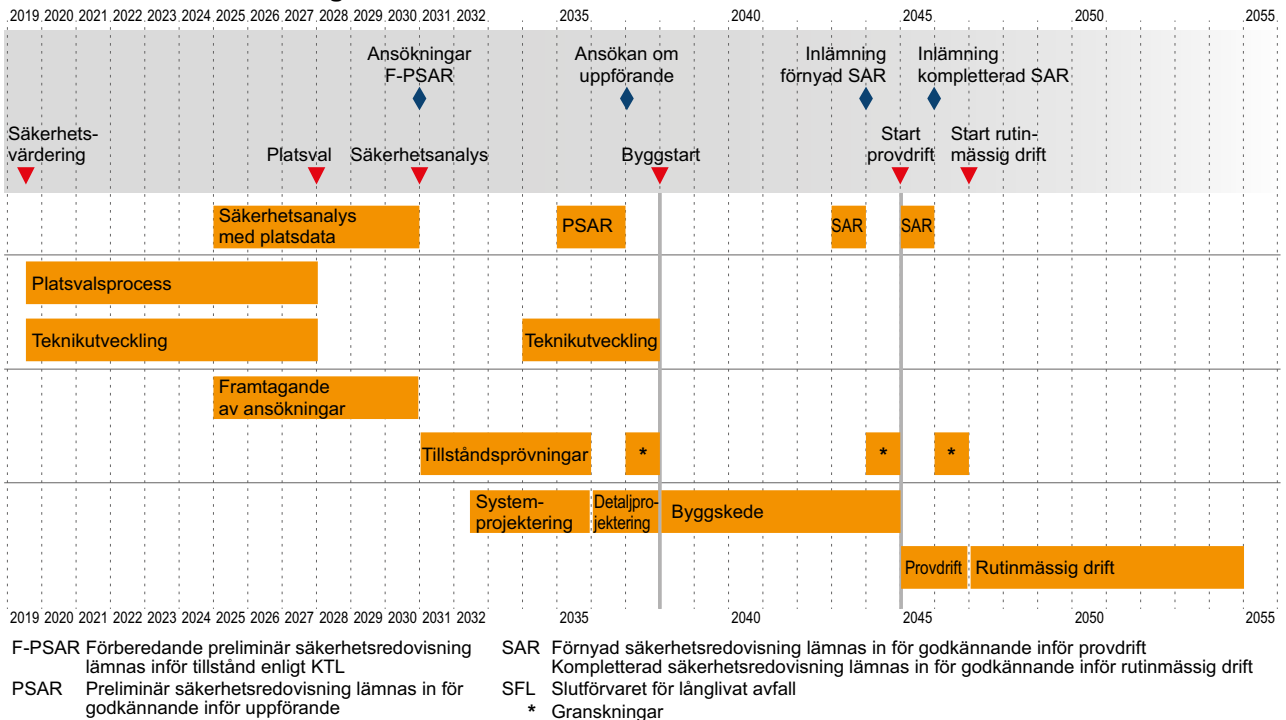
Teknikutveckling, lokalisering och säkerhetsanalyser

Projektering, tillståndsprövning

Uppförande

Drift

SFL – Slutförvaret för långlivat avfall



Figur 3-10. Uppskattad tidsplan för arbetet inför driftsättningen av SFL.

Utvärdering av säkerheten efter förslutning av SFL

SKB redovisade 2013 en utredning där olika förvarskoncepter utvärderades (Elfving et al. 2013). Utredningen beskriver ett förslag på avfallsbehållare, transportsystem samt anläggningar för konditionering, mellanlagring och slutförvaring av avfall. Baserat på utvärderingen har en konceptuell förvarskoncept för det långlivade avfallet presenterats, se avsnitt 2.1.2.

Under 2015–2019 genomfördes en värdering av det föreslagna konceptet med avseende på säkerheten efter förslutning. Säkerhetsvärderingen baserades på den säkerhetsanalysmetodik som utarbetats av SKB under de senaste decennierna och som tillämpats i de senaste säkerhetsanalyserna för Slutförvaret för använt kärnbränsle – SR-Site (SKB 2011b) och för SFR – SR-PSU (SKB 2015b). Säkerhetsvärderingen utgör dock inte en fullständig säkerhetsanalys. Värderingen har i möjligaste mån baserats på befintlig kunskap och data, som tagits fram i tidigare platsundersökningar, säkerhetsanalyser och teknikutveckling inom SKB.

Resultaten från säkerhetsvärderingen indikerar att förvarskonceptet har förutsättningar att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning, givet att den framtida platsen har tillräckligt låga grundvattenflöden för att minimera uttransport av radioaktiva ämnen från förvaret. Resultaten visar vidare vilka avfallskategorier som bidrar mest till de beräknade långsiktiga strålsäkerhetskONSEKVENSA, vilket ger underlag till fortsatt arbete med att utveckla acceptanskriterier för det långlivade avfallet. Säkerhetsvärderingens analyserade känslighetsfall för olika barriärlösningar utgör underlag till fortsatt arbete med att utveckla de tekniska barriärerna.

Säkerhetsvärderingen utgör nu basen för att identifiera områden för fortsatt forskning inför framtida fullständiga säkerhetsanalyser. Dessutom ger värderingen underlag för att påbörja lokaliseringsprocessen.

En mer detaljerad redovisning av säkerhetsvärderingens omfattning, metodik, resultat och slutsatser lämnas i kapitel 6.

Lokalisering av SFL

SKB har sedan tidigare lagt fast grundläggande förutsättningar för lokalisering av slutförvar för radioaktivt avfall:

- Säkerheten under drift och efter förslutning samt påverkan på miljön måste uppfylla kraven i kärntekniklagen och miljöbalken.
- Det lokala politiska och opinionsmässiga stödet behöver vara brett och stabilt.

SKB planerar att driva en stegvis lokaliseringsprocess med målsättningen att välja plats för SFL i slutet av 2020-talet. Målsättningen är att driva en öppen och transparent process i samråd med SSM och berörda kommuner, där förutsättningarna för olika aktörer tidigt är klarlagda och där processens olika steg är förankrade och kommunicerade.

Den kunskap om Sveriges geologi som förvärvats genom SKB:s tidigare lokaliseringsprocesser utgör grund för arbetet. Underlaget utgörs av alla områden i Sverige med data som behövs för värdering av säkerhet på 400–700 meters djup, exempelvis Forsmark, Simpevarp/Laxemar och samtliga så kallade typområden från lokaliseringsprocessen för Kärnbränsleförvaret. En systematik baserad på en indelning i lokaliseringsfaktorer har tidigare utarbetats och använts av SKB vid lokaliseringen av både Kärnbränsleförvaret och SFR-utbyggnaden. Detta underlag och den systematik med lokaliseringsfaktorer som SKB nu har tillgång till och erfarenhet av, kommer till stor del att användas också i lokaliseringsprocessen för SFL. Liksom i tidigare lokaliseringsprocesser kommer SKB att använda sig av följande huvudgrupper av faktorer vid värdering och jämförelser av lokaliseringsalternativ:

- Säkerhet efter förslutning.
- Teknik för genomförande.
- Miljö och hälsa.
- Samhällsaspekter.

Säkerhetsvärderingens resultat utgör grund för de säkerhetsmässiga lokaliseringsfaktorerna. Vidare har SSM:s och Mark- och miljödomstolens yttranden till regeringen i KBS-3-ärendet utgjort viktiga underlag för utformningen av processen.

Preliminära lokaliseringsfaktorer och den planerade lokaliseringsprocessen för SFL presenteras i kapitel 6.

Ansökningar, uppförande, drift och förslutning av SFL

SKB planerar att lämna in tillståndsansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för SFL runt 2030. Efter inlämnandet fortsätter arbetet med bland annat systemprojektering och detaljprojektering. Uppförande och provdrift följs av rutinmässig drift. Förslutning av SFL sker då allt mellanlagrat långlivat avfall samt det långlivade avfallet från rivning av det sista kärnkraftverket deponerats. Innan förslutningen verkställs behöver SKB säkerställa att det avfall som kommer från rivningen av Clink är lämpligt för SFR och således inte behöver slutförvaras i SFL.

Kärnämneskontroll

Det finns avfall som ska deponeras i SFL som innehåller kärnämne och därför står under kärnämneskontroll. Detta historiska avfall mellanlagras i dag i bergrumsförvaret AM i Studsvik där AB SVAFO är tillståndshavare. De grundläggande principerna för kärnämneskontroll vid slutförvaring av kärnämne från det historiska avfallet skiljer sig jämfört med principerna för slutförvaring av använt kärnbränsle. En betydande skillnad är att kärnämnet inte kan räknas och hanteras som bestämda enheter på samma sätt som kärnbränsleelement, eftersom det förekommer i olika former. Detta innebär att det inte kommer vara möjligt att verifiera innehållet av kärnämne mer än till en viss rimlig nivå och att det kommer att finnas osäkerheter i resultatet.

Verifiering och behandling av avfallet utförs av AB SVAFO, varefter avfallsbehållarna transporteras till SKB för slutförvaring i SFL. Gränssnittet för leverans behöver tydliggöras och så även ansvaret för att kraven på kärnämneskontrollen ska kunna uppfyllas både från AB SVAFO och SKB.

Metoder för verifiering, system för märkning, paketering, sigillhantering, transport och slutförvaring med hänsyn till avfallets särart behöver utformas.

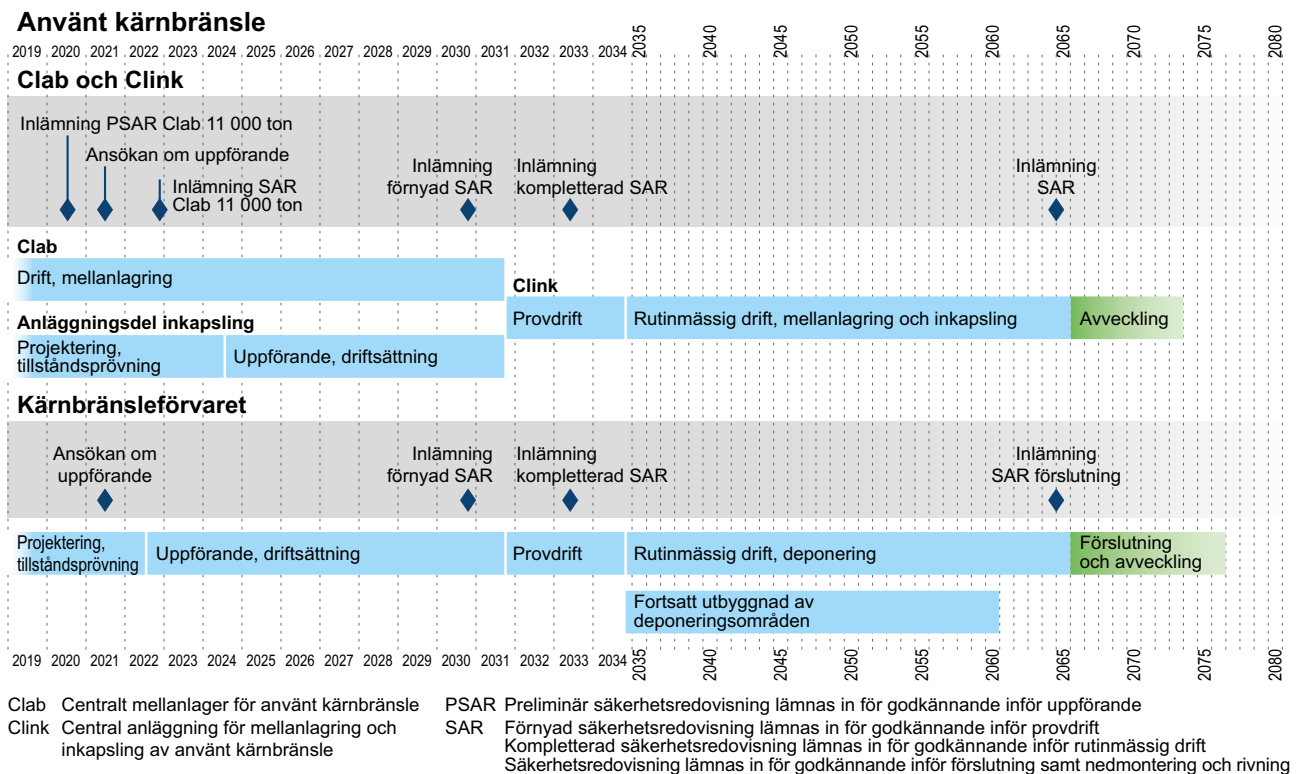
För slutförvarsanläggningen ska kontrollen av kärnämne beaktas redan under konstruktion och anläggningen ska i den internationella kontrollen verifieras mot ritningar under uppförandet och under drift.

3.4 Genomförandeplan för använt kärnbränsle

I detta avsnitt beskrivs nuläget och den övergripande planeringen för kommande aktiviteter för KBS-3-systemets olika anläggningar. Figur 3-11 illustrerar en översiktlig tidsplan tillsammans med viktiga milstolpar.

SKB:s verksamhet avseende det använda kärnbränslet omfattar huvudsakligen följande delar:

- Slutförande av tillståndsprövningarna för KBS-3-systemet.
- Teknikutveckling av KBS-3-systemet för att kunna ta det i drift.
- Säkerhetsredovisningar för anläggningarna inom KBS-3-systemet.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av slutförvarsanläggningen i Forsmark.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling i Oskarshamn.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av produktionssystemet för kapslar.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av produktionssystemet för buffert och återfyllnadsmaterial.
- Planering och förberedelser för utökning av mellanlagringskapaciteten i Clab utöver 8 000 ton bränsle.



Figur 3-11. Översiktlig tidsplan för KBS-3-systemets olika anläggningar.

De två anläggningsprojekten och arbetet med säkerhetsredovisningar för anläggningarna inom KBS-3-systemet är primära avnämare av den forskning och teknikutveckling för KBS-3-systemet som genomförs.

Planeringen bygger på erfarenheter och bedömningar av tidsåtgång för tillståndsprocess, uppförande och driftsättning och syftar till att driften av systemet ska starta så tidigt som möjligt.

3.4.1 Nuläge

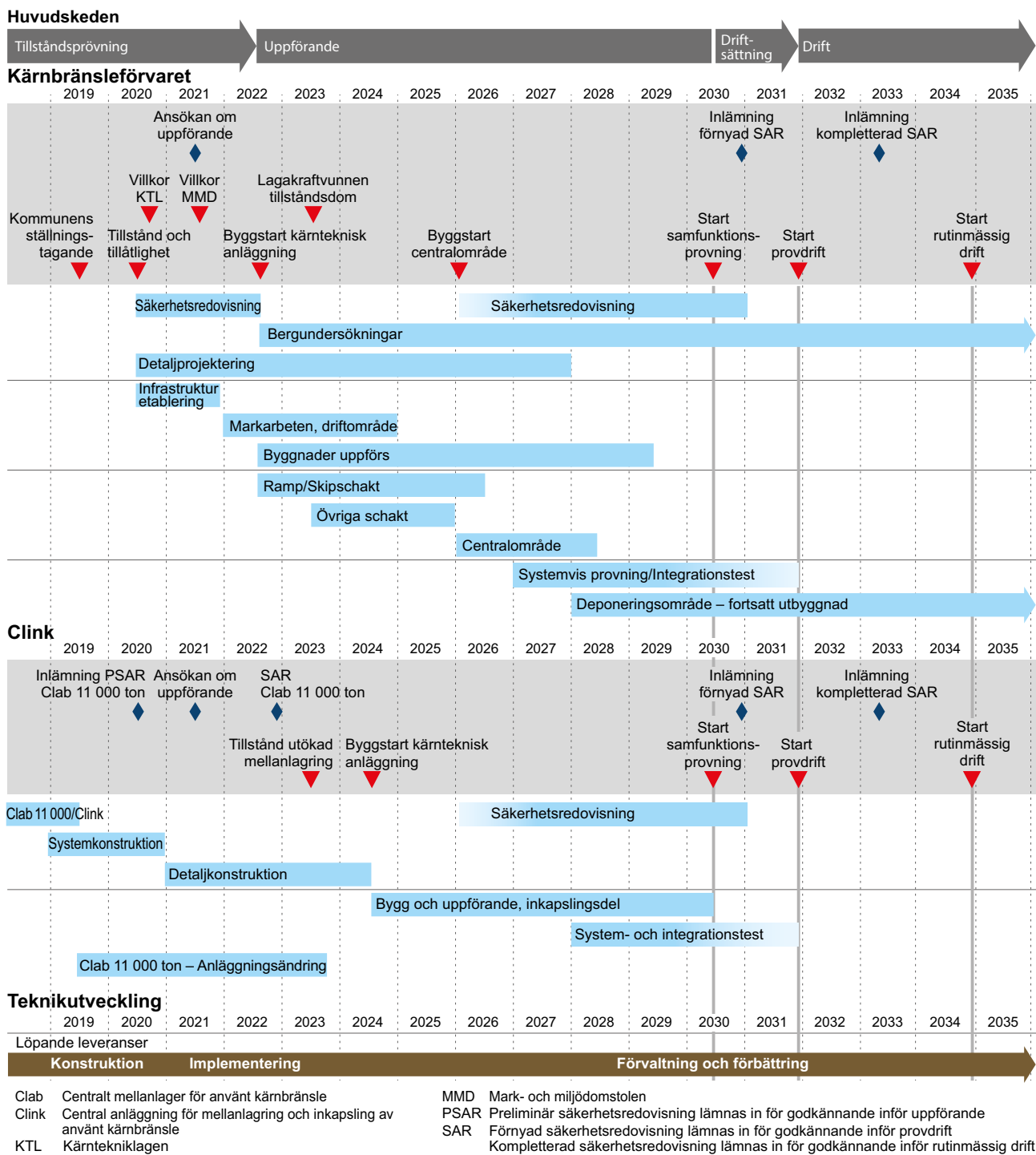
Nuläget för arbetet med återstående delar och anläggningar av KBS-3-systemet kan sammanfattas i följande punkter:

- Utifrån gällande prövningsunderlag, med ansökningarna 2011 som grund, har SKB planerat och strukturerat det arbete som kvarstår fram till start av provdrift av KBS-3-systemets ingående anläggningar.
- Tillståndsprovningarna fortskrider, några viktiga milstolpar som har passerats är:
 - Kungörelse av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen gjordes i januari 2016.
 - Huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen hölls hösten 2017 och i januari 2018 lämnade både SSM och Mark- och miljödomstolen sina yttranden till Miljö- och energidepartementet (Miljödepartementet från 1 april 2019).
 - I juni 2018 fattade Oskarshamns kommun ett positivt beslut i vetofrågan och godkände uppförande av Clink.
 - SKB besvarade i april 2019 begäranden om kompletteringar till Miljödepartementet.
- Nu pågår förberedande arbete inför byggstart, vilket bland annat inkluderar kompletterande geotekniska undersökningar, förprojektering och utredningar samt formulering av krav.
- Arbetet med säkerhetsredovisningar för anläggningarna inom KBS-3-systemet pågår. Detta arbete utgår från erfarenheterna från upprättandet av redovisningarna av säkerheten efter förslutning (SR-Site) och säkerheten under drift (SR-Drift). Arbetet med att ta fram de planer som SSM efterfrågat i sina granskningsrapporter rörande SAR-relaterade arbeten fram till driftskedet pågår också.
- Modernisering av SAR för Clab har genomförts och ytterligare uppdateringar pågår för att ge goda förutsättningar för utökning av mellanlagringskapaciteten i Clab till 11 000 ton och för Clink.
- Den ökade inlagringen av använt kärnbränsle på Clab, från dagens tillståndgivna mängd på 8 000 ton till 11 000 ton, kräver att förnyade konstruktions- och säkerhetsanalyser genomförs för anläggningen. De genomförda analyserna kommer att dokumenteras i en preliminär säkerhetsredovisning för Clab 11 000 ton. Den preliminära säkerhetsredovisningen ska redovisas för SSM. Säkerhetsredovisningen kommer ligga till grund för myndighetens beslut om att få utöka inlagringen på Clab. Redovisningen kan dock inges tidigast efter det att regeringen lämnat tillstånd för ökad inlagring enligt den ansökan som SKB lämnat enligt kärntekniklagen.
- Arbeten avseende systemprojektering av den integrerade mellanlagrings- och inkapslingsanläggningen, Clink, pågår och beräknas avslutas år 2020.

Teknikutvecklingsprojekten för Kärnbränsleförvaret är strukturerade i enlighet med de så kallade produktionslinjerna vilka är kopplade till förvarets barriärer och delar (kapsel, buffert, återfyllning, förslutning och berg). Projekten styrs övergripande av en strategisk teknikutvecklingsplan som kopplar ihop teknikutvecklingens leveranser med anläggningsprojekt och framtida säkerhetsredovisningar.

3.4.2 Övergripande planering

Etableringen av KBS-3-systemets anläggningar indelas i följande huvudskeden: tillståndsprovning (och projektering), uppförande, driftsättning och drift. De verksamheter som planeras under olika skeden sammanfattas för respektive anläggning i avsnitt 3.4.3 till 3.4.5. En del milstolpar som anges i figur 3-12 avser leveranstillfällen för resultat från teknikutveckling, det vill säga tidpunkter när teknikkomponenter och lösningar ska finnas färdiga att tas i bruk eller ha nått en viss utvecklingsfas (avsnitt 4.1.3). Andra milstolpar avser utvecklingen i tillståndsärendet utifrån SKB:s bedömningar av tidsplaner för regeringens beslut samt Mark- och miljödomstolens respektive SSM:s fortsatta hantering.



Figur 3-12. Uppskattad översiktlig tidsplan för etablering av Kärnbränsleförvaret och Clink utifrån aktuellt läge i tillståndsärendet KBS-3. Teknikutveckling som behövs till angivna milstolpar redovisas i kapitel 4.

Enligt planerna inleds uppförandet av Kärnbränsleförvarets tillfarter cirka 2022. För Clink inleds uppförandet cirka 2024 så att anläggningarna ska kunna tas i drift samtidigt, cirka 2031.

Jämfört med de planer som redovisades i Fud-program 2016 har tidpunkten för byggstart av Kärnbränsleförvaret och Clink senarelagts med cirka två år. Anledningen är att huvudförhandlingen i Mark- och miljödomstolen senarelades och att domstolen begärde komplettering avseende framför allt kapseln som barriär. SKB har lämnat kompletteringen till Miljödepartementet i april 2019.

Under pågående tillståndsprövning anpassas projektens framdrift till de kompletteringar som SKB behöver utföra samt eventuell ny information från myndigheter. De närliggande milstolparna är

- Östhammars kommuns ställningstagande
- regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet
- huvudförhandling om tillstånd och villkor i Mark- och miljödomstolen
- inlämnande till SSM av ansökan inför uppförande för Kärnbränsleförvaret och Clink.

I och med att ovanstående milstolpar passeras ökar SKB takten i förberedelsearbetet. Exempelvis kommer ett omfattande arbete avseende detaljprojektering av anläggningsdelar och tekniska system att inledas.

Innan uppförande av de anläggningsdelar som har betydelse för säkerheten i Kärnbränsleförvaret kan inledas, ska en ansökan om uppförande lämnas in och godkännas av SSM. I ansökan ingår bland annat följande redovisningar:

- Den preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR).
- En beskrivning som visar att det finns förutsättningar för SKB att genomföra planerade aktiviteter med den kvalitet som behövs från säkerhets- och strålskyddssynpunkt under anläggningens hela livscykel. Redovisningen benämns Suus (Säkerhet under uppförandeskedet).
- Planer för fortsatt forskning och utveckling till kommande steg i tillståndsansökan (inför driftskedet). Syftet med denna handling är att samla de mer omfattande planerna för forskning och utveckling som SSM i granskningsrapporter identifierat som nödvändiga för den fortsatta prövningen (fram till SAR inför driftskedet). Den innehåller bland annat detaljundersöknings- och övervakningsprogram. Planerna och programmen ska beskriva hur SKB avser att hantera de frågeställningar som SSM lyft i sina granskningsrapporter som lämnades till Miljö- och energidepartementet i januari 2018 (från 1 april 2019 Miljödepartementet).

Redovisningarna kommer att ta hänsyn till resultat av bland annat den forskning, teknikutveckling och projektering som skett sedan ansökningarna sammanställdes samt sådant av relevans som framkommit vid prövningen av ansökningarna.

3.4.3 Mellanlagring

Det använda kärnbränslet mellanlagras i dag i Clab. SKB planerar att uppföra en ny anläggningsdel i anslutning till Clab för inkapsling av det använda bränslet. De båda anläggningsdelarna kommer sedan att drivas som en integrerad anläggning, Clink.

Lagringskapaciteten i Clab har två begränsningar, dels tillåten mängd använt kärnbränsle i anläggningen, dels antalet fysiska lagringspositioner i bassängerna. Clab har i dag tillstånd att förvara 8 000 ton använt kärnbränsle i anläggningen. Enligt prognoser från kärnkraftverken når mängden använt kärnbränsle i Clab 8 000 ton vid årsskiftet 2023/2024. SKB planerar därför att senast vid denna tidpunkt ha tillstånd för utökad mellanlagring i Clab.

Under våren 2015 kompletterade SKB ansökningarna för Clab och Clink. I kompletteringen ingår ett tilläggsyrkande för att utöka den mellanlagrade mängden i Clab till 11 000 ton.

SKB:s inriktning är att erhålla tillstånd enligt kärntekniklagen från regeringen för utökad mellanlagringskapacitet till 11 000 ton använt kärnbränsle i Clab (Clab 11 000 ton) och inkapslingsanläggningen (Clink) samtidigt. Tillståndet för de olika verksamheterna kommer SKB dock att vilja ta i anspråk vid olika tillfällen. Planeringen för tillstånd till Clab 11 000 ton respektive Clink görs i förhållande till den stegvisa prövningsprocess som följer av SSM:s föreskrifter.

För att erhålla tillstånd att mellanlagra mer använt kärnbränsle enligt kärntekniklagen krävs att SKB efter regeringstillstånd lämnar en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR Clab 11 000 ton) till SSM för godkännande. Uppgraderingen av anläggningen samt inlämnandet av SAR planeras ske senast 2023.

Det totala kylbehovet vid inlagring av 11 000 ton bränsle uppgår till 12 MW. En uppgradering av den befintliga kylkapaciteten i Clab har genomförts och SAR för anläggningen uppdateras med avseende på detta.

Enligt gällande planer kommer provdriften av Kärnbränsleförvaret och Clink att inledas cirka 2031. I och med detta kan även utlastning av bränslet på Clab inledas. För att kunna ta emot det använda bränsle som uppkommer fram till dess krävs, förutom utökning av den tillståndsgivna lagringskapaciteten, åtgärder för att frigöra förvaringsutrymme för bränsle. Vidtas inga åtgärder så kommer lagringspositionerna vara fyllda cirka 2028. SKB planerar därför att segmentera styrstavarna från BWR-reaktorerna som i dag kräver stort lagringsutrymme. Efter segmentering kan styrstavarna lagras tätare i nya förvaringskassetter och återinlagras i Clabs förvaringsbassänger. SKB planerar att påbörja segmenteringen i mitten av 2020-talet. För de styrstavar som i dag lagras i Clab tar arbetet cirka fem år. För nya styrstavar sker segmenteringen successivt när dessa tas emot för mellanlagring. Genom denna åtgärd beräknas lagringsutrymmet räcka till cirka 2034.

Handlingsalternativ för utökad lagringskapacitet vid en eventuell försening i drifttagandet av Kärnbränsleförvaret och Clink beskrivs i avsnitt 3.7.5.

3.4.4 Inkapsling

SKB ansökte 2006 enligt kärntekniklagen om att få uppföra, inneha och driva en inkapslingsanläggning. Ansökan uppdaterades 2009 för att uppföra en inkapslingsdel i anslutning till Clab som en integrerad anläggning, Clink. Därefter har SKB lämnat in ett antal kompletteringar och redovisningar till SSM (avsnitt 1.2.3). I mars 2011 lämnade SKB en ansökan enligt miljöbalken för hela slutförvarssystemet, innefattande Clink och Kärnbränsleförvaret.

Den teknikutveckling som pågår och planeras avser främst processerna kring hanteringen och kontrollen av det använda kärnbränslet, tillverkning av komponenter till kapseln samt svetsning av kapselns förslutnings- och bottensvets.

Systemprojektering

Systemkonstruktionen pågår och resultat från denna kommer att ligga till grund för uppförandeskedet som följer därefter. Parallellt med systemkonstruktionen upprättas handlingar som inför uppförandeskedet utgör underlag för ansökan till SSM om godkännande att få börja uppföra anläggningen. I ansökan ingår en preliminär säkerhetsredovisning, PSAR, och övrigt underlag i enlighet med den stegvisa tillståndsprövningen. Under systemkonstruktionen görs också en översyn av de styrande dokument som finns specifikt för Clab. Vid behov görs kompletteringar med avseende på den styrning som specifikt krävs för uppförandet av Clink. Detta ska finnas framme för implementering inför uppförandeskedet.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SSM har godkänt ansökan, med tillhörande PSAR, om att få påbörja uppförandet. Uppförandeskedet omfattar detaljkonstruktion, etablering av byggarbetsplats, markberedning, uppförande av en inkapslingsdel, installationer i inkapslingsdelen, anläggningsändringar på Clab, sammankoppling av nya och befintliga anläggningsdelar samt förberedelse för provdrift. Icke nukleär provning sker under uppförandeskedet för komponenter och system, av hela inkapslingsprocessen och slutligen för hela KBS-3-systemet. Delar av den icke nukleära provningen kommer att ske med den kommande driftpersonalen närvarande som en del av utbildningen inför den nukleära driften.

Uppförandet av inkapslingsdelen kommer att ske i anslutning till Clab och även omfatta anläggningsändringar på Clab med anledning av den kommande Clink-anläggningen. Den huvudsakliga säkerhetsfrågan under uppförande av Clink är att säkerheten för Clab med avseende på anläggning och verksamhet kan upprätthållas under hela uppförandeskedet. Driften av Clab fortgår under hela uppförandet av inkapslingsdelen, men mottagning av bränsle kan under vissa tider begränsas efter planering med kärnkraftverken.

Uppförandeskedet kommer att avslutas i och med att de båda anläggningsdelarna kopplas samman fysiskt och processtekniskt. Detta sker genom att väggar mellan mellanlagringsdelen och inkapslingsdelen öppnas samt att installationerna i de båda anläggningsdelarna sammankopplas. Under uppförandeskedet kommer utbildning att hållas för kommande driftpersonal och styrande dokument att tas fram för att kunna genomföra provdrift.

Driftsättning

Driftsättning sker i två steg med godkännande från SSM för respektive steg. Först genomförs provdrift efter en ansökan till SSM som innehåller en förnyad säkerhetsredovisning. Denna säkerhetsredovisning grundas på den faktiska anläggningen efter uppförandet och de erfarenheter som hämtats vid den icke nukleära provningen. Inför provdriften upprättas också säkerhetstekniska driftförutsättningar, STF, och andra dokument med instruktioner och styrning av driften.

Vid driftsättningen provas systemen, först vart och ett för sig och sedan gradvis mera sammankopplade. Samtidigt som anläggningens delar driftsätts byggs driftorganisationen upp. Personalen utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrineringen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning, som innebär att hela anläggningen provas under driftsmässiga förhållanden.

När provdrift genomförts och utvärderats upprättas en ansökan om att få ta anläggningen i rutinemässig drift. Till den ansökan bifogas en kompletterad säkerhetsredovisning baserad på de erfarenheter som inhämtats och åtgärder som har vidtagits under provdriften. Denna säkerhetsredovisning ska därefter löpande förvaltas och hållas aktuell i enlighet med SSM:s föreskrifter.

Produktionssystem för kapslar

SKB:s produktionssystem för kapslar ska säkerställa den långsiktiga försörjningen av kapslar till Clink. Produktionssystemet kommer att omfatta ett antal externa leverantörer samt en kapselanläggning för montering och kvalitetssäkring av kapselkomponenter. Leverantörerna tillverkar segjärnsinsatser och kopparkomponenter till kapslarna enligt SKB:s specifikationer. Dessa levereras till SKB:s kapselanläggning där mekanisk bearbetning, kontroll mot fastställda kriterier samt montering av komponenterna görs. Resultatet blir en kapsel som levereras till Clink. Kapselanläggningen kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning, eftersom använt kärnbränsle inte kommer att hanteras här.

Arbetet med kapselanläggningen befinner sig för närvarande i ett tidigt stadium jämfört med Kärnbränsleförvaret och Clink. Anledningen till detta är att tidsplanen för uppförande och driftsättning av den är väsentligt kortare än för de övriga anläggningarna i KBS-3-systemet. En förstudie som bland annat beskriver anläggningens funktioner, layout och maskinpark har genomförts. Ett av syftena med förstudien var att uppdatera tidigare utredningar och klargöra strategiska ställningstaganden rörande bland annat avgränsning mot externa leverantörer och omfattning av kvalitetsarbetet kopplat till kapselproduktionen.

Förnyade analyser och planering av produktionssystemet för kapslar kommer att genomföras innan inlämnandet av PSAR för Clink. Som ett led i denna planering utreder SKB och Posiva bland annat förutsättningarna för ett gemensamt produktionssystem för kapslarna. Ett gemensamt system skulle kunna ge samordningsfördelar, men innebär också att produktionen måste starta betydligt tidigare i förhållande till SKB:s planer för att kunna fylla Posivas behov.

Den teknikutveckling som pågår och planeras avser främst processer för att styra och kvalitetskontrollera tillverkning av komponenter till kapseln, svetsning av kopparbotten och förslutning samt utveckling av kontroll och provning av komponenter och svetsar. Detta redovisas i kapitel 9.

3.4.5 Slutförvaring

Slutförvaring av det använda kärnbränslet planeras ske i Kärnbränsleförvaret i Forsmark. Ansökningar om uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret lämnades in i mars 2011 och provning av ansökningarna pågår. Yttranden från SSM och från Mark- och miljödomstolen lämnades till regeringen i januari 2018.

Tillståndsprövning och projektering

Anpassat till tillståndsprövningarnas framskridande görs de förberedelser som krävs för att kunna påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvarets tillfarter kort efter att alla tillstånd erhållits. Uppförandeskedet kommer att medföra nya förutsättningar för SKB:s organisation och verksamhet. Det gäller exempelvis styrning av projektet baserat på informationsflödet mellan byggarbeten och undersökningar, modellering, projektering och säkerhetsanalys. Under pågående tillståndsprövning kommer projektorganisationen successivt att bemannas efter de arbetsuppgifter som projektet har.

Parallellt med tillståndsprövningarna projekteras anläggningen. SKB har fullföljt systemskedet och förbereder samt utför detaljprojektering. Leveranser från teknikutvecklingen implementeras efter hand. Förberedelserna omfattar även byggtkniska och geologiska undersökningar. Markundersökningar kommer att göras som underlag för placering av byggnader och dimensionering av grundläggning. Även berget kommer att undersökas, främst för tillfarternas planerade lägen. Den lokala infrastrukturen för anläggningarna kommer att förberedas. Det handlar i stor utsträckning om att i samarbete med Forsmarks Kraftgrupp AB anpassa den infrastruktur som redan finns i Forsmark så att även Kärnbränsleförvarets och utbyggnaden av SFR:s behov kan tillgodoses.

Under tillståndsprövningarna sker även arbeten avseende Kärnbränsleförvarets påverkan på den yttre miljön. SKB har ansökt om artskyddsdispens hos Länsstyrelsen i Uppsala län i detta ärende. Den av länsstyrelsen beviljade dispensen har överklagats och ärendet ligger nu hos Mark- och miljödomstolen. Först efter att regeringen gett tillåtelse enligt miljöbalken för Kärnbränsleförvaret kommer artskyddsfrågan att behandlas. Övergripande regeringsvillkor för Kärnbränsleförvarets verksamhet kommer att meddelas i samband med erhållande av tillstånd enligt kärntekniklagen samt tillåtelse enligt miljöbalken. Därefter har SSM möjlighet att meddela särskilda villkor enligt kärntekniklagen. Enligt miljöbalken kommer tillstånd och villkor att meddelas efter att ytterligare en huvudförhandling hållits i Mark- och miljödomstolen.

Detaljprojekteringen genomförs successivt i takt med att anläggningen byggs ut och tar hänsyn till resultat från teknikutvecklingen. Resultat från projekteringen behövs som underlag för bland annat fördjupad planering, upphandlingar och byggarbeten. Under pågående tillståndsprövning detaljprojekteras därför i första hand anläggningsdelar som ska byggas tidigt. Det är framför allt etableringsytor, platskontor, tillfarter till förvaret, det vill säga ramp, schakt och centralområde samt delar av anläggningen ovan mark. För genomförandet av detaljprojekteringen som avser förvarsområdet, speciellt av deponeringstunnlar och deponeringshål, behövs även resultat och underlag från teknikutveckling inom berg, se kapitel 12. När anläggningen tagits i drift fortsätter detaljprojekteringen av de delar som successivt byggs ut parallellt med deponering.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått nödvändiga tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av slutförvarsanläggningen. Det innebär att en ansökan om uppförande ska ha lämnats in och godkänts av SSM.

Inledningsvis görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor görs i ordning och byggprovisorier etableras. Ovan- och undermarksanläggningen byggs ut parallellt, med infrastruktur och byggnader som färdigställs ovan mark.

Uppförandet av undermarksanläggningarna delas in i tre delar: Den första när tillfarter (schakt och ramp) drivs ner till förvarsnivån, den andra när centralområdets bergutrymmen byggs och tekniska system installeras och den tredje när det första deponeringsområdet etableras och anläggningen driftsätts och provas. Uppförandet av tillfarterna är tidskritiskt för hela projektets framdrift. Rampen och det schakt där bergmassor ska transporteras upp, tas ut parallellt, från ytan och nedåt. Fram till dess att schaktet nått förvarsnivån är bergarbetena begränsade till dessa två fronter. När förvarsnivån nåtts startar uppförandet av centralområdet. Efter att berglaststationen och berghissen (skipen) har tagits i drift ökar kapaciteten för berghanteringen radikalt och flera drivningsfronter kan successivt etableras. Bergarbetena för tillfarter och centralområde åtföljs av montagearbeten för den utrustning som behövs för driften av anläggningen. Anläggningarna ovan mark byggs i en takt som anpassas till undermarksarbetena.

Drivningen av tillfarterna och centralområdet kommer att ge fördjupade kunskaper om bergförhållandena som kommer att omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller modifiering av förvarsutformningen.

Parallellt med utbyggnaden av centralområdet görs undersökningar för det första deponeringsområdet och en tunnel drivs som ger tillträde till detta område. Från tunneln drivs ett fåtal deponeringstunnlar där deponeringshål borras. Syftet med att färdigställa ett deponeringsområde i detta tidiga skede är dels att använda en del av området för integrationstester och samfunktionsprovning dels att samla de geovetenskapliga data som behövs för att underbygga en förnyad säkerhetsredovisning inför provdrift. Under provdriften kommer de första kapslarna med använt kärnbränsle att deponeras i den del av deponeringsområdet som inte används för tester.

Driftsättning

Drift av slutförvaret omfattar dels successivt uppförande och färdigställande av platsanpassade deponeringstunnlar och dels deponering, återfyllning och pluggning av deponeringstunnlar. Driftsättningen av slutförvarets delsystem sker successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras. Exempelvis kommer uppföringssystemet för bergmassor, ventilation, styrsystem med mera att tas i drift innan de första deponeringstunnlarna är byggda.

Vid driftsättningen provas systemen, först vart och ett för sig och sedan gradvis mera sammankopplade. Samtidigt som anläggningens delar driftsätts byggs driftorganisationen upp. Personalen utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrimningen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning, som innebär att hela anläggningen provas under driftmässiga förhållanden. Då genomförs alla moment i verksamheten, inklusive deponering av ett antal kapslar, utan innehåll av använt kärnbränsle. Deponeringen sker i det första deponeringsområdet som byggts under senare delen av uppförandeskedet. Slutligen genomförs en samfunktionsprovning av KBS-3-systemet som innebär att gränssnitten mellan Kärnbränsleförvaret, Clink och transportsystemet provas. Den teknikutveckling som behövs för att färdigställa systemet för deponering omfattande buffert, återfyllning, plugg samt metodik och maskiner för installationer redovisas i kapitel 11. Motsvarande teknikutveckling som behövs för bergproduktion och detaljundersökningar redovisas i kapitel 12.

Driftsättningen avslutas när SKB får SSM:s medgivande till provdrift av slutförvarssystemet. Alla funktioner och resurser samt utrymmen för deponering i ett första deponeringsområde ska då finnas tillgängliga så att provdriften kan inledas.

När system och processer i anläggningen prövats och fungerar som avsett lämnar SKB till SSM en förnyad säkerhetsredovisning som avspeglar anläggningen som den är byggd. SSM bedöms kunna godkänna redovisningen cirka 2031. Innan en anläggning får tas i rutinemässig drift ska säkerhetsredovisningen kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM.

Kärnämneskontroll

Syftet med kärnämneskontroll är att kontrollorganen kan förvissa sig om att allt det använda kärnbränslet kapslas in och placeras i Kärnbränsleförvaret. Tillämpningen av kärnämneskontroll säkerställer kontinuerlig kännedom om att kärnbränslet efter slutlig verifiering och inkapsling placeras i Kärnbränsleförvaret och inte kommer på avvägar.

Systemet för kärnämneskontroll kommer bland annat att innehålla kontrollerade uppgifter om vilka bränsleelement som kapslarna innehåller, när bränslet kapslades in, transporterades och anlände till Kärnbränsleförvaret, var kapslarna är deponerade och det totala innehållet av kärnämne i slutförvaret.

Inför nybyggnation av kärntekniska anläggningar ska kontrollen av kärnämne beaktas redan i konstruktionsskedet så att tillsyn och kontroll underlättas under driftskedet. Arbetet inom detta område kommer att intensifieras under perioden och det huvudsakliga arbetet kommer att ske i anläggningsprojekten. Arbetet syftar till att berörda intressenter ska vara medvetna om de krav som finns för kärnämneskontrollen för att aktiviteter, konstruktion och anläggningsuppförande ska kunna planeras effektivt för hela KBS-3-systemet på ett sammanhållet sätt.

En viktig del av den internationella kontrollen av Kärnbränsleförvaret är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med redovisade ritningar. Detta görs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har redovisats och att det inte förekommer utrymmen där man kan bedriva otillåten verksamhet.

3.5 Genomförandeplan för avveckling av kärntekniska anläggningar

Planeringen för avveckling av kärnkraftverken i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals, Ågestareaktorn samt för SKB:s kärntekniska anläggningar redovisas i del III. Där beskrivs hur olika arbetsmoment har fördelats mellan kärnkraftsföretagen och SKB, samt inom de två koncernerna Uniper och Vattenfall. Vidare redovisas det utvecklingsarbete som kvarstår för att möjliggöra avvecklingen av de berörda anläggningarna.

Fud-program 2019 utgör tillsammans med respektive tillståndshavares avvecklingsplan(er) och industrins gemensamma kostnadsberäkning i planrapporten tre samverkande, kravställda, toppdokument som redovisar den avveckling som planeras av de svenska kärnkraftverken och övriga befintliga eller planerade kärntechniska anläggningar, till exempel Clink och SKB:s slutförvar. De tre toppdokumenten kompletterar varandra till sitt innehåll, där Fud-programmet redovisar den utvecklingsverksamhet och övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt kunna avveckla kärnkraftverken. Avvecklingsplanerna redovisar det tänkta genomförandet med fokus på strålsäkerhet, samt strategiska aspekter. Planrapporten redovisar den beräknade kostnaden för avvecklingen så som den beskrivs i Fud-programmet och avvecklingsplanerna. Toppdokumenten baseras på underliggande dokumentation, där en central gemensam referens utgörs av de rivningsstudier som genomfördes för respektive förläggningsplats inför Planrapport 2013 samt uppdaterad planering avseende de reaktorer som kommer att rivras på 2020-talet. Rivningsstudierna är framtagna med kostnadsfokus men beskriver även det tekniska tillvägagångssättet och berör därmed aspekter på alltifrån organisation till avfallsvolymer. Innehåll i rivningsstudier och övrig underlagsdokumentation återges summariskt när de refereras i de tre toppdokumenten.

3.5.1 Översikt avveckling

Avveckling av en reaktoranläggning för att uppnå en friklassad anläggning, omfattar ett flertal aktiviteter. Inför avveckling måste erforderliga tillstånd finnas. När en anläggning tas ur drift vidtar avställningsdrift då allt bränsle transporteras bort från reaktorn till Clab för mellanlagring. Vid behov vidtar därefter servicedrift fram till att nedmontering och rivning påbörjas. Kärnkraftsföretagens planering är att starta nedmontering och rivning så snart som möjligt efter slutlig avställning. När anläggningen/anläggningsdelarna friklassats kan konventionell rivning och återställning av mark genomföras.

I och med att nedmontering och rivning av Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågesta påbörjas innan det utbyggda SFR står klart för att ta emot kortlivat drift- och rivningsavfall behöver tillståndshavarna mellanlagra detta avfall lokalt eller externt. Se avsnitt 3.3.3 för mellanlagring av det kortlivade avfallet och avsnitt 3.3.4 för det långlivade avfallet.

3.5.2 Nuläge och övergripande planering

Figur 3-13 visar den övergripande tidsplanen för avveckling av samtliga kärnkraftverk och SKB:s anläggningar. Nedan ges en sammanfattning av nuläget för respektive kärnkraftverk samt planeringen för den kommande avvecklingen av dessa anläggningar och SKB:s anläggningar.

Barsebäck Kraft AB

Reaktortankarnas interndelar är segmenterade. Dessa mellanlagras i ståltankar i en lagerbyggnad på anläggningen. Erforderliga tillstånd har erhållits för nedmontering och rivning. Förberedande åtgärder som krävs för nedmontering och rivning är genomförda.

Nedmontering och rivning av kärnkraftverket startar 2020 och friklassning planeras påbörjas i slutet av 2020-talet och vara klar en bit in på 2030-talet.

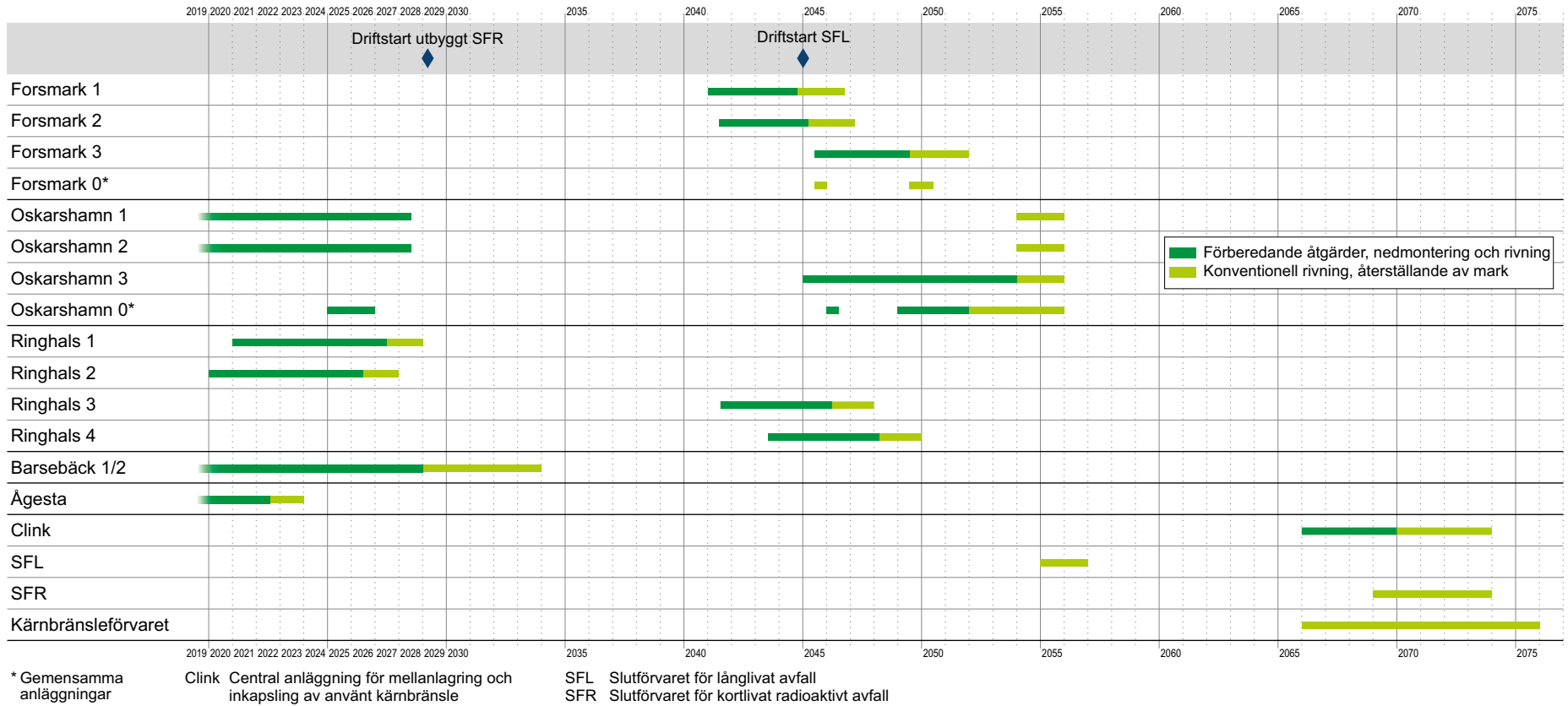
OKG Aktiebolag

Vid Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 pågår nedmontering och rivning. Ett flertal förberedande åtgärder har vidtagits. Reaktorns interna delar på Oskarshamn 2 har segmenterats medan segmentering för Oskarshamn 1 pågår. Segmenteringen beräknas vara klar under våren 2020. Slutlig friklassning av byggnaderna är planerad till omkring 2028.

Oskarshamn 3 planeras att vara i drift till 2045 då avvecklingen inleds. Friklassningen av Oskarshamn 3 avses att vara utförd till omkring 2053.

Reaktorerna har ett antal gemensamma serviceanläggningar som kallas block 0. Dessa kommer att avvecklas i anslutning till avvecklingen av Oskarshamn 3, med undantag för den befintliga gemensamma avfallsanläggningen som kommer avvecklas i samband med avvecklingen av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

Avveckling av reaktorläggningar och SKB:s anläggningar



Figur 3-13. Översikt av kärnkraftbolagens och SKB:s tidsplaner för avveckling.

De återstående gemensamma anläggningarna som inte krävs för avvecklingen av Oskarshamn 3 kommer att nedmonteras och rivs parallellt med Oskarshamn 3. Övriga gemensamma anläggningar nedmonteras och rivs efter genomförd avveckling av Oskarshamn 3 alternativt lämnas kvar till annan aktör. Slutlig friklassning av de gemensamma anläggningarna beräknas ske omkring 2051.

Ringhals AB

År 2015 tillsattes en linjefunktion inom Vattenfall AB med uppgift och ansvar att koordinera, samordna och driva avvecklingsfrågor inom Vattenfallkoncernen, affärsenheten Business Unit Nuclear Decommissioning (BUND). Analys och planering inför operativa avvecklingsåtgärder genomförs av BUND på uppdrag av och i nära samverkan med tillståndshavaren, Ringhals AB. Fokus i närtid är att analysera och planera för avvecklingen av Ringhals 1 och Ringhals 2 samt att utvärdera hur de specifika momenten under avvecklingen ska lösas på bästa sätt.

I samband med avställningsbeslutet för Ringhals 1 och Ringhals 2 startades projekt Sture (Säker och Trygg Utfasning av Reaktor 1 och 2) som syftar till att förbereda avvecklingen av de två reaktorerne samtidigt som driften av Ringhals 3 och Ringhals 4 fortgår.

Ringhals 1 och Ringhals 2 planeras att slutligen ställas av vid årsskiftena 2020/2021 respektive 2019/2020 och planeras vara avvecklade inom perioden 2028–2030. Ringhals 3 och Ringhals 4 planeras vara i drift fram till 2041 respektive 2043. Enligt nuvarande planering kommer BWR-reaktortanken från Ringhals 1 att segmenteras. Det finns också ett inriktningsbeslut att segmentera PWR-reaktortanken från Ringhals 2. För Ringhals 3 och Ringhals 4 är det fortfarande en öppen fråga.

Forsmarks Kraftgrupp AB

Forsmark Kraftgrupp AB:s samtliga reaktorer planeras vara i drift i 60 år, vilket innebär till 2040, 2041 respektive 2045 för Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3.

Ågestaanläggningen

Kärnkraftverket i Ågesta befinner sig sedan 1974 i servicedrift. Ett avvecklingsprojekt startade i november 2015. Under förutsättning att erforderliga tillstånd har erhållits planeras nedmontering och rivning att starta under hösten 2019. Avvecklingen planeras att vara genomförd till 2023.

SKB:s anläggningar

Avvecklingen av Clink och Kärnbränsleförvaret kan inledas tidigast när allt använt kärnbränsle har deponerats och avvecklingen av SFR kan inledas tidigast när avfallet från avvecklingen av Clink har deponerats. SFL däremot kan avvecklas då det långlivade avfallet från den sista reaktorn tagits om hand. Stängningen av SFL förutsätter att rivningsavfallet från Clink inte innehåller något långlivat avfall.

3.6 Genomförandeplan för transporter

3.6.1 Nuläge

Transportsystemets uppgifter är att ombesörja transport av använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken till Clab i Oskarshamn och transport av avfall från kärnkraftverken och Studsvik till SFR i Forsmark.

Transportvolymen per år omfattar i dagsläget i genomsnitt 90 behållare med använt kärnbränsle och cirka tio behållare eller containrar med radioaktivt avfall till SFR. De flesta transporterna görs med fartyget m/s Sigrid och resterande med terminalfordon på land. I dagsläget gör m/s Sigrid cirka 20 resor per år, vilket innebär att det finns en överkapacitet i transportsystemet.

Årligen genomför SKB dessutom ett antal fraktoppdrag på den internationella marknaden, som transport av fuktavskiljare, turbindelar och andra projektlastar.

3.6.2 Övergripande planering

Efter år 2030, förväntas behovet av att transportera använt kärnbränsle och radioaktivt avfall att successivt öka när flera av SKB:s nya anläggningar har tagits i drift. De volymer som tillkommer, jämfört med dagsläget, är i huvudsak inkapslat använt kärnbränsle som regelbundet ska transporteras från Clink till Kärnbränsleförvaret och rivningsavfall från kärnkraftverken som ska till SFR och till SFL när detta förvar tas i drift. Vid dessa transporter kommer kapseltransportbehållare respektive avfallstransportbehållare och ISO-containerar att användas. Transporter med driftavfall till SFR och använt kärnbränsle till Clab för mellanlagring kommer att fortsätta så länge det finns kärnkraftverk i drift.

Transportsystemets planerade framtida kapacitet kan förenklat beskrivas som fartyget m/s Sigrid, bränsletransportbehållare, avfallstransportbehållare, kapseltransportbehållare samt de i dag gällande och kända restriktionerna och förutsättningarna avseende terminalfordon, tid för varje transport inklusive lastning och lossning, servicebehov för fartyg och behållare, isförhållanden etcetera.

Transportbehovet kommer att vara stort under hela 2030-talet. Perioden har därför använts för att uppskatta en genomsnittlig och representativ årsvolym som ska kunna transporteras under denna tid. Enligt denna uppskattning behöver cirka 40 fartygst transporter genomföras per år, 14 transporter med radioaktivt avfall, 15 transporter med inkapslat använt kärnbränsle i kapseltransportbehållare och 11 transporter med använt kärnbränsle i bränsletransportbehållare.

En jämförelse av det årliga transportbehovet i tid under denna period och förväntad tillgänglig transportkapacitet visar att transportsystemets kapacitet är tillräcklig också på lång sikt (Hanström 2019). Fartygets kapacitet bedöms inte vara gränssättande, men den genomförda kartläggningen visar att terminalfordonen, service av transportbehållare samt tiden fartyget ligger still i hamn för lossning kan utgöra begränsningar om de inte hanteras på ett adekvat sätt. Förutsättningarna för utredningen av det årliga transportbehovet bygger delvis på ej fastlagda antaganden. I det kommande arbetet med att utveckla och anpassa transportsystemet kommer dessa genomarbetas.

När SFL är i drift 2045 är transportsystemet som mest belastat. Transporter sker med kopparkapslar till Kärnbränsleförvaret samtidigt med transporter av kort- och långlivat rivningsavfall från avvecklingen av de sista reaktorerna och från AB SVAFO till respektive slutförvar SFR och SFL. I dagens transportsystem finns överkapacitet och systemet förutses klara den ökade transportvolymen.

3.6.3 Transport av låg- och medelaktivt avfall

Styrstavar till Clab

Styrstavar från BWR är långlivat avfall som transporteras till Clab för mellanlagring. Vid transporten används en transportbehållare avsedd för hårdkomponenter.

Kortlivat drift- och rivningsavfall till SFR

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken, Clab och Studsvik till SFR för deponering. Lågaktivt avfall kan transporteras i ISO-containerar medan medelaktivt avfall transporteras i avfallstransportbehållare.

Volymerna av lågaktivt avfall i ISO-containerar som ska deponeras i SFR förväntas öka framöver när kärnkraftverken rivs. Det kommer att transporteras med m/s Sigrid i kampanjer.

Under perioden när utbyggnaden av SFR pågår, kommer inget avfall att kunna deponeras i anläggningen. Detta medför att det avfall som produceras då mellanlagras hos avfallsproducenterna fram till att utbyggnaden av SFR är klar och anläggningen kan ta emot avfall igen. Här ingår även segmenterade reaktortankar från Barsebäck 1 och 2, Ringhals 1 samt Oskarshamn 1 och 2. När utbyggnaden av SFR är klar, kommer det under de första åren att finnas ett stort behov av avfallstransporter, speciellt av ISO-containerar, från avfallsproducenterna.

Även drift- och rivningsavfall från AB SVAFO, Studsvik Nuclear AB och Cyclife Sweden AB i Studsvik samt rivningsavfall från Ågesta kommer att behöva transporteras till SFR. Prognoserna för dessa anläggningar är osäkra men volymen är begränsad jämfört med avfallet från kärnkraftverken.

Långlivat drift- och rivningsavfall till SFL

Långlivat avfall som uppstår på kärnkraftverken under drift samt vid rivningen behöver mellanlagras tills SFL tas i drift.

Allt långlivat avfall som ska till SFL ska transporteras under en tioårsperiod. Avfallet utgörs både av de volymer som finns i mellanlager och det avfall som produceras under SFL:s drifttid.

Innan SFL tas i drift antas det tillkomma transporter av långlivat avfall från Barsebäcks kärnkraftverk till mellanlagring på annan plats. Långlivat avfall uppkommer även från Studsvik Nuclear AB:s verksamheter samt från sjukvård, forskning och industri. Vid rivning av PWR-reaktorerna kommer reaktortankarna att transporteras till SFL för deponering.

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för långlivat medelaktivt avfall placerat i ståltank. Transportbehållaren benämns ATB 1T. Den kommer, på grund av aktivitetens innehåll, att behöva vara utformad enligt IAEA-kraven Typ B(U).

Ett kontrakt tecknades 2014 med en amerikansk leverantör, Holtec International Power Division Inc. om konstruktion, licensiering och tillverkning av ATB 1T. Transportbehållaren licensieras av den amerikanska myndigheten NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) och ett certifikat erhålls av DOT (U.S. Department of Transportation). Godkänt certifikat, Typ B(U), granskas och valideras sedan av SSM. Ansökningshandlingar för licensiering lämnades in till NRC i september 2015 och licensieringsprocessen pågår. NRC har begärt vissa kompletterande tester och förnyade ansökningshandlingar planeras att lämnas in under slutet av 2019. Leverans av den första nya transportbehållaren är planerad till sommaren 2020.

3.6.4 Transport av använt bränsle

Använt kärnbränsle från kärnkraftverken till Clab/Clink

Dagens transporter med använt kärnbränsle i bränsletransportbehållare till Clab kommer fortsätta på motsvarande sätt till Clink så länge det finns reaktorer i drift.

Arbetet för att ersätta SKB:s nuvarande bränsletransportbehållare med nya, som uppfyller moderna krav, fortgår enligt plan. Kontrakt för bränsletransportbehållarna tecknades i oktober 2013 med den amerikanska leverantören, Holtec International Power Division, Inc. Kontraktet omfattar konstruktion, licensiering och tillverkning av fem transportbehållare med kringutrustning. Option på tillverkning av ytterligare en behållare finns. Behållarna har större kapacitet än de befintliga, vilket innebär att färre behållare behövs för att klara de transportmängder som genereras i det svenska systemet. Under 2019 behöver beslut tas om en sjätte behållare ska beställas. NRC:s godkännande av den nya behållaren HI-STAR 80 erhöles i slutet av september 2018 och DOT har utfärdat licens. Ansökan om validering av licens lämnades in till SSM i början av december 2018. Tillverkning av den första HI-STAR 80 har inletts i Holtecs verkstad i Pittsburgh och planerad leverans av den första nya bränsletransportbehållaren är planerad till våren 2021.

År 2015 kom krav som innebar att SKB behövde anskaffa nya bottenstötdämpare till befintliga bränsletransportbehållare (av typen TN17/2). De nya bottenstötdämparna är levererade och certifikatet för transportbehållarna är giltigt till mars 2020. Behållarleverantören TN International har uppdaterat säkerhetsredovisningen och ansökt om ett nytt certifikat hos franska Autorite de Surete Nucleaire giltigt efter 2020. SKB kommer efter erhållandet av det franska certifikatet att ansöka om en svensk validering våren 2020.

Inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret

När Kärnbränsleförvaret tas i drift kommer kopparkapslar med använt kärnbränsle att transporteras regelbundet från Clink till Kärnbränsleförvaret.

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för transport av använt kärnbränsle i kopparkapslar från Clink till Kärnbränsleförvaret. Transportbehållaren benämns kapseltransportbehållare, KTB. Den kommer, på grund av aktivitetens innehåll, att vara certifierad enligt IAEA:s transportrekommendationer som förpackningstyp Typ B. En utredning pågår av hur många kapseltransportbehållare som kommer att behövas.

SKB har tidigare genomfört förstudier rörande tänkbar utformning av kapseltransportbehållare. SKB har tillsammans med leverantörer tagit fram ett förslag på konstruktion och funktionalitet av behållarna. Den slutliga konstruktionen tas fram i samarbete med den leverantör som kommer att väljas. Utformningen görs i en iterativ process för att uppfylla myndigheternas krav samt SKB:s egna förutsättningar, specifika krav och önskemål. Behållarens konstruktion och säkerhetstekniska egenskaper redovisas i en säkerhetsrapport som underlag för att erhålla en licens av behörig myndighet i det land den tillverkas. Innan behållaren får användas i Sverige ska en validering av licensen göras av SSM. Tidsåtgång för konstruktion och licensieringsprocessen skattas till cirka sju år.

Första kapseltransportbehållaren ska levereras till Clink och Kärnbränsleförvaret inför provningen av enskilda system. Denna provning kan med dagens tidsplan påbörjas cirka 2029. De inledande systemvisa testerna kommer att genomföras ett år innan samfunktionsprovningen av hela KBS-3-systemet genomförs. Resterande behållare planeras att tillverkas och levereras successivt under åren 2030–2034, parallellt med samfunktionsprovning och provdrift.

3.6.5 Specialtransporter

SKB:s transportsystem med m/s Sigrid har förmågan att utföra externa transporter och det finns bemanning med kompetens för det. Erfarenheten som fås genom externa uppdrag ökar kompetensen att utföra specialtransporter åt ägarna vid rivning av kärntekniska anläggningar.

Specialtransport av udda komponenter som eventuellt uppkommer i samband med rivningen av kärnkraftverken har ännu inte studerats. I och med beslutet att segmentera reaktortankarna för BWR-reaktorerna, i stället för att deponera dem hela, har transportlogistiken förenklats. Det handlar därför rimligen bara om ett fåtal stora rivningskomponenter som kan komma att kräva specialtransport.

3.7 Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar

SKB:s och tillståndshavarnas planering för omhändertagande av avfallet baseras på de förutsättningar och antaganden som gäller för kärnkrafts- och kärnavfallsprogrammen i dag. Planeringen omfattar naturligtvis osäkerheter av olika slag men verksamheten medger en förhållandevis stor flexibilitet. Allmänt sett kan tidpunkter och innehåll i leveranser komma att påverkas av de pågående tillståndsprövningarna. Nedan redovisas ett antal möjliga förändringar av förutsättningar och vilka konsekvenserna kan bli.

3.7.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

Sedan Fud-program 2016 har reaktorerna Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2, ställts av medan Ringhals 1 och Ringhals 2 planeras att ställas av i slutet av 2020 respektive 2019. För övriga sex reaktorer är den planerade drifttiden, liksom i Fud-program 2016, 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4. Det innebär att dessa reaktorer slutligen ställs av under perioden 2040 till 2045. Nedan beskrivs hur avfallssystemet skulle påverkas vid en eventuell förändring av de planerade drifttiderna för dessa reaktorer.

Förlängning av de planerade drifttiderna

SKB:s anläggningar inom KBS-3-systemet dimensioneras för att hantera och deponera 6 000 kapslar med använt kärnbränsle. Kärnkraftsföretagens aktuella prognoser, med hänsyn tagen till de förtida avställningarna enligt ovan, ger cirka 5 600 kapslar. Detta ger en marginal för eventuella förlängda drifttider för 1980-talsreaktorerna. Exempelvis kan det nämnas att det dimensionerande kapselantalet för Kärnbränsleförvaret om 6 000 kapslar nås om de kvarvarande reaktorerna förlänger sin drifttid med cirka sex år, det vill säga till en total drifttid på cirka 66 år. Skulle drifttiden förlängas ytterligare bedöms kapaciteten i Kärnbränsleförvaret kunna ökas, efter vederbörlig tillståndsprocess, genom att outnyttjade områden på det valda förvarsdjupet tas i anspråk.

Behovet av mellanlagringskapacitet i Clab för bränsle påverkas inte av en förlängning av reaktorernas drift då det tillkommande bränslet uppkommer under 2040-talet. Enligt planerna pågår då deponering i Kärnbränsleförvaret och därmed frigörs kapacitet i förvaringsbassängerna. Vid en försening med mer än tio år av drifttagningen av Clink och Kärnbränsleförvaret, kan det dock bli nödvändigt att utöka lagringskapaciteten för det använda kärnbränslet. Detta gäller oberoende av en eventuell förlängd drifttid (avsnitt 3.7.5).

Dimensioneringen av SFR:s utbyggnad bedöms ge tillräcklig marginal för tillkommande driftavfall vid förlängda drifttider. Dimensioneringen baseras på de tidigare planerade drifttiderna för reaktorerna inklusive ett osäkerhetspåslag. Mängden driftavfall som deponeras i markförvar kommer sannolikt att öka vid förlängda drifttider. Det rör sig dock om en mindre del av den totala avfallsmängden. Mängden rivningsavfall bedöms inte påverkas av förlängda drifttider.

Vid förlängda drifttider kommer även det långlivade avfallet i form av BWR-styrstavar och övriga hårdkomponenter att öka. Vid behov finns det möjlighet att anpassa den slutliga förvarsvolymen i SFL fram till byggstart, det vill säga fram till cirka 2038 med dagens planering.

Förkortning av de planerade drifttiderna

Omvänt skulle en förkortning av de planerade drifttiderna innebära en minskad mängd använt kärnbränsle och driftavfall och därför leda till ett minskat utrymmesbehov i förvarssystemen. Alla befintliga och planerade anläggningar för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle kommer ändå att behövas. Eftersom Kärnbränsleförvaret byggs ut successivt under driften kan deponeringsområdenas storlek anpassas utifrån det verkliga behovet. I detta fall kommer antalet deponeringspositioner att minska. Om SFR redan har byggts ut i full omfattning enligt dagens prognostiserade volymer kommer en förkortad drifttid av reaktorerna sannolikt innebära att anläggningen inte kommer att utnyttjas fullt ut.

I det fallet att ytterligare reaktorer, utöver de fyra som nämnts ovan, ställs av i förtid kommer sannolikt den totala bränslemängden understiga Clabs maximala lagringskapacitet om 11 000 ton bränsle.

En utökning av tillåten mellanlagringskapacitet i Clab förväntas enligt SKB:s planering att ske senast vid den tidpunkt då Clab når denna kapacitet. Enligt dagens prognoser nås 8 000 ton bränsle cirka 2023/2024. Om medgivande till utökad mellanlagring inte erhållits vid denna tidpunkt kommer det använda bränslet att behöva mellanlagras i bassängerna på kraftverken i stället. Om fler reaktorer än de fyra ovan nämnda stängs av kring 2020 kan Clabs begränsade kapacitet att ta emot och hantera bränsle leda till att bränsle behöver mellanlagras i bassängerna på kraftverken några år innan sluthårdarna successivt kan transporteras till och mellanlagras på Clab. Mellanlagring av använt bränsle på kraftverken efter slutlig avställning är inte ett önskvärt scenario då detta innebär en sämre säkerhet och ökade kostnader.

Förkortade drifttider av reaktorerna, speciellt om reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 stänger tidigare än planerat, skulle troligen innebära en tidigareläggning av rivningen av berörda reaktorer. Det skulle också kunna innebära att det totala kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Omfattningen beror naturligtvis på hur många reaktorer som skulle beröras och hur mycket drifttiderna förkortas. Om den sista reaktorn rivs innan SFL har tagits i drift behöver detta långlivade rivningsavfall i likhet med övriga reaktorer avfall mellanlagras tills SFL är driftsatt.

3.7.2 Drifttagning av det utbyggda Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SKB planerar att ta det utbyggda SFR i provdrift 2029. Enligt planeringen kommer rivningen av de sju första reaktorerna (inklusive Ågestareaktorn) påbörjas innan SFR-utbyggnaden står klar. Det innebär att olika mellanlager för det kort- och långlivade rivningsavfallet behövs (avsnitt 3.3.3 och 3.3.4).

Senareläggning

Barsebäck Kraft AB planerar för att anläggningen ska kunna friklassas så snart som möjligt efter att allt radioaktivt avfall transporterats till SFR för deponering (kortlivat avfall) eller mellanlagring på

annan plats (långlivat avfall). En försening av SFR-utbyggnaden innebär därmed även en försening av friklassningen av Barsebäcks anläggningsområde om inte det kortlivade avfallet också transporterats till annan plats för mellanlagring.

För OKG Aktiebolag och Ringhals AB är beroendet av en försening inte lika starkt eftersom det finns kvarvarande reaktorer i drift på anläggningsplatserna. Mellanlagringskapaciteten på kraftverksområdena bedöms kunna utökas för att klara behoven vid en försening av utbyggnaden med ett par år.

Tidigareläggning

En tidigareläggning av SFR-utbyggnadens drifttagande innebär ett förkortat och minskat behov av mellanlagring av det kortlivade rivningsavfallet. För Barsebäck Kraft AB innebär det att transporter kan tidigareläggas och möjligheterna att anläggningen blir friklassad som helhet före planerad tid ökar.

3.7.3 Slutförvaring av mycket lågaktivt rivningsavfall

I och med att aktivitetsnivån i det mycket lågaktiva avfallet överskrider friklassningsnivåer är de alternativ för omhändertagande som i dag existerar deponering i markförvar eller i bergssal för lågaktivt avfall (BLA) i SFR. BLA är en strålsäkerhetsmässigt betydligt mer avancerad anläggning än ett markförvar och avfall som deponeras i BLA ska företrädesvis ha ett högre aktivitetsinnehåll än det mycket lågaktiva avfallet för att motivera såväl kostnader som miljöpåverkan (i form av exempelvis berguttag och transporter).

Utbyggnaden av SFR är dimensionerad för att slutförvara allt lågaktivt avfall från nedmontering och rivning av reaktorerna, inklusive stora mängder av det mycket lågaktiva avfallet. Avfallsprognoserna är i nuläget översiktliga och avfallsproducenterna avser därför att uppdatera och förfinna dessa. Då det således finns stora osäkerheter kring prognoserna av mängden mycket lågaktivt avfall är det viktigt att utreda flera olika alternativ för det slutliga omhändertagandet.

Rent tekniskt kan det mycket lågaktiva avfallet deponeras i BLA i samma form som i ett markförvar. För att maximera nyttjandet av förvarsutrymmet är dock någon form av extra behandling att föredra. Det kan antingen vara att aktiviteten flyttas till annat bärarmaterial (genom dekontaminering), eller genom att ändra form på det ursprungliga avfallet (genom exempelvis förbränning). Som beskrivits i avsnitt 3.2.1 är det främst metaller i det mycket lågaktiva avfallet som kan dekontamineras för att därefter friklassas. Rester från dekontamineringen konditioneras för slutförvaring. Mjuka och inerta fraktioner är vanligen tekniskt mycket svåra att dekontaminera, alternativt svåra att bevisa att de är fria från radioaktivitet efter dekontaminering.

För de delmängder av avfallet som är brännbara utgör kontrollerad förbränning en alternativ metod för koncentrerat av radioaktivitetsinnehållet. Kontrollerad förbränning kräver att avfallet initialt har sorterats så att de icke-brännbara, men kompakterbara, fraktionerna skiljs av och hanteras separat. Vidare kräver den kontrollerade förbränningen både transport av radioaktivt material och en relativt dyr kampanjvis hantering vid förbränningsanläggningen i Studsvik vilket avsevärt minskar skäligheten att förbränna avfallet där.

Ett utvecklingsarbete för att identifiera möjligheter till energiåtervinning av delmängder av det brännbara mycket lågaktiva avfallet via konventionella avfallsförbränningsanläggningar har påbörjats (Keith-Roach och Elert 2018). Utfallet av arbetet kommer att diskuteras vidare med SSM under Fud-perioden och fördjupas i det fall det finns en samsyn mellan den kärntekniska industrins parter, SSM, och de konventionella avfallsförbränningsanläggningarna.

3.7.4 Lokalisering och drifttagning av slutförvaret för långlivat avfall

SKB planerar att ta SFL i drift cirka 2045, vilket sammanfaller med att de sista reaktorerna, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, ställs av (avsnitt 3.3.4). Tidsplanen baseras på ett scenario där SFL lokaliseras till en plats som SKB har kännedom om genom tidigare platsundersökningsprogram.

Lokaliseringen av SFL är inte beslutad. Skulle SFL lokaliseras på en plats där SKB har begränsade kunskaper om geologin från tidigare undersökningsprogram så kommer driftsättningen att skjutas framåt i tiden, uppskattningsvis cirka fem år. En sådan lokalisering kräver ett mer omfattande arbete, dels för att identifiera en plats, dels för att det medför mer omfattande platsundersökningar. En försening i driftsättningen skulle innebära en förlängd mellanlagring av det långlivade avfallet, både vid kraftverken och i Studsvik. Detta skulle i sin tur kunna påverka kärnkraftsföretagens och AB SVAFO:s möjligheter att avveckla den kärntekniska verksamheten på sina områden.

Det finns också osäkerheter i den gällande planeringen eftersom SFL ligger relativt tidigt i utvecklingen. Fram till drifttagning av förvaret är det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom utvärdering och analys av säkerheten efter förslutning, val av plats, framtagning av ansökningar, tillståndsprövning, uppförande etc. För att kunna ta SFL i drift 2045 behöver SKB enligt gällande planering lämna in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att få uppföra, inneha och driva SFL cirka 2030. En försening i någon del, eller i ytterligare några delar, som resulterar i något eller några års försening i processen fram till drifttagning av förvaret går inte att utesluta.

En eventuell samlokalisering med SFR eller Kärnbränsleförvaret skulle kunna medföra en tidigareläggning av drifttagande av förvaret. Byggskedet skulle då eventuellt kunna kortas genom samutnyttjande av ramp och schakt vilket förkortar tiden för tunneldrivning ned till försvarsdjup. En eventuell tidigareläggning av SFL:s drifttagning bedöms inte ge några större konsekvenser för avfallssystemet. Dock skulle det innebära en kortare tids mellanlagring av det långlivade avfallet.

Ett möjligt alternativ är också att slutförvaringen av det långlivade avfallet lokaliseras till två olika platser. Enligt planerna består SFL av två olika försvarsdelar med olika barriärlösningar, som rent principiellt skulle kunna lokaliseras till olika platser. Konsekvenserna av en sådan lösning på drifttagningstiderna beror, liksom i fallet med ett sammanhållet SFL, till stor del av valet av plats och omfattningen av de därtill hörande platsundersökningarna.

3.7.5 Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink

Enligt planerna inleds provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink cirka 2031 vilket innebär att SKB då påbörjar utlastningen av det använda kärnbränslet från Clabs förvaringsbassänger. För att Clab ska kunna ta emot det använda kärnbränsle som produceras fram till denna tidpunkt planerar SKB att utöka den tillståndsmässiga lagringskapaciteten till 11 000 ton bränsle. Dessutom kommer styrtavarna från BWR att segmenteras för att frigöra lagringsutrymme för det använda kärnbränslet. Lagringsutrymmet beräknas då att räcka till cirka 2034 (avsnitt 3.4.3).

Senareläggning

Om det skulle uppstå ytterligare förseningar i drifttagandet av Kärnbränsleförvaret och Clink finns även en möjlighet att lasta om det bränsle som fortfarande lagras i normalkassetter till kompaktkassetter. Omlastningen skulle då utföras i Clabs mottagningsdel. Efter utförd omlastning beräknas Clabs lagringskapacitet kunna räcka till cirka 2040.

Skulle ytterligare åtgärder krävas, kan i första hand de härdkomponenter och styrtavlar som lagras i Clab lastas ut och mellanlagras på en annan plats. Avfallet kan då lastas om till ståltankar för torr mellanlagring. Ståltankar används redan i dag för mellanlagring av metalldelar vid kärnkraftverken i Barsebäck, Forsmark och Oskarshamn. Om endast bränsle lagras i Clab kommer lagringspositionerna att räcka till cirka 2043. Detta ger en flexibilitet även vid en större försening av drifttagningen av Kärnbränsleförvaret och Clink.

Om det skulle visa sig nödvändigt finns även möjligheten att bygga ut mellanlagringskapaciteten för bränslet. Det finns två lagringsmetoder, våt respektive torr lagring. Våt lagring är det som används i Clab. Inför ett beslut om en eventuell utökning kommer möjligheten till torr mellanlagring av bränsle att utredas. Då måste bland annat aspekter avseende bränslets egenskaper efter torr mellanlagring och eventuell påverkan på säkerheten efter förslutning analyseras. Torr mellanlagring används i dag av ett flertal länder, bland annat Spanien, Tyskland och USA.

Tidigareläggning

SKB bedömer möjligheterna att ta Clink och Kärnbränsleförvaret i drift väsentligt tidigare än planerat som små. En tidigareläggning bedöms inte ge några negativa konsekvenser för avfallsprogrammet.

3.7.6 Horisontell deponering – KBS-3H

Sedan 2001 har SKB i samverkan med Posiva utrett om horisontell deponering (KBS-3H) kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering i Kärnbränsleförvaret. KBS-3H innebär att långa horisontella deponeringshåll borras direkt från Kärnbränsleförvarets stamtunnlar. I dessa deponeras det använda kärnbränslet i en rad så kallade supercontainrar.

En supercontainer består av en kopparkapsel omgiven av bentonitbuffert och sammanhållen av en perforerad ytterbehållare av metall. Mellan supercontainrarna placeras distansblock av bentonitlera. Deponeringshålen är upp till 300 meter långa och delas upp i två sektioner med sektionssluggar. I deponeringshålets mynning installeras en förslutningsplugg.

Den bergvolym som behöver tas ut för ett KBS-3H-förvar är mindre än vid vertikal deponering vilket även innebär att mindre volymer behöver återfyllas. Anläggningarna på driftområdet ovan mark och centralområdet samt tillfarter under mark påverkas marginellt vid en övergång till horisontell deponering.

En utvärdering av KBS-3H har genomförts tillsammans med Posiva. Utredningen har bland annat beaktat teknisk mognad och återstående frågor avseende tekniska lösningar och drift, status och kvarstående frågor avseende säkerhet efter förslutning samt kostnader, både kvarvarande utvecklingskostnad och bedömda driftkostnader. Trots genomförda utvecklingsinsatser återstår en hel del teknisk utveckling innan KBS-3H skulle befinna sig på samma nivå som vertikal deponering. För att driftsättningen av KBS-3-systemet ska kunna framskrida enligt plan, har bedömningen gjorts att det återstående utvecklingsarbetet för horisontell deponering är för omfattande för att kunna motivera parallella utvecklingsinsatser även om det finns stora potentiella ekonomiska fördelar med horisontell deponering. Även Posiva har gjort denna bedömning.

Med tanke på det återstående utvecklingsbehovet, med tillhörande osäkerheter, planerar SKB för närvarande inte att driva något utvecklingsarbete av KBS-3H under den kommande sexårsperioden. Denna inriktning kan dock komma att revideras i samband med Fud-program 2022, om SKB bedömer att det finns sådana ekonomiska fördelar med KBS-3H att det motiverar ett fortsatt utvecklingsarbete.

4 Fortsatt forskning och utveckling

Det system av anläggningar som hittills utarbetats för hantering och slutförvaring av kärnavfallet från kärnkraftverken redovisas i kapitel 2. Där beskrivs även de anläggningar som återstår att bygga för att kunna slutförvara det använda kärnbränslet och kärnavfallet från avveckling av kärnkraftsreaktorerna.

Planen för genomförandet redovisas i kapitel 3 och utifrån den planen redovisas i detta kapitel en översikt av de forsknings- och utvecklingsbehov som finns för att genomföra de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. Detaljerna i form av nuläge och program för specifika aktiviteter och insatser under Fud-perioden presenteras vidare i del II.

I avsnitt 4.1 beskrivs grunderna för planeringen av de framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna. Där ges en översikt av hur långt forskningen och teknikutvecklingen ska ha nått vid de milstolpar som är relevanta för Clink och respektive slutförvar. För att genomföra planen för det mycket lågaktiva kärnavfallet som beskrivs i kapitel 3 är bedömningen att behovet av specifika forsknings- och teknikutvecklingsinsatser är begränsade.

I avsnitten 4.2 till 4.9 motiveras och sammanfattas den teknikutveckling som behövs för att lösa frågor kring förvarens utformning, konstruktion och produktion. Där ges även en översikt av den forskning som behövs för att genomföra analys av förvarens säkerhet efter förslutning. Planeringen för hur slutförvaren ska övervakas under uppförande och drift beskrivs i avsnitt 4.10.

En översikt av teknikutvecklingsbehoven utifrån avveckling av kärntekniska anläggningar återfinns i avsnitt 4.11 och i avsnitt 4.12 ges en beskrivning av övriga områden som är relevanta för SKB:s uppdrag.

4.1 Planerade insatser för respektive slutförvar och Clink

SKB:s och reaktorinnehavarnas planering av framtida forsknings- och utvecklingsinsatser för slutförvaren och Clink utgår från handlingsplanen där den stegvisa beslutsprocessen, som redovisats i avsnitt 3.1, utgör grund för viktiga milstolpar. De milstolpar som är kopplade till beslutsstegen i form av ansökningar och säkerhetsredovisningar styr när kunskap och utveckling av teknik behöver ha nått en viss nivå, medan Strålsäkerhetsmyndighetens godkännande styr när SKB kan påbörja uppförande respektive drift av anläggningar. Det är således naturligt att milstolpar kopplade till inlämnande av ansökningar med säkerhetsredovisningar blir styrande för planeringen av forsknings- och utvecklingsinsatser, eftersom de styr när aktuellt kunskapsläge och tekniska lösningar ska redovisas för myndigheten:

- Förberedande preliminär säkerhetsredovisning (F-PSAR) vid ansökan om tillstånd enligt KTL att bygga, inneha och driva en anläggning.
- Preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) inför att påbörja uppförande.
- Förnyad säkerhetsredovisning (SAR) inför provdrift.
- Kompletterad säkerhetsredovisning (SAR) inför rutinmässig drift.

Inför Fud-program 2019 pågår två tillståndsärenden i Mark- och miljödomstolen (MMD) och hos Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), ett för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle (SKB inväntar regeringsbeslut för inkapslingsdelen och Kärnbränsleförvaret) och ett för utbyggnaden av SFR för slutförvaring av drift- och rivningsavfall.

När SKB lämnar in ansökningarna för att få bygga en anläggning är syftet att visa att vi har kunskap och förmåga att konstruera den så att den uppfyller myndigheternas krav. Även när SKB har nått den mognadsgrad i forskning och utveckling som krävs för att få tillstånd enligt KTL behövs i den kommande stegvisa prövningen fortsatt forskning och teknikutveckling. Det innebär vidareutveckling av den teknik och de system som behövs för att kunna uppföra och sedan driftsätta anläggningen samt forskning för att reducera kvarstående osäkerheter i analyserna av säkerheten efter förslutning av slutförvar som stöd för utveckling och optimering av anläggningen. SKB har som del av ansökningarna om tillstånd att bygga Kärnbränsleförvaret, Clink och utbyggnaden av SFR redovisat kunskapsläget och status för teknikutvecklingen. I ansökningarna ingår även utvärdering av betydelsen av osäkerheter

för säkerheten efter förslutning av förvaren (SR-Site för Kärnbränsleförvaret och SR-PSU för SFR). För KBS-3-systemet innebar huvudförhandlingen i MMD 2017, ytterligare ett steg i processen. Yttranden från SSM och MMD kom i januari 2018 och är centrala underlag för regeringens prövning av tillåtlighet och tillstånd samt viktiga underlag för SKB:s fortsatta arbete med Clink och Kärnbränsleförvaret inför byggstart. Huvudförhandlingen i Mark- och miljödomstolen för utbyggnaden av SFR kommer att genomföras under hösten 2019.

För SFL har en säkerhetsutvärdering genomförts för det föreslagna förvarskonceptet. Utfallet av säkerhetsvärderingen utgör utgångspunkt för fortsatta forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för SFL. Den ger också underlag för att precisera platsvalskriterier och för att utforma och genomföra en lokaliseringsprocess.

Ovan beskrivna redovisningar och studier, tillsammans med de synpunkter som lämnats av SSM i samband med prövningen av ansökningarna samt granskningar av tidigare Fud-program, ligger till grund för det program för framtida insatser som redovisas nedan. Behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser kan huvudsakligen delas in i tre grupper:

- Behov av ökad **processförståelse**, det vill säga den vetenskapliga förståelsen för de processer som påverkar slutförvaren och därmed grunden för att bedöma deras betydelse för säkerheten efter förslutning. Arbetet utförs enligt den styrning av och strategi för forskning som beskrivs i kapitel 5.
- Behov av kunskap och kompetens kring **utformning, konstruktion, tillverkning och installation** av de barriärer och komponenter som ska användas i anläggningarna. Arbetet utförs enligt den teknikutvecklingsprocess som beskrivs i kapitel 5.
- Behov av kunskap och kompetens kring **kontroll och provning** för att verifiera att systemets barriärer och komponenter produceras och installeras enligt godkända specifikationer och därmed uppfyller kraven. Här ingår även utveckling av metoder och instrument för kontroll och provning samt övervakning av slutförvaren och förvarplatserna.

Ett led i utvecklingsarbetet är att demonstrera hur framtagna lösningar fungerar i praktiken. Demonstrationsförsök kommer att fortsätta, i första hand vid Äspölaboratoriet. Under byggandet av de planerade slutförvaren kan vissa demonstrationsförsök komma att genomföras vid respektive förvar.

Som en integrerad del av forsknings- och utvecklingsarbetet studeras hur de tekniska lösningarna kan optimeras och göras mer effektiva, utan att ge negativ inverkan på säkerheten. Förutsättningarna för sådan teknikoptimering bedöms speciellt goda när det gäller samverkan mellan olika tekniska system och produktionslinjer, eftersom utvecklingsarbetet hittills fokuserat på att finna lämpliga lösningar för enskilda system och produktionslinjer.

Planering, förberedelser och genomförande av avveckling av svenska kärnkraftsreaktorer pågår, vilket beskrivs i del III. Behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser för att genomföra avvecklingen är relativt begränsat. Utveckling och forskning för avfall från avvecklingen omfattas av redovisningen för respektive slutförvar nedan.

4.1.1 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

Uppförande

Under perioden fram till byggstart planeras viss teknikutveckling av barriärerna i syfte att verifiera krav och konstruktionsförutsättningarna, vilka i sin tur medför att utformning av utbyggnaden av SFR och hur bergarbetena ska genomföras kan optimeras. Motsvarande gäller också för förslutningskomponenter, till exempel pluggar. De uppdateringar av barriärernas och andra förvarskomponenters egenskaper vid installation som teknikutvecklingen lett till beaktas som underlag vid analysen av säkerhet efter förslutning. Innan bergarbetena kan påbörjas ska ett antal undersökningsborrhål i anslutning till utbyggnaden förslutas. Förslutningstekniken kommer att anpassas till förhållandena vid SFR och ett program för kvalitetskontroll ska utformas och fastställas.

Vid byggstart är konstruktionsförutsättningarna och krav för utbyggnaden fastlagda. Uppförandet inleds med att nödvändig infrastruktur etableras. Under uppförandeskedet sker byggnation, tillverkning och installation av barriärerna samt förberedelser inför driftsättning. I slutskedet av uppförandet genomförs verifiering och validering av system och funktioner och uppförandeskedet avslutas med samfunktionsprovning.

Drift och förslutning

Innan provdrift påbörjas kommer analysen av säkerheten efter förslutning att förnyas med platspecifika kunskaper som erhållits under utbyggnaden. Den tillkommande informationen används bland annat för att uppdatera den platsbeskrivande modellen för Forsmark. Den nya informationen kommer att ge en mer detaljerad bild av bergets egenskaper i det utbyggda området. Deformationszoners lägen och vattenförande egenskaper kommer att kunna beskrivas med bättre precision. Säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) ska också tas fram och förslutningsplanens ses över och uppdateras.

Inför rutinmässig drift av det utbyggda SFR tas en kompletterad SAR fram samtidigt som STF uppdateras. Dokumenten är då kompletterade med erfarenheter från provdriften. Provdriften förväntas inte föranleda några särskilda behov av teknikutveckling eller forskning inför rutinmässig drift.

Inför avveckling och förslutning av anläggningen kommer teknik för förslutning och förslutningskomponenter av utvecklas med avseende på material, teknik och installation. Avvecklingsplanen kommer att kompletteras och en uppdaterad analys av säkerhet efter förslutning kommer att ingå i den omarbetade säkerhetsredovisningen som tas fram inför förslutning.

4.1.2 Slutförvaret för långlivat avfall

Utvecklingsbehov till följd av säkerhetsvärdering av förvarskonceptet

Den fortsatta utvecklingen av Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, kommer i ett första skede att fokusera på att ta om hand slutsatser och erfarenheter från den genomförda säkerhetsvärderingen av det föreslagna slutförvarskonceptet. Slutsatserna kommer att vara utgångspunkt för den fortsatta utvecklingen av de tekniska barriärerna, de preliminära acceptanskriterierna för avfallet och för lokaliseringsarbetet.

Under 2020 planerar SKB att starta ett program för planering och genomförande av slutförvaring av långlivat avfall. Syftet är att skapa en programorganisation som har fokus på att möjliggöra slutförvaring av långlivat avfall och att samordna de olika utvecklingslinjerna för SFL. Inom programmet för SFL planeras därför följande under Fud-perioden:

- Genomföra forskning och utredning för säkerhet efter förslutning utifrån resultaten från säkerhetsvärderingen.
- Påbörja lokaliseringsprocessen.
- Bygga upp en organisation för platsundersökning.
- Fortsatt teknikutveckling, inklusive praktiska försök.

I säkerhetsvärderingen har behov av ett förbättrat kunskapsläge, till stöd för framtida fördjupade analyser av säkerhet efter förslutning, identifierats, se kapitel 6. Där inkluderas behov av forskning och utveckling som syftar till att öka kunskapen om egenskaper, händelser och processer (FEP) som kan påverka säkerheten efter förslutning. Eftersom det finns många likheter mellan SFL och SFR samt Kärnbränsleförvaret sammanfaller ofta behoven av ökad kunskap för SFL med behov som identifierats för SFR och/eller Kärnbränsleförvaret. De behov av forskning och utveckling som identifierats i säkerhetsvärderingen rör framför allt:

- Fördjupad kunskap om inventariet för avfallet som ska deponeras i SFL. Detta gäller såväl prognosticerade avfallsmängder, som avfallets innehåll av radionuklider (avsnitt 4.2).
- Utökad kunskap om utveckling över tid för betongbarriären i bergssalen för hårdkomponenter, BHK. Fortsatta studier av interaktion mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser (avsnitt 4.5).
- Utökad kunskap om utveckling över tid för bentonitbarriären i bergssalen för historiskt avfall, BHA (avsnitt 4.6).

Det har även identifierats behov av utveckling av verktyg och metoder som används i utvärderingen av säkerhet efter förslutning. Planeringen för att möta dessa behov är delvis avhängig resultaten av redan planerad forskning och utveckling, och den kommer att detaljeras under Fud-perioden.

Fortsatt forskning och säkerhetsanalys specifikt för SFL:s behov kommer att koordineras med teknikutveckling och lokaliseringsprocessen inom programmet. Arbetet planeras att bedrivas med iterationer mellan teknikutveckling och säkerhetsanalys enligt etablerad metodik, men med målet att genomföra snabbare iterationer mellan dessa. Arbetsverktyg utvecklade inom säkerhetsvärderingen medger snabbare återkoppling på teknikutvecklingsinsatser, vilket ger en större flexibilitet i arbetet. SKB förutser därför i dag inte behov av en särskild redovisning i form av en säkerhetsanalys utan platsdata, som redovisats i tidigare Fud-program. Nästa planerade fullständiga säkerhetsanalys för SFL är den säkerhetsanalys som kommer att lämnas in som stöd till ansökningarna om att bygga och driva SFL.

Den fortsatta teknikutvecklingen baseras på tidigare genomförda utredningar rörande teknikutvecklingsbehoven, där kravbildningen kompletterats med slutsatser från den genomförda säkerhetsvärderingen. De huvudområden som bedöms kräva SFL-specifika utvecklingsinsatser är:

- Tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarsutrymmen.
- Tekniska lösningar för återfyllnad av förvarsutrymmena med betong och bentonit.
- Hantering och slutförvaring av stora komponenter, som till exempel hela PWR-tankar.

Under Fud-perioden fortsätter utvecklingen av utformningen av förvarsutrymmen, med inriktningen att utveckla det föreslagna konceptet till en första layout av anläggningen. Konstruktioner för säker hantering och lagring av avfallet som samtidigt medger en effektiv process för återfyllning av förvarsutrymmena, behöver utvecklas. Arbetet innefattar fortsatt utredning kring vilket initialtillstånd som kan uppnås, givet de praktiska begränsningarna i förvarsutrymmena, och hur initialtillståndet kan verifieras vid förslutning.

SKB kommer under Fud-perioden även att utreda om det är möjligt att utveckla konceptet så att det blir mindre känsligt för platsegenskaperna när det gäller till exempel grundvattenflöde. Utvecklingen bedrivs i ett första skede till en nivå som möjliggör relevanta jämförelser mellan olika konceptuella lösningar, avseende säkerhet, teknik, miljö och kostnader.

I detta Fud-program presenterar SKB grundläggande förutsättningar och utgångspunkter för lokalisering av SFL, se kapitel 6. Under Fud-perioden kommer processen att utvecklas i samråd med berörda myndigheter och kommuner. Lokaliseringsprocessen kräver dock inga särskilda utvecklingsinsatser.

Tillståndsansökningar

Till stöd för ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för att bygga SFL lämnas en förberedande preliminär säkerhetsredovisning, F-PSAR, in. Det innebär att platsen för förvaret behöver ha identifierats och beskrivits som underlag till analysen av förvarets säkerhet efter förslutning.

Teknikutvecklingen och kunskapen om barriärerna av betong och bentonit och det naturliga systemet, det vill säga det omgivande berget och ekosystemet, behöver vara driven så långt att det i säkerhetsanalysen går att visa att förvaret uppfyller kraven i miljöbalken (allmänna hänsynsreglerna) samt kraven i kärntekniklagen och SSM:s föreskrifter. Krav och konstruktionsförutsättningar behöver presenteras och det ska göras troligt att den tekniska lösningen kan tas fram och installeras på ett sådant sätt att det går att verifiera att kraven kan uppfyllas. Då SFL skiljer sig från de övriga förvaren framför allt när det gäller konstruktioner i förvarsdelarna och de tekniska lösningarna för återfyllning, bedöms detta vara områden som behöver utvecklas.

Preliminära acceptanskriterier för avfallet behöver finnas liksom eventuella tekniska lösningar för att behandla och konditionera avfallet för att uppfylla acceptanskriterierna.

Uppförande, drift och förslutning

Inför ansökan om uppförande uppdateras den förberedande preliminära säkerhetsredovisningen (F-PSAR) till en preliminär säkerhetsredovisning, PSAR. PSAR kommer då att innehålla en uppdaterad redovisning av verksamheten, anläggningens utformning och hur ställda krav uppfylls.

Arbetet med teknikutvecklingen ska ha utmynnat i underlag i form av krav för projektering av anläggningen.

I den förnyade säkerhetsredovisning (SAR) som tas fram innan provdrift ingår en uppdaterad analys av förvarets säkerhet efter förslutning. Där inkluderas tillkommande data från uppförandet tillsammans med ny kunskap från teknikutveckling och forskning. Inför provdrift behövs en viss teknikutveckling för att SKB ska kunna säkerställa att barriärerna och andra förvarskomponenter efter installation kommer att uppfylla ställda krav. Detta underlag ska vara tillräckligt detaljerat för att möjliggöra projektering av förslutningen. Förslutningsplanen och avvecklingsplanen uppdateras baserat på de detaljerade beskrivningarna.

Inför avveckling och förslutning av anläggningen genomförs projektering och detaljkonstruktion av förslutningskomponenter med avseende på material, teknik och installation. Avvecklingsplanen kommer att kompletteras och en uppdaterad analys av säkerhet efter förslutning kommer att ingå i den omarbetade säkerhetsredovisningen.

4.1.3 Kärnbränsleförvaret och Clink

Uppförande

Inför byggstart ska nödvändiga system, strukturer och komponenter vara specificerade, med funktion och prestanda fastställda. Kunskapsuppbyggnaden för frågor kring säkerhet efter förslutning är i första hand fokuserad på att leverera underlag till SAR. Inlämnandet av PSAR är en viktig avstämningsspunkt. I första hand behövs mer kunskap för att analysera osäkerheter och bedöma om de kan reduceras. Detta ger dels en mer realistisk bedömning av säkerheten efter förslutning av förvaret, dels underlag för optimering av förvaret så att preciserade krav för förvarets komponenter och layout kan formuleras.

Målet med teknikutvecklingen är att säkerställa att den teknik som behövs för att kunna påbörja byggandet av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink, finns tillgänglig före byggstart. Det innebär att delar av detaljkonstruktionsfasen väsentligen ska ha passerats för till exempel undersökningsmetoder och teknik för byggande av förvarets tillfarter. Det underlaget behövs för att redan under uppförandet av tillfarter, centralområde och första deponeringsområdet omhänderta frågor som har betydelse för strålsäkerheten under anläggningens hela livscykel. Underlaget redovisas dels i ett dokument om säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen, dels i ett detaljundersökningsprogram för uppförandefasen av slutförvaret. Syftet är att identifiera de aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för att verifiera och vidareutveckla den platsbeskrivande modellen för Forsmark. Vidare behöver de tekniska system (till exempel för deponering och återfyllning) som ska finnas inom förvarsområdet, utvecklas inför PSAR och SAR.

Teknik och metoder för produktion av kapslar ska vara utvecklade och beskrivna inför uppförandet av Clink. De nödvändiga tekniska systemen i Clink ska vara specificerade, vilket påverkar utvecklingen av den nukleära bränslemätningen och den valda metoden för torkning av bränsleelement. På samma sätt behöver metoder för svetsning och kontroll av kapslarna under inkapsling vara framtagna och anpassade till den nukleära miljön som råder där. I utformningen av inkapslingsdelen av Clink och av slutförvarsanläggningen ska förutsättningarna för kärnämneskontroll vara beaktade.

Inför byggstart av det första deponeringsområdet i Kärnbränsleförvaret kommer konstruktionsförutsättningarna för detta att vara reviderade. Därmed behöver konstruktions- och installationsmetoder för buffert, återfyllning och pluggar finnas liksom metodiken för uttag av deponeringstunnlar och deponeringshål. Dessutom ska de kontrollmetoder som ska tillämpas vara verifierade och det ska då finnas metoder för undersökning och modellering av berget i deponeringsområdet.

I Forsmark har övervakningen av berget, grundvattnet och ekosystemet fortsatt i det närmaste oförändrat efter platsundersökningen och planeras göra det fram till byggstart av Kärnbränsleförvaret. Viss anpassning har dock gjorts eller planeras till följd av genomförda utvärderingar av insamlade mätdata. Övervakningen ger underlag för att etablera en referensnivå som kan användas för att bedöma eventuell miljöpåverkan under förvarets uppförande och drift.

Samma typ av övervakning av geosfärs- och biosfärsparametrar planeras fortsätta under Kärnbränsleförvarets uppförande och drift. Det nya, i förhållande till platsundersökningen, är framför allt den övervakning som kommer att utföras under jord. Inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret kommer ett övervakningsprogram tas fram där övervakningsaktiviteter under uppförande och drift av slutförvaret presenteras (avsnitt 4.10).

Drift

I Kärnbränsleförvaret och Clink planeras integrationstester och samfunktionsprovning som ska verifiera att utbyggnad och deponering kan bedrivas i Kärnbränsleförvaret så att både säkerhet under drift och säkerhet efter förslutning åstadkoms. Dessa tester utförs i ett sent skede med den utrustning och personal som ska driva anläggningen. Detta blir en slutlig kontroll av att driften kan ske på avsett sätt.

Inför samfunktionsprovning ska samtliga system för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning vara tillverkade, installerade och testade. Kvalificeringar av processer med tillhörande utrustningar, personal och leverantörer ska vara genomförda och dokumenterade. Vid denna tidpunkt ska ett antal system för kvalitetsstyrning och kontroll av barriärerna vara implementerade. Det gäller såväl produktion, hantering och installation av kapslar, buffert- och återfyllningskomponenter som bergbyggnadsprocessen med tillhörande detaljundersökningar.

Inför framtagandet av en förnyad SAR kommer insatser att behövas för att hantera tillkommande data från förvarsutbyggnaden i analysen av säkerheten efter förslutning.

När samfunktionsprovning genomförts och förnyad SAR godkänts av SSM kan provdriften, då använt kärnbränsle hanteras och deponeras, inledas.

Innan KBS-3-systemet tas i rutinmässig drift kompletteras säkerhetsredovisningen, SAR, med erfarenheterna från provdriften. I och med att förvarssystemet tas i drift övergår verksamheten i en förvaltningsfas, då SAR ska hållas aktuell.

Återtag av deponerade kapslar

Det finns i Sverige inga bestämmelser i lagar eller i andra författningar med krav på att använt kärnbränsle som deponerats i ett slutförvar ska kunna återtas. Enligt SSM:s allmänna råd till föreskrifter om säkerhet vid slutförvaringen av kärnämne och kärnavfall (SSMFS 2008:21) kan åtgärder vidtas med främsta syfte att underlätta återtagande av deponerade kapslar. Sådana åtgärder får dock inte medföra att förvarets säkerhet efter förslutning försämras. Det kan finnas situationer där återtag före förslutning kan bli aktuellt.

SKB bedömer att det under driften av Kärnbränsleförvaret är möjligt att återta deponerade kapslar. Detta har demonstrerats praktiskt i försök i Äspölaboratoriet, senast i samband med brytningen av den yttre sektionen i det så kallade Prototypförvaret (Svemar et al. 2016). Rent principiellt skulle det gå att återta kapslar också från ett förslutet förvar, men genomförandet skulle bli väsentligt mer arbets- och resurskrävande. Inkapslingsdelen av Clink konstrueras så att det blir möjligt att återföra kapslar med bränsle för förnyad inkapsling. Återtag planeras att kunna genomföras som en tänkbar åtgärd för att hantera eventuella fel som uppstår eller upptäcks under deponeringssekvensen. Dessa planer kommer att redovisas i PSAR som lämnas in som underlag inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret. För att möjliggöra återtag behövs viss teknikutveckling. Det behöver säkerställas att deponeringsmaskinen kan föra tillbaka kapslar. Även praktiska metoder att hantera bentonitblock som delvis har börjat vattenmättas behöver tas fram.

Förslutning

Inför förslutning av Kärnbränsleförvaret tas en omarbetad säkerhetsredovisning fram. Den innehåller en uppdaterad analys av säkerheten efter förslutning samt en plan för förslutning och avveckling. Den uppdaterade analysen av säkerheten efter förslutning baseras på anläggningen som den är byggd och de planerade förslutningsåtgärderna. Där redovisas den teknik och det arbetssätt som ska användas vid förslutning av kvarvarande bergutrymmen och borrhål (förslutning av deponeringstunnlar utförs under driftperioden) samt de åtgärder som planeras för att övervaka och kontrollera förvaret och verksamheten vid förslutningen.

4.2 Låg- och medelaktivt avfall

I detta avsnitt beskrivs kortfattat de behov av forskning och utveckling avseende låg- och medelaktivt avfall som SKB kommer att prioritera under Fud-perioden. För vissa material i det låg- och medelaktiva avfallet som ska slutförvaras i SFR respektive SFL behövs en fördjupad processförståelse. Vidare behöver kunskapen om avfallets innehåll av radionuklider uppdateras och fördjupas. Nuläge och program presenteras i kapitel 7.

4.2.1 Processförståelse

För både SFR och SFL utgör fördröjning av uttransport av radionuklider från förvaret en central säkerhetsfunktion. En av de viktigaste processerna som bidrar till att fördröja uttransporten är sorption av radionuklider på cementmineral. Kemisk degradering av organiskt material i avfallet kan generera produkter som kan komplexbinda radionuklider och därmed minska graden av sorption på cementmineral.

SKB har de senaste tre åren studerat hur komplexbildande nedbrytningsprodukter från cellulosa påverkar sorptionen av bland annat plutonium. Under de kommande åren kommer SKB att delta i fortsatt arbete kring hur organiska ämnen påverkar radionuklidtransport i slutförvarsmiljö, med fokus på kartläggning av nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedel och hur dessa påverkar cementens sorptionskapacitet.

4.2.2 Radionuklidinventarium

Kunskapen om radionuklidinventariet för det låg- och medelaktiva avfallet behöver fördjupas för att minska osäkerheter inför framtida analyser av säkerheten efter förslutning för SFR och SFL. Detta gäller såväl prognosticerade avfallsmängder som avfallets innehåll av radionuklider. Radionuklidinventariet uppdateras löpande och särskilda insatser görs för bestämning av så kallade svårsmätbara nuklider, vilka i många fall har betydelse för säkerheten efter förslutning. SKB medverkar också till utveckling av metodik för karaktärisering av rivningsavfall i samråd med reaktorinnehavarna.

Under Fud-perioden kommer SKB att utveckla metodiken för bestämning av svårsmätbara nuklider, dels genom att utöka det underlag av mätdata som används vid aktivitetsbestämning, dels genom att genomföra ytterligare verifierande mätningar av vissa svårsmätbara nuklider.

4.2.3 Hantering av avfallet

Acceptanskriterier för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet fastställs först när utformningen av SFL bestämts. Redan i dag finns dock ett behov av att klargöra planeringsförutsättningarna för hanteringen av det avfall som uppstår vid drift samt nedmontering och rivning av de kärntekniska anläggningarna. Resultat och slutsatser från säkerhetsvärderingen för SFL, liksom kunskap om acceptanskriterier för slutförvaring, mellanlagring och transport av avfall till SFR, kommer att ligga till grund för den fortsatta utvecklingen av preliminära acceptanskriterier för det långlivade avfallet och för avfallet som ska deponeras i det utbyggda SFR. Framtida acceptanskriterier för det långlivade avfallet kan göra att det blir nödvändigt att stabilisera vissa typer av avfall, till exempel segmenterade hårdkomponenter som i dag mellanlagras i ståltankar på kraftverken, inför slutlig deponering i SFL. Metod för stabilisering av avfall i ståltankar, till exempel genom kringgjutning med betong, behöver då utvecklas. Likaså kan i framtiden krav komma att ställas på konditionering och paketering av vissa typer av avfall från AB SVAFO, Cyclife Sweden AB och Studsvik Nuclear AB, med behov av teknikutveckling som följd.

I Clab förvaras förutom använt kärnbränsle även hårdkomponenter, främst BWR-styrstavar. Segmentering av BWR-styrstavar ses fortfarande som huvudalternativ inför slutförvaring i SFL. SKB värderar löpande behovet av åtgärder för att säkerställa mellanlagringskapaciteten för använt kärnbränsle i Clab, och enligt nuvarande planer behöver segmentering av styrstavar inledas 2023 för att därmed frigöra lagringskapacitet genom att de efter segmentering kan lagras tätare i nya förvaringskassetter. Utvecklingsaktiviteter kopplade till segmentering av styrstavar kommer därför att behöva genomföras innan dess.

Reaktortankar från PWR-reaktorerna vid Ringhals kommer enligt nuvarande planering att slutförvaras i SFL. Dessa kan segmenteras och hanteras i mindre delar, eller hanteras hela (med eller utan interndelar kvar i tanken). För Ringhals 2 finns ett inriktningsbeslut att segmentera reaktortanken, medan beslut för Ringhals 3 och 4 kommer att fattas närmare avveckling av dessa reaktorer. För de segmenterade delarna planeras mellanlagring i avfallsbehållare på Ringhals i väntan på fortsatt hantering, transport och slutförvaring. Ingen särskild teknikutveckling bedöms då behövas för denna avfallskategori, utöver den som generellt redan planeras för hantering, transport och slutförvaring av långlivat avfall i ståltankar. Vid ett beslut om slutförvaring av hela reaktortankar från Ringhals 3 och 4 bedöms dock viss teknikutveckling behöva ske, kopplat till transport, uppställning, återfyllning och förslutning.

4.2.4 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att på ett optimalt sätt kunna transportera avfall från avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna behöver utvecklingsarbete ske rörande avfalls- och avfallstransportbehållare för långlivat avfall och för kortlivat rivningsavfall. Enligt nuvarande planer kommer en ny avfallstransportbehållare för långlivat avfall (ATB 1T) att certifieras och driftsättas omkring 2020, och ytterligare typer av avfallstransportbehållare kan komma att utvecklas. Behovet av avfallstransportbehållare styrs av vilka tillkommande avfallsbehållare som kommer att utvecklas.

Tekniska frågor kring hur långlivat avfall från AB SVAFO, Studsvik Nuclear AB och Cyclife Sweden AB, ska behandlas och förpackas behöver lösas när acceptanskriterier för långlivat avfall lagts fast. Detta kan exempelvis innefatta utveckling av nya typer av behållare.

4.3 Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat och högaktivt och kräver strålskärmning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Det utgör en mindre del av den totala mängden kärnavfall som ska slutförvaras, men innehåller den dominerande mängden av all radioaktivitet. Använt kärnbränsle kan bli kritiskt och måste hanteras på sådant sätt att det inte uppnår kriticitet.

Om en kapsel i Kärnbränsleförvaret skulle bli otät och vatten tränga in är bränslets egenskaper avgörande för hur snabbt radioaktiva ämnen frigörs. Resultat från tidigare säkerhetsanalyser visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar signifikant påverkar analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för mekanismen för upplösning av bränslematrisen behövs för att stödja tolkningen av de experimentella resultaten och därmed kunna minska pessimismen i kommande säkerhetsanalyser.

De kommande åren behövs både forskning för kommande analyser av säkerhet efter förslutning, och teknikutveckling gällande hantering av det använda kärnbränslet i de olika delarna av KBS-3-systemet.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor som behöver vidare insatser, i första hand fram till SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga avstämningpunkter. Teknik för hantering av bränsle färdigställs i takt med att detta behövs som underlag till systemkonstruktion och detaljkonstruktion av Clink och färdigställs under uppförande och driftsättning av anläggningen. I kapitel 8 beskrivs nuläge och program för forskning och teknikutveckling avseende det använda kärnbränslet under Fud-perioden.

4.3.1 Processförståelse

På grund av radioaktivt sönderfall minskar det använda bränslets innehåll av radionuklider med tiden. I början, under de första århundradena efter förslutning av slutförvaret dominerar gammastrålning från klyvningsprodukter. Det finns dock vissa klyvningsprodukter med mycket lång halveringstid, till exempel jod-129, som är viktiga i analysen av säkerhet efter förslutning. Andra mycket långlivande radionuklider är olika aktinider, vilka generellt sönderfaller med alfastrålning och efter 300 år dominerar denna. Risken förknippad med gammastrålande radionuklider, vilken är störst vid hantering av bränslet, undviks genom olika strålskyddsåtgärder såsom strålskärmning. Risken förknippad med alfastrålande nuklider kopplas främst till direktkontakt med dessa ämnen, till exempel genom födointag. Efter inkapsling i kopparkapslar är radionukliderna inneslutna så länge som kopparkapseln förblir tät. I säkerhetsanalysen hanteras olika scenarier då kopparkapselns integritet kan äventyras.

Bränsleupplösning

Upplösning av bränslet i slutförvaret är en fundamental process för analys av säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse av processer som sker vid radiolytisk oxidation av bränslet är viktig för en förklaring av den observerade vätagseffekten. Tidigare resultat har visat att reaktioner vid

bränslets yta är centrala, och att de metalliska partiklar som finns i bränslet spelar stor roll för att hålla ytan reducerad trots alfaradiolys i ytskiktet. Fortsatt forskning fokuserar på möjliga katalytiska effekter av en oxidytta utan metalliska partiklar, och hur olika ämnen som tillsätts i urandioxiden kan påverka den fasta fasens elektrokemiska egenskaper.

Radionuklidspeciering och lösligheter

Fördelningen av radionuklider i bränslets olika delar, speciellt hur stor del som sitter i gapet mellan kuts och kapsling har också betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning. Därför fortgår forskning kring hur detta beror av bränsletyp, effekthistorik och utbränning. Det finns kvarvarande osäkerheter angående speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider, inklusive uran. Då förståelse av urankemi i slutförvarsmiljö är en hörnsten i beskrivningen av den kemiska utvecklingen i en trasig, vattenfylld kapsel, behövs fortsatta forskningsinsatser inom detta område.

4.3.2 Bränsleintegritet, bränslekaraktärisering och bränsleinformation

För att säkerställa att allt använt bränsle kommer att kunna hanteras både i Clab och i inkapslingsanläggningen bedrivs ett program för kontroll av bränslets integritet (det så kallade åldringsprogrammet), där förändringar i bränslets egenskaper under lagring i bassängmiljö studeras. SKB följer internationell forskning och erfarenhet beträffande förändringar i bränslets integritet för att använda denna kunskap i åldringsprogrammet och inför hanteringen av bränslet i inkapslingsanläggningen. Det är viktigt att säkerställa att bränslet inte påverkas negativt av de påfrestningar som den planerade hanteringen kommer att innebära. Ett exempel är torkningen av bränsleelement som ska placeras i kapslar, då temperaturväxlingarna kan komma att påverka de kapslingsrör av zirkaloy som omger bränslet.

Icke-reguljära bränslen utgörs av sådana bränslen som väsentligt skiljer sig från det reguljärt använda kärnbränslet. Två viktiga exempel på icke-reguljärt bränsle är skadat bränsle och bränslerester från analyser av olika slag framför allt från Studsvik. Eftersom egenskaperna hos dessa bränsletyper skiljer sig från reguljärt bränsle, krävs separat hantering och analys av dessa. Resultaten av insatserna inom detta område kommer att användas i kommande säkerhetsredovisningar.

Ett pågående projekt om bränsleinformation syftar till att samla information om bränslet som SKB behöver nu och i framtiden. Inom detta projekt sker utredningar om hur information om det använda kärnbränslet bäst ska hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.

Det använda kärnbränslets resteffekt är en central egenskap som påverkar många aspekter i hela hanteringskedjan och i slutförvaret, exempelvis vid inkapsling då val av bränsleelement för inkapsling till stor del styrs av individuella bränsleelements resteffekt. Det pågår insatser för att förbättra och uppdatera beräkningar av resteffekt på Clab. Samtidigt fortsätter arbetet med kalorimetrisk bestämning och bestämning genom nukleära bränslemätningar (framför allt gamma och neutroner). Information om resteffekt behövs framför allt för att välja bränsleelement för placering i respektive kapsel, men ett viktigt syfte med detta arbete är också att kunna ge underlag till utformningen av de delar av inkapslingsanläggningen där mätutrustningen ska finnas. Dessutom syftar arbetet med bränslemätningar till att säkerställa att tillräcklig kunskap om bränslenas resteffekt finns tillgängliga för de kommande stegen i tillståndsprocessen för KBS-3-systemet.

4.3.3 Kriticitet, strålning och kärnämneskontroll

För kriticitetsberäkningarna har metoden för utbränningskreditering implementerats, ett utvecklingsarbete som inkluderar validering av en ny version av datorkoden Scale. Aktuella frågor är bland annat, analys av kriticitet i scenarier efter förslutning av förvaret med geometriförändringar i en trasig kopparkapsel, och strategi för att hantera bränsleknippen som inte möter utbränningskraven. De beräkningar som görs med Scale ger också underlag för bedömning av strålfältets påverkan på omgivningen. Teknikutveckling sker också inom området kärnämneskontroll, i samverkan med IAEA, Euratom och SSM.

4.4 Kapsel för använt kärnbränsle

Kopparkapseln utgör den viktigaste barriären i KBS-3-systemet genom att den ska innesluta det använda kärnbränslet under tillräckligt lång tid för att radionukliderna ska hinna sönderfalla så mycket att de inte längre utgör någon risk för människor eller andra organismer. I detta avsnitt beskrivs behoven av den kompletterande forskning som behövs om egenskaper hos kapseln (kopparhölje och segjärnsinsats) inför kommande säkerhetsredovisningar för Kärnbränsleförvaret. Vidare beskrivs behoven av den teknikutveckling som behövs för att kapseln ska kunna tillverkas, kontrolleras, verifieras mot ställda krav och användas inom KBS-3-systemet. I kapitel 9 redogörs för det planerade utvecklingsarbetet under Fud-perioden.

4.4.1 Processförståelse

Inför PSAR för Kärnbränsleförvaret har SSM pekat på områden med tillkommande behov av analyser, och flertalet av dem rör kapseln och dess funktion i förvaret. För att utveckla analysen av säkerhet efter förslutning behövs både mer kunskap om själva processerna och en förfinad användning av denna i analysen, och detta uppnås genom en iterativ process. SKB förutser därför att fortsatta studier av processerna behövs inför SAR.

Korrosion

Sulfidkorrosion är den viktigaste korrosionsprocessen för kopparhöljet särskilt om bufferten eroderats bort. Genom främst elektrokemiska experiment kan de detaljerade mekanismerna för korrosionen studeras, såsom bildning av och morfologi hos korrosionsfilmen, kopparytans utseende efter korrosion, och förutsättningar för att korrosionen skulle kunna vara mer lokaliserad (vilket ger djupare angrepp för en specifik mängd korrosion än om korrosionen är mer jämnt utbredd).

SKB kommer också att fortsatt studera mekanismerna för spänningskorrosion och strålnings-inducerad korrosion, liksom att utveckla modelleringen av lokal korrosion i analysen av säkerhet efter förslutning. Ett särskilt fokus kommer att ligga på perioden med omättad bentonitbuffert.

En ökad förståelse för vilka sulfidkoncentrationer som kan finnas i förvarsmiljön, både i lermaterialet och i berget, är viktig för att i möjligaste mån undvika överskattningar av transporten av sulfid till kapseln (och därmed av korrosionen).

Materialegenskaper kapselmaterial

SKB har valt en sort av syrefri koppar med låga halter av föroreningar. För att få gynnsamma krypegenskaper (tillräckligt hög duktilitet) tillsätts fosfor. Effekten av fosfor är belagd genom omfattande krypprovning, men för analysen av säkerhet efter förslutning behöver en bättre förståelse utvecklas (ända ner på atomnivå) för att visa att materialegenskaperna inte ändras över långa tider. SKB kommer därför att fortsätta studierna av fosfors effekt på krypegenskaperna, både experimentellt med provning och mikroskopi, och teoretiskt med framför allt kvantkemiska beräkningar. SKB planerar också undersökningar för att studera eventuell inträngning av väte i koppar, och om detta i så fall påverkar materialegenskaperna i någon signifikant utsträckning.

4.4.2 Konstruktion

När det gäller teknikutveckling för kapseln ska konstruktionsfasen i huvudsak vara slutförd som underlag till PSAR. Detta innebär att design- och defektanalyser uppdateras baserat på aktuella konstruktionsförutsättningar. Ytterligare kunskap om metallernas beteende vid tillverkning och praktiska demonstrationer behövs för att fastställa krav på dimensioner, mekaniska egenskaper, kemisk sammansättning, parametrar vid tillverkning och acceptanskriterier för fel eller avvikelser.

SKB har ansvar för kapslarna som produkt, men kan bara direkt styra vissa processer vid produktionen, till exempel förslutningen med friktionssvetsning i Clink. Genom en tydlig kravställning och återkoppling till leverantörer, kontroll och provning av kapseln och dess delar, samt kvalificering av vissa tillverkningsprocesser, kontrollförfaranden och provningssystem ska de egenskaper som kapseln behöver ha kunna uppnås och verifieras.

4.4.3 Tillverkning, kontroll och provning

Uppdaterade tillverkningskrav (specifikationer) och kontrollplaner ska tas fram inför provtillverkning av kapseldelar och inför montering och förslutning av kompletta men tomma kapslar.

Kapselns delar och svetsar provas för att bestämma mekaniska egenskaper, dimensioner och förekomst av defekter. SKB kommer att behöva visa att kapseln, inklusive dess delar och förslutningssvetsen, är provningsbar. För att kunna visa detta utarbetas krav på provningsmetoder baserat på analys av möjliga defekter, kapselns skadetålighet samt branschspecifika normer.

I samband med PSAR för Kärnbränsleförvaret avser SKB att presentera en strategi för kontroll och provning av barriärerna i slutförvaret inkluderat viss detaljering giltig för produktion av kapseln. Fastställda processer för kvalificering, kontroll och provning kommer däremot inte att finnas utvecklade till PSAR för Clink respektive Kärnbränsleförvaret, utan planeras vara klara inför samfunktionsprovningen.

Kapseldelar har provtillverkats i stål- och metallverk och verkstadsindustri i Sverige, Finland och andra europeiska länder. Inför industrialisering av produktionssystemet för kapslar behöver leverantörens kapacitet och logistik för kapseldelar utredas och åtgärder föreslås för att säkerställa leveranser av kapslar med en jämn och tillräckligt hög kvalitet till inkapslingsanläggningen. Målet är att processen för tillverkning och kontroll av kapslar ska vara utprovad och kunna utföras i industriell skala inom Fud-perioden, medan kvalificering av processen sker senare.

Den utrustning som ska användas i Clink för förslutning av kapslarna och kontroll av förslutningssvetsarna behöver anpassas till den nukleära miljön. Anpassningen kommer att utgöra underlag för detaljkonstruktion av Clink.

4.5 Cementbaserade material

Cementbaserade material förekommer i avfallsmatriser, barriärer och konstruktioner i SFR och SFL. I alla förvar används cementbaserade material också i pluggar, bergförstärkning och vid injektering.

I detta avsnitt beskrivs översiktligt den forskning som behövs för att få ökad processförståelse för egenskaperna hos de cementbaserade material som används i förvarskonstruktioner och andra delar av vikt för förvarens säkerhet efter förslutning. Vidare beskrivs den teknikutveckling som behövs för utformning av betongkonstruktioner, material och produktionsmetoder.

För detaljerat program för Fud-perioden vad gäller cementbaserade material i SFR, SFL och Kärnbränsleförvaret, se kapitel 10. Program som kopplar till cementbaserade material i avfallsmatrisen beskrivs i kapitel 7.

4.5.1 Processförståelse

Under den tidsperiod som omfattas av en analys av säkerheten efter förslutning kommer de cementbaserade materialens sammansättning och egenskaper sakta att förändras. Dessa förändringar kan orsakas av kemiska processer, såsom interaktioner med grundvattnet eller ämnen lösta i detta, alternativt av mekaniska processer, exempelvis bergrörelser eller tryck orsakade av svällande material, inre gastryck eller frysning av betongens porvatten. Egenskaperna skulle också kunna ändras abrupt vid ett jordskalv, och framför allt för SFL behöver effekterna av ett jordskalv på förvarets skyddsförmåga därför utvärderas.

Då cementbaserade material har en central funktion i upprätthållande av säkerheten efter förslutning bedriver SKB ett kontinuerligt arbete med syftet att vidmakthålla och förstärka kunskapen och förmågan att modellera utvecklingen av materialens egenskaper över tid.

Grundvattenpåverkan

Genom interaktioner med grundvattnet och ämnen lösta i detta kommer de cementbaserade materialens sammansättning och struktur att förändras. I vilken omfattning denna förändring sker beror av materialets ursprungliga sammansättning och struktur samt av grundvattnets sammansättning.

Under Fud-perioden avser SKB att fortsätta att driva och utveckla sitt program för studier av hur interaktioner mellan cementbaserade material och grundvatten och ämnen lösta i detta påverkar de cementbaserade materialens egenskaper över de aktuella tidsrymderna.

Påverkan från organiskt och metalliskt avfall samt från tillsatsmaterial

Organiskt och metalliskt material som bryts ned i en cementmatris kan påverka egenskaperna hos de tekniska barriärerna både genom att förändra den kemiska sammansättningen i porvattnet och hos cementmineralerna, och genom att orsaka lokala mekaniska spänningar. I syfte att ytterligare öka förståelsen för hur nedbrytningsprodukter från organiska respektive metalliska material interagerar med cementmineralerna planerar SKB att under Fud-perioden återta och analysera ytterligare prover från experiment inom projekt Concrete and Clay i Äspölaboratoriet.

SKB avser även att se över behovet av att fortsätta studierna av hur de olika typer av tillsatsmaterial som används vid tillverkning av cement och cementbaserade material kan påverka materialens egenskaper över tid. Arbetets utformning och tidpunkt för genomförande kommer dock att påverkas av de pågående förändringarna inom industrin för cementtillverkning och något program är därför inte fastlagt.

Mekaniska laster och gastransport

Mekaniska laster som kan påverka de cementbaserade materialens mekaniska och hydrauliska egenskaper kan dels utgöras av interna, lokalt verkande, laster orsakade av exempelvis expansiva mineral eller frysning av vatten inneslutet i materialens porsystem dels av mer storskaligt verkande laster orsakade av exempelvis gasträck eller glaciationslaster. Lastens ursprung och dess verkansområde kommer att avgöra vilken påverkan den kommer att ha på de cementbaserade materialens egenskaper.

SKB avser att under Fud-perioden fortsätta att samordna forskning kring gastransport genom cementbaserade material och de laster som förknippas med detta.

SKB kommer även att följa upp tidigare beräkningar och undersökningar av betongkonstruktionerna i befintligt SFR med en studie över bottenplattorna i förvarsdelarna. SKB kommer att utreda vilken påverkan lokal belastning med laster överstigande de angivna dimensionerande nyttolasterna kan ha medfört, och om en eventuell sprickbildning i någon bottenplatta medför att det initialtillstånd som säkerhetsanalysen förutsätter, inte längre uppnås.

4.5.2 Utformning av betongkonstruktioner och material

Inför utbyggnaden av SFR och inför uppförande av SFL och Kärnbränsleförvaret genomför SKB ett omfattande utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och material till de olika förvarerna. Det arbete som genomförts under den gångna Fud-perioden kommer att fortsätta även under den kommande perioden. I följande avsnitt ges en sammanfattning av planerat utvecklingsarbete. De fullständiga programmen presenteras i kapitel 10.

SFR och SFL

SKB planerar att under Fud-perioden fortsätta arbetet med utformning av förvarskonstruktioner och utveckling av material till dessa. Programmet tar avstamp i erfarenheter och resultat från det arbete som genomförts under den gångna Fud-perioden, med fokus på huvudområdena

- utformning av betongkonstruktioner
- vidareutveckling av tillverkningsmetod för material
- produktionsmetod för kassuner
- system för gastransport.

Huvudfokus kommer att skifta från materialutveckling och utveckling av teknik för uppförande till än mer produktionsnära aspekter.

För att realisera en försvarsutformning av SFL, med stora mängder betongåterfyllning, behöver material utvecklas och metoder för installationen tas fram. SKB bedriver i dagsläget inte något särskilt utvecklingsarbete av en konstruktionsbetong till de två bergssalarna, BHK och BHA, i SFL. Erfarenheter från tidigare arbete pekar på att den betong som utvecklats för kassunerna i 2BMA är lämplig även för försvarskonstruktionerna i SFL. Under Fud-perioden inriktas arbetet i stället på utredningar kopplade till material och metoder för grundläggning och återfyllnad av BHK med betong.

Kärnbränsleförvaret

Dagens konstruktionsförutsättningar och krav på Kärnbränsleförvaret förutsätter användning av låg-pH-material för att säkerställa att materialens lakningsprodukter inte negativt påverkar bentoniten i buffert och återfyllnad.

Under Fud-perioden kommer det hittills genomförda utvecklingsarbetet inom låg-pH cementbaserade material för berginjektering och bergförstärkning att sammanställas vilket skapar underlag inför planering av eventuella fortsatta arbeten.

SKB avser att under Fud-perioden slutföra utvärderingen från uppförande och rivning av den plugg av låg-pH-betong som tidigare uppförts i Äspölaboratoriets undersjordsdel, och sammanställa dessa analyser till ett underlag inför fortsatta studier.

4.6 Lerbarriärer och förslutning

Huvudsyftet med lerbarriärerna i Kärnbränsleförvaret (buffert och återfyllning), SFR (mellan berget och betongsilon) och SFL (återfyllningen i bergssal för historiskt avfall) är att begränsa vattenflödet runt kapslar respektive runt avfallsbehållare för låg- och medelaktivt avfall. Detta åstadkoms med ett material med en låg hydraulisk konduktivitet och en svällförmåga som gör att den installerade barriären homogeniseras, fyller hålrum och tätar till mot berget och andra försvarskomponenter.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor kring lerbarriärerna som behöver vidare insatser. För Kärnbränsleförvaret och det utbyggda SFR gäller detta i första hand fram till SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga avstämningpunkter. Den nyligen avslutade säkerhetsvärderingen för SFL baserades i huvudsak på befintlig kunskap när det gäller bentonitens egenskaper och funktion, men för framtida analyser kommer underlaget att behöva stärkas. De flesta processer i bentonitbarriärerna är gemensamma för de olika anläggningarna. Resultaten från den forskning som bedrivs för Kärnbränsleförvaret kan till största delen också användas för SFL och för silon i SFR.

För Kärnbränsleförvaret behöver utformning och produktionsprocess vidareutvecklas så att en tillräcklig grund kan ges för den fortsatta projekteringen av försvarsutrymmena och produktionssystem för bentonitkomponenter. Metoder och rutiner för kvalitetssäkring under tillverkning, hantering och installation behöver ytterligare detaljeras. Detta görs genom processkartläggningar och framtagning av preliminära kvalitetsplaner för den framtida produktionen av buffert och återfyllning. För att det ska vara möjligt att lägga fast tydliga krav som är praktiskt verifierbara behövs forskning avseende bentonitmaterialens egenskaper, framför allt under perioden efter installation fram till dess att bentoniten vattenmättats och fullt svälltryck utvecklats.

SFL säkerhetsvärdering har visat att både betongbarriärer och bentonitbarriärer utgör möjliga koncept för den kommande slutförvarsanläggningen utifrån perspektivet säkerhet efter förslutning. Vidare utveckling behövs för att ta fram tekniskt genomförbara utformningar av respektive barriärtyp i syfte att kunna jämföra dem sinsemellan.

För SFR anses kunskapsläget i huvudsak tillfredställande. En vidareutveckling av förslutningsplanen planeras dock för att om möjligt effektivisera utformning och installation.

Programmet inom lerbarriärer och förslutning redovisas i kapitel 11.

4.6.1 Processförståelse

Utveckling efter installation fram till vattenmättnad

I både Kärnbränsleförvaret och bergssalen för historiskt avfall i SFL (BHA) kommer lerbarriärerna att installeras som en kombination av kompakterade block och pellets tillverkade av bentonit. Den installerade barriären har därför initialt varken ett svälltryck eller en låg hydraulisk konduktivitet. Dessa egenskaper kommer att utvecklas i och med att bentoniten tar upp vatten från det omgivande berget.

I berget i Forsmark kommer en ansevärd andel av deponeringshålen i Kärnbränsleförvaret att vara delvis omättade för tidsperioder av 1 000 år eller längre. För bentonitens funktion har detta ingen större betydelse. Däremot kommer den kemiska miljön som står i kontakt med kapseln att vara annorlunda än den som råder under mättade förhållanden. Transport av ämnen i gasform i en omättad buffert kan ske betydligt snabbare än den transport av ämnen som är möjlig i en mättad buffert. En bättre förståelse för gasens sammansättning under den omättade perioden är därför nödvändig för att säkrare kunna värdera betydelsen av eventuell korrosion på kopparytan under denna period. För att kunna dra slutsatser om bentonitens långsiktiga funktion i SFL behöver dess utveckling i BHA under den omättade perioden utvärderas när plats för förvaret har valts.

Under perioden från installation av bentonitbarriärerna fram till dess att ett svälltryck har etablerats kan det förekomma mycket höga vattentrycksgradienter i barriärerna. Tillsammans med inflöden av vatten kan detta orsaka kanalbildning och erosion av material, och framför allt då i pelletsfyllningar. För att kunna utvärdera konsekvenserna av erosionen är det viktigt att förstå hur vatten tas upp i pelletsfyllningar under olika förhållanden.

För att mer utförligt kunna förstå och beskriva bentonitmaterialens utveckling fram till mättnad behövs därför fortsatta forsknings- och utredningsinsatser kring framför allt följande frågor:

- Gassammansättning och dess utveckling i den omättade bentoniten (främst när det gäller innehåll av syre och vätesulfid).
- Kanalbildning/erosion.
- Vattenupptag och svällning samt homogenisering av block och pellets.
- Mikrobiell sulfatreduktion/sulfidbildning.

Bentonitbarriärernas egenskaper i mättat tillstånd

Som tidigare nämnts är lerbarriärernas huvudfunktion att begränsa vattenflödet kring avfallet i de olika förvaren. 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. I Kärnbränsleförvaret ska bufferten också hålla kapseln på plats i deponeringshålet, dämpa bergets skjuvrörelser, begränsa den mikrobiella aktiviteten på kapselns yta och filtrera kolloidala partiklar. Det är viktigt att buffertens egenskaper bibehålls under hela den tidsperiod som analyseras.

Bentonitens viktigaste egenskaper, det vill säga låg hydraulisk konduktivitet, högt svälltryck och hög skjuvhållfasthet, kan samtliga relateras till dess densitet. Sambandet är unikt för varje bentonittyp, och för en given typ av bentonit varierar egenskaperna med dess sammansättning (till exempel montmorillonithalten). Det är viktigt att det finns en grundläggande förståelse för kopplingen mellan bentonitmaterialens sammansättning och dess egenskaper. Därför kommer SKB att fortsätta med detaljerade studier av kopplingen mellan materialets sammansättning och dess egenskaper för olika bentonitmaterial.

För Kärnbränsleförvaret och SFL behövs också fortsatta insatser kring bentonitförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion. Resultaten av sådana insatser kan direkt påverka utfallet av analysen av säkerhet efter förslutning, till exempel genom att de pessimistiska antagandena kring buffererosion i säkerhetsanalysen SR-Site skulle kunna mildras.

Insatser behövs också kring bentonitens långsiktiga stabilitet med hänsyn tagen till temperatur, järninnehåll och cement. Interaktionen mellan bentonit och cement är en av de viktigaste processerna för säkerhet efter förslutning i SFL, och ökad kunskap om denna interaktion kan också tillämpas för utvärderingen av säkerhet efter förslutning när det gäller silon i SFR.

4.6.2 Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning

Teknikutvecklingen för mekanisk brytning av tunnlar har gått framåt i omvärlden och SKB utreder möjligheten att använda denna teknik för produktionen av deponeringstunnlar i Kärnbränsleförvaret (avsnitt 4.7.2). Som en del av detta utreds även vad det skulle betyda för återfyllningens utformning. För utformning av återfyllning behövs också vidare insatser avseende verifiering av återfyllningens förmåga att utgöra mothåll till en uppåt svällande buffert.

Krav på installationssekvens och installation av buffert- och återfyllningskomponenter kommer att uppdateras och tydliggöras. En viktig fråga är hur termiska, hydrauliska och mekaniska processer i bufferten påverkar densiteten från det att bufferten placeras i deponeringshålet tills återfyllningen installeras över deponeringshålet. För återfyllningen behövs fortsatta insatser kring vattenhantering vid återfyllningsinstallation. Innan detaljprojektering av deponeringsområdet kan påbörjas måste installations- och kontrollmetoder för buffert, återfyllning och plugg vara detaljutformade och testade. För att verifiera att installation av buffert och återfyllning fungerar som avsett och ger resultat inom acceptabla intervall behöver fullskaliga tester genomföras.

Den framtagna processen för att anpassa densitetskraven på buffert och återfyllning till ett specifikt bentonitmaterial behöver appliceras på fler bentonitmaterial, både för att öka kunskapen om olika bentonitmaterial och för att utveckla kompetens för mätmetoder och mätutformning.

Som ett underlag till detaljprojektering av produktionsbyggnaden vid Kärnbränsleförvaret pågår en utvärdering av möjligheten till effektivare tillverkning av buffertblock. Både tillverkningen av hela buffertblock med enaxlig pressning och möjligheten att använda segmenterade buffertblock ingår i utvärderingen. Utöver utvärderingen av tillverkning av buffertblock behöver följande vara genomfört och fastställt inför detaljprojektering av produktionsbyggnaden:

- Tillverkningsmetoder som fungerar i industriell skala för produktion av bentonitblock och bentonitpellets för buffert och återfyllning.
- Provningsmetoder som fungerar i industriell skala.
- Förutsättningar för framtagning av kvalitetsstyrning och kontroll.

4.6.3 Deponering och installation av buffert och återfyllning

Till tekniska system för deponering hör till exempel deponeringsmaskin, återfyllningsrobot och transportsystem för buffert och återfyllnadskomponenter. Prototyper eller i alla fall principlösningar för deponeringsarbetet finns framme. Deponeringsprocessen avses bli automatiserad, och för att styra och övervaka ett sådant system pågår utveckling av ett överordnat styrsystem. Utrustningarna vidareutvecklas för att finnas framme när de behövs för integrationstester och samfunktionsprovning.

För återfyllning av BHA i SFL planeras utveckling av det återfyllningskoncept som utvärderats i säkerhetsvärderingen. Utvecklingen fokuserar på teknisk genomförbarhet.

4.6.4 Förslutning av borrhål och förvar

Förslutning

Förslutningssekvens för Kärnbränsleförvaret behöver utvecklas liksom kraven på layout så att positioner för pluggar kan förberedas då ramp och centralområde byggs.

Baserat på analysen av säkerhet efter förslutning för SFR och kompletterande analyser kommer kraven på förslutningskomponenterna för SFR att ses över. Genomförd teknikutveckling har även identifierat behov av vidare utveckling av utformning och installation av förslutningen.

Detaljprojektering av utbyggnaden av SFR samt ökad kunskap om bergets egenskaper kan också påverka utformningen av förslutningskomponenterna. Utgående från dessa underlag kommer förslutningen att ses över för att ta fram en även ur andra aspekter (till exempel övrig miljöpåverkan, flexibilitet och kostnadseffektivitet vid installation) mer anpassad förslutning. Som en del av översynen kommer behov av verifierande tester att inventeras.

Borrhålsförslutning

De metoder för förslutning av undersökningsborrhål som tagits fram bedöms kunna tillämpas i Forsmark i dagsläget. För implementering i rutinmässig verksamhet behöver dock metoderna optimeras.

4.7 Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvarsanläggningar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden samt att begränsa vattenflödet i och i anslutning till förvaren över den tid som avfallet behöver isoleras för att det inte ska utgöra en hälsorisk för människor eller andra organismer. För att detta ska kunna uppnås behövs dels tillräcklig kunskap om förhållandena i berggrunden och om de processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaret, dels behöver slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen utformas på ett sådant sätt att de långsiktigt stabila förhållandena inte äventyras. En stor del av de forsknings- och teknikutvecklingsfrågor som rör berget och slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen är gemensamma för de tre olika förvaren.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns ett antal frågor som behöver vidare insatser. När det gäller både Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR behöver dessa frågor vara lösta inför SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga avstämningpunkter. Den nyligen genomförda säkerhetsvärderingen av SFL baserades på befintlig kunskap om berget som barriär och på den information som tidigare tagits fram för Kärnbränsleförvaret och SFR. Säkerhetsvärderingen av SFL har pekat på några områden där ytterligare kunskap behövs (se även kapitel 6).

Den teknikutveckling inom bergområdet som behövs för Kärnbränsleförvaret som underlag till PSAR och dokumentet som redovisar säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen och som möjliggör byggstart (godkänd PSAR, detaljprojekterade tillfarter) är i huvudsak genomförd. Ytterligare metodutveckling inför SAR bedöms kunna leda till mer effektiva urvalskriterier för deponeringshål, vilket i sin tur medför att färre hål väljs bort i onödan.

Nedan sammanfattas de områden med kvarstående frågor vad avser forskning, teknikutveckling och analys av säkerhet efter förslutning för berget. Programmet för Fud-perioden redovisas i kapitel 12.

4.7.1 Processförståelse

Karaktärisering och modellering av bergets egenskaper

Modellering av bergmassans mekaniska egenskaper med kopplade modeller förutsätter att bergets egenskaper kan ansättas oberoende av modelleringsverktyg och numerisk upplösning. Det finns kunskapsluckor i den grundläggande förståelsen om de mekaniska egenskaperna av enskilda sprickor och spricksystem samt hur dessa samverkar med termiska och hydrauliska egenskaper, vilket i sin tur påverkar bergets hydrogeologiska-, geokemiska- och transportegenskaper.

Sprickpropagering i kristallint, hårt berg beror på de mekaniska, termiska och hydrauliska egenskaperna samt på rådande bergspänningsförhållanden. I ett långsiktigt perspektiv påverkas sprickors tillväxt även av de grundvattenkemiska förhållandena. Integrerad modellering behövs därför för att gränssätta betydelsen av inducerade rörelser, både i när- och fjärrområdet, som en följd av termiskt, seismiskt eller glaciellt inducerade belastningar.

De beräkningar av bergspänningar inom förvarsvolymen för Kärnbränsleförvaret i Forsmark som gjorts hittills är behäftade med stora osäkerheter, främst på grund av databrist. För att minska dessa osäkerheter behövs såväl in situ-mätningar som modellering, vilket även kommer att resultera i en förbättrad beskrivning av spänningsfältets spatiala variabilitet med avseende på storlek och riktning.

Diskreta spricknätverk (DFN – Discrete Fracture Network) används inom modellering av bergmekanik, grundvattenflöde och transport av lösta ämnen. Beskrivningen och parameteriseringen av enskilda sprickor utgör viktig indata vid analys av många frågor som spelar stor roll för förvarens säkerhet efter förslutning, liksom för frågor som behöver besvaras under konstruktions- och driftfasen. Den pågående utvecklingen av DFN-metodik kommer att fortsätta under de närmaste åren.

Seismisk påverkan på förvarens säkerhet

Jordskalv i Kärnbränsleförvarets närområde kan orsaka skjuvrörelser längs sprickor som skär kapselpositioner. Om skalven är tillräckligt stora och tillräckligt nära förvaret induceras sekundära skjuvrörelser som kan överskrida kapselns hållfasthet, om de sker längs olämpligt belägna och orienterade sprickor. Detta var en (av två) mekanismer för kapselskador som inte kunde uteslutas i säkerhetsanalysen SR-Site. Förståelse för skjuvrörelser i berget är också viktig för att kunna ställa adekvata krav på kapselns tålighet mot skjuvrörelser. För SFL behöver möjliga konsekvenser av jordskalv utvärderas när plats och koncept för förvaret har valts.

Forskning om jordskalv som bedrivs av SKB kan grovt delas in i de delvis överlappande disciplinerna paleoseismologi, instrumentering och modellering. Det huvudsakliga syftet med dessa forskningsinsatser är att säkerställa att den seismiska risken inte är underskattad, att de negativa effekterna på förvarssystemet som beräknats i modeller inte underskattats samt att utreda möjligheten till ett effektivare nyttjande av förvarsvolymen.

Den ojämförligt största kvarvarande osäkerheten rör sambandet mellan jordskalvens frekvens och magnitud samt dess variabilitet under en glaciationscykel. Denna osäkerhet adresseras delvis genom studier av paleoseismiska händelser och fördjupade studier av mätta data från skalv.

Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen

Under de senaste åren har hydrogeologisk modellering utvecklats så att geokemiska processer och transportprocesser nu kan integreras med flödesmodelleringen. Insatser behövs för att vidareutveckla och testa dessa nya verktyg samt att utöka deras användningsområden (till exempel genom att inkludera mikrobiella processer) för användning inom platsmodellering och säkerhetsanalys. Vidare planeras en utveckling av de hydrogeologiska simuleringsverktygen så att grundvattenflödes- och radionuklidtransportberäkningar kan göras i ett och samma verktyg utan export/import av datafiler med intermediära resultat.

I säkerhetsvärderingen för SFL identifierades att gränsytan mellan betongåterfyllnad och berg samt mellan bentonitåterfyllnad och berg är av stor betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning. Detaljerade modeller för att beräkna vattenflödet genom SFL och transporten av lösta ämnen från SFL till det omgivande berget kommer att utvecklas. Resultaten från de mer detaljerade modellerna kommer att ligga till grund för utvecklingen av en förenklad radionuklidtransportmodell som kommer att användas i framtida säkerhetsanalyser för SFL.

Inom transport av lösta ämnen behövs insatser framför allt om matrisdiffusion och sorption, vad gäller konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar och vidareutveckling av modelleringsverktyg. Detta berör främst Kärnbränsleförvaret och SFL, och insatserna kan framför allt leda till mindre pessimistiska antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning genom användande av platsspecifika data med ett reducerat osäkerhetsintervall jämfört med de data som används i dag.

Påverkan på ett slutförvar av det hydrogeologiska systemet vid glaciation samt under olika stadier av permafrosttillväxt eller avsmältning är platsspecifik och behöver analyseras i platsmodeller. SKB:s Grönlandsprojekt GAP (Greenland Analogue Project) och Grasp (Greenland Analogue Surface Project) har gett kunskap om lokala avrinningsområdets egenskaper under permafrostförhållanden och har bidragit till utvecklad processförståelse, främst när det gäller hur hydrogeologiska processer verkar i ett område med kall, djup och kontinuerlig permafrost. Det finns dock kvarvarande kunskapsluckor kopplade till processförståelse under tidsperioder då permafrosten växer till eller smälter av. SKB avser att inhämta denna kunskap genom hydrologiska och biogeokemiska modellstudier av platser som i dag har andra typer av permafrost.

Modeller som tar hänsyn till klimatets inverkan på platsspecifika egenskaper för hydrogeologi, geokemi och ämnestransport, samt klimatets påverkan på processer och egenskaper vid permafrost och glaciation behöver vidareutvecklas för Forsmark. Motsvarande modellutveckling och processförståelse behövs även för analys av hur ett varmare, och blötare klimat kan komma att påverka platsspecifika egenskaper och hydrologiska/hydrogeologiska och biogeokemiska processer.

4.7.2 Produktion, verifiering och kontroll

Metodik för detaljundersökningar med tillhörande modellering

De detaljundersökningar (inklusive övervakning, se avsnitt 4.10) och platsbeskrivande modelleringar som utförs i samband med ett slutförvars uppförande och drift, ger steg för steg information om bergets egenskaper, hur förvarets underjordsdelar ska anpassas till rådande förhållanden och dess lämplighet för deponering, det vill säga hur väl de uppfyller ställda krav för säkerhet efter förslutning. Vid den fortsatta utvecklingen av detaljundersökningsprogrammet till operativa program ska metoder, instrument och modelleringsteknik för att verifiera att ställda krav uppfylls, tas fram och beskrivas.

Metodik fastläggs för ämnesvis och integrerad geovetenskaplig modellering i olika skalor och för olika ändamål. Ett viktigt område där ytterligare insatser identifierats är utveckling av metodiken för DFN-modellering, det vill säga modellering av bergets spricknätverk. Operativa program för tillfarer och centralområde samt för deponeringsområden upprättas med beskrivningar av strategier för detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering, med speciellt fokus på verifiering av de krav som uttrycks i formulerade konstruktionsförutsättningar. De operativa programmen är ömsesidigt understödjande med tillämpningar som är väl integrerade med aktuella produktions- och deponeringscykler.

Tunnelproduktion

Bergarbeten för utbyggnad av SFR kan genomföras med befintlig teknik och för dessa planeras inget särskilt utvecklingsarbete.

Beskrivningar av krav, metodik, utförande och resultatkontroll (verifiering) för allt bergarbete som utförs i Kärnbränsleförvaret behöver vara framtaget som underlag till PSAR och Suus. Vidareutveckling för att skapa en mer produktionseffektiv metod för bergarbeten i deponeringsområdet såsom bergguttar av deponeringstunnel och borrhål av deponeringshål, kan dock fortsätta fram till dess att detaljprojektering av deponeringsområdet startar.

Med tanke på deponeringssekvensen i Kärnbränsleförvaret, där flera olika maskiner och utrustningar används, så behöver tunnelgolvet vara tillräckligt plant för att tunneln ska vara lättframkomlig och för att minska underhåll och slitage av utrustning. Referensmetod i dag är sprängning, men en utredning av alternativa metoder för att åstadkomma en planare sula med mindre sprängskadezon pågår. Den slutliga metoden behövs först vid testning av hela bergbyggnadsmetodiken på förvarsdjup i Forsmark.

Inför detaljprojektering av Kärnbränsleförvarets deponeringsområde behöver fungerande metoder och delprocesser för bergutbyggnad under Forsmarksförhållanden finnas framtagna och kunna verifieras på förvarsdjup i Forsmark.

Det innebär att följande metoder måste finnas framtagna:

- Undersökningsmetod för val och acceptans av deponeringstunnel.
- Uttagsmetoder inklusive metod för bergförstärkning och injektering fastställda för deponeringstunnel.
- Metod för avjämning av sula i deponeringstunnel.
- Undersökningsmetod för val och acceptans av deponeringshål.
- Metod för borrhål av deponeringshål, avjämning av botten samt tillverkning av avfasning.

För att verifiera undersöknings- och uttagsmetoder och säkerställa att de ger önskat resultat, behöver tester genomföras i fullskala i underjordsförhållanden.

4.8 Ytekosystem

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar i första hand till att skapa underlag för beräkningar av potentiell stråldos till människa och miljö i analyserna av säkerheten efter förslutning för de olika förvaren. Programmet ger också underlag för miljöövervakning, bedömningar av eventuella miljöförändringar och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift.

Nuläge och program för Fud-perioden redovisas i kapitel 13.

Forskningsfrågor kring radionuklidomsättning och dosberäkningar i ytekosystem för de tre olika förvaren överlappar varandra. SKB bedömer att det inte finns några kritiska kvarstående forskningsfrågor som måste lösas inför PSAR för Kärnbränsleförvaret eller PSAR inför utbyggnaden av SFR.

Inför SAR för Kärnbränsleförvaret och för utbyggt SFR, liksom inför F-PSAR för SFL, finns ett antal frågor där ytterligare insatser behövs, främst för att minska osäkerheter i analysen av säkerhet efter förslutning. De viktigaste kvarstående frågorna finns inom fyra olika områden: i) upptagsvägar och upptagsmekanismer för olika organismer, ii) temporal och spatial heterogenitet i landskapet, iii) transport- och ackumulationsprocesser, iv) radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos vissa ämnen (till exempel kol, klor och urans sönderfallskedja).

När det gäller upptagsvägar och upptagsmekanismer kommer SKB att fortsätta det långsiktiga arbetet som syftar till att ersätta eller komplettera koncentrationsfaktorer för organismer med mekanistiska modeller. SKB har tidigare utvecklat ekosystemmodeller för land, sjö och hav som underlag för modellering av radionuklidtransport och organismers upptag av radionuklider i ytsystemet. Som en fortsättning på arbetet med sjöekosystemmodellen kommer en modell för rinnande vatten att utvecklas. Parallellt med detta kommer arbetet med att utveckla den terrestra ekosystemmodellen att fortsätta, med fokus på växtupptag via rotsystemet.

4.9 Klimat och klimatrelaterade processer

Det övergripande syftet med arbetet om klimatfrågor är att förse säkerhetsanalyserna med vetenskapligt underbyggda och uppdaterade scenarier för framtida klimatutveckling, till grund för utvärderingen av förvarens säkerhet efter förslutning. För de olika förvarskoncepten finns specifika frågor som beror av framtida klimatutvecklingar som ska besvaras i säkerhetsanalyserna. Nuläge och program för Fud-perioden redovisas i kapitel 14.

De framtida klimatutvecklingarna baseras dels på kunskapen om klimatets historia (framför allt den senaste glaciationscykeln, Weichselglaciationen), dels på modellering av det framtida klimatet. Övergripande handlar arbetet kring klimatfrågor därför om att utveckla processförståelse, ta fram klimathistoria, uppdatera klimatscenarier och validera de modeller som används för att beskriva spännvidden av de klimat och klimatrelaterade processer som slutförvaren kan komma att utsättas för under kommande 100 000 till en miljon år. Dessutom ska övriga ämnesområden som ingår i SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning förse med indata, antaganden och randvillkor från klimat och klimatrelaterade processer, såsom utvecklingen av permafrost och inlandsis samt förändring av havsnivå.

Det finns frågor med bäring på alla tre slutförvaren som behöver studeras vidare för att minska osäkerheter och underbygga trovärdigheten i analysen av säkerhet efter förslutning för de olika förvaren. Frågor rör framför allt i) historiska klimatförändringar under Weichsel och holocen, ii) havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning, iii) ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av glacial erosion, iv) validering av permafrostmodell, samt v) variabilitet hos klimat och inlandsisar under de kommande en miljon åren. Utöver ovanstående punkter om framtida studier planeras fortsatt datainsamling från bergborrhålet vid inlandsisen på Grönland samt fortsatta väderstationsobservationer på och framför inlandsisen.

4.10 Övervakning under uppförande och drift

SKB kommer att ta fram övervakningsprogram inför uppförande av Kärnbränsleförvaret, SFL samt inför utbyggnaden av SFR. Programmen syftar till att ge en samlad bild av SKB:s kommande övervakningsaktiviteter under uppförande och drift av slutförvaren. De beskriver vilka data som ska samlas in och vad dessa ska användas till. Den information som kommer att samlas in har ibland mer än ett användningsområde och ger underlag till

- analysen av säkerhet efter förslutning
- utformning och uppförande av slutförvarsanläggningar
- kontroller av den yttre miljön.

Vad gäller underlag till andra och tredje punkten så har SKB sedan tidigare bedrivit arbete inom området. I övervakningsprogrammet kommer detta arbete att summeras och relationen till andra typer av övervakning beskrivas.

Vad gäller den första punkten, att stödja säkerhet efter förslutning, så kommer nya arbeten att initieras under Fud-perioden. Bedömningen av säkerhet efter förslutning bygger på

- förståelsen för de termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som styr slutförvarens utveckling och som utgör underlag för att demonstrera förvarets förmåga att innesluta eller fördröja spridningen av radioaktiva ämnen
- verifiering av att de installerade barriärerna samt tunnlar och bergrum uppfyller de tekniska utformningskraven.

Det dataunderlag som SKB har byggt upp genom årtionden av forskning kommer att kompletteras med resultat från ett detaljundersökningsprogram anpassat till de specifika förhållandena på den valda platsen. För verifieringen av att de tekniska utformningskraven uppfylls kommer metoder och rutiner för att säkerställa detta att utvecklas. Detta kommer att utgöra ett verktyg för att identifiera tillverknings- eller installationsfel samt andra avvikelser i material, utrustning och hantering. Övervakningen kommer att bidra till att

- verifiera SKB:s förståelse för förvarets utveckling
- stödja antaganden gjorda i analysen av säkerhet efter förslutning
- identifiera eventuella tidigare okända processer och händelser.

Slutförvarens säkerhet bygger på passiva barriärer och övervakningen får inte påverka dessa negativt. Att införa övervakningsutrustning i en barriär kan innebära en risk för säkerheten efter förslutning. Detta begränsar avsevärt valet av teknik, lokalisering och tidsramar för att utföra övervakningen. Risken för bortfall av eller felaktiga signaler från givare i de tekniska barriärerna är också en anledning till att sådana inte kommer att användas. Felaktiga signaler skulle kunna leda till ogrundade beslut om åtgärder som är förknippade med stora kostnader och radiologiska risker.

Det finns andra möjligheter till övervakning som ger relevant information om barriärernas utveckling vid förvarsplatsen, men som inte äventyrar säkerheten. En sådan möjlighet är att installera långtidsförsök, med fokus på de viktigaste aspekterna hos de tekniska barriärerna nere i berget vid representativa platser i förvaret. En del av dessa försök kan brytas och utvärderas under driftperioden för att ge underlag till säkerhetsredovisningen (SAR). Inför förslutning bör alla sådana försök avslutas och utvärderas för att ge underlag och förtroende för beslutet att stänga och försluta förvaret.

Under Fud-perioden kommer övervakningsprogram för Kärnbränsleförvaret och för SFR att tas fram och lämnas till SSM som ett underlag till ansökan om att påbörja uppförande av dessa förvar.

SKB har deltagit i det avslutade EU-projektet Modern2020 och i IAEA-projektet "Use of Monitoring Programmes in the Safe Development of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste". I det kommande arbetet ska parametrar som är lämpliga att inkludera i övervakningsprogrammen identifieras och deras relevans för säkerhet efter förslutning förklaras. Vidare ska kvalitativa beskrivningar av förväntad utveckling göras och om lämpligt exemplifieras med kvantitativa resultat från modeller. Resonemang om vilken typ av åtgärder som kan vidtas för att hantera eventuella situationer där övervakningsresultat avviker från förväntningarna redovisas. Övervakningsprogrammen kommer att uppdateras vid förutbestämda tidpunkter. SKB följer också internationellt arbete vad gäller övervakning.

I det kommande arbetet kommer övervakning för att stödja analysen av säkerhet efter förslutning att göras inom följande områden:

- Hydrologi.
- Grundvattenkemi.
- Bergets mekaniska och termiska beteende.
- Cementbaserade material, lerbarriärer och förslutning.
- Kopparkorrosion.

4.11 Avveckling

Utifrån tidigare genomfört utvecklingsarbete, pågående avveckling och nuvarande avvecklingsplanering har ett antal utvecklingsinsatser identifierats för att kunna genomföra avvecklingen av de svenska kärnkraftverken på ett säkert och effektivt sätt. Utvecklingsområdena är till stor del gemensamma för tillståndshavarna och relaterar mer till avfallshantering, tillståndsprocesser, samt resurser och samordning än till grundforskning och ren teknikutveckling, även om anpassningar av tillgänglig teknik kommer att behövas. I detta avsnitt redogörs för några av dessa utvecklingsområden och var utmaningarna ligger. I del III redogörs mer utförligt för pågående och planerade aktiviteter kopplade till avvecklingen.

4.11.1 Avfallshantering

Hantering av långlivat avfall

Långlivat avfallet från kärnkraftverken uppstår innan det planerade slutförvaret SFL är driftsatt. Det långlivade avfallet kan inte slutkonditioneras innan den slutgiltiga kravbilden för SFL fastlagts, vilket väntas kunna ske som tidigast i samband med att tillstånd om att uppföra SFL erhålls under 2030-talet.

För att kunna hantera det långlivade avfall som uppstår under avvecklingen så fullständigt som möjligt behöver tillräckliga planeringsförutsättningar fastläggas. Den genomförda säkerhetsvärderingen för det föreslagna förvarskonceptet för SFL utgör ett underlag för att formulera preliminära acceptanskriterier för avfallet. Dessa avser att ge tillräckliga förutsättningar för verkens avvecklingsplanering och kommer möjliggöra viss konditionering av det långlivade avfallet under avvecklingen.

Slutkonditionering bedöms kunna påbörjas under projekteringen av SFL och genomföras parallellt med byggnationen av anläggningen. Möjligheter finns då att etablera konditioneringsanläggning såväl lokalt på respektive anläggning som centralt. Fram till tidpunkten för slutkonditionering kommer mellanlager för avfallet att behövas. I flera fall kan detta lösas lokalt på anläggningen. Alternativa lösningar att mellanlagra avfall hos andra tillståndshavare utvärderas också.

Friklassning och hantering av mycket lågaktivt avfall

Hanterings- och bortskaffningsmöjligheterna för det konventionella och mycket lågaktiva avfallet har stor betydelse för ett avvecklingsprojekt. Eftersom materialströmmarna inom dessa avfallskategorier är stora finns logistiska utmaningar, vilket skapar behov av väl fastslagna alternativ för omhändertagande av avfallet innan det börjar genereras för att säkerställa fullgod och effektiv hantering. Det material som kommer att friklassas vid nedmontering och rivning kan omhändertas på flera sätt, exempelvis genom att material återanvänds som återfyllning vid den konventionella rivningen eller att visst avfall omhändertas på konventionella avfallsanläggningar. I vissa fall skulle friklassning för särskilda ändamål behöva tillämpas, vilket innebär att friklassningen är förbunden med restriktioner för hur materialet får hanteras efter friklassningen.

Exempel på bortskaffningsalternativ för det mycket lågaktiva avfallet är deponering i markförvar eller SFR samt förbränning av material för energiåtervinning med kontrollerad hantering av askrester. Material som kan friklassas, till exempel metaller, ska i så stor utsträckning som möjligt återvinnas för förnyad användning.

Nuvarande omhändertagande, framtida utmaningar och planerat arbete med att utveckla hanteringen av det mycket lågaktiva avfallet beskrivs i avsnitt 3.2.

4.11.2 Tillståndsprocesser

Friklassning av en kärnteknisk anläggning

För att slutligt kunna erhålla ett friklassningsbeslut, det vill säga ett beslut om att en anläggning inte längre ska beröras av lagkrav i strålskyddslagen och kärntekniklagen, krävs att material, lokaler, byggnader och marken har kontrollerats gällande förekomsten av radioaktiva ämnen och att kraven i SSMFS 2018:3 uppfylls. Vidare krävs att en avvecklingsrapport över genomförandet av avvecklingen, med beskrivningar av gjorda erfarenheter och anläggningens sluttillstånd, sammanställts och lämnats in till SSM.

Då flera av de svenska kärnkraftverken har ställts av eller står inför slutlig avställning och är i begrepp att inleda nedmontering och rivning finns det behov av att tydliggöra kravbilderna inom området avlicensiering. Ett förtydligande behövs avseende när en anläggning upphör att vara kärnteknisk enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen och vilken dokumentation som behöver finnas och hur informationen ska arkiveras. En utredning (SOU 2019:16) har nyligen presenterats och den innehåller förslag på en ny kärntekniklag som bland annat adresserar återkallande av tillstånd. Ett gemensamt arbete inom kärnkraftsföretagen kring avlicensiering behöver initieras inom Fud-perioden.

4.11.3 Resurser och samordning

Det planerade genomförandet av ett flertal parallella avvecklingsprojekt ställer stora krav på att kompetens och bemanning finns tillgänglig. Detta avser såväl externa konsulter och entreprenörer som interna resurser inom kärnkraftsföretagen samt handläggare och sakkunniga inom myndigheter och kommuner.

Inom kärnkraftskoncernerna pågår en översyn av kompetensbehovet och kompetenstillgången för att skapa en bild av situationen och baserat på denna initiera åtgärder. Därutöver har en första dialog med potentiella entreprenörer initierats. De aktiviteter under avvecklingen som kräver specifika resurser är att segmentera interndelar och reaktortank samt nedmontera och riva biologisk skärm. Utöver dessa mer kärntekniskt avancerade avvecklingsspecifika kompetenserna kommer ett stort antal rivningsentreprenörer och strålskyddare att krävas.

Till följd av att avvecklingen av de första reaktorerna genomförs innan mottagningskapacitet finns inom slutförvarssystemet, det vill säga innan SFR tas i drift efter utbyggnaden och innan SFL har byggts och tagits i drift, måste det radioaktiva avfallet mellanlagras inför deponering (se förhållande mellan milstolpar och avvecklingsprojekt i avsnitt 3.3). Tidigareläggandet av avvecklingsprojekten, och det mellanlagringsbehov som därmed realiserats, gör därför att avvecklingsprojekten i nuvarande planering överlag blir mindre känsliga för SKB:s tidsplaner än de tidigare varit. Eftersom all kärnteknisk verksamhet vid Barsebäcksverket planeras upphöra efter avvecklingsprojektets slut, finns alltså ett behov av att kunna bli av med det radioaktiva avfallet för att möjliggöra friklassning av anläggningen. Detta innebär att en viss koppling mellan reaktoravveckling och driftsättning av SFR:s utbyggnad fortfarande kvarstår och att avvecklingsprojekt är beroende av en extern mellanlagringsmöjlighet för långlivat avfall. Resultatet av att flera avvecklingsprojekt pågår samtidigt, och behov av mellanlager uppstått till följd av en senare driftsättning av utbyggt SFR, har inneburit en ökad samordning mellan kraftbolagen och inom koncernerna.

4.12 Övriga områden

SKB följer utvecklingen inom två övriga områden som är av intresse för SKB, frågeställningar kring bevarande av information och kunskap genom generationer samt utvecklingen inom andra metoder för slutförvaring.

4.12.1 Bevarande av information och kunskap genom generationer

SKB har under många år arbetat med frågeställningar kring arkivering och informationsbevarande på lång sikt, flera generationer framåt. Syftet med arbetet har varit att försöka skapa så goda förutsättningar för ett informationsbevarande som möjligt.

I samråden inför ansökningarna för inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret för använt kärnbränsle togs frågor om bevarande av informationen och kunskapen om Kärnbränsleförvaret och vem som har ansvaret för det efter förslutningen återkommande upp. Bland annat framkom det önskemål om att SKB ska presentera ett förslag på handlingsplan för hur informationen/kunskapen kan bevaras under mycket lång tid.

Frågorna om bevarande av information och kunskap till kommande generationer kan tyckas som mest angelägna för Kärnbränsleförvaret, men behöver även beaktas för SFR och SFL. Rent praktiskt behöver lösningarna för informationsbevarande finnas på plats först i samband med att ett slutförvar

försluts, vilket kan ske under slutet av detta sekel. Det är inte möjligt, för vare sig SKB, myndigheter eller andra delar av samhället, att i dag definitivt bestämma hur man ska gå tillväga med något som ska ske så långt in i framtiden.

I det dagliga arbetet och fram till förslutningen av slutförvaren, förvaltar och bevarar SKB dokument, data och information i enlighet med externa krav från bland andra SSM och Riksarkivet. Vissa av dessa krav innebär förvaring utan tydligt slutdatum. Enligt SSM:s föreskrifter om arkivering vid kärntekniska anläggningar SSMFS 2008:38, ska ett slutförvars samlade arkiv, ordnade och förtecknade, överlämnas till Riks- eller landsarkiv om verksamheten upphör. I samband med att ett slutförvar slutligt försluts förväntas en granskning ske av slutförvarets säkerhetsredovisning i syfte att bedöma om slutförvaret är säkert efter förslutning. I yttrande till regeringen har SKB föreslagit att frågor kring överlämnande av information och fortsatt bevarande och förvaltning, behandlas i detta sammanhang.

Det strukturerade arbetssätt som SKB tillämpar i dag vad gäller förvaltning och bevarande av dokument, data och information inom ramen för ordinarie arbete med säkerhetsredovisningar är en central och värdefull utgångspunkt för den framtida bedömningen och valet av vilken information som behöver bevaras. Förutom detta arbete anser SKB att det är betydelsefullt att ha ett arbetssätt som syftar till att hålla frågan levande, utveckla arbetet och sprida kunskapen om behovet där SKB:s roll och ansvar för frågan behöver förstås i relation till SKB:s övriga relationer till samhället. En förutsättning för att lyckas är engagemang från SKB, berörda myndigheter och kommuner såväl som samhället i övrigt.

SKB har deltagit i de internationella initiativen Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations och Assembling Alternative Futures for Heritage, vilka presenteras nedan.

Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations

SKB har deltagit i OECD/NEA:s arbetsgrupp för frågor om hur man kan bevara information och kunskap om slutförvar för radioaktivt avfall genom generationer (Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, RK&M).

En central fråga är vilken typ av data och information som bör sparas sett i de olika tidsperspektiven. SKB har konkret bidragit bland annat genom att delta i ett praktiskt försök att ta fram en gemensam struktur för en kort sammanfattande beskrivning, cirka 40 sidor – Key Information File av ett slutförvar. Strukturen testades sedan för tre olika anläggningar i Sverige (det planerade Kärnbränsleförvaret), Frankrike och USA. Underlaget för beskrivningen av Kärnbränsleförvaret utgjordes av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen.

Arbetet har genomförts i två faser där fas I avslutades 2014 med en konferens där det bland annat konstaterades att det finns ett stort intresse för frågan även utanför de delar av samhället som direkt arbetar med hanteringen av radioaktivt avfall.

Arbetet i fas II avslutades under 2018 och avrapporterades i januari 2019 vid en gemensam workshop med två andra OECD/NEA-projekt. Arbetsgruppen presenterade då förslag på principer, metoder och verktyg som kan användas för att över tid bevara dokument, information och kunskap om slutförvar med använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. Bland annat analyseras och diskuteras förutsättningarna för förvaring i traditionella arkiv och korsarkivering, internationella mekanismer, tidskapslar, markörer (på ytan och under mark), skapande av traditioner och arv samt hur och till vem ansvaret för slutförvaret och bevarandet av informationen och kunskapen kan överföras efter förslutningen.

En slutrapport förväntas publiceras under 2019.

Assembling Alternative Futures for Heritage

Assembling Alternative Futures for Heritage (AAFH) var ett tvärvetenskapligt forskningsprogram som syftade till att utveckla ett brett, internationellt och sektorsövergripande ramverk för att förstå ”arv” i sin mest expansiva mening. AAFH var ett samarbete mellan University College London, University of Exeter, University of York och Linnéuniversitetet i Kalmar. Programmet startade våren 2015 och pågick i fyra år.

Forskningsprogrammet var indelat i fyra teman:

- Förberedelse inför en osäker framtid.
- Förvaltning i gränslandet mellan natur och kultur.
- Förvaltning av överflöd.
- Bevarande av mångfalden.

SKB deltog som industripartner, framför allt i temat Förberedelse inför en osäker framtid. Arbetet har bland annat adresserat det budskap som rymdfarkosten New Horizons datorer ska förses med utifrån frågeställningen hur man gör ett budskap hållbart och begripligt.

Syftet med SKB:s deltagande var att få en direkt kontakt med personer, som på ett eller annat sätt har som profession att arbeta med bevarande av föremål och kunskap. Detta dels för att kunna ta del av deras erfarenheter och kompetens ställt i relation till frågan om hur man kan bevara information och kunskap om slutförvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall, dels för att sprida kännedom om frågan i bredare kretsar.

Program

Det är först när ett slutförvar slutligt försluts som lösningarna för informationsbevarande behöver finnas på plats. Till dess återstår det ännu många år. Förväntningarna och metoderna för informationsbevarande kommer att utvecklas och förändras under denna tid. Informationsbevarande är dessutom inte enbart en fråga för det kärntekniska området. Frågeställningarna och behoven är likartade även för andra typer av farligt avfall och förorenade områden. Behovet av informationsbevarande är inte heller avgränsat till enbart Sverige utan en gemensam internationell angelägenhet. Utifrån detta kommer SKB att under slutförvarens drifttid fortsätta delta i nationella och internationella forum och arbetsgrupper där dessa frågor diskuteras och adresseras. Syftet är att ha kännedom om det aktuella kunskapsläget, bidra till att ändamålsenliga principer, metoder och verktyg utvecklas liksom att lämpliga insatser vidtas samt löpande avrapportera till intresserade parter.

SKB avser i nuläget med bakgrund i detta att under perioden fram till nästa Fud-program delta i följande forum/arbetsgrupper:

- Projektet Minne bortom generationer.
- Information, Data and Knowledge Management.

Projektet Minne bortom generationer

Första fasen av projektet Minne bortom generationer startade 2019 med en förstudie. Målet är att bidra till att finna lösningar på utmaningen att bevara kunskap och information om farligt avfall över generationer genom att skapa ett samarbete med kulturarvssektorer. Projektet kommer, med utgångspunkt i de deltagande parternas behov och förväntningar, försöka utveckla kulturella processer och strategier som underlättar informationsbevarande över tiden.

Förutom SKB deltar Linnéuniversitetet (initiativtagare och sammanhållande koordinator), Östhammars kommun, SSM och Riksarkivet. Arbetet innebär även ett nära samarbete med Oskarshamns kommun, Kärnavfallsrådet och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG). Ambitionen är att även involvera parter från andra sektorer som hanterar farligt avfall.

Projektet har finansiering från Vinnova fram till januari 2020, då en ansökan om fortsatt medelstillsättning ska lämnas in.

Information, Data and Knowledge Management

Under 2018 avslutades tre olika arbetsgrupper/projekt inom ramen för NEA:s Radioactive Waste Management Committee (RWMC) med kopplingar till bevarandet av kunskap och information om slutförvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. SKB deltog aktivt i två av dem: Radioactive

Waste Repository Metadata Management (RepMet) och Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations. Det tredje var Expert Group on Waste Inventorying and Reporting Methodology (EGIRM).

NEA har nyligen beslutat att lansera en fortsättning på de tre arbetena under ett gemensamt paraply: Information, Data and Knowledge Management (IDKM).

SKB kommer att delta i IDKM avseende de delar som utgör en fortsättning på RK&M respektive RepMet. Syftet för SKB:s deltagande är att

- fortsätta dela erfarenheter om och utveckla idéer kring praktiskt genomförande av förberedelser för att bevara kunskap och information om slutförvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall
- ta upp frågor och utforska förslag på lösningar som inte hanns med innan RK&M avslutades.

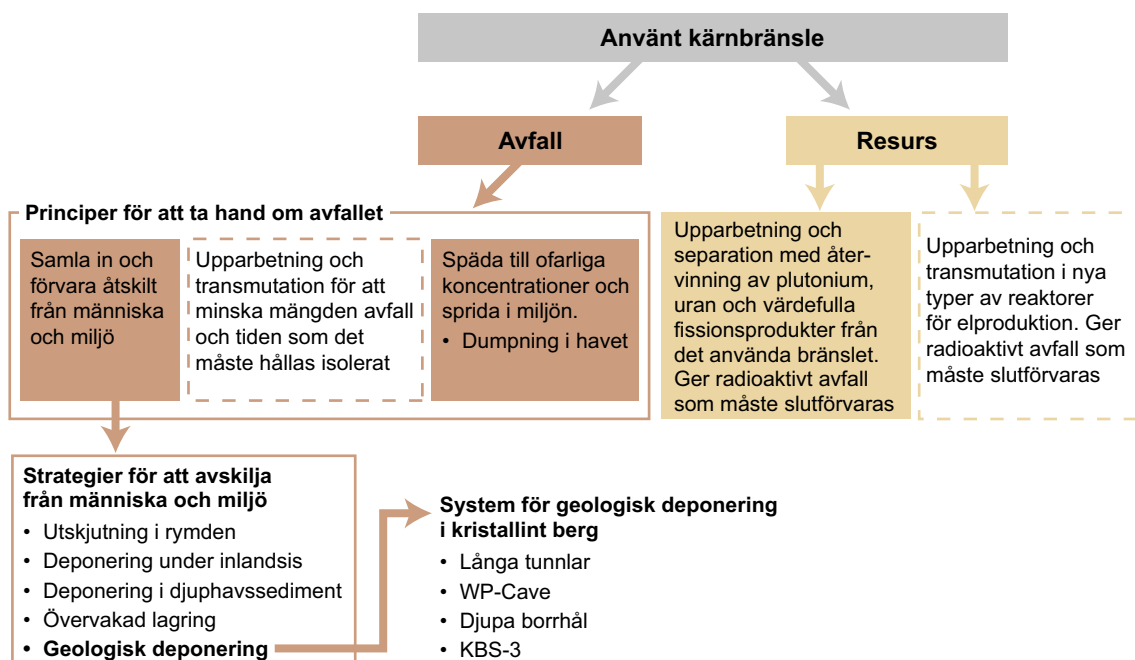
Exempel på frågor som föreslås fördjupas är etiska aspekter på IDKM, möjligheter att utnyttja internet över generationer och förutsättningar för att använda olika typer av tidskapslar.

4.12.2 Andra metoder för slutförvaring

Frågor om utvecklingen av andra metoder för slutförvaring, speciellt deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål har varit ständigt återkommande under alla år av samråd inför ansökningarna för inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret. I remissförfarandet av ansökan om KBS-3-systemet enligt miljöbalken, har frågorna fortsatt tagits upp. SKB fortsätter att bevaka utvecklingen av andra metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle men planerar inte att bedriva någon forskning eller utveckling på området under Fud-perioden.

Allmänt

Det använda kärnbränslet kan principiellt hanteras antingen som en resurs, varvid klyvbara beståndsdelar i bränslet avskiljs och återanvänds i nytt bränsle, eller som ett avfall som ska omhändertas på ett för människan och miljön säkert sätt. Figur 4-1 illustrerar de principer, strategier och system för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och/eller högaktivt avfall som huvudsakligen har beaktats i tidigare diskussioner.



Figur 4-1. Principer, strategier och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. Principerna i de streckade rutorna bygger på teknik som inte är industriellt tillgänglig i dag (SKB 2014f).

SKB:s analyser (SKB 2014f), liksom regeringens beslut om tidigare Fud-program, stödjer inriktningen att det använda bränslet i Sverige ska omhändertas som avfall. Analyserna visar att konventionell upparbetning eller separation och transmutation inte är ekonomiskt eller tekniskt intressanta alternativ för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle från dagens reaktorprogram.

SKB:s systematiska genomgång visar även att den mest realistiska strategin för slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet som avfall är geologisk deponering. Det finns ett brett internationellt samförstånd kring principerna för geologisk deponering. I flertalet länder med kärnkraft pågår en utveckling av sådana slutförvarssystem vars detaljutformning anpassas till det lokala kärnkraftsprogrammet och den tillgängliga geologin. Som visas i figur 4-1 har SKB, utöver KBS-3-metoden, utrett tre system för geologisk deponering, nämligen långa tunnlar, WP-Cave och djupa borrhål. Av dessa är deponering i djupa borrhål, DBD, det system som vissa aktörer har fört fram som intressant.

De synpunkter avseende DBD som framförts av SSM och Mark- och miljödomstolen i dessa myndigheters yttrande i januari 2018 över SKB:s ansökan om tillstånd att bygga och driva KBS-3-systemet redovisas nedan. Där redogörs även översiktligt för det arbete som genomförts av SKB och andra sedan Fud-program 2016 vad avser DBD, liksom för SKB:s planerade bevakning av insatser inom området.

Deponering i djupa borrhål

Det koncept för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål vilket har utretts av SKB innebär att inkapslat använt kärnbränsle placeras på 3–5 kilometers djup i borrhål som borrats från markytan varefter den övre delen av borrhålet försluts. Den viktigaste barriären för att isolera avfallet och förhindra att radioaktiva ämnen sprids är berget. Konceptet bygger på att grundvattnet på stora djup antas vara stagnant på grund av en stabil densitetsskiktning som beror på att grundvattnets salthalt ökar mot djupet. En mer detaljerad teknisk redovisning av systemet liksom en jämförelse av DBD och KBS-3-metoden återfinns i SKB (2014e).

Svenska myndigheters synpunkter

DBD har varit en frågeställning vid SSM:s respektive MMD:s handläggningar av SKB:s ansökningar om KBS-3-systemet. Flera parter har menat att DBD borde tas med dels i samband med bedömningen enligt kravet på användning av bästa möjliga teknik, i miljöbalkens försiktighetsprincip (MB 2 kap 3 §), dels i samband med bestämmelserna i miljöbalken om redovisning av alternativ i samband med miljöbedömningen.

SSM skriver i sitt yttrande till regeringen (januari 2018) över SKB:s tillståndsansökan att SKB har gjort tillräckliga om än begränsade insatser rörande alternativa metoder. SSM bedömer att även om DBD kan visa sig ha strålsäkerhetsmässiga fördelar i jämförelse med KBS-3-metoden finns det stora kvarstående utmaningar med konceptet och därmed stora osäkerheter om djupa borrhål i slutänden skulle uppfylla kraven på bästa möjliga teknik. Myndigheten anser att det inte är rimligt att fortsätta mellanlagring av det använda kärnbränslet under en längre tid med syftet att utveckla DBD. SSM anser vidare att MKB:n uppfyller de grundläggande kraven på en översiktlig redovisning av övervägda alternativ. När det gäller DBD gör SSM bedömningen att det inte är möjligt att i högre utsträckning komplettera redovisningen utan ytterligare omfattande undersökningar. Sådana undersökningar bedöms inte utgöra ett rimligt krav för alternativredovisningen.

MMD gör i sitt yttrande till regeringen januari 2018 över SKB:s tillståndsansökan inga specifika ställningstaganden när det gäller DBD. I sammanfattningsdokumentet nämns metoden inte alls medan man i huvuddokumentet refererar till SKB:s och motparters framställningar samt SKB:s kompletteringar och bemötanden med anledning av motparters framställningar.

Status internationellt

I enlighet med vad som sades om DBD i Fud-program 2016 har SKB fortsatt att följa utvecklingen internationellt. En sammanfattning av status i olika länder ges nedan. SKB har även bevakat bidrag till internationella konferenser och symposier där dock aktiviteten minskat väsentligt efter att det amerikanska forskningsprogrammet avbrutits, se nedan.

I Fud-program 2016 redovisades att det amerikanska energidepartementet, DOE, avsatt medel till ett program för borring av ett fem kilometer djupt demonstrationshål inklusive användning av hålet för vetenskapliga undersökningar och demonstration av deponeringsteknik. DOE annonserade i december 2016 att man hade upphandlat fyra entreprenadföretag för att de skulle undersöka förutsättningarna för anläggande av ett sådant demonstrationshål vid varsin plats för att i förlängningen välja ett av företagen som skulle få gå vidare och anlägga ett demonstrationshål. I maj 2017 meddelade departementet att man på grund av nya prioriteringar i budgeten avsåg att avbryta finansieringen av programmet för ett demonstrationshål. I och med detta beslut stoppades i praktiken hela det amerikanska forskningsprogrammet för utveckling av DBD.

Vid University of Sheffield i Storbritannien har forskning om DBD bedrivits sedan början av 2000-talet. Programmet var tidigare delfinansierat inom det amerikanska programmet. Då denna finansiering nu har bortfallit bedrivs nu DBD-forskningen ofinansierat, huvudsakligen med hjälp av examensarbeten på masternivå. Forskargruppen har sökt anslag från forskningsråd. En sådan ansökan till CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) i Australien behandlas fortfarande medan en ansökan till EPSRC (The Engineering and Physical Sciences Research Council) i Storbritannien avslagits.

I Tyskland styrs inriktningen av programmet för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och högaktivt avfall av de rekommendationer som lades fram i slutrapporten från "Kommissionen för lagring av högaktiva avfallsprodukter" som utkom i juli 2016. Kommissionen menar att eftersom det finns stora oklarheter huruvida DBD utgör en framkomlig väg får insatser inom forskning och utveckling rörande detta koncept inte medföra att ansträngningarna att hitta en plats för huvudalternativet som är ett byggt slutförvar begränsas. I dagsläget pågår ingen finansierad DBD-forskning i Tyskland.

Den franska statliga organisationen för hantering av radioaktivt avfall, Andra, har i ett ställningstagande daterat i januari 2017 förklarat att DBD som koncept på flera punkter inte överensstämmer med fransk lagstiftning.

Australien har små mängder låg- och medelaktivt avfall från två forskningsreaktorer och från isotopproduktion. Deponering i djupa borrhål är ett alternativ som diskuteras för det slutliga omhändertagandet av det medelaktiva avfallet. Dessa diskussioner är dock ännu på ett mycket tidigt stadium. Kontakter finns med forskargrupper i främst USA och Storbritannien.

I Sydkorea bedrevs 2013–2017 genom Kaeri forskning kring DBD som ett alternativ till programmetts huvudlinje, ett byggt slutförvar av KBS-3-typ. Forskningen som omfattade insamling av data, modellering och utveckling av teknik för inkapsling och hantering av kapslar finansierades inom Kaeri:s interna budget. För närvarande pågår ingen aktivitet runt DBD i Sydkorea. Kaeri avser att ansöka hos regeringen om ett nationellt forskningsprogram för DBD som man hoppas kan komma i gång 2021.

Japan har inget officiellt program för utveckling av DBD. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Jamstec) planerade tidigare att samla in geologiska och topografiska data nära ön Minamitorishima i Stilla havet cirka 185 mil sydost om Tokyo och föreslog att data skulle kunna användas i samband med utveckling av DBD. Det är i dagsläget okänt vad som hänt med förslaget.

Sonderande kontakter har förekommit mellan Sandia National Laboratories och motparter i Israel angående utveckling av ett DBD-koncept anpassat till israeliska förhållanden. I dagsläget är arten av dessa kontakter okänd.

Bedömning och fortsatt arbete

De internationella aktiviteter för utveckling av deponering i djupa borrhål som tidigare fanns i främst USA och Storbritannien har avbrutits i och med DOE:s beslut att inte fortsätta finansiera programmet för ett demonstrationsborrhål. Även om konceptet fortfarande diskuteras som en delösning i ett par länder har SKB inte identifierat någon pågående forskning och utveckling i frågan i något land.

SKB:s bedömning från tidigare Fud-program kvarstår, det vill säga att deponering i djupa borrhål inte är en realistisk metod för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. En strålsäker drift av ett borrhålsförvar kan inte garanteras eftersom uppförande, drift och förslutning inte kan genomföras

på ett i alla led kontrollerat och verifierbart sätt. Osäkerheterna om den framtida utvecklingen av ett slutförvar byggt på konceptet djupa borrhål bedöms vara större än för ett förvar byggt på KBS-3-metoden.

SKB avser trots det ovan nämnda att även fortsättningsvis bevaka utvecklingsområdena borrhållning av och deponering i djupa borrhål. Dock saknas i dag motiv för att genomföra något forskningsprogram i SKB:s egen regi. Ett exempel på utvecklingar som SKB avser följa är Swedish Deep Drilling Program för att därigenom få del av de data och andra resultat som är relevanta för deponering i djupa borrhål. SKB har vidare för avsikt att fortsätta bevaka och i relevanta sammanhang delta i internationella forum avseende deponering i djupa borrhål.

5 Arbetssätt, resurser och kompetens

För att kunna ta hand om radioaktivt avfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnadseffektivt sätt har SKB utvecklat ett systematiskt arbetssätt för att genomföra den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta i drift nya anläggningar. För anläggningar i drift gäller SSM:s föreskrifter och hur dessa tillämpas avseende arbetssätt, resurser och kompetens redovisas inte här. Kapitlet fokuserar på den iterativa processen att utveckla, implementera och utvärdera slutförvar för radioaktivt avfall vilket innefattar forskning och teknikutveckling samt utvärdering av säkerhet under drift och efter förslutning.

Här beskrivs även hur SKB prioriterar forsknings- och utvecklingsinsatser samt översiktligt hur SKB tillförsäkras sig att den kompetens, de resurser och de verktyg som behövs finns tillgängliga.

SKB:s systematiska arbetssätt för att genomföra forskning, utveckling och demonstration utvecklas successivt men grunderna ligger fast. Följaktligen följer redovisningen i detta kapitel i huvudsak motsvarande kapitel i Fud-program 2016. Uppdatering har framför allt skett av avsnitt 5.5 Resurser och kompetens. Hantering av organisation, resurser och kompetens i anslutning till utvecklingen av kärnkraftsreaktorerna hanteras i huvudsak av reaktorinnehavarna och beskrivs i kapitel 15.

5.1 Forskning

5.1.1 Mål för forskning

SKB:s forskningsprogram har som mål att säkerställa tillgången till den kunskap som behövs för att kunna utforma, lokalisera, få tillstånd för, projektera, uppföra och driva planerade anläggningar samt för att bibehålla en säker drift av SKB:s befintliga anläggningar. Det innebär att forskningsverksamheten ska

- ge tillräcklig kunskap om säkerheten efter förslutning och möjliggöra att säkerheten även i framtiden kan analyseras för SKB:s befintliga och planerade anläggningar
- ge tillräckligt underlag för den fortsatta teknikutveckling och projektering som behövs för att åstadkomma effektiva och optimerade lösningar som samtidigt ger säkerhet både under drift och efter förslutning av SKB:s slutförvar.

5.1.2 Styrning av forskning

Inriktningen av SKB:s forskningsprogram läggs fast i de Fud-program som i enlighet med kärntekniklagen inges till SSM vart tredje år. För att initiera, prioritera och stödja forskningen har SKB ett forskningsråd med representation från olika verksamheter med en stark förankring i säkerhetsanalyserna.

I samband med den årliga verksamhetsplaneringen genomför ansvariga för de olika ämnesområden som ingår i säkerhetsanalyserna en genomgång av nya, pågående och avslutade forskningsfrågor, med noggrann detaljering av planerna för de kommande åren. På så sätt sker en kontinuerlig genomgång och uppföljning av det fastställda forskningsprogrammet. Som en del i processen att uppdatera SKB:s Fud-program genomförs forskningsseminarier, där SKB:s experter inom olika ämnesområden föredrar sina förslag till planer, inklusive bedömt resursbehov, för de närmaste åren för forskningsrådet och övriga intressenter inom SKB. Forskningsrådet skaffar sig genom föredragningarna en överblick av forskningsbehoven och gör en samlad bedömning av behoven av insatser under de närmaste åren. Forskningsrådets bedömning ligger sedan till grund för verksamhetsplaneringen och utgör ett viktigt underlag i arbetet med kommande Fud-program.

5.1.3 Forskningens framtida inriktning

Syftet med förvaren är att långsiktigt skydda människa och miljön från radiologiska skadeverkningar av avfallet, och säkerheten efter förslutning är därför central för utformning, lokalisering, uppförande och drift av förvaren. Formellt avgörs om ett förvar har en acceptabel grad av säkerhet

genom att regering och myndigheter bedömer SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning. Allt SKB:s arbete inom detta område har dock sin grund i att SKB självt måste skaffa sig en övertygelse om att föreslagna förvarskoncept är säkra på lång sikt. SKB:s forskningsprogram drivs därför i hög grad utifrån behovet av att analysera förvarens säkerhet efter förslutning. En viktig del i varje analys av säkerheten efter förslutning är utvärderingen av kunskapsunderlaget, både när det gäller processer och ingående data i analysen. Sådana utvärderingar har ingått i de senaste säkerhetsanalyserna SR-Site för Kärnbränsleförvaret, SR-PSU för det utbyggda SFR samt den nyligen slutförda säkerhetsvärderingen av SFL. Resultaten av dessa utvärderingar samt granskningen av SKB:s tillståndsansökningar ligger väsentligen till grund för forskningsinsatserna som planeras i detta Fud-program. Säkerhetsanalyserna är således fundamentala för forskningsprogrammet.

Den stegvisa beslutsprocessen för kärntekniska anläggningar bygger på successiva uppdateringar och beslut om godkännande av säkerhetsredovisningen under uppförande och drift av respektive anläggning (avsnitt 3.1). Varje beslutssteg kring ett slutförvar kräver sin analys av säkerheten efter förslutning och inför varje beslut förväntas SSM bland annat bedöma om kunskapsunderlaget kring säkerheten efter förslutning är tillräcklig för att SSM ska medge att SKB får gå vidare till nästa steg. Inför ett regeringsbeslut om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt kärntekniklagen, det vill säga det första formella beslutet kring ett slutförvar, ställer SSM höga krav på kunskapsnivån för de centrala delarna av underlaget. SSM har granskat säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret (SR-Site) och för det utbyggda SFR (SR-PSU) och tillstyrkt uppförandet av dessa anläggningar. En central milstolpe avseende kunskapsnivån kan därmed anses ha passerats. Även när SKB fått tillstånd att uppföra nya anläggningar försvinner inte behovet av att kunna göra analyser av slutförvarens säkerhet både under drift och efter förslutning, med allt vad det innebär av krav på kunskap om hur både de tekniska barriärerna och de naturliga processerna i berg och på markytan samverkar och utvecklas med tiden. Enligt gällande regelverk ska säkerhetsredovisningen (SAR) ständigt hållas aktuell och därutöver ska en återkommande helhetsbedömning av respektive anläggnings säkerhet och strålskydd göras minst vart tionde år enligt krav i kärntekniklagen.

De framtida forskningsinsatser som nu behövs rör i första hand SKB:s befintliga och planerade slutförvar för radioaktivt avfall och använt kärnbränsle (SFR, SFL och Kärnbränsleförvaret). Den vetenskapliga förståelsen av frågor som rör Clink, Kärnbränsleförvaret och SFR är i huvudsak väl utvecklad genom decenniernas forskning inom det svenska programmet, och också inom andra länders nationella program och internationella samarbetsprojekt. Upprätthållen kunskap, ny kunskap och ny forskning behövs dock för att tillgodose de kommande behoven. I och med att uppförandet av de nya anläggningarna påbörjas flyttas fokus i arbetet från forskning och principlösningar till teknikutveckling av kvalitetsstyrda industrialiserade system. Forskningsinsatser och säkerhetsvärderingar kommer att behövas som stöd till teknikutvecklingen och då särskilt för framtagandet av praktiskt användbara konstruktionsförutsättningar (krav) på slutförvaren samt för att kunna verifiera att framtagna tekniska lösningar uppfyller dessa krav.

Även om det i dag finns en omfattande kunskap inom alla de områden som är av betydelse för säkerheten efter förslutning så kan man förvänta sig att nya frågor tillkommer. Ursprunget till frågor som kan komma att kräva forskningsinsatser är av flera slag:

- Frågor genereras/identifieras internt hos SKB vid utveckling av förvarskoncept och i samband med genomförande av analyser av säkerheten under drift och efter förslutning. Även platsundersökningar kan generera frågor och i takt med att en plats undersöks alltmer i detalj kan nya frågor tillkomma. Nya eller förändrade avfallstyper kan också leda till nya frågor.
- Frågor väcks i omvärlden, till exempel inom det vetenskapliga samfundet och i SKB:s systerorganisationer i andra länder.
- Frågor väcks av SSM och remissinstanser i granskningar av Fud-program och i tillståndsprövningar.
- Förändringar i omvärldskrav kan innebära att nya frågor behöver hanteras.

Nya frågor analyseras och diskuteras i forskningsrådet innan beslut tas om inriktning och omfattning av eventuella forskningsinsatser.

I SKB:s uppgift ingår även kunskapsbevakning av närliggande områden som kan ha betydelse för det svenska kärnavfallsprogrammet i framtiden. Det kan till exempel röra utvecklingen av metoder för behandling och slutförvaring av radioaktivt avfall, upparbetning av använt kärnbränsle, uppkomst av nya avfallstyper och nya typer av reaktorer. Detta sker i huvudsak genom upprätthållande av internationella kontakter och genom att följa branschtidskrifter.

5.1.4 Granskning, öppenhet och insyn

SKB:s forskningsarbete bedrivs utifrån kravet att forskningsresultaten ska vara korrekta, spårbara, reproducerbara och relevanta för SKB:s uppdrag. För att uppnå detta har SKB utvecklat och tillämpar rutiner för kvalitetssäkring av genomförande av forskningsprojekt och uppdrag. Det finns även särskilda rutiner för kvalitetssäkring av säkerhetsanalyser och dessa rutiner innefattar godkännande av forskningsresultat, data och modeller för användning i analysen, se även avsnitt 5.4.

Grundprincipen är att SKB:s forskningsresultat ska publiceras i öppen litteratur för att extern granskning ska underlättas. Forskningsresultat har sedan forskningsprogrammet inleddes på 1970-talet publicerats, och kommer även fortsättningsvis att publiceras i SKB:s rapportserier som är tillgängliga på SKB:s webbplats. Innan de publiceras har rapporterna genomgått intern och/eller extern granskning i enlighet med fastställda rutiner. Kvalitetssäkrade data från SKB:s platsundersökningar, teknikutveckling och forskning sparas i databaser och är tillgängliga för myndigheterna i deras granskning.

SKB strävar även efter att publicera relevanta resultat i vetenskapliga tidskrifter och uppmuntrar egen personal, forskningsinstitutioner och konsulter som SKB samarbetar med till publicering. En oberoende granskning sker då av resultaten genom den ”peer review” som sker innan publicering. SKB:s forskningsresultat presenteras och diskuteras även på vetenskapliga konferenser och redovisas i konferensdokumentationen (proceedings).

SKB arbetar även för att sprida forskningsresultat utanför vetenskapsvärlden. Till exempel genom publicering i populärvetenskapliga tidskrifter, publicering på SKB:s webbplats och i SKB:s tidning Lagerbladet, temakvällar (framför allt i Östhammar) samt information på skolor och universitet.

5.2 Teknikutveckling

5.2.1 Mål för teknikutveckling

Målet med teknikutvecklingen är att se till att de processer, system och utrustningar som behövs för att omhänderta det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet finns tillgängliga när anläggningarna ska tas i drift. Hantering och slutförvaring av kärnavfallet ska kunna ske på ett styrt, kontrollerat och rationellt sätt samtidigt som krav på säkerhet efter förslutning, låg stråldos vid drift av anläggningarna samt begränsad påverkan på yttre miljö uppfylls. Utvecklingen sker i steg med hänsyn tagen till att utvecklingen av olika delsystem kan kräva olika lång tid.

5.2.2 Styrning av teknikutveckling

Teknikutveckling beställs från de funktioner inom SKB som ansvarar för att uppföra de nya anläggningarna. Styrningen av teknikutveckling utgår från vad som behöver vara klart vid de milstolpar som identifierats för de olika anläggningsprojekten som redovisas i kapitel 3. En löpande planering görs för att tydliggöra och motivera vilken teknikutveckling som behövs fram till driftsatt anläggning (färdig teknikutveckling), när den behöver vara klar och vilka resurser som krävs. Planerna utgår från vilken teknik som behöver finnas framme, implementerad och driftsatt när anläggningarnas provdrift inleds. Därefter görs en värdering hur långt denna teknik behöver vara utvecklad inför de tidigare milstolparna inom respektive anläggningsprojekt. En mer detaljerad planering görs för de närmaste åren, där mål och behov omsätts i beskrivning av konkreta teknikutvecklingsprojekt.

Teknikutvecklingsprojekten har i huvudsak organiserats i ett antal så kallade produktionslinjer kopplade till egenskaper hos använt kärnbränsle och låg- och medelaktivt avfall samt avfallssystemets barriärer och andra komponenter såsom kapsel, buffert, cementbaserade material, återfyllning,

förslutning och berg. Denna indelning återspeglas i strukturen på kapitel 4. Teknikutvecklingen avser system, det vill säga både fysiska produkter som maskiner, barriärer, mätinstrument och processer som beskriver hur produkterna används för att åstadkomma en viss funktion samt hur systemet samverkar med omgivningen inklusive människor, teknik och organisation (MTO).

Vid framtagning av Fud-programmet görs en genomgång av aktuell status på teknikutvecklingen vilken stäms av mot och jämkas med de övergripande tidsplanerna för utveckling av systemet för omhändertagande av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet som beskrivits i kapitel 3. Efter beredning inarbetas planerna för teknikutveckling i Fud-programmet och verksamhetsplaner vilka läggs fram för företagsledningen och SKB:s styrelse för beslut. Planerna stäms sedan av årligen mellan anläggningsprojekten, beställarna för teknikutveckling och de funktioner inom SKB som genomför själva utvecklingsarbetet.

5.2.3 Teknikutvecklingsprocess

Som redovisats i tidigare Fud-program, har SKB utvecklat en process för styrning av teknikutvecklingen fram till systemen tas i drift. Grunden är att teknikutvecklingen indelas i ett antal faser. Dessa är:

- Konceptfas.
- Konstruktionsfas.
- Införande- och överlämningsfas.

För varje utvecklingsfas finns en specifikation för vad som ska ha uppnåtts och således vad som ska föreligga som underlag för beslut om att gå vidare med nästa fas i utvecklingen.

Modellen omfattar på en övergripande nivå vad som ska göras i respektive fas och vad som ska levereras. Den visar också på en övergripande nivå hur arbetet ska utföras. För genomförande av verksamhet i de olika faserna i teknikutvecklingen tillämpas normalt SKB:s projektstyrmodell. Avgränsningen av projekten beslutas från fall till fall. Normalt löper inte ett projekt över flera faser utan ett projekt avgränsas till att hålla sig inom en viss teknikutvecklingsfas. För att hålla samman utvecklingsverksamheten, för till exempel en anläggning, kan projekten styras och samordnas av ett program som normalt sträcker sig över flera faser. Teknikutvecklingen är inte en fristående process. Teknikstyrande beslut beaktar de planerade anläggningarnas begränsningar för att åstadkomma väl fungerande produktionssystem.

Syftet med konceptfasen är att specificera kraven på systemet, delsystemet eller komponenten, utvärdera flera tänkbara lösningar och föreslå en teknisk lösning (eller flera) att gå vidare med i nästa fas.

Syftet med konstruktionsfasen som består av två delar, systemkonstruktionsfas och detaljkonstruktionsfas, är att ta fram en konstruktion av delsystemet eller komponenten, att verifiera att den uppfyller kraven samt att ta fram förslag avseende produktion, drift, kontroll och underhåll av delsystemet/komponenten.

Konstruktionsfasen kan vara iterativ då det kan visa sig att föreslagen lösning inte uppfyller kraven eller inte kan produceras eller kontrolleras på ett kostnadseffektivt sätt. Allteftersom utvecklingsarbetet fortskrider sker en detaljering men mer omfattande förändringar av den tekniska lösningen kan också bli aktuella.

Systemkonstruktion omfattar definiering av delsystemet och dess utformning, förutsättningar samt krav från och krav på hela systemet. Detta kan i sina huvuddrag anses motsvara det som inom projekteringen benämns systemprojektering och resulterar i en systemhandling.

Resultatet av systemkonstruktionen är i regel inte tillräckligt detaljerat för att direkt kunna implementeras. Därför behövs i regel ytterligare, mer detaljerat konstruktionsarbete. Detaljkonstruktion omfattar allt det underlag som behövs, till exempel processbeskrivningar, krav på organisation, bygg- och tillverkningsritningar eller annat underlag som tydligt definierar de i systemet ingående produkterna, fastlagda bygg-, tillverknings- och kontrollmetoder, driftsäkerhetsprogram med mera för att kunna överlämna och implementera det konstruerade systemet.

Införande- och överlämningsfasen innebär införande av produkter, processer och metoder i anläggningens verksamhet. Fasens omfattning och hur arbetet ska gå till är olika beroende på systemet, produkten eller metoden som ska införas. Fasen innefattar minst planering, utbildning/kompetensöverföring, upphandling/inköp, kvalitetsstyrande åtgärder såsom kvalificeringar av procedurer, utrustning, leverantörer och personal som behövs för drift av systemet samt överlämning av all dokumentation.

5.2.4 Konstruktionsförutsättningar

Konstruktionsförutsättningarna bygger på internationellt accepterade och överenskomna strålskydds-mål och säkerhetsprinciper som omsatts i nationella lagar och föreskrifter. Utifrån dessa övergripande mål definieras säkerhetsfunktioner för skedet efter förslutning för respektive slutförvar. För en teknisk utformning som kan uppehålla dessa säkerhetsfunktioner specificeras ett antal konstruktionsförutsättningar. Konstruktionsförutsättningar avser krav som avfallssystemets anläggningar med sina barriärer behöver uppfylla för att säkerställa säkerhet både under drift och efter förslutning. Dessa anger till exempel vilka mekaniska laster barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning och egenskaper, acceptabla avvikelser av barriärernas dimensioner samt acceptanskriterier för de olika utrymmena under mark.

En uppsättning av konstruktionsförutsättningar och andra krav angavs i ansökningarna för uppförande av Kärnbränsleförvaret, inkapslingsdelen av Clink och utbyggnaden av SFR. Konstruktionsförutsättningar avseende säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret redovisas i SKB (2009a) och för SFR-utbyggnaden i SKB (2014b). Konstruktionsförutsättningar och kopplingar (relationer) mellan olika krav, samt tekniska specifikationer har samlats och strukturerats i en databas.

Konstruktionsförutsättningar, teknisk lösning samt analys av säkerhet under drift och efter förslutning tas fram successivt. Det är en iterativ process där preliminära kvantitativa krav på konstruktionen först specificeras. En teknisk lösning tas fram och utvärderas med säkerhetsanalytisk metodik med avseende på om den uppfyller krav på säkerhet efter förslutning. Parallellt utvärderas möjliga produktions- och kontrollprocesser och de krav som behöver ställas på dem. Sammantaget leder det till en uppdatering av konstruktionsförutsättningarna och den tekniska lösningen som kan tas vidare till nästa fas i teknikutvecklingen. En teknisk lösning kan till exempel vara utformning av en barriär eller en metod för att bygga tunnlar utan att orsaka en skadad zon som påverkat bergets barriärfunktion.

Ytterligare detaljering eller förändrad avvägning av krav mellan olika system kan även behöva göras under detaljkonstruktion eller inför implementering. De grundläggande principerna för avvägning av konstruktionsförutsättningar som berör flera barriärer är:

- Sammantagna ska konstruktionsförutsättningarna leda till överensstämmelse med krav som avser säkerhet under drift och efter förslutning av slutförvaret.
- Konstruktionsförutsättningar måste vara praktiskt uppnåeliga och verifierbara för samtliga berörda barriärer.
- Konstruktionsförutsättningar som innebär enkla, robusta och effektiva lösningar är att föredra.

Samlade utvärderingar av förvar avseende krav och kravuppfyllelse görs i samband med de analyser av säkerheten under drift och efter förslutning som ska ligga till grund för varje beslut i den stegvisa prövningsprocessen enligt kärntekniklagen.

Avseende Kärnbränsleförvarets barriärer har SKB och Posiva i samarbete tagit fram reviderade och mellan organisationerna harmoniserade konstruktionsförutsättningar (Posiva SKB 2017). Dessa baseras på hittills genomfört teknikutvecklingsarbete samt slutsatserna från analyserna av säkerheten efter förslutning för Kärnbränsleförvaret (SR-Site) och det finska förvaret (TURVA-2012) vilken utgjorde en del av Posivas ansökan 2012. Konstruktionsförutsättningarna är formulerade som tekniska designkrav på förvarets olika delar och barriärer och måste därmed vara praktisk uppnåeliga och verifierbara så att kravuppfyllelsen kan kontrolleras vid tillverkning och installation av förvarets komponenter. Kraven utgår ifrån vilka egenskaper förvarets olika tillverkade delar bör ha för att bidra till förvarets olika säkerhetsfunktioner både på kort och lång sikt och är satta så att, om de uppfylls, genomförda säkerhetsanalyser ska kunna visa att förvaret blir säkert efter förslutning.

De harmoniserade konstruktionsförutsättningarna utgör grunden för kommande PSAR även om de kan behöva revideras något som ett resultat av SSM:s prövning av tillståndsansökan. Ytterligare revision av konstruktionsförutsättningarna kan dessutom förväntas i samband med detaljkonstruktion och i och med att säkerhetsredovisningarna förnyas inför provdrift.

5.2.5 Kvalitetssäkring, styrning och kontroll

Ett viktigt mål för teknikutvecklingen är att det ska gå att verifiera att de tekniska lösningar som tas fram uppfyller de krav som ställs. Med kvalitetssäkring, styrning och kontroll avses de åtgärder som behöver utföras för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på anläggningarna under drift och efter förslutning av slutförvaren uppfylls. Målet är att erhållna resultat ska uppfylla de acceptabla värdena för egenskaper som bidrar till säkerhet och strålskydd.

Den tekniska lösning som fastställs vid utvecklingsarbetet ska kunna produceras så att den färdiga produkten överensstämmer med den fastställda utformningen. Innan produktionen kan inledas ska de tillverkningsprocesser och provningsmetoder som SKB avser tillämpa visas vara stabila.

Mät- och produktionssystemens förmåga att åstadkomma och kvalitetssäkra produkter som överensstämmer med fastställd utformning demonstreras i kvalificeringar.

SKB arbetar vidare med att fastställa principer för kvalificeringsprocessen som kommer att presenteras i PSAR. Kvalificeringen av varje mät- och produktionssystem anpassas till den tillverkade eller provade delens betydelse för säkerheten efter förslutning, tillgänglig beprövad teknik, tillgängliga standarder och normer samt de förhållanden som kommer att råda, såväl fysiska som organisatoriska, vid genomförandet i den planerade produktionen. Det innebär att varje kvalificering är unik, där några i princip enbart pekar på de standarder och normer som ska tillämpas medan andra kräver omfattande analyser och genomförande av demonstrationer.

Det kommer även att genomföras provning och kontroller vid uppförandet av anläggningarna för att bekräfta att uppförandet fungerar som det ska och säkerställa att inga fel eller avvikelser kvarstår som har betydelse för säkerheten efter förslutning. Kontroller inordnas i kontrollprogram vars utformning och innehåll beror av vilken typ av krav som ska verifieras, till exempel kontrollprogram för yttre miljö, program för undersökningar av berg, program för bergteknisk kontroll och program för kontroll av arbetsmiljö.

5.3 SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

5.3.1 Äspölaboratoriet

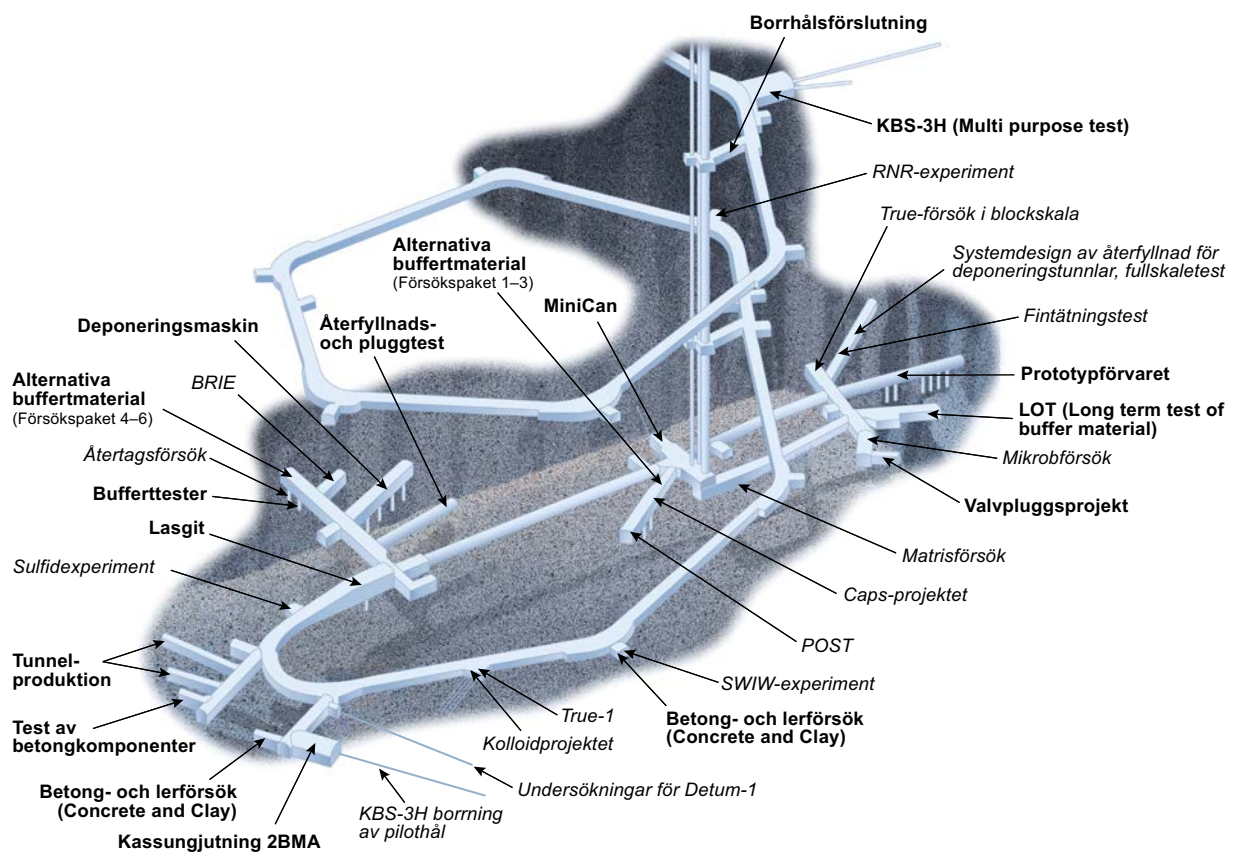
Äspölaboratoriet anlades under perioden 1990–1995 och verksamheten är en vidareutveckling av det arbete som tidigare bedrevs i Stripa gruva i Bergslagen. Laboratoriet är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk (figur 5-1). Det underjordiska laboratoriet består av en tunnel från Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö. På Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. De olika experimenten och demonstrationsförsöken äger rum i nischer och korta tunnlar som grenar ut från huvudtunneln. En illustration över laboratoriet visas i figur 5-2 och aktuella experiment redovisas i Äspölaboratoriets årsrapport (SKB 2019f).

Äspölaboratoriet har haft en central betydelse avseende utveckling, test och verifiering av teknik och metoder för de platsundersökningar som genomförts i Laxemar och Forsmark samt för genomförande av undersökningar under pågående byggnation. Dessa erfarenheter kommer att vara till nytta för de kommande detaljundersökningarna för Kärnbränsleförvaret, utbyggnaden av SFR i Forsmark samt lokalisering, utformning och uppförande av SFL.

Bergets egenskaper och de hydrokemiska processer som sker i berget studerades grundligt under byggandet av anläggningen och det första decenniet laboratoriet var i drift. Resultat och kunskap från dessa insatser har legat till grund för att definiera bergets (säkerhetsmässiga) funktion relativt de övriga barriärerna.



Figur 5-1. Åspölaboratoriet är beläget på ön Åspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk.



Figur 5-2. Åspölaboratoriet med pågående (*fet stil*) och avslutade (*kursiv stil*) experiment.

Efter driftstarten 1995 påbörjades successivt experiment för att undersöka hur barriärerna och de övriga delarna i Kärnbränsleförvaret (kapseln, bufferten, återfyllning och förslutning) kan utformas och hanteras för att ge en optimal funktion. Inte minst viktigt är att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva Kärnbränsleförvaret. Tester har genomförts av i stort sett alla KBS-3-metodens delsexperiment i realistisk miljö, flera av dem i full skala. Resultaten från flera av dessa experiment utgjorde

viktigt underlag till SKB:s ansökan om KBS-3-systemet. I det fortsatta arbetet med utveckling av KBS-3-systemet kommer Äspölaboratoriet att spela en viktig roll, bland annat genom de pågående långtidstester som kommer att avslutas de kommande åren samt de fullskaletester som planeras att genomföras där.

Inför kommande uppförande av SFR och SFL har experiment kopplade till utveckling av konstruktionsbetong och andra cementbaserade material samt teknik för uppförande av barriärkonstruktioner i SFR och SFL genomförts. Fokus har här främst legat på utvecklingsarbeten kopplade till betongkassunerna i det framtida 2BMA där en kassun i fjärdedelsskala nu uppförts som ett avslutande produktionsstest. De inledande arbetena genomfördes på olika externa betonglaboratorier medan de avslutande storskaliga provgjutningarna genomfördes i Äspölaboratoriet. Utöver detta genomförs forskningsprojekt inför framtida analyser av säkerheten efter förslutning för SFR och SFL fokuserade på studier av interaktioner mellan olika typer av barriärmaterial relevanta för dessa förvar samt för olika typer av material som är representativa för låg- och medelaktivt avfall.

I dag och de kommande åren fokuseras insatserna vid Äspölaboratoriet på de tekniska barriärerna. Fokus kommer att ligga på teknikutveckling och test av utrustning och system för användning i Kärnbränsleförvaret samt för SFR och SFL. SKB:s långsiktiga behov av Äspölaboratoriets underjordsdel utreds för tillfället och beslut om omfattning och tidsplan för fortsatt verksamhet kommer att fattas 2020.

I Äspölaboratoriets roll som centrum för forskning och utveckling av teknik för slutförvaring ingår även att vara värd för ytterligare några av SKB:s laboratorier och försöksanläggningar.

Vattenkemilaboratoriet

Vattenkemilaboratoriet på Äspö är ackrediterat för att analysera de kemiska komponenter i grundvatten som är av särskild betydelse för slutförvarens funktion efter förslutning. Under platsundersökningskedet ansvarade laboratoriet för hanteringen av samtliga analyser och resultatsammanställningar för platsundersökningsprojekten i både Forsmark och Laxemar. Laboratoriets samlade kompetens nyttjas för planering och uppbyggnad av motsvarande laboratorium i Forsmark.

Materialforskningslaboratoriet

SKB driver också en laboratorieverksamhet som fokuserar på forskning om lermaterialens fysikaliska och kemiska egenskaper, främst när det gäller frågor som har betydelse för pågående och framtida säkerhetsanalyser. I laboratoriet utvecklas också standardiserade test- och undersökningsmetoder som ska användas vid kontroll av bentonitleveranser till slutförvaret under driftskedet. Forskningslaboratoriet omfattar aktuell infrastruktur (resurser, metodik, instrumentpark och dokumentation) samt de lokaler som används för verksamheten. Laboratoriet är i dag inrymt i samma byggnad som vattenkemilaboratoriet på Äspö, men verksamheten kan i framtiden omlokaliseras utifrån SKB:s behov.

Testhallen

Sedan 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i det som nu benämns Testhallen och som ligger ovan mark i direkt anslutning till Äspölaboratoriet. Försöken som görs i Testhallen kompletterar de försök som görs under jord samt i de andra laboratorierna på Äspö.

En av barriärerna i samtliga slutförvar är bentonit. I Kärnbränsleförvaret omges kopparkapseln av högkompakterad bentonit. Bentonit omger även silon i SFR och planeras som barriär i SFL. Bentonit kommer även att användas för återfyllning av tunnlarna i förvaren. I Testhallen genomför SKB undersökningar av bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. Där utvecklas även metoder för att fylla igen förvarets tunnlarna med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnlarna.

De undersökningar som genomförs i Testhallen är ofta förberedande tester i olika skalor och omfattning inför tester i full skala på förvarsdjup i Äspölaboratoriet. I Testhallen finns också utrustning och utrymme för mottagning av bentonitleveranser och blandning av bentonit till önskad vattenhalt.

5.3.2 Kapsellaboratoriet

Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. På Kapsellaboratoriet testas och utvecklas bland annat tekniken för att svetsa botten och försluta locket på kapseln. Även de metoder som SKB kommer att använda för att kontrollera kapselns delar och svetsar utvecklas och demonstreras här. De flesta försöken görs i full skala. Utvecklingen av de metoder som ska användas vid tillverkning av kapselns delar leds från laboratoriet. Undersökning och utvärdering sker till stor del på Kapsellaboratoriet medan tillverkningsförsöken görs hos externa leverantörer. Målet är att utveckla metoder för tillverkning och kontroll som uppfyller fastställda kvalitetskrav och som har tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i den framtida kapselproduktionen och i Clink. Viktiga utrustningar som finns i laboratoriet är ett system för friktionssvetsning med roterande verktyg, utrustningar för oförstörande provning samt hanteringssystem för fullstora kapslar. Utrustningen för friktionssvetsning har byggts om så att svetsning kan ske i ”syrefri” miljö och ett nytt röntgensystem har installerats för provning av friktionssvetsen. Figur 5-3 visar utrustningen för friktionssvetsning.

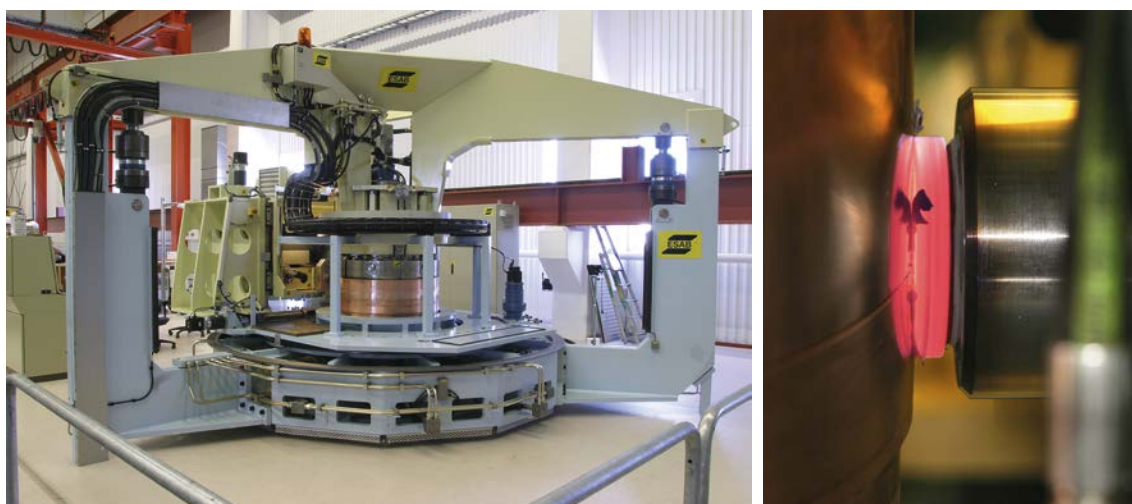
5.4 Arbetsverktyg

Genomförande av det forsknings-, utvecklings- och projekteringsarbete som behövs för att utveckla kärnkraftverken och slutförvara kärnavfallet kräver tillgång till en uppsättning arbetsverktyg. SKB och reaktorinnehavarna har som en del av Fud-programmet utvecklat eller införskaffat en uppsättning sådana verktyg. I detta avsnitt ges en kort överblick av väsentliga verktyg och de insatser som görs för att underhålla och vidareutveckla dessa.

5.4.1 Databaser

Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle innebär hantering av stora mängder data som lämpligen samlas och struktureras i databaser. SKB och reaktorinnehavarna har databaser som innehåller information, SKB använder Dark och PlutoWeb för använt kärnbränsle och långlivat avfall som mellanlagras i Clab samt Gadd för allt låg- och medelaktivt avfall som deponerats i SFR. Databasen Gadd har utvecklats i etapper och inkluderar numera kärnavfall från de kärntekniska anläggningarna som levererar avfall till SFR.

Inom forskning och för att genomföra säkerhetsanalyser används ett flertal databaser med vetenskapliga grunddata huvudsakligen hämtade från publika källor med till exempel radionukliddata och termodynamiska data.



Figur 5-3. Friktionssvetsning av kopparlock. Bilden till vänster visar Kapsellaboratoriets utrustning för utveckling och bilden till höger visar det roterande verktyg som pressas in i fogen mellan de delar som sammanfogas.

Resultaten av SKB:s forsknings- och utvecklingsarbete, underlag till arbeten med lokalisering av förvar och underlag till platsbeskrivningar, projektering och säkerhetsanalyser hanteras i ett antal olika databaser, till exempel Sicada för undersökningsdata från bland annat platsundersökningar och från analyser genomförda vid SKB:s olika laboratorier och en GIS-databas för geografisk informationshantering och modellering.

SKB tillämpar en systematisk hantering av kraven på slutförvaren för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. Detta omfattar krav som ska uppfyllas vid projektering, uppförande, drift och avveckling av anläggningarna. Krav på olika detaljeringsnivå, från strålsäkerhetsprinciper och anläggningsövergripande funktioner till utformning av enskilda komponenter liksom sambanden mellan dem, dokumenteras och följs upp i databasen Doors NG.

Det finns även databaser av mer administrativ karaktär såsom Bibas som är SKB:s biblioteks-databas och SKBdoc som är dokumenthanteringssystemet.

Databaserna uppdateras löpande med uppgifter om tillkommande mängder radioaktivt avfall och använt kärnbränsle, nya data från forskning och undersökningar samt nya publikationer och dokument. Det sker också ett löpande underhåll av dessa system och programvaran utvecklas i takt med utvecklingen av dator- och operativsystem.

5.4.2 Modell- och beräkningsverktyg

Modeller och beräkningar är en central del av arbetet med konstruktion, utvärdering och analyser av säkerhet under drift och efter förslutning. För att kunna genomföra alla de analyser och beräkningar som erfordras för att hantera det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet har SKB tillgång till ett antal modell- och beräkningsverktyg. Det finns såväl egenutvecklade modell- och beräkningsverktyg som kommersiella verktyg som köpts in och vid behov anpassats för SKB:s tillämpning.

Vid genomförande av analyserna av säkerheten efter förslutning för Kärnbränsleförvaret (SR-Site) och för det utbyggda SFR (SR-PSU) användes ett stort antal modell- och beräkningsverktyg (SKB 2010c, 2014c). Beräkningsverktygen som använts omfattar både kommersiella dataprogram med hundratusentals användare och program speciellt utvecklade för säkerhetsanalyser med uppskattningsvis bara några tiotal aktiva användare och utvecklare. För att programvaror ska få användas som en del i säkerhetsanalyserna har SKB kvalitetskrav som beräkningsverktygen ska uppfylla. Enligt dessa krav (kapitel 2 i SKB 2010c) ska det för att resultat ska få användas i säkerhetsanalyser finnas dokumentation som styrker att:

- Programvaran är lämplig för sin uppgift i säkerhetsanalysen.
- Programvaran har utvecklats på ett ändamålsenligt sätt och beräkningarna ger korrekta resultat.
- Programvaran har använts på ett korrekt sätt och det ska finnas en beskrivning över hur data överförs mellan olika beräkningsuppgifter.

De data som används i beräkningarna kommer huvudsakligen från SKB:s eller kommersiellt tillgängliga databaser (se föregående avsnitt).

Modell- och beräkningsverktygen underhålls och uppgraderas löpande i takt med den allmänna utvecklingen av dator- och operativsystem. SKB bedriver även ett utvecklingsarbete för att göra vissa av de kommersiella verktygen mer optimerade för säkerhetsanalysernas behov och det sker också en kontinuerlig utveckling av egna beräkningsverktyg (till exempel DarcyTools). SKB strävar efter att ha egen kompetens när det gäller samtliga programvaror som används i säkerhetsanalyser och att i så hög utsträckning som möjligt använda parallella uppsättningar av programvaror och modelleringsteam för att därigenom skapa oberoende verifieringar av resultat.

Utveckling av en modelldatabas pågår för att säkerställa en systematisk och spårbar användning av versionshanterade modeller, både när det gäller platsmodeller och modeller som används i säkerhetsanalyserna.

5.4.3 Platsundersökningar och platsmodeller

För att samla in de data som behövs för att anlägga och värdera säkerheten hos ett slutförvar har SKB i många fall tillsammans med systerorganisationer och samarbetspartner utvecklat speciella

undersökningsmetoder och instrument. SKB förvaltar således en uppsättning mätinstrument för genomförande av platsundersökningar och vidareutvecklar sådana metoder och instrument i mån av behov. Dessa instrument förvaras i Instrumentförrådet som ligger i anslutning till Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Från förrådet har ett kilometerdjupt borrhål borrats som används för test och kalibrering av borrhålsinstrument.

En platsbeskrivande modell är en integrerad beskrivning av flera vetenskapsområden. Modellerna utgör en sammanställning av mätdata, konceptuella modeller, strukturella geologiska modeller, yteko-logiska modeller samt kvantifierade beskrivningar av platsens hydrogeologiska och hydrogeokemiska utveckling fram till i dag. En platsbeskrivande modell är en av grundstenarna för förvarsutformning, miljökonsekvensanalyser och för analysen av säkerheten efter förslutning för ett förvar. SKB har tagit fram platsbeskrivande modeller för Forsmark (SKB 2008, 2013c) och Laxemar (SKB 2009b).

Genom att Forsmark valts som plats för slutförvaren både för använt bränsle och för kortlivat låg- och medelaktivt radioaktivt avfall anses det i dag enbart motiverat att underhålla modellerna för Forsmark. Uppdatering av modellen för Laxemar kan bli aktuellt som en del i arbetet med lokalisering av SFL, se kapitel 6. I Forsmark pågår, sedan platsundersökningarna avslutades, ett övervakningsprogram där data samlas in om grundvattentryck, grundvattnets sammansättning, seismiska händelser, nederbörd, temperatur, utveckling av ekosystem med mera. Det innebär att nya data successivt tillförs som kan användas för att uppdatera de platsbeskrivande modellerna för Forsmark. Modellerna ligger bland annat till grund för projektering och kommer att uppdateras i samband med den successiva utbyggnaden av förvaren. Större uppdateringar kommer att göras om det finns väsentlig ny information inför förnyade säkerhetsredovisningar i enlighet med tidsplanen som redovisas i kapitel 3.

5.4.4 Kvalitetssäkring

För att se till att resultat från forskning och teknikutveckling är korrekta och håller hög kvalitet har SKB rutiner för kvalitetssäkring av resultaten. I SKB:s ledningsrutiner ingår bland annat rutiner för upphandling, godkännande av leverantörer har rätt kompetens och kan leva upp till SKB:s krav, godkännande av innehåll i databaser, godkännande av modell- och beräkningsverktyg samt godkännande av indata till modeller och beräkningsresultat.

Resultat från SKB:s forskning och utveckling redovisas i allmänhet i SKB:s rapportserier eller i vetenskapliga publikationer. De rapporter och övriga dokument av betydelse för säkerheten som SKB tar fram genomgår en dokumenterad granskningsprocess. Granskning sker för att säkerställa att dokumenten uppfyller ställda krav vad gäller omfattning och innehåll samt att den information som lämnats är sakligt korrekt och baserad på godkända källor och beräkningsverktyg.

5.5 Resurser och kompetens

5.5.1 Behov av kompetens och resurser

SKB har en bred och mångfacetterad verksamhet vilket medför att SKB behöver kompetens inom många olika områden. En stor del av den kunskap och teknik som SKB behöver finns allmänt tillgänglig. Andra delar är specifikt kopplade till hantering och slutförvaring av kärnavfall.

Delar av den för SKB nödvändiga kunskapen ingår i den allmänna naturvetenskapliga kunskapsmassan och utvecklas inom vetenskapssamhället. SKB behöver dock ha tillräcklig egen kompetens för att kunna upprätthålla förmågan att tillgodogöra sig den kunskap som finns i forskarsamhället som har betydelse för hantering och slutförvaring av kärnavfall, samt för att vara en kompetent beställare av forskningsinsatser. Genom att SKB bedriver egen forskning säkerställs denna kompetenshållning. Stora delar av den detaljerade kunskapen om till exempel funktionen hos förvarens barriärer i en geologisk miljö är dock så specifika för kärnavfallsområdet att kunskapen har eller kommer att behöva genereras av SKB självt eller i internationellt samarbete. Detta gäller även viss kunskap om den geologiska miljön i sig, om den biosfär där konsekvenser av eventuella utsläpp från förvaren uppkommer, samt om storskaliga omgivningsförändringar, i första hand klimatrelaterade, som kan påverka förvaren i framtiden. SKB behöver därför ha en sammanhållen grupp av personer med kunskap om metodiken för analys av säkerhet efter förslutning med en bred och tvärvetenskaplig insikt om hur de olika processerna som påverkar förvarets säkerhet samverkar. I gruppen behövs

också personer med djup kunskap om de ämnesområden som påverkar säkerheten, det vill säga inom geovetenskap (till exempel geologi, hydrogeologi, geokemi), materialfrågor (kapselmaterial, lermaterial, cementmaterial), avfall och använt kärnbränsle (kriticitet, strålskydd, kemi, lösligheter etcetera), ämne-transport (tekniska barriärer, berg), yttre ekosystem och klimatutveckling. Dessutom behövs kompetens att kombinera och integrera kunskap från alla dessa ämnesområden för att kunna genomföra analyser av säkerheten under drift och efter förslutning, det vill säga kompetens i säkerhetsanalysmetodik.

Behovet av kompetens för att styra och genomföra teknikutvecklingen utgår från de planer som tas fram (avsnitt 5.2.2). För att kunna värdera vilken utveckling som behövs och för att kunna styra utvecklingen behöver SKB generalistkompetens inom respektive produktionslinje kopplade till egenskaper hos kärnavfallet samt avfallssystemets barriärer och andra komponenter såsom kapsel, buffert, cementbaserade material, återfyllning, förslutning och berg. Utvecklingen kan i många fall utföras av olika forskningsinstitut eller konsultbolag men inom vissa områden, där det finns få andra köpare av den kompetens som SKB efterfrågar, behöver SKB egen utvecklingskompetens. Det gäller speciellt inom områdena radioaktivt avfall, använt kärnbränsle, konstruktion av kapslar, utveckling av cementbaserade material och lerbarriärer samt metodik för undersökning av berget. SKB:s process för kompetensförsörjning syftar till att säkerställa att kompetensen finns och utvecklas, på kort och lång sikt, inom sådana områden.

I och med det förestående uppförandet av nya anläggningar (Clink, produktionssystem för kapsel-tillverkning, Kärnbränsleförvaret och SFL) samt utbyggnaden av SFR behövs även kompetens för genomförande av stora anläggningsprojekt (till exempel projektledning, byggledning, konstruktion, bergarbeten, bergundersökningar, installationsarbeten). Nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorer kommer att kräva likartad kompetens framför allt avseende projektledning och byggnadsarbeten men även specifik kompetens avseende till exempel strålskydd och klassificering av avfall.

Utöver kompetens inom olika ämnesområden så behövs inom de olika områdena även kompetens på olika nivåer. Det behövs generalister med systemförståelse som kan agera som beställare och/eller projektledare, det behövs chefs- och arbetsledarkompetens likaväl som expert och forskarkompetens. Sedan behövs även kompetenta och ibland specialiserade utförare (till exempel installatörer och operatörer) som kan omsätta kunskap i praktisk handling. Därutöver behövs även personal med god anläggningsskänedom för att uppföra, driva och underhålla de anläggningar som är och planeras vara i drift. Vid bedömning av behovet av kompetens behöver hänsyn även tas till det antal personer med viss kompetens som behövs för att genomföra erforderliga arbetsuppgifter. Det gäller särskilt vid mer intensiva perioder som till exempel vid framtagning av underlag till ansökningshandlingar (till exempel säkerhetsanalyser) och uppförandet av nya anläggningar.

För att kunna genomföra vissa uppgifter av betydelse för SKB:s verksamhet behövs även tillgång till speciella laboratorier och speciella instrument eller verktyg, till exempel SKB:s materialforskningslaboratorium på Äspö för genomförande av särskilda analyser av bentonit samt Kapsellaboratoriet (avsnitt 5.3).

5.5.2 Uppbyggnad och bevarande av kompetens

SKB är som verksamhetsutövare skyldig att tillse att uppgifter löses av personer med erforderlig kompetens. Om den kompetensen ska tillgodoses med egen personal eller genom externa leverantörer eller konsulter är till viss del en strategisk fråga. Den avvägning som görs baseras både på en bedömning av vilka uppgifter som är av sådan strategisk eller säkerhetsmässig betydelse att de bör skötas av egen personal, risker med att vara beroende av externa leverantörer och ekonomiska överväganden. Utfallet av bedömningar kring kompetensbehov och avvägningen mellan egen personal och externa leverantörer kan variera över tid.

SKB:s utgångspunkt är att SKB ska ha egen personal med kompetens för att kunna styra och leda arbetet med forskning, utveckling och drift av system för omhändertagande av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. I det ingår att SKB ska ha erforderlig kompetens för att upphandla och värdera de tjänster och varor som kopplar till hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall som SKB beställer av externa leverantörer. SKB:s inriktning är att egna resurser ska

besitta den kompetens som behövs och utföra de arbetsuppgifter som är av strategisk betydelse för strålsäkerheten i stället för att anlita konsulter. Exempel är säkerhetsanalytisk metodik och utveckling av kapslar för använt kärnbränsle där SKB valt att till stor del ha egna resurser för att på lång sikt bygga och bibehålla kompetens inom företaget. Om produkter eller tjänster i övrigt finns hos SKB:s ägare eller är kommersiellt tillgängliga så är den allmänna inriktningen att använda dessa.

SKB har en kompetensförsörjningsprocess fastställd i sitt ledningssystem. Processen bygger på ett systematiskt arbetssätt för att efterleva interna och externa krav för att säkerställa att tillräckligt med kompetens finns tillgänglig för att upprätthålla en hög säkerhet och nå verksamhetens mål på kort och lång sikt.

I samband med den årliga verksamhetsplaneringen genomförs en kompetens- och bemanningsanalys. Kompetensanalysen visar den kompetens som krävs i en befattning eller roll för att utföra arbetsuppgifter enligt verksamhetens krav och behov. Dessa arbetsuppgifter identifieras för att kunna säkerställa en korrekt och effektiv hantering av kompetenssäkring samt ersättningsplanering med slutmålet att en hög säkerhet ska bibehållas i verksamheten. Roller av särskild strategisk betydelse eller av betydelse för strålsäkerheten identifieras. För organisations- och verksamhetsförändringar finns ett strukturerat och spårbart arbetssätt för att säkerställa bemanning och kompetens så att krav uppfylls i framtiden.

Analysen görs både på individ- och gruppnivå och med en tidshorisont på fyra till fem år. Med tanke på den tid det tar att utveckla kompetens så är framtidsperspektivet alltid väsentligt. Strategiska kompetensanalyser med en tidshorisont på cirka tio år görs regelbundet men med lite längre intervall än den årliga verksamhetsplaneringen. Syftet med de nyligen genomförda strategiska analyserna för kommande anläggningsprojekt är att identifiera framtida bemanningsbehov (kompetens samt numerär) samt hur organisation och bemanning ska kompetenssäkras under de olika projektfaserna, främst för etablerings- och uppförandefas samt i viss mån för driftfasen.

Analysen visar på den kompetens som behövs för att genomföra verksamheten och behovet av kompetensutveckling antingen genom vidareutbildning av befintlig personal eller genom nyrekrytering. Utbildningsprogram upprättas vid behov för individer och grupper. Det kan till exempel avse befattningar som kräver särskild behörighet, som exempelvis operativ driftpersonal. Det generella utbildningsprogrammet omfattar till exempel en introduktionsutbildning för nyanställda. SKB har ett kompetensstödsystem i vilket kompetenssäkring (dokumentation av kompetens och eventuella gap mellan krav och bedömd nivå) sker av egen och inhyrd personal.

Personalens kompetens utvecklas bland annat genom mentorprogram och rotationsprogram där medarbetare ges möjlighet att arbeta inom olika områden och i olika roller. SKB har även ett kompetensöverföringsprogram för att förbereda generationsskiften och för att minska sårbarhet mot förlust av kompetens (till exempel på grund av personalomsättning). I kompetenssäkringen ingår även att förbereda för kommande förändringar i verksamhet och yttre krav.

För att utveckla och behålla SKB:s experter ges de möjlighet till deltagande i vetenskapliga konferenser, eget forskningsarbete och publicering i vetenskapliga tidskrifter av sina resultat. Några har till exempel varit industridoktorander och doktorerat inom ramen för sitt arbete på SKB. Flera av SKB:s ämnesexperter är adjungerade professorer och några har gjort "sabbaticals" på universitet eller högskolor.

5.5.3 Kompetensnätverk och leverantörer

De grundläggande behoven av kompetens inom forskning, säkerhetsanalys och teknikutveckling tillgodoses av SKB-anställd personal. Inom flera av dessa områden finns också behov av fördjupad kompetens och tillgång till större personella resurser för forsknings- och utvecklingsinsatser. För detta anlitas externa specialister, ofta från forskningsinstitut, universitet och högskolor. Dessa experter anlitas i större eller mindre omfattning beroende på behovet för tillfället. Många har i varierande utsträckning varit knutna till SKB:s verksamhet i tiotals år. För tillfälliga behov av resurser, till exempel för större uppdrag avseende projektering och konstruktion av anläggningar, anlitas i allmänhet externa leverantörer. SKB:s ägare är också en viktig resurs.

5.5.4 Samarbeten

Samarbete med universitet och högskolor

SKB samarbetar med universitet och högskolor för att erhålla kritisk kunskap inom områden där sådan saknas. Ett samarbete som SKB ser som mycket värdefullt. Det handlar vanligen om forskning där SKB står för finansiering av doktorandprojekt medan universitetet handleder doktoranden. SKB-finansierade doktorander utgör en presumtiv framtida kompetensreserv för SKB och andra i branschen.

SKB har för närvarande cirka 15 SKB-finansierade eller delfinansierade doktorandprojekt. Genom åren har SKB finansierat eller delfinansierat betydligt mer än 100 doktorander. Många av dessa har under forskarutbildningen och efter doktorsexamen haft nyckelroller i framdriften av SKB:s arbete.

Samarbete med Posiva

SKB har sedan ett antal år ett fördjupat samarbete med sin systerorganisation Posiva i Finland. Posiva har liksom SKB valt att utforma sitt slutförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. År 2001 ratificerade Finlands riksdag den finska regeringens principbeslut om metod och plats för det finska slutförvaret. Anläggningen ska enligt planerna uppföras i Olkiluoto i Euraåminne. Posiva började 2004 uppföra en berganläggning (Onkalo) i Olkiluoto och nådde 2010 ner till planerat förvarsdjup. Onkalo används i dag för forskning och utveckling, men kommer också utgöra tillfarterna till själva slutförvaret.

I slutet av 2012 lämnade Posiva in en ansökan om tillstånd för att uppföra en inkapslings- och slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. I februari 2015 lämnade den finska Strålsäkerhetscentralen (Stuk) sitt yttrande över denna ansökan och rekommenderade den finska regeringen att ge tillstånd. I yttrandet identifierade Stuk ett antal frågor som Posiva behöver lösa och redovisa innan det är möjligt att ge drifttillstånd. I november 2015 gav finska regeringen tillstånd till uppförandet av slutförvaret och inkapslingsanläggningen. Posiva har nu påbörjat uppförandet av anläggningarna och avser kunna påbörja provdrift, om tillstånd ges för denna, cirka 2023/2024.

Under 2013 inledde SKB och Posiva planering av ett fördjupat samarbete med målet att utveckla gemensamma tekniska lösningar för slutförvarssystemet inför driftsättningen. Avtal som då tecknades, förnyades vid årsskiftet 2018/2019. Samarbetet omfattar kapsel-, bentonit- och bergfrågor, maskinkonstruktion och frågor kopplade till att finna ekonomiskt optimala lösningar utan att säkerheten försämrats.

Förutom de effektivitetsvinster som detta samarbete för med sig förstärks även SKB:s förmåga att genomföra forskning och utveckling. Framtagandet av gemensamma planer och gemensamma projekt innebär att dessa får en bredare och mer allsidig beredning och granskning än om SKB drev detta arbete på egen hand. SKB får genom samarbetet tillgång till Posivas anläggningar, speciellt Onkalo, och får även tillgång till de forskningsinstitutioner, institut och andra experter som Posiva samarbetar med.

Övrigt internationellt samarbete

En stor del av SKB:s internationella samarbeten sker inom ramen för EU, OECD/NEA och IAEA. SKB deltar även i ett antal bilaterala och multilaterala samarbetsprojekt ofta med andra kärnavfallsorganisationer.

EU:s arbete på kärnenergiområdet regleras av Euratomfördraget. EU-kommissionen strävar bland annat efter att harmonisera kärnavfallshanteringen i Europa och har tagit fram direktiv om både kärnsäkerhet och avfallshantering. Forskning inom kärnavfallsområdet har varit en del av EU:s forskningsprogram i många år.

IGD-TP är en teknikplattform som bildades 2009 på initiativ av SKB. Medlemmar i plattformens styrgrupp är organisationer med ansvar för avfallsprogram i elva länder, Ondraf/Niras (Belgien), Posiva (Finland), Andra (Frankrike), BMWi (Tyskland), Enresa (Spanien), SKB, Nagra (Schweiz), RWM (Storbritannien), Puram (Ungern), Covra (Nederländerna) och Surao (Tjeckien). Omkring 130 universitet, högskolor, forskningsinstitut och konsultföretag deltar i egenskap av så kallade. participants och stöder plattformens vision om att ett slutförvar för högaktivt avfall och/eller använt bränsle ska vara i drift 2025. Plattformen har varit betydelsefull för inriktningen av EU:s forskningsprogram.

SKB har under den senaste Fud-perioden deltagit i följande EU-projekt vilka nu närmar sig avslut eller är avslutade:

Modern2020	Further technological development on monitoring	www.modern2020.eu
Cebama	CEment BAsed Materials: properties, evolution and barrier functions	www.cebama.eu
Mind	Microbiology In Nuclear waste Disposal	www.mind15.eu
Beacon	Bentonite mechanical evolution	www.beacon-h2020.eu
Disco	Modern spent fuel dissolution and chemistry in failed container	www.disco-h2020.eu
Chance	Characterization of nuclear compounds	www.chance-h2020.eu

EU:s sätt att finansiera forskning och utveckling inom kärnavfallsområdet kommer att förändras. I stället för att stödja enskilda projekt så kommer man att stödja ett sammanhållet program, ett så kallat Joint Program, benämnt Eurad. Programmet har utformats av ett antal aktörer inom avfallsområdet såsom avfallsorganisationer (till exempel SKB), så kallade "Technical Support Organisations" samt forskningsinstitut. Programmet startar 2019 och löper i fem år. Det består, i dess första fas av sju olika forskningsprojekt, två strategiska projekt samt insatser om kunskapsöverföring. SKB kommer att leda ett forskningsprojekt om använt kärnbränsle. Detta har kopplingar till ett annat internationellt samarbete mellan Euratom, DOE och SKB vilket går under namnet Non Destructive Assay Spent Fuel project.

NEA, som är en samarbetsorganisation för kärnenergifrågor inom OECD, har organiserat Radioactive Waste Management Committee (RWMC) som består av företrädare från myndigheter och avfallsorganisationer. SKB deltar i följande kommittéer och grupper under RWMC:

- Forum on Stakeholder Confidence (FCS).
- Integration Group for the Safety Case (IGSC).

RWMC initierade 2011 projektet Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations (RK&M). Syftet med projektet var att presentera en form av "verktygslåda" och en internationell samsyn på förslag på vilka verktyg man kan använda för att bevara dokument, information och kunskap om slutförvar med radioaktivt avfall med olika tidsperspektiv. SKB har deltagit i projektet från början till det avslutades 2018 (avsnitt 4.12.1). SKB deltog dessutom i projektet Radioactive Waste Repository Metadata Management (RepMet) som pågick mellan 2014 och 2017. Där undersöktes vilka metadata som kan understödja tillgänglighet och förståelighet av de data och den information som samlas in för att användas i säkerhetsanalyserna.

Ett internationellt projekt lett av NEA och Studsvik pågår, NEA Studsvik Cladding Integrity Project (Scip) som handlar om bränsle och interaktionen mellan kuts och kapsling, vilken är relevant under hela bränslets livstid då det kan påverka kapslingens integritet. Projektet har genomgått tre faser, varav SKB har deltagit i den tredje och planerar att delta även i den kommande fjärde fasen.

SKB deltar även i arbetsgruppen Working Party on Management of Materials from Decommissioning and Dismantling (WPDD) som 2019 överfördes från RWMC till det av NEA nybildade Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management (CDLM) för samarbete om avvecklingsfrågor. Dessutom delar SKB i ett NEA-projekt inom ramen för NEA Data bank (Thermochemical Database Project) där syftet är att skapa en kvalitetssäkrad kemisk termodynamisk databas som innehåller data för ämnen som har betydelse för hantering av kärnavfall.

Det internationella kärnenergiorganet (International Atomic Energy Agency), IAEA, håller också i ett antal projekt och grupper där SKB deltar som till exempel:

- Geosaf II – Projektet hanterar frågeställningar omkring integration av driftsäkerhet och långsiktig säkerhet för geologiska slutförvarsanläggningar.
- Modaria II – Arbetet syftar till att vidareutveckla modeller för bedömning av strålningsdos till människa och miljö.
- Hidra II – Inom projektet studeras olika aspekter av intrång i förvaret.
- Astor – en expertgrupp med syfte att ta fram rekommendationer för kärnämneskontroll i geologiska slutförvar.
- Use of Monitoring Programmes in the Safe Development of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste – arbetsgruppen har till syfte att redovisa hur ett övervakningsprogram bör utvecklas och genomföras i olika skeden av ett slutförvarsprogram och hur information från övervakning kan integreras med övrig information i beslutsprocessen för slutförvar.

Sverige har ratificerat IAEA:s avfallskonvention (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) och SKB bidrar till den nationella rapport som SSM, i enlighet med konventionen, tar fram vart tredje år. Rapporten granskas av konventionsparterna vid särskilda granskningsmöten.

Det nordiska nätverket Husc (Human Performance and Safety Culture) är ett nätverk för nordiska företag och organisationer som verkar inom det kärntekniska området. SKB bidrar även tillsammans med SKB:s ägarföretag till det nordiska forsknings-samarbetet Nordic Nuclear Safety Research (NKS).

SKB har även genom Vattenfall tillgång till internationell kompetens och resurser genom forskningsorganisationer som till exempel Eniss (European Nuclear Installations Safety Standards), Epri (Electric Power Research Institute) och Nugenia. SKB medverkar också aktivt i Nugenias arbete.

Edram är en internationell sammanslutning för organisationer som ansvarar för hanteringen av radioaktivt avfall. Det är ett forum där strategiska frågor av gemensam karaktär diskuteras i syfte att utbyta erfarenheter och stödja varandra. Ett exempel på områden som hanteras är ”Knowledge management” sett ur ett långsiktigt perspektiv.

SKB samarbetar också med andra avfallsorganisationer runt om i världen. Dessa samarbeten har varit och kommer fortsättningsvis vara viktiga för att säkerställa tillgång till kompetens och erfarenheter från motsvarande utvecklingsarbeten i andra länder. Samarbeten sker både bilateralt och i konstellationer med flera organisationer. Till exempel det internationella samarbetet som SKB samordnar vid Äspölaboratoriet samt Greenland Analogue Project (GAP) som omfattat studier av hur nästa inlandsis kan påverka ett slutförvar för använt kärnbränsle.

I särskilda forum samarbetar specialister och modelleringsgrupper från flera länder kring utvalda frågor som har betydelse för slutförvaring av kärnavfall. Två forum finns etablerade inom grundvatten- och transportmodellering respektive tekniska barriärer: SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (Task Force GWFTS) och SKB Task Force on Engineered Barrier Systems (Task Force EBS). Samarbetet syftar till att utvärdera olika koncept och modelleringsmetoder samt främja samverkan mellan experimenterare och modellörer.

5.5.5 Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt

Frågan om kompetensförsörjning och då särskilt på längre sikt har lyfts av SSM och Kärnavfallsrådet. SSM fick under 2016 ett uppdrag av regeringen att utreda förutsättningarna för att upprätthålla kompetens inom SSM:s ansvarsområde vilket rapporterades i september 2018 (Hällgren 2018). Regeringen beslutade (Regeringsbeslut I:7 om Fud 2016) på Kärnavfallsrådets inrådan att Fud-program 2019 ska innehålla en beskrivning av hur kompetensutveckling och kompetensförsörjning ska säkras i ett tidsperspektiv på 50–100 år. Fokus i detta avsnitt är SKB:s verksamhet medan frågor relaterade till avveckling av reaktorer behandlas i avsnitt 15.4.

Allmänna och grundläggande förutsättningar

SKB har som redovisats ovan behov av kompetens inom många områden med en viktning mot personer utbildade inom naturvetenskap och teknik. De områden inom vilka SKB kommer att behöva kompetens kan förväntas vara relativt oförändrade över tid men antalet personer som behövs inom respektive område kommer att förändras allteftersom verksamheten förändras från dagens tonvikt på forskning och teknikutveckling till uppförande, drift och avveckling av anläggningar.

Allmänt sett är de nationella trenderna med vikande intresse för tekniska och naturvetenskapliga utbildningar ett problem för SKB liksom för svensk industri som helhet. Förutom att detta kan leda till brist på examinerade inom relevanta områden så har det även negativa effekter på lärosätenas möjligheter att bedriva utbildningsprogram inom relativt sett smala områden som kärnteknik och bibehålla viktiga forskningsmiljöer vilket bland annat belyses i SSM:s utredning. Det är således viktigt att öka intresset för naturvetenskap och teknik så att tillräckligt många utbildade personer kan utexamineras. Att upprätthålla intresset för naturvetenskap och teknik är en gemensam fråga för många aktörer där SKB tillsammans med sina ägare kan bidra. SKB arbetar tillsammans med ägarna för att öka branschens attraktionskraft. SKB avser fortsätta att stärka förtroendet för SKB:s uppdrag och lyfta fram de många intressanta och utmanande uppgifter och roller som behövs för att lösa uppdraget. SKB avser att samverka med företag och skolor, i första hand på de orter där SKB är verksam, och delta vid arbetsmarknadsdagar, mässor och olika branschevenemang. Ett lyckat exempel på hur nyrekrytering till branschen kan göras är Vattenfalls traineeprogram som inleddes 2018. Dessa initiativ bidrar vart och ett och tillsammans till SKB:s långsiktiga kompetensförsörjning. Att säkra kompetens inom områden viktiga för slutförvar av kärnavfall och avveckling av kärntekniska anläggningar, är en för SKB och dess ägarbolag en strategiskt viktig fråga på både kort och lång sikt. Slutförvaring och avveckling innebär ett brett behov av kompetens som förutom kärnteknik och strålskydd omfattar geovetenskap, geoteknik, materialfrågor, anläggningsteknik, instrument- och mätteknik samt kompetens om klimatutveckling. Utgångspunkten är att det är samhällets ansvar att tillhandahålla grundutbildning av till exempel civilingenjörer och upprätthålla grundkompetens inom relevanta områden men industrin kommer även att behöva göra särskilda insatser. För att säkra kompetens inom landet kommer samarbete med universitet och högskolor att vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, samt att fortsatt uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden. Till exempel så stödjer Vattenfall finansiellt ett högskoleingenjörsprogram inriktat på kärnkraft vid Uppsala universitet samt Vattenfallgymnasiet i Forsmark för att säkra tillgång till kvalificerad kompetens långt in på 2040-talet. Dessutom finansierar Forsmarks Kraftgrupp AB, Ringhals AB, OKG Aktiebolag och Westinghouse Electric Sweden AB SKC, Svenskt Kärntekniskt Centrum. SKC stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

Allmänt sett och i det längre tidsperspektivet räknar SKB med att huvuddelen av personalbehovet kan tillgodoses av grundutbildad personal som sedan vidareutbildas av SKB för de företagsspecifika tillämpningarna. Därutöver behövs ett mindre antal personer med djup kompetens, till exempel forskarutbildade, kombinerat med lång erfarenhet av för SKB viktiga områden.

SKB har i avsnitt 5.5.2 redovisat hur SKB hanterar kompetensförsörjningen i dagens verksamhet. De rutiner och det arbetssätt som etablerats och de strategiska kompetensanalyser som genomförts utgör en god grund att hantera kompetensutveckling och kompetensförsörjning på sikt även om utrymme för ständiga förbättringar finns. SKB deltar till exempel i ett branschgemensamt nätverk med representanter från Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU), Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB och OKG Aktiebolag med syftet att tillsammans förbättra och utveckla arbetssättet med systematiska kompetensanalyser samt gemensam utbildningsverksamhet.

Närliggande utmaningar

En närliggande utmaning för SKB är de nya anläggningar som ska uppföras och sedan drivas under lång tid. Det finns även andra utmaningar för kompetensförsörjningen på sikt varav några diskuteras nedan.

När det gäller uppförandet av de nya anläggningarna planerar SKB att bygga upp en beställarorganisation för att upphandla, styra och följa upp de entreprenader som uppförandet av respektive anläggning kommer att delas upp i. Beställarorganisationen kommer att besitta den SKB-unika kompetens

som behövs för uppförandet av anläggningarna. Den kommer i huvudsak att bestå av egen personal men även inhyrd personal kan komma ifråga. Då uppförandet av anläggningarna i huvudsak omfattar tillämpning av väl etablerad teknik räknar SKB med att anlita etablerade leverantörer (entreprenörer) med erforderlig kompetens. För uppförandet av kärntechniska anläggningar gäller särskilda krav som leverantörer måste leva upp till under arbetets gång. SKB har sedan tidigare kompetens och erfarenhet, från uppförandet av Clab 2 och Äspölaboratoriet samt platsundersökningarna i Oskarshamn och Forsmark, av att styra leverantörer och tillse att de lever upp till SKB:s i många fall specifika krav. En viktig komponent i styrningen är de utbildningsprogram som SKB arbetar med att ta fram för alla som ska arbeta med uppförandet av respektive anläggning. De utmaningar SKB ser med uppbyggnad av organisation för anläggningsprojekten är i första hand relaterade till konkurrens om personal från andra stora infrastrukturprojekt under de kommande decennierna. En utmaning kan även vara tillgången på den seniora kompetens som behövs för att organisera och leda de stora anläggningsprojekten, särskilt med tanke på den generationsväxling som sker i och med att många av de som byggt upp det svenska kärnavfallsprogrammet snart går eller har gått i pension.

Kompetensförsörjning och utmaningar på längre sikt

När det gäller kompetensförsörjning på mycket lång sikt, det vill säga 50–100 årsperspektivet, så finns det två viktiga förutsättningar som behöver beaktas:

- SKB:s verksamhet är långsiktig då den planeras pågå i ytterligare cirka 70 år, det vill säga fram till cirka 2090, och det finns planer och finansiering för verksamhetens inriktning och omfattning under denna tid.
- SKB är dominerande aktör i Sverige när det gäller hantering av radioaktivt avfall men uppgifter av väsentlig omfattning kommer även utföras av ägarbolag, leverantörer och myndigheter.

Den första punkten är ju en fördel i och med att kompetensutveckling och kompetensförsörjning kan planeras på lång sikt på ett sätt som få andra företag kan. Det borde underlätta med tanke på att kompetensuppbyggnad tar tid. SKB har väl utvecklade rutiner för kompetensutveckling och kompetensförsörjning, vilka redovisats i avsnitt 5.5.2, som ger en god grund för att SKB ska ha den kompetens som behövs för att genomföra den planerade verksamheten enligt ställda interna och externa krav.

Den forskning och teknikutveckling SKB bedriver ger ett viktigt bidrag till utveckling av kompetens och kompetensförsörjning avseende hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. För SKB är samarbetet med universitet och högskolor strategiskt viktigt, dels för att ta fram ny kunskap inom för SKB viktiga områden, dels för att bibehålla och utveckla kompetens. SKB strävar efter långsiktigt samarbete med universitet och högskolor och försöker om det är lämpligt och förutsättningar finns att agera så att stödet till doktorandprojekt kan bidra till uppbyggnad och bevarande av goda forskningsmiljöer. Som tidigare nämnts så stödjer SKB för närvarande cirka 15 doktorandprojekt. Förutom att utveckla kunskapen i frågor av betydelse för slutförvaring av avfall blir de doktorander SKB finansierar en kompetensreserv för SKB såväl som för andra aktörer inom området. Som framgår av avsnitt 5.1 och 5.2 styrs forskning och teknikutveckling primärt av SKB:s behov men programmet som helhet ger betydande bidrag till kompetensförsörjningen, framför allt av expertkompetens, även på lång sikt.

En aspekt som särskilt behöver beaktas under anläggningarnas hela livstid är anläggningskännedom och för slutförvar även kännedom om det omgivande berget. Särskilda insatser kommer att behövas när det gäller bevarande av kunskap och kompetens avseende dessa områden såsom god dokumentation, utbildning av personal och redundant bemanning.

SKB:s roll som den huvudsakliga arbetsgivaren när det gäller hantering av radioaktivt avfall ger SKB ett särskilt ansvar för sin kompetensförsörjning. Att vara den huvudsakliga arbetsgivaren inom ett verksamhetsområde gör ett företag mer känsligt för den allmänna trend som finns i dagens samhälle där rörligheten på arbetsmarknaden ökar. Om någon slutar kan det vara svårt att hitta ersättare med rätt kompetens. Den förmodade bristen på extern kompetens leder till ett behov av relativt sett större insatser på intern utbildning. SKB är dock inte den enda arbetsgivaren inom området utan motsvarande kompetens behöver även finnas hos konsultföretag och myndigheter vilket kan reducera eventuella problem med ersättningsrekryteringar samtidigt som branschen som helhet blir mer attraktiv.

SKB arbetar aktivt för att utveckla företaget som en attraktiv arbetsgivare (employer branding). Dels genom utåtriktade aktiviteter som till exempel deltagande i arbetsmarknadsdaggar och rekryteringskampanjer för att öka intresset att söka arbete hos SKB. Dels internt genom att tillse att arbetsuppgifterna är stimulerande och vidareutvecklande, att det finns goda möjligheter till vidareutbildning och kunskapsförjupning, samt att det finns karriärmöjligheter inom företaget.

En risk som SKB identifierat är om det av någon anledning blir uppehåll i någon del av verksamheten och de problem som då kan uppstå med att bibehålla kompetens inom olika områden.

Uppehåll i en verksamhet kan vara planerad eller oplanerad. Planerade uppehåll i en verksamhet kan till exempel vara platsundersökningar som redan genomförts för Kärnbränsleförvaret och SFR-utbyggnaden men som inom ett antal år ska genomföras för SFL. Oplanerade uppehåll kan till exempel orsakas av ej erhållna tillstånd från myndigheter.

Ett uppehåll inom en del av SKB:s verksamhet leder normalt till behov av omplacering av personal. Om uppehållet är långt kan det vara svårt att upprätthålla kompetens och behålla personal. En grund för att bevara kunskapen under längre uppehåll är väl genomarbetad och systematisk dokumentation som beskriver de arbetsuppgifter som har utförts, den utrustning som använts, de resultat som uppnåtts och den kompetens som behövts. Ett exempel är de metodbeskrivningar och övrig dokumentation som togs fram i samband med platsundersökningarna. När verksamheten återupptas igen måste tid avsättas för inläsning av material och utbildning av eventuellt ny personal som ska genomföra arbetet. Förutsättningarna för omplacering av personal beror naturligtvis på kompetensområde. SKB ser relativt goda förutsättningar att bibehålla bemanning och kompetens hos SKB:s experter som arbetar med säkerhetsanalyser. Säkerhetsanalyser ska genomföras med jämna mellanrum som en del i den stegvisa prövningen för tre slutförvar. De som arbetar med forskning och teknikutveckling kan även i utökad omfattning arbeta inom internationella projekt (avsnitt 5.5.4) eller via SKB International lånas ut till avfallsorganisationer i andra länder. Att arbeta i uppdrag åt andra avfallsorganisationer ger variation i arbetet och ses i allmänhet som stimulerande och bidrar till att behålla och utveckla kompetent personal inom företaget. För andra personalkategorier som operativ driftspersonal kan det vara svårt att finna andra lämpliga arbetsuppgifter inom SKB. Här kan dock finnas möjligheter att låna ut personal till SKB:s ägare där likartade arbetsuppgifter förekommer.

Det finns även risker med smala kompetensområden där det kanske finns någon enstaka expert i Sverige eller ibland i världen. I sådana fall är det internationella samarbetet SKB har med andra avfallsorganisationer väsentligt (avsnitt 5.5.4). SKB har genom det möjlighet att anlita experter från dessa organisationer antingen för att genomföra uppdrag åt SKB eller för att utbilda personal inom SKB. Det i avsnitt 5.5.4 nämnda samarbetet med Posiva, har bland annat som syfte att upprätthålla kompetens och stötta respektive organisation inom smala kompetensområden för kärnavfallsfrågan. Det kan även noteras att frågor om kompetenshållning diskuteras ingående internationellt inom bland annat IAEA, NEA och EU samt bland andra kärnavfallsorganisationer. SKB bedömer det internationella samarbetet som viktigt för att utveckla och säkra kompetensen på lång sikt.

SKB har ovan redogjort för de principer, rutiner och arbetssätt SKB utvecklat för kompetensutveckling och kompetensförsörjning. SKB har tagit fram strategiska kompetensförsörjningsplaner och analyserat de risker och problem som kan uppstå när det gäller kompetensförsörjningen på lång sikt. SKB bedömer eventuella problem som hanterbara och ser det som möjligt att genom att tillämpa och vidareutveckla rutinerna för kompetensutveckling och kompetensförsörjning slutföra SKB:s uppdrag med att slutförvara det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken med bibehållen kompetens.

Del II

Avfall och slutförvaring

- 6 Slutförvaret för långlivat avfall
- 7 Låg- och medelaktivt avfall
- 8 Använt kärnbränsle
- 9 Kapsel för använt kärnbränsle
- 10 Cementbaserade material
- 11 Lerbarriärer och förslutning
- 12 Berg
- 13 Ytekosystem
- 14 Klimat och klimatrelaterade processer

Del II – läsanvisning

I del II av Fud-program 2019 beskrivs planerade forsknings- och teknikutvecklingsinsatser under Fud-perioden. Fokus ligger på de frågor som SKB identifierat som prioriterade för den fortsatta hanteringen och slutförvaringen av radioaktivt avfall respektive använt kärnbränsle. Beskrivningen av planerade insatser presenteras för det låg- och medelaktiva avfallet, det använda kärnbränslet och förvarssystemens olika delar, vilket innebär att forskningen och teknikutvecklingen beskrivs integrerat för de tre slutförvararna. Nulägesbeskrivningen av kunskapsläget redovisas översiktligt och hänvisar till mer detaljerad resultatredovisning i underlagsrapporter.

I del II beskrivs även planering och utvecklingsaktiviteter inför slutförvaret för långlivat avfall, SFL, samt utgångspunkter för lokaliseringsprocessen för SFL.

6 Slutförvaret för långlivat avfall

SKB har utvecklat ett förvarskoncept för Slutförvaret för långlivat avfall (SFL). Förvarskonceptet (avsnitt 2.1.2) rymmer två förvarsdelar, en för hårdkomponenter och PWR-reaktortankar från kärnkraftverken, bergssal för hårdkomponenter (BHK) och en för historiskt avfall, bergssal för historiskt avfall (BHA). Hårdkomponenterna, vilka är metalliskt avfall, utgör cirka en tredjedel av volymen, men innehåller (initialt) huvudparten av aktiviteten. Förvarsdelen för hårdkomponenter planerar SKB att utforma med en teknisk barriär av betong.

Det historiska avfallet lagras och hanteras av AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB i Studsvik. Ytterligare avfall tillkommer från Cyclife Sweden AB och övrig svensk forskning, industri och sjukvård. För denna förvarsdel föreslår SKB att den tekniska barriären utformas av bentonit. Förvarskonceptet illustreras i figur 2-5.

Säkerhetsprincipen för det föreslagna förvarskonceptet är *fördröjning*. Konceptet bygger således på ett system av tekniska och naturliga barriärer som minskar rörligheten och bromsar transporten av radionuklider från förvaret. Effekten av fördröjningen är att radionuklider hålls kvar och sönderfaller, framför allt i förvaret men också i den omgivande berggrunden. I det föreslagna förvarskonceptet ingår vidare att SFL placeras på tillräckligt djup för att undvika negativa effekter av permafrost på de tekniska barriärerna.

I detta kapitel beskrivs den utvärdering av säkerheten efter förslutning för det föreslagna förvarskonceptet som genomförts under Fud-perioden (avsnitt 6.1). Vidare beskrivs processen för lokalisering av SFL (avsnitt 6.2).

6.1 SFL säkerhetsvärdering

Under Fud-perioden har en utvärdering av säkerheten efter förslutning genomförts för det föreslagna förvarskonceptet. Detta i syfte att ge SKB underlag att bedöma om det studerade förvarskonceptet har förutsättningar att uppfylla SSM:s krav och ge viktig information för den fortsatta utvecklingen av SFL vad gäller platsval och barriärutformning. Förutsättningar, metodik, resultat och slutsatser från säkerhetsvärderingen sammanfattas i detta avsnitt. Fullständig dokumentation återfinns i en huvudrapport (SKB 2019c), samt en uppsättning huvudreferenser och underlagsrapporter.

6.1.1 Syfte med och nivå på analysen

Säkerhetsvärderingen syftar till att utvärdera förhållanden under vilka det föreslagna förvarskonceptet har potential att uppfylla myndighetskraven kopplade till säkerhet efter förslutning. Resultatet av utvärderingen utgör en förutsättning för platsvalsprocessen och utveckling av tekniska barriärer, samt för att formulera krav på avfallet (WAC, waste acceptance criteria) för SFL. I utvärderingen har även ingått att identifiera områden där kunskapsläget behöver förbättras till stöd för framtida fördjupade analyser av säkerhet efter förslutning.

Den genomförda säkerhetsvärderingen baseras på SKB:s säkerhetsanalysmetodik. Metodiken har anpassats för att ge underlag till den fortsatta utvecklingen av SFL snarare än att visa kravuppfyllnad. Det finns många likheter mellan det föreslagna förvarskonceptet för SFL och de två andra förvaren, SFR och Kärnbränsleförvaret. Avfall och avfallsbehållare i SFL, har likheter med motsvarande komponenter i utbyggt SFR, och detsamma gäller för de tekniska barriärerna. Då SFL är ett slutförvar för långlivat radioaktivt avfall ska analysen av säkerheten efter förslutning av förvaret omfatta en miljon år, det vill säga samma tidsperiod som för Kärnbränsleförvaret. I det föreslagna förvarskonceptet ingår vidare att SFL, i likhet med Kärnbränsleförvaret, placeras på tillräckligt djup för att undvika negativa effekter av permafrost på de tekniska barriärerna. Med utgångspunkt från dessa likheter har analysen i möjligaste mån baserats på befintlig kunskap och data som tagits fram inom tidigare platsundersökningar, säkerhetsanalyser och teknikutveckling på SKB.

6.1.2 Utgångspunkt för analysen

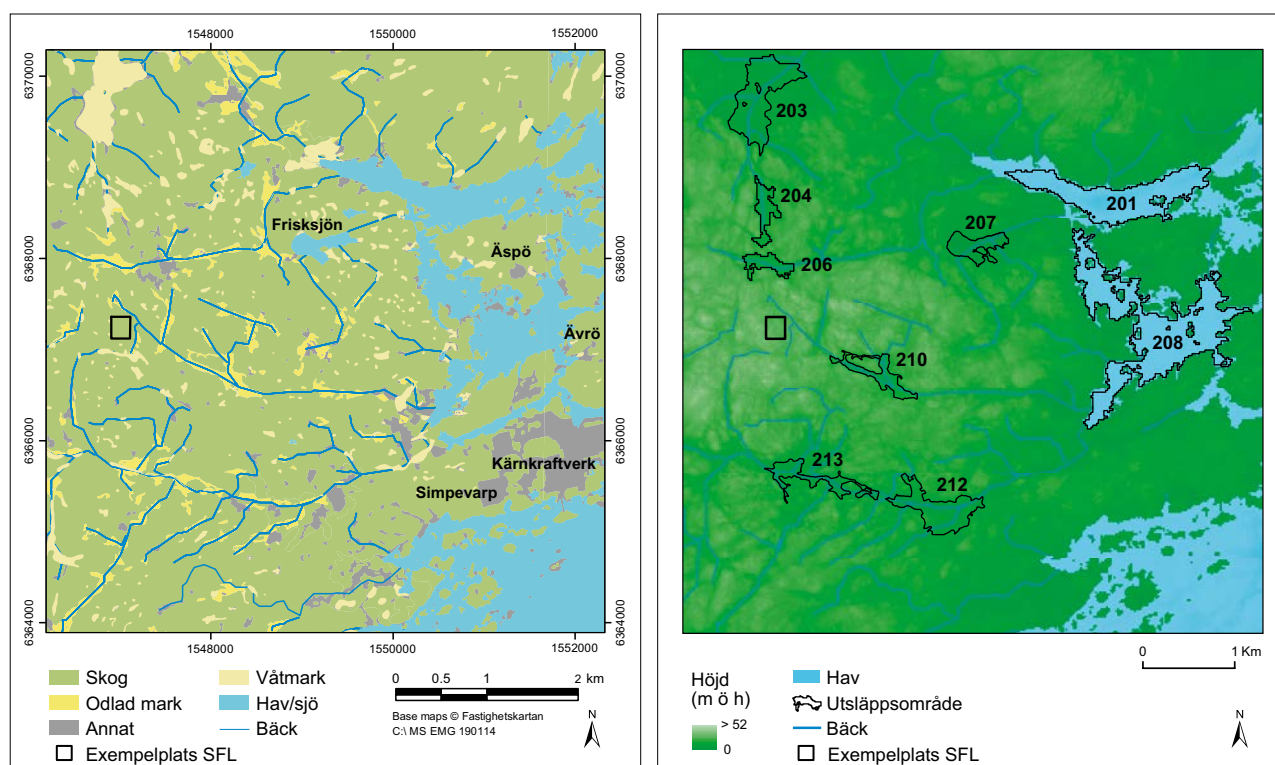
Exempelplats

Då anläggningsplats för SFL ännu inte valts har tillgängliga data från platsundersökningar för Kärnbränsleförvaret och för utbyggt SFR använts för säkerhetsvärderingen. En realistisk, detaljerad och sammanhållen uppsättning data från SKB:s platsundersökning för Kärnbränsleförvaret i Laxemar, i Oskarshamns kommun, finns tillgänglig för analysen. Då Laxemar bedöms vara ett relevant exempel på en anläggningsplats för ett geologiskt slutförvar i Sverige, har dessa data varit utgångspunkt för säkerhetsvärderingen. För den detaljerade analysen har en specifik position inom området valts (figur 6-1), baserat på en första analys av grundvattenflöden (Abarca et al. 2016a). Berggrunden i den valda positionen har låg sprickfrekvens och därmed låg permeabilitet jämfört med andra positioner inom den bergvolym inom området som tidigare befunnits mest lämplig för placering av ett potentiellt Kärnbränsleförvar. Vidare antas förvaret placeras på 500 meters djup, vilket bedöms vara tillräckligt djupt för att undvika negativa effekter av permafrost, samt försvåra oavsiktligt intrång i framtiden. Utöver data från Laxemar har data från Forsmark, i Östhammars kommun, använts som underlag för att undersöka analysens känslighet för platsspecifika egenskaper.

Inventarium

En viktig utgångspunkt för analysen är det uppskattade inventariet av radionuklider och andra material i respektive bergssal. Detta har hämtats från uppskattningar som gjorts av SKB för långlivat medelaktivt avfall från kärnkraftverken och långlivat avfall från AB Studsvik, Cyclife Sweden AB and AB SVAFO.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken är tänkt att placeras i BHK. Reaktoravfallet är mer välkaraktäriserat än det historiska avfallet eftersom den inducerade aktiviteten kan beräknas med förhållandevis god noggrannhet och materialen generellt är kända för de ingående komponenterna i avfallet. Den största osäkerheten ligger sannolikt i materialsammansättningen för bestrålat material och då främst spårämnen som normalt inte analyseras vid bestämning av materialsammansättning i till exempel stål. I dessa fall har pessimistiska antagande gjorts (som till exempel för klorhalten i stål).



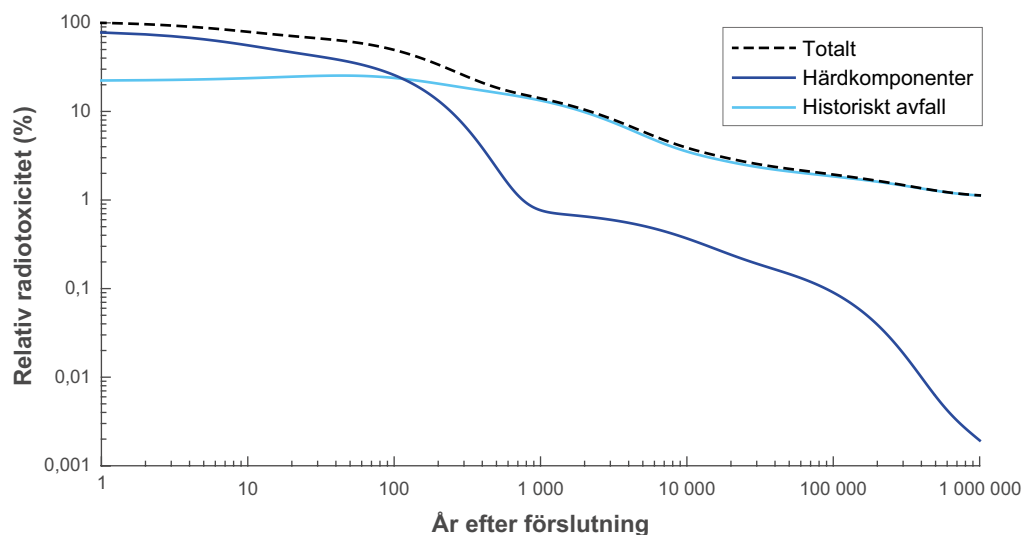
Figur 6-1. Illustration av markanvändning i området kring Laxemar i dag (vänstra bilden), samt markytans höjd över dagens strandlinje (högra bilden). I den högra bilden visas även utläppsområden som utvärderats i säkerhetsvärderingen.

Avfallet från Studsvik Nuclear AB, Cyclife Sweden AB och AB SVAFO är tänkt att placeras i BHA. Inventariet för det historiska avfallet är behäftat med stora osäkerheter. I ett fåtal avfallsfraktioner finns relativt tillförlitliga data för aktinider eller svärmätbara nuklider som till exempel kol-14. För den övervägande delen av avfallet finns dock endast gammadetektoriska mätningar. Inventariet för svärmätbara nuklider är baserat på den nuklidvektor som AB SVAFO redovisat. Eftersom denna nuklidvektor är framtagen för friklassning har den överlag mycket pessimistiska värden för svärmätbara nuklider, vilka oftast inte blir gränssättande för friklassning. När denna nuklidvektor appliceras på det historiska avfallet leder det dock till att vissa svärmätbara nuklider överskattas. Även materialinventariet för det historiska avfallet är mycket osäkert. Materialuppskattningen baseras i huvudsak på materialsammansättning från ett fåtal kollin som undersökts, där resultaten sedan extrapolerats till allt avfall inom samma avfallsklass (till exempel sopor och skrot).

Radioaktivt avfall från driften av European Spallation Source ERIC (ESS) planeras att deponeras i SFL. Eftersom planering för uppförande och drift av ESS pågår finns endast begränsad information om mängder och sammansättning för detta avfall. Avfallet från ESS hanterades därför med ett förenklat förfarande i säkerhetsvärderingen.

Vid förslutning av SFL är den uppskattade radiotoxiciteten⁹ ungefär tre gånger högre i avfallet från kärnkraftverken än i det historiska avfallet (figur 6-2). Inventariet för avfallet från kärnkraftverken domineras dock av de relativt kortlivade radionukliderna nickel-63 och kobolt-60. Redan hundra år efter förslutning är den uppskattade radiotoxiciteten i det historiska avfallet högre än i avfallet från kärnkraftverken, och skillnaden ökar med tiden. I det uppskattade inventariet för avfallet från kärnkraftverken har den totala radiotoxiciteten efter tusen år minskat till mindre än en procent och efter en miljon år utgör det mindre än 0,01 procent av värdet vid förslutning. Det uppskattade inventariet för det historiska avfallet innehåller en större andel av de relativt långlivade radionukliderna teknetium-99 och uran-238. Tillsammans med sönderfallsprodukter i urankedjan leder detta till att den totala radiotoxiciteten i det historiska avfallet avtar långsammare än den för härdkomponenterna. Efter en miljon år har den minskat till ungefär en procent av värdet vid förslutning.

Den totala radiotoxiciteten i SFL (figur 6-2) vid förslutning är ungefär tio gånger högre än i utbyggt SFR, men något mindre än inventariet i en enda av cirka 6 000 kopparkapslar i Kärnbränsleförvaret¹⁰.



Figur 6-2. Radiotoxicitet för radionuklidinventariet som utvärderas i SFL Säkerhetsvärdering för avfallet från kärnkraftverken (mörkblå linje; härdkomponenter) och historiskt avfall (ljusblå linje). Radiotoxiciteten visas i procent av den totala radiotoxiciteten i avfallet vid förslutning.

⁹ Radiotoxiciteten i radionuklidinventariet har beräknats under antagande att radionukliderna inmundigas, samt att det radioaktiva avfallet stannar i bergssalarna under hela analysperioden.

¹⁰ Den jämförelsevis höga toxiciteten för det använda kärnbränslet är en viktig grund för att använda en helt inneslutande barriär för den avfallsformen. Kärnbränslet i sig, till skillnad från stora delar av SFL-avfallet, är också mycket svårlöst i slutförvarsmiljön.

Materialegenskaper

I det föreslagna konceptet ingår cementbaserade material i avfallsmatriser, konstruktioner, och i återfyllnaden i bergssalen för hårdkomponenter, BHK. Som utgångspunkt för säkerhetsvärderingen har betongen antagits ha en sammansättning som liknar den betong som användes vid uppförandet av befintligt SFR. Utvecklingen av de kemiska och hydrauliska egenskaperna hos betong i BHK efter förslutning har modellerats (Idiart och Shafei 2019, Idiart et al. 2019a, b, Idiart och Laviña 2019). Inom det program som syftar till att utveckla en betong till kassunerna i 2BMA har en betong innehållande relativt stora mängder finmald kalksten utvecklats (avsnitt 10.2.1). De utredningar som genomförts under Fud-perioden indikerar att denna betong har en mycket låg initial porositet, vilket gör att den långsiktiga kemiska lakningen går långsammare (avsnitt 10.1.6). Bedömningen är att denna betong ska kunna utnyttjas även i BHK (avsnitt 10.3.1). Preliminära beräkningar av hur utsläppet av radioaktivitet från BHK skulle påverkas vid användning av en sådan tätare betong har därför genomförts som ett så kallat utvärderingsfall i säkerhetsvärderingen.

I det föreslagna konceptet ingår bentonitlera som återfyllnadsmaterial i bergssalen för historiskt avfall, BHA, och som del i pluggar och andra förslutningskomponenter. De antaganden som gjorts i säkerhetsvärderingen gällande bentonitens egenskaper och funktion baseras i huvudsak på befintlig kunskap. Återfyllnadsbentoniten antas ha samma egenskaper som buffertbentoniten i Kärnbränsleförvaret. De processer som skulle kunna leda till att bentonitens egenskaper och funktion förändras under tiden fram till och efter förslutning antas inte ha någon betydande påverkan på förvarets förmåga att bromsa utsläpp av radionuklider. Detta antagande behöver utvärderas i framtida analyser på basis av ett förbättrat underlag. Utgångspunkten för detta är studier utförda för Kärnbränsleförvaret (avsnitt 11.3.2), samt en pågående första modellering av mineralomvandling i återfyllnadsbentoniten i BHA till följd av växelverkan med cementbaserade material i avfallsmatriser och konstruktionen kring avfallet (avsnitt 11.3.4).

Hantering av osäkerheter

Osäkerheter i klimatutvecklingen (scenariosäkerhet) hanteras i säkerhetsvärderingen genom att inkludera tre varianter som inbegriper framtida klimattillstånd som förväntas förekomma på en anläggningsplats i Sverige under de kommande en miljon åren. I referensutvecklingen hanteras även osäkerheter i relation till den hydrokemiska utvecklingen i den omgivande berggrunden, samt osäkerheter kopplade till utvecklingen av betong och bentonitmaterial i bergssalarna. Även parameterosäkerhet har till viss del hanterats, bland annat i relation till grundvattenflöde och retentionsparametrar för den omgivande berggrunden och egenskaper hos det område där utsläppet till biosfären antas ske.

Sammantaget kan sägas att ansträngningar har gjorts i säkerhetsvärderingen för att demonstrera en förståelse för förvarets funktion och utveckling. Ansträngningar har också gjorts för att säkerställa tillämpligheten för de modeller, parametervärden och andra antaganden som används för att beskriva och kvantifiera förvarets funktion och utveckling. I framtida säkerhetsanalyser för SFL finns utrymme för en mer omfattande analys och dokumentation av osäkerheter.

6.1.3 Metodik och tillämpning

Metodiken för säkerhetsvärderingen utvecklades med utgångspunkt från SKB:s metodik för analyser av säkerhet efter förslutning. Hur metodiken tillämpats beskrivs kortfattat i detta avsnitt. Analysen kan sammanfattas i tio delar eller steg (figur 6-3), där processen är iterativ.

Egenskaper, händelser och processer som kan påverka säkerheten efter förslutning

Analysen utgår ifrån identifiering av samtliga egenskaper, händelser och processer (eng features, events, processes; FEP) som kan påverka förvaret och är betydelsefulla för analysen av säkerheten efter förslutning. FEP tas fram utifrån avfallet, det föreslagna förvarskonceptet samt vald exempelplats. På grund av de många likheterna mellan det föreslagna förvarskonceptet för SFL och SFR har FEP-katalogen från SR-PSU använts som utgångspunkt för analysen. Resultatet av FEP-analysen dokumenterades i en nyupprättad FEP-katalog för SFL inom ramen för SKB:s FEP-databas. I FEP-katalogen finns samtliga identifierade FEP beskrivna. Vidare beskrivs om och hur varje identifierad FEP har hanterats i säkerhetsvärderingen. För FEP som inte har hanterats i säkerhetsvärderingen ges en motivering samt en indikation om denna bedöms behöva hanteras i en framtida fullständig säkerhetsanalys för SFL.



Figur 6-3. Översikt av metodiken som tillämpas för utvärderingen av säkerhet efter förslutning för det föreslagna förvarskonceptet för SFL.

Initialtillstånd i förvaret och dess omgivning

Analysens initialtillstånd definieras som det förväntade tillståndet hos systemet, det vill säga förvaret och dess omgivning, vid förslutning. Då förslutningsår för SFL inte är bestämt, har förvaret antagits förslutas år 2075. Förhållandena i förvarets omgivning antas likna dagens förhållanden på exempelpositionen i Laxemar (avsnitt 6.1.2). Förvarets initialtillstånd definierades under dessa antaganden och på basis av uppskattningar av förhållanden i avfallet och övriga förvarskomponenter vid förslutning. Vissa av de antaganden som görs gällande analysens initialtillstånd har utvärderats närmare (se steg 8 *Val av utvärderingsfall*).

Externa referensförhållanden

Förändringar av klimatet och klimatrelaterade processer, såsom strandlinjeförskjutning och uppbyggnad av permafrost och inlandsisar, kan påverka förvarets skyddsförmåga på de tidsskalor som analysen omfattar. För att kunna utvärdera betydelsen av sådana förändringar för förvarets utveckling väljs en uppsättning externa referensförhållanden som utgångspunkt för analysen.

I begreppet externa förhållanden ingår även storskaliga geologiska processer och effekter, framtida mänskliga handlingar, samt övrigt (till exempel meteoritnedslag). Dessa processer och effekter har inte inkluderats i säkerhetsvärderingen, men kommer att hanteras i den utsträckning som krävs i en framtida fullständig säkerhetsanalys.

Valet av externa referensförhållanden för säkerhetsvärderingen utgår från samma förutsättningar som de som beaktats i SKB:s tidigare säkerhetsanalyser för SFR och Kärnbränsleförvaret. Dessa kan kortfattat sammanfattas:

- Det är högst sannolikt att den nuvarande interglaciala perioden, holocen, kommer att vara signifikant längre än tidigare interglaciala perioder. Till följd av framtida variationer i solinstrålning och människans utsläpp av växthusgaser bedöms denna period sträcka sig mellan 50 000 och 100 000 år, eller till och med ännu längre, in i framtiden.
- Den rekonstruktion av den senaste glaciala-interglaciala cykeln, som var utgångspunkt för analysen i den senaste säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret, utgör ett relevant exempel för ordningsföljden för klimattillstånden under en glacial-interglacial cykel.

Tre varianter av externa referensförhållanden valdes (tabell 6-1).

Tabell 6-1. Externa referensförhållanden för SFL Säkerhetsvärdering.

Variant	Beskrivning
Basvariant	Hypotetiskt fall där dagens externa (klimat-) förhållanden antas råda på anläggningsplatsen under hela analysperioden (en miljon år). Denna förenkling har valts som utgångspunkt för analysen i syfte att bygga upp en förståelse för hur det föreslagna förvarskonceptet fungerar.
Ökad växthuseffekt	Representerar ett varmare klimat än dagens, med en förändrad hydrologisk årtidscykel jämfört med dagens förhållanden, under de kommande 50 000 åren. Därefter antas dagens externa förhållanden råda under resten av analysperioden.
Förenklad glaciationscykel	Representerar en utveckling mot kallare klimat än dagens. Definierades med utgångspunkt från den övergripande klimatutvecklingen i SKB:s rekonstruktion av den senaste istidscykeln (figur 6-4). Möjliggör utvärdering av effekter av en succession av tempererat klimat, periglaciala förhållanden med permafrost, inlandsisutveckling och havstäckta förhållanden. Denna förenklade glaciala-interglaciala cykel upprepas tio gånger under den en miljon år långa analysperioden.

Valet av externa referensförhållanden kommer att ses över inför framtida fullständiga säkerhetsanalyser för SFL. Speciellt kan ytterligare gränssättande klimatfall, vilka representerar mer extrema framtida klimatutvecklingar än de som ingår i säkerhetsvärderingen, behöva inkluderas. Valet av klimatfall görs då med utgångspunkt från resultaten från säkerhetsvärderingen, samt kompletterande undersökningar av klimatutvecklingens påverkan på systemets säkerhetsfunktioner.

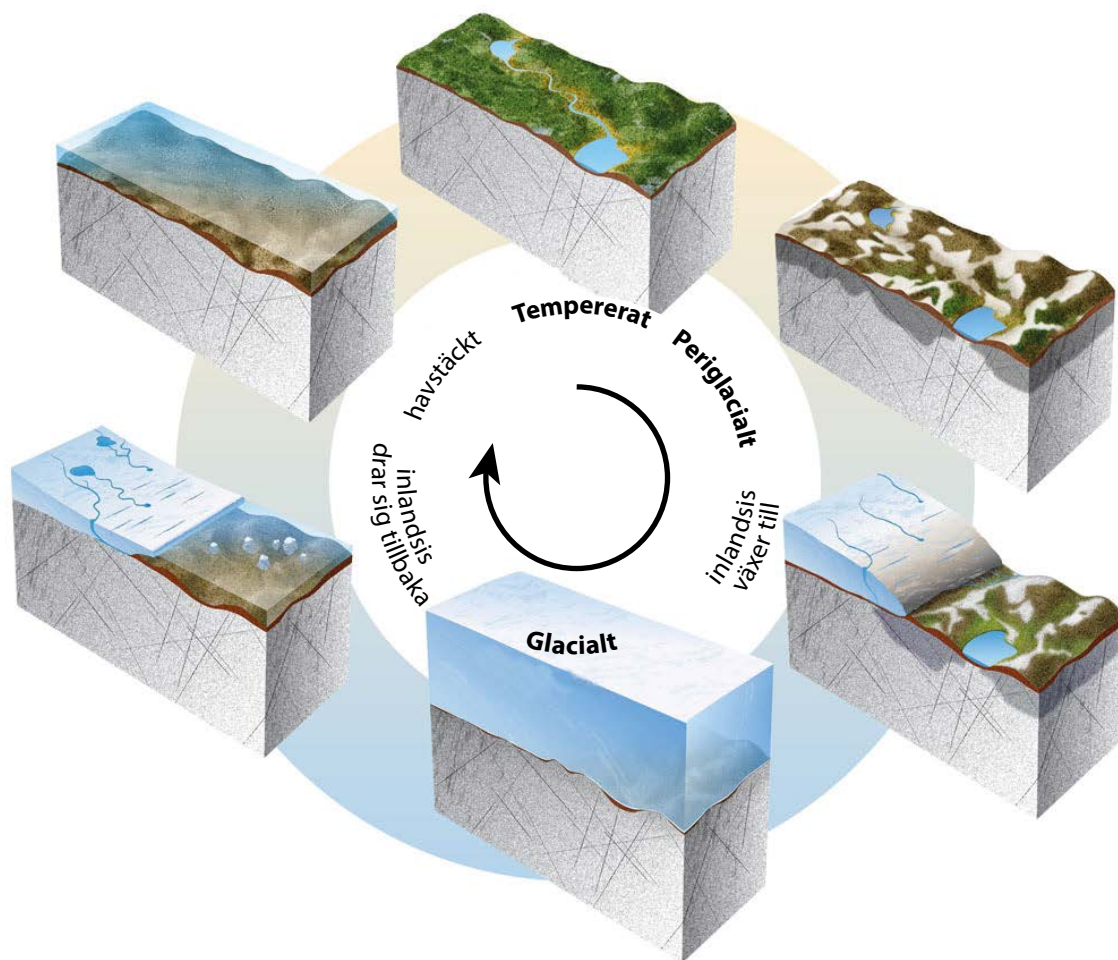
Interna processer

Relevanta interna processer för SFL identifierades i steg 1 i analysmetodik och hanteringen av dessa i säkerhetsvärderingen för SFL har dokumenterats i FEP-katalogen för SFL. Analysen bygger i stor utsträckning på befintliga beskrivningar av relevanta processer. Då säkerhetsvärderingen utgår från data från en annan plats än de senaste analyserna för utbyggt SFR och Kärnbränsleförvaret, vilka båda utvärderas Forsmark, har processbeskrivningarna för ytsystemen uppdaterats i säkerhetsvärderingen.

Säkerhetsfunktioner

Ett centralt inslag i SKB:s säkerhetsanalysmetodik är definitionen av en uppsättning säkerhetsfunktioner, som används för att tydliggöra på vilket sätt en förvarskomponent bidrar till säkerheten efter förslutning. Säkerhetsprincipen för det föreslagna förvarskonceptet är *fördröjning*. Det föreslagna konceptet bygger således på ett system av tekniska och naturliga barriärer som minskar rörligheten och bromsar transporten av radionuklider från förvaret (figur 6-5). Effekten av fördröjningen är att radionuklider hålls kvar och sönderfaller, framför allt i förvaret men också i den omgivande berggrunden.

I säkerhetsvärderingen för SFL föreslås säkerhetsfunktioner för det föreslagna förvarskonceptet, givet säkerhetsprincipen *fördröjning* samt kunskap om initialtillståndet, de interna och externa processerna. Eftersom förvarsdesignen, barriärsystemet och lokaliseringen för SFL ännu inte är beslutad, kommer valet av säkerhetsfunktioner behöva ses över i kommande säkerhetsanalyser. Det kan också hända att en fördjupad framtida FEP-analys visar att ytterligare processer behöver övervägas vid valet av säkerhetsfunktioner.



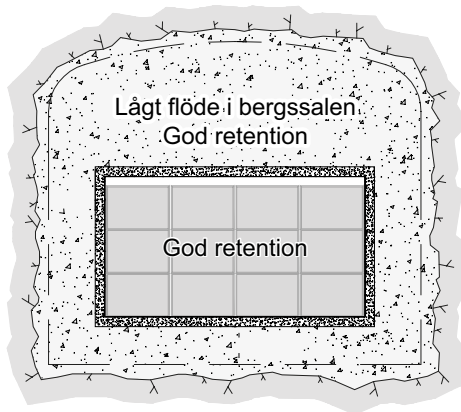
Figur 6-4. Förenklad glaciationscykel bestående av de tre klimattillstånd (fet stil) som bedömts relevanta för analyser av säkerhet efter förslutning för en anläggningsplats vid den svenska Östersjökusten, såsom Laxemar och Forsmark. Bilden visar även framryckade och tillbakadragande av en inlandsis som följs av en period av havstäckta förhållanden.

I avfallet uppnås retardation genom upprätthållande av säkerhetsfunktionen *god retention* genom fördelaktiga förhållanden med avseende på bland annat högt pH, låg redoxpotential, låg koncentration av komplexbildare, stor tillgänglig yta för sorption och låg korrosionshastighet för det metalliska avfallet. I bentonitbarriären i BHA är de viktigaste säkerhetsfunktionerna *lågt flöde i bergssalarna* och *god retention*. Dessa säkerhetsfunktioner upprätthålls genom låg hydraulisk konduktivitet, låg diffusivitet, stor tillgänglig yta för sorption, och stor kapacitet att filtrera kolloider. I betongbarriären i BHK är de viktigaste säkerhetsfunktionerna *lågt flöde i bergssalarna* och *god retention*. Dessa säkerhetsfunktioner upprätthålls genom låg diffusivitet, stor tillgänglig yta för sorption, högt pH och låg redoxpotential.

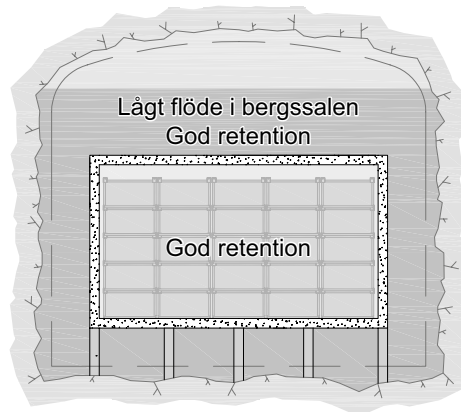
I den omgivande berggrunden uppnås retardation genom att välja en anläggningsplats som uppfyller säkerhetsfunktionen *lågt flöde* i berggrunden.

Den sammantagna effekten av retardationen i förvaret fördelar utsläppet av radioaktivitet från förvaret över tid. Således säkerställs att de årliga utsläppen av radioaktivitet från förvaret endast utgör en mycket liten andel av det totala inventariet vid förslutning. Utöver denna effekt innebär retentionen att en signifikant andel av det initiala radionuklidinventariet sönderfaller innan de når ytan. Detta gäller speciellt för radionuklider som har kort halveringstid i jämförelse med tiden som de kvarhålls i förvaret (eller berggrunden).

Bergssal för hårdkomponenter



Bergssal för historiskt avfall



Figur 6-5. Föreslagna säkerhetsfunktioner för avfallet och de tekniska barriärerna i BHK och BHA. Bergssalarna är återfyllda med betong (BHK) respektive bentonit (BHA).

Sammanställning av data

Det naturliga systemet på exempelplatsen beskrivs i stor utsträckning med hjälp av data som togs fram i den tidigare platsundersökningen för Kärnbränsleförvaret i Laxemar. Då SFL endast skulle ta upp någon procent av den bergsvolym som undersöktes för Kärnbränsleförvaret i Laxemar har data från ny modellering av grundvattenströmning och grundvattenkemi (Joyce et al. 2019, Gimeno et al. 2019) använts. Data från förbättrad modellering av det ytnära grundvattensystemet (Johansson och Sassner 2019) har också använts. Förhållanden i förvaret beskrivs med utgångspunkt från beskrivningen av det naturliga systemet, samt underlag från tidigare säkerhetsanalyser och teknikutveckling på SKB. Data som beskriver grundvattenströmningen i och ut ur bergssalarna tas från ny modellering (Abarca et al. 2019). Data från modellering av utvecklingen av kemiska och hydrauliska egenskaper hos betong i bergssalen för hårdkomponenter (Idiart och Shafei 2019, Idiart et al. 2019a, b, Idiart och Laviña 2019) har också använts.

Eventuella effekter av värmealstrande avfall har utretts (von Schenck 2018). Vidare har omfattning av gasbildning i avfallet, och eventuella effekter av denna på grundvattenströmningen i förvaret och omgivande berggrund, undersökts (Silva et al. 2019a, b).

Referensutveckling för förvaret och dess omgivning

I syfte att förstå den övergripande utvecklingen för det föreslagna förvarskonceptet på en relevant exempelplats under representativa externa förhållanden har en referensutveckling för förvaret och dess omgivning definierats. Denna utgår från analysens initialtillstånd samt de externa referensförhållanden som valts för analysen. Referensutvecklingen består av tre varianter som baseras på de tre varianterna av externa referensförhållanden (se tabell 6-1). FEP som identifierats ha potentiell påverkan på säkerheten efter förslutning för SFL har inkluderats i beskrivningen.

Referensutvecklingen baseras på en kombination av underlag från studier av förväntade förhållanden för det föreslagna förvarskonceptet, under antagande att förvaret lokaliseras i den förvarsvolym som valts för utvärderingen i SFL Säkerhetsvärdering, och underlag från studier av förhållanden i eller kring Kärnbränsleförvaret eller SFR. Beskrivningen av den förväntade framtida utvecklingen är därför inte fullständig, men bedöms tillräcklig för att säkerhetsvärderingens slutsatser ska kunna användas som underlag för den vidare utvecklingen av SFL.

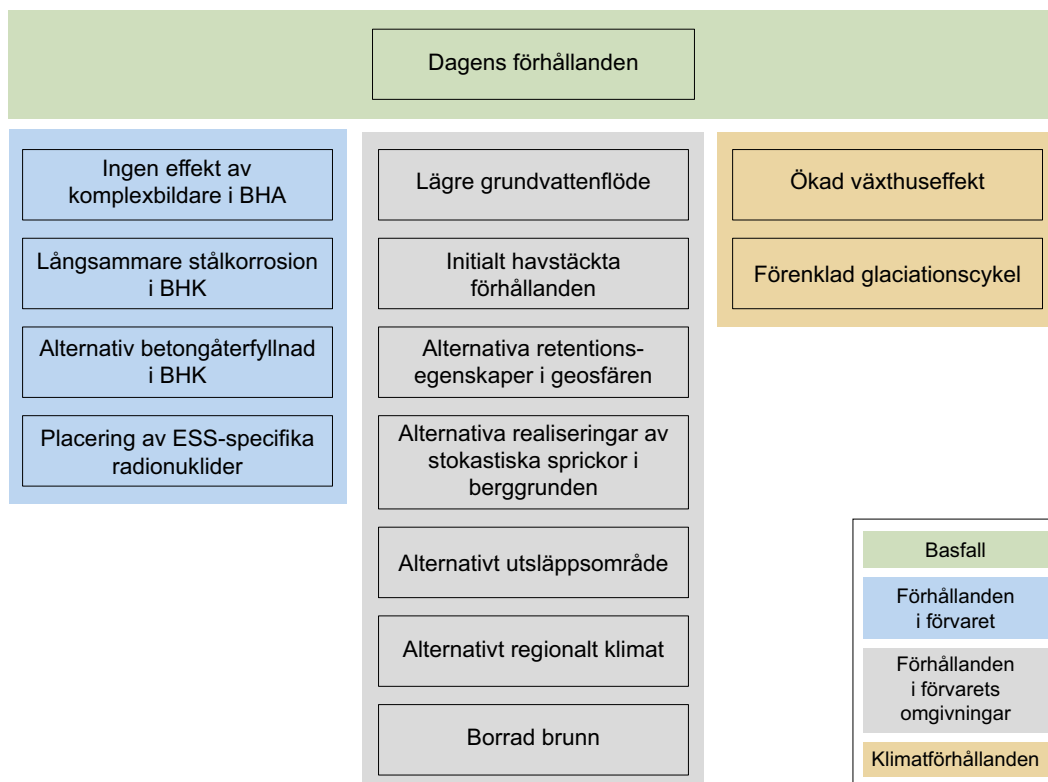
Val av utvärderingsfall

I syfte att beskriva det föreslagna förvarskonceptets funktion samt utvärdera under vilka förutsättningar det föreslagna förvarskonceptet har potential att uppfylla föreskrifternas krav, har en uppsättning utvärderingsfall definierats. Utvärderingsfallen har definierats med utgångspunkt från den övergripande utvecklingen för förvaret och dess omgivning som beskrivs i referensutvecklingen.

Uppsättningen består av ett basfall samt fall som utvärderar betydelsen av olika egenskaper, samt effekter av osäkerheter i egenskaper, hos systemet som analyseras (figur 6-6). Basfallet antar att dagens externa (klimat-) förhållanden råder på anläggningsplatsen under hela analysperioden (en miljon år). Baserat på nuvarande kunskap om egenskaper hos avfallet och tillgängliga barriärmaterial, såsom beskrivs i referensutvecklingen, görs realistiska, och i vissa avseenden förenklade, antaganden gällande förhållandena i förvaret och dess omgivningar.

Termen utvärderingsfall valdes, i stället för termen scenario, för att tydliggöra att valet gjorts utifrån ett annat perspektiv än det som ges av SSM:s allmänna råd till SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37. I detta sammanhang är det viktigt att påpeka att utvärderingsfallen som ingår valdes för att ge underlag till den fortsatta utvecklingen av SFL. Analysen är inte avsedd att ge en heltäckande riskanalys för SFL.

Som ett kvalitativt mått på potentialen att uppfylla föreskrifternas krav, och för jämförelse av hur olika antaganden påverkar förutsättningarna för kravuppfyllnad, används den beräknade dosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen. I en fullständig säkerhetsanalys bör huvudscenariot resultera i en årlig dos under den dos (14 μSv) som motsvarar riskkriteriet¹¹. En högre dos kan vara acceptabel för mindre sannolika scenarier givet att den summerade risken för huvudscenariot och mindre sannolika scenarier är lägre än riskkriteriet. I säkerhetsvärderingen används i stället den dos (14 μSv) som motsvarar riskkriteriet (fortsättningsvis benämnd doskriteriet) som ett referensvärde för att utvärdera det föreslagna konceptets skyddsförmåga. Utvärderingsfall som resulterar i en årlig dos som överstiger doskriteriet indikerar att de förhållanden som antas råda i förvaret och dess omgivningar representerar en situation som är mindre gynnsam för att uppnå förvarets tänkta funktion. På motsvarande sätt indikerar en årlig dos som är lägre än doskriteriet att de förhållanden som antas råda i förvaret och dess omgivningar är mer gynnsam för att uppnå förvarets tänkta funktion.



Figur 6-6. Utvärderingsfall som ingår i SFL Säkerhetsvärdering.

¹¹ SSM (SSMFS 2008:37) fastslår att den årliga risken för skadeverkningar inte får överstiga 10^{-6} för en representativ individ i grupp som utsätts för den största risken från förvaret (den mest exponerade gruppen). Detta ger en årlig effektivdos av 14 μSv , där en riskfaktor på 7,3 procent per sievert används för dosomvandlingen (så som anges i föreskrifterna). Doskriteriet 14 μSv motsvarar omkring en procent av effektivdosen från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige.

Basfallet

Som utgångspunkt för analysen valdes utvärderingsfallet *dagens förhållanden*, som definieras med utgångspunkt från beskrivningen av initialtillståndet och referensutvecklingens basvariant (tabell 6-1). Antaganden som gjordes i detta basfall var:

- Både markytan ovanför förvaret och det område där utsläppet från förvaret antas nå ytsystemen är i dag beläget mer än tio meter över Östersjöns nivå. Därför antas förhållandena i förvarets omgivning, det vill säga den omgivande berggrunden och ytsystemen, vara konstanta under hela analysperioden. Effekter av havstäckta förhållanden och strandlinjeförskjutning utvärderas i stället i utvärderingsfallet *förenklad glaciationscykel* och *initialt havstäckta förhållanden*. Effekter av landskapsutveckling i samband med strandlinjeförskjutning utvärderas vidare i utvärderingsfallet *alternativt utsläppsområde*.
- För en signifikant andel av det metalliska avfallet i bergssalen för hårdkomponenter antas den inducerade radioaktiviteten frisläppas genom korrosion, där en konstant korrosionshastighet antas. För gods tunnare än 1 mm och ytkontamination antas dock radionuklidinventariet vara tillgängligt för uttransport och sorption direkt vid förslutning. Betydelse av dessa antaganden utvärderas vidare i utvärderingsfallet *lägre stålkorrosionsrat i BHK*.
- Betongåterfyllnaden i bergssalen för hårdkomponenter antas ha en sammansättning som liknar den betong som användes vid uppförandet av befintligt SFR. Betongens egenskaper utvecklas över tid till följd av urlakning, vilket leder till ökad hydraulisk konduktivitet och en sänkning av pH. Dessa förändringar antas påverka den advektiva och diffusiva transporten i förvaret, samt sorption av radionuklider på cement i avfallet och återfyllnaden.
- Det beräknade utsläppet från bergssalarna fördelas på partikelspår som representerar transportvägar från gränsytan mellan bergssalarna och berggrunden till gränsytan mellan berggrunden och jordlagren. I de fem realiseringar av grundvattenflödet som genomförts (Joyce et al. 2019) slutar en majoritet av partikelspår från bergssalarna i något av tre utsläppsområden. Då dessa områden alla representerar liknande förhållanden i dag valdes ett av dem (biosfärsobjekt 206, se figur 6-1), för basfallet, och det totala utsläppet av radioaktivitet vid bergövertytan antas komma upp i detta område. Området antas vara myrmark som dräneras och odlas upp.

Vissa aspekter av referensutvecklingens basvariant har exkluderats i basfallet, trots att de skulle kunna påverka utvecklingen av barriärerna och förvarets funktion. Till skillnad från betongåterfyllnaden i bergssalen för hårdkomponenter, antas bentonitåterfyllnaden i bergssalen för historiskt avfall ha konstanta egenskaper under hela analysperioden. Processer som skulle kunna leda till att bentonitens egenskaper och funktion förändras under tiden fram till och efter förslutning antas därmed inte ge en signifikant påverkan på förvarets förmåga att bromsa utsläpp av radionuklider. Speciellt gäller detta kemisk växelverkan mellan betongen i avfallsdomänen och bentonitåterfyllnaden, vilket kan leda till omvandling av montmorillonit i bentonitleran till andra mineral. Omvandlingen sker inifrån och ut med start vid gränssnittet mellan betong och bentonit. Omfattningen av denna process, samt hur den påverkar barriärens säkerhetsfunktioner behöver kvantifieras i en framtida säkerhetsanalys för SFL. Även förlust av bentonit genom frigörelse av kolloider exkluderar i basfallet. Omfattningen av sådan frigörelse under en utsträckt period av tempererat klimat, då grundvatten med tillräckligt låg salthalt skulle kunna tränga in i bentonitåterfyllnaden, behöver utvärderas vidare i framtida säkerhetsanalyser.

I likhet med SKB:s tidigare säkerhetsanalyser för utbyggt SFR och Kärnbränsleförvaret görs ett antal förenklade antaganden i beräkningen av transport av radionuklider och potentiell årlig dos för en individ i den mest exponerade gruppen. Dessa leder sannolikt till en överskattning av de beräknade maximala radiologiska konsekvenserna. Bland annat beaktas inte

- löslighetsbegränsningar för radionuklider
- avfallsbehållarnas transportmotstånd
- möjlighet för lösta radionuklider att falla ut i fast form
- sjunkande nivåer av komplexbildare i det historiska avfallet med tiden
- att utsläppet kan fördelas i fler än ett geografiskt begränsat område.

Då osäkerheten i inventariet i det historiska avfallet är stor har ytterligare förenklingar gjorts för denna bergssal. Här antas hela radionuklidinventariet vara tillgängligt för uttransport vid förslutning, trots att delar av radioaktiviteten i avfallet sannolikt är bundet i fasta material.

Klimatutveckling

Betydelsen av framtida klimatutveckling för den beräknade dosen har analyserats i utvärderingsfallen med *ökad växthuseffekt* och en *förenklad glaciationscykel*. Utvecklingen i dessa fall baseras på motsvarande varianter av referensutvecklingen (tabell 6-1). På samma sätt som i basfallet ingår viktiga aspekter av referensutvecklingens varianter i dessa utvärderingsfall, emedan vissa aspekter har exkluderats trots att de skulle kunna påverka utvecklingen av barriärerna och förvarets funktion. I likhet med basfallet exkluderas eventuella effekter av förlust av bentonit genom frigörelse av kolloider, till följd av inträngning av glacialt smältvatten med låg salthalt. Belastningen från en inlandsis kan ha mekanisk påverkan på omgivande berggrund och eventuellt också på bergssalarna. Den yttre delen av betongåterfyllnaden antas dock redan vara kemiskt lakad när inlandsisen utvecklas i utvärderingsfallet *förenklad glaciationscykel*. Därför har inte den eventuella effekten av mekanisk påverkan på denna inkluderats i utvärderingsfallet. I en fullständig säkerhetsanalys behöver dock den kombinerade effekten av kemisk lakning av betongen och ökade bergsspänningar utvärderas.

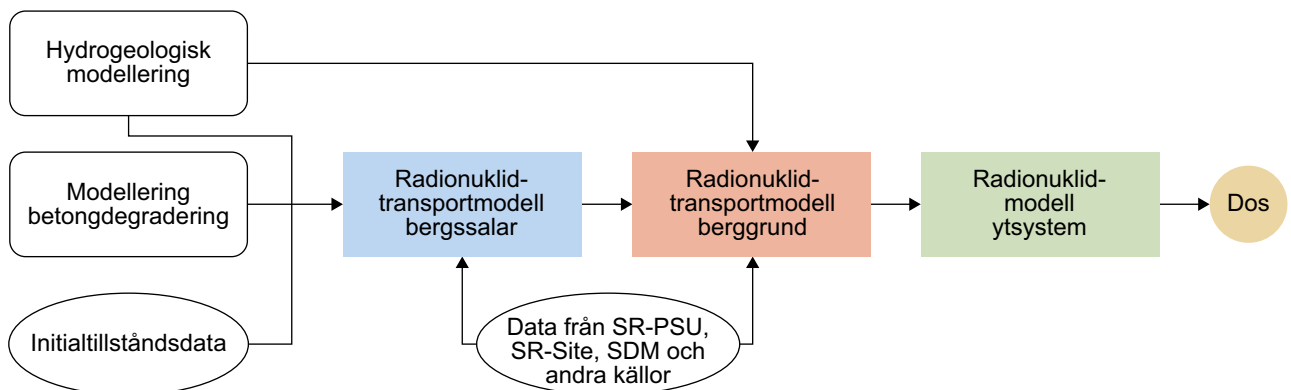
Förhållanden i förvaret och dess omgivningar

I syfte att utvärdera potentialen för det föreslagna förvarskonceptet att uppfylla föreskriftskraven, givet bättre förutsättningar än de som antogs i basfallet, definierades en uppsättning utvärderingsfall (figur 6-6). Vidare inkluderades utvärderingsfall där betydelsen av inneboende osäkerheter hos systemet har analyserats.

6.1.4 Resultat

Dosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen har beräknats med modeller som beräknar utsläpp av radionuklider från förvaret, transport från förvaret till ytsystemen, upptag och utbyte inom biosfären, samt doser till människor (figur 6-7). Modellerna är avsedda att fånga de huvudsakliga FEP för transport, ackumulation och exponering för radionuklider. De modeller som använts är i tillämplig omfattning likvärdiga med de modeller som använts av SKB i de senaste säkerhetsanalyserna för utbyggt SFR och Kärnbränsleförvaret. Nya modeller som beräknar transport i och ut från bergssalarna för härdkomponenter och historiskt avfall har utvecklats (Wessely och Shahkarami 2019). Dessa modeller bygger på samma principer som motsvarande modeller för utbyggt SFR. För transporten i berggrunden användes en ny implementation av den konceptuella modellen från tidigare säkerhetsanalyser. För transport och ackumulation i ytsystemen, samt exponering för radionuklider, har en modell med samma detaljningsnivå och de flesta antaganden baserade på den senaste utvärderingen för utbyggt SFR (SR-PSU) använts. Modellen som används i SR-PSU har bedömts ge en bra beskrivning av ytsystemen (se till exempel SSM 2019). Modellen som används i SFL Säkerhetsvärdering bedöms därför ge en ändamålsenlig representation av doskonsekvenser för möjliga utvecklingar av förhållanden på en anläggningsplats vid den svenska kusten.

Det föreslagna förvarskonceptets funktion beskrivs kortfattat nedan, med utgångspunkt från resultaten från basfallet. Resultat och slutsatser från utvärderingen diskuteras och sammanfattas i avsnitt 6.1.5.



Figur 6-7. Schematisk bild över modellkedjan som användes i SFL säkerhetsvärdering för beräkningar av radionuklidtransport och dos (Shahkarami 2019).

Det föreslagna förvarskonceptets retarderande funktion

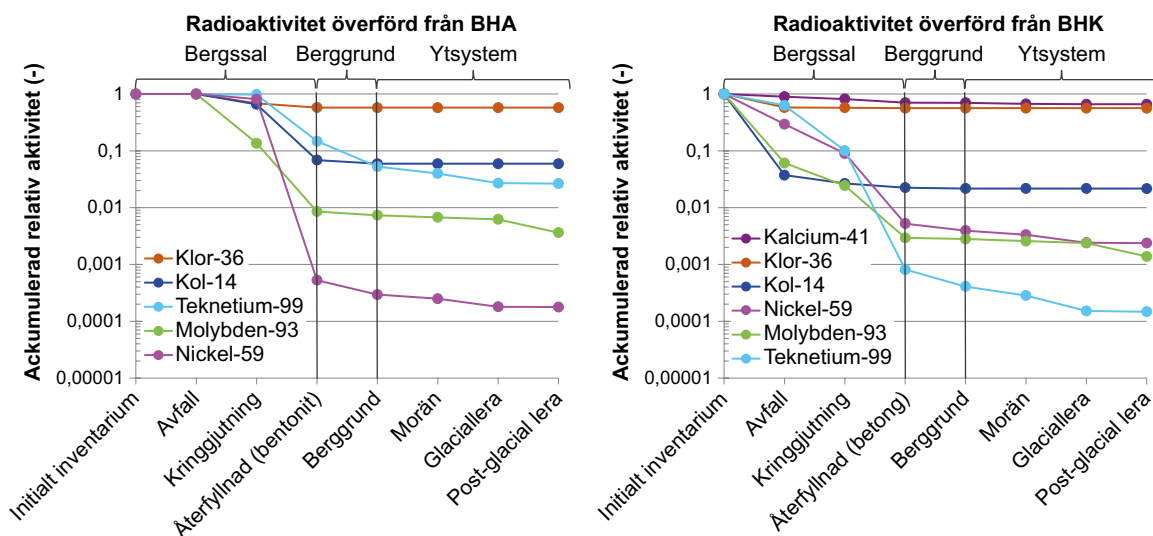
I detta avsnitt sammanfattas resultaten från basfallet med fokus på det föreslagna konceptets funktion. Den årliga dosen som beräknades, givet de antaganden som gjordes i basfallet, redovisas i nästa avsnitt. Redovisningen av resultaten utgår från de radionuklider som beräknats ge störst bidrag till den årliga dosen. Bidragande radionuklider sammanfaller i stor utsträckning med de radionuklider som har störst initialt inventarium i respektive bergssal och halveringstid längre än några tusentals år, det vill säga teknetium-99, kol-14 och klor-36 från BHA, samt molybden-93, kol-14 och nickel-59 från BHK.

Figur 6-8 illustrerar hur förvaret och omgivande berggrund bidrar till retardation av radionuklider i förvaret, omgivande berggrund och jordlager. För respektive radionuklid visas den ackumulerade radioaktiviteten (summerad över den en miljon år långa analysperioden) som överförs längs vägen från avfallet i BHA (vänstra bilden) och BHK (högra bilden) till biosfären i relation till den initiala radioaktiviteten. Följande faktorer ökar uppehållstiden i förvaret och bidrar därmed till att radionuklider sönderfaller innan de når en recipient:

- Det låga advektiva flödet genom avfallet.
- Merparten av radionukliderna i inventariet i BHK frigges långsamt från det metalliska avfallet via korrosion (radionuklider från de tunnaste metalldelarna, samt ytkontamination, antas dock vara tillgängligt för uttransport vid förslutning).
- Bentonitens låga hydrauliska konduktivitet, vilken resulterar i en diffusionsdriven transport i och ut ur BHA.
- Sorption på cement i avfallet och i återfyllnaden (BHK) samt på bentonit i återfyllnaden (BHA) (för vissa radionuklider minskas dock sorptionen på cement och bentonit i BHA då dessa antas bilda icke-sorberande komplex med sönderfallsprodukter från cellulosa).

Analysen av resultaten från basfallet visar att de tekniska barriärerna i BHA och BHK ger en effektiv retardation av radionuklider i bergssalarna, givet de platsegenskaper som antas för exempelplatsen. Retardationen i förvaret är särskilt effektiv för radionuklider med kortare halveringstid såsom kol-14 och molybden-93 (halveringstid 5 730 år respektive 4 000 år), se figur 6-8. För icke-sorberande kol-14 sönderfaller runt 95 procent av radioaktiviteten i bergssalarna. Retardationen beror dock på olika mekanismer i de två bergssalarna, i BHA beror det främst på en långsam diffusionsdriven uttransport, medan långsam frigörelse via korrosion är den viktigaste orsaken i BHK. Sorption på cement, samt en kortare halveringstid, gör att en större andel av inventariet av molybden-93 (mer än 99 procent) sönderfaller i bergssalarna.

Den ackumulerade radioaktiviteten som överförs från bergssalarna till omgivande berggrund är störst för den långlivade radionukliden klor-36 (halveringstid 311 000 år). Endast ungefär 40 procent av inventariet sönderfaller i bergssalarna (figur 6-8). Uttransporten sker dock långsamt och det årliga utflödet av klor-36 från respektive bergssal är mer än fem storleksordningar lägre än det initiala inventariet.



Figur 6-8. Radioaktivitet som överförs längs vägen från avfallet i BHA (vänstra bilden) och BHK (högra bilden) till biosfären. Den ackumulerade radioaktiviteten (summerad över den en miljon år långa analysperioden) som överförs visas i relation till den initiala radioaktiviteten för varje radionuklid.

Sorption på cement och bentonit (BHA), samt en kortare halveringstid, gör att en större andel av inventariet av teknetium-99 än klor-36 sönderfaller i bergssalarna. Retardationen i BHK är större än i BHA eftersom sorptionen på cement och bentonit av teknetium-99 i BHA försämras signifikant genom förekomsten av komplexbildare. Utan förekomst av komplexbildare skulle utsläppet av teknetium-99 från BHA minska med mer än fem storleksordningar.

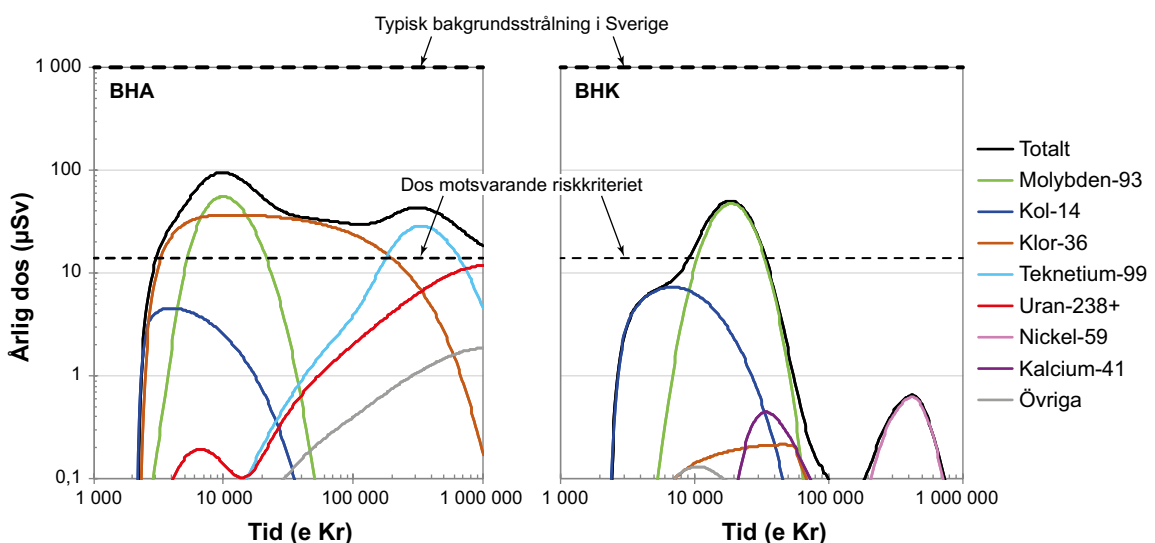
Nickel-59 har betydligt längre halveringstid (76 000 år) än kol-14 och molybden-93, men till skillnad från dessa båda radionuklider sorberar nickel-59 starkt på cement och bentonit. Detta tillsammans med långsam diffusionsdriven uttransport gör att mindre än en tusendel av inventariet av nickel-59 transporteras ut ur BHA. I BHK fördröjs uttransporten både av långsam frigörelse via korrosion, samt sorption på cement, vilket leder till sönderfall av nickel-59 i bergssalen. Uttransporten genom betongbarriären i BHK är större än genom bentonitbarriären i BHA. Här bidrar dock både långsam frigörelse via korrosion, samt sorption på cement, till sönderfall av nickel-59 i bergssalen och att mindre än en procent av inventariet av nickel-59 transporteras ut ur BHK.

Kvarhållande och sönderfall i berggrunden har en marginell effekt på utsläppet till biosfären för radionuklider som inte sorberar i berggrunden, till exempel klor-36, kol-14 och molybden-93 (figur 6-8). Även för långlivade, svagt sorberande radionuklider som teknetium-99 är effekten av passagen genom berggrunden begränsad.

Beräknad dos för en representativ individ i den mest exponerade gruppen

Då det finns relevanta skillnader mellan bergssalarna BHA och BHK avseende både avfallet och det föreslagna förvarskonceptet (avsnitt 6.1.2), redovisas den beräknade årliga dosen separat för de båda bergssalarna. På så sätt kan förhållanden under vilka respektive bergssal har förutsättningar för att uppfylla föreskriftskraven utvärderas.

Den beräknade årliga dosen i basfallet överskrider doskriteriet med en faktor 4 för BHK och en faktor 6 för BHA (figur 6-9). För en uppsättning radionuklider är den årliga dosen inom en storleksordning från doskriteriet: kol-14 och molybden-93 för båda bergssalarna och teknetium-99, klor-36 samt radionuklider i sönderfallskedjan för uran för BHA. Här antas utsläppsområdet vara en myr som dräneras och odlas upp, då detta är den landanvändning som ger högst dos. Detta beror på att radionuklider kan ackumuleras i torv under en lång period innan människor exponeras och att de radionuklider som bidrar mest till den beräknade dosen huvudsakligen ger dos via matintag. Även brunnsvatten bidrar dock till dosen, huvudsakligen från teknetium-99 under den första delen av analysen och från sönderfallsprodukter i urans sönderfallskedja mot slutet av analysperioden.



Figur 6-9. Årlig dos från BHA (vänstra bilden) och BHK (högra bilden) i basfallet (se text). Den sammanlagda årliga dosen för alla radionuklider (svart linje), samt bidragen från de radionuklider som bidrar mest till den sammanlagda dosen visas. Den dos som motsvarar föreskrifternas riskkriterium (14 µSv), samt den dos som orsakas av naturlig bakgrundsstrålning i Sverige (ungefär 1000 µSv) visas med streckade svarta linjer.

Givet samma utsläpp av radioaktivitet från berggrunden till ytsystemen skiljer sig den årliga dosen mer än tre storleksordningar mellan olika radionuklider. Skillnaderna förklaras av skillnader i halveringstid, sorption i olika jordlager, växtupptag och radiotoxicitet. Molybden-93 ger exempelvis höga doser jämfört med nickel-59 givet samma utsläpp från berggrunden.

6.1.5 Diskussion och slutsatser

I detta avsnitt diskuteras resultaten av säkerhetsvärderingen för SFL med utgångspunkt från analysens målsättning (se steg 10 i figur 6-3):

- Utvärdering av under vilka förhållanden, i förvarets omgivningar, avfallet och barriärerna, som förvarskonceptet har potential att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning.
- Underlag för SKB att prioritera områden inom vilka kunskapsläget behöver fördjupas för att en fullständig säkerhetsanalys som uppfyller SSM:s krav ska kunna genomföras för SFL.

Vidare sammanfattas de slutsatser SKB drar av säkerhetsvärderingen.

Givet de antaganden som gjordes i utvärderingsfallet *dagens förhållanden* (basfallet) överskrider den beräknade årliga dosen den dos som motsvarar riskkriteriet för BHA och BHK var för sig (figur 6-9). Den totala beräknade dosen för SFL är ungefär tio gånger så hög som doskriteriet. I detta sammanhang är det viktigt att påminna om att den beräknade dosen är avhängig de antaganden som gjorts i säkerhetsvärderingen. Inventariet för radionuklider och andra material i BHA är behäftat med stora osäkerheter (avsnitt 6.1.2). I föreliggande analys skulle ett ändrat inventarium (högre eller lägre) ge en ändrad årlig dos som är proportionell mot inventarieändringen. Vissa aspekter av referensutvecklingens basvariant har exkluderats från basfallet, trots att de skulle kunna påverka barriärernas och förvarets funktion (avsnitt 6.1.2). Här kan speciellt nämnas processer som kan leda till att bentonitens egenskaper och funktion förändras under tiden fram till och efter förslutning. Vidare görs, i likhet med SKB:s tidigare säkerhetsanalyser för utbyggt SFR och Kärnbränsleförvaret, ett antal förenklade antaganden i beräkningen vilka sannolikt leder till en överskattning av de beräknade maximala radiologiska konsekvenserna (avsnitt 6.1.3).

Utvärderingen av klimatutveckling i utvärderingsfallen *ökad växthuseffekt* och *förenklad glaciationscykel* gav liknande eller lägre årlig dos än de som beräknades för *dagens förhållanden*. Resultaten kan inte ställas rakt av mot föreskrifternas riskkriterium, eftersom inget av de utvärderingsfall som inkluderats i säkerhetsvärderingen är valt för att motsvara ett huvudscenario i en fullständig säkerhetsanalys. Som beskrivs under rubriken Val av utvärderingsfall i avsnitt 6.1.3, används dock den beräknade årliga dosen som ett kvalitativt mått på potentialen att uppfylla föreskrifternas krav, och för jämförelse av hur olika antaganden påverkar förutsättningarna för kravuppfyllnad. Doskriteriet, det vill säga den dos som motsvarar riskkriteriet, används härvidlag som ett referensvärde för att utvärdera det föreslagna konceptets skyddsförmåga. Utvärderingsfall som resulterar i en årlig dos som överstiger doskriteriet indikerar att de förhållanden som antas råda i förvaret och dess omgivningar representerar en situation som är mindre gynnsam för att uppnå förvarets tänkta funktion. På motsvarande sätt indikerar en årlig dos som är lägre än doskriteriet att de förhållanden som antas råda i förvaret och dess omgivningar är mer gynnsamma för att uppnå förvarets tänkta funktion.

Potential att uppfylla myndighetskraven på säkerhet efter förslutning för BHA

• **Avfallskaraktärisering**

Under de första 100 000 åren efter förslutning domineras den beräknade årliga dosen från BHA av radionuklider med högt initialt inventarium och halveringstid längre än några tusen år (molybden-93, klor-36 och kol-14). Inventariet för det historiska avfallet är behäftat med stora osäkerheter, se vidare avsnitt 6.1.2. Resultatet av en bättre karaktärisering av det historiska avfallet kan inte förutspås, men som ett exempel skulle tio gånger lägre inventarium av dessa radionuklider i kombination med oförändrade eller lägre inventarium för andra radionuklider, ge en beräknad årlig dos som är lägre än doskriteriet givet de antaganden som görs i basfallet.

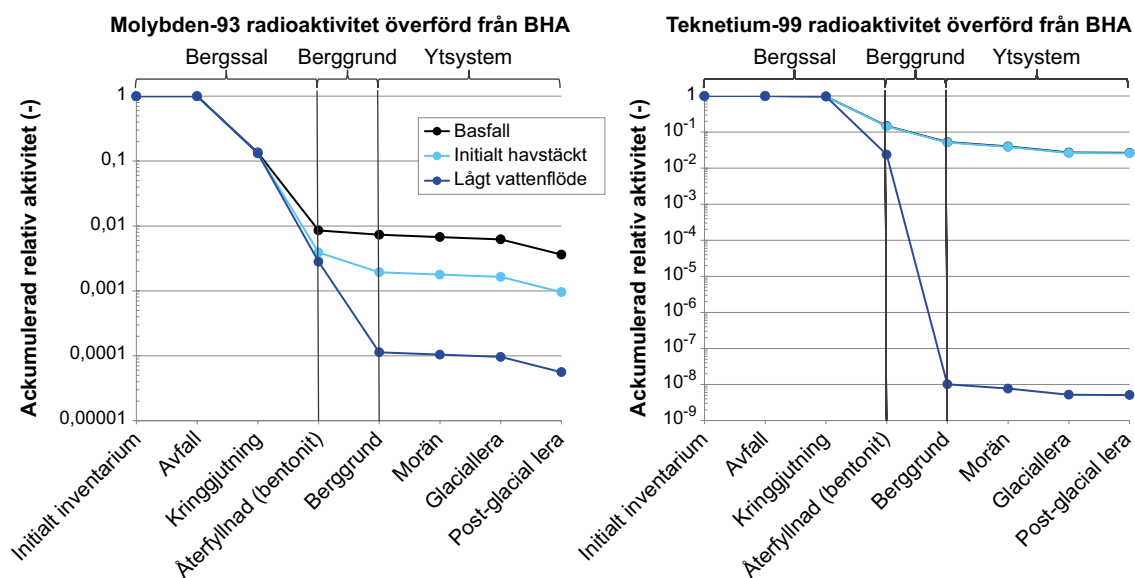
Efter 100 000 år efter förslutning bidrar teknetium-99 och radionuklider i sönderfallskedjan för uran-238 till en årlig dos som överskrider doskriteriet. Också här påverkas resultaten av osäkerheten i inventariet. Vidare har hela inventariet i BHA antagits vara tillgängligt för uttransport vid förslutning, trots att delar av avfallet är inducerat i metall. Andra delar av avfallet, framförallt

radionuklider i sönderfallskedjan för uran-238, är sannolikt i fast form. Mer realistiska antaganden skulle kunna leda till lägre utsläpp av dessa radionuklider, givet att också sönderfallsprodukterna hålls kvar av sorption på material i bergssalen. För perioden efter 100 000 år spelar också de antaganden som gjorts om förekomst och beständighet av komplexbildare i BHA stor roll, eftersom dessa kraftigt försämrar sorptionen för bland annat teknetium och radionuklider i sönderfallskedjan för uran. Detta illustreras i utvärderingsfallet *ingen effekt av komplexbildare i BHA*, där dessa radionuklider inte bidrar signifikant till den beräknade dosen.

- **Grundvattenflöde**

Andelen radionuklider som hålls kvar och sönderfaller i förvaret och i berggrunden skulle öka med en *lägre grundvattenflödeshastighet* än den som antas i basfallet. Effekten exemplifieras i utvärderingsfallet lägre grundvattenflödeshastighet där en faktor 100 lägre flöden än de som antas i basfallet ger en signifikant reduktion av utsläppen, såsom visas för molybden-93 och teknetium-99 i figur 6-10. Den största minskningen av utsläppen sker i berggrunden, där typiska transporttider av storleksordningen 10 000 till 100 000 år, är tillräckliga för att uppfylla doskriteriet givet de antaganden som gjorts i säkerhetsvärderingen. För en förvarsposition med 10 gånger lägre grundvattenflöde än i basfallet, med typiska transporttider i berggrunden av storleksordningen 1 000 år, förväntas däremot inte några stora sänkningar av utsläppen från bergssalen eller berggrunden. Detta beror på att utsläppet från bentonitåterfyllnaden till grundvattnet i berggrunden kontrolleras av diffusion, samt att transporttiden är signifikant kortare än halveringstiden för de dosdominerande radionukliderna.

Befintliga data från förundersökningar och platsundersökningar indikerar att mer fördelaktiga hydrogeologiska förhållanden än de som antas i basfallet kan hittas på större djup i Laxemar eller på andra platser i Sverige. En signifikant sänkning av grundvattenflödeshastigheterna är också att förvänta om förvaret lokaliserar på en plats som är havstäckt. Detta exemplifieras i säkerhetsvärderingen i utvärderingsfallet *initialt havstäckta förhållanden*, där grundvattenflödeshastigheterna antas vara en faktor 100 lägre än i basfallet under en havstäckt period. Resultatet är signifikant minskade utsläpp från bergssalen och från berggrunden, men effekten håller bara i sig tills den havstäckta perioden är slut. Längden på den initiala havstäckta perioden behöver således vara signifikant längre än halveringstiden för de radionuklider som bidrar till den beräknade dosen och för BHA betyder det hela analysperioden (figur 6-10).



Figur 6-10. Radioaktivitet från molybden-93 (vänstra bilden) och teknetium-99 (högra bilden) som överförs längs vägen från avfallet i BHA till biosfären. Den ackumulerade radioaktiviteten (summerad över den 1 miljon år långa analysperioden) som överförs visas i relation till den initiala radioaktiviteten för varje radionuklid. Resultaten visas för basfallet (svart linje), havstäckta förhållanden under de första 10 000 åren efter förslutning (ljusblå linje) och en faktor 100 lägre grundvattenflödeshastigheter (mörkblå linje). Notera att den ljusblå kurvan ligger rakt ovanpå den svarta i den högra bilden.

- **Barriärsystemets tålighet mot FEP som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutningen.**

Processer som påverkar bentonitbarrärens tidsutveckling är de mest relevanta för påverkan på barriärernas funktioner efter förslutning. Såsom beskrivs i referensutvecklingen för BHA, är montmorillonitombildning och bentonitkolloidfrigörelse två processer som man behöver ta hänsyn till. En studie av montmorillonitombildning, som sker till följd av växelverkan mellan bentonit och betong, har inletts inom säkerhetsvärderingen (avsnitt 11.3.4). Givet resultaten av denna studie behöver processens påverkan på bentonitbarriärens säkerhetsfunktioner, *lågt flöde i bergssalen* och *god retention*, utvärderas. För att kvantifiera effekterna av denna process på den beräknade dosen i framtida analyser för SFL, behöver denna process konceptualiseras på ett adekvat sätt i radionuklidtransportberäkningarna.

Bentonitkolloidfrigörelse diskuteras i referensutvecklingen, men processen har inte kvantifierats för exempelplatsen i säkerhetsvärderingen då de geokemiska förhållandena på förvarsdjup antagits vara sådana att kolloidfrigörelse förhindras. I framtida analyser för SFL behöver processen kvantifieras med utgångspunkt från studier utförda för Kärnbränsleförvaret (avsnitt 11.3.2), och i tillämplig utsträckning konceptualiseras i radionuklidtransportberäkningarna.

Bentonitbarriärens mekaniska utveckling, speciellt under den initiala perioden av återmättnad, diskuteras i referensutvecklingen. För att underbygga diskussionen om barriärsystemets robusthet behöver påverkan av återmättnad på bentonitbarriären analyseras i en framtida analys.

Egenskaper i den omgivande berggrunden behöver vara sådana att de tekniska barriärernas integritet inte försämras och begränsningen av utflöde av radionuklider upprätthålls. En detaljerad analys kan sedan ge underlag för optimering av bentonitbarriärens egenskaper och geometrin i referensutformningen för BHA.

Potential att uppfylla myndighetskraven på säkerhet efter förslutning för BHK

- **Korrosion av metalliskt avfall**

Den långsamma frigörelsen av radionuklider via korrosion från det metalliska avfallet är viktig för att begränsa utsläppen av radionuklider från bergssalen. Den korrosionsrat som antagits i basfallet (10 nm/år) har hämtats från SR-PSU. Denna är högre än nyligen rapporterade korrosionsrater för rostfritt stål i en alkalisk syrefri miljö. För PSAR för utbyggt SFR har ett spann tagits fram för att representera osäkerheten i korrosionsraten för rostfritt stål i en alkalisk syrefri miljö, där korrosionsraten som antas i basfallet för säkerhetsvärderingen är tio gånger högre än det lägsta värdet i spannet. Känsligheten för denna osäkerhet testades i utvärderingsfallet *lägre korrosionsrat i BHK*. En minskning av den antagna korrosionsraten till en tiondel (1 nm/år) ger minskade utsläpp och doser med ungefär en faktor fyra, och därmed en beräknad dos precis under doskriteriet. Att effekten inte är större beror på att den inducerade aktiviteten som finns i metalldelar som är tunnare än 1 mm antas vara tillgänglig för uttransport vid förslutning. En översyn av de antaganden som gjorts, med avseende på korrosionsrat och andel av den inducerade aktiviteten som är tillgänglig för uttransport vid förslutning, behöver göras i en framtida analys.

- **Betongåterfyllnad**

Återfyllnadsbetongens kvalitet är ett designval, och med tätare betong än den som antas i basfallet har BHK potential att uppfylla riskkriteriet givet övriga antaganden i basfallet. Utvärderingsfallet *alternativ betongåterfyllnad i BHK* antar transportegenskaper som motsvarar de som uppmätts för en betong innehållande tillsatser av kalksten och dolomit (Lagerblad et al. 2017). Denna betong har använts för konstruktion av komponenter motsvarande kassunerna i 2BMA som genomförts i Äspölaboratoriet (Mårtensson och Vogt 2019). Vidare har betongdegradering för denna typ av betong modellerats och analyserats av Idiart et al. (2019b). Resultaten av utvärderingsfallet visar att utsläppet av radionuklider från bergssalen minskar med mer än två storleksordningar för den dosdominerande radionukliden molybden-93 (se vänstra bilden i figur 6-11). Även utsläppet av kol-14 påverkas. Den beräknade maximala dosen är mer än en storleksordning lägre än i basfallet och således med marginal under doskriteriet.

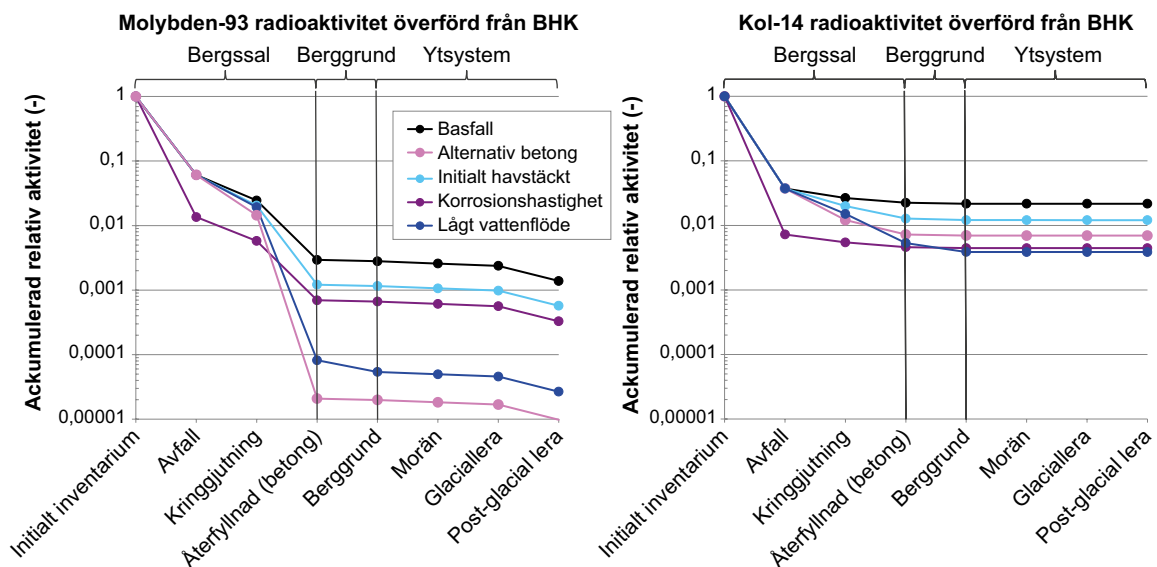
- **Grundvattenflöde**

Liksom för BHA ökar andelen radionuklider som kvarhålls och sönderfaller i förvaret och i berggrunden med en *lägre grundvattenflödes hastighet* än den som antas i basfallet. Effekten exemplifieras i utvärderingsfallet lägre grundvattenflödes hastighet där en faktor 10 lägre flöden än de som antas i basfallet (det vill säga med ett totalt flöde genom BHK på $10^{-1} \text{ m}^3/\text{år}$) ger en signifikant reduktion av utsläppen, såsom visas för molybden-93 och kol-14 i figur 6-11. Då advektion i basfallet dominerar flödet genom BHK ger det minskade flödet en kraftigare minskning av transport av radionuklider från bergssalen till berggrunden än det gör i BHA där bentonitbarriären effektivt begränsar det advektiva flödet. Den beräknade maximala årliga dosen blir mindre än en tiondel av basfallet och således med marginal under doskriteriet. Även gångtider i berggrunden ökar med en faktor 10, men detta leder inte till en tillräcklig ökning av uppehållstiden för att det i någon nämnvärd omfattning ska påverka den andel av de dominerande radionukliderna som sönderfaller i berggrunden.

På samma sätt som för BHA exemplifieras effekten av att välja en plats som är havstäckad vid förslutning i utvärderingsfallet *initialt havstäckta förhållanden*, där grundvattenflödes hastigheterna antas vara en faktor 100 lägre än i basfallet under en havstäckad period. Resultatet innebär signifikant minskade utsläpp från bergssalen och från berggrunden, men effekten håller bara i sig tills den havstäckta perioden är slut. Längden på den initiala havstäckta perioden behöver således vara signifikant längre än halveringstiden för de radionuklider som bidrar till den beräknade dosen. För BHK, vars radionuklidinventarium innehåller betydligt mindre långlivade radionuklider än BHA, skulle en period av ungefär 50 000 år krävas.

- **Barriärsystemets tålighet mot FEP som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutningen.**

Säkerhetsfunktionerna för förvarskomponenterna i BHK är *god retention* i avfallsdomänen, samt *lågt flöde genom bergssalen* och *god retention* i betongbarriären. I avfallsdomänen upprätthålls god retention genom ett högt pH, vilket leder till långsam korrosion och därmed långsam gasbildning, samt hög tillgänglig sorptionsarea på cement i kringgjutningen. I betongbarriären ger betongens låga hydrauliska konduktivitet ett lågt flöde genom förvaret, och tillsammans med en hög tillgänglig sorptionsarea på cement, och låg diffusivitet i betongen ger det god retention.



Figur 6-11. Radioaktivitet från molybden-93 (vänstra bilden) och kol-14 (högra bilden) som överförs längs vägen från avfallet i BHK till biosfären. Den ackumulerade radioaktiviteten (summerad över den 1 miljon år långa analysperioden) som överförs visas i relation till den initiala radioaktiviteten för varje radionuklid. Resultaten visas för basfallet (svart linje), havstäckta förhållanden under de första 10 000 åren efter förslutning (ljusblå linje) och en faktor 10 lägre grundvattenflödes hastigheter (mörkblå linje). Vidare visas resultaten i utvärderingsfallet med 10 gånger lägre korrosionshastighet än i basfallet (gul linje) och fallet med (tätare) alternativ betongåterfyllnad i BHK (magenta linje).

Processer som påverkar utveckling av betongbarriären över tid är de mest relevanta för påverkan på barriärernas funktioner efter förslutning. Cementbaserade material som kommer i kontakt med grundvatten påverkas av vattnets kemiska sammansättning samt av vattenflödets storlek och riktning. Upplösning eller utfällning av mineral förändrar betongens porstruktur, vilket påverkar materialets hydrauliska och mekaniska egenskaper, och dessa processer påverkar även masstransportegenskaper hos betongmatrisen och pH i porvattnet. SKB har under föregående Fud-period fortsatt insatserna att fördjupa processförståelsen rörande degradering av betong under förvarsbetingelser, både med hjälp av modellering och genom experimentella studier (avsnitt 10.1.1 samt 10.1.6). De genomförda modelleringsarbetena har haft sin utgångspunkt i utformningen av bergssalen BHK i SFL och bland annat omfattat utveckling av kemiska och hydrauliska egenskaper hos betong i ett perspektiv av upp till en miljon år under inverkan av hydro-kemo-mekaniska processer (Idiart and Shafei 2019, Idiart and Laviña 2019, Idiart et al. 2019a). Även studier av inverkan av alternativa betongsammansättningar (Idiart et al. 2019b) har genomförts. De huvudsakliga slutsatserna är att:

- Den huvudsakliga degraderingsprocessen är urlakning av kalcium vilket leder till en gradvis förlust av portlandit och CSH-gel.
- Degraderingshastigheten i återfyllnaden i BHK är mycket låg, huvudsakligen på grund av låga vattenflöden i återfyllnadsbetongen.
- Degraderingshastigheten i återfyllnaden i BHK är lägre för den betong innehållande stora mängder finmald kalksten som utvecklats inom ramen för SR-PSU än för den anläggningsbetong som antagits i basfallet för säkerhetsvärdering. Betongens initiala porositet och transportegenskaper har en större inverkan på omfattningen av degraderingen över tid än betongens kemiska sammansättning för de fall som studerats här.

Inom dessa studier har det även visats att mekaniska laster förväntas orsaka endast mycket begränsade skador i anslutning till gränssytan mellan berg och återfyllnaden i BHK. Enda undantaget är glaciationslaster vilka kan orsaka mer omfattande skador i en större del av återfyllnaden.

Sammantaget visar dessa studier att förändringar av betongens egenskaper i BHK efter förvarets förslutning kommer att ske mycket långsamt. Barriärsystemets tålighet mot FEP som inkluderats i säkerhetsvärderingen som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutning förväntas därför vara god under de perioder som omfattas av analysen av förvarets säkerhet efter förslutning. I säkerhetsvärderingen har effekter av möjliga jordskalv på barriärsystemets tålighet inte utvärderats. Detta behöver göras i framtida analyser för SFL och resultaten kan bidra till optimering av förvarsdesignen.

Betydelse av förhållanden i förvarets omgivning

De flesta resultaten som redovisas i säkerhetsvärderingen baseras på utvärderingsfall där utsläppet av radioaktivitet från berggrunden antas komma upp i ett specifikt utsläppsområde (biosfärsobjekt 206, se figur 6-1). I utvärderingsfallet *alternativt utsläppsområde* visas att den beräknade årliga dosen kan variera med flera storleksordningar beroende på utsläppsområdets egenskaper, samt att skillnaderna mellan utsläppsområden kan variera mellan olika radionuklider. För molybden-93 och nickel-59 till exempel ökar dosen om grundvattenflödet från berggrunden ökar, medan det motsatta gäller för kol-14. Det finns också systematiska skillnader mellan utsläppsområden i Laxemar och Forsmark som beror på lägrevariationer i topografisk relief (och mindre grundvattenflöde från berggrunden) i Forsmark.

6.1.6 Områden där kunskapsläget behöver förbättras

På basis av analysen har behov av ett förbättrat kunskapsläge, till stöd för framtida fördjupade analyser av säkerhet efter förslutning, identifierats. Häri inkluderas behov av forskning och utveckling som syftar till ett förbättrat kunskapsläge kring egenskaper, händelser och processer (FEP) som kan påverka säkerheten efter förslutning. Eftersom det finns många likheter mellan SFL och SFR samt Kärnbränsleförvaret (avsnitt 6.1.1) sammanfaller ofta behoven av ett förbättrat kunskapsläge för SFL med behov som identifierats för SFR och/eller Kärnbränsleförvaret. Under Fud-perioden planeras forskning och utveckling som svarar mot de behov som identifierats i säkerhetsvärderingen. Insatserna rör främst följande områden:

Långlivat låg- och medelaktivt avfall

- Fördjupad kunskap om inventariet. Detta gäller såväl prognosticerade avfallsmängder som avfallets innehåll av radionuklider, se avsnitt 7.2.1.
- Fördjupad kunskap om gasbildande processer i det historiska avfallet och om gasproduktion kan påverka bentonitbarriärens förmåga att fördröja uttransport av radionuklider, se avsnitt 7.1 och 10.1.2.

Betongbarriärens tidsutveckling i BHK

- Fortsatta studier av interaktioner mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser, se avsnitt 10.1.1.

Bentonitbarriärens tidsutveckling i BHA

- Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad, se avsnitt 11.1.
- Bentonitmaterialets egenskaper i mättat tillstånd, se avsnitt 11.2.
- Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad, se avsnitt 11.3.

Även behov av utveckling av verktyg och metoder som används i utvärderingen av säkerhet efter förslutning har identifierats:

- Givet de osäkerheter som finns kring innehållet i det historiska avfallet kan verktygen för hantering av osäkerheter i säkerhetsanalyserna behöva utvecklas.
- Givet en utvecklad beskrivning av bentonitbarriärens utveckling över tid kan verktygen för beräkning av grundvattenflöde och radionuklidtransport i bergssalarna och omgivande berggrund behöva utvecklas.
- Effekter av möjliga jordskalv har inte tagits hänsyn till i säkerhetsvärderingen. I framtida analyser för SFL behöver barriärsystemets tålighet för dessa processer utvärderas. Resultaten kan bidra till optimering av förvarsdesignen.
- För val av bästa tillgängliga teknik och optimering av förvarsdesignen för SFL skulle det vara fördelaktigt med en ökad funktionalitet hos verktygen för modellering av grundvattenflöde och radionuklidtransport i bergssalar och omgivande berggrund. I detta sammanhang är metoder som tillåter flexibilitet i geometrier och materialegenskaper av särskilt intresse.

Planeringen för att möta dessa behov är avhängig resultaten av planerad forskning och utveckling och kommer att detaljeras under Fud-perioden.

6.2 Lokalisering av SFL

SKB har sedan tidigare lagt fast grundläggande förutsättningar för lokalisering av slutförvar för radioaktivt avfall:

- Säkerheten under drift och efter förslutning samt påverkan på miljön måste uppfylla kraven i kärntekniklagen och miljöbalken.
- Det lokala politiska och opinionsmässiga stödet behöver vara brett och stabilt.

Dessa förutsättningar ligger också till grund för SKB:s arbete med lokalisering av SFL. I det arbetet är resultat från utredningar, undersökningar och erfarenheter från lokalisering av SKB:s övriga slutförvar, särskilt Kärnbränsleförvaret, ett viktigt underlag.

6.2.1 Krav i lagar och föreskrifter rörande lokalisering

En grundläggande utgångspunkt för lokaliseringen av SFL är de krav som finns i miljöbalken (SFS 1998:808), kärntekniklagen (SFS 1984:3) och Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter. Dessa är av allmän karaktär, varför mycket beror på hur de tolkas och tillämpas i praktiken.

Miljöbalken och dess krav på samråd ger ett ramverk för processen fram till ansökan om tillåtlighet och tillstånd för uppförande och drift av SFL. Inom dessa ramar styrs lokaliseringsprocessen i betydande grad av vad SKB anger i sitt program och vad myndigheter, kommuner och andra instanser framför.

Nedan sammanfattas de krav avseende lokalisering som finns i miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen och de ytterligare riktlinjer som ges i Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd.

Miljöbalken

I miljöbalkens (SFS 1998:808) andra kapitel finns ett generellt krav för lokaliseringen av verksamheter, den så kallade lokaliseringsprincipen, som anger följande: *6 § För en verksamhet eller åtgärd som tar i anspråk ett mark- eller vattenområde skall det väljas en plats som är lämplig med hänsyn till att ändamålet skall kunna uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön.*

I miljöbalkens 2 kap finns även skälighetsregeln 7 § som anger följande: *Kraven i 2–5 §§ och 6 § första stycket gäller i den utsträckning det inte kan anses orimligt att uppfylla dem. Vid denna bedömning skall särskilt beaktas nyttan av skyddsåtgärder och andra försiktighetsmått jämfört med kostnaderna för sådana åtgärder.*

Lagkonstruktionen kan beskrivas som ett långtgående allmänt krav balanserat av en regel som öppnar för skälighetsbedömning från fall till fall. Den plats som väljs ska dels vara lämplig i sig (detta är en grundförutsättning för att platsen över huvud taget ska bli aktuell), dels orsaka minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön. Platsen ska således passa för såväl ändamålet med verksamheten som för hälso- och miljöskyddsintresset i allmän mening i enlighet med miljöbalkens portalparagraf 1 kap 1 §: *Bestämmelserna i denna balk syftar till att främja en hållbar utveckling som innebär att nuvarande och kommande generationer tillförsäkras en hälsosam och god miljö. En sådan utveckling bygger på insikten att naturen har ett skyddsvärde och att människans rätt att förändra och bruka naturen är förenad med ett ansvar för att förvalta naturen väl.*

I miljöbalken finns också kapitel 6 rörande miljöbedömningar. I 6 kap 35 § anges att en miljökonsekvensbeskrivning i den specifika miljöbedömningen ska redovisa ”uppgifter om alternativa lösningar för verksamheten eller åtgärden” vilket inkluderar frågan om alternativa platser.

Miljöbalken ska tillämpas så att (1 kap. § 1)

1. *människors hälsa och miljön skyddas mot skador och olägenheter oavsett om dessa orsakas av föroreningar eller annan påverkan,*
2. *värdefulla natur- och kulturmiljöer skyddas och vårdas,*
3. *den biologiska mångfalden bevaras,*
4. *mark, vatten och fysisk miljö i övrigt används så att en från ekologisk, social, kulturell och samhällsekonomisk synpunkt långsiktigt god hushållning tryggas,*
5. *återanvändning och återvinning liksom annan hushållning med material, råvaror och energi främjas så att ett kretslopp uppnås.*

För att främja en god hushållning av mark- och vattenområden så har ansvariga myndigheter anvisat områden av riksintresse för olika ändamål. Bestämmelser om avvägning mellan oförenliga riksintressen finns i 3 kap 10 §. Områden av riksintresse för slutförvaring av kärnavfall finns i Forsmark i Östhammars kommun samt i Simpevarp/Laxemar i Oskarshamns kommun. Lokaliseringen av ett slutförvar för kärnavfall begränsas även av bestämmelserna i 4 kap 3 och 4 §§, av vilka följer att nya kärntekniska anläggningar inte får anläggas inom vissa angivna områden.

Kärntekniklagen

Kärntekniklagen (SFS 1984:3) innehåller inga specifika lokaliseringsbestämmelser utan hänvisar till 2 kap. i miljöbalken. Lokalisering behandlas dock i Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd till 2 och 3 §§ i SSMFS 2008:21. I råden konstaterar Strålsäkerhetsmyndigheten att: *Platsen för ett slutförvar och förvarsdjupet bör väljas så att den geologiska formationen ger tillräckligt stabila och*

gynnsamma förhållanden för att slutförvarets barriärer ska fungera som avsett under tillräckligt lång tid. De förhållanden som avses rör primärt temperatur, hydrologi, samt mekaniska (till exempel bergmekanik, seismologi) och kemiska (geokemi, inkl. grundvattenkemi) faktorer. Platsen för ett slutförvar bör vidare förläggas på ett betryggande avstånd från naturresurser som utnyttjas i dag eller kan komma att utnyttjas i framtiden.

Strålskyddslagen

Strålskyddslagen innehåller, i likhet med kärntekniklagen, inga specifika lokaliseringsbestämmelser, men Strålsäkerhetsmyndigheten har med stöd av denna lag formulerat att: *Förlägningsplats, 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.* (SSMFS 2008:37, Allmänna råd till 4, 8 och 9 §§).

I samma föreskrifter ställer myndigheten krav som berör människors hälsa och miljön, och som har betydelse för de generella värderingar som lokaliseringen måste bygga på: *Människors hälsa och miljön ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning, dels under den tid då de olika stegen i det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall genomförs, dels i framtiden. Det slutliga omhändertagandet får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som accepteras inom Sverige.* (SSMFS 2008:37, 3 §).

För utsläpp av radioaktiva ämnen från kärntekniska anläggningar i drift gäller SSMFS 2008:23. För anläggningar belägna inom samma geografiska område gäller att: *Den effektiva dosen till någon individ i den kritiska gruppen av ett års luft- och vattenutsläpp av radioaktiva ämnen från alla anläggningar belägna inom samma geografiskt avgränsade område ska inte överstiga 0,1 millisievert (mSv). Den effektiva dosen, som avser dosen från extern bestrålning och den intecknade dosen från intern bestrålning, ska integreras över en period av 50 år.* (SSMFS 2008:23, 5 §).

Krav på barriärfunktion och säkerhet efter förslutning

Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter preciserar det krav på säkerhet efter förslutning, det så kallade riskkriteriet, som ett slutförvar ska uppfylla: *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.* (SSMFS 2008:37, 5 §).

Det kan noteras att detta riskkriterium har satts så att det gäller för varje förvar för sig i det fall flera förvar skulle vara lokaliserade till samma plats (se exempelvis SSIFS 1998:1, SSI:s kommentarer till föreskrifterna).

Slutligen ges anvisningar om hur säkerheten ska uppnås med hjälp av barriärer och deras funktion. I SSMFS 2008:21, 2 och 3 §§ anges att: *Säkerheten efter förslutning av ett slutförvar ska upprätthållas genom ett system av passiva barriärer. Varje barriär ska ha till funktion att på ett eller flera sätt medverka till att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen, antingen direkt, eller indirekt genom att skydda andra barriärer i barriärsystemet.*

I allmänna råd till 2 och 3 §§ i samma föreskrifter anger SSM: *Vilka barriärer eller barriärfunktioner som behövs i ett slutförvar beror på dess innehåll av radioaktiva ämnen, andra ämnen som påverkar barriärernas säkerhetsfunktioner och på slutförvarets utformning och lokalisering.*

6.2.2 Lokaliseringsfaktorer för SFL

En framtida ansökan om tillstånd för att uppföra SFL kommer att behöva innehålla underlag som visar att den plats som valts uppfyller de krav som redovisats ovan. Ansökan behöver också innehålla systematiska jämförelser med andra möjliga lokaliseringalternativ med hänsyn till faktorer som speglar kraven på lokaliseringen. Den valda platsen ska ha goda förutsättningar för att uppfylla krav på säkerhet efter förslutning. För att bedöma detta krävs underlag i form av geovetenskapliga data och annan information. Vidare ska platsen ge goda förutsättningar för att tekniskt uppföra och driva ett slutförvar så att etableringen ger begränsad påverkan på miljö och människors hälsa.

Robusthet och effektivitet i genomförandet ska eftersträvas och kostnaderna för etablering och drift ska vara rimliga. Det ska också vara troligt att det går att uppnå samhällelig acceptans för ett slutförvar på den valda och den alternativa platsen. Inom SKB:s program har alltsedan det påbörjades på 1970-talet ett omfattande underlag tagits fram som kan användas för utvärdering och jämförelser av platser för slutförvaring. En systematik baserad på en indelning i lokaliseringsfaktorer har också utarbetats. Detta underlag och den systematik med lokaliseringsfaktorer som SKB nu har tillgång till och erfarenhet av kommer till stor del att kunna användas också för lokaliseringen av SFL.

SKB har såväl i ansökan för Kärnbränsleförvaret (SKB 2010d) som för utbyggnad av SFR (SKB 2013b) valt att använda sig av följande huvudgrupper av faktorer vid värdering och jämförelser av lokaliseringsalternativ:

- Säkerhet efter förslutning.
- Teknik för genomförande.
- Miljö och hälsa.
- Samhällsaspekter.

Denna indelning i huvudgrupper är väl förankrad hos myndigheter och kommuner varför det finns all anledning att tillämpa den också för en lokalisering av SFL. I det följande ges en översiktlig beskrivning av faktorer som ingår i dessa huvudgrupper och hur de tillämpas på SFL.

Säkerhet efter förslutning

Utvärderingen av föreslaget förvarskoncept för SFL (avsnitt 6.1) visar att de krav som behöver ställas på berget som barriär är likartade de som ställs för Kärnbränsleförvaret eftersom båda slutförvaren ska ha skyddsförmåga under lång tid. Några likheter i krav som är av särskild betydelse när det gäller lokalisering av SFL är till exempel låg seismisk aktivitet, förvarsdjupet som behöver vara tillräckligt för att undvika eventuell påverkan av framtida permafrost och att förvarsberget bör ha låg vattengenomsläpplighet. En väsentlig skillnad är att dimensionerande avfallsvolymer och valt förvarskoncept medför att SFL blir ett litet förvar med ett ytbehov av cirka 200×200 meter, vilket är ungefär en hundradel av Kärnbränsleförvarets. En annan viktig skillnad är att avfallet i SFL endast alstrar mindre värmemängder, så bergets termiska egenskaper är av mindre betydelse. Det underlag som tagits fram avseende Sveriges berggrund och lämplighet avseende slutförvaring av använt kärnbränsle är således tillämpliga för lokalisering av SFL men med beaktande av att det är ett geometriskt sett mycket mindre slutförvar som ska byggas.

Baserat på utvärderingen av föreslaget förvarskoncept för SFL och erfarenheter av de säkerhetsanalyser som SKB tidigare genomfört för slutförvar i kristallin berggrund bedöms följande geovetenskapliga faktorer vara av betydelse för slutförvaring av SFL-avfall:

• Vattengenomsläpplighet i berggrunden

Hydrogeologiska förhållanden styr grundvattenströmningen i förvarsvolymen. I en kristallin (granitisk/urberg) berggrund är det frekvensen av, och vattengenomsläppligheten hos, de vattenförande sprickorna som är de avgörande faktorerna. Dessa parametrar påverkar tillförseln av ämnen som skulle kunna påverka processer i de tekniska barriärerna och avfallet, liksom förutsättningarna för transport av lösta ämnen i bergssalarna, samt transport från förvaret till ytan och därmed tiden det tar för radioaktiva ämnen att spridas via grundvattnet. För radionuklider med kortare halveringstider och som sorberar i berggrunden kan också en låg vattengenomsläpplighet tillsammans med låg hydraulisk gradient innebära att dessa delvis hunnit sönderfalla innan de når ytan. Säkerhetsvärderingen visar att vattengenomsläppligheten är av stor betydelse, speciellt för utflödet av radionuklider från bergssalarna, vilket då innebär att det är ett starkt önskemål att den är låg i den del av berggrunden där förvaret förläggs.

• Hydraulisk gradient

Låg hydraulisk gradient bidrar till lågt grundvattenflöde i ett förvar. Den avgörande faktorn för den hydrauliska gradienten är terrängens relief. Ju kraftigare nivåvariationerna är i terrängen desto större är potentialen för lokala cirkulationsceller på grund av förhöjda lokala hydrauliska

gradienter som dominerar över den flackare regionala gradienten. För stora delar av landet, till exempel i de mestadels låglänta svenska kustområdena, är dock skillnader i hydraulisk gradient mellan olika platser inte så stora att det påverkar grundvattenflödet mer än marginellt vid en jämförelse. Låg hydraulisk gradient ses som ett önskemål vid lokalisering.

- **Grundvattnets sammansättning**

Den kemiska sammansättningen hos grundvattnet kan ha en inverkan på processer i avfallet, förvarets barriärer och i berget. Grundvattnets sammansättning är en faktor som behöver beaktas vid lokalisering.

- **Reducerande förhållanden**

Reducerande förhållanden i förvaret är betydelsefullt för att upprätthålla en god sorption i barriärerna. Detta underlättas om det råder reducerande förhållanden i berggrunden på förvarsdjup. Den stora mängden järn som kommer att finnas i förvaret bidrar även till reducerande förhållanden.

Reducerande förhållanden i berggrunden betraktas som ett krav i samband med lokalisering. Erfarenhetsmässigt kan sådana förhållanden förväntas vid samtliga platser och på de djup som kan vara aktuella för SFL.

- **Seismisk aktivitet**

Möjliga konsekvenser av jordskalv behöver beaktas vid platsanpassning och utformning av slutförvar för radioaktivt avfall. Bland annat ska större deformationszoner genom förvaret undvikas. Skillnader i jordskalvsfrekvens mellan olika delar av landet bör därför inte medföra större olikheter ur ett riskperspektiv.

- **Malmpotential**

I en säkerhetsanalys bedöms sannolikhet och konsekvens av framtida oavsiktligt intrång i förvaret, liksom andra av människor orsakade oavsiktliga händelser som kan påverka förvarets säkerhet efter förslutning. De faktorer som måste beaktas vid slutförvaring av radioaktivt avfall är risk för intrång i förvaret eller dess närhet på grund av sökande eller brytning av malmmineral (naturresurser) och risk för brunnborrning. Avsaknad av malmpotential är ett krav vid lokalisering.

Eftersom malmpotential ofta är kopplad till specifika geologiska miljöer/bergarter kan en kvalificerad bedömning ofta göras utifrån tidigare känd malmpotential i regionen, i kombination med allmän kännedom om den geologiska miljön vid förläggningsplatsen, eventuellt kompletterat med specifik information från exempelvis geofysiska data eller borrhävar.

- **Risk för brunnborrning**

Risken för att någon i framtiden borrar ett hål i eller i anslutning till förvaret för att utvinna grundvatten eller energi (energibrunn) går inte att utesluta. I säkerhetsanalysen analyseras därför konsekvenser av att människor i framtiden oavsiktligt borrar en sådan brunn och använder sig av dricksvatten från brunnen. Risken för oavsiktlig brunnborrning genom ett förvar minskar med förvarsdjupet. Då SFL avses förläggas på ett relativt stort djup blir risken generellt låg. Vid lokalisering är låg risk för brunnborrning genom eller så nära förvaret att det kan medföra risk för kontaminerat brunnsvatten ett önskemål.

- **Klimat- och klimatrelaterade processer**

Klimatet kan på lång sikt påverka förvarets geologiska och hydrologiska omgivning och därigenom dess barriärer. Bland annat finns risk för frysning av porvatten under kalla perioder med permafrost, vilket kan påverka de tekniska barriärernas funktion och grundvattnets flödesmönster. Variationer i havsytans och jordskorpan höjd påverkar även strandlinjens position, vilket kan ha betydelse vid en kustnära lokalisering. Vidare kan de skjuspänningar som uppkommer i samband med passage av en inlandsisfront påverka de tekniska barriärernas funktion.

Konsekvenserna av havsyteförändringar, landhöjning och tillväxt av permafrost och inlandsis i samband med kommande perioder av kallt klimat utreds i en säkerhetsanalys för den valda platsen. Om SFL placeras på tillräckligt djup för att undvika negativa effekter av frysning förväntas klimatvariationers påverkan på lokalisering vara liten. I första hand kan antagna framtida klimatvariationer påverka teknisk utformning och förvarsdjup.

Teknik för genomförande

De enskilda lokaliseringsfaktorer som har betydelse för de tekniska förutsättningarna att etablera och driva ett SFL är:

- **Bygge och drift av berganläggningar**

Bergförhållandena på platsen ska ge goda förutsättningar för att bygga och driva förvarets bergutrymmen på ett säkert och effektivt sätt. Exempelvis är sprickfattigt berg med hög hållfasthet fördelaktigt. Tillräckliga volymer med lämpligt berg ska finnas för att med god marginal hysa ett förvar som efter platsanpassning uppfyller kapacitetskraven.

- **Utrymme för anläggningar ovan och under mark**

Ovan mark behövs kontor, verkstäder, terminalbyggnad, körytor med mera. Under byggtiden tillkommer ytor för att hantera och tillfälligt lagra utsprängda bergmassor. Hur och var bergmassorna hanteras beror på lokala förutsättningar. SFL kräver inga omfattande anläggningar ovan mark och utrymmesbehovet är därmed mer begränsat än för de övriga SKB-förvaren. Eftersom berggrummen i SFL är mindre till utbredningen än såväl SFR som Kärnbränsleförvaret innebär det rimligen att det blir enklare att finna tillräckligt stora bergvolymer, utan större deformationszoner och med lämpliga egenskaper i övrigt.

- **Transporter**

Transporter av avfall till SFL kommer att behöva ske från kärnkraftverken, SKB:s anläggningar, ESS och Studsvik. Med undantag för ESS, finns på dessa platser infrastruktur anpassad för hantering och sjötransport av radioaktivt avfall. Detta inkluderar hamn och andra anläggningar, maskiner, fysiskt skydd samt tillgång till kärnteknisk kompetens. Vid en eventuell lokalisering av SFL vid ett annat kustläge krävs tillgång till lämplig hamn och vid en inlandslokalisering behöver också ett system för marktransport etableras. Tekniskt och säkerhetsmässigt är sådana lokaliseringar fullt möjliga ur transportsynpunkt, men de kräver tillkommande investeringar och acceptansen från olika samhällsintressen behöver säkras, i synnerhet vad gäller vägtransporter. Det är därför uppenbart att ur transportsynpunkt är platser i närheten av kärnkraftverken och Studsvik särskilt lämpliga.

- **Samordningsmöjligheter med befintlig eller planerad verksamhet**

Samlokalisering med befintlig kärnteknisk verksamhet ger samordningsmöjligheter. Slutförvaring av långlivat radioaktivt avfall är en del i SKB:s hanteringssystem och en lokalisering av förvaret till någon av de platser där SKB:s övriga avfallsanläggningar finns, det vill säga Forsmark och Simpevarp, ger särskilt goda synergimöjligheter och möjlighet till samutnyttjande av personal mellan anläggningarna. I relation till dessa platser ger alla andra alternativa platser nackdelar med avseende på resursbehov och effektiviteten i hela SKB:s verksamhet. Även möjliga nackdelar med samlokalisering med kärnteknisk eller annan industri behöver dock vägas in i bedömningen. Det kan gälla beroenden av infrastruktur eller service som tillhandahålls av annan part, risker för ömsesidiga störningar eller olycksrisker som indirekt kan påverka anläggningen.

- **Kostnader**

Givet att säkerhets- och miljökraven uppfylls utgör kostnaden för olika alternativ en viktig parameter för besluten om hur och var SFL ska etableras. Kostnadsuppskattningar för olika alternativ behöver beakta de totala systemkostnaderna för SFL och tillhörande osäkerheter i bedömningarna.

Miljö och hälsa

Lokaliseringen av ett slutförvar måste ta hänsyn till markanvändningsintressen och olika former av påverkan på miljön och människors hälsa. Hänsyn måste tas till skyddad och skyddsvärd natur, såsom riksintresse, naturreservat, Natura 2000-områden, nyckelbiotop, förekomst av skyddade arter eller liknande. I landskapet finns kulturmiljöer som är viktiga för att värna dess historiska kvaliteter och utveckla dem på ett hållbart sätt. Särskilt viktiga kulturmiljöer är sådana som fått någon form av skydd, exempelvis riksintressen för kulturmiljövård, byggnadsminnen, landskapsbildskydd och forn lämningar.

I ansökan om att få uppföra och driva anläggningen behöver påverkan på omgivningen på kort och lång sikt beskrivas i en miljökonsekvensbeskrivning. Den måste visa att lokaliseringen uppfyller miljömål, miljö kvalitetsnormer och hushållning av mark, material, råvaror och energi.

Generellt gäller att områden med befintlig industri är fördelaktiga ur miljö- och hälsosynpunkt eftersom man då inte tar någon orörd mark i anspråk och närområdet redan är påverkat av exempelvis buller och luftutsläpp.

Samhällsaspekter

För att slutförvaring av radioaktivt avfall ska kunna ske framgångsrikt krävs förtroende och acceptans från samhället på den plats och ort som det gäller samt tillgång till aktuellt markområde. Kommunfullmäktige i berörd kommun behöver ge sitt samtycke.

6.2.3 Befintligt lokaliseringsunderlag

Eftersom lokaliseringsfaktorerna för SFL i stort sett är desamma som för Kärnbränsleförvaret är det omfattande underlag som tagits fram sedan slutet av 1970-talet användbart vid bedömningar av var det finns potential för lokalisering av SFL.

Underlaget består av data och kunskap från följande kategorier av undersökningar och studier:

- Typområdesundersökningar som inleddes redan i slutet av 1970-talet i form av mätningar i 100-tals meter djupa borrhål. Programmet utgjorde en pionjärinsats, som under 1970- och 1980-talen byggde upp en omfattande geovetenskaplig databas över förhållandena på djupet i kristallin berggrund på olika håll i landet.
- Undersökningar inför lokalisering och bygge av SKB:s och andra kärntekniska tillståndshavares berganläggningar; Centralt mellanlager för använt bränsle (Clab), SFR, Äspölaboratoriet samt mellanlagren BFA på OKG:s område och AM i Studsvik.
- Förstudier av förutsättningarna i olika avseenden för en lokalisering i en specifik kommun. SKB gjorde under 1990-talet åtta förstudier, alla i frivillig samverkan med de berörda kommunerna.
- Översiktsstudier, genomgångar av i första hand geologiska förutsättningar på nationell eller regional nivå.
- Speciella studier, utredningar av särskilda frågeställningar, exempelvis avseende möjlighet till lokalisering i basiska bergarter, särskilt gabbro, och analyser av för- och nackdelar med lokalisering i norra eller södra delen av landet eller vid kust eller inland.
- Platsundersökningar, utredningar och geovetenskapliga undersökningar inkluderande borrhålsundersökningar på specifika platser. Fullvärdiga och allsidiga platsundersökningar på platser som utvaldes baserat på 1990-talets förstudier gjordes av SKB i Östhammars kommun (Forsmark) och Oskarshamns kommun (Laxemar/Simpevarp) under perioden 2002–2009. Dessutom finns resultaten av de undersökningar som gjorts inför utbyggnaden av SFR.

Nedan följer en kort sammanfattning av detta omfattande underlag med de övergripande slutsatser som SKB hade avseende lokaliseringspotential för Kärnbränsleförvaret och i vad mån motsvarande slutsatser är tillämpliga avseende lokaliseringen av SFL.

Nationella och regionala översiktsstudier

SKB har genomfört länsvisa översiktsstudier för samtliga län utom Gotland. Studierna (SKB 2010d, avsnitt 4.3) fokuserade på säkerheten efter förslutning och därmed på förhållandena i berggrunden, men omfattade även översiktliga kartläggningar av miljöfaktorer, befintlig industri och transportförutsättningar. Huvudslutsatsen var att det i samtliga studerade län finns berggrund som kunde motivera vidare studier rörande lokaliseringen av slutförvaret, se figur 6-12. Samtidigt identifierades stora områden som potentiellt olämpliga.

En sammanställning av för- och nackdelar med gabbro som förvarsbergart (Ahlbom et al. 1992) visade inte på några avgörande skillnader mot granitiska bergarter vad beträffar förhållanden av betydelse för uppförandet av ett slutförvar eller för säkerhet på lång sikt.

Frågor om eventuella för- och nackdelar med att lokalisera slutförvaret till norra respektive södra Sverige, samt vid kusten respektive i inlandet utreddes särskilt (Leijon 1998). Slutsatsen blev att dessa faktorer inte har någon avgörande betydelse. Bedömningar av lämpligheten måste i stället grundas på konkreta studier av lokala förhållanden.

Frågor om mera generella skillnader mellan kust- och inlandsalternativ har aktualiserats även i senare skeden, bland annat av dåvarande Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI) i samband med valet av platser för platsundersökningar. Mer specifikt har det gällt huruvida långa strömningsvägar (och långa cirkulationstider) för grundvatten från inlandslägen kan ge fördelar ur säkerhetssynpunkt. Vidare har frågor ställts om låga salthalter hos grundvattnet (sött grundvatten) i inlandslägen, särskilt på platser belägna ovanför högsta kustlinjen kan ge fördelar i form av undanröjda risker för salthalter höga nog att påverka de tekniska barriärerna negativt. Detta har lett till omfattande uppföljande studier. Studierna har sammanfattats i SKB (2010d, avsnitt 8.2.8):

SKB:s samlade slutsats är att det inte går att påvisa någon systematisk skillnad mellan kust- respektive inlandslägen vad gäller förekomsten av gynnsamma strömningsförhållanden. De kompletterande analyser som redovisats [...] har inte ändrat på denna uppfattning. Huvudskälet är att undersökningar och analyser har visat att lokala förhållanden, främst berggrundens vattengenomsläpplighet, är avgörande för om en plats är lämplig för ett slutförvar, med avseende på grundvattenströmning. Platsundersökningarna i Laxemar och Forsmark har befast denna uppfattning. Detta hindrar inte att grundvattenströmningen från ett förvarsläge kan innefatta regionala komponenter som kännetecknas av långa och långsamma strömningsvägar. Det bedöms dock inte vara möjligt att med rimliga insatser verifiera sådana förhållanden, med tillräcklig tillförlitlighet för att de ska kunna tillskrivas någon säkerhetsfunktion för ett slutförvar.

Beträffande grundvattnets salthalt är SKB:s uppfattning att de salthalter som konstaterats i kustnära lägen, inklusive Laxemar och Forsmark, inte är så höga att funktionen hos de tekniska barriärerna riskerar att påverkas negativt. De frågetecken som kan finnas gäller snarare om halterna i andra geografiska lägen kan bli för låga med avseende på potentialen för bufferterosion.

SKB anser att den slutsats avseende långa strömningsvägar som redovisas ovan är tillämplig även när olika områdets potential för lokalisering av SFL beaktas.

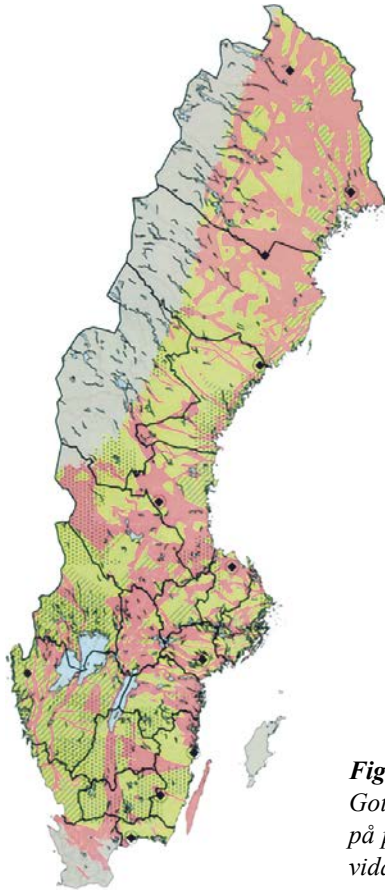
SKB menar att med det underlag som finns från översiktsstudierna kan följande slutsatser dras avseende lokaliseringspotential för SFL:

- Potentiellt lämplig berggrund finns i alla studerade län.
- Inlandslägen har inte några verifierbara generella fördelar i förhållande till kustnära lägen.

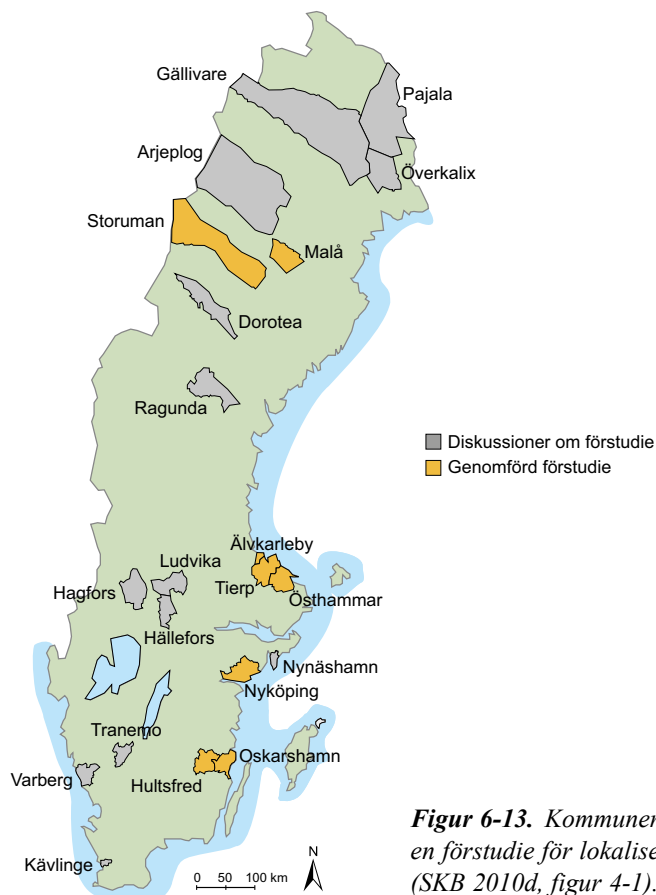
Förstudier

Under perioden 1992–2000 förde SKB mer eller mindre långtgående diskussioner om förstudier med ett tjugotal kommuner i olika delar av landet, se figur 6-13. I åtta fall – Storuman, Malå, Östhammar, Nyköping, Oskarshamn, Tierp, Älvkarleby och Hultsfred – ledde detta till att en förstudie genomfördes. I övriga fall avslutades diskussionen, antingen därför att SKB fann att en förstudie inte var motiverad, eller för att den aktuella kommunen valde att avstå.

Syftet med förstudierna var att bedöma om det fanns förutsättningar för vidare lokaliseringsstudier för ett slutförvar i den aktuella kommunen, samtidigt som kommunen och dess invånare gavs möjlighet att utan förpliktelser bilda sig en uppfattning om slutförvarsprojektet och en eventuell fortsatt medverkan. En huvuduppgift var att identifiera områden med berggrund som kunde vara lämpliga för ett slutförvar. Geologiska studier utgjorde därför en huvudkomponent. Studierna baserades på befintligt underlag, och några borrhningar utfördes inte. Även tekniska, miljömässiga och samhällsliga förutsättningar utreddes. Inom ramen för förstudierna hade SKB också en omfattande, aktiv dialog med såväl allmänhet som kommun och länsstyrelse.



Figur 6-12. SKB:s länsvisa översiktsstudier omfattade samtliga län utom Gotland. För varje län gjordes bland annat en grov indelning med avseende på potentiellt olämpliga (rött) och potentiellt lämpliga (grönt) områden för vidare studier avseende ett slutförvar för använt kärnbränsle (SKB 2000).



Figur 6-13. Kommuner där SKB genomfört eller fört diskussioner om en förstudie för lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle (SKB 2010d, figur 4-1).

Förstudierna (SKB 2010d, avsnitt 4.2) genomfördes enligt det program och med de lokaliseringsfaktorer som redovisades i SKB:s komplettering till Fud-program 92, vilket innebar att framför allt följande frågor behandlades:

- Vilka är de allmänna förutsättningarna för lokalisering av ett slutförvar till kommunen?
- Var kan det finnas lämpliga platser för ett slutförvar med hänsyn till geovetenskapliga och samhälleliga förhållanden?
- Hur kan transporterna ordnas?
- Vilka är de viktiga miljö- och säkerhetsfrågorna?
- Vilka kan konsekvenserna bli, positiva och negativa, för miljö, ekonomi, turism och annat näringsliv inom kommunen och regionen?

Arbetsgången var i huvudsak följande:

- Kommunens generella förutsättningar med avseende på de angivna frågorna utreddes.
- Områden som inte hade tillräckligt goda möjligheter att uppfylla kraven på berggrunden uteslöts.
- En preliminär prioritering gjordes mellan de områden som kvarstod, utifrån en samlad bedömning där också tekniska och miljömässiga lokaliseringsförutsättningar vägdes in. Områden valdes för geologiska fältkontroller.
- Resultaten redovisades i en preliminär slutrapport, som tillsammans med övrigt utredningsmaterial remissbehandlades av kommunen.
- Geologiska fältkontroller och andra kompletteringar utfördes.
- Alla resultat sammanställdes, varvid synpunkter från remisshanteringen beaktades. Lokaliseringsalternativ värderades och prioriterades. Hela förstudien redovisades i en slutrapport.

SKB menar att med det omfattande underlag som finns från förstudier av åtta kommuner kan följande slutsatser dras avseende lokaliseringspotential för SFL:

- Områden med potentiellt lämplig berggrund identifierades i sju av åtta kommuner. Utan tillgång till information från djupa borrhål fanns det inte underlag för en rangordning mellan områdena avseende förhållanden av betydelse för säkerhet efter förslutning.

Även om mer kunskap om den ytliga berggrunden har tillkommit sedan förstudierna genomfördes, skulle förmodligen motsvarande studie för SFL i dessa kommuner resultera i samma potentiellt lämpliga områden, möjligen några fler givet SFL:s ringa storlek, men med samma slutsats att det krävs information från djupa borrhål för att rangordna mellan områdena.

- Markanvändningsintressen begränsade lokaliseringsmöjligheterna i olika grad mellan kommunerna. Exempelvis blev i förstudien av Östhammars kommun nio områden med potentiellt lämplig berggrund reducerade till fyra när i lag skyddade områden, storlek på möjliga undersökningsområden och närhet till potentiell storskalig gruvdrift beaktades.

Vid lokalisering av SFL kan markanvändningsintressen begränsa vilka områden som kan komma ifråga. Det kan vara skyddade kulturmiljöer eller naturmiljöer. Begränsningen är ofta stor vid kustområden, exempelvis kuststräckan från Arkösund till Forsmark där kärnteknisk verksamhet endast tillåts där sådan verksamhet redan finns, eller där det finns vissa typer av tung industri.

- Erfarenheterna från lokaliseringsprocessen för Slutförvaret för använt kärnbränsle visade på svårigheter att uppnå samhälleligt stöd. Även om många kommuner var preliminärt intresserade var det få som medgav att SKB kunde genomföra en förstudie. Av de åtta kommuner där en förstudie genomfördes avstod två kommuner från fortsatta undersökningar redan efter avslutad förstudie. Övriga sex kommuner deltog i processen fram till val av områden för platsundersökningar. Av de fyra kommuner där SKB föreslog platsundersökningar eller annan fortsatt verksamhet tackade två nej.

För att platsundersökningar för SFL ska kunna genomföras krävs ett stabilt samhälleligt stöd. Slutsatsen från lokaliseringen av Kärnbränsleförvaret är att det kan ta tid att uppnå acceptans och att detta aldrig kan tas för givet för någon plats.

Typområdesundersökningar

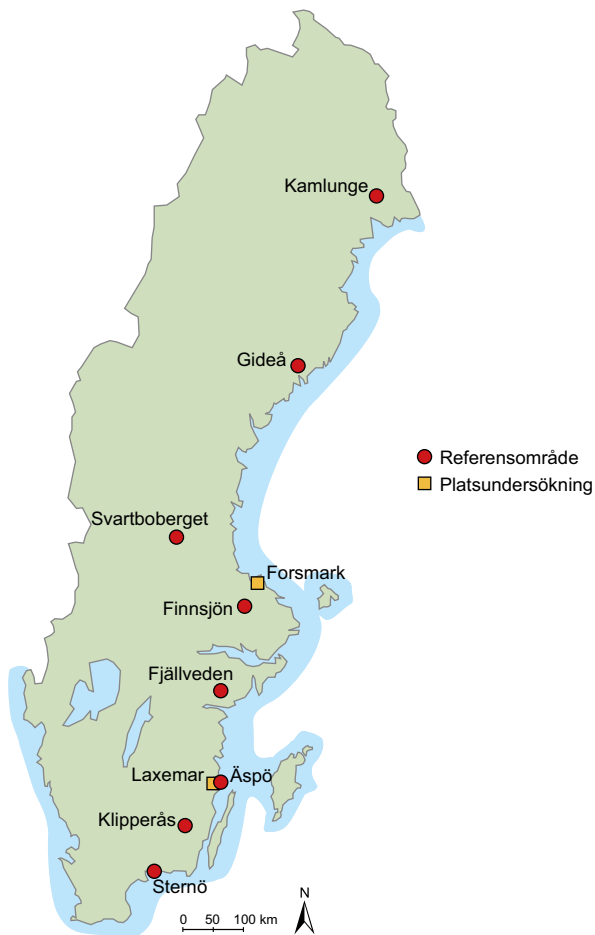
De platser som under KBS-projektet var föremål för mer omfattande undersökningar kom att benämnas typområden (figur 6-14). Valet av områden för undersökningar baserades på de omfattande rekognoseringar och översiktliga bedömningar som pågått sedan mitten av 1970-talet. Totalt borrades 85 kärnbrorhåll med en sammanlagd längd av mer än 45 kilometer. Det största djup som undersöktes var cirka 700 meter. Borrhålen undersöktes med hjälp av olika mätmetoder. Särskild omsorg lades på att bestämma läge och egenskaper hos deformationszoner, bergets vattengenomsläpplighet och den kemiska sammansättningen av grundvattnet på stora djup. Mätmetodiken, liksom metoderna för utvärdering av data och modellering av grundvattenrörelser m m, utvecklades successivt. Resultaten från typområdesundersökningarna (SKB 2010d, avsnitt 3.3) visade att det finns möjlighet att finna många platser i Sverige, där de geologiska förutsättningarna troligen är lämpliga för att anlägga ett slutförvar.

I lokaliseringunderlaget för Kärnbränsleförvaret finns jämförelser med andra av SKB undersökta områden. Dessa områden visas i figur 6-15 (benämndes här referensområden) tillsammans med Forsmark och Laxemar som utgjorde urvalsunderlaget för Kärnbränsleförvaret.

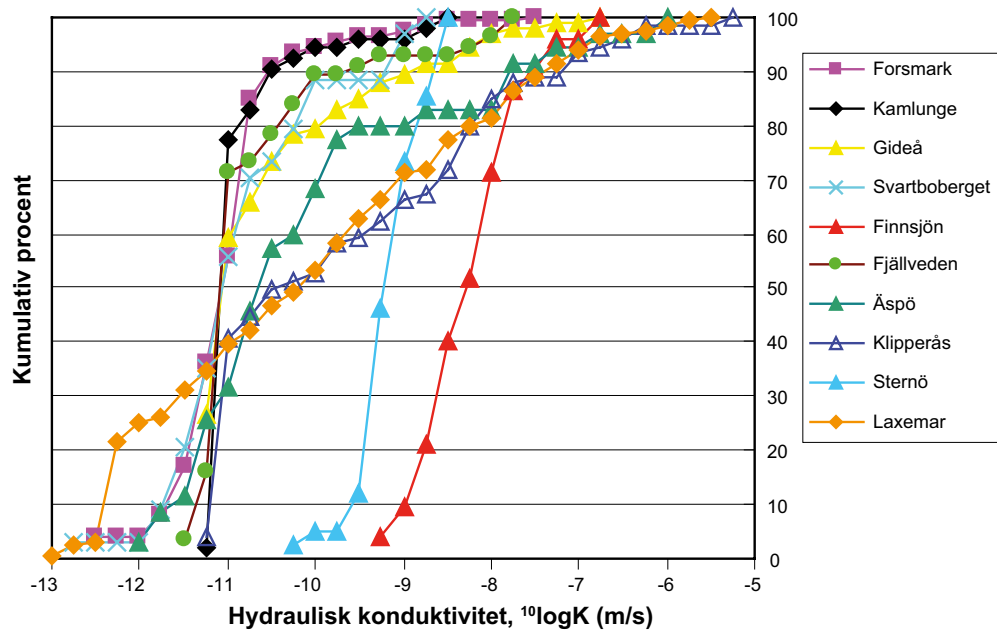
För SFL som har likartade önskemål och krav på berggrunden som Kärnbränsleförvaret, är jämförelsestudien för Kärnbränsleförvaret relevant. Studien finns redovisad i Winberg (2010) och i rapporten "Platsval – lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle" (SKB 2010d). Jämförelsestudien beaktar olika geovetenskapliga parametrar och förhållanden. I figur 6-16 visas den kumulativa fördelningen av vattengenomsläppligheten (hydraulisk konduktivitet) för olika typområden, Äspölaboratoriet samt Laxemar och den tektoniska linsen i Forsmark.



Figur 6-14. Platser i landet där undersökningar gjordes under perioden från mitten av 1970-talet till 1990 (SKB 2010d, figur 3-2).



Figur 6-15. Lågen för referensområden, samt platser för platsundersökningar för Kärnbränsleförvaret (från SKB 2010d).



Figur 6-16. Kumulativa fördelningar för uppmätt hydraulisk konduktivitet (K) i skala 20–25 meter, för linsen i Forsmark, Laxemar, Äspö och referensområden. Data representerar bergmassan mellan deterministiska deformationszoner i djupintervallet 400 till 700 meter. Den kumulativa fördelningen anger den andel (uttryckt i procent) av mätningarna som är mindre än ett givet konduktivitetsvärde. Observera också att skalan för hydraulisk konduktivitet är logaritmisk.

Fördelningen för Sternö och Finnsjön är förskjutna mot högre konduktivitetsvärden, troligen beroende på att de lägre mätgränserna vid dessa tidiga mätningar var högre jämfört med övriga senare undersökta områden (Winberg 2010). De är därför inte fullt jämförbara med fördelningarna för övriga områden.

En slutsats vid jämförelse av återstående områden är att den tektoniska linsen i Forsmark uppvisar en fördelning med generellt låga konduktiviteter, och framför allt en mycket låg andel mätsektioner med hög konduktivitet. Fördelningen för Kamlunge är till väsentliga delar närmast identisk med den för Forsmark, och även Gideå, Svartboberget och Fjällveden ansluter nära till samma trend. Klipperås och Laxemar uppvisar en helt annan typ av fördelning, med konduktiviteter jämt fördelade över ett brett intervall. Äspö, slutligen, ansluter till Klipperås och Laxemar för konduktivitetsvärden större än cirka 10^{-9} m/s, men inte i övrigt.

Ovanstående jämförande studie (figur 6-16) visar att även om berggrunden i den volym i Forsmark där Kärnbränsleförvaret planeras att förläggas har låg vattengenomsläpplighet finns det sannolikt även andra platser där den lokaliseringsfaktorn uppfylls. Motsvarande slutsats bör gälla för SFL.

Andra skillnader som behöver beaktas när data från typområden används vid jämförelser med SFL är storleken på den förvarsvolym som SFL kräver. Med en utsträckning av en hundradel av Kärnbränsleförvaret behöver jämförelser mellan typområden och SFL beakta möjligheten att förhållandena kan variera mellan olika bergblock inom den undersökta bergvolymen. Ytbehovet av SFL är inte heller beroende på berggrundens termiska ledningsförmåga som fallet är med Kärnbränsleförvaret.

SKB menar att med det geovetenskapliga underlag som finns från typområden kan följande slutsats dras avseende lokaliseringspotential för SFL:

- Potentiellt lämplig berggrund för SFL finns i flera av de undersökta typområdena och sannolikt även på många andra platser i Sverige med likartade bergartsförhållanden.

Platsundersökningar

Under åren 2002–2009 genomförde SKB platsundersökningar i Forsmark, Östhammars kommun och Laxemar/Simpevarp, Oskarshamns kommun (SKB 2010d, avsnitt 5.3 och 5.4). Det övergripande målet var att upprätta ansökningar med underlag för tillståndsprövning enligt kärntekniklagen för Kärnbränsleförvaret och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet.

Arbetet under platsundersökningsskedet bedrevs i projektförhållanden. De viktigaste aktiviteterna var att

- genomföra ett omfattande undersökningsprogram med undersökningar på markytan och borrhålsundersökningar ner till cirka 1 000 meters djup,
- ta fram beskrivningar av de undersökta platserna, som grund för platsanpassade förvarslösningar, säkerhetsanalyser samt miljöutredningar och konsekvensbedömningar,
- projektera anläggningar, system och infrastruktur för slutförvar på de undersökta platserna, till en nivå som ger underlag för de anläggningsbeskrivningar och säkerhetsanalyser som ska ingå i ansökan,
- ta fram säkerhetsredovisningar för slutförvarets säkerhet på de undersökta platserna under drift av anläggningen och efter förslutning samt för transporter,
- genomföra utredningar som underlag för att bedöma inverkan på miljö, hälsa och samhälle av planerade anläggningar och verksamheter,
- genomföra föreskrivna samråd och övrig kommunikation med berörda parter och allmänhet,
- utarbeta ett program för byggskedet,
- ta fram den miljökonsekvensbeskrivning som skulle åtfölja ansökan.

I slutfasen av platsundersökningsskedet gjordes en samlad utvärdering (SKB 2010d, kapitel 7) av allt underlag för att kunna

- välja en plats för Kärnbränsleförvaret och motivera detta val,
- sammanställa tillståndsansökan.

Vid lokalisering av SFL är erfarenheterna från platsundersökningarna för Kärnbränsleförvaret av stort värde. En platsundersökning för SFL kan bygga vidare på den kunskap som erhållits och som finns väl dokumenterad. Detta gäller särskilt för de undersökta platserna men även andra platser som kan bli aktuella. En viktig skillnad är att SFL, som nämnts, är ett betydligt mindre förvar. Det är därför troligt att en platsundersökning för SFL kan genomföras på något kortare tid och kräva mindre resurser än för Kärnbränsleförvaret för att identifiera en för SFL tillräckligt stor bergvolym med fördelaktiga egenskaper.

SKB menar att med det underlag som finns från platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar/Simpevarp kan följande slutsatser dras avseende lokaliseringspotential för SFL:

- Det finns ett omfattande underlag i form av ytundersökningar, borrhålsundersökningar och modelleringar som kan användas för att bedöma möjligheten till lokalisering av SFL i Forsmark respektive Laxemar/Simpevarp med avseende på lokaliseringsfaktorn säkerhet efter förslutning.
- För dessa platser finns även underlag för att bedöma övriga lokaliseringsfaktorer avseende teknik för genomförande, miljö och hälsa och samhällsaspekter.
- Erfarenheterna av platsundersökningarna, säkerhetsanalysen och det omfattande underlag som krävdes för tillståndsprovningen enligt kärntekniklagen för Kärnbränsleförvaret och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet kan användas vid lokalisering av SFL, oavsett vilken plats som blir aktuell.

6.2.4 Principiella lokaliseringsalternativ

Erfarenheten att potentiellt lämplig berggrund kan finnas på många platser och att det krävs ett stabilt samhällsligt stöd vid lokalisering gör att SKB menar att lokaliseringsprocessen för SFL kan utgå från en skälighetsbedömning av olika principiella alternativ som alla kan förväntas uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning.

De principiella alternativ som SKB då menar finns är:

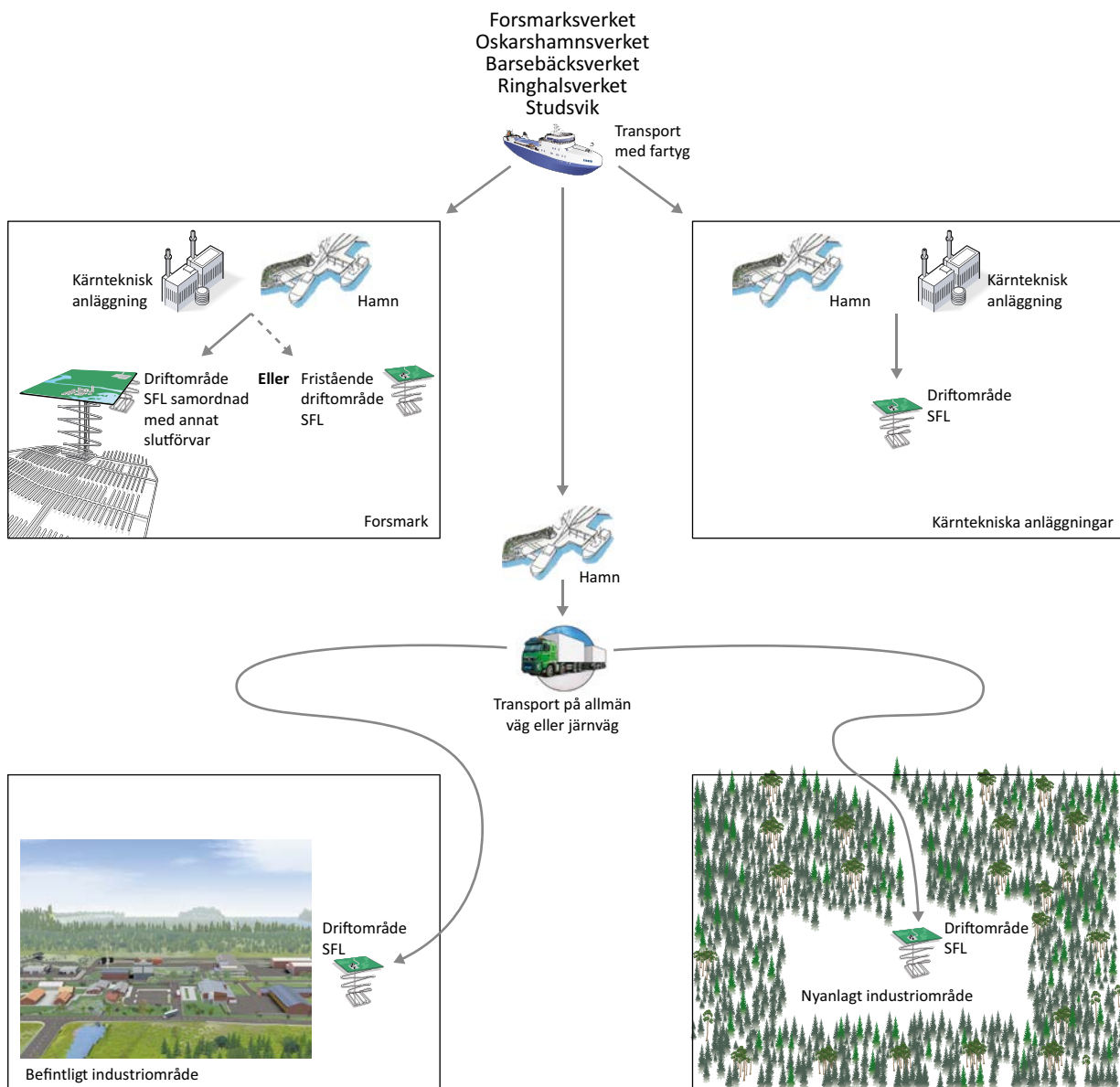
- Samlokalisering med befintliga eller planerade slutförvar för kärnavfall (SFR respektive Kärnbränsleförvaret).
- Vid kärntekniska anläggningar.
- Vid andra industrianläggningar/industriområden.
- I områden där annan industriell verksamhet saknas.

I tabell 6-2 ges en kortfattad beskrivning av potentiella fördelar och potentiella nackdelar för dessa alternativ. Beskrivningen är inte fullständig, men innehåller de väsentligaste skillnaderna mellan alternativen ur lokaliseringssynpunkt.

Figur 6-17 visar schematiskt de delar som ingår i hanteringskedjan för de olika principiella alternativ som beskrivs ovan. Vid en etablering till Forsmark eller Simpevarp behövs sjötransport dit från övriga kärntekniska anläggningar och kort landtransport inom eller i närheten av det kärntekniska industriområdet. Detta gäller även om annan kärnteknisk anläggning skulle bli aktuell. Vid samlokalisering med annat slutförvar i Forsmark behövs troligen inte något särskilt driftområde för SFL. Ett alternativ är ett fristående driftområde för SFL i Forsmark, vilket även blir fallet om SFL förläggs till Simpevarp eller vid annan kärnteknisk anläggning. Nedtransport till förvaret sker i ramp eller schakt. För alternativet befintligt industriområde tillkommer omlastning i någon hamn och transport på allmän väg eller järnväg, till ett nyanlagt kärntekniskt driftområde för SFL. För områden där industriell verksamhet saknas tillkommer etablering av industriområde med tillhörande infrastruktur, inklusive nyanläggning av väg. För detta alternativ behöver ny mark tas i anspråk för vägar och industriändamål.

Tabell 6-2. Potentiella för- och nackdelar vid lokalisering av SFL till olika alternativ.

	Potentiella fördelar	Potentiella nackdelar
Samlokalisering med befintliga eller planerade slutförvar för kärnavfall	Infrastruktur finns på plats i form av transportsystem och för hantering av kärnavfall. Inget nytt markområde behöver tas i anspråk. Miljöpåverkan blir liten, inkluderande eventuellt reduktion av berguttag. Alternativet medger gemensam användning av personal och kan leda till begränsad tidsåtgång vid uppförandet. Kostnaderna blir troligen lägre än för andra alternativ, bland annat för att platsundersökningen kan utgå från befintlig kunskap om området. Lokalt samhälleligt stöd är mer troligt än alternativ där erfarenhet av kärnteknisk verksamhet saknas. Forsmark är utpekade som område av riksintresse för slutförvaring av kärnavfall.	Eventuell ömsesidig påverkan på och från det andra förvaret kan vara negativt och möjligen så stor att den utesluter en lokalisering. Samlokalisering innebär att förvaren blir beroende av varandra, vilket bland annat kan innebära förseningar. Kumulativa effekter behöver beaktas. Juridiskt kan samlokalisering medföra utmaningar, då förändrad verksamhet på platsen kan innebära att villkoren för den befintliga verksamheten tas upp för förnyad prövning i samband med prövningen av den nya verksamheten.
Vid kärntekniska anläggningar	Infrastruktur finns på plats och kan samutnyttjas. Med ett redan industrialiserat område kan miljöpåverkan bli begränsad. Alternativet bör innebära möjlighet till gemensamt utnyttjande av personal/kompetens. Med etablering i eller i närheten av ett kärntekniskt industriområde bör kostnaderna vara rimliga, men troligen något högre än vid samlokalisering. Med infrastruktur på plats förkortas tidsåtgång för uppförandet. Lokalt samhälleligt stöd är mer troligt än i områden som saknar kärnteknisk erfarenhet. Forsmark och Laxemar/Simpevarp är utpekade som områden av riksintresse för slutförvaring av kärnavfall.	Ny mark inom eller nära industriområde kan behöva tas i anspråk.
Vid andra industrianläggningar/industriområden	Grundläggande infrastruktur finns tillgänglig (vägar, kraft, VA, m m). Miljöpåverkan kan vara begränsad (redan industrialiserat område). Alternativet innebär begränsade kostnader men troligen något högre än vid samlokalisering till annat förvar eller vid kärnteknisk anläggning. Ett visst samutnyttjande av personal kan förväntas. Möjlighet till lokalt samhälleligt stöd är svårbedömt, men troligen möjligt.	Ett nytt kärntekniskt verksamhetsområde behöver upprättas med tillhörande installationer och skydd. Ny mark inom eller nära industriområde kan behöva tas i anspråk. Ett transportsystem för radioaktivt avfall kan behöva etableras. Tidsåtgång för etablering blir troligen större än vid kärnteknisk anläggning, främst för alternativ där industriområdet ligger avskilt från hamn vilket innebär att ett transportsystem för radioaktivt avfall behöver etableras.
I områden där annan industriell verksamhet saknas	Möjlighet till bättre utnyttjande av fördelaktiga bergförhållanden. Det är svårt att se potentiella fördelar avseende tekniska, miljömässiga eller samhälleliga faktorer. Möjligen kan en etablering ses som positiv ur aspekten att den skapar arbetstillfällen.	Ett nytt kärntekniskt verksamhetsområde behöver upprättas med tillhörande installationer och skydd. För det nya industriområdet behöver infrastruktur etableras (nya vägar, kraftförsörjning, VA, m m) med därpå följande miljökonsekvenser. Ett nytt område behöver tas i anspråk. Miljöpåverkan av bygget kan bli större eftersom den nu sker i "orörd" miljö jämfört med etablering inom befintliga industriområden. Etablering i ett nytt område leder till högre kostnader och längre tidsåtgång jämfört med andra alternativ. Inget samutnyttjande av personal kan förväntas. Ett nytt transportsystem för radioaktivt avfall behöver etableras som kan innebära vägar/järnväg och omlastningsstationer om lokalisering sker i inlandet eller hamn om lokalisering sker vid kust. Det är mer tveksamt än andra alternativ om det går att få samhälleligt stöd för en sådan etablering.



Figur 6-17. Transportsätt och anläggningar för hantering av avfall till ett SFL för olika principiella alternativ. Bilderna visar möjliga lägen för SFL:s driftområde ovan jord. Underjordsdelen (förvaret) kan placeras under eller sidoförskjutet i förhållande till driftområdet. Skulle järnvägstransport bli aktuell tillkommer troligen en omlastningsstation för avslutande vägtransport. Avfallet från ESS transporteras på allmän väg eller järnväg antingen till en hamn för vidare transport med fartyg, eller direkt till SFL.

6.2.5 SKB:s slutsatser och föreslagen lokaliseringsprocess

Övergripande slutsatser

De lokaliseringsfaktorer för SFL som presenteras ovan är i allt väsentligt lika de som tillämpades vid lokaliseringsprocessen för Kärnbränsleförvaret. Båda förvaren hanterar långlivat avfall som behöver förvaras så att det inte utgör en fara för människor och andra levande arter under mycket lång tid. Förvaren behöver även förläggas så att oavsiktligt intrång kraftigt försvåras.

Även om lokaliseringsfaktorerna avseende säkerhet efter förslutning väsentligen är desamma kan platsundersökningar för SFL förmodligen omfatta mindre områden givet SFL:s ringa ytbehov. Behovet av information från borrhålsundersökningar för att kunna värdera lokaliseringsfaktorerna avseende säkerhet efter förslutning är dock likartade eftersom SFL behöver förläggas på betydande djup.

Likheten mellan lokaliseringsfaktorer för SFL och Kärnbränsleförvaret gäller även för övriga grupper av lokaliseringsfaktorer avseende miljö och hälsa, teknik för genomförande och samhällsaspekter.

Det finns skillnader som kan ha betydelse när ett områdes lämplighet för lokalisering värderas ur miljö-, teknik- och samhällligt perspektiv. Ett litet SFL bör medföra mindre påverkan på miljön jämfört med ett kärnbränsleförvar på samma plats. Eftersom termiska egenskaper och förhållanden inte har någon väsentlig betydelse för SFL, jämfört med Kärnbränsleförvaret, är denna faktor inte av betydelse vid en lokalisering vilket kan göra att även berggrund med låg värmeledning kan vara intressant. Behov av personal och andra insatser under drifttiden är olika med ett kärnbränsleförvar som byggs ut kontinuerligt, medan SFL byggs klart under uppförandeskedet. Uppskattad drifttid för SFL är cirka tio år mot cirka 40 år för Kärnbränsleförvaret.

Sammanfattningsvis leder erfarenheter och faktaunderlag från typområdesundersökningarna, översiktsstudierna, förstudierna och platsundersökningarna från Kärnbränsleförvarets lokalisering till följande grundläggande slutsatser:

- Att det förmodligen finns många områden med berggrund som kan betraktas som potentiellt lämpliga för SFL och att rangordning mellan dessa avseende väsentliga förhållanden av betydelse för säkerheten efter förslutning inte kan göras utan information från platsspecifika geovetenskapliga undersökningar inkluderande mätningar i djupa borrhål.
- Att ett stabilt samhällligt stöd krävs för att genomföra en platsundersökning och för tillstånd till uppförande av ett slutförvar.

SKB menar att platser som kan komma ifråga måste bedömas ha goda geologiska förutsättningar för att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning utifrån tillgänglig geologisk information. Vid en sådan bedömning kan det omfattande underlagsmaterial som tagits fram för Kärnbränsleförvarets lokalisering användas. Givet att sådana förutsättningar finns, och då det krävs omfattande platsundersökningar för att avgöra om en plats fyller kraven, anser SKB att en urvalsprocess i första hand bör utgå från de faktorer som går att bedöma i ett tidigt skede av lokaliseringsprocessen. Följaktligen bör platser med goda geologiska förutsättningar inledningsvis värderas utifrån inledande bedömningar av påverkan på människors hälsa och miljön, tillgänglig infrastruktur, ianspråktagande av mark och möjlighet att erhålla samhällligt stöd.

Lokaliseringsprocess för SFL

I Fud-program 2016 beskrevs målsättningen att driva en öppen och transparent lokaliseringsprocess i samråd med SSM och berörda kommuner, där förutsättningarna för olika aktörer tidigt är klarlagda och där processens olika steg är förankrade och kommunicerade. SKB vill betona att en grundläggande utgångspunkt är berörda kommuners frivilliga deltagande i alla steg i lokaliseringsprocessen.

Baserat på de grundläggande förutsättningar, utgångspunkter och principiella alternativ som redovisats ovan är SKB:s slutsats att arbetet med att identifiera potentiellt lämpliga områden för SFL med fokus på säkerheten på lång sikt kombinerat med möjligheten att få erforderliga tillstånd bör omfatta i första hand områden där det finns kärnteknisk verksamhet, i andra hand där det finns etablerade industriområden. Särskild vikt bör även läggas vid att Forsmark och Laxemar/Simpevarp utpekats som områden av riksintresse för slutförvaring och därmed har en särställning när det gäller hushållning av mark. Andra områden där industriell verksamhet saknas kan komma i fråga, men då bara om det under lokaliseringsprocessen framkommer särskilda skäl till att inkludera dessa, eller att det inledande arbetet visar att underlagsmaterialet av andra skäl behöver utvidgas.

Områden där det finns ett omfattande underlag från tidigare undersökningar till stort djup som kan användas vid en preliminär bedömning av områdenas förutsättningar att uppfylla säkerhetsrelaterade lokaliseringsfaktorer bör inkluderas i urvalsunderlaget. SKB menar därför att Forsmark och Simpevarp bör ingå i urvalsunderlaget vid lokalisering av SFL. Underlag finns här även för att bedöma förutsättningar för uppfyllande av andra lokaliseringsfaktorer.

SKB ser redovisningen ovan av bakgrundsmaterial och grundläggande förutsättningar och utgångspunkter som det första steget i den stegvisa lokaliseringsprocessen för SFL. Remisshanteringen av Fud-program 2019 ger berörda möjlighet att lämna synpunkter på SKB:s redovisade utgångspunkter, den föreslagna processen och de föreslagna lokaliseringsfaktorerna. SKB avser fortsätta den stegvisa lokaliseringsprocessen i huvudsak enligt nedan angivna steg med de justeringar som kan föranledas av Fud-processen.

1. Inledande förstudieskede

I det inledande skedet av lokaliseringsprocessen behöver SKB visa att områden i urvalsunderlaget har goda förutsättningar att uppfylla säkerhetskraven. En jämförelsestudie kommer därför att genomföras med andra områden där det finns relevanta data från större djup. Visar jämförelsestudien att det finns områden med uppenbara fördelar avseende säkerhet på lång sikt kan dessa överföras till urvalsunderlaget under förutsättning att detta är möjligt och rimligt när andra icke-säkerhetsrelaterade lokaliseringsfaktorer beaktas.

Jämförelsestudien kommer inledningsvis att avse säkerhetsrelaterade lokaliseringsfaktorer. För områden där det finns potential för uppfyllande av dessa kommer även andra lokaliseringsfaktorer avseende teknik, miljö och samhälle att värderas. Jämförelsestudien kommer även att beakta områden där data saknas från djupa borrhål, men som framhållits av olika intressenter som potentiellt lämpliga för slutförvar. Exempel på sådana områden är Studsvik och vissa områden i och nära Hultsfreds kommun. Samråd under lokaliseringsprocessen kan visa på fler områden som kan bli aktuella att inkludera i jämförelseunderlaget.

I detta skede görs vidare en systematisk genomgång av Forsmarks- och Simpevarpsområdena som utgör urvalsunderlaget och platser som ingår i jämförelseunderlaget utifrån lokaliseringsfaktorerna säkerhet, teknik, miljö och samhälle. Detta med syftet att så långt som underlaget tillåter ge svar på följande frågor:

- Kan platserna i urvalsunderlaget bedömas ha goda möjligheter att uppfylla alla lokaliseringskrav? Om så är fallet, vilka kompletterande undersökningar och utredningar behövs för att välja en av platserna och ett alternativ samt ta fram en tillståndsansökan?
- Finns i jämförelseunderlaget något som motiverar att SKB bör försöka utvidga urvalsunderlaget med någon ny kommun/plats att ta med i det fortsatta lokaliseringsarbetet? Om så är fallet, vilka kompletterande undersökningar och aktiviteter behövs för att inkludera denna plats i urvalsunderlaget?

Arbetet enligt ovan sker inom ramen för MKB-samråd med bland annat de berörda kommunerna och myndigheter. Skedet avslutas med utvärdering och bedömning inför val av områden för platsundersökningar vilket redovisas och diskuteras vid ett avgränsningssamråd. Detta skede inleds under Fud-perioden.

2. Platsundersökningsskede och platsval

Undersökningar, utredningar och samråd för att få fram underlag att välja plats. Efter genomförda platsundersökningar och säkerhetsvärdering sker ett platsval som beaktar samtliga lokaliseringsfaktorer.

3. Tillståndsansökan

För huvudalternativet tas all dokumentation fram som krävs för en ansökan. För den alternativa platsen/platserna tas dokumentation fram till en nivå så att den/de kan prövas jämförbart med SKB:s huvudalternativ. Enligt nuvarande planering kommer SKB att lämna in ansökningar runt 2030.

7 Låg- och medelaktivt avfall

Låg- och medelaktivt avfall utgörs av drift- och rivningsavfall från de svenska kärntekniska anläggningarna samt radioaktivt avfall från forskning, sjukvård och industri. Avfall med begränsad mängd långlivade radionuklider betraktas som kortlivat och slutförvaras i SFR medan långlivat avfall planeras att slutförvaras i SFL. Med gällande driftvillkor kan SFR endast ta emot driftavfall, men i det utbyggda SFR ska även kortlivat rivningsavfall slutförvaras.

Det finns även kortlivat avfall som deponeras i markförvar på de kärntekniska anläggningarna förutsatt att aktivitetsnivån i avfallet är tillräckligt låg vilket beskrivits i avsnitt 3.2. Här redovisas dock endast den forskning och utveckling som SKB, under Fud-perioden, ämnar bedriva för att öka kunskapen kring processer och egenskaper kopplade till låg- och medelaktivt avfall i SFR och SFL.

7.1 Processförståelse

SKB:s arbete för förbättrad processförståelse med avseende på låg- och medelaktivt avfall fokuserar på två huvudområden: sorptionspåverkan och gasbildning/svällning.

I SFR är sorptionen av radionuklider på cementmineral en av de viktigaste processerna som fördröjer utsläppet av radionuklider från förvaret. Förekomst av ämnesgrupper som kan påverka sorptionen av radionuklider minimeras genom krav i acceptanskriterierna för avfallet. Det finns dock organiska material som under vissa betingelser kan brytas ned till komplexbildande ämnen. Förståelsen för nedbrytningsprocesserna och de produkter som bildas vid nedbrytning har därför stor betydelse för bedömningar av vilka material som måste begränsas i SFR samt hur sorptionen av radionuklider ska hanteras i SKB:s analys av säkerhet efter förslutning.

Gasproduktion i slutförvarsmiljö beror huvudsakligen på nedbrytning av material genom till exempel korrosion eller mikrobiell påverkan. Om gasproduktionen är så omfattande att den bildade gasen inte kan ledas ut på ett kontrollerat sätt kan barriärer i slutförvaret skadas. Det är därför viktigt att förstå de nedbrytningsprocesser som leder till gasproduktion för att kunna ansätta realistiska parametrar i analysen av säkerhet efter förslutning.

I likhet med gasproduktionen, kan svällande avfall också påverka betongbarriärens integritet och därmed påverka uttransporten av radionuklider. Det är därför viktigt att kvantifiera hur stora svälltryck som kan uppkomma.

7.1.1 Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cellulosa

Organiskt material förekommer i olika avfallstyper i SFR. En del av det organiska materialet består av cellulosa som under alkaliska förhållanden kan brytas ner till isosaccharinsyra (ISA) (Glaus et al. 1999). Nedbrytningsmekanismen är väl studerad (Glaus och Van Loon 2008) och SKB har använt hastighetskonstanten som presenterats i studien för att uppskatta koncentrationen av ISA i SFR (Keith-Roach et al. 2014).

ISA kan fungera som ligand och bilda lättlösliga metallorganiska komplex med flertalet radionuklider. ISA kan också sorbera på cementmineral (Ochs et al. 2014) vilket minskar tillgängligheten av ISA för komplexbildning med radionuklider.

I SKB:s analys av säkerhet efter förslutning antas att sorptionen av plutonium reduceras med en faktor (sorptionreduktionsfaktor) som beror av ISA-koncentrationen. Tidigare har kunskapen om hur närvaron av ISA i olika koncentrationer påverkar plutonioms förmåga att sorbera till cementmineral varit begränsad. Det har därför funnits viss osäkerhet i vilken sorptionsreduktionsfaktor som bör tillskrivas plutonium i närvaro av ISA. SKB har i SR-PSU därför valt en pessimistisk sorptionsreduktionsfaktor för plutonium(III)/plutonium(IV).

Nuläge

Den studie som SKB startade 2014 har avslutats och rapporterats i form av en doktorsavhandling (Tasi 2018). Studien följde en fyrstegsmetodik där:

1. Redoxkemin för plutonium under alkaliska betingelser (pH 12,5) undersöktes i frånvaro av ISA och kalcium(II).
2. Lösligheten av plutoniumdioxid undersöktes i närvaro av ISA men i frånvaro av kalcium(II).
3. Lösligheten av plutoniumdioxid undersöktes i närvaro av ISA och kalcium(II). Huvudsyftet med denna delstudie var att ta fram en fullständig kemisk och termodynamisk modell för kalcium(II)-plutonium(III/IV)-OH-ISA-systemet.
4. Sorptionen av plutonium och plutonium-ISA på cement undersöktes i en sista delstudie.

En modell för hur sorptionen av plutonium på cement påverkas av ISA har tagits fram. Sorptionsförsök med plutonium-ISA-cement-systemet visar att sorptionen av plutonium påverkas av ISA och sorptionsreduktionsfaktorer har kunnat härledas för olika koncentrationer av ISA. Om plutonium och ISA tillåts bilda komplex innan sorptionen på cement sker, påverkas sorptionen av plutonium i större utsträckning än om sorptionen av plutonium på cement sker innan ISA tillsätts till systemet. Detta är viktigt att veta då det mesta av cellulosan i förvaret finns i sådant avfall där koncentrationen av plutonium är låg. De bildade nedbrytningsprodukterna (ISA) från cellulosa måste då diffundera till avfallspaket där koncentrationen av plutonium är högre. Detta ökar sannolikheten för att sorptionen av plutonium kommer att ske innan plutonium-ISA-komplexen kan bildas.

Resultaten från studien har också medfört att en mindre pessimistisk sorptionsreduktionsfaktor för plutonium kan tillämpas i kommande säkerhetsanalyser.

Program

SKB planerar inte i nuläget att fortsätta studera plutonium-ISA-systemet utan följer kunskapsläget och justerar både sorptionsfaktorer och sorptionsreduktionsfaktorer om ny kunskap framkommer som visar att en sådan justering är nödvändig.

7.1.2 Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedel

Nuläge

Ett exempel på ett ofta förekommande filterhjälpmedel i driftavfallet från kärnkraftverken är UP2. Detta filterhjälpmedel består av polyakrylonitril (PAN). Under alkalina till hyperalkalina förhållanden bryts polymerstrukturen ned och bildar lättlösliga föreningar som kan påverka sorptionen och/eller lösligheten av radionuklider (Duro et al. 2012). I den senaste genomförda studien undersöktes påverkan på nickel(II) och europium(III) under förvarsliga förhållanden (Tasdigh 2015). Studien visade att nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet påverkade sorptionen av europium(III), och försöken med nickel(II) indikerade att lösligheten för nickel(II) ökade vid närvaron av nedbrytningsprodukter. Tidigare studier har visat att nedbrytningsprodukter av PAN inte i nämnvärd utsträckning påverkar sorptionen av europium(III) (Dario et al. 2004).

Program

Ytterligare studier av filterhjälpmedel planeras inom ramen för ett EU-finansierat projekt benämnt Cori (Cement Organics Radionuclide Interaction). SKB deltar i förberedelserna inför ansökan av projektet. Eftersom nedbrytningen av PAN förväntas vara långsam har nedbrytningsförsök redan påbörjats. I Tasdigh (2015) noterades en påverkan på pH under nedbrytningen av PAN. En sådan eventuell påverkan kommer att undersökas ytterligare för att om möjligt fastställa om nedbrytningsprodukterna kan påverka pH i de avfallskollin som innehåller PAN. Cori förväntas starta under 2019 och pågå i fyra år. SKB planerar att studera om nedbrytningsprodukter av PAN påverkar sorptionen av nickel(II), europium(III) och aktinider(IV). Som nämnts ovan har sorptionen av europium(III) i närvaro av nedbrytningsprodukter från PAN redan studerats. Europium(III) inkluderas i det planerade arbetet som en referens.

7.1.3 Sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cementtillsatsmedel

I såväl SFR-utbyggnaden som i det framtida SFL, kommer stora mängder betong att användas som konstruktionsmaterial. För att erhålla en högkvalitativ betong med lämpliga egenskaper kommer betongtillsatsmedel såsom superplasticerare behöva användas. Sådana medel består bland annat av organiska polymerer. Dessa kan komma att brytas ned, under de betingelser som råder i förvaret efter förslutning (högt pH, lågt Eh), och bilda lättlösliga organiska föreningar. Vilken inverkan dessa organiska föreningar har på sorption och/eller lösligheten hos radionuklider är beroende av vilken typ av förening det rör sig om. I och med att superplasticerarnas sammansättning och struktur skiljer sig åt kan inga generella krav fastställas för innehåll av superplasticerare.

Innan byggstart av SFR-utbyggnaden är det därför viktigt att SKB har skaffat sig en förståelse för effekten av dessa organiska polymerer så att SKB kan ställa krav på vilka tillsatsmedel som betongentreprenörer tillåts använda i betongen för att undvika eventuell påverkan på de säkerhetsfunktioner som gäller för förvaret efter förslutning.

Nuläge

De studier som SKB startade under 2016 har avslutats. Resultaten visade att strukturen för den studerade superplasticeraren innefattade en organofosfatdel. Hastighetskonstanten för nedbrytningen och frigörelsen av fosfat bestämdes. Den studerade superplasticeraren visade sig öka lösligheten av både nickel(II) och europium(III) genom dessa ämnens interaktion med den avspjälkade fosfaten. Superplasticerare som innehåller organofosfatestrar kan därför antas öka lösligheten av nickel(II) och europium(III).

Innehållet i betongtillsatsmedel är inte generellt känt eftersom företagen som tillverkar dessa inte öppet redovisar sammansättningen. Detta begränsar möjligheten för SKB att på förhand utreda vad möjliga tillsatsmedel innehåller. SKB:s studie visade att superplasticerarna hydrolyserades relativt snabbt i den experimentella miljön. Detta kan tas som en indikation på att detta även kan komma att ske i SFR och SFL om miljön är likvärdig. Lösligheten av nickel(II) och nickel(III) kan då komma att påverkas om de finns i tillräckligt höga koncentrationer av nedbrytningsprodukter i porvattnet.

Studier genomförda på uppdrag av brittiska Nuclear Decommissioning Authority (NDA 2015) visar dock att superplasticerare inte påverkar sorptionen av radionuklider. NDA:s experimentella uppställning skiljer sig från den uppställning som traditionellt brukar användas när påverkan på sorption studeras. I NDA-studien gjöts radionuklider in tillsammans med betong innehållande olika typer av superplasticerare. Resultatet från dessa försök visade att radionuklidens mobilitet i betongen inte påverkades av superplasticerare i betongen. Ytterligare lakttest med varierande förhållande mellan mängden fastfas respektive vätskefas bekräftade resultaten att superplasticerare inte ökar transporten eller mobiliteten av radionuklider i betong (NDA 2015). Dessa experiment är genomförda under mer förvarsliga betingelser än traditionella experimentuppsättningar och ger därför värdefull information om hur det verkliga systemet beter sig.

Program

SKB planerar inte i nuläget att fortsätta studera påverkan av superplasticerare på sorptionen av radionuklider. SKB följer dock fortsättningsvis kunskapsläget. I god tid innan byggstart är det viktigt att SKB får ta ställning till den superplasticerare som betongentreprenören tänkt använda så att dess lämplighet kan bedömas.

7.1.4 Gasbildning från korrosion av aluminium och zink

Anaerob korrosion av aluminium och zink i avfall som deponeras i SFR kan under kort tid bilda stora mängder vätgas. Om gasen inte på ett kontrollerat sätt kan ledas ut ur de betongkonstruktioner som omsluter avfallet kan ett, för betongkonstruktionerna, skadligt övertryck uppkomma. Det är därför viktigt att förstå korrosionsprocessen samt att kvantifiera korrosionshastigheten för zink och aluminium i slutförvarsmiljö.

Nuläge

SKB har tillsammans med forskare på KTH studerat korrosion av aluminium och zink ingjutet i betong och utsatt för syrgasfritt grundvatten. En serie försök med olika exponeringstider (2, 4, 12, 52 och 104 veckor) har genomförts.

Både för zink och aluminium visar preliminära resultat från försöken att korrosionen initialt är snabb, omkring 50 $\mu\text{m}/\text{år}$ för zink och 1 mm/år för aluminium, men att korrosionshastigheten sedan avtar. För zink sjunker korrosionshastigheten till en mycket låg nivå, ungefär 1 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 104 veckor, medan uppskattningen för aluminium är runt 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 104 veckor. I fallet aluminium bildas också ett tomrum kring metallprovet i samband med den initiala korrosionen, och dess orsak tillskrivs preliminärt vätgasutvecklingen.

Program

Efter att studien tillsammans med KTH har färdigställts, planerar SKB inga vidare studier av anaerob korrosion av aluminium och zink. De genomförda försöken, samt de studier som finns publicerade (till exempel Fujiwara et al. 2017), ger tillräcklig information för att korrosion av aluminium och zink ska kunna beskrivas i analys av säkerhet efter förslutning. SKB kommer dock att fortsätta följa kunskapsläget.

7.1.5 Mikrobiell gasproduktion

En process som kan bidra till gasproduktion i ett slutförvar är metanbildning genom mikrobiell nedbrytning av organiskt material såsom cellulosa. Det är därför viktigt att förstå vilka förhållanden man bör eftersträva i SFR för att begränsa gasproduktion till följd av mikrobiell nedbrytning.

Nuläge

I Fud-program 2016 redogjorde SKB för att studier av mikrobiell gasproduktion skulle genomföras inom EU-projektet Mind. Forskningen inom Mind har dock främst fokuserat på andra mikrobiella processer än just gasproduktion. Frågan berörs i viss mån av Small et al. (2017) som studerat gasproduktion (mestadels metan) vid nedbrytning av lågaktivt avfall innehållande cellulosa. Resultaten visar en fördubbling av gasproduktionsraten i samband med att pH i det omgivande vattnet sjunker under 9.

SKB har genomfört egna studier av mikrobiell produktion av metan. Inom detta arbete har förekomst av metanogener i grundvatten från Forsmarksområdet studerats. Resultaten visar att det finns metanogener i grundvattnet och att de arter som förekommer kan bilda metan från nedbrytning av organiska material, representativa för låg- och medelaktivt avfall. Resultaten visar också att dessa metanogener endast är aktiva upp till ett pH strax över 10 (Taborowski och Pedersen 2018).

Program

SKB planerar inte i nuläget att fortsätta studera mikrobiell gasproduktion i låg- och medelaktivt avfall. SKB följer dock fortsättningsvis kunskapsläget.

7.1.6 Svällning av jonbytarmassor

Svällande avfall kan påverka betongbarriärers integritet och därmed påverka uttransporten av radionuklider från SFR. Det är därför viktigt att veta om avfallet kan svälla och hur stort svälltrycket från avfallet i så fall kan bli.

Nuläge

SKB har genomfört experiment vid Äspölaboratoriet där svällning av en bitumensolidifierad jonbytarmassa har studerats. Även lakningshastigheten av anjoner och katjoner från en bitumeniserad avfallsform har undersökts. Resultatet visade att bitumenmatrisen inte är tillräckligt tät för att förhindra att jonbytarmassan sväller.

Ytterligare försök på okonditionerad jonbytarmassa har därefter genomförts för att kvantifiera svälltrycket när jonbytarmassa återmätas med vatten. I försöken mättes jonbytarmassans expansion vid vattenupptag vid olika mottryck för att fastställa ett empiriskt samband mellan expansion och svälltryck. Resultaten av dessa försök redovisas i Jensen et al. (2018).

Resultaten för den okonditionerade jonbytarmassan är dock inte helt representativa för den faktiska avfallsformen. Försök med konditionerad jonbytarmassa försvåras dock av att återmätning för bitumensolidifierad jonbytarmassa under mottryck tar mycket lång tid.

Program

SKB planerar att genomföra fortsatta försök för att mäta svälltryck som är representativa för det konditionerade avfallet under slutförvarförhållanden, men där återmätning sker tillräckligt snabbt för att tillförlitliga resultat ska kunna erhållas inom rimlig tid.

7.2 Radionuklidinventarium

SKB arbetar kontinuerligt med att förbättra metoder för uppskattning och prognos av radionuklidinventariet i det låg- och medelaktivt avfallet. Vartefter kunskapsläget förbättras uppdateras och kompletteras beräkningen av referensinventariet.

SKB:s arbete med att förbättra uppskattningen av radioaktivitet i låg- och medelaktivt avfall fokuseras främst på de nuklider som i säkerhetsanalyser visat sig ha störst påverkan på den radiologiska risken efter förslutning. De flesta av dessa nuklider hör till kategorin svärmätbara nuklider. Med svärmätbara nuklider avses de nuklider vars aktivitet inte rutinmässigt kan mätas direkt på avfallskollin.

Vissa svärmätbara nuklider kan mätas rutinmässigt i prov från till exempel processvatten hos avfallsproducenterna. För mätning av andra svärmätbara nuklider krävs däremot omfattande koncentrerings- och provberedning samt avancerade analyser vid externa laboratorier. På grund av detta blir tillgången på uppmätta värden för dessa nuklider mer begränsad.

Eftersom uppmätt aktivitet för svärmätbara nuklider endast finns som indirekta mätningar eller som analyser av enstaka prov är det nödvändigt att tillämpa beräkningsmodeller för att uppskatta radionuklidinventariet för svärmätbara nuklider i låg- och medelaktivt avfall. För att det beräknade inventariet ska vara tillförlitligt krävs att beräkningsmodellerna så långt som möjligt bygger på etablerade fysikaliska samband samt att antaganden och parametrar i modellerna kan verifieras med uppmätta värden. Fysikaliskt rimliga modeller är också en förutsättning för att kunna extrapolera data för svärmätbara nuklider till äldre avfall som producerats när tillgången på uppmätta värden var mer begränsad. Modellerna anpassas och verifieras dels mot uppmätt aktivitet för svärmätbara nuklider och dels mot mer omfattande mätdata för relaterade lättmätta nuklider.

SKB:s fortsatta arbete med svärmätbara nuklider innefattar både utökad mätning av svärmätbara nuklider och vidareutveckling av de beräkningsmodeller som används för att uppskatta radionuklidinventariet. Vidare arbetar SKB också med att, genom utökade mätningar och insamling av processdata från avfallsproducenterna, förbättra uppskattningen av osäkerheter i såväl uppmätt som beräknad aktivitet.

7.2.1 Referensinventarium

Nuläge

Ett uppdaterat referensinventarium för avfall till det utbyggda SFR har tagits fram som underlag för nästa analys av säkerhet efter förslutning som ska ingå i PSAR. Inventariet inkluderar allt deponerat avfall till och med 31 december 2016 samt prognostiserat drift- och rivningsavfall. Metodiken för inventariesammanställningen har uppdaterats med prognoser för årlig produktion av svärmätbara nuklider samt uppdaterad osäkerhetsanalys för radionuklidinventariet.

Metodförändringarna syftar främst till att ersätta schablonmässiga antaganden om aktivitet i prognostiserat avfall med data baserat på mer detaljerad statistisk analys av inrapporterad aktivitet för deponerat avfall.

SKB har också inlett en dialog för att samordna arbetet med radiologisk kartläggning och karaktärisering av rivningsavfall för de tillståndshavare som står i begrepp att inleda nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorer.

Inför framtida uppdatering av referensinventariet för SFL har SKB:s register för mellanlagrade styrstavar i Clab uppdaterats med information om drifhistorik och borutbränning, vilket ger möjligheten att förbättra metodiken för bestämning av aktivitet i långlivat avfall från kärnkraftsreaktorerna. För det långlivade historiska avfallet kvarstår dock en betydande osäkerhet kring avfallets innehåll av material och radionuklider.

Program

SKB kommer att utveckla system för informationshantering för att kunna ta emot information från radiologisk kartläggning inför nedmontering och rivning. Syftet med detta är att löpande kunna uppdatera inventariet för rivningsavfallet i takt med att tillståndshavarna genomför utredningar, beräkningar eller mätprogram med syfte att karaktärisera rivningsavfallet. Detta arbete kommer också att utgöra grunden för ett framtida avfallsregister för rivningsavfall.

SKB kommer att fortsatt bevaka resultaten av provtagning och provanalyser från interndelssegmenteringen och segmentering av reaktortankar för att kunna uppdatera uppskattningen av inducerad aktivitet i låg- och medelaktivt avfall. Vidare kommer SKB även att bevaka AB SVAFO:s planer för hantering och karaktärisering av det historiska avfallet.

Arbetet med en förbättrad modell för beräkning av inducerad aktivitet i skrotade styrstavar kommer att fortgå under Fud-perioden. Modellen kommer att med hjälp av borutbränningsdata kunna ge en mer detaljerad bild av bestrålningshistoriken för styrstavarna och på så sätt ge en bättre beskrivning av radionuklidinventariet i bergssalen för hårdkomponenter i SFL. Beräkningarna kommer också att användas som stöd vid radiologiska bedömningar rörande den fortsatta hanteringen av styrstavarna fram till deponering i slutförvar.

SKB kommer också att bevaka planeringen av spallationsanläggningen ESS för att fortlöpande kunna ta ställning till möjligheten att slutförvara avfall från drift och avveckling av anläggningen.

7.2.2 Metodikutveckling för svärmätbara nuklider

Nuläge

Inventariet av svärmätbara nuklider vars aktivitet bestäms genom mätning på processvatten riskerar att underskattas om inte ordinarie analyser av dessa nuklider kompletteras med vattenanalyser från genomförda systemdekontamineringar. SKB har därför beräknat och kompletterat aktivitetsuppskattningar för genomförda systemdekontamineringar av reaktorernas primärsystem där information om svärmätbara nuklider varit bristfällig. I beräkningarna har frigjord aktivitet beräknats utifrån tillgänglig mätdata, uppskattad mängd upplöst uran i den aktuella reaktorn samt vektorer för bränsle och aktiverade korrosionsprodukter. Den beräknade mängden har jämförts mot mätdata i förekommande fall och jämförelsen visar att beräkningarna generellt ger en pessimistisk uppskattning av aktivitet för svärmätbara nuklider.

SKB har även kompletterat de inrapporterade mängderna av transuraner med beräknade värden för de nuklider som inte omfattas av ordinarie analyser. För detta har vektorer från respektive reaktors beräknade jämviktshärd applicerats på de uppmätta mängderna plutonium-239/240.

SKB har sedan en tid beräknat mängden av de svärmätbara nukliderna molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135 i driftavfall med hjälp av en beräkningsmodell (Lundgren 2005, 2006). Under 2016 uppdaterades modellen efter att en rad förbättringsåtgärder hade identifierats. Bland annat lades ytterligare mätdataserier till för att bättre kunna bestämma ursprunget till frigörelse av aktivitet och således även val av parametervärden. Vidare ersattes koncentrationen i processvatten som tidigare varit på reaktortypnivå med reaktorspecifika värden. Det är nu även möjligt att variera det skadade bränslets ålder och utbränningsgrad. Under arbetet med att utveckla modellen har dock

ytterligare behov av förbättring identifierats. Detta arbete pågår och behöver färdigställas innan den uppdaterade modellen kan implementeras och helt ersätta den ursprungliga.

För att kunna verifiera beräkningsmodellen för svärmätbara nuklider har ett mätprogram genomförts i två etapper. I den första etappen samlades reaktorvattenprover från reaktorerna Oskarshamn 1 och 3 under 2014. Proverna analyserades med ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) för att bestämma koncentrationen av nukliderna teknetium-99 och jod-129 (Åkerblom 2015). I etapp två omfattade analyserna reaktorvattenprover från Forsmark 1, 2 och 3, Oskarshamn 1 och 3 samt Ringhals 1 och 3, respektive bassängvattenprov från Clab. Proverna samlades in under 2016 och analyserades återigen med ICP-MS för att bestämma mängden teknetium-99 och jod-129 (Ahlford 2019). Resultaten från dessa mätningar kommer att utgöra ett viktigt underlag för kommande utveckling av beräkningsmodellen för svärmätbara nuklider. Verifierande mätningar av andra svärmätbara nuklider vars aktivitet bestäms med hjälp av beräkningsmodellen är också önskvärt, varför utformning av ytterligare mätprogram pågår.

Program

För att få en mer tillförlitlig beräkningsmodell för de svärmätbara nukliderna molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135 i driftavfall behöver de ingående källtermerna ses över och uppdateras. Detta innebär att de underliggande crud- och bränsleskademodellerna behöver omarbetas och förbättras. I första hand är det crud-modellen för kokvattenreaktorer (BWR) som behöver uppdateras med avseende på aktivering av molybden. Mätningar av elementärt molybden antyder att tidigare antaganden om hur molybden deponeras och aktiveras på bränslet behöver revideras samtidigt som det nu finns mer data att använda för att kvantifiera korrosion av aktiverade molybden-legerade material i härden.

Målsättningen är att modellen för svärmätbara nuklider ska kunna användas för att beräkna mängden av samtliga svärmätbara nuklider. På så sätt kan uppmätta värden för de nuklider där aktivitetsbestämningsmetodiken redan är etablerad (såsom regelbunden mätning av ett antal transuraner) användas för att verifiera modellen samtidigt som modellen kan användas för att komplettera aktivitetsuppskattningen för perioder där mätdata saknas.

För att möjliggöra vidareutveckling av beräkningsmodeller för såväl framtagande av källtermer som aktivitetsbestämning av svärmätbara nuklider, har SKB identifierat ett behov av att samla tillgänglig drift- och mätdata för samtliga svenska reaktorer sedan driftstart i en databas. SKB har påbörjat detta arbete och databasen kommer att uppdateras och kompletteras vartefter nya data tillkommer.

Tillsammans med tillståndshavarna planerar SKB ytterligare mätningar av ett antal svärmätbara nuklider, såsom exempelvis molybden-93. För att förbättra möjligheten att kunna detektera dessa nuklider kommer integrerad provtagning att tillämpas för koncentrerad provtagning av proverna. Gammamätning och elementanalys görs i anslutning till provtagningen, för att kunna relatera mängden svärmätbara nuklider till relevanta lättmätta nuklider respektive metallhalt i proverna och för att kunna säga något om upptaget på de olika filterfraktionerna (anjonfilter, katjonfilter och partikelfilter). Provinsamling och mätning genomförs under 2019 och 2020.

För att uppskatta hur uppmätta och beräknade aktivitetsmängder i system hos avfallsproducenterna fördelas i olika delar av SFR behöver aktivitetsmängderna kopplas till producerade avfallskollin. För att förbättra tillförlitligheten i hur aktiviteten fördelas per kולי avser SKB i högre grad inhämta och tillämpa information som förbättrar möjligheten att spåra avfallskollin till de system där avfallet uppstått.

7.2.3 Osäkerheter i radionuklidinventariet

Nuläge

SKB har vidareutvecklat metodiken för att uppskatta osäkerheten i inventariet för SFR. Ur statistisk analys av uppmätt och beräknad aktivitet för deponerat avfall har fördelningar för osäkerheten i aktivitet för deponerat avfall samt fördelningar för aktivitet i prognostiserat avfall tagits fram. Från dessa fördelningar kan osäkerheten i radionuklidinventariet för deponerat och prognostiserat avfall uppskattas genom Monte Carlo-simulering där osäkerhet i olika mät- och beräkningsmetoder vägs samman.

Program

SKB avser att i högre utsträckning än tidigare samla in mätdata och driftförhållanden från avfallsproducenterna. På så sätt erhålls ett mer omfattande dataunderlag för att parametrisera och verifiera de modeller som beskrivs i avsnitt 7.2.2. Tillsammans med de utökade verifierande mätningar som planeras för svärmätbara nuklider kommer ett bättre dataunderlag för osäkerhetsanalys kunna tas fram. SKB avser att inom ramen för den metodutveckling som beskrivs i avsnitt 7.2.2 också bättre kvantifiera osäkerheten i uppmätt och beräknad aktivitet.

7.3 Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR

Acceptanskriterier för avfall anges i säkerhetsredovisningen för respektive slutförvar. För anläggningar som ännu inte tagits i drift kommer acceptanskriterier att läggas fast i samband med inlämnandet av SAR.

I dagsläget finns dock en betydande mängd långlivat avfall i mellanlager hos avfallsproducenterna och ytterligare långlivat avfall kommer att uppstå under fortsatt drift och rivning av de kärntekniska anläggningarna. För att undvika att framtida transporter och slutförvaring försvåras behöver det tydliggöras hur det långlivade avfallet ska hanteras och karaktäriseras samt vilka krav som, redan i dag, kan ställas på avfallet.

För de tidiga avvecklingsprojekten finns också ett behov av tydliga förutsättningar för hur det kortlivade rivningsavfallet ska hanteras för att avfallet så långt som möjligt ska överensstämma med framtida acceptanskriterier för det utbyggda SFR.

Det finns således ett behov av att redovisa preliminära acceptanskriterier för både SFL och det utbyggda SFR. I takt med att detaljerna kring förvarens utformning konkretiseras kommer också kravbilderna att kunna preciseras och till slut leda fram till fastställda acceptanskriterier.

Nuläge

Den nyligen avslutade säkerhetsvärderingen för SFL ger viss vägledning kring framtida krav på avfallet. De antaganden om avfallsform och emballage som säkerhetsvärderingen baseras på har utgått från hur avfallet hittills har hanterats. Resultaten från säkerhetsvärderingen kan därför utnyttjas i det fortsatta arbetet för att ge svar på hur nuvarande och tidigare hantering påverkar förutsättningarna för framtida slutförvaring.

Acceptanskriterier finns fastställda för driftavfall i det befintliga SFR och preliminära acceptanskriterier har lämnats in i samband med ansökan om utbyggnad av SFR. Rivningsavfallet har stora likheter med det driftavfall som redan slutförvaras i SFR och de tillkommande förvarsdelarna har flera egenskaper gemensamma med motsvarande förvarsutrymmen i den befintliga anläggningen. Därför kan många av de krav som gäller driftavfall i SFR förväntas gälla också för rivningsavfall i den utbyggda delen. Detta gäller särskilt det lågaktiva avfallet i containrar till BLA. Därför har acceptanskriterier för de tillkommande bergssalarna 2–5BLA kunnat utvecklas i mer detalj.

För 2BMA finns däremot skillnader i utformning jämfört med 1BMA som måste beaktas, och för BRT finns ingen motsvarighet i det befintliga SFR. Arbetet med att utveckla acceptanskriterier för dessa förvarsdelar kommer därför att bli mer omfattande.

Program

Krav på avfallet kommer att kunna härledas från den senast genomförda analysen av säkerhet efter förslutning för respektive anläggning. För SFL blir utgångspunkten den nyligen genomförda säkerhetsvärderingen medan kravbilderna för det utbyggda SFR kommer att utgå från den analys som görs inför PSAR. Med de beräkningsmodeller som tagits fram för förvaren kan utökade analyser vid behov genomföras för att till exempel precisera gränsvärdena för avfallets innehåll och form.

Utöver krav relaterade till förvarens säkerhet efter förslutning, kommer krav kopplade till konstruktionen, transport och hantering under drift att utgöra underlag för att ytterligare precisera acceptanskriterier för avfallet.

7.4 Hantering av reaktortankar och stora komponenter

Under 2017 fattade Vattenfall och Uniper beslut om att inte deponera BWR-tankar hela i SFR utan att dessa ska segmenteras innan deponering. För Ringhals 2 finns ett inriktningsbeslut att segmentera reaktortanken medan beslut för Ringhals 3 och 4 kommer att fattas närmare avveckling av dessa reaktorer. För mer information kring kärnkraftsföretagens planering och genomförande av avveckling, se del III.

Nuläge

Under 2017 och 2018 genomfördes ett utvecklingsarbete, kopplat till beslutet om segmentering av BWR-tankar, för att säkerställa att hela kedjan från nedmontering och rivning till deponering i SFR genomförs optimalt. Arbetet har identifierat möjliga avfallsbehållare för tillståndshavarna att tillämpa för avfall till bergssalen för reaktortankar (BRT) i utbyggt SFR.

Program

SKB planerar i nuläget inga utredningar kopplade till hantering av hela reaktortankar eller större komponenter, men kommer fortsatt bevaka utvecklingen inom avvecklingsprojektet.

7.5 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att kunna genomföra avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna optimalt enligt vad som beskrivs i del III behöver utvecklingsarbete ske med avseende på avfallsbehållare och avfallstransportbehållare för det låg- och medelaktiva avfallet.

7.5.1 Avfallsbehållare för avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB

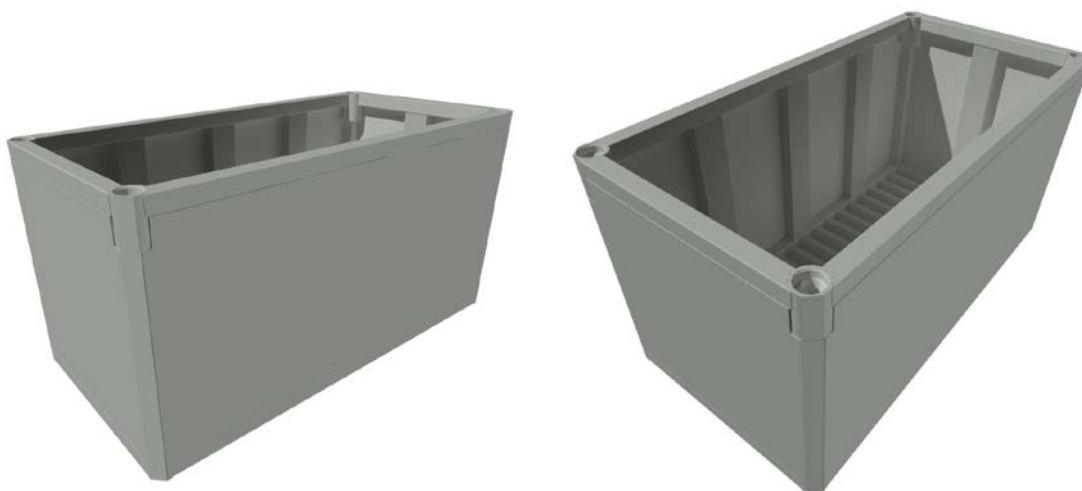
Nuläge

Inom SFL konceptstudie har underlag till avfallsbehållare utarbetats för säker och effektiv hantering av det avfall som i dag är placerat i kokiller, 200-litersfat och 280-liters skyddsfat (Pettersson 2013).

AB SVAFO har bedrivit en förstudie för att analysera olika metoder att återta, karaktärisera, behandla och konditionera låg- och medelaktivt avfall. Syftet med förstudien var att se över möjligheterna att konstruera och bygga en anläggning för att hantera och konditionera det historiska avfallet inför deponering i slutförvar. Efter den avslutade förstudien har bedömningen gjorts att hantering av det historiska avfallet kräver ytterligare utredning innan något projekt för konstruktion av en hanteringsanläggning kan påbörjas. Om AB SVAFO väljer att behandla och konditionera sitt avfall, kommer behovet av nya avfallsbehållare möjligen att förändras.

Program

Behovet av nya avfallsbehållare kommer att ses över i samband med att acceptanskriterierna för det långlivade avfallet och hanteringen av det historiska avfallet konkretiseras.



Figur 7-1. Tvåkokill (1,2 × 2,4 × 1,2 meter), avfallsbehållare för medelaktivt rivningsavfall. Tvåkokillen planeras att förses med ett gjutet betonglock inför transport till slutförvar.

7.5.2 Avfallsbehållare för rivningsavfall

Nuläge

Under 2017 och 2018 genomfördes ett fortsatt arbete för att realisera användandet av en större avfallsbehållare vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. SKB beslutade att avvakta med utvecklingen av fyrkokill och i stället gå vidare med tvåkokill (figur 7-1) och ta fram tillverkningsunderlag. Genomfört arbete har omfattat tillverkningsunderlag för tvåkokill, lyftdon för tvåkokill på SFR, lyftdon för tvåkokill på kraftverken samt lastbärare för att hantera tvåkokill med truck.

Program

SKB har inget program för utveckling av nya avfallsbehållare för rivningsavfall, men kommer att löpande bevaka behovet av ändamålsenliga avfallsbehållare inom pågående och framtida avvecklingsprojekt.

7.5.3 Avfallstransportbehållare för nya avfallsbehållare

Avfallstransportbehållare för långlivat avfall syftar till att möjliggöra säker och effektiv transport av långlivat avfall från avfallsproducenterna till nya mellanlager eller SFL. Behovet av avfallstransportbehållare styrs av val av avfallsbehållare och kapacitetsbehovet.

Nuläge

En ny avfallstransportbehållare, ATB 1T, för transport av ståltankar utvecklas i samarbete med amerikanska Holtec International Power Division Inc. Den nya avfallstransportbehållaren planeras att certifieras och driftsättas till 2020.

Program

Utvecklingen av ytterligare typer av avfallstransportbehållare styrs av tillkommande avfall och avfallsbehållare. Om nya avfallsbehållare utvecklas kommer även motsvarande transportbehållare att behöva utvecklas. I avvaktan på mer konkreta planer på hantering av det långlivade historiska avfallet bedrivs inget utvecklingsarbete av nya avfallstransportbehållare.

8 Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat och högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Det utgör en mindre del av den totala mängden kärnavfall som ska slutförvaras, men innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet. Det använda kärnbränslet måste konfigureras på sådant sätt att kriticitet inte uppnås. Slutförvaringen planeras ske i Kärnbränsleförvaret.

Det använda bränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt). Resteffekten gör att bränslet kräver kylning för att inte överhettas. Resteffekten beror till största del på bränslets avklingningstid, initiala anrikning och utbränning. Med utbränning menas den energimängd som utvunnits ur bränslet. Utbränningen anges i megawattdygn per kilo uran (MWd/kgU). I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna har utbränningen av bränslet ökat successivt sedan reaktorerna togs i drift. Motivet till dessa förändringar är att få ett så effektivt utnyttjande av bränslet som möjligt. Kopplat till denna effekthöjning är utveckling av modernt kärnbränsle, till exempel utveckling av nya material och konstruktioner, och användning av olika tillsatser såsom gadolinium och krom.

Enligt planeringsförutsättningarna (avsnitt 1.1) kommer den totala mängden använt kärnbränsle motsvara cirka 6 000 kapslar i Kärnbränsleförvaret. En kapsel innehåller cirka två ton bränsle. Mängden använt kärnbränsle anges som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet. I den mängd använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret ingår, förutom allt använt bränsle från dagens svenska kärnkraftverk, även bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik samt ett antal bränsleelement med så kallat Mox-bränsle (mixed oxide fuel). Dessa bränsletyper utgör en mycket liten del av den totala mängden. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från Ågestareaktorn samt cirka två ton använt kärnbränsle från Studsvik Nuclear AB:s undersökningsverksamhet mellanlagras i dag i Clab. I anläggningen lagras även 23 ton Mox-bränsle som har erhållits från Tyskland i utbyte mot det bränsle som i ett tidigt skede av det svenska kärnkraftsprogrammet sändes till La Hague i Frankrike för uppberedning, där uran, plutonium och avfallsprodukter separeras.

Nya bränsletyper som införs vid de svenska kärnkraftverken måste först godkännas av SKB. I denna verifieringsprocess kontrolleras bränsletypernas kompatibilitet med verksamhet som har bäring på bränsle i hela KBS-3-systemet.

SKB:s program avseende hantering av bränsle omfattar flera delar, från krav på information om bränslets egenskaper innan det används i bränslecykeln till att utforma ett program för kärnämneskontroll som är internationellt godkänt. Det utvecklingsarbete som genomförs och planeras inom dessa områden beskrivs i detta kapitel. Utveckling av kärnämneskontroll är ett område där SKB:s utveckling sker i nära samarbete med internationella organ.

Om en kapsel i Kärnbränsleförvaret skulle bli otät och vatten tränga in är bränslets egenskaper avgörande för hur snabbt radioaktiva ämnen frigörs. Resultat från tidigare säkerhetsanalyser visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar signifikant påverkar analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för mekanismen för upplösning av bränslematrisen behövs för att stödja tolkningen av de experimentella resultaten och därmed minska pessimismen i kommande säkerhetsanalyser. En önskan om ökad förståelse för och förbättrad systematisk beskrivning av den mekanism eller mekanismer som ligger bakom de observerade resultaten har också uttalats av SSM både inom ramen för tillståndsprövningen och granskningen av Fud-program 2016. Det återstår också vissa osäkerheter angående speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider.

8.1 Bränsleupplösning

Detta avsnitt beskriver forskningsprogrammet för bränsleupplösning i slutförvaringsmiljö. Bränsleupplösning medför frigörelse av radionuklider och processen är central för den konsekvensanalys som ingår i analys av säkerhet efter förslutning. SSM stöder i sin granskning av Fud 2016 samt i

sin granskning av SR-Site (SSM 2018) SKB:s insatser för processförståelse inom detta område med hänvisning till att dessa frågor har stor säkerhetsbetydelse och kräver fördjupad förståelse för att minimera osäkerhet i konsekvensanalysen. Dessa osäkerheter rör både experimentella undersökningar och teoretiska förklaringsmodeller. Syftet med det forskningsprogram som beskrivs här är att adressera dessa frågor.

Om kapseln förlorar sin täthet kommer bränslet att komma i kontakt med vatten och därmed börja lösas upp. Vattnet som kommer in i en potentiellt otät kapsel kommer då att interagera med de material som finns inne i kapseln, vilket påverkar den kemiska miljön och därmed speciering av upplösta radionuklider inne i kapseln. Anoxisk korrosion av järn bildar vätgas, vilket har visat sig motverka oxidativ upplösning av bränslematrisen; detta benämns vätgaseffekten.

För att öka förståelsen för mekanismen bakom vätgaseffekten och påverkan av radiolys på matrisupplösning i slutförvarsmiljö, utförs noggrant kontrollerade experiment med analoga material som utsätts för varierande grad av radiolys, kombinerat med modellering.

Variationer i bränslesammansättning samt driftförhållanden kan påverka frigörelsen av radionuklider från bränslet, både från den snabbupplösta fraktionen i gapinventariet och från den långsamma upplösningen av bränslematrisen. För att undersöka hur dessa parametrar påverkar bränsleupplösning genomförs lakningsexperiment med använt bränsle.

Korrosion av de metalledar, det vill säga konstruktionsmaterial och PWR-styrstavar, som ska deponeras tillsammans med bränslet i kopparkapseln, frigör aktiveringsprodukter. Ett par speciellt intressanta fall är frigörelse av radioaktivt silver från styrstavar och aktiveringsprodukter i kapslingsmaterial. Undersökningar som relaterar till detta beskrivs nedan.

Nuläge

För att öka förståelsen för de processer som sker under bränsleupplösning, med speciellt fokus på mekanismer som orsakar den observerade vätgaseffekten, utförs experiment i kontrollerad laboratoriemiljö där olika aspekter av bränsleupplösningens processen studeras. Den överliggande frågan är hur vätgas kan verka reducerande på en alfastrålande bränsleyta, då vätgas är inert i normal rumstemperatur. Reaktionen mellan väteperoxid och urandioxid är av intresse eftersom radiolytiskt producerad väteperoxid är den oxidant med störst inverkan i slutförvarsmiljön.

Under perioden slutfördes ett doktorandprojekt (Bauhn 2018), vilket syftade till att öka förståelsen för vätgaseffekten i system med dominerande alfastrålning. Experimenten som genomfördes utforskade vätgasens effekt i en lösning med plutonium (Bauhn et al. 2017), samt i system med olika typer av urandioxid (Simfuel, Bauhn et al. 2018b; obestrålad Mox, Bauhn et al. 2018a). Försöken visade dels att det krävs en yta för att åstadkomma den observerade vätgaseffekten i ett system med dominerande alfastrålning, dels att vätgasen verkar hindra oxidativ bränsleupplösning genom att reagera med ytbundna hydroxylradikaler. I denna reaktion bildas vatten och en väteatom, där väteatomen är reducerande.

Hur strålningsinducerad upplösning av urandioxid påverkas av den fasta fasens egenskaper studerades i ett doktorandprojekt under perioden (Fidalgo 2017). Ett av de ingående arbetena visade att reaktionen mellan syrgas och vätgas vid metalloxydytor bildar väteperoxid, vilken är en mer effektiv oxidant än syrgas (Fidalgo och Jonsson 2016). Resultaten från ett annat ingående experiment (Fidalgo et al. 2018) indikerade bildning av ytbundna hydroxylradikaler från katalytisk sönderdelning av väteperoxid. Urandioxidens redox-reaktivitet är central i dessa reaktioner och kan påverkas av tillsatser i materialet. Som en del av doktorandprojektet studerades därmed gadolinium-dopad urandioxid, med resultat som pekar på att tillsats av gadolinium minskar urandioxidens redox-reaktivitet (Fidalgo et al. 2019).

Kumagai et al. (2019) studerade hur urandioxidens stökiometri påverkar dess oxidativa upplösning. Resultaten visar att helt reducerad urandioxid reagerade med väteperoxid mycket snabbare än delvis oxiderad urandioxid. Experimenten visade också att högre halt väteperoxid i början av försöket medförde lägre uranutbyte för båda materialen, och detta tolkas som ett resultat av katalytiskt sönderfall av väteperoxid.

För att studera upplösningen av uransilicid (U_3Si_2), en föreslagen ny typ av skadetåligt kärnbränsle som testas runtom i världen, jämförde Maier et al. (2019) upplösningen av urandioxid med U_3Si_2 .

Studien fokuserade på reaktionskinetik för reaktionen mellan silicid och väteperoxid, samt upplösningshastighet under bestrålning av silicid med gammastrålning. Resultaten visar att siliciden reagerar något snabbare med väteperoxid än urandioxid, och att i karbonatfria lösningar bildas ett sekundärt mineral (studtit). I försök med gammastrålning är bildning av oxidant den begränsande faktorn, vilket medför en snabbare upplösning av urandioxid jämfört med silicid.

I EU-projektet Disco, vilket koordineras av SKB, undersöks upplösning av bränsletyper med olika tillsatser i urandioxidmatrisen. Detta sker genom experiment med använt bränsle, med analoga material (urandioxid med olika tillsatser) samt kemisk modellering. Projektet startades 2017 och kommer sluta 2021. De så kallade dopade bränslen som studeras är Adopt med både krom och aluminium, och bränsle dopat med endast krom. I projektet ingår även försök med Mox-bränsle. Dessutom studeras vanligt standardbränsle som referens i både oxiderande och reducerande miljö. De analoga materialen, av vilka vissa är färdigproducerade medan andra tar längre tid att framställa, inkluderar tillsatser av krom, aluminium, gadolinium, plutonium, och torium (som analog till plutonium, och Mox-bränsle). Lakningsexperimenten använder sig av vattenlösningar som är relevanta för olika typer av förvarskoncept, och är planerade så att de ska producera jämförbara resultat och ge indata till kemisk modellering. Arbetet inom kemisk modellering involverar både termodynamisk modellering av den fasta fasen specifikt med hänsyn till syrepotential, och upplösningsprocessen med vätgaseffekten inkluderad, samt kemiska interaktioner i bränslets närmiljö. Framstegen inom projektet kan följas från projektets webbplats, <https://www.disco-h2020.eu>, där också olika dokument och rapporter kan laddas ner.

För att testa hypotesen att successiv uppbyggnad av vätgas på grund anoxisk korrosion av järn kan strypa den oxidativa upplösningen av använt bränsle genomfördes ett autoklavexperiment med tillsatt järn. Den oxidativa bränsleupplösningen avtog i takt med uppbyggnad av vätgas, för att vid cirka 220 dagar helt avstanna (Puranen et al. 2017). För att vidare undersöka om järn(II) i lösning kan ha påverkat resultaten startades ett nytt autoklavförsök med samma bränsle men med magnetit i stället för järn. Resultaten håller i nuläget på att analyseras.

Två olika högutbrända bränslen, det vill säga bränsle med utbränning över cirka 50 MWd/kgU, har lakats under vätgas för att undersöka om de ger annorlunda resultat än de med lägre utbränning. Ett svenskt bränsle med utbränning cirka 65 MWd/kgU visade negligerbar oxidativ matrisupplösning. Efter cirka ett års lakning under vätgas har laklösningen uranhalter som motsvarar lösligheten för urandioxid under reducerande förhållanden och frigörelsen av cesium och strontium har avstannat (Puranen et al. 2018). Tidigare försök med ett annat högutbränt bränsle gav inga tillförlitliga resultat, beroende på problem med provpreparering (Puranen et al. 2016).

Den snabbupplösta fraktionen, det vill säga IRF (Instant Release Fraction), består av de fraktioner av radionuklidinventariet som sitter utanför bränslematrisen. För att undersöka hur stor del av inventariet som sitter i korngränserna har två tidigare lakade bränslen malts till kornstorlek med samtidig lakning (Fidalgo et al. 2019). Resultaten från experimentet är svårtolkade då många korn krossats så att inte bara korngränser var frilagda för lakning utan också de interna delarna av bränslekornen. Fortsatta analyser behövs för att öka vår förståelse om frigörelse från korngränser.

Resultaten från EU-projektet First Nuclides har nu sammanfattats i två artiklar med fokus på IRF från högutbrända bränslen. Resultaten visar att för bränslen som hade en hög linjär effekt (W/cm) i reaktorn kunde den linjära effekten korreleras med frigörelse av jod och cesium (Lemmens et al. 2017). Projektets resultat har bidragit till förståelse för hur den snabbupplösta fraktionen av jod, cesium och selen korrelerar med bränsleprovets beskaffenhet och gap- och korngränsinventarium av dessa fissionsprodukter (Kienzler et al. 2017), samt gett viss insikt i hur fissionsgaser frigörs under experimentens gång. Korrosion av zircaloy och stål studerades i EU-projektet Cast (<https://www.projectcast.eu/>) där SKB deltog. Fokus var på innehåll av kol-14 i dessa metaller, samt frigörelse och speciering av kol-14. En studie av korrosion av bestrålat stål i en reducerande alkalisk miljö (Cvetković et al. 2018) visade att det bildas organiska ämnen (till exempel olika karboxylsyror) som ett resultat av kolinnehållet i stål, och dessa organiska ämnen bestämmer till stor del specieringen av kol-14. Fortsatta undersökningar av frigörelsen av silver-108m från styrstavar har genomförts i Studsvik. Tidigare autoklavförsök i vätgasatmosfär med använda styrstavar visade ingen frigörelse av silver och försöket fortsatte med extern bestrålning i fyra veckor. Gammamätning vid försökets slut påvisade ingen silver-108m i lösning, det vill säga halten silver-108m var lägre än detektionsgränsen. En publik rapport om detta arbete är under framtagning.

Program

Under Fud-perioden kommer pågående forskningsuppdrag på Studsvik att fortsätta, och nya uppdrag kommer att påbörjas. Planerade studier inkluderar avslut och analys av mångåriga bränslelagningsprojekt (flera tiotals år) i hot cell, samt start av liknande lagningsförsök med fokus på dopat bränsle. En studie med långtidslakning av bränsle i glasampuller kommer att fortsätta; några av de kvarvarande ampullerna planeras att öppnas under Fud-perioden. Data från olika uppdrag som ännu inte publicerats ska analyseras och publiceras i vetenskapliga tidskrifter.

I samband med att skadat bränsle skickas till Studsvik för att placeras i hylsor och transportboxar kommer studier av utvalda bitar av det skadade bränslet att initieras. Syftet är att karaktärisera det skadade bränslet med avseende på oxiderat uran och radionuklidinnehåll.

Pågående doktorandprojekt på KTH och Chalmers tekniska högskola kommer att fortsätta under Fud-perioden. Målet med denna är att öka kunskapen om de processer och mekanismer som reglerar oxidativ bränsleupplösning, till exempel katalytisk sönderdelning av väteperoxid.

Inom det pågående EU-projektet Disco studeras matrisupplösning av använt bränsle, vid Studsvik och andra hot cell-anläggningar i Europa, samt liknande experiment med analog material. Dessa experiment sker främst under reducerande förhållanden (det vill säga med vätgas), men vissa experiment sker också under oxiderande förhållanden. Data från dessa experiment ska inom ramen för projektet inkorporeras i uppdaterade modeller för bränsleupplösning, och ge svar på om tillsatser i så kallade dopat bränsle påverkar upplösningskinetiken, till exempel genom att påverka vätgaseffekten eller materialens redoxreaktivitet. Resultat förväntas vara tillgängliga mot slutet av projektiden vilken infaller under Fud-perioden.

8.2 Radionuklidspeciering och lösligheter

Om en kapsel skadas och radionuklider frigörs från bränslet, kommer deras transport påverkas av den kemiska miljön inne i den skadade kapseln. Därför är det viktigt att förstå hur radionuklider interagerar med den fasta fasen och lösta species som finns inne i en vattenfylld kapsel i förvaringsmiljö. Studier inom detta område genomförs för att fastställa speciering och löslighetsgränser vilka används inom modellering av transport av radionuklider ut ur en skadad kapsel.

Nuläge

Det doktorandarbeta som utförts på FZ Jülich om radium-barium-samfällning har avslutats och resulterat i en avhandling (Weber 2017). De olika arbeten som ingår fokuserar på hur radium inkorporeras i existerande barit. Resultaten har publicerats i vetenskapliga artiklar (Weber et al. 2016, 2017) och sammanfattningsvis visar det på att den fasta fasens beskaffenhet är viktig för hur snabbt samfällningen bildas. Den snabba reaktionen och genomgående omvandlingen av den fasta fasen som tidigare observerats kan med hjälp av dessa studier förklaras, då den barit som användes i försöken hade hög koncentration av vätskefyllda porer och hålrum (Weber et al. 2016). Uptagsmekanismen studerades mer ingående av Weber et al. (2017) genom att studera utvecklingen av mikrostruktur och radiuminnehåll i både mineral och vattenlösning under försökets gång. Tre olika steg kunde urskiljas: Först försvann de riktigt små porerna till fördel för makroporer, sedan togs radium upp runt om makroporerna, och slutligen hade en homogen radiumbarit bildats i hela ursprungliga mineralkornet. Försöket visade på en fullständig omkristallisation av barit till radiumbarit, och detta skedde via mikrostrukturella förändringar.

Reduktion och nedfällning av neptunium på järn studerades av Yang et al. (2017). Effekterna av både rent och korroderat järn undersöktes i en anoxisk miljö. Resultaten visar att föroxiderat järn, det vill säga järn med en magnetitytta, var mer effektivt för reduktion av neptunium(V) och immobilisering av neptunium i form av neptunium(IV) på det korroderade järnet. Efter experimenten konstaterades att neptunium hade fällts ut och bildat ett 5–8 µm tjockt ytlager på det korroderade järnet. Detta indikerar att reduktion och fällning av neptunium troligtvis sker i den miljö som förväntas i en trasig kopparkapsel.

EU-projektet Redupp som avslutades för några år sedan har fortsatt att resultera i vetenskapliga artiklar. Redupp fokuserade på hur resultat av upplösningsexperiment kan påverkas av hur ytan av den fasta fasen ändras under experimentets gång, till exempel genom initial upplösning av kanter, korngränser och andra mindre stabila områden. I den senaste artikeln beskrivs förhållandet mellan interna defekter såsom syrevakanser i ceriumoxid och upplösningshastighet: ju fler defekter, desto högre upplösningshastighet (Corkhill et al. 2016).

Ett till Redupp kopplat doktorandprojekt har avslutats under den senaste Fud-perioden. I avhandlingen (Myllykylä 2017) ingår bland annat ett par studier som involverar en liten mängd av isotopen torium-229. Isotoputbyte mellan torium-229 (som tillsatts i vattenlösningen) och torium-232 i toriumoxiden visar hur isotoputbytet fortgår även då systemet befinner sig nära kemisk jämvikt (Myllykylä et al. 2017b). För att vidare studera hur den fasta fasens isotopsammansättning ändrades under isotoputbytesexperimenten, användes alfaspktroskopi. Med hjälp av denna metod kunde tjockleken på det påverkade ytlagret uppskattas till max 0,1 μm efter 534 dagar i vattenlösning (Myllykylä et al. 2017a).

I ett annat avslutat EU-projekt, Skin, där SKB deltog, undersöktes sorptions- och upptagsmekanismer för mycket låga koncentrationer av radionuklider i mineral. Under den senaste Fud-perioden har vissa resultat från Skin sammanfattats och diskuterats i en artikel (Grambow et al. 2017) med avseende på uppmätt löslighet och vad den representerar. Resultaten för urandioxid och toriumdioxid indikerar att då systemet är nära jämvikt är mindre än ett monolager involverat i den observerade upplösning- och nedfällningsprocessen. Detta gäller för experiment som pågår i cirka 100 dagar. Troligen är det endast delar av provets yta, till exempel defekter eller korngränser, som deltar i den upplösning som observeras (Grambow et al. 2017). Författarna tolkar detta som att termodynamisk jämvikt inte uppnås, eller ens kan förväntas att uppnås, inom en tid som kan anses rimlig för ett laboratorieexperiment.

Möjlig omvandling av urandioxid och använt bränsle till mineralet koffinit (USiO_4) studeras i ett pågående projekt tillsammans med Amphos 21, Marcoule Institute for Separation Chemistry och Stanford University. Det involverar både experiment och kemisk modellering. Arbetet har startat och resultaten förväntas bli tillgängliga under kommande Fud-period.

Ett pågående internationellt samarbetsprojekt med NEA, Thermochemical Database (TDB) Project, kallat NEA-TDB, har resulterat i att den termodynamiska databasen nu finns tillgänglig online: <https://www.oecd-nea.org/dbtdb/tbdbdata/>. Arbetet med databasen fortgår och för vissa element är uppdateringar nära förestående.

Program

Forskning kring eventuell bildning av silikatmineralet koffinit och hur varierande kiselhalter påverkar upplösning av urandioxid pågår ett internationellt projekt (se ovan). Planerna är att projektet ska avslutas under andra halvan av 2019 och att resultaten ska publiceras i öppen litteratur.

Uranspeciering behöver fortsatt studeras med tanke på nya data som pekar på möjlig existens av kalcium-uranyl-karbonatkomplex, och ett projekt i samarbete med Stockholms universitet och Chalmers tekniska högskola är i planeringsfasen. Uppdatering av termodynamiska data och speciering är relevant även för andra radionuklider, och därför har SKB gått med i nästa fas av NEA-TDB-projektet. Under de kommande fyra åren kommer projektet att fokusera på uppdatering av databasen för organiska föreningar, lantanider och/eller svaga komplex (inklusive de som bildas via hydrolys).

EU-projektet Disco kopplar även till frågor som involverar speciering och lösligheter, eftersom kemisk modellering av bränsleupplösning ingår: både tidigare, projekt-externa resultat och projekt-interna resultat kommer inkluderas i modellerna. Projektet ska därmed fylla kunskapsluckor och minska osäkerheter vad gäller radionuklidens speciering och löslighet i förvarsmiljö.

8.3 Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet

Med icke-reguljärt bränsle avses bland annat bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik, Mox-bränsle samt skadat bränsle.

Vid Clab inspekteras ett antal individuella bränsleelement regelbundet för att följa förändringar i elementens egenskaper under mellanlagring. Bränslets integritet har även betydelse för inkapslingsanläggningen då hanteringen av bränsleelementen i Clink måste kunna ske på ett förutbestämt sätt. Därför följs åldring av kärnbränsle i Clab, från kärnkraftverk och industrin i övrigt samt rön från internationell forskning. Då kärnbränsle i Clab hanteras i vattenfyllda bassänger är inspektion av elementen förhållandevis enkel, till skillnad från torrlagring i kapslar där sådan inspektion inte är möjlig på ett enkelt och kontinuerligt sätt. Kontakt upprätthålls även med bränsleleverantörer samt liknande anläggningar med erfarenhet av mellanlagring.

Nuläge

Att hantera och tömma de svenska kärnkraftverken på skadat bränsle pågår i ett särskilt projekt som är i sitt slutskede. Skadat bränsle med otät kapsling kallas även läckande bränsle. För att återupprätta den barriärfunktion som kapslingen utgör under driften av de anläggningar där bränsle hanteras, behandlas det skadade bränslet med särskilda metoder så att bränslet inte behöver vidare behandling före slutförvaring.

SKB har beslutat att använda två olika metoder för omhändertagande av läckande bränslestavar. Båda metoderna innebär att det skadade bränslet placeras i behållare med dimensioner av PWR- eller BWR-bränsle. Dessa behållare är vattentäta och ersätter därmed den läckande kapslingen. Den ena metoden är utvecklad av Westinghouse och kallas Quiver. Metoden utvecklas för användning i kärnkraftverkens bassänger. Innan förslutning av behållaren sker torkas innehållet (efter att bränslekapslingen punkterats för att säkerställa fullständig torkning), och torrheten verifieras. Den andra metoden har utvecklats av Studsvik och den används för transport av bränslerester till Clab. Studsvikmetoden innebär att de läckande bränslestavarna skickas till Studsvik där de förs till en hot cell, sågas upp i enmeterslängder, torkas enligt internationellt protokoll och därefter kapslas in i speciella hylsor, som är gas- och vattentäta. Därefter packas de i transportboxar vilka har dimensionerna av PWR- eller BWR-bränsle. Studsviks transportboxar kan sedan hanteras i resten av KBS-3-systemet.

Existerande dokumentation visar också att det finns ett mindre antal bränsleelement med läckande bränslestavar på Clab. En förstudie pågår rörande hur dessa ska tas omhand.

Det långsiktiga inspektionsprogrammet för kärnbränsle är i gång efter att bränslehanteringsmaskinen på Clab har automatiserats i syfte att minska risken för missöden vid bränsleinspektioner. Bland annat har Ågesta-bränsleelement och Ringhals PWR-bränsleelement med känslig zirkoniumlegering inspekterats. De resultat som erhålls från dessa inspektioner har diskuterats med aktuella bränsletillverkare och kärnkraftverk.

För vissa bränsletyper har efterhand svagheter med konstruktionen upptäckts som kan medföra problem vid hantering av bränslet. Uppgifter om sådana konstruktioner dokumenteras i SKB:s bränsledatabaser då de kan påverka utformning av och hantering i Clink.

Erfarenheter från driften av kärnkraftverken i Sverige och internationellt, följs upp via deltagande i internationella konferenser såsom IAEA:s grupper för samverkan och OECD/NEA-projektet Scip III (Studsvik Cladding Integrity Project). Via kontakt med representanter för de svenska kärnkraftverken samt kärnkraftsindustrin i Sverige och internationellt erhålls även erfarenhet av hantering av kärnbränslet.

Program

När kärnkraftverken är tömda på skadat bränsle, ska planerna för hantering av det kända skadade, obehandlade bränslet på Clab fastställas. En detaljerad plan för detta ska upprättas under den kommande Fud-perioden. Tillsammans med kärntechniska aktörer har metoder utvecklats som kan hantera de mindre mängder skadat bränsle som tros uppkomma efter att verken tömts på befintligt skadat bränsle.

I linje med Clabs åldringsprogram så kommer en förnyad åldringsanalys av kärnbränsle i mellanlagring utföras. En del av detta är en systemanalys vilken är planerad att initieras under 2019.

Omvärldsbevakning utförs för att hålla sig uppdaterad med de senaste rönen avseende integriteten hos kärnbränsle i bassängmiljö, men även för torr hantering. Detta omfattar forskningsresultat i ämnet samt besök vid och erfarenhetsutbyte med liknande anläggningar. Under Fud-perioden kommer SKB att fortsatt delta i olika internationella forum. SKB är med i OECD/NEA-projektet Scip III och kommer också delta i nästa fas av projektet, Scip IV, som startade i juni 2019. Scip IV innehåller mer av backend-frågor än tidigare Scip-projekt som mer har fokuserat på bränslets integritet under drift vid höga utbränningar.

8.4 Bränslekaraktärisering, resteffekt och strålning

Resteffekten från bränslet är en central parameter som måste vara känd vid olika steg i kärnbränslecykeln, såsom transport, mellanlagring, inkapsling och slutförvaring. Ofta utgör resteffekten den begränsande faktorn, vilket gör att den har en betydande ekonomisk betydelse.

Vid bränslekaraktärisering används all relevant tillgänglig information i form av bränslets egenskaper och drifhistorik, beräkningskoder och mätningar. Bränsleelementets radionuklidinventarium beräknas, och utifrån detta kan bränslets multiplicitet (kopplat till kriticitet), strålningsfält och resteffekt tas fram. Dessutom bestäms bränslets innehåll av fissila ämnen, vilket gör att bränslet kan verifieras ur kärnämneskontrollsynpunkt. Det finns krav på att alla bränsleelement måste verifieras före inkapsling, vilket är planeringsförutsättningen.

Nuläge

Ett projekt med fokus på utveckling av mätningar och beräkningar av bränsleknippens gamma- och neutronstrålning samt resteffekt har pågått från 2015 (som i sin tur bygger på tidigare aktiviteter och projekt). Projektet är nu inne i en andra fas. Arbetet syftar ytterst till att ta fram ett mätsystem som kan klara kraven för att karaktärisera bränsle som ska kapslas in i inkapslingsanläggningen. Kraven på ett sådant system beror också på hur mycket annan kunskap som finns om det använda bränslet, till exempel drifhistorik, vilket också utreds, se avsnitt 8.5. Utveckling av instrument och metoder behövs eftersom målsättningen är att mätsystemet ska vara permanent, komplett (kunna mäta alla bränsleelement) och robust. Det ska även ge entydiga resultat, ha låg osäkerhet, och en hög genomströmningskapacitet. Tanken är att ett kombinerat mätsystem ska användas för att verifiera bränslets egenskaper, och en kalorimeter finnas för att förankra bestämningarna framför allt (men inte endast) av resteffekt.

Gammamätningar av bränsle i Clab genomfördes hösten 2016, inom ramen för ett internationellt projekt (kallas ”SKB-50” men heter officiellt Non-Destructive Assay Spent Fuel Project; Tobin et al. 2016). Resultaten av dessa mätningar har nu utvärderats. För att validera den nya metodiken behöver samtliga PWR-bränslen som ingick i mätningsskampanjen även mätas kalorimetriskt. De kalorimetriska mätningarna påbörjades under januari 2018. I skrivande stund har tillräckligt antal mätningar genomförts för att fastställa resteffekt, och utvärdering av gammametoden är påbörjad. Arbetet med att mäta resterande bränslen som ingår i projektet (SKB-50) fortsätter när möjlighet ges. De bränslemätningar som genomförts i Clab inom ramen av detta internationella projekt har möjliggjort en utvärdering av de olika ingående metodernas osäkerheter och de illustrerar hur en metod som tillämpar delar av koden Scale/Origen kan förbättra mätningarnas tillförlitlighet (Vaccaro et al. 2018).

Då kunskap om resteffekt är centralt för att bedöma behov av kyleffekt i Clab, har en översyn genomförts av samtliga beräkningar. Detta har resulterat i att de beräkningsalgoritmer för resteffekt som används i databaserna PlutoWeb och Dark nu förbättras bland annat genom uppdatering av befintliga algoritmer. Dessutom ska en översyn göras över de algoritmer som används inom verksamheten på Clab och inom transport av använt kärnbränsle.

Beträffande strålning och strålfältets egenskaper, görs inom SKB mätningar och beräkningar av källstyrkor, stråldoser och strålskärning. Renodlade strålskyddsfrågor har en etablerad organisation och arbetssätt för anläggningsdrift och transport av kärnavfall och använt kärnbränsle. Korrekt beräkning och användning av källtermer och stråldoser i övriga tillämpningar behöver samordnas med strålskydd inom en gemensam plattform med metodiker, beräkningsverktyg och kompetens.

Bränslets radioaktivitet innebär interaktion mellan strålfältet och de omgivande materialen. Effekterna av denna interaktion är viktiga att identifiera och analysera i hela hanteringskedjan, inte minst för dimensionering av strålskydd. Strålfältet påverkar även materialegenskaper hos barriärerna i slutförvaret, se till exempel kapitel 9 och 11. Därför sker omvärldsbevakning och i relevanta fall forskningsuppdrag rörande bränslets joniserande strålning och hur strålfältets egenskaper beror av olika parametrar. I detta syfte pågår ett projekt där enskilda bränsleelements radioaktivitet används för att beräkna emitterad strålning och deponerade energier i kapseln och dess närfält. Dessa beräkningar görs utifrån Monte-Carlo-simuleringar på atomnivå vilka utförs vid Uppsala universitet. En beräkningsmodell är framtagen för neutron- och gammastrålning från olika vanliga typer av BWR- och PWR-bränslen. Beräkningarna baseras på emitterade energier från cesium-137 och europium-154.

Det beräknade strålfältets verkningar på barriärerna tas upp i de separata kapitlen för kapsel och bentonit. Radiolys av vatten diskuteras i avsnitt 8.1.

Program

Bränslekaraktäriseringsprojektet ska under Fud-perioden utveckla och förfina metoderna. Målet under perioden är att utveckla delmetoderna och detektorsystemet och verifiera dem. Under kommande år planeras fortsatta kalorimetriska-, neutron- och gammamätningar på Clab, samt undersökningar med avseende på strålningskänsligheten och detektorresponsen för olika detektorer med tillhörande elektronik. I perioden efter etableras det industriella systemet för användning i Clink med alla relevanta krav implementerade.

De väl etablerade samarbetena med olika internationella grupper och organisationer fortsätter, inte minst samarbetet med amerikanska Department of Energy (DoE) genom Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge NL, Lawrence Livermore NL och Pacific Northwest NL. I Sverige fortsätter samarbetena med Uppsala universitet och Lunds universitet. I det stora EU-programmet Eurad (European Joint Research Programme on Radioactive Waste Management) koordinerar SKB ett projekt kallat SFC (Spent Fuel Characterization and Evolution Until Disposal) under perioden. SKB genomför ett internationellt blindtest där flera olika modelleringsgrupper predikterar resteffekten från ett antal för deltagarna okända bränsleelement. Dessa jämförs sedan med kalorimetriska mätningar av bränsleelementen i fråga. Syftet är att ge en state-of-the-art-bild av status beträffande osäkerhet och noggrannhet för beräkningar av resteffekt. Blindtestet görs i samarbete med OECD/NEA, som också kommer att administrera dessa data.

Allt detta görs i samarbete med det projekt som beskrivs under avsnitt 8.5, samt med driften avseende de existerande databaser som dokumenterar bränsledata och resteffekt. Projektet ska också undersöka hur detaljeringsgraden i bränsledata och effekthistorik påverkar beräkningsresultatet.

Den utveckling av resteffektberäkningsalgoritmerna i PlutoWeb och Dark som påbörjats kommer att fortsätta under kommande Fud-period.

SKB avser att utveckla forskningsområdet strålning genom att ta fram en metodik för beräkning av strårelaterade parametrar, samt att utreda vilka beräkningar som ska göras. Metodiken ska omfatta vilka beräkningskoder som ska användas och hur dessa ska valideras, vilka beräkningsmiljöer som ska användas, kvalitetssäkring av indata samt dokumentation av beräkningar. Metodiken ska även svara på vilka beräkningar som ska göras av SKB och vilka som ska utföras av externa parter. Denna insats kommer att bidra till ökad effektivitet genom samordning och spårbarhet rörande strålnings- och stråldosberäkningar inom olika projekt. Kontroll över genomförda beräkningar kan också bidra till att dimensioneringen av strålskärmar för nya anläggningar optimeras, och till mer effektiva driftrelaterade strålningsanalyser.

Arbetet med att utifrån bränslets gamma- och neutronstrålning beräkna temperaturer i bränslet och kapselns närområde fortsätter under Fud-perioden. Delar av detta arbete innebär beräkningar för fler bränsletyper och fler gammaenergier, vilka kommer användas vidare i de beräkningar av kapselns temperaturutveckling som beskrivs i kapitel 9.

8.5 Bränsleinformation och optimering inför inkapsling

Bränslets sammansättning är utgångspunkten för alla de beräkningar av radioaktivitet, kriticitet, resteffekt och radionuklidinventarium som behöver göras för det bränsle som ska transporteras, mellanlagras och slutförvaras. För att korrekt kunna bestämma detta behövs detaljerad information om bränslets geometri, material, initial anrikning och drifhistorik.

En viktig uppgift för SKB och kärnkraftverken under den kommande Fud-perioden är att säkerställa att den bränsleinformation, som behövs inför hantering och slutförvaring i KBS-3-systemet, sammanställs och bevaras för framtiden. Detta är speciellt viktigt vid den nu pågående avvecklingen av kärntekniska anläggningar. Bränsleinformationsprojektet (MIB) pågår under 2018–2019 med detta syfte.

Nuläge

Detaljeringsgraden på den bränsleinformation som behövs för verifiering av bränslets egenskaper beror på vilka mätmetoder och krav på noggrannhet som krävs i olika steg av bränslets väg från kärnkraftverken till Clink och slutförvaring i kapslar. Ju mer detaljerad bränsledata som kan erhållas desto mer precisa beräkningar kan göras, systemet kan optimeras, och påslag för olika typer av osäkerheter minimeras.

Nu pågår ett arbete för att kvalitetssäkra den bränsleinformation som SKB har i sina databaser. Detta görs dels genom automatiserade jämförelser med data från kraftverken, dels genom att gå igenom bränsledokumentation från bränsleleverantörerna och kontrollera den mot databasens uppgifter. Den stora fördelen med att göra automatiserade kontroller mot kraftverkens data är att jämförelsen kan göras utan risk för manuell felhantering, vilket är en uppenbar risk om stora mängder data matas in manuellt i en databas.

För äldre bränsle finns i många fall mindre detaljerad bränsledata dokumenterad. I vissa fall finns inte heller detaljerad driftdata sparad hos kärnkraftverken.

Projektet kommer ta fram riktlinjer för vilka osäkerheter som måste associeras med bränsle där information saknas.

Program

De olika databaser som finns inom SKB ska samordnas så att alla beräkningar och kontroller inom SKB utgår ifrån en och samma kvalitetskontrollerade bränsledatabas.

En del av projektets uppgift är att föreslå lösningar på, och möjliggöra, att olika beräkningsprogram kan kopplas till denna databas så att beräkningar, i den mån det handlar om historiskt bränsle, kan utgå ifrån kvalitetssäkrad data från kraftverken i stället för antagna data. Detta gäller såväl beräkningar av radionuklidinnehåll, strålning, resteffekt som kriticitet. Resteffekt i individuella bränsleelement påverkar hur urval av bränsleelement som ska placeras i en kapsel kan göras för att minimera antalet kapslar (inkapslingsoptimering).

I nuläget sker en översyn av hur inkapslingsoptimering ska gå till baserat på den information som finns tillgänglig och kommer finnas tillgänglig vid inkapslingstillfället. Insatser under Fud-perioden syftar till att ta fram verktyg för optimering av kapselinnehåll.

8.6 Kriticitet

För kriticitetsberäkningar tillämpar SKB utbränningskreditering för PWR samt BA-kreditering för BWR. Utbränningskreditering innebär att den minskning av reaktiviteten som sker då bränslet bestrålas i reaktorn och utbränningen ökar tillgodoräknas i kriticitetsanalyserna. BA-kreditering innebär att hänsyn tas till att bränslet innehåller så kallad brännbar absorber (BA), främst gadolinium-155, som är en stark neutron-absorber och därmed minskar bränslets reaktivitet.

SKB:s program avseende kriticitetssäkerhet utvecklar kontinuerligt använd metodik och validerar nya versioner av beräkningsprogram. Både metodik och beräkningsprogram ska vara i enlighet med moderna internationellt accepterade standarder och krav.

Nuläge

Under 2013–2016 implementerades en ny metodik för utbränningskreditering i ansökningarna för Clink, Clab och Kärnbränsleförvaret. Under den senaste perioden har denna metod befästs genom olika aktiviteter. En central del är en validering av den nya versionen av datorkoden Scale, där ändrade osäkerheter för plutonium-tvärsnitt har beaktats. Enligt SKB:s metodik för validering av beräkningsprogram för kriticitetsberäkningar väljs de kriticitetsexperiment ut från OECD/NEAs databas som har neutronkaraktäristik som bäst motsvarar våra målsystem (kopparkapseln och Clabs förvaringskassetter). Detta urval görs med hjälp av programmet Tsunami med tillhörande metodik utvecklad av ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Ändringen i plutonium-tvärsnittet påverkade urvalet så att andra experiment än i tidigare validering valdes ut. Vid höga utbränningsfaktorer fanns inga experiment som var tillräckligt lika kopparkapselns neutronkaraktäristik enligt de kriterier som rekommenderas av ORNL. För att detta skall uppnås behövs experiment med innehåll av både järn och plutonium, vilket i dag saknas i OECD/NEA:s databas. SKB löste problemet genom att välja ut ett antal olika experiment som tillsammans täcker alla de viktigaste reaktioner som förekommer i järn och plutonium. Detta bedöms i dag vara tillräckligt för att uppskatta osäkerheten i Scale-koden.

Metodikrapporten för kriticitetsanalys har uppdaterats med beaktande av geometriförändringar som kan ske under antagande om att kapselns integritet förlorats. Arbetet med att säkerställa att de krav som ställs i kriticitetsanalysen kan verifieras under kapseltillverkningen har fortsatt och resulterat i en rapport om defekter i insatsen.

Program

Under Fud-perioden planeras en uppdatering av kriticitetsanalysen för Kärnbränsleförvaret där hänsyn ska tas till möjliga geometriförändringar i en kapsel vars integritet har förlorats. I detta ingår också utredning av den långsiktiga stabiliteten hos de fissionsprodukter som används i utbränningskreditering, då kriticitetsanalysen måste täcka in tidsperioder upp till en miljon år. Förändrad anläggningsutformning och ny händelseinventering för Clink kräver en uppdaterad kriticitetsanalys. Utöver detta planeras också strategin för hur de bränsleelement som inte möter kapselns kriticitetskrav ska tas om hand. Kopplat till projektet för bränsleinformation (avsnitt 8.5) ska en utredning genomföras om hur detaljerad bränsleinformation kan användas för att göra kapselspecifika beräkningar av kriticitet.

8.7 Kärnämneskontroll

För inkapslat bränsle kommer systemet för kärnämneskontroll bland annat att innehålla uppgifter om de enskilda kapslarnas innehåll av kärnämne, vilka bränsleelement som kapslarna innehåller, när bränslet kapslades in, transporterades och anlände till Kärnbränsleförvaret, var kapslarna är deponerade och det totala innehållet av kärnämne i förvaret. Enskilda kapslar och deras innehåll ska alltså kunna identifieras.

En övergripande beskrivning av området kärnämneskontroll ges i avsnitt 2.4

Tillämpningen av kärnämneskontroll måste säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnbränslet. Detta innebär kontroller och verifiering för att tillse att det använda kärnbränslet inte kommer på avvägar, och medför att utvecklingen av kärnämneskontrollen för KBS-3-systemet i huvudsak rör följande områden:

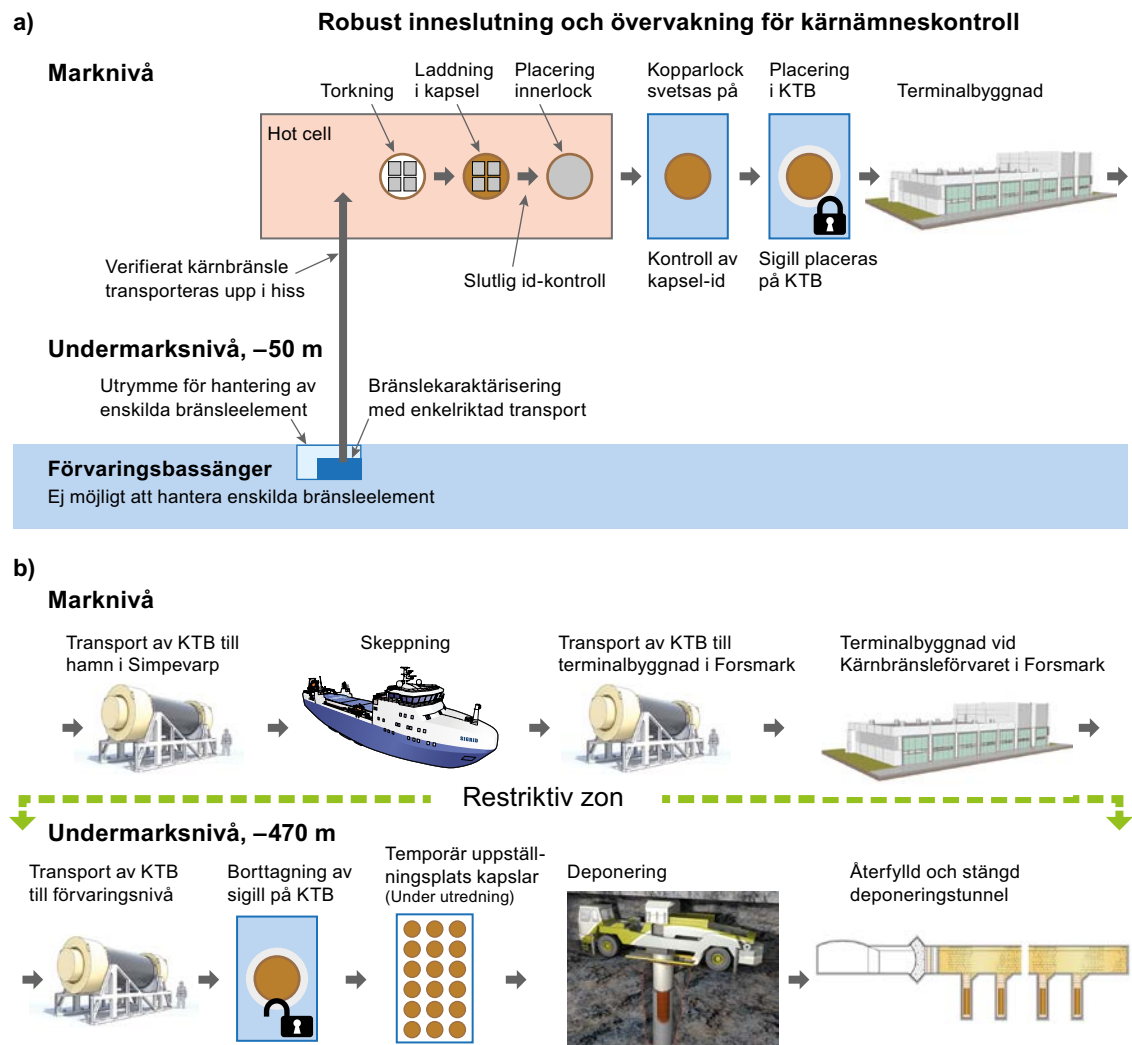
- Metod för verifiering av deklarerat kärnämne.
- Logistik för kärnämneskontroll.
- Kopparkapselidentifiering.

- Sigill för kärnämneskontroll.
- Obevakade verifieringssystem.
- Hantering av onormala händelser i kärnämneskontrollen.
- Konstruktionsdataverifiering.

Utvecklingsarbetet i ovanstående områden kommer att genomföras sammanhållet så att helheten inom kärnämneskontrollen beaktas för att på så sätt säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnämne i KBS-3-systemet.

Nuläge

Under senaste Fud-perioden har principiella steg i kärnämneskontrollen utarbetats (figur 8-1).



Figur 8-1. a) Schematisk bild av Clink som visar planerade kontroller i bränslets väg från lagringsbassängerna via bränslets mätstation, hanteringsbassäng, torkning, placering i kapsel och slutlig identitetskontroll av bränslet innan innerlocket monteras. Därefter monteras kopparlocket och kapselidentitet kontrolleras innan kapseln slutligen placeras i en kapseltransportbehållare och safeguards-sigillen sätts på. b) Schematisk bild som visar transport och hantering av inkapslat bränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret med kontrollen av safeguards-sigill i samband med öppning av kapseltransportbehållare, KTB. Kapseln överförs direkt från KTB till deponeringsmaskinen i samband med identitetskontroll, för att sedan placeras på en temporär uppställningsplats inför deponeringskampanjen.

Principerna baseras på följande: Information om det använda bränslets innehåll av kärnämne måste säkerställas. Efter att bränslet genomgått mätningar och verifikation i inkapslingsanläggningen placeras det så att det inte kan förväxlas med annat bränsle, till exempel icke verifierat bränsle. Efter hantering, torkning och placering av bränslet i kapseln (figur 8-1a) kontrolleras bränslets identiteter och position med optisk utrustning. Kapselns identitet verifieras vid samma tillfälle så att det inte ska kunna uppstå någon otydlighet om vilket bränsle som placerats i respektive kapsel. Detta moment är kritiskt i hanteringen och det måste därför utföras på ett sådant sätt att inga förväxlingar kan uppstå. Efter att kapseln förslutits så är den en ny minsta enhet i hanteringen av kärnämnet.

Kapseln placeras i en kapseltransportbehållare inför transport till Kärnbränsleförvaret. Kapseltransportbehållaren kommer att föras med sigill och annan utrustning för att säkerställa att kapseln som tas emot i Kärnbränsleförvaret inte har öppnats eller blivit utbytt.

I Kärnbränsleförvaret kontrolleras sigillen med statusöverföring till kontrollorganen i samband med att kapseltransportbehållaren öppnas (figur 8-1b). I anläggningens mottagningsstation finns möjlighet att i samband med omlastning till deponeringsmaskinen verifiera att mottagen kapselidentitet överensstämmer med den avsända kapselidentiteten. Efter omlastning placeras kapseln i deponeringsposition eller temporärt på en uppställningsplats inför deponering.

Slutförvarets olika öppningar är övervakade eller förseglade så att inget kärnämne ska kunna avledas. Hela den volym som omsluter slutförvaret och all mark ovan slutförvaret är en restriktiv zon där ingen annan verksamhet än den som redovisats för kontrollorganen tillåts (figur 8-1b). Principen är att det kärnämne som förts ner i slutförvaret kommer att förbli där och ska inte kunna föras ut obemärkt på något sätt.

SKB har bidragit till Europeiska kommissionens forskning och utveckling av metoder för märkning och identifiering av kopparkapslar. En metod som utvecklas innebär att märkningar görs på insidan av kopparkapselns lock, när kapsellocket väl är påsvetsat finns det ingen praktisk möjlighet att påverka identitetsmärkningen och identitetsavläsning kan göras med hjälp av ultraljud. En annan metod som utvecklas innebär att registrera mycket små och unika ojämnheter på kapselns insida innan den lämnar Clink. Fortsatt utveckling är nödvändig för att metoderna ska bli tillförlitliga och kunna accepteras i produktionsmiljö. Den i dagsläget rimligaste metoden att säkert identifiera kapslarna är att märka kapseln med identitetsnummer både på utsidan och på insidan. Avläsning av invändigt avtryck eller märkning är tänkt att användas endast vid händelser där sigillen på kapseltransportbehållaren skadats och det kan misstänkas att kapseln har bytts ut under transporten till Kärnbränsleförvaret.

Hantering av onormala händelser för kärnämneskontrollen har i en förenklad analys studerats med avseende på bokföring av kärnämnesinventarium för de händelser som har identifierats. Reversering av kapslar från slutförvarsanläggningen till Clink kommer att kräva anmälan och speciella rutiner, som tas fram tillsammans med kontrollorganen. En ytterligare förfinad analys av onormala händelser kan vara lämplig att genomföra under en kommande period när anläggningsutformningarna är mer detaljerade.

Program

Under Fud-perioden planeras ett antal olika aktiviteter.

Kopplat till ovan nämnda projekt som syftar till utveckling av bränslemätning (avsnitt 8.4) och bränsleinformation (avsnitt 8.5) kommer metodik och verifiering för kärnämneskontroll att utarbetas.

Bränslets innehåll av kärnämne, som beror av ursprunglig anrikning, utbränning och avklingningstid, kan beräknas antingen utifrån information om bränslets drifhistorik eller utifrån mätningar av gamma- och neutronstrålning i kombination med verifierande kalorimetriska mätningar. Utvecklingen av metodiken för att kombinera bränsledata med karaktäriseringsmätningar för verifiering mot deklarerat kärnämne har påbörjats och kommer att fortsätta under kommande år. Inom detta område pågår också utveckling av mätstationens utformning, metodik och teknik för kärnämnesverifiering. Vägning av bränsleelement samt mätning av cherenkovstrålning är metoder som SKB avser att använda.

En utredning av logistiken för kärnämneskontrollen planeras för att säkerställa att bränsleförflyttningar i Clink inte ska kunna genomföras i manipulativt syfte. Speciellt gäller det hantering av enskilda bränsleelement inför och i synnerhet efter de mätningar som genomförts vid bränslekaraktärisering och kärnämnesverifiering. Störningar i bränslehanteringen eller signifikant avvikande mätresultat kan komma att innebära att vissa bränsleelement måste sättas åt sidan eller backas i systemet. Efter att bränsleelementen verifierats kommer de att placeras i en transportkassett för vidare transport till inkapslingsdelens torkposition. Transportkassetterna som skiljer sig i utförande från förvaringskassetterna kommer, för kärnämneskontrollen, att utgöra en viktig del av konstruktionen i Clink.

Det kommer också behövas en logistikstudie med avseende på kärnämneskontroll av färdiga kopparkapslar i Clink. Hanteringen av kapslarna från det att bränslet kapslats in måste ske på sådant sätt att förväxling eller annat utbyte inte ska kunna genomföras i syfte att avleda kärnämne. Kontrollorganens installationer ska vara optimerade och kostnadseffektiva, samtidigt som de inte ska störa eller hindra produktionen i inkapslingsanläggningen, vilket SKB kommer att arbeta för i kommande samarbetsforum med kontrollorganen.

Utveckling av identifieringsmetod för kopparkapslar kommer att fortsätta under perioden. Tillgängliga metoder behöver utvärderas. De metoder som bedöms vara genomförbara och realistiska behöver sedan utvecklas för att de ska kunna tillämpas i praktiken.

Det är väsentligt att det ständigt finns kontinuerlig kännedom om kärnämnet, kopparkapselns innehåll och dess position. Detta säkerställs bland annat genom användning av speciellt utvecklade sigill som föreslås vara integrerade i kapseltransportbehållarens konstruktion, samt annan övervakningsutrustning, till exempel kameror och detektorer. Förslaget är att SKB ska tillåtas sätta sigillerna i Clink samt bryta sigillerna i Kärnbränsleförvaret utan att någon inspektör från kontrollorgan närvarar på platsen. I samarbetet med Europeiska kommissionen (Joint Research Center Ispra) ska sigillanvändningen för kapseltransport utvecklas så att hantering, kontroll och verifiering av sigillerna ska kunna ske på ett säkert, effektivt och tillförlitligt sätt. Obevakade verifieringssystem och metoder för operatören att genomföra sigillhantering behöver utvecklas tillsammans med kontrollorganen.

Kärnämneskontroll vid onormala händelser kräver fortsatt analys, speciellt med inriktning på Clink. Vid onormala händelser, till exempel där bränsleelementens integritet måste brytas, kan åtgärder göras kampanjvis, genom att föra in utrustning för begränsade åtgärder. Utrustningen tas därefter bort för att säkerställa att det i normalfallet inte finns kapacitet på Clink att bryta bränsleelementens integritet.

Konstruktionsdataverifiering kommer att genomföras av kontrollorganen för att säkerställa att anläggningarna byggs enligt de ritningar och övriga konstruktionsunderlag som redovisats av SKB. Ny teknik utvecklas av bland annat JRC Ispra för att med laser skanna av tunnlar och installationer med hög upplösning, som sedan jämförs med befintliga ritningar eller med tidigare genomförd laser-skanning, för att kunna upptäcka förändringar i anläggningarnas utformning och installationer som inte är redovisade. Konstruktionsdataverifiering kan komma att påbörjas redan under uppförandet av tillfarter till slutförvaret och under uppförandet av inkapslingsanläggningen. SKB avser att delta i delar av detta arbete genom att stödja utvecklingen av effektiva metoder som påverkar produktionen i anläggningarna i minsta möjliga utsträckning.

9 Kapsel för använt kärnbränsle

Kapseln har ett cylindriskt kopparhölje och en lastbärande insats av segjärn (figur 2-8). I insatsen har kanaler av konstruktionsstål gjutits in för att ge plats åt det använda kärnbränslet. Två olika utformningar av insatsen har utvecklats, där kanalernas storlek och antal är anpassade för bränsleelement från tryckvatten- respektive kokvattenreaktorer (PWR- respektive BWR-insatser). I avsnitt 4.4 ges en kortfattad beskrivning av SKB:s planerade utvecklingsprogram för kapseln.

SKB har i säkerhetsanalysen SR-Site analyserat korrosion, och har därefter vid flera tillfällen kompletterat materialet till SSM, senast i SKB (2019e), men SSM har i sin granskning i tillståndsprocessen för Kärnbränsleförvaret (SSM 2018) pekat på flera områden där ytterligare analys behövs inför PSAR. Däri framgår att de mest angelägna frågorna rör olika former av lokal korrosion med sulfid närvarande, liksom krypdeformation i kopparn. Båda frågorna har särskilt fokus på omättrade förhållanden i bufferten, med tanke på de långa återmättnadstider som kan förekomma.

Det fortsatta behovet av forskning om korrosion för koppar-bentonit-koncept för slutförvaring framgår också vid avstämningar mellan slutförvarsprogrammen i olika länder. I en gemensam state of the art-publikation (Padovani et al. 2017) beskrivs forskningsbehov och även möjliga samarbetsområden, där inverkan av porvattensammansättning, bestrålning och frigörelse av vätgas nämns, liksom användningen av analogier. I det kanadensiska kärnavfallsprogrammet bedrivs nu ett omfattande forskningsprogram, se till exempel Chen J et al. (2018a), vilket gör avstämningar av SKB:s forskningsfrågor möjliga.

Trots att koppar och segjärn anses vara lämpliga för KBS-3-kapseln, återstår vidareutveckling av tillverkningsteknik för att fastställa materialkrav och specifikationer, och för att säkerställa att samtliga kvalitetskrav kan uppnås i kapselns delar. Styrning av koppars sammansättning, kornstorlek, och undvikande av defekter kommer kunna förbättras genom praktiskt användbara teorier och stabila tillverkningprocesser. Även gjutning och tillverkning av segjärnsinsatsen behöver vidareutvecklas för att nå SKB:s materialkrav, genom kunskap om strukturens betydelse för materialegenskaper och hur gjutningen påverkas av insatsens konstruktion med stålprofiler och av olika gjutningsmetoder.

SKB:s friktionssvetsning för att sammanfoga kopparhöljets delar har utvecklats genom ökad processstyrning och ett gasskydd för att eliminera oxidstråk. Det kan inte uteslutas att svetsdefekter behöver karaktäriseras och höjdbestämmas. För att säkerställa att inga svetsdefekter eller oxidstråk förekommer behöver svetsprocessen förfinas och provningsmetoder vidareutvecklas för att kunna detektera oxidstråk.

I detta kapitel ges en mer detaljerad beskrivning av SKB:s program inom dessa områden.

9.1 Korrosion

9.1.1 Sulfidkorrosion

Sulfid är den långsiktigt viktigaste korrodanten för koppar i slutförvaringsmiljö. I säkerhetsanalysen SR-Site gav kapselbrott till följd av sulfidkorrosion för fall då bufferten eroderats bort det dominerande riskbidraget. Det vetenskapliga underlaget avseende sulfidkorrosion i förvaringsmiljö är omfattande, men för kommande säkerhetsanalyser behövs en bättre förståelse för de detaljerade mekanismerna i korrosionsprocessen.

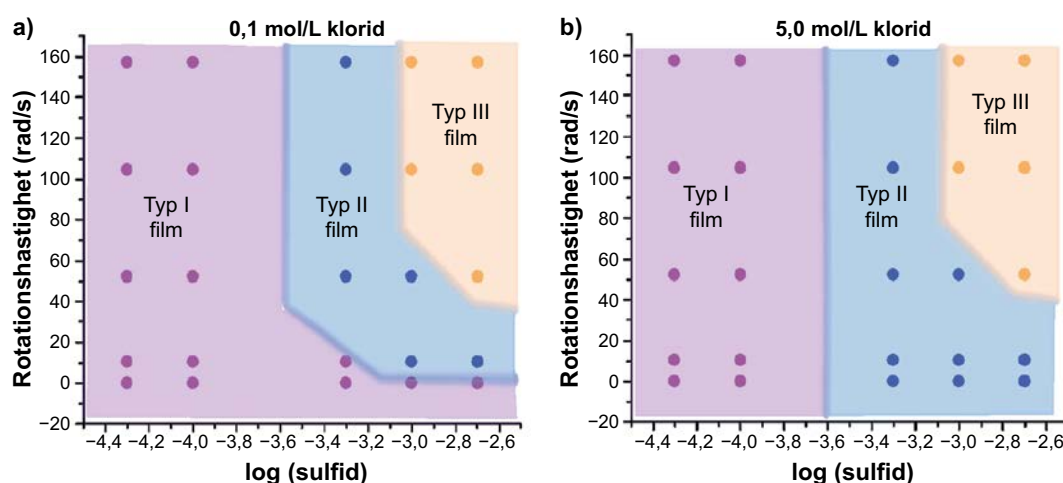
Nuläge

Bildningen av kopparsulfidfilm på koppar i sulfidlösning, och mekanismerna för detta, har fortsatt studerats med elektrokemiska metoder (CV, cyclic voltammetry; EIS, electrochemical impedance spectroscopy), olika typer av mikroskopi (SEM, scanning electron microscopy; FIB-SEM, focused ion beam-scanning electron microscopy) liksom korrosionsförsök. Tidigare har fokus i forskningen varit frågan om vad som begränsar filmtillväxten, men har nu övergått mer till frågor om passivitet och egenskaper hos sulfidfilmen och förutsättningar för lokal korrosion (en passiv film kan vara en sådan förutsättning). Arbetet utförs även fortsättningsvis huvudsakligen vid University of Western Ontario i Kanada.

Mekanismerna för filmtillväxten har fortsatt studerats under pålagd spänning i elektrokemiska experiment (Martino et al. 2017, 2019b, Martino 2018), medan korrosionsförsöken undersökt inverkan av kloridjoner (Chen J et al. 2017b), ojämn tillväxt av korn i sulfidfilmen och mikrogalvanisk koppling (Chen J et al. 2017a), samt specieringen för transport av de primära korrosionsprodukterna i lösningen (Chen J et al. 2018b). I figur 9-1 framgår att en passiv film endast bildas vid höga sulfidkoncentrationer och höga sulfidflöden, högre än de som förväntas i förvaret för använt bränsle.

För att bättre förstå om någon form av lokal korrosion kan uppkomma vid korrosion av koppar i sulfidlösning har SKB låtit genomföra tre nya studier, där koppar exponerats för sulfidlösning (Chen J et al. 2019), samt för sulfidgas och för en lösning med sulfatreducerande bakterier (Gordon et al. 2018, Johansson L 2019, Stahlén 2019). Som ett inledande steg studerades också olika metoder för att ta bort korrosionsprodukterna utan att skada ytan eller skapa nya gropar. Vid tillräckligt höga sulfidkoncentrationer observerades gropar som skulle kunna tolkas som mikrogalvanisk korrosion, vilket är en mildare form av lokal korrosion och som troligen uppstått på grund av varierande tjocklek hos filmen. Den lägsta sulfidkoncentration vid vilken detta observerades i försöket var något högre än de allra högsta som förväntas i grundvattnet i Forsmark. I försök där koppar exponerats för sulfatreducerande bakterier har lösningen antingen varit näringsrik (högre halter av sulfat och organiskt kol) eller näringsfattig (halter av sulfat och organiskt kol som förekommer i grundvatten på försvarsdjup). På några av de kopparprover som exponerats för den näringsrika lösningen återfanns fler gropar än på referensproverna, vilket indikerade att lokal korrosion kan ha förekommit under exponeringen. Det resultatet är också förenligt med resultat från ett par andra vetenskapliga studier där man observerat aktivitet från bakterier och bildning av en biofilm på kopparytan (Chen S et al. 2014, Dou et al. 2018). Gemensamt för alla försök där man sett biofilm och/eller lokal korrosion från bakteriell aktivitet är att koncentrationen av sulfid i lösningen varit högre än de högsta som uppmätts i grundvattnet i Forsmark. Proverna i näringsfattig lösning (som liknar grundvatten) hade inte några sådana gropar. Alla proverna hade dock gropar och repor, vilka uppkommit under provprepareringen, det vill säga de liknade helt oexponerade referensprover som också undersöktes.

I ett arbete av Huttunen-Saarivirta och medarbetare studerades korrosion av koppar under biotiska och abiotiska förhållanden, det vill säga i syntetiskt grundvatten med, respektive utan, mikrober utvunna från den planerade slutförvaringsplatsen i Finland (Huttunen-Saarivirta et al. 2016). Mätningar av såväl korrosionspotentialen för koppar som redoxpotentialen för en platinaelektrod bekräftade att förhållandena i det längre biotiska försöket blivit syrgasfria och sulfidiska, medan inläckage av syrgas tycks ha skett i det kortare biotiska försöket, vilket därför inte diskuteras vidare här. I överensstämmelse med andra studier där koppar exponerats för sulfatreducerande bakterier påvisades framför allt korrosionsprodukten dikopparsulfid (Cu_2S). När sulfidhalten mättes i slutet av försöket var koncentrationen cirka 2×10^{-4} mol/L vilket är den lägre gräns vid vilken lokala korrosionsangrepp påvisats i tidigare studier, men trots detta observerades inga lokala korrosionsangrepp. Resultaten från försöken utan mikrober diskuteras i avsnitt 9.1.2.

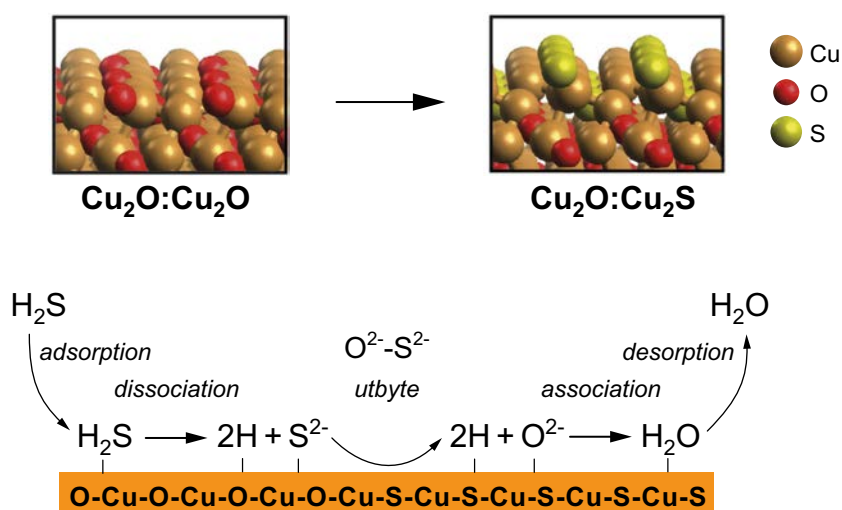


Figur 9-1. Summering av under vilka förhållanden i elektrokemiska experiment som en porös (Typ I, II) och en kompakt och eventuellt passiv (Typ III) film bildas på en kopparyta, som funktion av sulfidkoncentration och rotationshastighet hos elektroden (ett mått på sulfidflöde till elektroden), för a) 0,1 mol/L klorid, b) 5,0 mol/L klorid (Martino et al. 2017).

Passivering av koppar i sulfidlösning har också studerats av andra. I Mao et al. (2014) presenterades experimentella data som tolkats som nedbrytning av ett passiverande skikt, och dessa data användes sedan i modellering med en PDM (point defect model). Flera vetenskapliga artiklar har publicerats av (delvis) samma grupp forskare (till exempel Dong et al. 2016, Kong et al. 2018) och som tolkar sina resultat som att en passiv film bildas. Martino et al. (2017) visar dock på att samma resultat med kraftig strömökning vid högre potentialer i de elektrokemiska mätningarna erhålls vid exponering av koppar för enbart kloridlösning, och att det därför inte handlar om bildning av en passiv film. En ytterligare vetenskaplig artikel (Huttunen-Saarivirta et al. 2018) använder PDM för att tolka data från elektrokemiska försök, med slutsatsen att en passiv film bildas. Artikeln har dock kommenterats (Martino et al. 2019a), med åtföljande svar (Huttunen-Saarivirta et al. 2019b) och errata (Huttunen-Saarivirta et al. 2019a). De huvudsakliga argumenten i kritiken gäller att ingen hänsyn tas till den omfattande litteratur som visar på att det inte bildas någon passiv film, att ett orimligt värde (12 storleksordningar från andra publicerade data) på koncentrationen av katjonvakanser används, samt att användningen av PDM förutsätter en passiv film (varför det blir en form av cirkelresonemang att använda den för att visa att den studerade filmen är passiv).

När kapseln deponeras i Kärnbränsleförvaret kommer ytan att ha en film av kopparsulfid, vilken sedan förväntas omvandlas till en kopparsulfidfilm när sulfid från bufferten (eller från grundvattnet via porvattnet i bufferten) nått fram till kapselytan. Kvantkemiska beräkningar har nu använts för att modellera gradvis sulfidering av kristallytorna (111) och (100) hos dikopparsulfid (Cu_2S) via en kemisk substitutionsmekanism (Stenlid et al. 2017). Resultaten visar att ytlig sulfidering av Cu_2O (se figur 9-2) är än mer energetiskt fördelaktigt än själva bulkreaktionen. Resultaten stärker också den tidigare slutsatsen från experiment att sulfideringsmekanismen är kemisk (ett rent utbyte av syre mot svavel, vilket inte innebär någon ytterligare oxidation av koppar), och det är därför pessimistiskt att i säkerhetsanalysen addera dessa korrosionsbidrag (vilket gjordes i SR-Site).

Kvantkemiska beräkningar har även gjorts på modeller av kopparmetall och Cu_2S i syfte att nå en fördjupad förståelse för den detaljerade reaktionsmekanismen för sulfidkorrosion av koppar. Arbetet hittills har fokuserats på att prova olika mekanismer för katodreaktionen och visar att så länge kopparyta finns exponerad för sulfidlösningen är det på koppar snarare än på Cu_2S som katodreaktionen sker. Preliminärt visar även resultaten att vattenmolekylen är en bättre donator av protoner i katodreaktionen än sulfid i vattenlösning, detta på grund av vattnets betydligt högre koncentration, trots att reaktioner med sulfid har lägre aktiveringsenergi (Stenlid et al. 2019). Kvantkemiska beräkningar har också initierats för att studera fundamentala aspekter hos de tunna kopparsulfidskikt som bildas i korrosionsprocessens tidiga skede, med fokus på tillväxtmekanism och morfologi hos dessa (Lousada et al. 2018). I tillägg till denna mer specifika modellering av bland annat sulfid på olika ytor, görs mer grundläggande utvecklingsarbete av de kvantkemiska beräkningsverktygen, till exempel för att ta fram nya deskriptorer för interaktionen mellan ytan och adsorberade molekyler (Halldin Stenlid et al. 2019).



Figur 9-2. Illustration av kvantkemisk modell för ytlig sulfidering av Cu_2O (Stenlid 2017).

Analysen av masstransportbegränsningen i sulfidkorrosionen under mättade förhållanden i förvaret i Forsmark har förfinats och publicerats (King et al. 2017). Ytterligare underlag angående sulfidkoncentrationer och -flöde i förvaret har tagits fram, se avsnitt 12.3.2 för processer som påverkar den hydrokemiska miljön, och för bentoniten avsnitt 11.1.1, 11.1.6 och 11.3.1. Modellerna för sulfidtransport i närområdet, och korrosion på kopparn, har vidareutvecklats tillsammans med Posiva, se avsnitt 12.3.2.

En ny sammanfattning av kunskapsläget för sulfidkorrosion, under både mättade och omättade förhållanden i bentoniten, finns i SKB:s komplettering (SKB 2019e) till regeringen efter Mark- och miljödomstolens yttrande över SKB:s ansökan om ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. Slutsatsen är att de sulfidflöden som kan tänkas uppkomma i det omättade systemet är en storleksordning högre än de högsta flödena som kan uppkomma under mättade förhållanden. En annan viktig slutsats är att så länge bentoniten är på plats är även dessa flöden med god marginal lägre än de sulfidflöden, under vilka lokala korrosionsfenomen som mikrogalvanisk korrosion och ytlig sprickbildning under pålagd dragspänning, observerats. (Det senare har av en del författare tolkats som spänningskorrosion, se vidare avsnitt 9.1.5.)

Program

Sulfid är den viktigaste korrodanten för koppar i slutförvarsmiljö, eftersom korrosionsprodukterna är så stabila och reaktionerna mellan kopparytan och sulfidföreningar snabba. All sulfid som når kapseln kan således förväntas reagera med kopparn.

För att stärka den vetenskapliga grunden för hanteringen av sulfidkorrosion i kommande säkerhetsanalyser behövs en fortsatt kunskapsuppbyggnad när det gäller de detaljerade mekanismerna i korrosionsprocessen. SKB kommer därför att fortsätta studierna av koppar i sulfidlösning, framför allt med elektrokemiska metoder. Arbetet har väsentligen två inriktningar, dels studier som mer i detalj undersöker förutsättningarna för uppkomst av lokal korrosion (genom studier av stabiliteten hos sulfidfilmen, bildning av ett passivskikt, mikrogalvanisk koppling etc), dels hur andra joner (klorid, sulfat, karbonat etc) påverkar korrosionsmekanismen.

Genom experiment där laboratoriemiljön görs tillräckligt aggressiv för att lokala korrosionsangrepp ska förekomma studeras mekanismer för eventuell tillväxt, liksom mekanismer som hindrar tillväxt. Metoderna för att ta bort sulfidfilmen kommer att förfinas så att skadorna på kopparytan av borttagningsprocessen minskas, och därefter planeras fler undersökningar av ytans topografi under sulfidfilmer från exponering i sulfidlösning, och även med mikrober tillsatta till lösningen.

Den kvantkemiska delen av forskningsprogrammet kommer att ha fortsatt fokus på modellering av katodreaktionen, adsorption av grundvattenjoner på Cu och Cu₂S, samt strukturella och elektroniska egenskaper hos tunna sulfidfilmer. Samtliga insatser syftar till att uppnå en djupare mekanistisk förståelse för olika aspekter av korrosionsprocessen.

9.1.2 Korrosion under oxiderande förhållanden

Lokal korrosion (även kallad gropfrätning) under oxiderande förhållanden behandlas i SR-Site som ojämn allmätkorrosion (eng surface roughening) med ett maximalt extra korrosionsdjup, i stället för de tidigare använda gropfrätningfaktorerna.

Nuläge

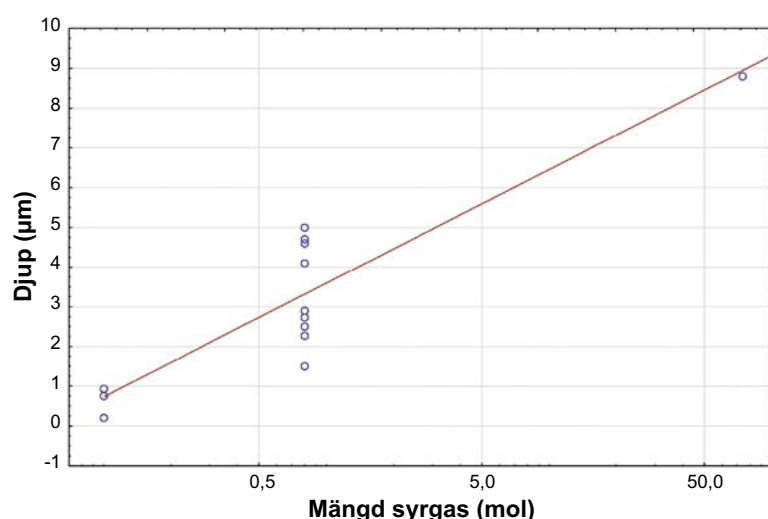
Genom fortsatta studier av litteratordata rapporterade SKB (King och Lilja 2013, 2014) att de porvattensammansättningar som är aktuella i förvaret gynnar allmätkorrosion, och inte ger upphov till någon passivfilm. En sådan film är en förutsättning för att lokal korrosion under oxiderande förhållanden ska uppstå. För att i ännu större utsträckning täcka in den osäkerhet och variabilitet i data som finns, har SKB påbörjat utvecklingen av probabilistiska modeller för lokal korrosion. Som ett första utvecklingssteg har analysen avsett situationen med oxiderande förhållanden där bufferten hunnit vattenmättats, dock i medvetande om att den kombinationen troligen inte kommer att uppstå (SKB

2019e, avsnitt 2.6). En beskrivning av denna modellutveckling beräknas publiceras under 2019. Ett viktigt nytt underlag är tillgången till den databas som NWMO i Kanada låtit University of Western Ontario ta fram (summerat i Qin et al. 2017), och som innehåller ett stort antal potentialmätningar under olika förhållanden (temperatur, pH, koncentrationer av klorid, sulfat och karbonat).

Data från tidigare fältförsök med koppar i förvarsliknande miljöer har sammanställts och analyserats med avseende på allmän korrosion (massförlust) och vilka miljöparametrar som samvarierar med korrosionsdjupet (Johansson A et al. 2019, Johansson A 2019a). Analys av data från försöken MiniCan, LOT, ABM, Prototypförvaret och Febex visar att korrosionsdjupet korrelerar med den uppskattade totala mängden initial syrgas i bentonit och luftfyllda spalter i närområdet, se figur 9-3. Analysen visar även att korrosionsprodukterna i de försök som innehållit större mängder syrgas initialt (till exempel LOT och Prototypförvaret) är syreinhållande och såväl monovalenta som divalenta, medan de försök som innehållit mycket lite syrgas initialt hade relativt sett större andel svavelhaltiga och endast monovalenta korrosionsprodukter. En mer utförlig analys av data och tolkningar finns i Johansson A et al. (2019).

För att bättre kunna karaktärisera den observerade ytan hos de återtagna kapslarna från Prototypförvaret (Taxén 2013), har SKB låtit undersöka kapselkoppar som endast utsatts för den atmosfäriska korrosion som sker vid normal luftfuktighet men som inte exponerats i något korrosionsförsök (Högberg et al. 2017). Analys av kapselytans topografi visar på riklig förekomst av grop- och sprickliknande defekter på omkring några mikrometer, vilka huvudsakligen bedöms ha uppkommit under den maskinbearbetning (svarvning) av kapselytan som görs i samband med tillverkning. Det bedöms som högst troligt att även den topografi som observerats på kapslarna från Prototypförvaret härrör från samma steg i tillverkningen.

I en studie av Huttunen-Saarivirta och medarbetare från 2016 studerades korrosion av koppar under biotiska och abiotiska förhållanden i grundvatten (Huttunen-Saarivirta et al. 2016). Resultaten från försöken med mikrober diskuterades i avsnitt 9.1.1. Resultaten från försöken utan mikrober visar tydligt att experimentet inte varit syrgasfritt, såväl korrosionspotentialen för kopparelektroden som redoxpotentialen mätt med en platinaelektrod är positiva från starten och ökar under exponeringens gång, vilket tyder på att syrgas läckt in i försöket. Detta bekräftas även av de syreinhållande korrosionsprodukter som återfanns på kopparytorna efter försöket. På ett kopparprov påvisades ett lokalt korrosionsangrepp med en utbredning om cirka 50 μm och där korrosionsprodukten hade hög halt av grundämnenas syre och klor. Detta är ett relativt stort korrosionsangrepp i jämförelse med den genomsnittliga korrosionen i försöket om cirka 2 μm . Det är oklart om denna observation är orsakad under exponeringen eller om angreppet kan ha initierats redan före försöket.



Figur 9-3. Korrelation mellan genomsnittligt korrosionsdjup (från massförlust) och mängden syrgas i fältförsök (Johansson A 2019a).

I en senare studie av Huttunen-Saarivirta et al. (2017) studerades korrosion av koppar under oxiderande förhållanden i bentonit, samt under inverkan av aeroba mikroorganismer. Den observerade korrosionen är i god överensstämmelse med vad som observerats i till exempel fältförsöken inom LOT-serien. De huvudsakliga korrosionsprodukterna var Cu_2O och någon form av atacamit, $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, men mycket lite svavel fanns på kopparytorna i jämförelse med mängden syre. Inga tecken på lokala korrosionsangrepp observerades. Liknande slutsatser drogs i en studie med en multielektrod, vid mätningar i vatten med grundvattensammansättning och bentonit (Kosec et al. 2017).

Experimenten vid University of Western Ontario i Kanada med syfte att mäta potentialer på koppar i bentonit (det vill säga i kontakt med bentonitporvatten) har fortsatt, men inte oväntat har det varit problem att utforma elektroder som är stabila i bentonitmiljön. En första rapportering finns som en del i doktorsavhandlingen av Martino (2018).

Program

SKB fortsätter utvecklingen av den probabilistiska modelleringen av lokal korrosion, och har påbörjat arbetet med modellering av omättade, oxiderande förhållanden.

Såväl Prototypförverkets inre sektion som kvarvarande försök ur serierna LOT och ABM kommer att ge möjligheter att ytterligare utvärdera korrosion under framför allt oxiderande förhållanden, även om huvudsyftet med dessa försök inte var att studera korrosion. Brytningen av kommande försökspaket följer den övergripande plan som redovisades i Fud-program 2016.

9.1.3 Kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten

Nuläge

Frågan om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten har rönt stor uppmärksamhet under ett flertal år sedan en grupp forskare vid KTH framfört uppfattningen att omfattningen av denna korrosionsform är betydligt större än vad etablerad vetenskap förutsäger. SKB har därför som rapporterats i tidigare Fud-program studerat processen ingående, utan att finna något stöd för KTH-forskarnas uppfattning. Sedan Fud-program 2016 har följande nytt material publicerats:

- Resultat från den SKB-stödda studien vid Uppsala universitet har publicerats i den vetenskapliga litteraturen (Ottosson et al. 2017) med efterföljande kommentarer i tidskriften (Szakálos et al. 2018, Ottosson et al. 2018).
- SKB har publicerat en sammanfattande vetenskaplig artikel där också forskargruppen vid Uppsala universitet är medförfattare eftersom en del av deras resultat publiceras för första gången i artikeln (Hedin et al. 2018). I artikeln redogörs för Uppsalagruppens försök att upprepa KTH-forskarnas resultat, för provrörsförsöken hos Micans (Microbial Analytics Sweden AB) och för sökandet efter okända kopparföreningar. Där diskuteras också brister och oklarheter i KTH-forskarnas publikationer, liksom även andra försök inom området.
- En avslutande mätning har gjorts på den mindre mängd provrör som fortsatt förvarats i kvävgasatmosfär vid 70 °C hos Micans (Morsing Johansson och Pedersen 2019). Ingen vätgas över bakgrundsnivån kunde uppmätas. I Finland har liknande försök gjorts (Ollila 2019), med resultat som bekräftar Micans resultat. SKB har också genomfört beräkningar av hur kapselkoppar avger väte (Hedin 2019), vilket ytterligare stärker tolkningen av experimenten med SKB:s kapselkoppar.
- En mindre insats har gjorts för att utröna möjligheten att formulera en kinetisk modell (eng mixed-potential model) för korrosion i rent vatten. En preliminär rapport (King och Orazem 2017) pekar inte oväntat på att en tidigare modell och de kinetiska data som används där (Cleveland et al. 2014, 2016) inte är förenliga med termodynamiska data. Modellen ger därför inte något tillförlitligt mått på korrosionshastigheten. Både modell och indata skulle behöva modifieras, men med den knappa tillgången på kinetiska data är det tveksamt om detta med rimliga insatser går att genomföra.
- Utvärderingen av kinetiska data med elektrokemiska mätmetoder har fortsatt, och modellen har byggts ut för att även inkludera det oxidskikt som oundvikligen finns på kopparelektroden om inte denna reducerats katodiskt före start (Betova et al. 2018). Slutsatsen är att de möjliga adsorptionsplatserna på oxidskiktet bestämmer hur mycket vätgas som kan utvecklas, på samma

sätt som för en kopparyta utan oxidskikt. Vätgasen kommer alltså inte från en reaktion med kopparmatrisen, och de kinetiska data som erhålls gäller enbart för reaktion på ytan.

- Ytterligare grupper har försökt att uppmäta vätgas från koppar exponerat för rent vatten (He et al. 2018, Senior et al. 2019), men i båda fallen konstaterar författarna själva att de inte kan dra slutsatser att någon korrosion förekommit, framför allt för att andra källor till uppmätt vätgas inte kunnat uteslutas.
- De kvantkemiska studier av gränssnittet koppar-vatten som initierades under föregående Fud-period har fortsatt i syfte att modellera reaktiviteten med mera realistiska modeller. Nya insatser på området har beaktat effekter av såväl defekter i kopparytan (Lousada et al. 2017a, b), lösningsmedelseffekter (Stenlid et al. 2016a), som inverkan av en oxidfilm bestående av Cu_2O (Stenlid et al. 2016b, Stenlid 2017). Oavsett hur gränssnittet modelleras kvarstår den kvalitativa slutsatsen från de första studierna på området; den ytreaktivitet som kan ske i gränssnittet koppar-vatten är inte tillräcklig för att förklara den vätgasutveckling som observerats i vissa experiment med koppar i rent syrgasfritt vatten. Vidare har interaktionen mellan väte och kopparoxid, samt mekanismer för vätgasbildning på kopparoxid studerats vidare med en kombination av experimentella och teoretiska metoder (Tissot et al. 2019). I syfte att möjliggöra bättre modellering av elektrokemiska processer på atomär nivå har en metod utvecklats för att på kvantkemisk väg simulera cykliska voltammogram, och metoden har i ett första steg tillämpats på olika kopparytor i simulerad lösning med varierande pH (Bagger et al. 2019).

Ytterligare kommentarer till dessa studier och en ny sammanfattning av kunskapsläget finns i SKB:s komplettering (SKB 2019e) till regeringen efter Mark- och miljödomstolens yttrande över SKB:s ansökan om ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. SKB har inte kunnat finna något vetenskapligt stöd för en korrosionsprocess för koppar i rent, syrgasfritt vatten, som fortgår i en omfattning som överskrider den som förutsägs av etablerade termodynamiska data.

Slutligen har SKB publicerat beräkningar som visar att även om man hypotetiskt skulle tolka den observerade vätgasutvecklingen i KTH-forskarnas experiment som orsakad av korrosion, så skulle omfattningen av den anförda korrosionsprocessen, baserat på KTH-forskarnas egna data, bara vara cirka en millimeter på en miljon år med de temperaturer som kommer att råda i förvarsmiljön (Hedin et al. 2017).

Program

Det är SKB:s tydliga slutsats att det inte finns något vetenskapligt stöd för att hävda att koppar korroderar i rent, syrgasfritt vatten på något annat sätt än vad etablerad vetenskap säger, vilket är omätbart litet och hanterat i säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret.

Tillkommande slutrapportering planeras för de kinetiska modellerna med ”mixed-potential model” och för inverkan av jonstyrkan (experiment med perkloratlösning). I övrigt planerar SKB inga fortsatta studier inom området.

9.1.4 Strålningsinducerad korrosion

Strålningsinducerad korrosion av kopparkapseln sker till följd av de radiolysprodukter som bildas när vatten på kapselns utsida absorberar gammastrålning inifrån bränslet i kapseln. Det är framför allt under de första 300 åren i Kärnbränsleförvaret som dosraten vid kapselytan kommer att generera radiolys av vatten i någon signifikant omfattning. I säkerhetsanalysen SR-Site uppskattades på teoretisk väg att denna korrosionsprocess skulle kunna ge ett genomsnittligt korrosionsdjup på maximalt 14 μm , vilket är försumbart.

Nuläge

Efter SR-Site studerades fortsatt inverkan av gammastrålning på korrosion av koppar i ett doktorandarbete på KTH (Björkbacka et al. 2016, 2017, Björkbacka 2015). Experimenten utfördes huvudsakligen med kopparkuber i rent vatten under kvävgasatmosfär, vid stråldosrater mellan cirka 0,1 och 1 kGy/h. Dessa stråldosrater är cirka 1000 gånger högre än maximal stråldosrat utanpå kapseln i Kärnbränsleförvaret, och exponeringstiderna i experimenten anpassades så att den totala dosen blev av samma storleksordning som i Kärnbränsleförvaret, det vill säga cirka 100 kGy (Björkbacka 2015).

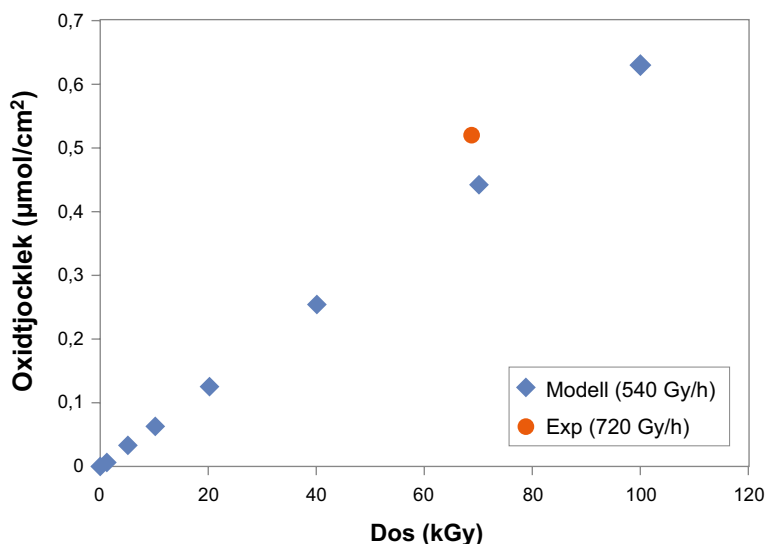
De inledande studierna visade på högre korrosion för bestrålade prover än för obestrålade, vilket är förväntat. Korrosion påvisades i form av Cu_2O samt lokala kaviteter med djup på någon mikrometer och lateral utbredning om några tiotals mikrometer. Senare studier har visat att mängden oxiderad koppar till följd av radiolys ökar om det finns en oxidfilm på ytan initialt (Björkbacka et al. 2015). De uppmätta korrosionseffekterna (vid en dos som motsvarar den i Kärnbränsleförvaret) är dock små (μm -skala) och mindre än det som pessimistiskt beräknades i SR-Site.

Radiolys av fuktig luft kan ge upphov till joner, men det är värt att notera att varken Björkbacka et al. (2017) eller Ibrahim et al. (2018), den senare från det kanadensiska programmet, rapporterade någon förekomst av joner kända för att inducera spänningskorrosion på koppar, till exempel nitrit eller ammonium, i sina experiment. Däremot detekterades nitrater i båda experimenten.

En fråga som varit obesvarad fram till nyligen är varför en teoretisk modell, som använts framgångsrikt för att prediktera korrosion av till exempel uran under bestrålning, förutsåg betydligt mindre korrosion av koppar än den som observerats experimentellt vid KTH (Björkbacka 2015, Björkbacka et al. 2016). Denna fråga tycks nu ha fått ett svar då nya experiment och analyser som SKB låtit genomföra vid KTH visat att den relativa betydelsen av de olika oxidanter som bildas under radiolys av vatten vid ytan skiljer sig drastiskt mellan till exempel urandioxid och kopparmetall, och att de ytkemiska reaktionerna därför måste beskrivas olika i modeller för de båda materialen (Soroka och Jonsson 2019). Den reviderade modellen är fortfarande under utveckling men förutsäger redan nu den experimentellt observerade korrosionen av koppar under gammabestrålning med relativt god precision (Soroka and Jonsson 2019, SKB 2019e), vilket illustreras i figur 9-4.

Program

För att minska osäkerheterna i analysen av säkerhet efter förslutning om hur strålningsinducerad korrosion i Kärnbränsleförvaret påverkar kapseln på lång sikt kommer arbetet vid KTH att fortsätta med en vidare utredning av reaktionsmekanismen för denna korrosionsprocess i grundvattenmiljö. Till exempel kommer effekterna av grundvattenjoner som klorid och karbonat att studeras och inkluderas i den teoretiska modellen. SKB avser även att låta utföra beräkningar av korrosion till följd av radiolys under realistisk initial dosrat samt realistiskt sönderfall av cesium-137, i stället för de högre och konstanta dosrater som använts i Soroka och Jonsson (2019).



Figur 9-4. Modellberäkning av oxidskiktets genomsnittliga tjocklek (uttryckt som mängd oxid per yta) som funktion av absorberad dos, vid dosraten 540 Gy/h (Soroka och Jonsson 2019). Det experimentellt uppmätta värdet i Björkbacka (2015) vid dosraten 720 Gy/h, är också angivet.

9.1.5 Spänningskorrosion

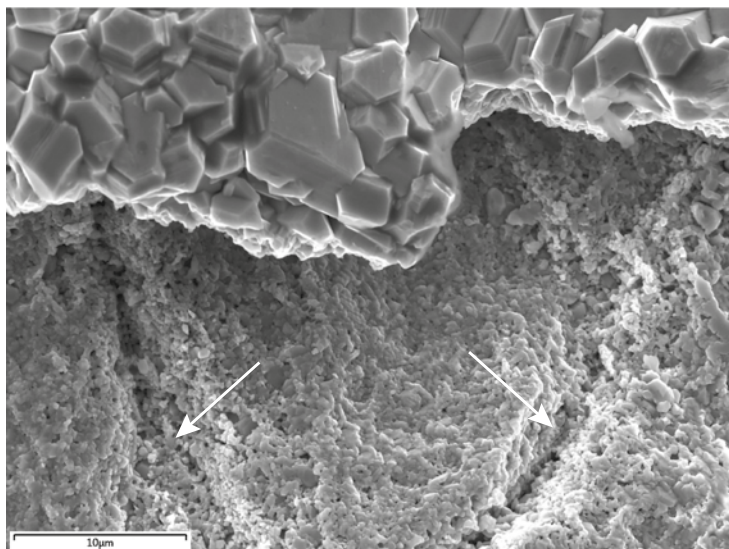
För att spänningskorrosion ska uppstå krävs samtidigt ett känsligt material, dragspänningar och specifika joner. Spänningskorrosion har hanterats i tidigare säkerhetsanalyser (inklusive SR-Site) och har då i första hand avsett korrosion under oxiderande förhållanden i närvaro av nitrit, ammonium eller acetat. Eftersom de nödvändiga jonerna saknas i tillräckliga halter under den inledande oxiderande perioden i förvaret, har spänningskorrosion inte bedömts inverka på kapselns integritet.

Frågan om spänningskorrosion också kan ske i närvaro av sulfid har diskuterats, framför allt sedan en japansk forskargrupp (Taniguchi och Kawasaki 2008) presenterade resultat som tydde på en sådan process.

Nuläge

Sedan 2008 har ytterligare fyra olika grupper gjort experiment för att undersöka om spänningskorrosion kan uppträda i sulfidmiljö. I de tidigare försöken (Bhaskaran et al. 2013, Sipilä et al. 2014) kunde inga tecken på spänningskorrosion noteras, och inte heller vid Swerea Kimabs undersökning 2016 av inverkan från provstavstillverkningen (Taxén et al. 2018). Långsam dragprovning vid Studsvik (Becker och Öijerholm 2017) och hos Rise Kimab (Taxén et al. 2018, 2019) visade dock på små ytliga sprickor vid sulfidkoncentrationer över 10^{-3} mol/L. Gemensamt för de sistnämnda studierna var att pH buffrats till cirka pH 7,2 med en fosfatbuffert. Den fortsatta studien vid Rise Kimab (Taxén et al. 2019) visade att sprickor med upp till 30 μm djup uppträdde om sulfidkoncentrationen var tillräckligt hög, vid både 60 och 90 °C och vid olika koncentrationer av kloridjoner. Undersökningarna visade också att angreppen var lokaliserade till korngränser (figur 9-5) och att sprickbildningen avstannade med tiden. En mekanistisk beskrivning har nu formulerats (Taxén et al. 2019) och som går ut på att dragspänningarna ger sprickor i sulfidfilmen, och att om detta sker direkt över en korngräns, som är mer reaktiv än själva kristallkornen i koppar, så kommer viss korrosion att ske i korngränsen. Korrosionsangreppet kontrolleras av transporten av sulfid in i sprickan och allt eftersom sprickan blir djupare och korrosionsprodukterna fyller upp sprickan, kommer den lokala processen att avstanna.

Redan i underlaget till SKB:s ansökan 2011 diskuterades om den så kallade Aaltonenmekanismen skulle kunna vara en spänningskorrosionsmekanism. Mekanismen innebär att sprickor växer till följd av att ett överskott av vakanser, det vill säga atomära ”hål”, förflyttas till sprickan. SKB har låtit experter vid VTT (Teknologiska forskningscentralen i Finland) återigen gå igenom de publicerade studierna och det konstaterades då att de laboratorieförsök där inverkan av vakanser studerats har utförts under förhållanden som aldrig kan uppstå i förvaret (Huotilainen et al. 2018).



Figur 9-5. Ytlig korrosion i korngränser på kopparprovstav efter långsam dragprovning i en lösning med 10^{-2} mol/L sulfid vid 80 °C (Taxén et al. 2018). Pilarna pekar på ytliga angrepp i korngränser.

SKB har sammanställt och uppdaterat beräkningarna av dragspänningar i kopparhöljet för olika belastningsfall (Hernelind 2019b), och även analyserat effekten av att minska gapet mellan kopparhöljet och segjärnsinsatsen (Hernelind 2019a). Slutsatsen är att dragspänningar inte kan uteslutas, men att de troligen kan reduceras om gapet minskas genom mindre designändringar av kapseln.

SKB har summerat kunskapsläget för spänningskorrosion i sulfid (SKB 2019e), och drar slutsatsen att spänningskorrosion i sulfid inte hotar kapslarnas integritet i ett KBS-3-förvar i Forsmark.

I fältförsöket MiniCan 4 som återtog under 2015 fanns böjda kopparprover för att undersöka sprickinitiering, och förspräckta prover för att mäta eventuell spricktillväxt under exponeringen i Äspölaboratoriets grundvattenmiljö. Ingen sprickinitiering observerades i de böjda proverna (Gordon et al. 2017, Johansson et al. 2017). Inte heller har någon tillväxt av initialsprickan skett i något av de förspräckta proverna, detta i likhet med resultaten från det tidigare återtagna MiniCan 3. Små sprickor som löper från initialsprickan observerades men dessa bedöms ha orsakats av den utmattningsspräckning som användes för att åstadkomma den initiala experimentsprickan under provtillverkningen.

Program

Forskningsprogrammet för spänningskorrosion på koppar fortsätter med ytterligare insatser, inriktade på sulfidmiljö. Syftet är framför allt att ytterligare verifiera att de iakttagna ytliga sprickorna är en form av korngränskorrosion. Planerade experiment omfattar bland annat långsam dragprovning med lägre töjningshastighet och längre exponeringstider, samt med annan sammansättning på lösningen så att eventuella effekter av pH och andra joner kan studeras. De experimentella resultaten kommer också att användas för att utveckla den mekanistiska beskrivningen. Huruvida koppars materialegenskaper påverkas av injektion av vakanser från en korrosionsprocess kommer också att undersökas, till exempel genom att studera effekter på kryphastigheten vid pålagd spänning under krypprovning, och likaså betydelsen av en påbörjad respektive fullbordad sprickbildning av kopparhöljet.

För spänningskorrosion under oxiderande förhållanden kommer SKB att utreda vilka halter av nitrit och ammonium som kan uppstå genom inverkan av gammastrålning nära kapseln (på utsidan, såväl som i spalten mellan koppar och järn), och likaså acetathalter orsakade av mikrobiell aktivitet, i syfte att bedöma om spänningskorrosion kan uppstå. För fortsatta analyser av korrosion från insidan av kapseln kommer översikten från det kanadensiska programmet (Wu et al. 2019) att vara ett användbart underlag.

9.1.6 Verifiering av olika kopparmaterial för korrosionskänslighet

Nuläge

Utvecklingen av elektrokemiska metoder för att undersöka skillnaden i korrosionsbenägenhet hos olika kopparmaterial (svetsat, kallbearbetat etc) har genomförts (Taxén et al. 2017). Resultaten visade inte på någon inverkan av kallbearbetning eller svetsning på korrosionskänsligheten hos kopparn. Samma slutsats drogs i studien av oxidstråks betydelse (Björck et al. 2019), där metoden också användes (avsnitt 9.4.3).

Program

SKB planerar inte någon ytterligare utveckling av metoder för att bestämma olika kopparmaterials korrosionsbeständighet.

9.2 Materialegenskaper kapselmaterial

De förväntade omgivande trycken i slutförvaret kommer att deformera kapselkopparn elastiskt, visköst genom krypdeformation, och om trycken är höga även plastiskt. Både plastisk och visköst (kryp-) deformation sker genom glidning av atomplan i kristallerna under balans mellan spänningarna och materialets deformationshärdning och återhämtning. Krypdeformationen för ett material beror av temperatur och spänning, och därför kommer krypdeformationen att uppkomma under vissa

tidsperioder och variera rumsligt i kapseln. Kapselkopparn har krypprovats vid olika temperaturer, spänningar, strukturer och defektförekomster. Dock kommer extrapolering att vara nödvändigt med tanke på den långa tiden i förvaret, och då är det centralt att materialegenskaperna inte förändras över tid. För att visa att egenskaperna inte ändras måste processer verksamma i materialet kunna beskrivas fysikaliskt och kemiskt.

9.2.1 Kopparkrypning

SKB har valt en sort av syrefri koppar med låga halter av föroreningar. För att få gynnsamma krypegenskaper (tillräckligt hög duktilitet) görs en tillsats av fosfor, och materialet benämns ofta Cu-OFP (oxygen free, phosphorus doped). Effekten av fosfor är belagd genom omfattande krypprovning, men för analysen av långsiktig säkerhet behöver en bättre förståelse utvecklas (ända ner på atomnivå) för att visa att materialegenskaperna inte ändras över långa tider. SKB har sedan länge bedrivit utvecklingsarbete för att med modeller kunna beskriva krypförlopp i koppar.

Nuläge

Effekten av kallbearbetning på deformationshastigheten har modellerats som en balans mellan deformationshärdning, dynamisk och statisk återhämtning, och efter kallbearbetning noteras att de flesta dislokationerna finns i cellväggar (som bildas inuti kornen i metallen), och inte i korngränserna (Sandström 2016). Modelleringsarbetet har fortsatt, för att så långt som möjligt ge fysikaliska beskrivningar av alla ingående parametrar, och en backspänning som representerar dislokationerna i cellväggarna har införts (Sandström 2017).

Fleraxliga spänningstillstånd vid långsam dragprovning har utvärderats med finita-elementberäkningar (Sui och Sandström 2017) och modellerats med den framtagna krypmodellen (Sui och Sandström 2016). Resultaten verifierar även att de grundläggande modellerna för enaxlig belastning också kan användas för fleraxliga tillstånd. Nyligen har även krypdeformationen under den avslutande fasen före brott (tertiärkryp) kunnat inkluderas i modelleringen av kapselkopparn (Sui et al. 2018). Glidning av kristallplan bidrar huvudsakligen till denna krypdeformation, medan kavitetsbildning som högst bidrar med knappt en procent.

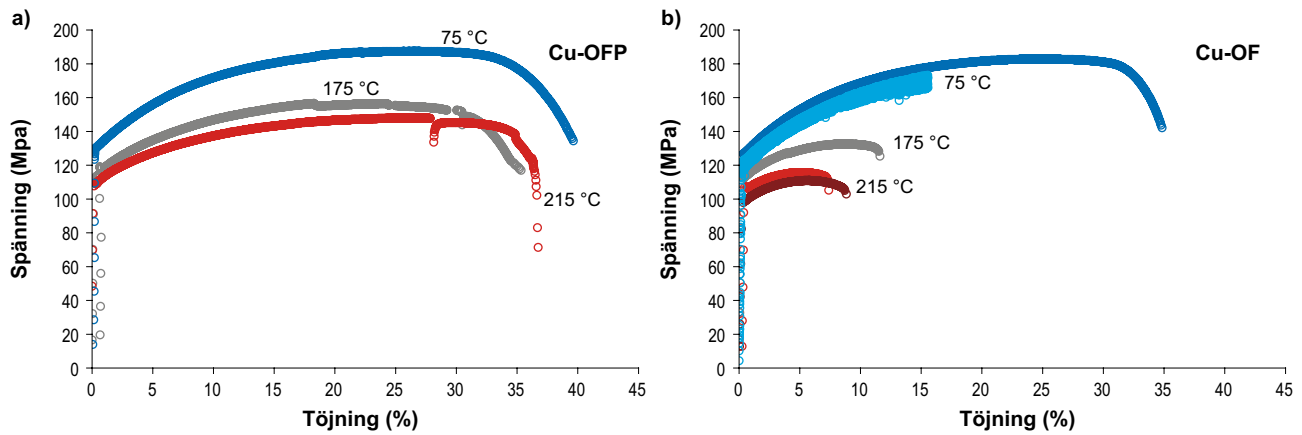
I doktorandarbetet vid KTH har inverkan av töjningshastighet på utvecklingen av dislokationerna studerats med dislokationsdynamiska beräkningar (Delandar et al. 2016), där också betydelsen av glidningen av kristallplanen har visats (Delandar et al. 2018b).

De kvantmekaniska beräkningarna av effekten av hur föroreningsatomer samverkar med korngränser har publicerats (Li et al. 2017). Termodynamiska beräkningar har också gjorts för ternära system koppar-fosfor-X (Magnusson 2017). De analyserade grundämnena (X) inkluderar ämnen som är kända för att öka, eller minska, förspridningen, samt de ämnen som finns i Cu-OFP. Slutsatsen är att de enda ämnen som samverkar med fosfor är syre (genom bildning av fosfater), samt nickel och järn, som båda (även i blandad form) bildar stabila fosfider.

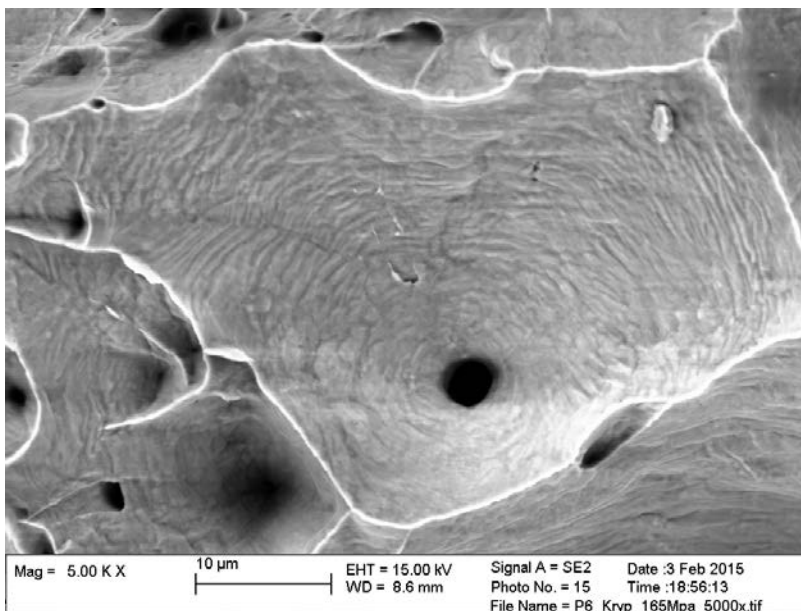
Fortsatt arbete har gjorts för att studera fosfors inverkan på krypegenskaperna hos koppar. I Andersson-Östling et al. (2018) prövades hypoteser om inverkan av mikrostruktur (ingen rekristallisationseffekt kunde påvisas) och kornstorlek (ingen effekt av kombination av stora och små korn). I samma studie undersöktes vidare krypprovad koppar metallografiskt och med TOF-SIMS (Time-of-flight – Secondary Ion Mass Spectroscopy), men ingen anrikning av fosfor i korngränserna kunde observeras, med de tillgängliga detektionsgränserna. Med TEM (transmissionssvepelektronmikroskopi) undersöktes fyra olika Cu-OFP-material, även här med syfte att leta efter anrikning av fosfor (Magnusson och Bergqvist 2018). Inklusioner med svavel (sulfider) kunde konstateras, men ingen anrikning av fosfor. Det kunde också noteras att provpreparering kan störa resultaten (såväl etsning med fosforsyra, som jonpolering med argon), liksom att kristallografiska effekter kan misstolkas som partiklar. Långsam dragprovning har använts (Josefsson och Andersson-Östling 2019) för att jämföra egenskaperna hos fyra kopparkvaliteter med olika sammansättning. Slutsatsen var att tillsatt fosfor är den faktor som har avgörande inverkan för att få ökad duktilitet. Skillnaden är mer tydlig vid 175 och 215 °C, än vid 75 °C där även material utan fosfortillsats har hög duktilitet, se figur 9-6. Långsam dragprovning vid lägre temperaturer är alltså inte utslagsgivande på det sätt som krypprovning är för duktiliteten vid mycket låga töjningshastigheter. Resultaten är helt i linje med tidigare provningsresultat för SKB:s Cu-OFP (Andersson-Östling och Sandström 2009).

Spänningens och deformationens storlek och variation i kapselkopparn har simulerats med hjälp av finita-elementmodeller. SSM har låtit beräkna den plastiska deformationen i kopparn (Engman 2018) som ett led i att granska SKB:s arbete. SKB har redovisat nya och uppdaterade beräkningar av den totala plastiska och kryp-deformationen i kopparn, där det även visas hur dragspänningarna till viss del kan reduceras genom mindre designändringar i kapseln (Hernelind 2019a), se även avsnitt 9.3.

Brottmekanismerna vid SKB:s tidigare krypprovning har utvärderats och kapselkopparn har funnits vara plastiskt duktil och stabil vid kryppning (Björkblad och Faleskog 2018). I figur 9-7 syns groparna som utgår från mikroskopiska defekter och som är typiska för duktila brott. Bara vid extremt utbredda oxidstråk utanför svetsprocessens processfönster påverkas duktiliteten negativt (Björck et al. 2019).



Figur 9-6. Långsam dragprovning (töjningshastighet cirka 5×10^{-7} 1/s) av a) Cu-OFP (med fosfor), och b) Cu-OF (utan fosfor). Diagrammen visar teknisk spänning mot teknisk töjning, det vill säga ingen kompensering för midjebildning har gjorts (Josefsson och Andersson-Östling 2019).



Figur 9-7. Detalj från ett duktilt krypbrott från en cylindrisk kopparprovstav (Björkblad och Faleskog 2018). Bilden visar brottytan.

Program

För att underbygga modellering av kryp, och särskilt den tidsmässigt långa extrapolering som är nödvändig, är det centralt att förstå fosforns inverkan på kapselkopporns brottmekanismer. SKB kommer att fortsätta på samma sätt som tidigare, med en kombination av studier med olika inriktning och olika skala, från atomskala till provstavsskala.

I de kvantmekaniska beräkningarna för interaktioner mellan atomer och dislokationer och defekter fortsätter fokuseringen på korngränser, där framför allt studier av diffusionen av koppar självt, liksom svavel och fosfor, kommer att komplettera beskrivningen av mobiliteten hos defekter, och föroreningsatomers förmåga att ansamlas (segring) och bilda kluster. Stabiliteten och eventuellt bildning av fosforinnehållande föreningar i korngränserna kommer att undersökas.

Ytterligare experiment kommer att göras för att lokalisera fosfor i koppar och studera hur den är fördelad, men det har varit svårt att hitta tekniker som är användbara och tillräckligt känsliga. I första hand kommer arbetet att inriktas på att studera korngränser. Studier av rekristallisation vid olika temperaturer pågår, liksom Auger-undersökningar av brottytor, och en första publicering av resultat planeras under 2019. Sammanställningen av SKB:s studier av krypprovning sedan slutet av 1980-talet (Andersson-Östling och Sandström 2009) kommer att uppdateras. Vidare planeras även krypprovning i viss omfattning, bland annat för att bättre uppskatta grundläggande inverkan av kristall(korn)strukturen, olika föroreningselement och fosforhalter på den långsamma krypdeformationens storlek och brottmekanismer.

Arbetet med krypmodellering planeras att kompletteras med en utökad beskrivning av kavitetbildning och hur denna kopplar till bindingsenergierna för fosfor. En översiktsartikel om krypmodelleringen planeras.

9.2.2 Väteförsprödning

Väte kan i metaller förekomma både atomärt (H) eller som vätgasmolekyler (H_2). Om koncentrationen av väte är tillräckligt hög kan det påverka metallens mekaniska egenskaper negativt. Atomärt väte kan bindas till olika typer av defekter och föroreningar i materialet. Det kan också bilda molekyllärt, gasformigt väte i mikroskopiska porer inuti materialet, vilket kan ha en negativ effekt på materialets mekaniska egenskaper (väteförsprödning). Koppar och många andra typer av metaller och legeringar med liknande kristallstruktur drabbas dock generellt inte av väteförsprödning.

Enligt kraven på den syrefria koppar som används för kapslarna får halten väte vara högst 0,6 vikts-ppm, och motsvarande krav för syre är 5 vikts-ppm. Dessa krav tjänar till att förhindra väteförsprödning och även den form som brukat kallas vätesjuka (där vätet reagerar med syre i form av oxid, och bildar vattenånga). Liknande krav på syrehalten har använts i många år för koppar i olika tillämpningar och varit så framgångsrikt att väteförsprödning inte längre anses vara ett tekniskt problem i koppar. Utgångsmaterialet för kopparkapslarna är tillräckligt rent för att väteförsprödning inte ska utgöra något problem, men det behöver också säkerställas att materialet inte påverkas vid tillverkning av kapslarna eller i slutförvaret på ett sådant sätt att väteförsprödning skulle kunna uppstå och påverka kapsegenskaperna negativt.

Nuläge

SKB har under lång tid arbetat med kravet att hålla syrehalten i kapselkopporn på en låg nivå. Detta görs dels genom att helt enkelt bara använda koppar med ett lågt innehåll av syre (högst 5 vikts-ppm), dels genom att utveckla svetsstekniken för förslutning av kopparkapseln med ett gasskydd så att fastsvetsningen av kapselns lock och botten inte leder till att för höga halter oxider bildas i svetsfogarna, se vidare avsnitt 9.4.3.

Lösligheten av väte i koppar är mycket låg (Magnusson och Frisk 2017), och för att studera om väte påverkar materialegenskaperna måste man tvinga in väte i metallen. Det har dock visat sig svårt att få in några större mängder, annat än ytligt, och likaså att tillförlitligt mäta halten på olika ställen i materialet.

I några försök har man observerat måttliga öknings av vätehalten då koppar i vatten utsatts för en stråldos motsvarande den som materialet kommer att utsättas för i slutförvaret. I dessa försök observerades ytliga korrosionseffekter, men ingen porbildning på djupet. Det upptag av väte som uppmätts efter att koppar exponerats för gammastrålning är mindre än vätehalten i SKB:s kapselkoppar (Lousada et al. 2016). Den har dessutom uppmätts i mycket tunna prover, vilket innebär att effekten på koppar-kapseln skulle bli än mindre signifikant. Mätningar av väte i koppar efter långsam dragprovning i sulfidlösning vid Studsvik (avsnitt 9.1.5) angav att vätehalten ökat från 0,5 till cirka 1,0 vikts-ppm under exponeringen (Forsström et al. 2017). Resultaten kan dock ifrågasättas eftersom 1) ökningen av vätehalt var oberoende av sulfidhalten, 2) även den oexponerade delen av provstaven hade samma halt av väte som den exponerade delen efter provningen.

I en del försök har man också mätt de mekaniska egenskaperna efter väteladdningen och då sett en påverkan som ungefär svarar mot det man kan förvänta sig utifrån att materialet faktiskt förändrats nära ytan. Vid en ny genomgång av tidigare publicerad provning av koppar har inte någon mekanism identifierats som kan ge sprickpropagering i koppar under de tidsrymder som är aktuella i förvaret (Leijon et al. 2018).

Omfattande kvantkemiska beräkningar har utförts för att bättre förstå hur väte interagerar med kopparmetallens ytor, med dess inre kristallstruktur, samt med korngränser (Lousada och Korzhavny 2019). Beräkningarna visar bland annat att även om kopparytan vore helt belagd med väte, oavsett ursprung, blir koncentrationen inne i metallen mycket låg.

Risken att väte tränger in och påverkar kopparmaterialets egenskaper på djupet har dessutom analyserats på teoretisk väg med utgångspunkt från diffusionsberäkningar, både för ett fall att väteporer bildas i metallen och för ett fall där detta inte antas ske (SKB 2019e). Resultaten visar att omfattningen av den korrosion som kan förekomma i slutförvaret är för liten för att det väte som frigörs ska ge någon signifikant påverkan på kapslarna.

Slutligen har SKB i samarbete med fyra olika laboratorier låtit genomföra en så kallad Round Robin-studie av känsligheten i vätemätningar med smältanalys. Studien visar bland annat på vikten av likartad provberedning för att kunna jämföra prover med avseende på väteinnehåll (Granfors 2017).

Program

Forskningsprogrammet för väte i koppar fortsätter med elektrokemiska försök för att bättre förstå vilka laddningsförhållanden som krävs för att driva in väte i koppar och vad som krävs för att porbildning ska ske, samt hur mekanismen för transport i koppar under förhållanden med hög strömtäthet skiljer sig från förhållanden med de låga strömtätheter som kan följa av gammadiolys och sulfidkorrosion i förvarsmiljön.

Insatserna med kvantkemiska beräkningar kommer att fortsätta med syfte att bättre förstå hur väte i koppar växelverkar med föroreningsatomer och defekter i materialet, samt hur detta kan påverka transportegenskaperna för väte i koppar.

SKB avser även att under Fud-perioden ytterligare låta utvärdera metoder för att mäta förändringar och variationer i koppars väteinnehåll under experimentella försök, för att på så sätt bättre kunna utvärdera om olika försöksmiljöer har någon påverkan på väteinnehållet. Utveckling av mätmetoder kommer även att vara till hjälp för att ställa krav och verifiera kravuppfyllnad vid tillverkningen av kapslarna.

9.2.3 Strålningseffekter på koppar och segjärn

I underlaget till säkerhetsanalysen SR-Site drogs slutsatsen att de stråldoser som kapselmaterialet (koppar och segjärn) kommer att utsättas för är minst en storleksordning för låga för att ge mätbara effekter på kapselns mekaniska egenskaper. Detta bygger i huvudsak på tidigare beräkningar av strålskador i de båda materialen till följd av gamma- och neutronstrålning.

Gamma- och neutronstrålning kan också inverka försprödande på segjärnets materialegenskaper, genom utfällning av kopparpartiklar eller bildning av LBP (late-blooming phases). Omfattningen av utfällning av kopparpartiklar behöver studeras så att väl underbyggda krav kan ställas på maximalt tillåten kopparhalt i järnmaterialet.

Nuläge

SKB har låtit göra nya beräkningar av strålskador på koppar och segjärn genom en forskargrupp vid KTH (Yang et al. 2019). Beräkningarna av strålskador har utförts för både gamma- och neutronstrålning. Nästan tjugo år har gått sedan de tidigare beräkningarna gjordes, och såväl programvara som dataunderlaget har utvecklats. De nya beräkningarna resulterar i uppskattningar av strålskadorna i materialen av samma storleksordning som i de tidigare beräkningarna.

I såväl tidigare som nya beräkningar av strålskador har man medvetet försummat effekten av att det bestrålade materialet "självläker" samtidigt som strålskador skapas, vilket har medfört att resultaten är pessimistiska vad gäller omfattningen av strålskadorna. Nyligen genomförda uppskattningar av självläkningens effektivitet tyder på att den verkliga omfattningen av strålskadorna är åtminstone en faktor 100 lägre än den redan låga omfattningen i beräkningarna (Padovani et al. 2019).

Parallellt med de nya strålskadeberäkningarna har SKB även låtit en forskargrupp i Storbritannien göra ett försök att experimentellt verifiera små strålskador i koppar efter gammabestrålning, med en dos representativ för förhållandena i slutförvaret (Padovani et al. 2019). Redan på förhand stod det klart att den ringa omfattning av strålskador som uppskattats av beräkningar är för låg för att detekteras. Ambitionen med försöket blev i stället att använda de experimentella metodernas känslighet för att verifiera att skadornas omfattning inte översteg den som kunde detekteras i experimentet, vilket också visades.

Förstudien för att undersöka om LBP kan uppträda i segjärnet har slutförts (Korzavyi et al. 2018). I denna har termodynamiska beräkningar av fasdiagram (Calphad, CALculations of PHase Diagrams) använts tillsammans med kvantmekaniska beräkningar för analys av interaktioner mellan lösta atomer och vakanser i koppargittret. Arbetet utökades senare till en mer systematiskt uppbyggd databas för termodynamiska data för koncentrerade lösta och utfällna faser i järnbaserade legeringar (Delandar et al. 2018a). Likaså finns nu en systematisk studie med kvantmekaniska beräkningar för interaktioner mellan lösta atomer, föroreningsatomer och vakanser i järn (Gorbatov et al. 2016), vilket kan användas vid studier av bildning av kluster och utfällning av faser.

Program

SKB planerar i dagsläget inga fortsatta insatser på direkta strålskador i kapselmateriell. De nya beräkningarna av strålskador kommer att ligga till grund för planering av experiment för att undersöka eventuell utfällning av koppardpartiklar. Detta kommer i sin tur att användas för att säkerställa att kraven på maximal kopparhalt i segjärnet är ändamålsenliga. Även eventuell inverkan av strålning på kanalrören av stål kommer att beaktas. Utfällning av andra faser i segjärnet kommer att studeras fortsatt, med beräkningar och eventuellt experiment.

9.3 Konstruktion

Nuläge

SKB har uppdaterat designanalysen tillsammans med Posiva (Jonsson et al. 2018) för att förtydliga krav och sammanställa och inarbeta de nya verifierande spännings- och skadetålighetsanalyserna som tagits fram för att besvara de kompletteringar som SSM begärt. För analyserna av de mekaniska lastfallen har de nya konstruktionsförutsättningarna (Posiva SKB 2017) beaktats.

Kraven på kapselns hållfasthet och tillåtna defektstorlek har formulerats deterministiskt baserat på konstruktionsförutsättningar och materialstandarder. För att värdera kapselns robusthet har SKB även genomfört probabilistiska analyser av såväl det isostatiska lastfallet som skjuvlastfallet (Jonsson et al. 2018).

Trots att de mekaniska belastningarna varierar mellan delar av kapseln i slutförvaret har inte kapselns hållfasthetskrav anpassats för detta. De acceptabla defekternas storlek varierar i olika delar av insatsernas tvärsnitt, men i övrigt har kravbilderna med avseende på defekter och materialegenskaper varit enhetlig för insatsen. SKB ser möjligheter att mildra standardkrav med avseende på materialegenskaper och tillåtna defektstorlekar, samtidigt som kapselns integritet behålls. Dessutom kan SKB motivera att inte alla delar av kapseln behöver provas.

Program

För att anpassa kraven till förändringar i konstruktionsförutsättningar, variationen i mekaniska belastningar, och den systematiska variationen av egenskaperna inom kapseldelar, utvecklar SKB kravbilderna och gör en bedömning av kravuppfyllnad i PSAR.

Tillåtna hanteringslaster utreds liksom tillåten storlek på hanteringsdefekter i kopparhöljet. För kopparhöljet genomförs nya utredningar rörande den största kvarstående deformation som kopparhöljet kan komma att utsättas för. I dessa utredningar används både elastoplastiska materialmodeller och materialmodeller som innehåller krypning (avsnitt 9.2.1). De olika lastfallen värderas med avseende på om dessa är deformationsstyrda eller kraftstyrda för kopparhöljet. Dessutom beaktas inverkan av excentriskt placerad insats. Därefter kan kraven på kopparmaterialets duktilitet revideras och en förnyad bedömning av kravuppfyllnad göras.

Preliminära resultat visar att det finns förutsättningar att revidera kravet på brottförlängning i segjärnet. Kravställningen med avseende på idealiserade defekter i segjärnet utreds vidare, och även här indikerar preliminära resultat att dessa krav kan mildras, framför allt för de centrala delarna av insatsen. SKB utreder vidare hur detta ska kontrolleras i serietillverkning och med vilken säkerhet (konfidens) som kraven ska uppfyllas.

9.4 Tillverkning, kontroll och provning

9.4.1 Utformning och bearbetning av koppardelar

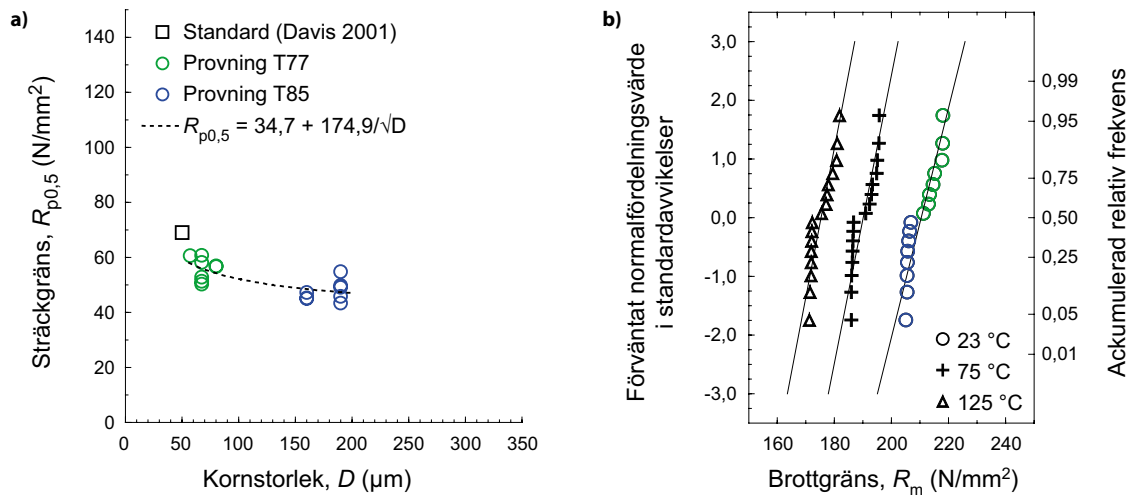
SKB krävställer kapselkoppans hållfasthet och duktilitet för inkapsling, transport och slutförvaring. Dimensioner och materialegenskaper har tidigare redovisats i SKB (2010b). För att uppnå de egenskaper och dimensioner som förutsätts i konstruktionsunderlaget tillverkas koppardelarna genom gjutning, varmbearbetning och skärande bearbetning enligt standarder och branschpraxis hos metallverk. Varmbearbetningsprocesser som används är extrusion av rör, dornpressning av rör och smidning av lock och bottnar. Processerna förutsätter tillräckliga krafter och effekter för de pressar som används vid tillverkningen och även att metallen kan bearbetas utan att brista eller att andra defekter bildas.

Nuläge

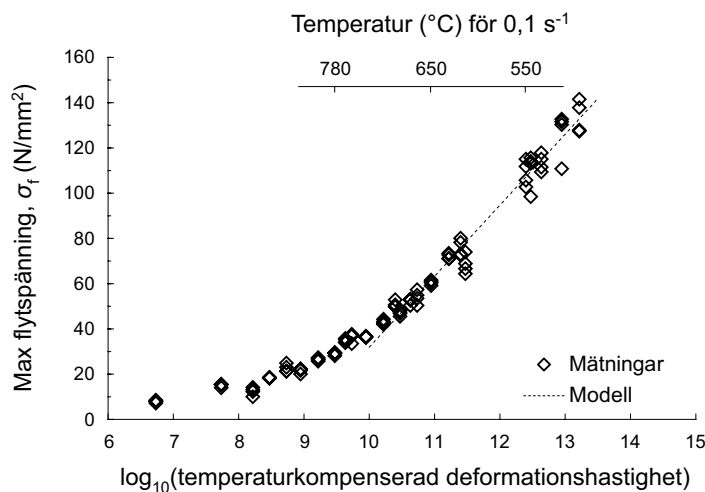
SKB har kunskap om koppars hållfasthet och deformationsmotstånd, och har erfarenhet av varmbearbetning. I figur 9-8a visas SKB:s mätningar (Nilsson 2019) av hållfastheten för extruderade rör T77 och T85, och där framgår också att sträckgränsen R_p kan beskrivas med en fundamental kornstorleksmodell enligt Hall–Petch passad till mätningarna. Spridningen i mätdata indikerar att även andra härdningsmekanismer kan påverka sträckgränsen. SKB:s mätningar av sträckgränsen R_p visar sig vara lägre än standardvärdet för koppar >99,9 procent ur ASM Specialty Handbook (Davis 2001) och detta kan antas bero på större kornstorlek. För samma provmaterial visas i figur 9-8b hur koppars brottgräns påverkas systematiskt av temperaturen. De räta linjerna visar normalfördelningars summafunktion från minus tre standardavvikelser till plus tre standardavvikelser, och där andelen 0,50 motsvarar det förväntade värdet.

Deformationsmotstånd och flytspänning vid varmbearbetning beror främst av temperatur och hastighet, men också i viss mån av metallens kornstorlek. Figur 9-9 visar att SKB:s mätningar (Nietsch 2018) av koppars maximala flytspänning vid varmbearbetning kan modelleras som en funktion av en temperaturkompenserad deformationshastighet, Zener–Hollomon-parametern. De maximala flytspänningarna som redovisas i figuren har mätts på stelningsstruktur från koppargöt. Modellen kan användas för att interpolera koppars flytspänning och ingå i kraftberäkningar för bearbetning av arbetsstycken från koppargöt. Vid extrusion och smidning av koppardelar kommer kopparna att ha en mindre kornstorlek och modellen behöver kalibreras och eventuellt justeras.

Eftersom temperatur och deformationshastighet påverkar koppars nybildning av kristallkorn modelleras ofta den nybildade kornstorleken som funktion av den temperaturkompenserade deformationshastigheten. Modellerna kan användas för att välja en lämplig kombination av temperatur och presshastighet i de avslutande bearbetningsstegen för att metallstrukturen ska bli tillräckligt finkornig.



Figur 9-8. a) Sträckgränsen som funktion av kornstorlek vid rumstemperatur. b) Mätningar av brottgränsens beroende av temperaturen.

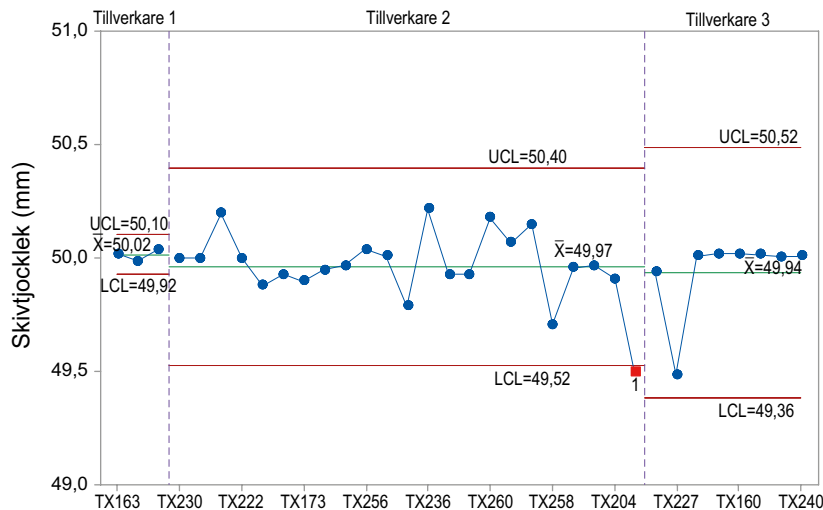


Figur 9-9. Kapselkopparns flytspänning vid varmbearbetning som funktion av den temperaturkompenserade deformationshastigheten.

Figur 9-10 visar kopparlockens tjocklek vid spånbrutande bearbetning för olika tillverkare. Skivtjockleken har mätts för 35 lock och är i medeltal 49,96 mm, med standardavvikelsen 0,16 mm. Tillverkningsprocessens övre respektive undre styrgräns definieras som medelvärdet ± 3 standardavvikelse för respektive tillverkare. Även om tillverkningsprocesserna inte är fullständigt stabila faller kopparlockens skivtjocklek väl inom kraven (Jonsson et al. 2019).

Program

SKB avser att beskriva hur härdningsmekanismer påverkar hållfastheten för kapselkopparn utifrån gjorda mätningar av sträckgräns, brottgräns, kornstorlek och temperatur, men också av andra faktorer såsom tillverkningsprocesser. SKB kommer att krävställa både hanteringen av kapseln i Clink och kopparns sträckgräns för att säkerställa kapselns hållfasthet vid lyft, och att inga intryck ska uppstå. SKB avser att ta fram modeller för flytspänning och nybildad kornstorlek vid varmbearbetning utifrån stukning av små kopparcylindrar. SKB planerar vidare att utreda kravet på medelkornstorlek i koppardelarna vilket kan medföra att ett tilläggskrav rörande ljuddämpning kan behöva definieras för att tillräcklig känslighet ska kunna uppnås vid ultraljudprovningen.



Figur 9-10. Diagram för skivjocklek i kopparlock. Sorteringen är per tillverkare och därefter i tidsföljd då locken maskinbearbetats. UCL anger processens övre styrgräns, LCL anger processens undre styrgräns hos respektive tillverkare (Jonsson et al. 2019).

SKB har för avsikt att utreda och förtydliga acceptanskrav med avseende på materialsammansättning, exempelvis maximal syrehalt i kopparhöljet, och komplettera och motivera kravbilderna för defekter i koppardelarna (Jonsson och Rydén 2014). SKB planerar att validera de finita-elementberäkningar som ligger till grund för de framräknade tillåtna defekterna med lämpliga praktiska experiment. SKB planerar att utreda och förbättra metoderna för kvalitetssäkring av fosforhalten och övriga specifikationer av den kemiska sammansättningen och densiteten i koppardelarna, liksom hur jämnare kornstorlek ska kunna uppnås.

Varmformningen av lock och botten kan utföras som friformsmidning eller med omslutande verktyg (sänksmidning). Val av process och utformning påverkas av seriestorlek (Bodin 2003). SKB kommer att utveckla smidningen för att förbättra hållfasthet och minska spridningen i kornstorlek i färdig produkt samt minimera risken för smidesveck. Möjliga och troliga defekter i koppardelarna ska analyseras och klassificeras. Acceptanskriterier för defekter med hjälp av finita-elementsimuleringar av extrusions- respektive smidningsprocesserna tas fram. Preliminära defektanalyser och acceptanskriterier kommer att redovisas i PSAR. SKB planerar att extrudera kopparrör och smida kopparlock med lämpliga processparametrar för serietillverkning, samt att prova och kontrollera mot krav och acceptanskriterier, för att verifiera att koppardelarnas egenskaper uppnås och kunna vidta korrigerande åtgärder i tillverkningsprocesserna.

Därtill utreder SKB möjligheten att välja dornpressning som en ytterligare referensmetod för tillverkning av kopparrör. Dornpressning ger ett rör med integrerad botten. SKB och Posiva genomför utveckling av dornpressningsprocessen tillsammans. Det är nu möjligt att tillverka kapselkoppar som uppfyller tillverkningskravet minst 40 procents brottförlängning respektive referensutformningskravet på medelkornstorlek max 800 μm men inte alltid tillverkningskravet max 360 μm medelkornstorlek. Ytterligare arbete återstår för att utveckla dornpressningen och verifiera att jämn kornstorlek kan uppnås även i den integrerade botten på röret, men även att kartlägga vilka defekter som kan uppstå vid dornpressning samt acceptanskriterier för dessa defekter. SKB har även för avsikt att utreda hur verifiering av koppertillverkning med dornpressning kan genomföras.

9.4.2 Gjutning av kapselns insats

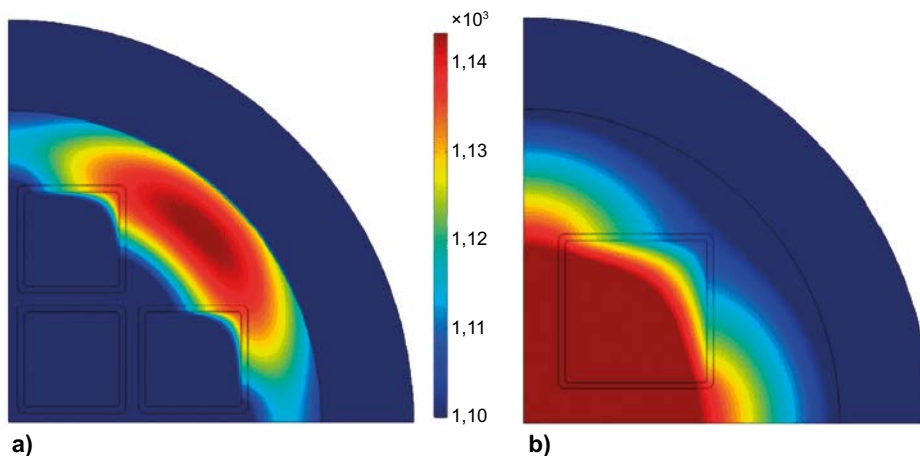
För att kapseln ska garantera strålsäkerheten under transport och deponering och bidra till ett säkert förvar behöver SKB visa att den mekaniska hållfastheten är tillräcklig i hela insatsen samt att det inte kvarstår några oacceptabla fel eller avvikelser i insatsen.

Nuläge

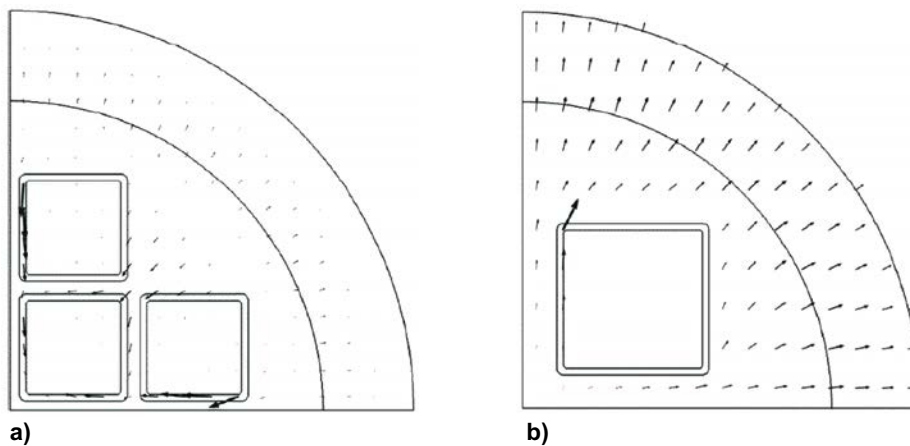
SKB har till kapselns insats valt ett ferritiskt segjärn som balanserar hållfasthet och seghet med tanke på isostatiska laster och ett jordbävningsscenario i SKB:s analys av säkerhet efter förslutning. Materialbeteckningen för SKB:s segjärn är EN-GJS-400-15C från standarden SS-EN 1563. Segjärn är också den typ av gjutjärn som har högst åldringsbeständighet mot till exempel blåsprödhet. Genom att gjuta segjärnet kring stålprofiler säkerställs utrymme för bränsleelementen.

SKB:s uppdragsforskning vid KTH och Frecast AB har undersökt struktur och grafitnodulstorleksfördelning för SKB:s provtillverkade segjärnsinsatser och simulerat stelnings- och svalningsförlopp. Figurerna 9-11 och 9-12 visar på olika stelningsförlopp för BWR-insatser respektive PWR-insatser. Som kan ses i figur 9-11 steltnar PWR-insatser mycket långsammare än BWR-insatser. Små grafitnoder bildas vid snabb stelning och grövre noder vid långsam stelning, men skillnaderna i nodulstorlek förklarar inte helt variationer i mekaniska egenskaper (Tadesse och Fredriksson 2018).

Järn och stål kan bli hårdare och sprödare vid lagring efter avkyllning eller deformation. Sambanden mellan sprödhet och materialets sammansättning är inte fullständigt klarlagda, men under 1900-talet minskades ståls åldringsbenägenhet genom forskning och praktisk utveckling hos tillverkarna. Det finns undersökningar som visar på att segjärn i praktiken försprödas först vid 400 °C (Yanagisawa och Lui 1983). Dynamisk åldring kan uppkomma vid dragprovning vid förhöjd temperatur och den identifieras som taggar (striationer) i dragprovskurvan och kallas Portevin-LeChatelier-effekten. Förenklat kan striationerna hänföras till att inlösta ämnen interagerar med den fortgående deformationen av metallens kristallkorn, och både ämnenas diffusion och deformationen är temperaturaktiverade. Denna effekt ger inte någon drastisk minskning av materialets seghet (brottförlängning).



Figur 9-11. Temperaturprofil i senare delen av stelningsförloppet. a) BWR-insats, $t = 1 \text{ h } 43 \text{ min}$, b) PWR-insats, $t = 8 \text{ h}$. Figur från Tadesse och Fredriksson (2018) enligt <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



Figur 9-12. Värmefflöde före fullständig stelning. a) BWR-insats, b) PWR-insats. Figur från Tadesse och Fredriksson (2018) enligt <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Statisk deformationsåldring sker bara för material och temperaturer som uppvisar karaktäristiska tecken på åldring. Eftersom varken sådana tecken som markerat ökad sträckgräns eller striationer har observerats vid dragprovning av segjärn, bedöms inte statisk deformationsåldring förekomma om plasticering inträffar vid temperaturer under 125 °C (Sarnet och Holst 2017). Efter genomgång av tillgänglig litteratur och av lastfallen i slutförvaret bedömer SKB att varken statisk eller dynamisk deformationsåldring påverkar kapselinsatsens mekaniska egenskaper eller funktioner i slutförvaret. Dels krävs plasticerande laster för att fenomenen ska uppstå medan kapselinsatsen är dimensionerad så att plasticering inte uppnås utom i osannolika fall, dels är temperaturen i slutförvaret betydligt lägre än de temperaturer vid vilka särskilt dynamisk åldring uppträder. Segjärn är vidare den form av gjutjärn som är mest tålig mot deformationsåldring (SKB 2017).

Program

SKB har under 2018–2019 gjutit tre BWR-insatser och två PWR-insatser för att utveckla gjutprocesserna och jämföra olika gjuteriers kvalitetsnivåer. Segjärnets hållfasthet och struktur kommer att mätas och analyseras för flera höjder och provlägen. För dessa kommer kemisk sammansättning, densitet och ultraljudegenskaper, att mätas och brottytor karakteriseras för ett lämpligt urval i förhållande till hållfasthetsresultat.

Att gjuta in en stålkonstruktion i segjärnet är effektivt men ovanligt. SKB kommer att undersöka hur konstruktionen samverkar med segjärnsmältan under gjutningen och om konstruktionen eller materialet kan påverka segjärnets egenskaper.

Även om SKB bedömer att varken statisk eller dynamisk deformationsåldring av segjärnet påverkar kapselinsatsens mekaniska egenskaper eller funktioner i slutförvaret kommer segjärn att dragprovas vid förhöjda temperaturer. Dynamisk deformationsåldring och eventuell sprödhet beroende av temperatur ska utvärderas för två olika segjärnsinsatser enligt försöksplanen i tabell 9-1.

Tabell 9-1. Försöksplan för undersökning av segjärns dynamiska deformationsåldring.

Insats	Höjd (mm)	Provstav	Temperatur (°C)	Hastighet (1/s)
i76	2306	2	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	5	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	11	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2306	14	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	2	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	5	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	11	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2336	14	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	5	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	11	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2377	14	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	2	125	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	5	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	11	400	$2,8 \times 10^{-4}$
i76	2419	14	20	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2336	2	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2336	5	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2336	11	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2336	14	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	5	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2372	11	300	$2,8 \times 10^{-4}$
i57	2372	14	300	$7,7 \times 10^{-5}$
i57	2372	2	300	$2,8 \times 10^{-4}$

SKB kommer att vidareutveckla tillverkningstekniken och förtydliga tillverkningskraven på insatsens ståldetaljer. För segjärnet utreds tillverkningskrav för segjärnsinsatsen. SKB planerar att uppdatera kravbilderna för oförstörande provning av insatsen och koppla defektbilderna tydligare till de slutligt valda tillverkningsmetoderna.

9.4.3 Svetsning

Friktionssvetsning (FSW, Friction stir welding) valdes 2005 som referensmetod för förslutning av kapseln efter en utvärdering mot alternativtekniken elektronstrålesvetsning. Under 2014 valde även Posiva FSW som referensmetod för svetsning av kapseln. Sedan dess har SKB och Posiva arbetat tillsammans för att utveckla och verifiera FSW.

FSW sammanfogar materialet i fast tillstånd vilket skiljer processen från klassisk smältsvetsning. Genom att låta en tapp rotera värms materialet av friktionen. Den ökande temperaturen gör materialet mjukare så att det, om temperaturen är tillräckligt hög, börjar röra sig med tappens utslag utan att materialet smälter. När tappens utslag förs fram längs foglinjen skapas en homogen fog. FSW ger en fog med materialegenskaper jämförbara med grundmaterialet (SKB 2010b).

Nuläge

Efter Fud-program 2016 har utvecklingsarbetet fokuserat på dels industrialisering och automatisering av svetsprocessen, dels undersökning av oxidstråk i svetsgodset.

Arbetet med oxidstråk har under perioden syftat till att förstå effekten av oxidpartiklar på mekaniska egenskaper, främst seghet (duktilitet), men också korrosion. Detta har gjorts genom att systematiskt variera oxidtjockleken på fogytorna före svetsning. Därefter har dragprovning och krypprovning gjorts på svetsat material. Korrosionsegenskaperna har undersökts dels genom elektrokemiska studier av svetsat material, dels genom beräkningar av kemisk upplösning av oxidstråk. Dessa resultat har använts för att definiera ett preliminärt processfönster för syrgashalten i gasskyddet under svetsning, <100 at-ppm syre (Björck et al. 2019).

När det gäller automatiseringen och den så kallade kaskadregulatorn (som ändrar svetsverktygets rotationshastighet) så håller den verktygstemperaturen runt hela foglinjen inom ± 5 °C. Denna regulator har utvecklats så att den ska fungera även om verktygstemperatursignalen försvinner, en så kallad fail-safe-funktion som testats och verifierats vid två separata tillfällen, då regulatorn styr endast på värmetillförseln när temperatursignaler saknas.

Den så kallade djupregulatorn, som ändrar svetsverktygets tryckkraft mot kapseln, har sedan Fud-program 2016 verifierats under flertalet fullvarvssvetsningar som ett led i ytterligare automatisering. Resultaten (Cederqvist et al. 2018) visar att med en tapplängd på 51 mm och centrerat höjdläge kan foglinjeböjningen begränsas till mindre än 2 mm trots att skulderdjupet varierats i intervallet 1,2–3,4 mm.

För att undersöka tillverkningstoleranser för lock och rör samt för att förenkla foglinjegeometrin har en ny rak foglinjeutformning provsvetsats (i stället för den nuvarande utformningen med en klack i). Både oförstörande och förstörande provning visar samma resultat som med den nuvarande utformningen, det vill säga inga diskontinuiteter förutom foglinjeböjning mindre än 2 mm.

Program

SKB och Posiva kommer att fortsätta verifiera svetsproceduren och förbereda den för kvalificering. Kvalificering sker genom utfallsprovning. Fokus kommer att ligga på den nya foglinjeutformningen och tillverkningstoleranser mellan lock och rör, samt att ta fram processfönster för alla parametrar som förberedelse inför den planerade kvalificeringsproceduren.

9.4.4 Kontroll och provning

Kapseln och kapseldelarna ska kontrolleras för att bekräfta att tillverkningsprocesserna fungerar som de ska (styrande kontroll), att egenskaperna som förutsätts i konstruktionsunderlaget uppnåtts och för att säkerställa att inga fel eller avvikelser kvarstår (accepterande kontroll). Styrande kontroll kan med fördel utföras genom mätning direkt under tillverkningsprocessen.

Nuläge

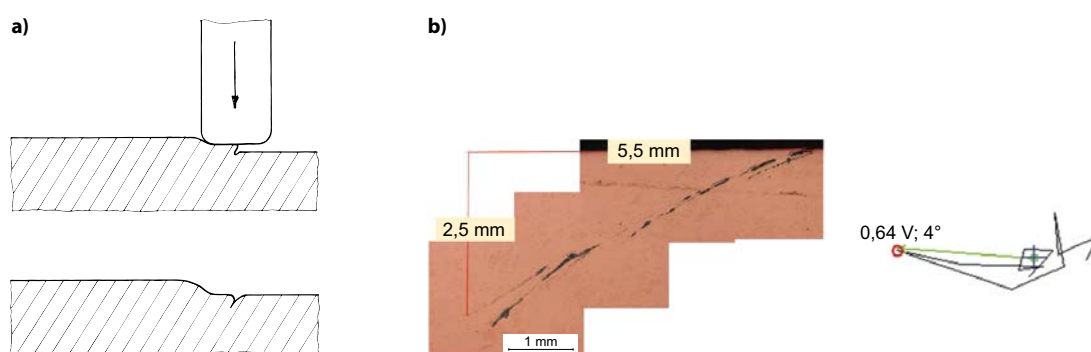
Kapseln och kapseldelarna kan kontrolleras och provas mekaniskt och fysikaliskt, samt analyseras kemiskt, med standardmetoder. De mekaniska egenskaperna kan provas i kontrollvolymen i anslutning till kapseldelarna med vidgjutna provstavar och provringar från överlängder av kapseldelarna. Även om de uppmätta egenskaperna i princip gäller den undersökta provningsvolymen kan kapseln och kapseldelarnas egenskaper bestämmas med teknisk bevisföring.

För att upptäcka (detektera) defekter i svets, koppardelar och segjärnsinsatser har fysikaliska provningsmetoder baserade på ultraljud, magnetism och röntgen visats sig lämpliga. SKB har anpassat sådana standardmetoder utifrån kapselns geometri, dimensioner och material samt defekternas storlek, karaktär och orientering. Med fysikaliska provningsmetoder som ultraljudprovning och röntgen kan eventuella fel detekteras inuti kapselns svetsfog eller kapseldelarna. Ytbrytande defekter kan detekteras med en magnetisk provningsmetod (virvelström).

Finit-elementberäkningar av skjuvlastfallet gett att 3 procents brottförlängning är ett rimligt lägsta krav att ställa på segjärnsinsatsen (Jonsson et al. 2018).

Vid smidning av kopparlock kan smidesveck bildas vid ogynnsamma verktygsförhållanden (Kopp et al. 1988). Små kontaktlängder mellan smidesverktyg och ämne samt små verktygsradier ökar risken för bildning av smidesveck, vilket visas schematiskt i figur 9-13a. Defektstorleken och orienteringen gör att ett kopparlock med smidesveck inte kan accepteras. SKB har anpassat virvelströmsprovning som framgångsrikt detekterar sådana smidesveck i kopparlock (van den Bos 2018). Figur 9-13b visar hur virvelströmsprovningens indikation motsvaras av smidesveck.

SKB har tagit fram en samlad kravbild, inklusive acceptanskriterier för kapseln och dess komponenter. Som en följd av att ultraljudprovning av insatsens centrala delar har ifrågasatts i SSM:s granskningsrapport (SSM 2018) har en studie med syfte att applicera röntgenteknik för dessa områden initierats. Preliminära resultat av denna studie visar på möjligheter att prova med röntgen i dessa områden, framför allt med tanke på att acceptanskriterierna troligen kan revideras.



Figur 9-13. a) Bildning av smidesveck vid ogynnsam verktygsradie och matning. b) Indikation vid virvelströmsprovning vid 1 kHz och motsvarande smidesveck (3 mm) (van den Bos 2018).

Program

Provning av koppardelars och segjärnsinsatsers mekaniska egenskaper sker i kontrollvolymen i anslutning till kapseldelarna. SKB planerar att utreda vilka provningsmetoder som är möjliga i kontrollvolymen och vilken provningsomfattning som behövs. Exempelvis är dragprovning möjlig och utslagsgivande för varje tillverkat kopparrör för att kontrollera att tillverkningsprocessen fungerat som den ska. Däremot behöver SKB utreda hur dragprovningmätningar förhåller sig till kapselkoppans hållfasthet.

SKB planerar att utföra utredningar och utveckling avseende kontrollordning för kapseln. Som utgångspunkt för dessa utredningar, som till viss del görs i samarbete med ackrediterade kontroll- och kvalificeringsorgan, avser SKB att som bas använda befintliga föreskrifter SSMFS 2008:13, vilka gäller för mekanisk utrustning i kärnkraftverk, med kompensatoriska åtgärder. Även andra guidelines och normer (IAEA) kan användas för att ge principer och strategier inom delområden där inte SSMFS 2008:13 anses fullt ut tillämpbar för kapseln i ett KBS-3-system. En kontrollordnings syfte är i normala fall att ge ett system och en strategi för hur kravuppfyllnad och kvalitetssäkring av till exempel en produkt ska erhållas. Inom systemet ska då även övergripande utredas hur kontrollordningens aktiviteter ska rapporteras och dokumenteras då detta är en del av kvalitetssäkring.

SKB avser att föreslå detaljerade acceptanskriterier för oförstörande provning. Det kommer att göras genom fortsatta systematiska analyser av möjliga och troliga defekter i kapselns delar och förslutningssvets, vilka sammanställs i defektbeskrivningar. Dessa kommer därefter att kopplas till de beräkningar som görs med avseende på hantering av kapseln vid tillverkning och deponering samt kapselns säkerhet efter förslutning. Parallellt med detta arbete bedrivs fortsatt utveckling av tekniken för oförstörande provning för detektering av defekter kopplat till dessa mer detaljerade acceptanskriterier. Utvecklingen fokuseras på framtagning av kompletterande ultraljudteknik för provning av insatsens volym samt utvärdering av alternativa tekniker för ytprovning av insatsen. Utöver detta har arbete initierats med inriktning på utveckling av virvelströmsteknik för ytprovning av koppardelarna.

Utvecklingen av oförstörande provning kommer även mer konkret att inriktas mot teknik för storleksbestämning kopplat till de defekter som förväntas kunna förekomma i kapselns komponenter och svetsar samt de acceptanskriterier som utarbetas. Utöver den provningsteknik som utvecklas för slutkontroll planeras även en översyn av den provning som i dagsläget görs av utgångsmaterial som exempelvis kopparrör. Baserat på denna översyn kommer anpassning av standardmetoder och eventuell teknikutveckling att initieras.

För att underbygga teknik för oförstörande provning bedriver SKB fortsatta studier av möjliga variationer av geometri, material och defekter i kapselns komponenter och svetsar samt hur dessa kan påverka kapselns provbarhet. Baserat på dessa studier kommer sedan eventuella krav på exempelvis ljuddämpning och ytfinhet att definieras. För att ytterligare underbygga provningstekniken bedrivs fortsatt arbete med ultraljudsimulering av såväl själva provningstekniken som dess respons kopplat till både artificiella och verkliga defekter.

För övriga kontroller av kapseln, exempelvis avseende dimensioner, kommer en översyn av toleranser att genomföras. Baserat på denna översyn kommer eventuell utveckling av teknik för verifiering av kravuppfyllnad att initieras.

I inkapslingsanläggningen kommer svetsfogens kvalitet att kontrolleras med ultraljudprovning och röntgen. Metodik för kontroll och provning av samt krav på kapselns locksvets behöver fastställas till en nivå så att de kan användas för konstruktion av Clink. Det kan inte uteslutas att defekter kommer att behöva karaktäriseras och höjdbestämmas och därför återstår att ta fram teknik för oförstörande provning. Eftersom oxider inte kan detekteras med dessa metoder behöver FSW-svetsprocessen kvalificeras, och SKB kommer därför att formulera kriterier på maximal tillåten syrehalt i gasskyddet.

10 Cementbaserade material

I SFR förekommer cementbaserade material i stor utsträckning i avfallsmatriser, tekniska barriärer och andra konstruktioner. I det koncept för SFL som genomgått säkerhetsvärdering ingår också stora mängder cementbaserade material, likaså kommer Kärnbränsleförvaret att innehålla cementbaserade material i pluggar, injekteringsmaterial och material för bergförstärkning.

I kapitel 4 redovisas kortfattat SKB:s planerade utvecklingsprogram för cementbaserade material, kopplat till utformning av förvarskonstruktioner, materialutveckling samt produktionsmetoder för uppförande och förslutning av de tre slutförvaren. Vidare ges där en översiktlig beskrivning av programmet för forskning om processer av vikt för systemens säkerhet efter förslutning. I detta kapitel ges en mer detaljerad beskrivning av SKB:s program inom dessa områden. Programmet för forskning för ökad förståelse av processer redovisas gemensamt för de tre förvaren (avsnitt 10.1) medan programmet för utformning, material och produktionsmetod redovisas separat för SFR (avsnitt 10.2), SFL (avsnitt 10.3) och Kärnbränsleförvaret (avsnitt 10.4).

10.1 Cementbaserade material – utveckling efter förslutning

I detta avsnitt beskrivs den naturvetenskapliga forskning som SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen kring hur funktionen hos cementbaserade material i slutförvarsmiljö förändras under de tidsperioder som säkerhetsanalyserna omfattar.

10.1.1 Grundvattenpåverkan

Cementbaserade material som kommer i kontakt med grundvatten påverkas av vattnets kemiska sammansättning samt av vattenflödets storlek och riktning. Upplösning eller utfällning av mineral förändrar betongens porstruktur, vilket påverkar materialets hydrauliska och mekaniska egenskaper. Även masstransportegenskaper hos betongmatrisen förändras.

Nuläge

SKB har under Fud-perioden fortsatt insatserna att fördjupa processförståelsen rörande degradering av betong under förvarsbetingelser, både med hjälp av modellering och genom experimentella studier.

De genomförda modelleringsarbetena har haft sin utgångspunkt i utformningen av bergssalen för hårdkomponenter, BHK, i SFL och omfattat studier av utveckling av kemiska och hydrauliska egenskaper hos betong i ett perspektiv av upp till 1 miljon år under inverkan av hydro-kemo-mekaniska processer (Idiart and Shafei 2019, Idiart and Laviña 2019). Även studier av inverkan av alternativa betongsammansättningar (Idiart et al. 2019b) har genomförts; se även avsnitt 10.1.6.

Följande huvudsakliga slutsatser kan dras från de genomförda studierna:

- Den huvudsakliga degraderingsprocessen är urlakning av kalcium vilket leder till en gradvis förlust av portlandit och CSH-gel.
- Degraderingshastigheten i återfyllnaden i BHK är mycket låg, huvudsakligen på grund av låga vattenflöden i återfyllnadsbetongen.
- Betongens initiala porositet och transportegenskaper har en större inverkan på omfattningen av degraderingen över tid än betongens kemiska sammansättning för de fall som studerats här.

Inom dessa studier har det även visats att mekaniska laster endast förväntas orsaka mycket begränsade skador i anslutning till gränssytan mellan berg och återfyllnaden i BHK. Enda undantaget är glaciationslaster vilka kan orsaka större skador i en större del av återfyllnaden.

Sammantaget visar dessa studier att egenskaperna för betongen i BHK i SFL endast kommer att påverkas extremt långsamt under perioden efter förslutning och förvarets förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider kan därför förväntas vara god under de perioder som omfattas av analysen av förvarets säkerhet efter förslutning.

Applicerat på 2BMA kan resultaten anses tyda på att den betong innehållande stora mängder finmald kalksten som utvecklats inom ramen för SR-PSU kommer att ha en långsammare degradering än den betong som användes vid uppförande av den befintliga SFR-anläggningen och på vilken alla nuvarande analyser är baserade.

Program

Med bakgrund i de resultat som erhållits i de studier som genomförts inom ramen för SFL Säkerhetsvärdering, avser SKB att fortsätta att utveckla sitt program för studier av interaktioner mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser. Programmet är i dagsläget inte slutligt fastlagt då samtliga resultat från pågående undersökningar ännu ej finns tillgängliga. Av möjliga utvecklingsområden som identifierats är dock följande värda att nämnas:

- Utveckling av materialens porositet som funktion av utfällnings- och upplösningsreaktioner och kopplingen till mekaniska processer.
- Vidare studier av egenskaper hos betong med olika bindemedelssammansättning.
- Utveckling av egenskaper hos material i systemen för gasavledning över tid.

10.1.2 Modellering av gastransport

Den gas som bildas genom nedbrytning av i slutförvaren förekommande material under tiden efter förslutning kan bygga upp ett inre tryck om inte ett välfungerande system för gastransport finns tillgängligt. Trycket kan påverka betongkonstruktionernas strukturella integritet. För att undvika skadliga laster på barriärerna behöver därför gas kunna transporteras ut ur avfallsdomänen.

Nuläge

SKB har tidigare med förenklade modeller för metallkorrosion och gastransport genomfört en analys av hur gasproduktion kan påverka den strukturella integriteten i betongbarriärerna i 2BMA (Eriksson et al. 2015). Enligt analysen är det korrosion av aluminium och zink i avfallet som orsakar den största påverkan på barriärerna. De beräknade gränsvärdena för hur mycket aluminium och zink som avfallet kan tillåtas innehålla ligger nära de uppskattade mängderna av dessa metaller i inventariet (SKB 2013a, 2019b).

Nyligen har SKB även genomfört en studie rörande transport av gas i ett flerfasflöde genom barriärerna i BHK där den huvudsakliga källan till gasbildning är korrosion av stål i frånvaro av syre (Silva et al. 2019a) men även den vidare transporten av gas genom berggrunden har studerats (Silva et al. 2019b). De huvudsakliga slutsatserna från dessa studier är:

- Gasbildning påverkar inte signifikant grundvattenflödena i närzonen eller betongens hydrauliska egenskaper (Silva et al. 2019a).
- Förekomsten av en deformationszon med hög genomsläpplighet utgör en preferentiell transportväg för den gas som bildats i förvaret och reducerar det maximala gastrycket i detta (Silva et al. 2019a).
- Modellens beskrivning av gasflödets fördelning i berggrunden påverkas om denna beskrivs med en homogen eller en heterogen modell (Silva et al. 2019b).
- Transportegenskaperna hos berggrunden påverkar det maximala gastrycket som kan uppstå i bergssalen (Silva et al. 2019b).

SKB har även låtit genomföra en studie av inverkan av återfyllnadsmaterial på grundvattenflöden och radionuklidtransport med utgångspunkt i utformningen av 2BMA (von Schenck et al. 2018).

I studien undersöktes utsläppet av radionuklider som funktion av egenskaperna hos återfyllnads-materialiet runt betongkassunerna men hänsyn togs ej här till inverkan av gasbildningsprocesser eller gasflöden.

Program

SKB behöver under kommande Fud-perioder vidare fördjupa förståelsen för tvåfasflöden av vätgas och vatten genom såväl berg som barriärmaterial (betong och bentonit). Inledningsvis kommer – som en fortsättning på det arbete som genomfördes av von Schenck et al. (2018) – gas- och vattenflödet i närzonen i SFR modelleras med en tvåfasflödesmodell för porösa medier. I en sådan modell påverkas även vattenflödet av gasflödet. En av de viktigaste parametrarna i en tvåfasflödesmodellering är de så kallade relativa permeabiliteterna för de två faserna. Det finns flera modeller som beskriver dessa som funktion av mättnadsgraden. SKB planerar att undersöka skillnader och likheter mellan de olika modellerna.

På längre sikt kan även modeller där de två faserna (gas och vatten) beskrivs som åtskilda behövas. I synnerhet gäller detta om berget beskrivs som ett diskret spricknätverk i stället för som ett poröst medium. Även sådana modeller behöver undersökas i termer av beroende av numeriska villkor.

Efter att förmågan att simulera och beräkna gastransportkapaciteten för såväl berg som barriärer fördjupats och förmår återspegla försöksresultat, kan metoderna användas för att bedöma hur tekniska gasutsläpps lösningar ska se ut för att kunna släppa ut den gas som bildas samtidigt som den flödesbegränsande förmågan hos barriären påverkas så lite som möjligt; se även avsnitt 10.2.3.

10.1.3 Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall

Organiskt material som bryts ned i en cementmatris kan påverka egenskaperna hos de cementbaserade materialerna. Detta kan avspeglas i en förändring av porvattnets sammansättning men även påverka betongens förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider.

Nuläge

Inom projektet Concrete and Clay vilket drivs av SKB i Äspölaboratoriet sedan 2010 (Mårtensson 2015) studeras bland annat vilka typer av nedbrytningsprodukter som bildas från olika typer av organiskt material representativa för låg- och medelaktivt avfall och hur dessa sprids i en cementmatris.

Under 2014 och 2016 återtog prover innefattande stålbehållare med grundvatten från förvaringsdjup, organiskt material representativt för låg- och medelaktivt avfall samt lite krossad cementpasta (Wold 2014, Dvinskikh et al. 2016). Analyserna visade att nedbrytningen av organiskt avfall varit mycket begränsad och endast i något fall kunde mycket låga halter av nedbrytningsprodukter gå att detektera.

Program

SKB har inlett återtag och analys av ytterligare prover från projekt Concrete and Clay omfattande organiskt material ingjutet i betongcylindrar. Fokus ligger i dessa studier på i vilken omfattning nedbrytningsprodukter från de aktuella materialerna sprids i en cementmatris. Ytterligare återtag och analyser av liknande experiment inom detta projekt planeras att genomföras under den kommande femårsperioden.

10.1.4 Påverkan från korrosion av metalliskt avfall

Då metalliskt material korroderar i närvaro av cement kan korrosionsprodukterna reagera med cementmineralerna och därigenom förändra egenskaperna hos de cementbaserade materialerna. Utöver detta kan även det mekaniska tryck som uppstår om voluminösa korrosionsprodukter ansamlas på eller kring metallytorna medföra sprickbildning i matrisen.

Nuläge

Inom projekt Concrete and Clay genomförs även studier av korrosion av metalliska material i ett cementmaterial samt hur korrosionsprodukterna interagerar med cementmatrisen.

Det återtag och de analyser som genomfördes under 2015 (Kalinowski 2015) har följts upp med en kvantitativ långtidsstudie av korrosion av aluminium och zink i cementmiljö. Den kommer att fortsätta även in i den kommande Fud-perioden innan den slutligen avrapporteras.

Studien omfattar såväl ingjutna prover som prover placerade i cementbuffrat vatten i stängda behållare. Preliminära resultat antyder en hög initial korrosionshastighet, vilken sedan kraftigt avtar i takt med att ett skikt med korrosionsprodukter byggs på runt provbiten.

Program

Inom projekt Concrete and Clay avser SKB att under Fud-perioden återta och analysera ytterligare en provkropp av betong med metalliskt material liknande det som studerats av Kalinowski (2015). Genom denna analys erhålls ytterligare information av korrosionshastigheter hos ingjutet material samt hur korrosionsprodukter sprids i cementmatrisen under långa tidsperioder vilket kan ge en ytterligare förståelse för denna process. Tidpunkten för framtida återtag och analyser är dock ännu inte slutligt fastställd.

10.1.5 Bentonitens inverkan på cementbaserade material

I den befintliga silon i SFR och den föreslagna utformningen för bergssalen för historiskt avfall, BHA, i SFL kommer kontakt mellan betong och bentonit att förekomma. När dessa material en tid efter förslutning vattenmättas kan de kemiska interaktionerna leda till förändringar av cementmaterialens sammansättning, egenskaper och struktur. Denna process kan även innefatta nedbrytningsprodukter från avfallet.

Nuläge

SKB har i ett antal tidigare arbeten studerat interaktioner mellan bentonit och cementbaserade material och deras inverkan på säkerheten efter förslutning för silon i SFR, se exempelvis Höglund (2001), Gaucher et al. (2005) och Cronstrand (2007, 2016) av vilka Gaucher et al. (2005) utgör den mest omfattande studien.

SKB har även inom projekt Concrete and Clay i Äspölaboratoriet deponerat ett stort antal prover under 2014 för studier av interaktioner mellan olika typer av bentonit och cementpasta bestående av ren portlandcement såväl som av låg-pH-pasta (Mårtensson 2015). En övervägande andel av cementproverna vilka utgjordes av små cylindriska kutsar innehöll även pulver av en av ett flertal olika metaller och metallsalter, representativa för låg- och medelaktivt avfall, men även prover utan sådana material användes.

Under 2018 återtogs och analyserades ett av totalt fem av dessa paket (figur 10-1). Studierna kunde inte påvisa någon frigörelse av de spårämnen som gjutits in i de små cementkutsarna och därmed spridning i bentoniten annat än för grundämnet cesium där en cirka 10 mm bred gradient kunde noteras i bentoniten (Kalinowski 2018).

För cementkutsar bestående av vanlig cement kunde ett lägre kalcium-kisel-förhållande noteras i gränssytan mot bentoniten samtidigt som något förhöjda halter av kalcium och magnesium noterades i bentoniten på ett avstånd av upp till 10 mm från gränssytan. För prover där kutsen bestod av låg-pH-cement var den påverkade zonen mindre och nivåerna lägre.

Sedan 2015 har SKB deltagit i det internationella forskningsprojektet Cebama (www.cebama.eu) inom vilket interaktioner mellan olika typer av cementbaserade material och angränsande material såsom leror eller berggrundsmaterial av olika slag studerats. Projektet inom vilket ett 20-tal olika forskningsinstitut och ett tiotal olika avfallsorganisationer varit aktiva befinner sig i slutfasen och sammanställning av de olika forskningsinsatserna och slutrapportering pågår.



Figur 10-1. Återtag av ett paket med 30 bentonitblock (vänster bild). Varje block innehåller även fyra mindre materialprover varför blocken delas i fyra delar och vakuumpförpackas inför analys (höger bild).

Program

SKB planerar fortsatta återtag av prover inom projekt Concrete and Clay för vidare studier av interaktioner mellan cement och bentonit i närvaro av metaller och metallsalter representativa för låg- och medelaktivt avfall. Fokus vid analyserna kommer att ligga på studier av jontransport och mineralomvandlingar i gränssytorna mellan cement och bentonit samt spridning av nedbrytningsprodukter från de material som blandats in i de små cementkutsarna i bentoniten. Nästa återtag kan bli aktuellt först omkring 2021 och kommer troligen då att omfatta två stycken experimentpaket. De två sista paketen kommer sedan att återtas och analyseras så sent som möjligt men den exakta tidpunkten är ännu inte fastställd.

10.1.6 Inverkan av tillsatsmaterial

Vid tillverkning av cementbaserade material kan förutom cement, vatten och ballast även olika typer av tillsatsmaterial användas. Dessa material – exempelvis silika, finmald kalksten eller flygaska – kan tillsättas antingen vid cementtillverkningen eller vid tillredningen av det cementbaserade materialet. Syftet med dessa tillsatser kan vara att minska materialets miljöpåverkan såväl som att styra egenskaperna hos färskt och härdat material, men även ekonomiska orsaker kan finnas. Oberoende av orsak för användning av tillsatsmaterial, så kommer dessa inte bara att påverka sammansättning av och egenskaper hos det färskta och härdade materialet, utan kan även påverka hur dess egenskaper förändras efter förslutning.

Nuläge

SKB har under åren låtit genomföra ett antal studier av den långsiktiga kemiska omvandlingen av betong i förvar för låg- och medelaktivt avfall, se exempelvis Lagerblad och Trägårdh (1994) och Höglund (2001, 2014). Dessa studier har baserats på en cementsammansättning motsvarande anläggningscement från Degerhamn. Det är en ren så kallad portlandcement utan tillsatsmaterial motsvarande cementtyp CEM I, vilken använts vid uppförande av betongkonstruktionerna i de befintliga förvarsdelarna i SFR.

Inom det program som syftar till att utveckla en betong till kassunerna i 2BMA har en betong innehållande relativt stora mängder finmald kalksten utvecklats (se avsnitt 10.2.1). Då denna tillsats kan förväntas påverka den långsiktiga kemiska och fysikaliska utvecklingen av materialet har ett flertal olika utredningar påbörjats och genomförts under Fud-perioden. Dessa utredningar har omfattat modellering av den förväntade kemiska och hydrauliska utvecklingen av denna betong men även av betong med andra tillsatsmedel (Idiart et al. 2019b). Utöver detta pågår en experimentell studie av egenskaperna hos betongen till 2BMA i syfte att skapa en grund för ett välbeskrivet initialtillstånd för betongkonstruktioner tillverkade med denna typ av betong.

Idiart et al. (2019b) visade att den långsiktiga kemiska lakningen av betong är tydligt beroende av betongens initiala porositet och transportegenskaper. Av de olika typer av betong som undersöktes i denna studie uppvisade den betong som utvecklats för 2BMA de bästa egenskaperna, något som förklarades av dess mycket låga initiala porositet snarare än av dess kemiska sammansättning.

Preliminära resultat från den experimentella studien visar även att egenskaperna hos betongen till 2BMA väl motsvarar de som antagits vid analysen av förvarets säkerhet efter förslutning.

Program

Under Fud-perioden planerar SKB att avsluta de inledda modelleringsstudierna för att utvärdera egenskaper efter förslutning hos cementbaserade material med förändrad bindemedelssammansättning. Dessa studier kommer att ge en bättre förståelse för hur användning av framtida material kan påverka förvarens säkerhet efter förslutning. SKB avser även att avsluta och avrapportera den experimentella studien av egenskaperna hos betongen till 2BMA.

10.1.7 Frysning

När porvattnet i ett cementbaserat material fryser kommer detta att expandera och materialet utsätts för ett inre tryck. Om materialet är tillräckligt vattenmättat och en tillräckligt stor andel av porvattnet fryser kan det inre trycket bli så stort att sprickor uppkommer i materialet alternativt att detta helt bryts sönder. Vid vilken temperatur detta sker är huvudsakligen beroende av materialets porstruktur samt av vattenmättnadsgraden.

Nuläge

Under åren 2007–2013 lät SKB genomföra ett antal studier rörande frysning av porvattnet i betong och dess inverkan på betongens egenskaper vid de temperaturer som kan förväntas råda i samband med att en permafrost når förvarsdjup i SFR (Emborg et al. 2007, Thorsell 2013, Tang och Bager 2013, Pålbrink och Rydman 2013).

I Emborg et al. (2007) och Thorsell (2013) visas att en tillräckligt stor andel av porvattnet har frusit vid en temperatur mellan -3 och -5 °C för att betongen ska få allvarliga skador. Dessa resultat kunde dock inte bekräftas av Tang och Bager (2013) eller av Pålbrink och Rydman (2013). Dessa studier visade i stället att betong som fryser i en volym som inte tillåter volymexpansion motsvarande en miljö som kan förväntas råda i samband med en permafrost, inte kommer att frysa sönder på det sätt som beskrivits av Emborg et al. (2007) och Thorsell (2013).

Gemensamt för de ovan refererade studierna är att de genomförts på väldigt ung betong vilken inte utsatts för den mineral- och strukturomvandling som kan förväntas under de långa tidsrymder som är aktuellt i slutförvarssammanhang. Ett mer troligt scenario är att betongen genom dessa processer har en annan porstruktur vid den första frysningen än vad som uppvisas av den färska betongen. Detta innebär att betongens frysningsegenskaper, vid tiden för den första permafrosten, troligen inte kommer att motsvaras av de egenskaper som de undersökta materialen uppvisar i de studier som refereras ovan.

SKB har därför låtit genomföra två studier av frysningsegenskaperna hos betong som lakats till med den av Babaahmadi (2015) utvecklade metoden och därmed erhållit en porstruktur motsvarande den för åldrad betong (Karlsson 2017, Fridh 2017).

Karlsson (2017) visade att porositeten ökade med nästan 25 procent i lakad betong jämfört med det icke lakade materialet. Detta resulterade i en med ultraljud tydligt mätbar förändring av materialets struktur vilken ytterligare påverkades av den efterföljande frysningen. Trots denna ökning bibehöll provkropparna sin form efter frysning till -10 °C och någon strukturell kollaps kunde inte observeras.

Fridh (2017) genomförde en mer uttömmande studie i vilken inga bevis för att lakad betong helt kommer att falla sönder när det utsätts för temperaturer ner till -3 °C.

SKB har även genomfört en komplettering där effekterna på SFR till följd av frysning av betong har utretts; se Näslund et al. (2017) och referenser däri. Studien som beskrivs i kompletteringen (Brandefelt et al. 2013) visar att de kommande 50 000 åren kommer att domineras av ett varmt klimat. Det kan dock inte uteslutas att temperaturen i förvaret kan bli så låg som -3 °C vid en potentiell kall period runt cirka 54 000 år.

Program

SKB har i dagsläget inget program för studier av frysningsegenskaper hos betong. Detta motiveras av att de genomförda studierna visat att även kraftigt lakad betong kommer att bibehålla sin integritet vid de temperaturer som kan förväntas uppkomma i SFR i samband med en permafrost samt att dosberäkningar visat att även den tidigaste permafrosten inte kommer att påverka tidpunkt för maximal dos eller nivån på denna dos. För SFL medför det större förvarsdjupet att sannolikheten för att en permafrost ska påverka betongbarriärernas egenskaper blir betydligt lägre än för SFR. SKB bevakar området och utesluter inte framtida insatser om sådana behov identifieras.

10.1.8 Inre och yttre laster

Betongkonstruktionerna kommer vid uppförande, under drift samt i samband med förslutning och återfyllnad att utsättas för laster vilka skulle kunna leda till uppkomst av sprickor. Utöver detta kan betongkonstruktionerna även utsättas för både inre och yttre laster under perioden efter förslutning orsakade av exempelvis gasproduktion och svällande avfall, alternativt bergutfall och last från återfyllnadsmaterialet vilka även dessa skulle kunna leda till sprickbildning.

Nuläge

SKB har tidigare studerat betongstrukturens hållfasthet i förvaret. Silons ytterväggar har visat sig vara tåliga för såväl inre som yttre laster (von Schenck och Bultmark 2014).

Nyligen genomförda studier (Idiart et al. 2019a) inom säkerhetsvärderingen för SFL har även visat att mekaniska laster endast förväntas orsaka mycket begränsade skador i anslutning till gränsytan mellan berg och återfyllnaden i BHK. Enda undantaget är glaciationslaster vilka skulle kunna orsaka skador i en större del av återfyllnaden.

Under Fud-perioden har SKB tagit beslutet att genomföra en justering av referensutformningen för 2BMA som innebär en ökning av tjockleken på kassurnas ytterväggar och bottenplatta samt införande av innerväggar. Genom denna justering erhålls en struktur som kan hantera de yttre lasterna utan att avfallet behöver kringgjutas. Genom denna lösning skapas även utrymme för svällning av avfallet utan att betongkonstruktionen påverkas. För att hantera gastrycket har SKB studerat olika utformningar av system för gastransport, se även avsnitt 10.2.3.

Även för 1BMA har SKB tagit beslut att genomföra vissa justeringar i referensutformningen. Dessa innebär att betongkonstruktionens yttre väggar och lock ska förstärkas genom en utanpåliggande betongkonstruktion. Med bakgrund i de förstärkningar som planeras av betongkonstruktionen i 1BMA kvarstår inte längre behovet av kringgjutning av avfallet för att hantera de externa laster som kommer att påverka betongkonstruktionen vid återfyllnad och återmättad (Elfwing 2017). Av denna anledning planerar SKB i nuläget inte längre att genomföra kringgjutning av avfallet i 1BMA men möjligheten kvarstår om behovet åter anses påkallat.

Program

SKB följer upp tidigare beräkningar och undersökningar av betongkonstruktionerna i befintligt SFR med en studie över bottenplattorna i förvarsdelarna. I några fall kan bottenplattorna lokalt belastats med laster som överstiger de angivna dimensionerande nyttolasterna på konstruktionsritningarna. SKB kommer att utreda vilken påverkan detta kan ha medfört och om en eventuell sprickbildning i någon bottenplatta medför att det initialtillstånd säkerhetsanalysen förutsätter, inte längre innehålls. De dimensionerande lastfallen ensidigt vattentryck, inre svälltryck och gastryck kan också komma att behöva uppdateras.

10.2 Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR

I detta avsnitt redovisas SKB:s program för utformning av betongkonstruktioner, materialutveckling och produktionsmetod för SFR.

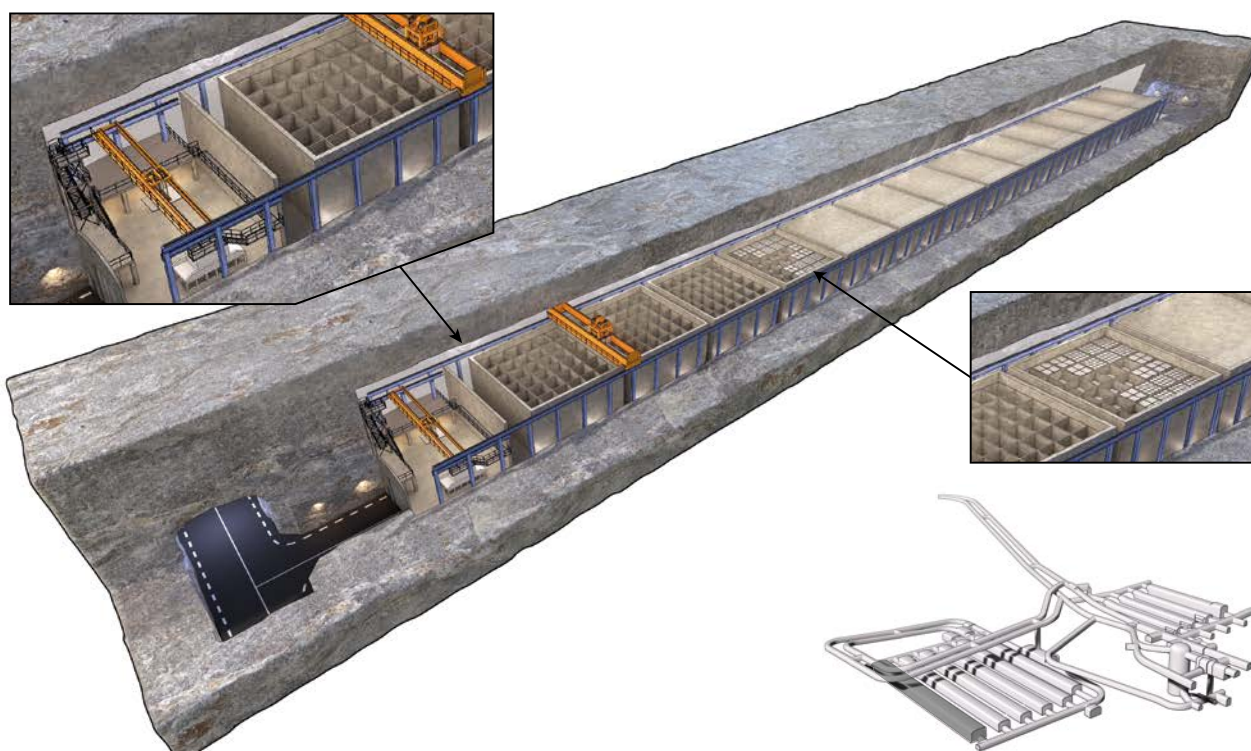
10.2.1 Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA

Bergssalen för medelaktivt avfall, 2BMA, kommer att utgöras av en drygt 250 meter lång bergssal i vilken ett antal fristående kassuner uppförs i oarmerad betong (figur 10-2). Under Fud-perioden har SKB tagit beslutet att genomföra en justering av referensutformningen för 2BMA innebärande en ökning av tjockleken på kassunernas ytterväggar och bottenplatta samt införande av innerväggar. Detta innebär att avfallet kommer att deponeras i schakt motsvarande de som i dag finns i silon.

Genom införande av innerväggar samt ökning av tjockleken på kassunernas ytterväggar, lock och bottenplatta erhålls en struktur som kan hantera samtliga laster under förvarets alla skeden. Detta innebär att kringgjutning av avfallet inte längre kommer att vara nödvändigt för att erhålla en strukturell stabilitet över tid. Kringgjutning av avfallet i 2BMA planeras av denna anledning inte längre att genomföras. Genom denna lösning skapas även utrymme för svällning av avfallet utan att betongkonstruktionen påverkas. För att hantera gstrycket har SKB studerat olika utformningar av gasavledningssystem, se även avsnitt 10.2.3.

Nuläge

SKB har sedan början av 2015 bedrivit ett program för utveckling av material och teknik för uppförande av kassunerna i 2BMA. Detta arbete tog avstamp i kravbild, referensutformning och metod för uppförande som var gällande vid tidpunkten för formulering av programmet (SKB 2015b). Utgångspunkten vid utformningen av betongreceptet var att använda ballastmaterial som till så stor del som möjligt framställts av utsprängda bergmassor från utbyggnaden av SFR, samt att ett minimum av kemiska tillsatsmedel ska användas.



Figur 10-2. 2BMA – bergssal för medelaktivt avfall i utbyggd del av SFR.

Arbetet som har bedrivits i en stegvis process innefattar följande områden:

- Studier av det entreprenadberg som kommer att uppkomma vid utsprängningen av de nya bergs-salarna för användning som ballast i betong och identifiering av lämpliga täkter att använda under utvecklingsarbetet (Lagerblad et al. 2016).
- Utveckling av betong på betonglaboratorium och uppskalning till produktionsanläggning för betong (Lagerblad et al. 2017).
- Gjutning av större betongstrukturer med formen av hörnsektioner vars utformning och dimensioner motsvarar de för kassunerna i 2BMA tänkta. Arbetet genomförs i en representativ bergrumsmiljö i Äspölaboratoriet (Mårtensson och Vogt 2019).
- Gjutning av en kassun i fjärdedelsskala enligt justerad referensutformning (Elfving et al. 2017) i en representativ miljö i Äspölaboratoriet med tillverkning av betong vid en mobil betongstation som placerats i anslutning till tunnelpåslaget. Arbetet genomfördes under slutet av 2018. I nuläget pågår uppföljning och analys av konstruktionens långtidsegenskaper. Slutrapportering förväntas ske under 2020.

Vid de genomförda studierna har en betong utvecklats vilken uppfyller samtliga egenskapskrav på både den färska och den härdade betongen. Betongen utnyttjar till 100 procent ballast som tillverkats av krossat berg liknande det som kan förväntas uppkomma vid utsprängningen av utbyggnaden av SFR. Utöver detta används en låg cementhalt vilket begränsar värmeavgivningen vid hydrataionen i kombination med en relativt låg halt superplasticerare och retarderande medel. För att den färska betongen ska få en tillräckligt god arbetbarhet tillsätts även kommersiella mycket finmalda kalkstens-filler för att erhålla en tillräckligt hög volym pasta. För en utförligare beskrivning av utvecklings-arbetet, se Lagerblad et al. (2017).

Materialutvecklingen följdes av gjutning av två större komponenter motsvarande hörnsektioner av kassuner enligt den då gällande referensutformningen i Äspölaboratoriet (figur 10-3). Vid detta arbete uppfördes en sektion enligt referensmetoden vilket innebar att en bottenplatta och en L-formad vägg uppfördes i en sammanhängande gjutning. En tid senare uppfördes en andra sektion som omfattade en L-formad vägg vilken uppfördes på den befintliga bottenlattan. Fogen mellan dessa tätades med ett fogband av kopparplåt. Figur 10-3 visar strukturen efter gjutning av sektion 1 (till vänster) samt efter gjutning även av sektion 2 (till höger).



Figur 10-3. Kassunsektion 1 omfattande bottenplatta och L-formad vägg (till vänster) samt kassunsektion 2 omfattande L-formad vägg vilken uppförts på bottenplattan till sektion 1.

Den första gjutningen där bottenplatta och väggar uppfördes i en sammanhängande gjutning visade på oförutsedda tekniska svårigheter att uppföra kassunerna enligt den då gällande referensutförningen. Dock kunde materialstudier genomförda efter den andra gjutningen visa att de hydrauliska egenskaperna hos fogen mellan bottenplatta och vägg motsvarade de hos betong utan fog. Detta indikerar alltså att uppförande av bottenplatta och väggar vid två separata tillfällen i enlighet med konventionell teknik skulle kunna vara en möjlig lösning, vilket skulle förenkla gjutningsförloppet betydligt. För en utförligare beskrivning av detta arbete; se Mårtensson och Vogt (2019).

Det sista steget i programmet för utveckling av material och teknik för uppförande av kassunerna till 2BMA omfattade gjutning av en fjärdedels sektion av en oarmerad kassun i enlighet med den senaste referensutförningen (Elfving et al. 2017) och genomfördes i Åspölaboratoriet under hösten 2018. Detta arbete utgjorde utöver gjutning och studier av egenskaper hos en betongkonstruktion även undersökning av inverkan av att tillverka betongen vid en mobil betongstation i direkt anslutning till tunnelpåslaget. Frågor som studerades var inverkan av behov av tillsatsmedel samt transport- och produktionsaspekter.

Arbetet omfattade gjutning av en kassun i fjärdedelsskala jämfört med de planerade kassunerna i 2BMA (Elfving et al. 2017) med de yttre dimensionerna $8,1 \times 19,3 \times 4,5$ meter ($l \times b \times h$) där bottenplatta och väggar har tjockleken 600 mm respektive 680 mm. Kassunens grundläggning utgjordes av en oarmerad betongplatta vilken gjutits direkt mot rensat berg för att erhålla ett mycket stabilt underlag där sättning ej kan ske. Innan gjutning av bottenplatta täcktes grundläggningen med en armerad plast för att begränsa vidhäftningen och därmed tillåta fria temperaturrörelser av kassunens bottenplatta.

Väggarna uppfördes fyra veckor efter bottenplattan. Innan gjutning av väggarna värmdes bottenplattan försiktigt med värmemattor för att skapa en begränsad expansion av denna. Genom kontrollerad avsvälning av bottenplattan efter genomförd gjutning av väggarna kunde effekten av väggarnas temperaturkrympning begränsas, uppkomst av spänningar i fogen förebyggas och risken för sprickbildning därmed minimeras.

Arbetet genomfördes under hösten 2018 och gjutningarna omfattade totalt cirka 250 m^3 betong varav 100 m^3 till bottenplattan och 150 m^3 till väggarna. Figur 10-4 visar den färdiga kassunens ut- och insida.

Uppföljning av konstruktionens egenskaper påbörjades direkt efter genomförd gjutning och studier av materialegenskaper har genomförts på prover vilka tillverkades i samband med gjutningen. Uppföljning förväntas pågå under stora delar av 2019 och projektet kommer därför att avrapporteras under 2020.



Figur 10-4. Gjuten kassun, ut- och insida.

Program

SKB:s program för vidare arbete med utvecklingen av kassunerna och produktionsmetoden för 2BMA omfattar under de kommande åren följande aktiviteter:

- Vidareutveckling av utformning samt teknik för uppförande.
- Analys, beräkningar och dimensionering av konstruktionsdetaljer (såsom gjutfog och påverkan av yttre last).
- Vidareutveckling av produktionsmetod för uppförande.
- Verifierande tester av konstruktions- och produktionsteknik.
- Framtagning av drift- och underhållsprogram.

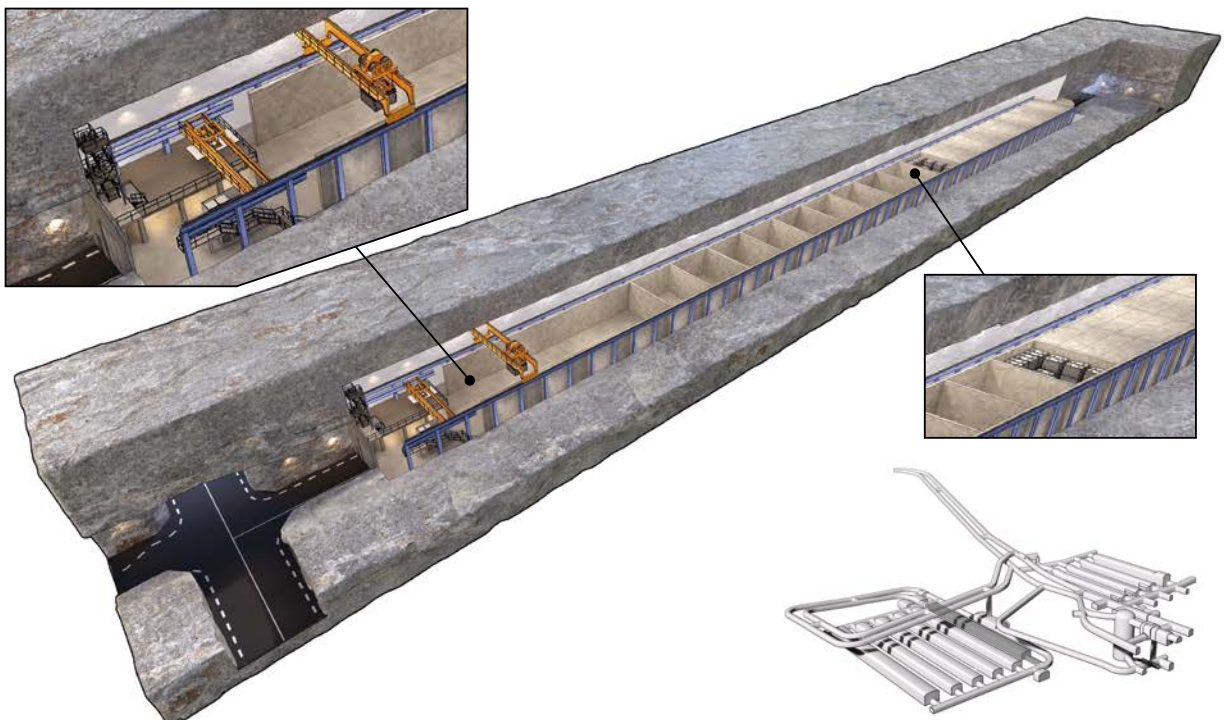
10.2.2 Bergssal för reaktortankar, BRT

Bergssalen för reaktortankar, BRT, kommer att utgöras av en drygt 250 meter lång bergssal i vilken en fackindelat betongkonstruktion kommer att uppföras i armerad betong (figur 10-5).

Avfallsbehållarna placeras i facken och i samband med förslutning kringgjuts dessa med betong med hög hållfasthet. På så sätt bildas ett nätverk av lastbärande väggar vilka kan ta upp de externa lasterna.

Nuläge

Under Fud-perioden har SKB tagit beslutet att genomföra en justering av referensutformningen för BRT för att anpassa denna till beslutet att reaktortankarna ska segmenteras varefter segmenten packas i behållare innan slutförvaring.



Figur 10-5. BRT – bergssal för reaktortankar i utbyggd del av SFR.

Detta innebär att det program som var relaterat till deponering av hela reaktortankar och vilket presenterades i det föregående Fud-programmet inte har genomförts. I stället pågår nu ett arbete fokuserat på den detaljerade utformningen av betongkonstruktionen för att anpassa denna till de olika typer av avfallskollin som reaktorägarna avser att deponera i BRT.

Program

SKB avser att fortsätta den detaljerade utvecklingen av utformningen av betongkonstruktionen till BRT.

Resultaten från det program för utveckling av material och teknik för uppförande som genomförs för kassurnerna till 2BMA anses tillämpliga även för BRT varför något unikt program för BRT inom detta område ej planeras.

10.2.3 System för gastransport

Under de långa tidsperioderna som omfattas av en säkerhetsanalys kommer avfall, avfallsbehållare och eventuell armering att brytas ner med förväntad gasbildning som följd. För att underlätta för gasen att transporteras ut ur de olika förvarsdelarna behövs ett system för gastransport, även om en viss transport kan ske genom betongens porsystem.

Nuläge

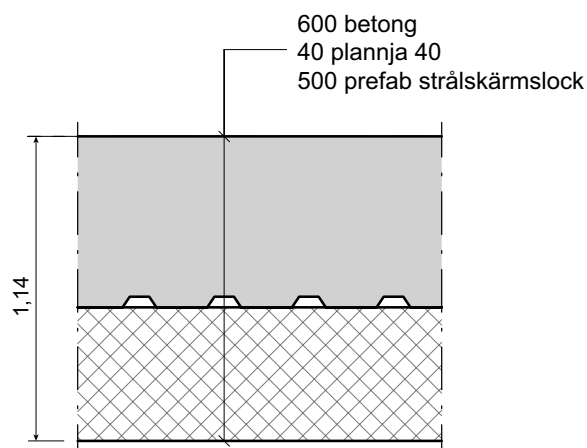
Enligt gällande förslutningsplan för silon kommer hela silokonstruktionen vid förslutning att övergjutas med ett lager betong vilket kommer att förses med ett antal genomföringar fyllda med ett poröst material (Luterkort et al. 2014).

I samband med utformning och uppförande av silon lät SKB genomföra ett antal analyser av gasbildning och gastransport i silon, samt av den långsiktiga funktionen hos genomföringarna med gasgenomsläppligt material (Moreno et al. 2001, Höglund och Bengtsson 1991) där Höglund och Bengtsson (1991) visar att systemets funktion kan upprätthållas under de första 5 000 åren efter förslutning.

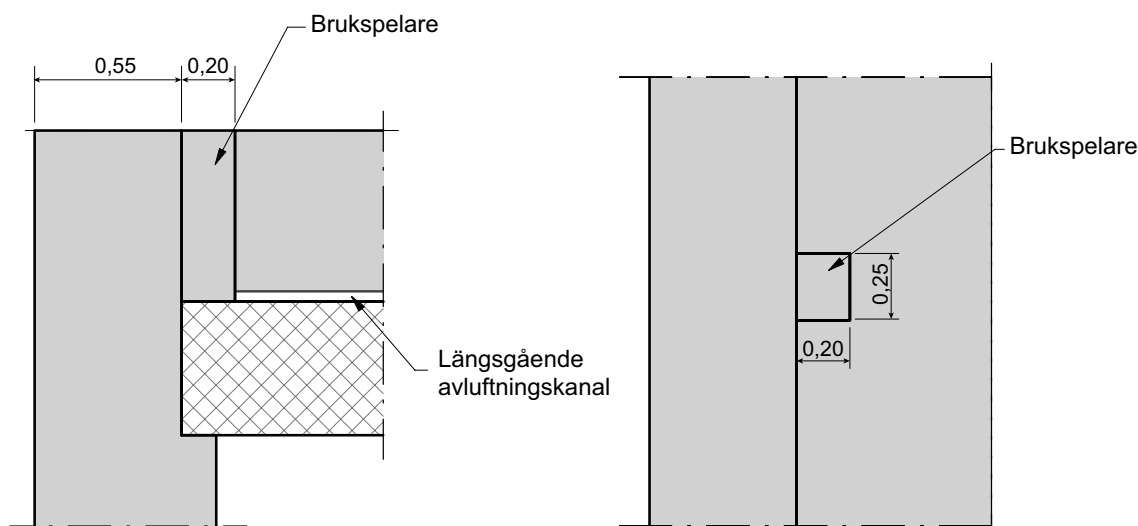
Som en del av den vidareutveckling av barriärerna som SKB genomfört för 2BMA har ett system för gasavledning utvecklats (Elfving et al. 2017).

Gasavlastningsutformningen består av

1. horisontella (tomma) gasavlastningskanaler som löper i gränsytan mellan strålskärmslocken och den tätare pågjutningen (figur 10-6)
2. vertikala gasavlastningskanaler fyllda med poröst cementbruk som placeras längs med en yttervägg (och som genomskär det pågjutna locket; se figur 10-7).



Figur 10-6. Horisontella gasavlastningskanaler som löper i gränsytan mellan strålskärmslocken och pågjutningen. Dessa kanaler lämnas tomma. Mått i meter.



Figur 10-7. Vertikal gasavlastningskanal fylld med poröst cementbruk; genomskärning till vänster och sett från ovan till höger. Ytterväggen ses till vänster i båda figurerna och det pågjutna locket till höger. I genomskärningen (till vänster) ses även strålskärmslock (rutat). Mått i meter.

Gasavlastningsutformningen är utformad så att betongkonstruktionens strukturella integritet inte påverkas.

För 1BMA pågår utredningar kring behov och utformning av ett eventuellt gasavledningssystem.

Program

SKB avser att fortsätta utredningarna kring utformning av gasavledningssystemet för 2BMA samt dess långsiktiga egenskaper liksom analysen av behov och utformning av ett motsvarande system för 1BMA. I det fallet att ett behov anses föreligga kommer utformningsarbetet att ta avstamp i det för 2BMA pågående arbetet.

10.3 Utformning av betongkonstruktioner och material till SFL

10.3.1 Betongkonstruktioner

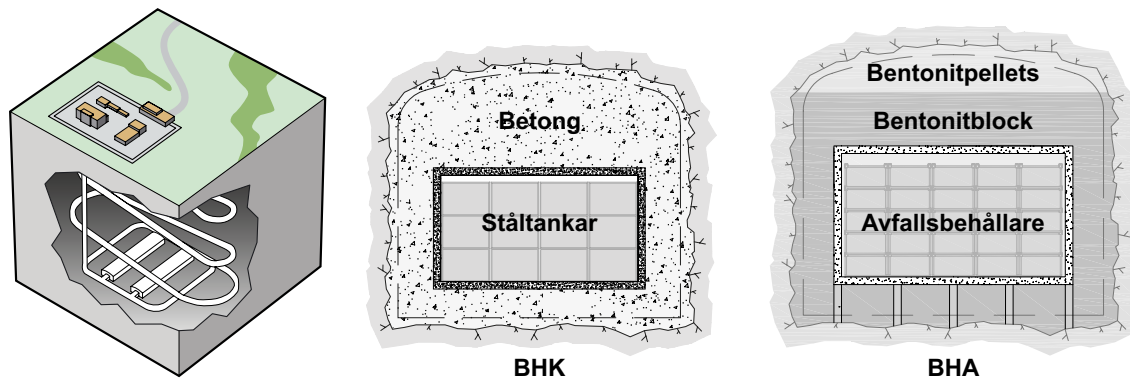
I de föreslagna utformningarna av Bergssalen för hårdkomponenter, BHK, och Bergssalen för historiskt avfall, BHA, placeras avfallet i betongkonstruktioner vilka utgör strålskydd under driftperioden samt säkerställer utrymningsvägar (figur 10-8). I både BHA och BHK utgörs den primära barriären av det återfyllnadsmaterial som installeras runt betongkonstruktionen i samband med förslutning; betong för BHK (avsnitt 10.3.3) och bentonit för BHA (avsnitt 11.4.3).

Nuläge

SKB bedriver i dagsläget inte något utvecklingsarbete av betong till betongkonstruktionerna i BHK och BHA. Bedömningen är att den betong som utvecklats till kassunerna till 2BMA ska kunna utnyttjas även i dessa. Hittills uppnådda resultat inom detta arbete styrker denna bedömning (avsnitt 10.2.1).

Program

SKB ser inte något behov av att under Fud-perioden genomföra något experimentellt utvecklingsarbete av en betong till förvarskonstruktionerna i BHA och BHK. SKB ser inte heller något behov av utveckling av teknik för uppförande av förvarskonstruktionen i BHK då denna bedöms kunna dimensioneras och uppföras med konventionella metoder.



Figur 10-8. Föreslagen utformning av SFL.

Däremot har SKB identifierat ett behov att inleda ett arbete kopplat till utformning, dimensionering och teknik för uppförande av förvarskonstruktionen i BHA. Arbetet måste ta sitt avstamp i den i figur 10-8 illustrerade utformningen innebärande att förvarskonstruktionen uppförs på en broliknande konstruktion vilken på alla sidor ska vara omgiven av bentonit. Följande övergripande frågor där ett riktat utvecklingsarbete behövs har identifierats:

- Material och metod för uppförande av pelare samt dimensionering av dessa.
- Dimensionering och teknik för uppförande av den bärande konstruktionen.
- Teknik för uppförande av förvarskonstruktionen på den bärande konstruktionen.

Utöver detta tillkommer frågor kopplade till krav på bergssulan och krav på fri arbetshöjd under den bärande konstruktionen vilka är relaterade till installation av bentoniten.

10.3.2 Kringgjutning av avfallsbehållare

I samband med förslutning av de båda bergssalarna i SFL kommer avfallet enligt gällande planer att kringgjutas med ett cementbaserat bruk. Syftet med denna kringgjutning är att stabilisera avfallet och skapa ett stöd för betongkonstruktionen i samband med återfyllnad och återmättnad av förvaret.

Nuläge

SKB har under 2012–2015 genomfört ett antal studier och utvecklingsarbeten av kringgjutningsbruk till 1BMA och 2BMA (Lagerlund et al. 2014, Lagerlund 2014, 2015a, b) vilka kommer att tjäna som underlag vid utveckling av ett kringgjutningsbruk för BHK och BHA.

Program

Givet den mycket långa tidsperioden fram till förslutning av SFL bedömer SKB att det inte föreligger något behov att inleda ett utvecklingsarbete för ett kringgjutningsbruk till SFL inom Fud-perioden.

10.3.3 Grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av BHK med betong

I den föreslagna utformningen av BHK baseras förvarsdelen säkerhet efter förslutning på att avfallet på alla sidor omges av ett tjockt lager av betong (figur 10-8). För att säkerställa säkerheten efter förslutning under hela den tidsperiod som omfattas av förvarets säkerhetsanalys måste material och metod för installation av material väljas med omsorg. Detta omfattar både grundläggningen av betongkonstruktionen och återfyllnad av bergssalen med betong i samband med förslutning.

Nuläge

SKB har under Fud-perioden bedrivit en intern utredning rörande val av material och metod för grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av BHK med betong. Ett antal olika metoder har här ställts mot varandra och aspekter kopplade till miljö, säkerhet efter förslutning och teknisk genomförbarhet har analyserats och utvärderats (Mårtensson 2017a, b).

Program

SKB har i dagsläget inga planer på att genomföra ett separat experimentellt utvecklingsprogram kopplat till grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av BHK med betong inom Fud-perioden. Detta motiveras av de långa tidsperioder som återstår tills uppförande och förslutning av SFL samt behov att prioritera utvecklingsinsatser kopplade till SFR.

Arbetet kopplat till grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av bergssal med betong kommer under Fud-perioden i stället att fokusera på att sammanställa pågående utredningar och modelleringsstudier (avsnitt 10.1.1 och 10.1.6) till ett väl sammanhållet underlag inför utformningen av det experimentella utvecklingsprogrammet.

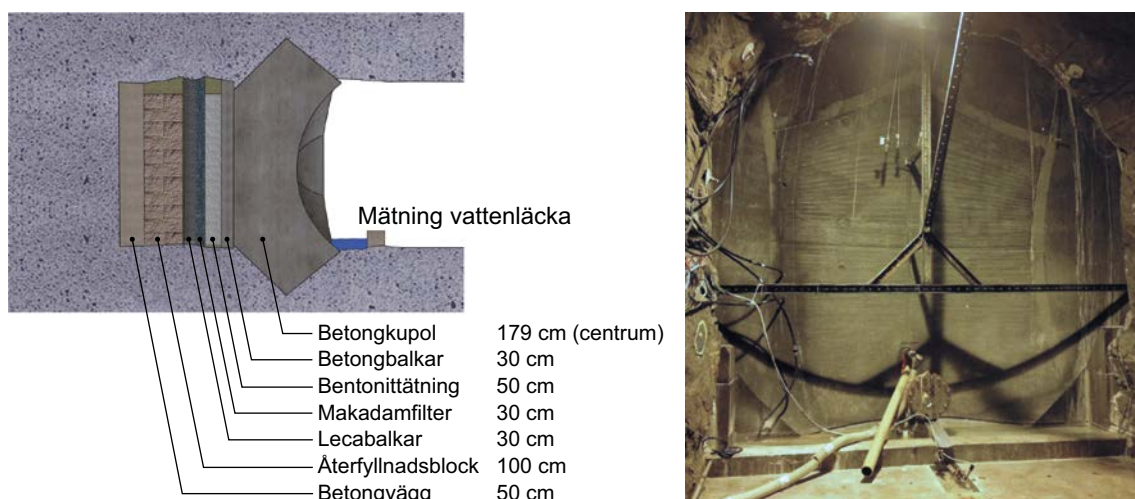
10.4 Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret

10.4.1 Plugg till deponeringstunnlar

Nuläge

Pluggarnas huvudsyfte är att under drifttiden, det vill säga tiden från det att tunnlar försluts och fram till förslutning av angränsande stamtunnel, hålla deponeringstunnlarnas återfyllning på plats och att minimera läckage ut ur tunnlar. Utvecklingen och veriferingen av pluggar för förslutning av deponeringstunnlar i Kärnbränsleförvaret har genomförts med analytiska och numeriska beräkningar, laboratorieexperiment, skalförsök samt genom ett fullskaleförsök av pluggsystemet (Domplu-experimentet) på 450 meters djup i Äspölaboratoriet (Graham et al. 2015). En schematisk bild av testet och ett foto på den installerade pluggen visas i figur 10-9.

Fullskaleförsöket har visat att det är möjligt att uppföra pluggsystemet på ett ändamålsenligt sätt med en oarmerad betongkupa av låg-pH-betongreceptet B200 som uppfyller funktionskraven.



Figur 10-9. Schematisk sektion samt foto av den installerade Domplu-pluggen.

Fullskaleförsöket driftsattes 2014 och pluggen trycksattes då med vatten till 4 MPa för att simulera ett grundvattentryck vid förvarsdjup. Försöket har övervakats med olika instrument sedan installation. Sommaren 2017 avslutades försökets driftfas men en testperiod där ett gastätetstest samt ett trycksättningstest var av särskild betydelse. Efter avslutad testperiod revs Domplu för slututvärdering (Enzell och Malm 2019).

Gastestet genomfördes för att verifiera om pluggkonstruktionen kan uppfylla kravet på att stoppa konvektion av luft under drifttiden. Det genomförda gastestet visar att Domplu är gastät (Åkesson 2018).

Trycksättningstestet genomfördes för att verifiera att betongkonstruktionen klarar designtrycket 9 MPa. Både genomförda analyser och trycksättningstest visar att betongkupolen är väl dimensionerad för denna last.

Borrprover som togs i samband med rivning visar att betongkonstruktionen är homogen och att den har haft god anliggning mot berget.

I slutet av september 2014 var det uppmätta läckaget förbi pluggen 44 ml/min (motsvarande 2,6 L/h). Läckaget har sedan installation gradvis minskat och vid tidpunkten för rivning var det uppmätta läckaget cirka 25 ml/min (motsvarande 1,5 L/h). Minskningen beror på att Domplu-pluggens bentonittätning haft kontinuerlig tillgång till vatten vilket har gjort att den kunnat vattenmättas och bygga upp ett svälltryck och därmed täta mellan pluggen och berget.

Program

Under Fud-perioden avser SKB att slutföra utvärderingen från uppförande och rivning av Domplu-pluggen och sammanställa dessa analyser till ett underlag inför fortsatta studier av låg-pH-cementmaterial för injektering och bergförstärkning

Nuläge

Dagens konstruktionsförutsättningar och krav på Kärnbränsleförvaret förutsätter användning av låg-pH-cementmaterial vid injektering och bergförstärkning från -200 meter med utgångspunkt från den studie som utförts av effekten av användningen av konventionell cement (OPC) i de översta 200 meter i Kärnbränsleförvaret (Sidborn et al. 2014). SKB har sedan tidigare låtit utveckla ett låg-pH-cementmaterial för injektering (Bodén och Sievänen 2005) och bergförstärkning (Bodén och Pettersson 2011).

Uppförande, drift och förslutning av Kärnbränsleförvaret omfattar långa tidsperioder vilket medför att tillgängligheten på komponenter i det nuvarande receptet kan komma att förändras betydligt och vissa produkter helt utgå över tid. Av denna anledning är det av vikt att receptet är utformat på ett sådant sätt att materialens egenskaper inte blir helt beroende av en specifik produkt och att ingående komponenter kan ersättas med produkter med likartade egenskaper.

SKB har även genomfört långtidsstudier av korrosion av ståldetaljer ingjutna i standardbetong samt i betong av låg-pH-typ. Studierna har pågått under totalt nio år och återtag och analys har genomförts efter fem år (Aghili et al. 2014) och nio år (Sederholm et al. 2018).

Studierna visade på försumbar korrosion både i standardbruk och i låg-pH-bruk så länge som klorider inte trängt in till de ingjutna stålproverna. Det framgick även av studierna att låg-pH-brukets högre täthet medförde att tiden fram till dess att korrosion påbörjades var längre än för det något mindre täta standardbruket. Detta förklaras av den lägre diffusionshastigheten för klorid i låg-pH-bruket jämfört med i standardbruket. Dock, när väl klorider hade nått fram till de ingjutna stålproverna var korrosionshastigheten i låg-pH-bruket betydligt högre än i standardbruket och kraftiga angrepp kunde observeras.

För injekterade bergbultar kunde inga korrosionsangrepp identifieras efter nio års exponering (Sederholm et al. 2018). Studien visade även att ingen urlakning skett i något av bultbruket samt att vidhäftningen mellan bruk och bergbult var god.

Program

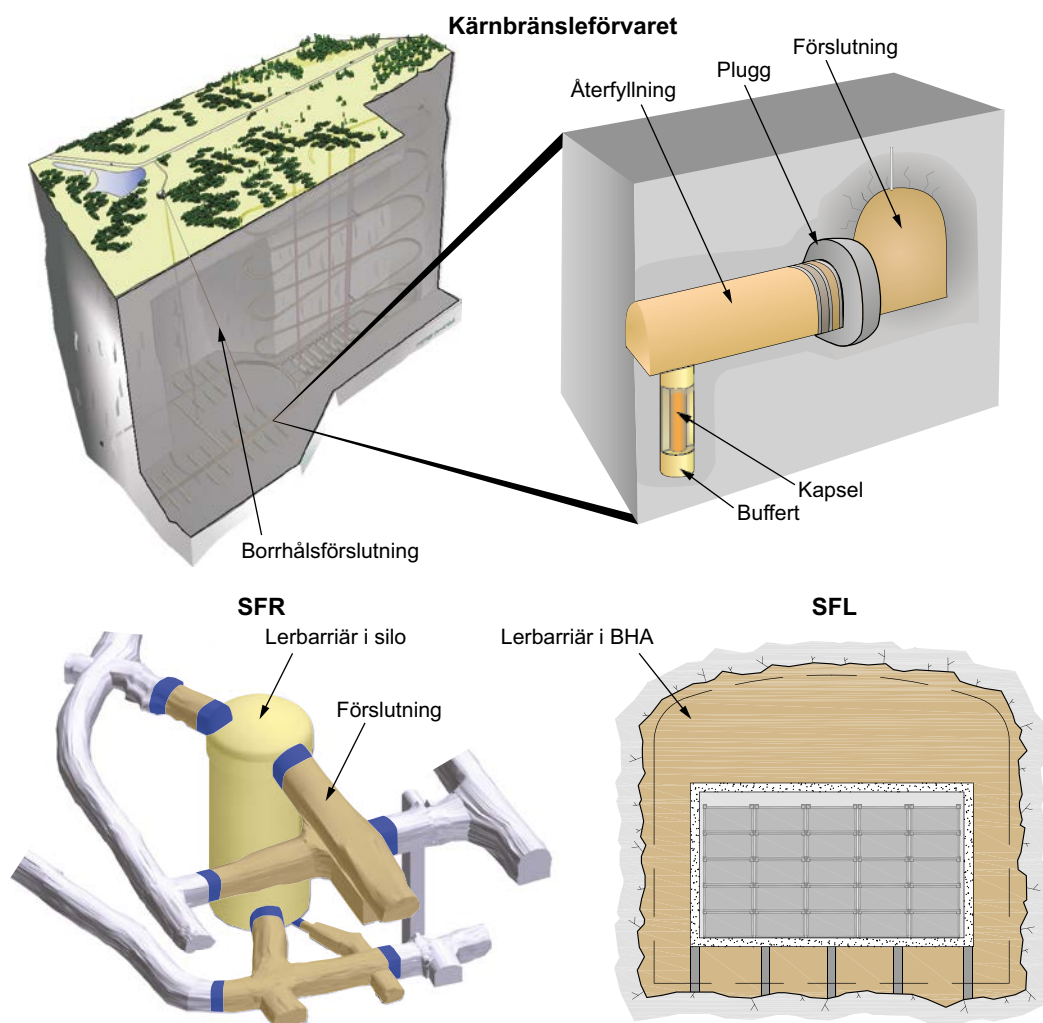
SKB har efter slutförandet av de utvecklingsinsatser som beskrivs under Nuläge ännu inte utformat något program för fortsatta utvecklingsarbeten för låg-pH cementbaserade material för berginjektering och bergförstärkning. Fokus under Fud-perioden blir i stället att sammanställa det hittills genomförda arbetet och genom detta skapa ett underlag inför planering av eventuella framtida vidare arbeten. Utöver detta, planerar SKB att genomföra en uppdatering av studien rapporterad i Sidborn et al. (2014), det vill säga, en analys av pH-plymens utbredning i Kärnbränsleförvaret från tunnelsektioner där standardcementmaterial används. Analysen ska baseras på mer realistiska antaganden och beräkningsförutsättningar. Med ny indata och randvillkor kan resultat baserat på mer verkliga förhållanden erhållas, vilket ger bättre grunder att stå på när det gäller kravformulering.

11 Lerbarriärer och förslutning

Huvudsyftet med lerbarriärerna, det vill säga buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret, silons lerbarriär i SFR och återfyllningen i bergssalen för historiskt avfall (BHA) i SFL (figur 11-1), är att begränsa vattenflödet runt kapseln respektive avfallsbehållarna. Detta åstadkoms med en låg hydraulisk konduktivitet och en svällförmåga som gör att den installerade barriären homogeniseras, fyller hålrum och tätar till mot omgivande berg och andra förvarskomponenter.

Förslutningen utgörs av pluggar, material installerat i borrhål samt det material som installeras i alla bergutrymmen utanför förvarutrymmena (bergssalarna i SFR och SFL samt deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret) för att försluta dem.

Förslutningen i förvaren ska upprätthålla flerbarriärprincipen genom att hindra att det bildas konduktiva vattenvägar mellan förvarsområdet och markytan samt hindra att återfyllningen expanderar ut ur deponeringstunnlarna respektive bergssalarna. I den övre delen av ramp och schakt ska förslutningen avsevärt försvåra oavsiktligt intrång i förvaret.



Figur 11-1. Övre: Lerbarriärerna och förslutning i Kärnbränsleförvaret: buffert, återfyllning, förslutning och borrhålsförslutning. Nedre, vänster: silons lerbarriär och förslutning i SFR. Nedre, höger: lerbarriär i bergssal för historiskt avfall (BHA) i SFL.

11.1 Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad

I både Kärnbränsleförvaret och bergssalen för historiskt avfall i SFL (BHA) kommer lerbarriärerna att installeras som en kombination av kompakterade block och pellets tillverkade av bentonit. Den installerade barriären har därför initialt varken ett svälltryck eller en låg hydraulisk konduktivitet. Dessa egenskaper kommer att utvecklas i och med att bentoniten tar upp vatten från det omgivande berget.

För att mer utförligt kunna förstå och beskriva bentonitmaterialets utveckling fram till mättnad behövs insatser kring den kemiska utvecklingen under den omättade perioden, kanalbildning/erosion, svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum, ångcirkulation samt kring mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden.

11.1.1 Gasfasens sammansättning under den omättade perioden

I berget i Forsmark förväntas mättnadstiden för bufferten kring kapseln variera mellan några tiotals till några tusen år beroende på deponeringshålets position i berget. I de flesta positioner förväntas mättnadstiden vara mer än 1 000 år. Detta innebär att kapselytan kan utsättas för omättat tillstånd under relativt lång tid. Ett möjligt problem för kapselkorrosion är gasens kemiska sammansättning i den omättade bentoniten. Av särskilt intresse är syrenehållet (O_2) och vätesulfiden (H_2S). Frågorna som ska lösas är:

- Kommer syrgas att konsumeras av förvarskomponenterna? Om ja, vad är reaktionshastigheten?
- Kommer vätesulfid att genereras från mineral i bufferten?
- Kan vätesulfid genereras mikrobiellt i en omättad buffert?
- Kan det bildas andra gaser?

Dessa frågor är av särskilt intresse för Kärnbränsleförvaret eftersom gassammansättningen framför allt kan påverka kopparkapseln. Det är dock inte omöjligt att sammansättningen av gasfasen under den omättade perioden också kan vara av intresse för BHA.

Nuläge

Två försök har utformats och genomförts för att undersöka utvecklingen av gassammansättningen i bufferten i ett omättat KBS-3-förvar (Birgersson och Goudarzi 2018). Ett av försöken inkluderade en central värmare i form av ett kopparrör, samt Ibeco RWC-bentonitblock och pellets, konfigurerade som en skalmodell av en isolerad omättad buffert i ett KBS-3-förvar (10 cm kopparrör, och bentonitblock med en diameter på 30 cm). Det andra försöket utfördes under isothermiska och isolerade förhållanden (rumstemperatur eller 50 °C) och innefattade endast bentonitpellets. Utvecklingen av syrekoncentrationen i försöken mättes återkommande med hjälp av ett in situ-system. Innan försöken avslutades, samplades gas för analys. Trots att den använda bentoniten valdes på grund av dess ganska höga svavelhalt, detekterades ingen sulfidgas i något av proven. Detta resultat är en stark indikation på att sådan gas inte förväntas i ett omättat KBS-3-förvar. Vidare noterades en kraftig syreförbrukning i försöket som innehöll ett kopparrör – efter ungefär 50–60 dagar var syrehalten cirka en procent i detta försök. Kopparrörets yta undersöktes och resultaten presenteras i Johansson A (2019b). Däremot visade försöket utan kopparkomponent ingen märkbar syreförbrukning vid rumstemperatur. Från denna skillnad kan man dra slutsatsen att syret huvudsakligen konsumeras som en följd av aerob kopparkorrosion.

Syreförbrukning under mättnadsfasen har också studerats i Full-scale Emplacement Experiment i underjordslaboratoriet i Mont Terri (Schweiz) (Giroud et al. 2018). Försöket visade att syret förbrukades mycket snabbt, som snabbast efter några veckor efter att försöket var återfyllt. Tolkningen av det försöket är dock att det är den störda zonen i berget och bentoniten som förbrukar syret och att reaktion med metall bara står för en mindre andel. Laboratorieförsök som gjorts i samband med fältförsöket visar att syrgas konsumeras av bentonit redan vid ~55 procents relativ fuktighet. Observationen att ädelgaser konsumeras med hastigheter som är jämförbara med syrgas innebär att det borde vara fråga om en sorptionsprocess.

Program

Studier av gassammansättningen i en omättad bentonit kommer att fortsätta. En ny försöksuppsättning liknande den som användes i Birgersson och Goudarzi (2018) har byggts upp i SKB:s forskningslaboratorium på Äspö. Skillnaden är att vätesulfid, vätgas, svaveldioxid och koldioxid kan mätas in situ.

Den experimentella uppställningen av det nya testet (figur 11-2) är baserad på två behållare av rostfritt stål, vilket ger möjlighet att köra två experiment parallellt. Båda har en central uppvärmd kapsel, en med en kopparvärmare och en med en värmare av rostfritt stål, vilket gör att liknande experiment kan utföras med eller utan närvaro av metallisk koppar.

11.1.2 Kanalbildning/erosion

Ett hydrauliskt problem under driftskedet rör kanalbildning och tillhörande erosionseffekter i bufferten och återfyllningen. Det vatteninflöde till deponeringshålen som krävs för bevätning av bufferten kommer huvudsakligen att ske genom sprickor i omgivande berg. Om inflödet är koncentrerat till sprickor som tillför vatten i en snabbare takt än den som den svällande bufferten kan absorbera, uppkommer ett vattentryck i sprickan som påverkar bufferten. Eftersom den svällande bentoniten inledningsvis är en gel, med en densitet som ökar med tiden när vatten tas upp i bentoniten, kan gelen vara alltför mjuk för att stoppa vatteninflödet. Resultatet kan bli kanalbildning i bentoniten och ett kontinuerligt vattenflöde samt fortlöpande erosion av bentonitpartiklar. Det fortsatta förloppet bestäms då av bentonitens svällningshastighet, flödeshastigheten genom bufferten och buffertens erosionshastighet.

Samma fenomen kan uppkomma i återfyllningen i BHA. I det förvaret är dock bentonitmängden så stor att en massförlust i det tidiga skedet knappast kommer att ha någon som helst betydelse för barriärens funktion.

Nuläge

Resultaten från tidigare studier har avrapporterats i Börgesson et al. (2015). Målen har varit att förstå och utveckla modeller för kritiska processer som uppstår i ett tidigt skede efter installation av buffert och kapsel, såsom kanalbildning, erosion, vattenupptag i pelletsfyllda spalter och tidig vattenabsorption samt att skapa förutsättningar för att ställa krav på täthet hos ändpluggarna i deponeringstunnlarna.



Figur 11-2. T v: Två behållare av rostfritt stål utrustade med sensorer för temperatur och relativ fuktighet samt anslutningar för onlineanalys av gassammansättning. T h: En centralt placerad uppvärmd kopparvärmare med utbytbara kopparsköldar för enkel installation och analys.

Program

En fråga som fortfarande kvarstår efter många piping- och erosionsexperiment är att utrustningen som använts har tillåtit att lera kan lämna testsystemet. När små inflöden (0,01–0,05 L/min) studeras i sådana system är kanalerna inte alltid stabila och kan öppnas och stängas under testets gång. En kanalstängning medför att trycket ökar tills leran brister och kanalen återigen öppnas. Varje gång en kanal öppnas rycks lite lera med. Totalt ger detta en högre lerkoncentration än den som uppmäts vid högre flöden då kanalen är stabil (10 g/L eller mer). Det är dock troligt att detta är en artefakt som orsakats av testinställningen eftersom 1) så stora utloppshål finns inte i deponeringshål eller tunnlar 2) den ”medtryckta” leran i ett deponeringshål måste transporteras ~6 meter i lera för att nå tunneln. Det är troligt att den kommer att sedimentera på vägen och inte lämna deponeringshålet.

Planen är nu att göra ett något större test där både buffert och återfyllning ingår. Inflödet ska vara litet (eventuellt 0,01 L/min eller 0,05 L/min) och flödet ska gå genom bufferten till återfyllning och antingen lämna systemet på ett sätt som gör att leran inte kan komma ut (porös vägg runt återfyllningen) eller att tomvolymen i återfyllningen bör vara tillräckligt stor för att rymma stora mängder vatten (flera kubikmeter). Från inflödestrycket går det då att analysera om leran brister och efter försöket går det att analysera lermaterialet som finns kvar i bufferten för att se hur mycket lera som verkligen försvann.

11.1.3 Vattenupptag

När bentonitblocken och pelletsfyllningen installerats i ett deponeringshål och deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret, eller i återfyllningen i BHA kommer bentoniten att ta upp vatten från det omgivande berget. Under mättnadsfasen kommer bentoniten att utbilda ett svälltryck som påverkar berget och omgivande barriärer mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bentoniten är en komplicerad process, som bland annat är beroende av temperatur, densitet, montmorillonithalt och vattenkvot i barriärens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är den relativa fuktigheten i barriären, vilken kan ses som ett kapillärt undertryck i buffertens porer vilket leder till att vatten tas upp från berget. De hydrauliska förhållandena i berget närmast barriären avgör mättnadsförloppet utveckling. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad inom ett fåtal år i bufferten i Kärnbränsleförvaret och på något tiotal år i återfyllningen i deponeringstunnlarna och i BHA. I och med att vattentillgången kommer att vara begränsad av flödet i berget kommer vattenmättnaden i realiteten att ta mycket längre.

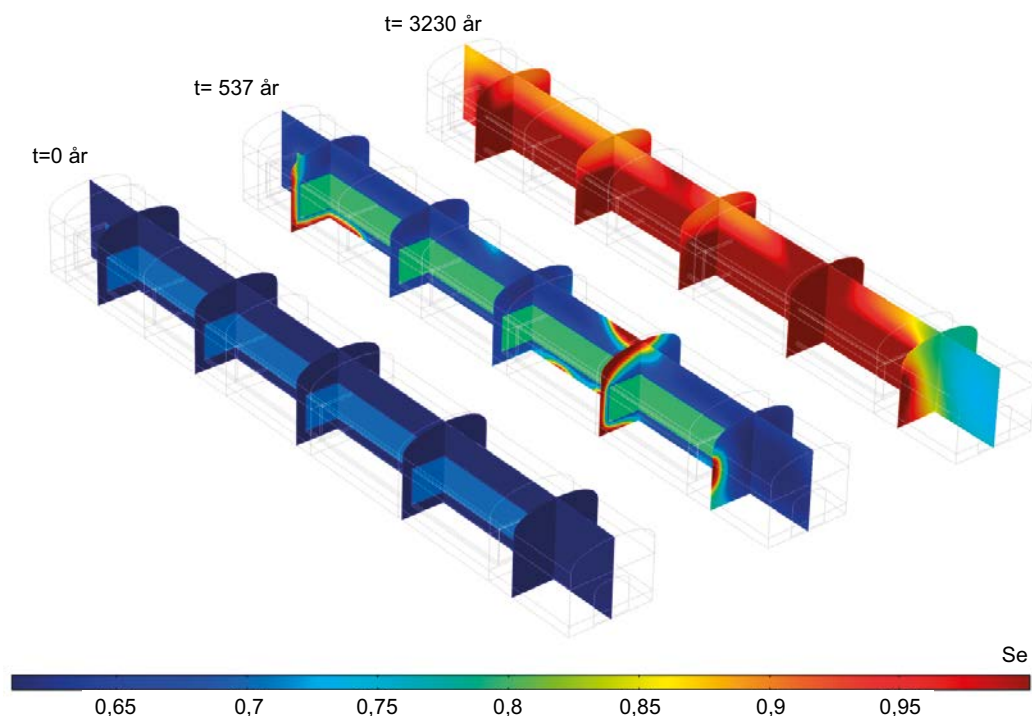
Vattenupptaget och tiden för full vattenmättnad har i sig ingen direkt betydelse för barriärens funktion i något av förvaren. Processen kan dock ha indirekt betydelse för förvarets funktion till exempel genom:

- den maximala temperaturen – en mättad buffert har högre värmeledningsförmåga,
- svällnings- och homogeniseringsprocessen,
- tiden för när specier (till exempel korroderande ämnen) i vattenlösning kan transporteras mellan berg och kapsel,
- tiden för hur länge en gasfas kan finnas i kontakt med kapseln.

Vattenmättnadsprocessen ger därför randvillkor till en rad andra processer.

Nuläge

SFL:s närområdeshydrogeologi utvärderades med hjälp av en skalmodell av förvaret (Abarca et al. 2019). En del av den utvärderingen fokuserade på transienta omättade flödessimuleringar för att uppskatta den tid som krävs för att nå full vattenmättnad av förvarsdelarna BHA och BHK. Det maximala flödet till förvaret begränsas alltid av grundvattnet som strömmar genom berget. Fördelningen av vattenmättnadsgrad under vattenmättnadsförloppet visas i figur 11-3. Resultatet visar att det mesta av vattnet går in i förvaret genom områden som står i kontakt med sprickor i berget. Inlastningsområdet, som är helt fyllt med bentonit, tar längst tid att mätta. Avfallet mätts snabbare än bentoniten på grund av dess lägre porositet.



Figur 11-3. Initial vattenmättnad i BHA samt beräknad fördelning av vattenmättnadsgrad vid 537 och 3 230 år (Abarca et al. 2019).

Den största delen av modellutveckling och testning av modeller för vattenupptag görs inom ramen för SKB Task Force on Engineered Barrier Systems (Task Force EBS). Under den senaste perioden har en del av dessa studier avrapporterats. Fas 1 av Task Force EBS avseende modellering av THM-processer (termo-hydro-mekaniska processer) i buffert- och återfyllningsmaterial för slutförvaring av radioaktivt avfall har pågått mellan 2005 och 2010. Denna fas har inkluderat ett flertal beräkningsuppgifter som innebar att modellera både väldefinierade småskaliga laboratorieförsök och storskaliga fältförsök.

Den modellering som utförts av de två svenska modelleringsgrupperna som finansierats av SKB beskrivs i Börgeresson et al. (2016a, b).

I Malmberg och Åkesson (2018) beskrivs modellering av Brie-experimentet i Äspölaboratoriet; dels vattenupptagsförsöket, dels själva fältförsöket. Även den modelleringen utfördes inom ramen för Task Force EBS. Huvudmålen med modelleringen var att 1) verifiera den hydrauliska materialmodellen för bentonitlera och 2) utveckla och testa conceptualiseringen av vattentransportegenskaper hos berget i nära anslutning till Brie-experimentet. Syftet var att förbättra förståelsen för bevättningsprocessen i det planerade slutförvaret i Forsmark. Vattenupptagsförsöket bestod av enskilda bentonitblock (cylinderformade) inneslutna i metallbehållare. Bentonitblocken hade fri tillgång till vatten via filter som omgav den yttre randen, varken filtren eller metallbehållarna var dock inkluderade i modellen. Resultaten från modelleringen av försöket överensstämde mycket väl med de experimentella resultaten, vilket visade att parametrarna angivna i taskdefinitionen gav en god representation av de använda bentonitblocken.

Program

Arbetet med att verifiera och uppdatera modellerna för buffertens vattenmättnad fortsätter. Huvuddelen av detta arbete sker fortfarande inom ramen för Task Force EBS. Där fortsätter arbetet med att modellera laboratorie- och fältförsök, för att ta fram bättre och mer flexibla verktyg för de kommande säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret och SFL. En viktig frågeställning för ett förvar i Forsmark är att kunna hantera ett mycket långsamt vattenupptag, antingen i en diskret spricka eller genom hela bergmatrisen, och bedöma hur det kommer att påverka mättnadsförloppet och vattenfördelning i buffert och återfyllning. Även kopplingen mellan ett mycket långsamt vattenupptag och den mekaniska utvecklingen i bentonitbarriärerna är en viktig fråga.

11.1.4 Svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum

I bufferten och återfyllningen i Kärnbränsleförvaret, som är inhomogena vid installation, kommer vattenupptaget efter deponeringen i deponeringshålen att leda till svällning. Den medför att alla spalter i bufferten, mellan berg och buffert och mellan kapsel och buffert försvinner och att bufferten i huvudsak homogeniseras. Emellertid kommer en viss inhomogenitet att kvarstå på grund av friktion i bentoniten, vilket medför att det kommer att bli en kvarstående densitetsfördelning och barriären i fråga kommer att ha olika hydrauliska egenskaper i olika delar. Denna kvarstående inhomogenitet har betydelse för konstruktionsförutsättningarna och den konfiguration (pellets och block) med vilken bufferten deponeras. Avsikten med programmet är att utröna om den förväntade graden av homogenisering i bufferten är tillräcklig för att bufferten ska kunna upprätthålla dess avsedda funktioner på lång sikt. Svällning och homogenisering är också viktiga processer för att kompensera för lokala massförluster från erosion eller oupptäckta missöden vid installationen.

Återfyllningens svällnings- och kompressionsegenskaper är viktiga för Kärnbränsleförvarets funktion. Utformningen med block och pellets i återfyllningen ställer framför allt krav på homogeniseringsförmågan dels mellan blocken och pelletsfyllningen, dels för läkningen av erosionskanaler. Svälltrycken och kompressionsegenskaperna är också viktiga för till exempel buffertuppsvällning och påverkan på pluggen. Samma frågeställningar är också aktuella i BHA i SFL där den stora volymen bentonit kan medföra ytterligare frågor angående uppskalning från laboratorieförsök till verklig skala.

Nuläge

Att utveckla prediktiva modeller för det mekaniska beteendet hos buffertar, återfyllningar och tätningar tillverkade av bentonit är ett gemensamt behov för avfallsorganisationer som planerar att använda tekniska barriärer bestående av bentonit. Dessa typer av modeller är komplicerade, både konceptuellt och numeriskt. Ett effektivt sätt att angripa detta är samarbete mellan olika grupper, där man tillsammans försöker komma fram till bättre och effektivare lösningar. Detta är bakgrunden till EU-projektet Beacon.

Syftet med Beacon är att utveckla förståelsen för de fundamentala processer som påverkar homogeniseringen av bentonit, samt att förbättra kapaciteten hos de numeriska modellerna. Projektet har 26 deltagare från nio länder och pågår under perioden 2017–2021.

Parallellt med Beacon har SKB fortsatt med ytterligare experiment och modellutveckling avseende de mekaniska egenskaperna hos bentonit. Resultat från flera olika försöksserier presenteras i Dueck et al. (2016). Försöksserier som inkluderar svällning har utförts i två olika skalor där resultaten från försöken i den större skalan (cylindriska prover med diametern 100 mm) medger relativt sett högre upplösning i de basvariabler som bestäms från proverna. I en annan försöksserie har friktionen mellan inspända vattenmättade prover och olika ytor studerats. Självläkning av bentonitbuffert har också undersökts med två försök i medianskala (cylindriska prover med diametern 300 mm) där förlust av stora volymer bentonit har ingått. Självläkningen av kaviteten är effektiv, men en fullständig homogenisering nås inte.

Dueck et al. (2019) innehåller en sammanställning av laboratorieförsök som utförts för att studera homogeniseringsprocessen i bentonitlera. Huvudsyftet med rapporten är att presentera försöksresultat från försök som utförts fram till och med juli 2016 och att tillhandahålla resultat som kan användas för modellering, för att förbättra modeller eller för att bestämma mekaniska parametrar för THM-modelleringen av bentonitbuffertens uppförande. Analys av försöken, förutsättningar, försöksresultat och begränsningar i försöken kommer att göras senare i projektet. Resultat från kompletterande svällningsförsök med olika vattentillförsel och försök som undersöker friktionen mellan bentonit och andra ytor presenteras i denna statusrapport. Ytterligare resultat från studier av bufferthomogenisering där effekten av förlust av bentonitmaterial har studerats presenteras. Skillnader i densitet som kvarstår efter lång tid har studerats i en serie försök med så kallat långa rör.

En av de viktigaste uppgifterna för återfyllningen i tunnarna i Kärnbränsleförvaret är att begränsa uppsvällningen av bufferten från deponeringshålet. Om bufferten kan svälla uppåt kommer den att förlora i densitet och därmed kan de viktiga egenskaperna förändras. Ett möjligt fall som kan leda till en sådan expansion av bufferten kan vara där vattenflödet in till deponeringstunneln är mycket lågt, medan det samtidigt finns ett vattenflöde in till deponeringshålet. Detta innebär att bufferten i deponeringshålet kommer att mättas snabbt och börja svälla vilket resulterar i en tryckupbyggnad

som trycker den torra tunnelåterfyllningen uppåt. Denna uppsvällning har modellerats tidigare, men resultaten har inte validerats mot fält- eller laboratorieförsök. Fältförsöket Buffer Swelling Test genomfördes vid Äspölaboratoriet för att kunna användas för validering av modeller. Ett simulerat deponeringshål med djupet cirka 1,5 meter togs upp i tunnelgolvet och utrustades med fyra hydrauliska domkrafter i hålets botten. En stålplatta med ett buffertblock ovanpå placerades på domkrafterna. Tunneln ovanför det simulerade deponeringshålet fylldes sedan med återfyllningsblock och pellets av bentonit (Sandén et al. 2017).

Efter installationen trycktes buffertblocket uppåt mot återfyllningen för att simulera en svällande buffert mot en torr återfyllning. De vertikala krafterna på stålplattan, förskjutningen av buffertblocket och uppkomna tryck mot bergytan i fem punkter ovanför hålet mättes under hela försöket. Den totala förskjutningen av buffertblocket på ungefär 150 mm har enligt försöksresultaten fördelats på följande sätt mellan de olika delarna:

- Det 70–90 mm tjocka pelletslagret på golvet har komprimerats ungefär 30 mm.
- Det 430 mm tjocka pelletslagret i taket mellan det övre återfyllningsblocket och bergytan har komprimerats cirka 40 mm.
- Blockdelen har komprimerats cirka 80 mm genom hoptryckning av spalter, elastisk kompression av blocken och rörelser i sidled.

Mätningar av exakta tryckhållfastheten och draghållfastheten hos återfyllningsblocken visar att hållfastheten är låg i jämförelse med andra försök, i huvudsak beroende på den låga densiteten och låga vattenkvoten hos blocken. En preliminär slutsats är att mothållet mot uppsvällning kan förbättras avsevärt om återfyllningsblocken görs med högre densitet, och därmed får högre tryckhållfasthet. Börgesson och Hernelind (2017) beskriver modellberäkningar av mekanisk samverkan mellan buffert och återfyllning. Syftet med beräkningarna har varit att förstå och utvärdera inverkan av olika faktorer på interaktionen mellan bufferten och en torr återfyllning på det slutliga tillståndet hos bufferten efter svällning och homogenisering. Sandén et al. (2017) har modellerat Buffer Swelling Test och jämförelsen mellan modellerade och uppmätta resultat visade på mycket god överensstämmelse.

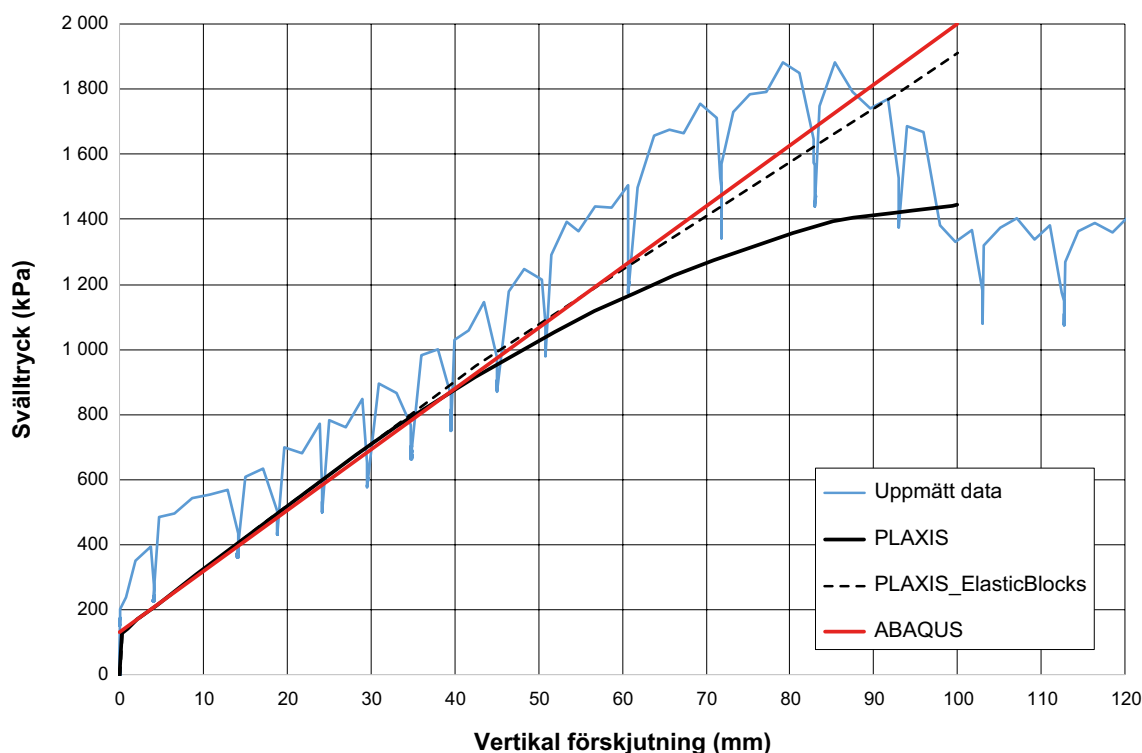
Leoni et al. (2018) presenterar en jämförelse mellan resultaten från två olika beräkningsmodeller som har använts för att modellera Buffer Swelling Test (Sandén et al. 2017). Trots skillnaderna mellan de använda koderna och skillnader i materialmodeller, geometrier och indata lyckades båda teknikerna modellera händelseförloppet fram till dess att blocken började gå sönder. En slutsats är att båda koderna och modellerna kan användas för att studera processerna i återfyllningen när bufferten sväller upp mot en torr återfyllning av block och pellets. I figur 11-4 finns en jämförelse mellan resultaten från modellerna och försöket med avseende på normalspänning som funktion av förskjutning. Fältförsöket visade att återfyllningen uppnår sitt maximala motstånd mot buffertuppsvällning när svälltrycket från bufferten är nära den exakta tryckhållfastheten hos de individuella blocken. Om detta kan bekräftas för ett vidare spann av tryckhållfastheter bör det beaktas vid den fortsatta utvecklingen av återfyllningskonceptet.

Program

Huvuddelen av det fortsatta arbetet inom området fram till 2021 kommer att genomföras inom ramen för Beacon. I nästa skede kommer modellerna att testas på experiment i större skala. Förutom den del som finansieras av EU kommer SKB även att fortsätta med laboratoriestudier och modellutveckling i egen regi. Huvudmålet är att ta fram verifierade modeller med prediktiv kapabilitet. Dessa ska användas för att verifiera förvarsutformningarna för buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret och för återfyllningen i BHA i SFL.

Det finns ett behov av att verifiera och utveckla modellerna för buffertuppsvällning och interaktionen mellan buffert och återfyllning för att senare kunna använda dem för beräkningar av olika bevättningsfall eftersom det i dag inte finns modeller som är verifierade för olika bevättningsfall. Det är lämpligt att utföra ett antal skalförsök för att

- öka förståelsen för olika bevättningsfall och avgöra om det torra fallet är det mest ogynnsamma
- jämföra med modelleringsansatser
- skala upp resultaten till full skala.



Figur 11-4. Jämförelse mellan uppmätt och modellerat förhållande mellan plattans vertikala förskjutning och normalspänning på plattan. De svarta fasta och streckade linjerna är Plaxis-resultaten och den röda linjen motsvarar Abaqus-resultaten. "Dipparna" i de uppmätta värdena beror på att lasten ökades i steg med en relaxationstid emellan. (Leoni et al. 2018).

De beräkningsmodeller som kan användas för dessa beräkningsfall är framför allt Code Bright, Comsol och 3DEC, men det behövs ytterligare kunskap om och utveckling av dessa verktyg. Detta pågår bland annat inom Beacon.

11.1.5 Ångcirkulation

Frågor har uppstått om huruvida vatten från bergsprickor kan förångas mot kapseln i Kärnbränsleförvaret och transporteras ut i återfyllningen och genom denna process orsaka saltanrikning mot kapseln, som, om den är omfattande, möjligtvis skulle kunna orsaka korrosion (saunaeffekten). SKB:s uppfattning är att detta inte kan inträffa i någon omfattning som är skadlig för kapseln eller bentoniten, i och med att det inte förväntas att vatten transporteras ut från deponeringshålet. Ett försöksprogram för att verifiera detta har avslutats.

Denna fråga är inte aktuell i SFR eller SFL eftersom temperaturen i dessa förvar alltid kommer att vara låg.

Nuläge

I Birgersson och Goudarzi (2017) redovisas tester gjorda för att studera ångtransport i och förslutningsförmågan hos den inre spalten mellan bentonitblock och kapsel i ett deponeringshål. Dessa processer studerades som en del i en undersökning av så kallade saunaeffekter, det vill säga eventuell saltackumulering i ett deponeringshål som följd av ångbildning och ångtransport under de initiala faserna i ett KBS-3-förvar.

Specifikt visades att hastigheten på vattenupptagsprocessen minskade betydligt när vatten matades genom en bentonitkomponent, jämfört med att mata vatten direkt till den inre spalten. Föga förvånande fungerar alltså bentonitkomponenten som ett flödesmotstånd, vilket minskar vatteninflödet

till den inre spalten (i jämförelse med direktmatning). Bentonitkomponenten genom vilken vatten matades höll sig i princip vattenmättad under hela testets gång, trots att det utsattes för torkande förhållanden i den inre spalten. Hastigheten med vilken flytande vatten förångas i den inre spalten var alltså liten i förhållande till transport av vatten genom bentonitkomponenten.

Birgersson och Goudarzi (2017) argumenterar för att det är högst osannolikt att större mängder salt anrikas i ett KBS-3-förvar under mätnadsfasen och att processen kan avfärdas.

Åkesson et al. (2019) SKBdoc memo beskriver mätningar av ångtransport genom bentonit. Tester har utförts med testutrustningar i vilka provkroppar av bentonit placerades ovanför bägare med vatten (eller saltlösningar). Testutrustningarna placerades i sin tur i ett klimatskåp. Detta innebar att provkropparna kunde utsättas för en ånghalts-gradient vilken definierades av vattnet (eller saltlösningen) respektive klimatskåpet, samt av geometrin hos testutrustningen. Testerna kördes med prov bestående av block, delade block, referenser utan bentonitprov eller pellets.

Massförlusten i referenscellen var inte överraskande mycket snabbare än i cellerna med bentonitprover. Massförlusten i cellerna med block var likartad, oberoende av om blocket var sprucket, medan de pelletsfyllda cellerna förlorade mer vatten. Upptaget av vatten i bentoniten var mindre än förlusten från cellerna i samtliga fall. Det är således uppenbart att bentonit inte kommer att begränsa ångtransport i någon större utsträckning, såvida inte kondensation uppträder. Alla tester gav liknande resultat.

Program

I SKB (2019e) dras slutsatsen, vad gäller saunaeffekten, att saltackumulering som en konsekvens av förångning av tillflöde av grundvatten från en spricka som skär ett deponeringshål inte kommer att uppstå i ett KBS-3-förvar. Slutsatserna bygger på laboratorieundersökningar, modellberäkningar och fältförsök. Således är slutsatsen att saunaeffekten inte kommer att vara verksam i ett KBS-3-förvar i Forsmark. Därför anser SKB inte att det är motiverat med ytterligare studier av ångtransport i bentonit. Området bevakas dock och det kan bli aktuellt med ytterligare insatser om nya frågeställningar dyker upp.

11.1.6 Mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden

I Kärnbränsleförvaret i Forsmark är det troligt att ett flertal deponeringshål och deponeringstunnlar kommer att vara torra, eller delvis torra, även i ett relativt långt tidsperspektiv. En fråga som blir aktuell i ett sådant fall är produktion och transport av kapselkorroder i gasfas. Diffusion i gasfas är snabb, så i praktiken finns det inga transportbegränsningar i ett omättat förvar. Den styrande faktorn blir då hur mycket korroder som finns tillgängliga i gasfas i tunnlar och deponeringshål. Mängden syre kan enkelt uppskattas med tillgänglig tomvolym. Även om det inte är troligt, så går det inte att helt utesluta att svavelväte skulle kunna bildas genom mikrobiell sulfatreduktion i den omättade bufferten och återfyllningen. För bufferten hanteras detta pessimistiskt genom ett antagande om massbalans och ett krav på maximal svavelhalt (all sulfid i bentoniten antas orsaka kapselkorrosion). I återfyllningen är det svårare att verifiera ett haltkrav för totalinnehållet av sulfid i det installerade materialet eftersom mängden material är så stor. Transporten av sulfid från återfyllningen till kapseln kommer att styras av den halt av sulfid, i form av svavelväte, som finns i gasfasen i de omättade tunnarna. Det är därför viktigt att kunna bestämma halter av svavelväte i gasfas i jämvikt med bentonit. Under mättade förhållanden kommer diffusionsmotståndet i återfyllningen och i bufferten att starkt begränsa transporten av sulfid.

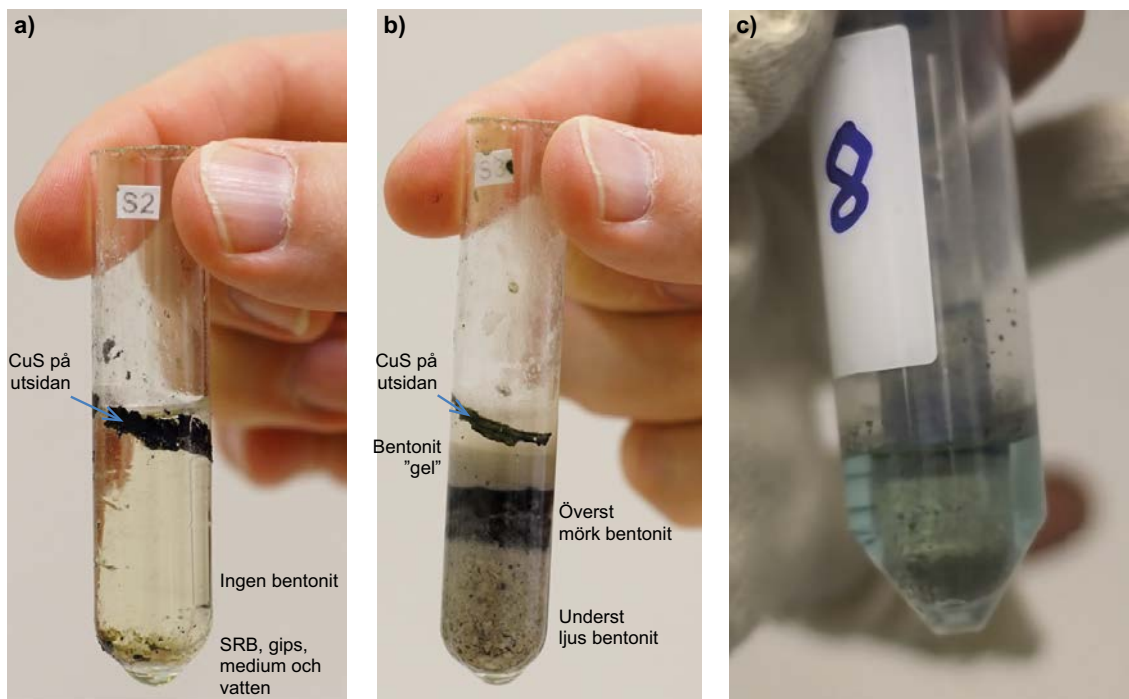
En förutsättning för mikrobiell aktivitet är förekomst av näringsämnen för mikroberna. Näringsämnen kan antingen tillföras med grundvattnet eller finnas som föroreningar i buffert- och återfyllningsmaterialen vid installationen. Under den omättade perioden kommer tillförseln av näringsämnen från grundvatten att vara ytterst begränsad eftersom den mängd vatten som behövs för att mätta barriärerna är relativt liten. För att begränsa mängden näringsämnen i de installerade materialen ställer SKB kravet att materialen inte får innehålla mer än en viktprocent organiskt kol. Detta krav är oberoende av formen av det organiska kolet.

Nuläge

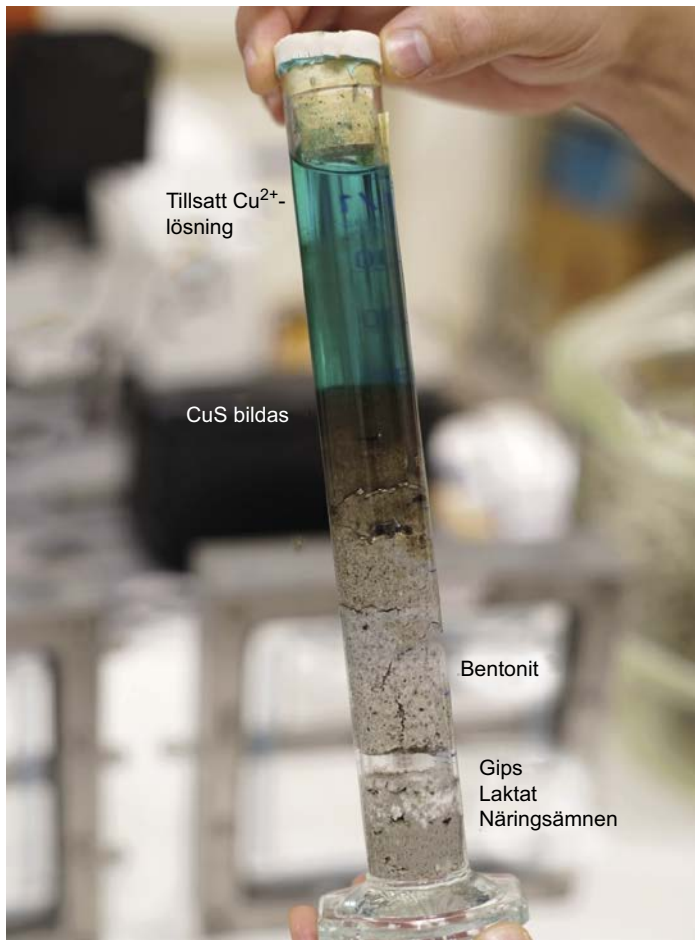
Under den senaste forskningsperioden utfördes en serie försök (Svensson et al. 2019b) för att undersöka aktiviteten av sulfatreducerande bakterier (SRB) i bentonit som funktion av tillgången till vatten (vätska och olika relativa fuktigheter). Fokus var på experiment med den kommersiellt tillgängliga *Pseudodesulfovibrio aespoeensis* (tidigare kallad *Desulfovibrio aespoeensis*) som ursprungligen isolerades från Äspölaboratoriet, men experiment utfördes också med en anrikning från ett naturligt grundvatten från ett borrhål nere i Äspölaboratoriet. Försöken utfördes i små glasrör placerade i större plaströr (figur 11-5) som sedan förvarades i en syrefri miljö. Dessutom utfördes ett demonstrationsexperiment i mätcyliinder (figur 11-6) för att undersöka om den naturliga förekomsten av SRB i bentonit kunde aktiveras. När gips, laktat (som utgör både kol- och energikälla), näringsämnen och flytande vatten tillsattes kunde sulfatreduktion observeras oavsett om bentonit tillsatts eller ej. Det fanns starka indikationer på att bentoniten reagerade med sulfid eftersom mängden bildad sulfid var lägre eller under detektionsgränsen i närvaro av bentonit. Slutsatsen från denna studie är att det krävs både en energikälla (laktat i detta fall) och flytande vatten för att sulfatreduktion ska ske. Inte ens med 100 procents luftfuktighet kunde sulfid observeras under försöksperioden.

Program

Fler försök kommer att utföras, dels med *Pseudodesulfovibrio aespoeensis* monokultur, dels med naturligt förekommande mikrober isolerade från borrhål i Äspölaboratoriet. För att minska osäkerheterna kommer någon eller några andra metoder att testas för att mäta eventuellt bildad sulfid i fast fas i bentoniten. Försök kommer att genomföras där kol- och energikälla kommer från gasfas (koldioxid och vätgas).



Figur 11-5. Bild a) och b) visar två glasrör med nybildad kopparsulfid från mikrobiell omvandling av sulfat. Bild c) visar hur ett av dessa glasrör placerats i plaströr med vätska för att ge den relativa fuktigheten i systemet. Vätskan fångade även upp eventuellt bildad svavelväte i den stabila fasen kopparsulfid. Det vänstra glasröret har ingen bentonit medan glasröret i mitten har bentonit. I båda fallen fanns flytande vatten tillgängligt för mikroberna. Dessa försök utfördes i en syrefri atmosfär.



Figur 11-6. Ett demonstrationsförsök där naturligt förekommande sulfatreducerande bakterier i Wyoming-bentonit lyckades väckas till liv med tillsats av flytande vatten, gips och näringslösning. Senare tillsattes kopparsulfat som reagens och kopparsulfid föll ut.

11.2 Bentonitmaterialets egenskaper i mättat tillstånd

Lerbarriärernas huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln i Kärnbränsleförvaret, och runt avfallsbehållare i silon i SFR och i BHA i SFL, samt att begränsa den advektiva transporten i deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret. 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 får inte signifikant försämra övriga barriärers funktion.

De viktiga egenskaperna är hydraulisk konduktivitet, svälltryck och skjuvhållfasthet. Dessa kan relateras till en given bentonits densitet. Sambandet är unikt för varje bentonittyp, och för en given typ av bentonit varierar egenskaperna med dess sammansättning (till exempel montmorillonithalten). Därför är detaljerad materialundersökning viktig eftersom förändringar i montmorillonithalten får direkt påverkan på bentonitens svälltryckskurva.

Hydraulisk konduktivitet och svälltryck är de viktigaste egenskaperna hos lerbarriärerna i samtliga förvar. Skjuvhållfastheten är däremot framför allt av betydelse för bufferten i Kärnbränsleförvaret.

11.2.1 Materialsammansättning

Nuläge

Ett forskningslaboratorium har satts upp vid Äspölaboratoriet för analys av och experiment med bentonitmaterial. Huvudsyftet är att fungera som en infrastruktur för forskning, utveckling och kvalitetskontroll av bentonit, samt att stimulera intern kompetensutveckling. Under den senaste perioden har fokus varit på att utveckla och testa metoder och att karaktärisera referensmaterial (Svensson D et al. 2017a). De metoder som huvudsakligen använts är katjonutbyteskapacitet (CEC), pulverröntgendiffraktion (XRD), röntgenfluorescensspektroskopi (XRF), utbytbara katjoner (EC), vattenhalt, skrymdensitet, kornstorleksfördelning, svälltryck, hydraulisk konduktivitet, skjuvhållfasthet, kompakteringsegenskaper, analys av kol och svavel och värmeledningsförmåga.

Ett stort arbete med att kvantifiera osäkerheter och i övrigt delvis validera metoderna har genomförts (Svensson et al. 2019a), delvis för att se hur små föroreningar som kan upptäckas i bentoniten, och vilken repeterbarhet respektive metod kan uppnå.

I de aktiviteter som är kopplade till experimentet Alternativa buffertmaterial (ABM) analyseras ett stort antal bentoniter av ett antal olika internationella team vilket fungerar som en typ av benchmark-test för respektive laboratorium. Detta är SKB:s huvudforum för materialsammansättning och långtidsstabilitet av bentonit, och analyserna sker i forskningslaboratoriet.

Program

Det återstår vissa behov av att ytterligare förbättra och testa metoderna, och att karaktärisera referensmaterial. Detta kommer att göras i begränsad omfattning i de aktiviteter som genomförs i samband med ABM.

11.2.2 Svälltryck och hydraulisk konduktivitet

Nuläge

I det forskningslaboratorium som byggts på Äspölaboratoriet (avsnitt 11.2.1) har nio mätceller installerats för att kunna mäta svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Under den senaste perioden har det bland annat undersökts hur en ändring i montmorillonithalten i bentoniten påverkar svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Detta har gjorts genom att blanda en Wyoming-bentonit (MX-80) med fem respektive tio viktprocent finmald sand för att simulera olika bentonitkvaliteter. När det gäller svälltryck är det tydligt att en minskning av montmorillonithalten med fem procent signifikant påverkar svälltrycket negativt. Därför är det viktigt att de metoder som används för mätning av materialsammansättningen (avsnitt 11.2.1) är utformade på det sättet att de klarar av att upptäcka små förändringar i montmorillonithalten i den bentonit som ska användas som buffert. Den hydrauliska konduktiviteten ökar något när montmorillonithalten sjunker.

Svälltryck och hydraulisk konduktivitet har uppmätts för ett flertal olika bentoniter. De flesta bentoniter uppför sig på liknande sätt, men bland annat bentonit från Bulgarien avviker då den har mycket högre svälltryck än de andra bentoniterna vid en given densitet.

Program

Mätning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet kommer att fortgå för att karaktärisera fler bentoniter, dels som råmaterial, dels efter värmning i långtidsförsök i fält (experimenten ABM och LOT, Long term test of buffer material). Analyserna av materialen från fältförsöken kommer att ge insikt i om det finns några processer som förändrar bentonitmaterialens egenskaper under den uppvärmda perioden i berget. Resultaten kan också användas för att avgöra vilka mineralogiska parametrar som har störst betydelse för de hydromekaniska egenskaperna.

Det är av största vikt att ha ett stort statistiskt underlag för sambandet mellan svälltryck och hydraulisk konduktivitet som funktion av bentonittyp och densitet innan ett material väljs för att användas i Kärnbränsleförvaret.

11.2.3 Skjuvhållfasthet

Skjuvrörelser i berget kan, beroende på buffertens mekaniska egenskaper, orsaka skador på kapseln och eventuellt förlust av inneslutning. Bentonitens skjuvhållfasthet är därför en viktig parameter för dimensioneringen av kapseln samt för utvärderingen av skjuvfallet i analysen av säkerhet efter förslutning. Skjuvhållfastheten ökar med densitet och svälltryck, men de mätningar som tidigare genomförts tyder på att det också kan finnas andra parametrar som påverkar. Eftersom SKB har definierat ett tekniskt utformningskrav för skjuvhållfasthet är det nödvändigt att testa alla aktuella buffertmaterial.

Eftersom det är bentonitens förmåga att skydda kapseln som är kritisk är frågan bara av betydelse för bufferten i Kärnbränsleförvaret.

Nuläge

En standardiserad testmetod för skjuvhållfasthet, uttryckt som enaxlig tryckhållfasthet, har tagits fram och finns presenterad i Svensson D et al. (2017a). I den typen av test komprimeras provet axiellt med en konstant hastighet. Proverna som används för testet är relativt små. Diametern är normalt 20 mm och höjden är 40 mm. Proverna komprimeras först och mätas sedan i en separat enhet. Testet görs med en deformationshastighet av 0,8 procent av provhöjd per minut med kontinuerlig mätning av belastningen och deformation av provet. Tryckhållfastheten bestäms som den maximala spänningen som appliceras på provet före brott.

Modellerings- och laborietester har visat att spänningarna på kapseln kommer att reduceras till acceptabel nivå om buffertens skjuvhållfasthet, mätt med ett enaxligt tryckhållfasthetstest vid deformationshastighet på minimum 0,8 procent, är begränsat till ett maximalt värde av 4 000 kPa.

Program

Eftersom skjuvhållfastheten, eller snarare den enaxliga tryckhållfastheten, är en kontrollparameter hos materialet i Kärnbränsleförvarets bentonitbuffert ska metoden för enaxliga tryckförsök på lerprover etableras internt på SKB och testköras på lämpliga lermaterial. Arbetet innebär metodutveckling med laborieanalyser av bentonit vid Äspölaboratoriet. Etablering av metoden på Äspölaboratoriet innebär bland annat komplettering av mjukvara och dokumentation av loggsystem samt utveckling av metodik för konvertering från natrium- till kalciumbentonit i större batcher än tidigare.

De enaxliga tryckförsöken ska genomföras med en pressutrustning (Tritech) med kapacitet på 50 kN. Denna utrustning går att programmera så att konstant deformationshastighet erhålls. Under ett tryckförsök mäts lägesändringen med en deformationsgivare och den axiella lasten med en lastcell.

Sprödhet hos bentonitprover som utsatts för ökad temperatur har påvisats i olika studier. Sprödheten tar sig främst uttryck i minskad töjning vid brott. Effekten av förhöjd temperatur och uttorkning har i dessa sammanhang till största del handlat om vattenmättade förhållanden och jämvikt med avjoniserat vatten. Hur den kombinerade effekten av förhöjd temperatur, uttorkning och ökat saltinnehåll inverkar på spänning-töjning-hållfasthet kommer att undersökas.

11.3 Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad

11.3.1 Sulfidbildning och sulfidtransport

Sulfid löst i porvattnet i bentoniten kan agera som korrodant för kopparkapseln. För att bedöma den diffusiva transporten av sulfid i bentoniten till kapseln är det viktigt att förstå vilka koncentrationer av sulfid som kan vara aktuella i porvattnet. Mikrobiella processer kan under vissa betingelser ge upphov till bildning av sulfid. Bentonitens torrdensitet eller svälltryck har en stor påverkan på den mikrobiella aktiviteten. Sulfid är i princip bara ett problem för kopparkapslarna i Kärnbränsleförvaret, vilket gör att dessa processer inte är lika relevanta för SFR och SFL.

I SR-Site definierades en säkerhetsfunktion för bufferten vilken innebär att den ska begränsa mikrobiell aktivitet. Där sattes funktionsindikatorn till *ett högt svälltryck* på grund av de osäkerheter som fanns kring mekanismen. I Posiva SKB (2017) diskuterades frågan ytterligare och det konstaterades att slutsatserna angående svälltrycket/torrdensiteten och eventuella ytterligare faktorer som begränsar mikrobiell aktivitet är något ofullständiga. Det finns emellertid resultat som indikerar att det finns en skarp gräns där mikrobiell sulfatreduktion upphör i MX-80-bentonit (Bengtsson et al. 2015). Funktionsindikatorn för att begränsa mikrobiell aktivitet sattes till ett svälltryck > 2 MPa och gäller för hela buffertvolymen.

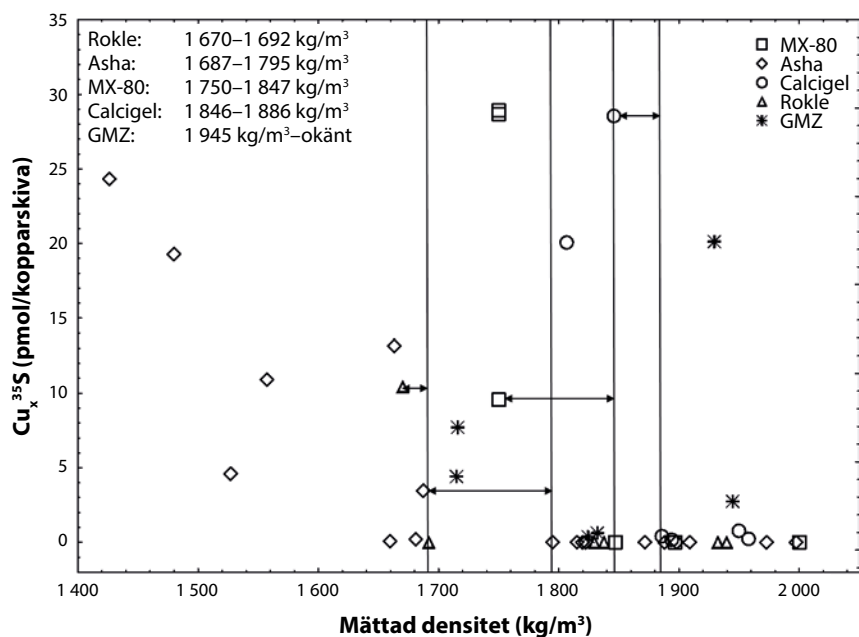
Nuläge

För att bestämma vilka sulfidkoncentrationer som kan vara aktuella i systemet bentonit-sulfid utfördes experiment med två olika bentonitleror, Ibeco BF (Milos, Grekland) och MX-80 (Wyoming, USA) och i vissa fall sulfidlösningar (Svensson D et al. 2017b). Huvudsyftet med studien var att bestämma jämviktskoncentrationen av sulfid i vatten-bentonit-blandningar. Vid bestämning av löst sulfid i vattenlösningarna erhöles koncentrationer som var lägre än metodens rapporteringsgräns. När natriumsulfidlösning tillsattes, upptäcktes det att bentoniten minskade mängden sulfid i lösning till en koncentration som var lägre än den förväntade. Mekanismen för detta kan vara absorption, omvandling eller någon typ av reaktion, men är utifrån dessa data inte möjlig att vidare utreda. Observationen att bentonit minskade mängden sulfid i lösning då natriumsulfid tillsattes stärkte observationen att ingen sulfid kunde detekteras i lösning jämviktad enbart mot bentonit.



Bengtsson et al. (2017a) undersökte tre olika bentonitleror, Wyoming MX-80, Asha och Calcigel, vid mättade densiteter i ett intervall från 1 500 till 2 000 kg/m³, för mikrobiell sulfidproducerande aktivitet som en funktion av totaldensitet vid full vattenmättnad. Resultaten för de tre lerorna indikerar att i ett intervall av mättad densitet går den sulfidproducerande aktiviteten, mätt på koppardiskarna, ner från hög till väldigt låg eller under den detekterbara gränsen. Ackumuleringen av kopparsulfid med radioaktivt svavel (Cu_x^{35}S) som funktion av bentonitens mättade densitet för kopparskivor monterade i testceller med bakteriella tillsatser från experimenten visas i figur 11-7. För varje bentonittyp fanns det ett relativt litet intervall i mättad densitet i vilken sulfidproducerande aktivitet föll från hög nivå till mycket låg nivå eller till frånvaro av Cu_x^{35}S . Den analyserade densiteten där bildandet av Cu_x^{35}S hade sjunkit till ett mycket lågt värde var liknade för Calcigel och MX-80 och låg vid $\sim 1\,870$ kg/m³ (figur 11-7). Motsvarande värde för Asha var lägre, $\sim 1\,830$ kg/m³. Följaktligen behövs det minst en ytterligare faktor utöver densitet som påverkar mikrobiell aktivitet hos kompakterade bentoniter för att fullständigt förklara skillnaden i dessa värden mellan Asha jämfört med MX-80 och Calcigel.

För att ytterligare studera effekten på bakteriell sulfidproduktion i olika bentoniter fortsatte serien som beskrivs ovan med två ytterligare material och tre densiteter för varje material (Bengtsson et al. 2017b). Denna studie inkluderade en järnrik (Rokle) och en järnfattig (Gaomiaozi, GMZ) bentonitleror. Metodiken med radioaktivt svavel-35 (^{35}S) som spårämne visade mycket låg sulfidproduktion i Rokle vid samtliga densiteter, med undantag för en lokal produktion vid den lägsta densiteten. För GMZ däremot var situationen den omvända. Där kunde sulfidproduktion detekteras vid samtliga testade densiteter. Resultaten presenteras i figur 11-7 tillsammans med resultaten från Bengtsson et al. (2017a).

En svaghet med de studier som rapporteras i Bengtsson et al. (2017a, b) är att de har utförts av samma personal på samma laboratorium och att det inte fanns några oberoende verifieringar av resultaten. För att råda bot på detta upprepade Haynes et al. (2019) en liten del av försöken från Bengtsson et al. (2017a). Två mättade densiteter av Calcigel studerades, dels 1 750 kg/m³ som positiv kontroll där sulfidproduktion förväntades, dels 1 900 kg/m³ där ingen aktivitet förväntades. Ackumulering av kopparsulfid på kopparskivorna identifierades genom att exponera en fosforbildplatta för den korroderade kopparytan och därmed analysera den radioaktiva svavel-35 som hade introducerats till bentoniten efter mättnadssteget. För Calcigel med en densitet 1 750 kg/m³ visade plattan att svavel-35-ackumulering står för 99,96 procent av intensiteten (figur 11-8). 1 900 kg/m³ gav ett negativt resultat (0 procent), vilket är lägre än bakgrundssignalen för fosforbildplattan (0,04 procent) (figur 11-8). Slutsatsen är att ingen sulfid bildades vid den högre densiteten.



Figur 11-7. Ackumulerad mängd Cu_x^{35}S på kopparskivor i picomol (pmol) som funktion av mättad densitet. De respektive intervallen där sulfidproduktionen skiftar från hög till låg indikeras med pilar. Intervallen finns utskrivna uppe till vänster i figuren (Bengtsson et al. 2017b).

	Bakgrund	1 750 kg/m ³	1 900 kg/m ³
			
Betasönderfall (antal per sekund)	9	120	9
Fluorescensintensitet	0,04 %	99,96 %	0 %

Figur 11-8. Bilder på kopparskivorna efter att de har tagits ut från tryckcellen, tillsammans med den uppmätta dosraten från betastrålning och intensiteten från fosforplattan (Haynes et al. 2019).

Program

Det är uppenbart att det finns en tydlig gräns för när mikrobiell sulfidproduktion i bentonit kan förekomma. För ett givet bentonitmaterial kan gränsen uttryckas som densitet i mättat tillstånd. I dagsläget finns det dock ingen förståelse för varför gränsen är olika mellan olika bentonitmaterial. Svälltryck eller montmorillonithalt är inte hela förklaringen. Rent empiriskt verkar det som om sulfidproduktionen hämmas av en högre halt av järn i leran. Det finns dock ingen bra teori om varför järnet skulle vara av betydelse och med tanke på det begränsade dataunderlaget skulle det kunna vara en slump.

Gränsen för mikrobiell sulfidproduktion i mättad bentonit är kritisk både för den tekniska utformningen av bufferten och i viss mån återfyllningen samt för analysen av säkerhet efter förslutning av Kärnbränsleförvaret. I dag finns det brist på data för att kunna bestämma den definitiva gränsen samt brist på förståelse för den bakteriehämmande mekanismen. Den försöksmetod som beskrivs i Bengtsson et al. (2017a) är både kostsam och relativt tidskrävande. Den är inte heller särskilt flexibel eftersom den ställer krav på att laboratoriet kan hantera radioaktiva isotoper. SKB planerar ett program för att förbättra förståelse och ta fram ytterligare data. Även mätmetoden behöver utvecklas. En möjlighet

är att analysera sulfid på kopparplåtar med SEM-EDX (svepelektronmikroskop, utrustat med energidispersiv röntgenspektrometer), vilket skulle eliminera behovet av radioaktivt svavel och därmed göra metoden avsevärt flexiblere. Under de närmaste åren kommer programmet fokusera på att ta fram ytterligare experimentella data för att i mer detalj och med bättre statistik bestämma gränsen i densitet där sulfidproduktion upphör. Med ett bättre dataunderlag kan det bli möjligt att avgöra vilka fysikaliska, kemiska eller mineralogiska egenskaper som kontrollerar aktiviteten hos sulfidproducerade mikrober. Detta kommer att ha avgörande betydelse för materialval, konstruktionsförutsättningar och antaganden i säkerhetsanalysen.

11.3.2 Kolloidfrigörelse/erosion

Upptaget av vatten och den resulterande svällningen av bentonitbufferten i Kärnbränsleförvaret förhindras av deponeringshålets väggar och därigenom utvecklas ett svälltryck i bentoniten. Detsamma gäller för återfyllningen i BHA. Om sprickor skär deponeringshålet eller förvarssalen finns det vid skärningsytorna inte några fasta hinder för svällning. Lokalt fortsätter då svällningen in i sprickorna tills jämvikt eller stationära förhållanden uppnås. Denna fria svällning kan leda till att enskilda montmorillonitskikt separeras (dispergeras) och att en del av bufferten därigenom kan transporteras bort med grundvattnet. Den maximala fria svällningen av bentonit beror starkt på laddning och koncentration av jonerna i skikt mellanrummen. Vid för låga koncentrationer av lösta ämnen i grundvattnet, kan avståndet mellan de enskilda montmorillonitskikten öka så mycket att systemet lera/vatten får en kolloidal karaktär, det vill säga enskilda eller små grupper av montmorillonitskikt uppträder som enskilda kolloidala partiklar.

De centrala förutsättningarna för eventuell kolloidbildning i ett förvar är den lokala saltkoncentrationen i porvattnet och förhållandet mellan mono- och divalenta joner i montmorilloniten vid bentonit/grundvattenkontakten. De styrande processerna är jonbyte av de ursprungliga montmorillonit-motjonerna med joner som härrör från de extra mineralerna och från det omgivande grundvattnet.

I analysen av säkerhet efter förslutning, SR-Site, kunde inte kolloidfrigörelse och erosion avfärdas och i ett fåtal deponeringshål var den beräknade massförlusten så stor att advektiva förhållanden inte kunde uteslutas.

Nuläge

Den modellering som använts i SR-Site för att beskriva erosion av bentonitleran har reviderats baserat på experiment utförda i tunna spalter (Neretnieks et al. 2017). Den numeriska noggrannheten för att beskriva processerna i den expanderande tunna övergångszonen mellan lera och vatten var inte tillräckligt bra i föregående modell. En ny metod för att lösa ekvationerna baserad på att dela området i två zoner utvecklades och befanns kunna uppnå nödvändig noggrannhet. Denna modell underskattade dock väsentligt erosionen i experimenten. Noggrannare analys av dessa visade att ett fenomen som tidigare inte var känt kraftigt bidrog till att öka erosionshastigheten. De eroderade lerpartiklarna slår efter att ha frigjorts från leran mycket snart ihop sig i flockar som snabbt transporteras med vattnet som strömmar i spalten. När denna oväntade process infördes i modellen erhöles en god överensstämmelse mellan modell och experiment. En jämförelse av resultat från den nya modellen och den som användes i SR-Site illustreras i figur 11-9.

Flockbildning visar sig leda till en ytterligare oväntad effekt, nämligen att flockarna sedimenterar i sluttande sprickor. Erosionen som förorsakas av detta kan vara större än den som förorsakas av strömmande vatten. Erosionsförlust i sprickor med större apertur än 0,1 mm verkar bestämmas av hur snabbt flockar frigörs från leran.

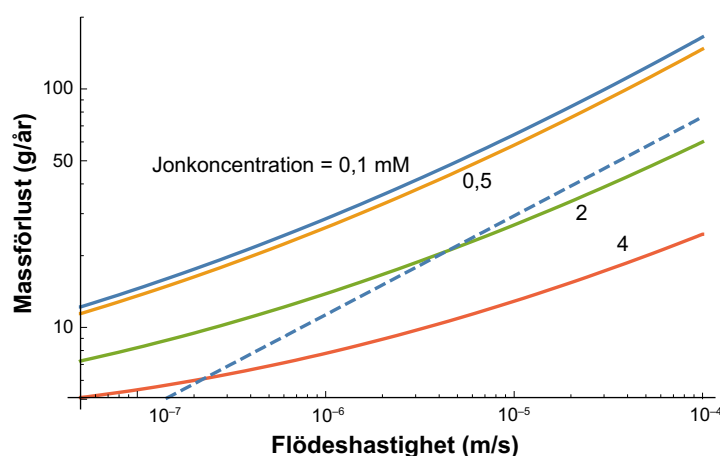
Belbar var ett EU-finansierat samarbetsprojekt baserat på en idé om att förbättra de långsiktiga säkerhetsutvärderingarna för geologiska slutförvarskoncept där man kombinerar ett tekniskt barriär-system med bentonit som en komponent med en naturlig barriär av kristallint berg. Belbar omfattade nationella organisationer för hantering av radioaktivt avfall från ett antal länder, forskningsinstitut, universitet och konsultbolag vilka arbetar med långsiktig säkerhet för förvar med radioaktivt avfall. En sammanfattning av slutsatserna från Belbar finns i Shelton et al. (2018). I Belbar gjordes ett betydande antal experiment där bentonitlera fick tränga in i en konstgjord spricka med antingen

stillastående eller långsamt flödande vatten. Inträngningen av leran i sprickorna och frigörelsen av lerpartiklar till vattnet i sprickorna studerades. Ett viktigt syfte med dessa experiment var att ta fram data som skulle kunna användas för att vidareutveckla kvantitativa modeller som kan användas för att beräkna förlusten av bentonit från deponeringshål och tunnlar. Dessutom gjordes ett antal experiment för att studera de underliggande mekanismerna för bentonitexpansion och frigörelse av lerkolloider. Tidigare härledda konceptuella, matematiska och numeriska modeller förfinades och modifierades baserat på experimentella resultat. Den stora mängden information som producerades under det fyraåriga projektet har rapporterats i ett antal rapporter och i publikationer i tidskrifter.

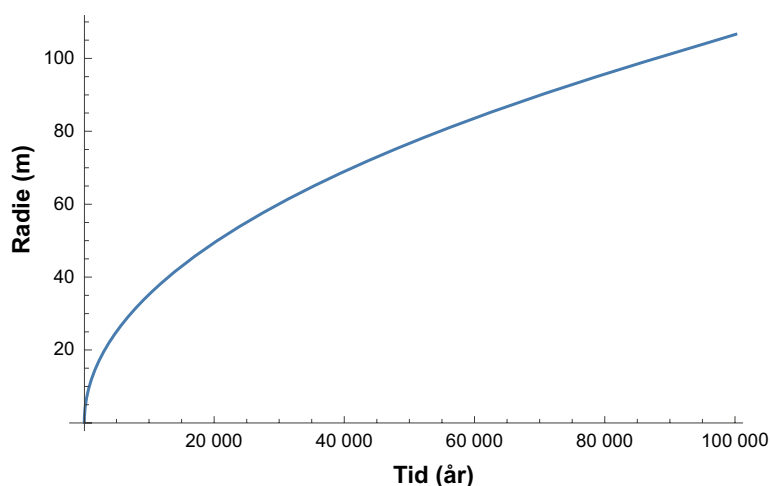
Neretnieks och Moreno (2018) presenterar en utvärdering av hur bra den nuvarande modellen för massförlust matchar experimentella data från Belbar. Huvudsyftet med rapporten var att samla in och sammanställa tillgängliga data, främst från Belbar men även från andra källor, för att kunna använda dem för modelltestning och för att verifiera den nuvarande modellen (Neretnieks et al. 2017) mot experimentella data från Belbar. Modellen som används för att simulera förlust av bentonit från deponeringshålet, tunneln eller förvarssalen har två huvudmodellkomponenter. Den första är den dynamiska lerexpansionsmodellen som beskriver hur kompaktaterad bentonit tar upp mer vatten, genererar starkt svälltryck och tränger in i tomma utrymmen – sprickorna. Denna modell är giltig för ett stort antal jonkoncentrationer i porvattnet. För monovalenta joner kan svällningen vara omfattande. Detta gäller även för kalcium-dominerade leror fram till den punkt där svällstrycket sjunker mot noll, vilket, enligt modellen, uppträder vid volymfraktioner inom intervallet 10–20 procent. Den andra modellkomponenten är den som beskriver förlusten vid lerfronten. Detta kan inträffa i en spricka med stillastående vatten genom sedimentation och i en spricka med strömmande vatten genom erosion av kolloider. I båda fallen verkar det ske en flockbildning av frigjorda kolloider. Erosion genom flockbildning vid ler-/vattengränssnittet kan endast ske i vatten med låga jonkoncentrationer. De två modellkomponenterna måste lösas samtidigt eftersom de påverkar varandra.

Bildandet och egenskaperna hos mycket lösa lerblandningar har visat sig experimentellt vara orsakad av närvaron av positivt laddade kanter på lerflaken (Hedström et al. 2016). Under betingelser när en sol bildas, har det visat sig att flockbildning av kolloiderna är en viktig process som starkt kan påverka erosion såväl i stillastående vatten i sluttande sprickor som i horisontella sprickor med flöde (Schatz et al. 2013, Schatz och Akhanoba 2017). Flockbildning har inkorporerats i den uppdaterade modellen för bentonitexpansion och -erosion (Neretnieks et al. 2017). I Neretnieks och Moreno (2019) har flockbildning studerats ytterligare. Flockars och sediments reologiska egenskaper påverkar hur snabbt och långt in i spricknätverket montmorilloniten kan vandra. Flockarna med montmorillonitpartiklarna åldras vilket gör flockarna starkare. De bildar gelliknande strukturer som är tillräckligt starka för att stoppa fortsatt vandring i sprickorna.

Den modell för utträngning av bentonit i en spricka som presenteras i Neretnieks et al. (2017) predikterar att bentonit kan expandera upp till hundra meter i en spricka under en 100 000-årsperiod (figur 11-10) även för jonkoncentrationer i grundvatten när kolloider inte bildas.



Figur 11-9. Massförlust som funktion av flödes hastighet för olika jonkoncentrationer i mM för en spricka med aperturen 0,1 mm. Den streckade linjen visar resultatet från modellen som användes i SR-Site.



Figur 11-10. Radie till lerfronten som en funktion av tid för en jonkoncentration > 4 mM (Neretnieks et al. 2017).

Denna utträngning stämmer inte riktigt överens med de observationer som finns från fält- och laborieförsök. Börgesson et al. (2018) har studerat utsvällning av bentonit i en spricka som äger rum i ett grundvatten som har en natriumklorid-koncentration över den kritiska koaguleringskoncentrationen (CCC). För rena natriumsystem fungerar CCC-begreppet. De processer som medverkar när bentonit sväller tills den blir en icke-svällande gel, vilket blir resultatet när grundvattnet ligger över CCC, har analyserats. Eftersom problem med kolloiderosion från bentonit är störst för homojonisk natriummontmorillonit har gränsvärden bestämts för sådana system. CCC för natriumbentonit är cirka 20 mM natriumklorid. Vid den kloridkoncentrationen slutar leran att svälla vid en lerkoncentration av ungefär 60 g/L. För att kunna uppskatta hur en bentonit sväller in i en spricka behövs kunskap om

- svälltryck och svällningsegenskaper hos bentonit vid lerkoncentrationer högre än 60 g/L
- det motstånd mot utsvällning som orsakas av skjuvmotstånd eller friktion i bentoniten och mellan bentoniten och sprickytorna
- skjuvhållfastheten hos den icke-svällande gelen vid 60 g/L.

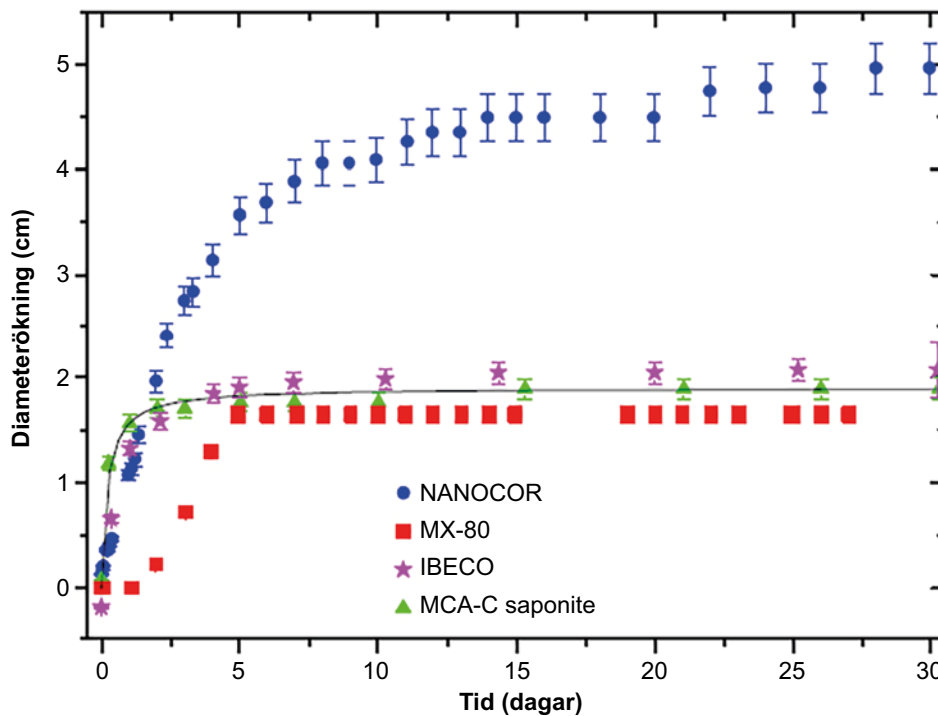
En teori har utvecklats avseende bentonitinträngning i plana horisontella sprickor. Teorin ger slut-tillståndet vid jämvikt när svällningen är avslutad och svälltrycket balanserats av friktion mot sprickväggarna. Från teorin kan man dra slutsatsen att bentonitutträngning i sprickor under förhållanden över CCC begränsas till avstånd som är mycket mindre än diametern på deponeringshållet.

Erosionsbeteendet hos kompakterad bentonit i artificiella sprickor har studerats experimentellt under olika fysikalisk-kemiska förhållanden. Resultaten finns avrapporterade i Alonso et al. (2019). Experiment utfördes både i plana och ojämna sprickor med en experimentell uppställning speciellt utformad för att utvärdera

- bentonitexpansion i horisontella sprickor
- sedimentation i lutande sprickor
- erosion som funktion av vattenflöde.

Experimentserien fokuserade på frågeställningar där data från tidigare försök saknas, eller områden där det tidigare dataunderlaget anses som svårtolkat.

Experiment utförda med olika bentoniter i smala sprickor (tjocklek < 1 mm) visar att lerexpansion i sprickan upphör efter en viss tid eller expansionssträcka. Ett exempel på resultat illustrerats i figur 11-11.



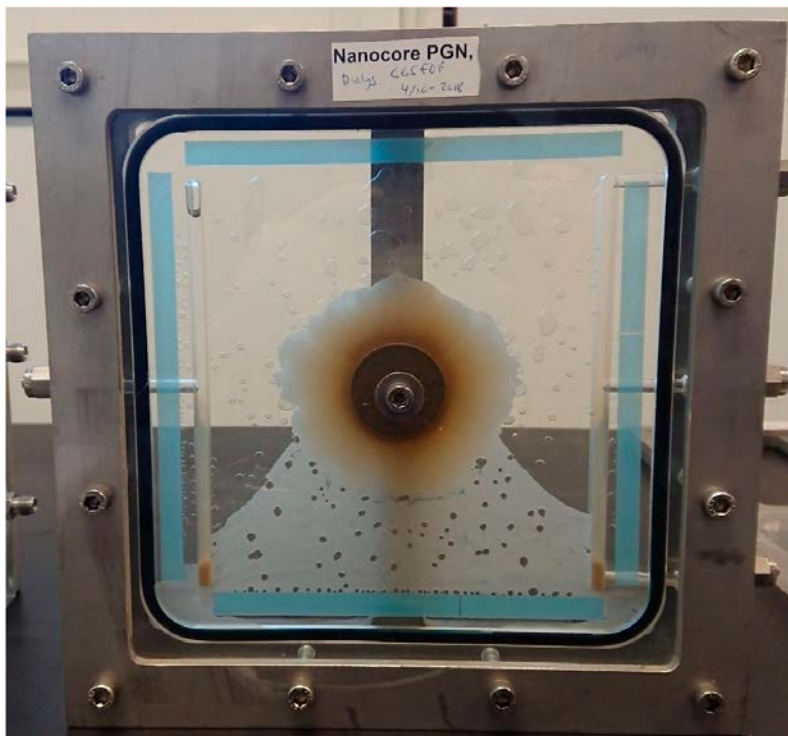
Figur 11-11. Expansion (diameterökning, i cm) hos olika leror; Nanocor®, MX-80, Ibeco och MCA-C, kompakterad till $1,4 \text{ g/cm}^3$, inom en $0,2 \text{ mm}$ plan spricka placerad horisontellt och fylld med natriumklorid 10^{-3} M (Alonso et al. 2019).

Detta stöder slutsatserna från Börgesson et al. (2018), vilka presenterades i föregående stycke. Studier utförda med naturliga leror och kalciumrika leror i plana och ojämna sprickor visade att under de experimentella förhållanden som rådde, förekom ingen sedimentation av lera i vertikala sprickor med aperturer mindre än $0,4 \text{ mm}$. Effekten som accessoriska mineral och lättlösliga salter kan ha på erosionsprocessen analyserades i detalj. Resultaten visar att grova mineralfraktioner effektivt kan begränsa lerexpansion i tunna sprickor. I gränsen för den expanderande fraktionen identifierades dock både accessoriska mineral och lera, och i själva verket bildar lerpartiklarna själva ett koherent filter. Studierna bekräftade också att vattenkemin har klart större betydelse än flödes hastigheten för erosionen. Detaljen om vilka fysikalisk-kemiska parametrar som begränsar expansionen och sedimentationen av bentonit i sprickorna är dock fortfarande inte helt klart.

Program

Den stora kvarstående frågan med avseende på kolloidbildning och erosion är betydelsen av flockbildning. Det är uppenbart att lerkolloider bildar en ny fas, en "sekundär gel", när de utsätts för en kraft, antingen genom ett flöde i sprickan eller från gravitation i en vertikal eller lutande spricka. När det gäller flöde i en horisontell spricka verkar det som om frigörelsen av partiklar från lerfronten till det strömmande vattnet är den begränsande faktorn och flockbildningen är av underordnad betydelse. I lutande sprickor är dock situationen en annan: bildandet av en "sekundär gel" kontrollerar massförlusten. I dag finns det ingen konceptuell modell som kan beskriva detta förlopp. Den kvantitativa modell som presenteras i Neretnieks et al. (2017) bygger helt på empiriska data. Det är också utmanande att göra försök med sedimentation i stagnanta förhållanden eftersom små mängder salt i lera kan ha stor betydelse för resultatet.

Ett nytt experimentellt program har startat på SKB:s forskningslaboratorium vid Äspölaboratoriet. Målsättningen är att verifiera de resultat som presenteras i Alonso et al. (2019), samt att ta fram ytterligare data. Figur 11-12 visar preliminära resultat från ett sedimentationsförsök med en "saltfri" ren montmorillonit.



Figur 11-12. Sedimentationsförsök med en tvättad montmorillonit i vatten med 1 mM natriumklorid i en 0,2 mm artificiell spricka. I mitten finns en puck av kompakterad lera, utanför den bildar den expanderande pastan och den icke-svällande gelen en cirkel. Nedanför cirkeln ser man den sedimenterande flockbildningen (sekundär gel). I kanalerna på sidorna kan man även ana en sol-fas.

Förutom de experiment som SKB genomför i egen regi kommer experiment och modellutveckling hos externa leverantörer att fortsätta. I nuläget kommer fokus att ligga på sedimentation/flockbildning.

11.3.3 Sjävläkning av bentonit

Vid en eventuell massförlust av bentonit från en barriär, till exempel till följd av erosion, är det viktigt att kunna förstå hur barriären sjävläker. Programmet för detta beskrivs i avsnitt 11.1.4.

11.3.4 Mineralstabilitet

Bentonit har valts som barriärmaterial eftersom det förväntas vara långsiktigt stabilt i de miljöer som råder i de olika förvarerna. Bentonit kan vara stabil i hundratals miljoner år i sin bildningsmiljö, men förändringar i miljön kan leda till en relativt snabb förändring av mineralstrukturen. De faktorer som främst styr stabiliteten är temperatur, tillgång till kalium och pH. Även redoxförhållandena kan vara viktiga. Kaliumhalterna i svenska grundvatten är generellt låga, men det kan finnas relativt stora mängder kalium i berget. En förhöjd temperatur förväntas under en relativt kort period i bufferten i Kärnbränsleförvaret, medan återfyllningen och bentonitbarriärerna i SFR och SFL aldrig utsätts för någon förhöjd temperatur. I Kärnbränsleförvaret undviks interaktionen mellan högt pH och bentonit med ett krav på låg-pH-material, emedan denna process är högst reell både i SFR och i BHA i SFL.

Bentonit kan brytas ner av joniserande strålning, men vid de relativt låga strålningsnivåer som förväntas i samtliga förvar kan denna process anses som försumbar.

Viktiga fältförsök för att studera mineralstabilitet i bentonitlera är LOT och ABM i Äspölaboratoriet. I LOT undersöks åldrandet av MX-80-bentonit med en kopparvärmare vid 90 °C och 130 °C. I ABM undersöks över tio olika bentoniter från olika delar av världen tillsammans med en stålvärmare vid 130 °C (undantaget är försökspaket 5 som kördes i högre temperaturer). I båda typerna av försök används kompakterade bentonitringar på 30 cm diameter staplade runt värmaren som är totalt fyra meter hög i LOT och tre meter hög i ABM.

Nuläge

De viktigaste resultaten från ABM:s försökspaket 2 presenteras i Hadi et al. (2017) och kan sammanfattas enligt följande:

- De identifierade processerna överensstämmer med de som rapporterats i tidigare tester vid Äspölaboratoriet och det schweiziska berglaboratoriet, Grimsel. Dessutom möjliggjorde studien en mer detaljerad förståelse beträffande järn-bentonit-interaktion i en slutförvarsliknande miljö. Korrosion av värmaren gav upphov till en järnfront som sträckte sig ~5–20 mm in i angränsande bentonit, förutom i det järnrika bentonitmaterialet (Rokle) där ingen järnökning var observerades. Huvudfraktionen av denna järnackumulation i leran visade sig vara järn(III)oxider. En del järn(II) hittades också som diffunderat vidare in i leran men vars natur ännu inte identifierats.
- Kationbytesreaktioner mellan natrium-, kalcium-, magnesium- och kaliumjoner inträffade både horisontellt och vertikalt i försöket. Katjonutbyteskapaciteten (CEC) visade nästan ingen förändring som en funktion av avståndet till järn och värmekälla.
- Ackumulering av magnesium och kalciumsulfat nära värmaren.
- Inga indikationer på smektit förändring i något av proven, detta stöds av de nästan konstanta CEC-värdena och det konstanta aluminium/kisel-förhållandet mot värmaren. Detta resultat ligger i linje med andra in situ-experiment och indikerar stabiliteten hos smektit under hårda förvarsliknande förhållanden.

Studier pågår angående interaktionen mellan bentonitbarriären och cement i avfallformen i BHA i SFL. Två uppsättningar av endimensionella reaktiva transportmodeller för bentonitombvandling i BHA har utvecklats och implementeras med hjälp av iCP, ett gränssnitt mellan programmen Comsol Multiphysics och Phreeqc. Den första uppsättningen modeller behandlar endast bentonitsystemet och behandlar betongen som ett randvillkor. Den andra uppsättningen hanterar den fullständiga interaktionen mellan betong- och bentonitbarriärerna. Syftet är att bedöma massan av montmorillonit-ombvandling i bentonitbarriären som ett resultat av samverkan med cementytorna från avfallsbehållaren under en tidsperiod på 100 000 år.

Modellerna med nuvarande antaganden predikterar en relativt omfattande omvandling av bentonitbarriären.

Program

Arbetet pågår fortfarande med ABM:s försökspaket 2 och sker nu delvis parallellt med analyser av ABM:s försökspaket 5 (figur 11-13). Paket 5 kördes upp till mycket höga temperaturer (cirka 200 °C), varpå blocken till stor del torkade och sprack. De kemiskt mer påverkade proverna verkar komma från försökspaket 2, där man i kontaktytan med stålvarmaren kunde identifiera en ny magnesiumrik trioktaedrisk smektit, dock i en mycket liten halt och bara i en typ av bentonit. Det är också tydligt att olika bentoniter interagerat olika med stålvarmaren. Det går inte i nuläget avgöra om dessa skillnader mellan lerorna även på något sett skulle synas i ett försök med kopparvärmare.

Arbetet med försökspaket 2 och 5 från ABM fortsätter. Framför allt kommer svälltrycksdata och hydraulisk konduktivitet samlas in, samt röntgendiffraktionsdata för identifiering av eventuella omvandlingsfaser. En viktig lärdom från försökspaket 2 var att bentonitlerorna kan ha olika kemisk stabilitet och kan interagera på olika sätt med den metalliska värmaren. Det är problematiskt att bara Wyoming-bentonit (MX-80) har testats i fält med koppar. Därför planeras nya fältförsök av ABM-typen men med kopparvärmare i stället för stål, så att man i framtiden har en flexibilitet i val av buffert i Kärnbränsleförvaret.

Närmast kommer två försökspaket från LOT att brytas. Standardanalyser kommer att genomföras liknande vad som gjorts på tidigare paket, men ett stort antal prover kommer även att undersökas med röntgendiffraktion (XRD) och röntgenfluorescencepektroskopi (XRF) för att leta efter magnesiumrika faser i kontakt med värmaren. Tidigare har små öknings av magnesium observerats (till exempel LOT och Prototypförvaret) och målet är nu att försöka hitta orsaken till dessa observationer. Ett annat fokusområde är att studera järnets redoxkemi i bentoniten. Bentoniten domineras av järn(III) vid installation, men vid brytning av Prototypförvarets yttre sektion (Olsson et al. 2013) observerades en ökning i järn(II)/järn(III)-kvoten i bufferten. Denna ökning kunde inte riktigt förklaras, varför nu mer information ska samlas in för att öka kunskapen om processen.



Figur 11-13. Prov med Calcigel-bentonit från ABM:s försökspaket 5, vilket togs upp 2017.

Dioktatedrisk smektit har identifierats i Kirunagruvan, ner till djup på minst 1 200 meter under ytan. Smektiten är relativt ren och sväller med vatten precis som man väntar sig. Kirunagruvan är en av Europas största järnmalmsbildningar. Betydande zoner av lera har uppstått i nära anslutning till magnetit-apatit-avlagringarna i upp till cirka 50 meter tjocka mjuka förändringszoner. Det finns indikationer på att smektiten i Kiruna kan vara extremt gammal och därför potentiellt mycket intressant som en naturlig analog ifall man kan datera den.

Det finns uppenbara utmaningar när det gäller interaktionen mellan cement och bentonit i BHA. Det finns tekniska lösningar som till exempel, en minskning av mängden kringgjutningsbruk runt avfallet eller en mer massiv bentonitbarriär, men det är inte säkert att dessa lösningar är praktiskt genomförbara. De osäkerheter som skulle kunna ha störst betydelse för processen är transportegenskaperna i betongen i avfallsbehållaren och montmorillonitens upplösningskinetik. Även utfällningskinetik hos de sekundära faserna skulle kunna påverka systemet och denna mekanism har helt försumrats i studien. Det kommer att bli nödvändigt med ytterligare studier, både experimentella och modelleringar. Satoh et al. (2013) visar att den reaktiva ytan i kompakterad bentonit är betydligt lägre än den som uppmätts i dispergerade lösningar. Denna effekt har inte tagits om hand i den pågående studien. Preliminära beräkningar visar att effekten kan vara avgörande för bentonitbarriärens beständighet i BHA. Nästa steg i programmet bli därför:

1. Modellering av interaktionen mellan bentonit och betong i BHA med hänsyn tagen till lägre reaktiva ytan.
2. Ytterligare experiment för att verifiera att ytminskning vid kompaktering är ett korrekt angreppssätt på processen.

Resultaten kommer att ha stor betydelse för utformningen av barriärerna i BHA.

11.4 Utformning av barriärer

Det underlag som redovisades i ansökan för Kärnbränsleförvaret beskrev konceptuella utformningar av buffert, återfyllning inkluderande valvplugg samt förslutning. Därefter har fortsatt teknikutveckling bedrivits för arbetet med systemkonstruktion för buffert, återfyllning och pluggar i deponerings-tunnlar. Utifrån uppdaterade konstruktionsförutsättningar behöver utformningarna för buffert och återfyllning ses över.

En förstudie rörande SFL-anläggningens utformning har genomförts och indikerar att det behövs riktade utvecklingsinsatser avseende tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarskonstruktioner i bergsalarna.

11.4.1 Buffert i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Utgående från de uppdaterade konstruktionsförutsättningarna (Posiva SKB 2017) har en ny metodik för att anpassa buffertens utformning till olika bentonitmaterial tagits fram. Metodiken har tillämpats för MX-80 av Luterkort et al. (2017, se avsnitt 7.2) här redovisas också hur hänsyn tagits till den expansion som sker innan återfyllningen installeras ovan deponeringshålen, se vidare avsnitt 11.6.2, samt till buffertens uppåtriktade svällning efter det att återfyllningen installerats.

Program

Under Fud-perioden kommer möjligheten att installera bufferten i form av segmenterade block att utredas. Detta kommer att inkludera ett installationsförsök i full skala och modellering av de tidiga termiska, hydrauliska och mekaniska processerna som kan leda till expansion eller krympning av bufferten. Utformning och tillverkningsmetod av buffertpellets kommer också att utredas.

11.4.2 Återfyllning i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Laboratieverksamhet för rutinmässig karaktärisering av bentonitmaterial har byggts upp och tagits i drift på Äspölaboratoriet. Två av de för återfyllningen centrala kravparametrarna, svälltryck och hydraulisk konduktivitet, kan bestämmas med de metoder som tagits i drift i laboratoriet. Genom att ha möjlighet till dessa bestämningar i egen regi har SKB under Fud-perioden haft möjlighet att bygga ett dataunderlag, innehållande relevanta material och densiteter, för att beskriva sambandet mellan dels densitet och svälltryck, dels densitet och hydraulisk konduktivitet. Återfyllningens utformning avseende installerad densitet har jämförts mot dessa samband och har uppfyllt kraven.

Modellerna för hur återfyllningen motverkar buffertens uppåtriktade svällning har vidareutvecklats baserat på resultat från tester i laboratorie- och fullskala (Börgesson och Hernelind 2017). Modellerna har använts för att visa att kraven på buffertens svälltryck och hydrauliska konduktivitet uppfylls även efter att bufferten komprimerat återfyllningen och ett jämviktsläge har uppnåtts.

Specifikationer för återfyllningens komponenter och för den installerade återfyllningen som en helhet har tagits fram och ett program har föreslagits för att kontrollera överensstämmelse med specifikationerna under produktion.

Program

Återfyllningens utformning kommer att uppdateras baserat på förändringar av tunnelprofil, som är en konsekvens av inriktningsbeslut för byte av berguttagsmetod. Modellerna som beskriver återfyllningens förmåga att begränsa buffertens uppåtriktade svällning kommer också att vidareutvecklas och användas vid uppdateringen av utformningen. Hur inflödande vatten ska hanteras ska också utredas för uppdaterad utformning av återfyllningen. Detta arbete kommer också att ta hänsyn till logistikstudier vilka ger underlag i form av hur lång tid installationen av buffert och återfyllning tar i slutförvaret.

11.4.3 Utformning av lerbarriärer i SFL

Nuläge

Under 2015–2019 har en värdering av det föreslagna konceptet med avseende på säkerheten efter förslutning genomförts. Säkerhetsvärderingen genomfördes för att ge SKB underlag för att bedöma om det föreslagna konceptet (avsnitt 2.1.2) har potential att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning.

Resultaten från säkerhetsvärderingen indikerar att förvarskonceptet har förutsättningar att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning, givet att den framtida platsen uppvisar tillräckligt goda egenskaper med avseende på framför allt ämnestransport i berget. Säkerhetsvärderingens analyserade känslighetsfall för olika barriärlösningar utgör underlag till fortsatt arbete med att utveckla de tekniska barriärerna.

Program

Under Fud-perioden fortsätter utvecklingen av utformningen av förvarsutrymmen med fokus på förvarskonstruktioner för hantering och lagring av avfallet och metoder för återfyllnad med bentonit. Utvecklingen av konstruktioner för säker hantering och lagring av avfallet behöver särskilt beakta möjligheten till en effektiv och robust process för återfyllning av förvarsutrymmena. Arbetet innefattar fortsatt utredning rörande vilket initialtillstånd som kan uppnås givet de praktiska begränsningarna i förvarsutrymmena och hur initialtillståndet kan verifieras vid förslutning.

11.5 Tillverkning samt kontroll och provning av buffert- och återfyllningskomponenter

För att säkerställa att buffert och återfyllning kan installeras i Kärnbränsleförvaret så att de tekniska utformningskraven uppfylls behövs god styrning och kontroll för hela kedjan från brytning av bentonit till färdig installation av buffert och återfyllning. Arbete pågår för att utforma hela processen från val av material till färdig installation. Baserat på detta beskrivs de olika processtegen samt de kvalitetskontroller som behöver göras för att kunna säkerställa de installerade barriärernas kvalitet. I detta avsnitt ges mer utförliga beskrivningar av följande områden:

- Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial.
- Tillverkning av buffertkomponenter.
- Tillverkning av återfyllningskomponenter.

11.5.1 Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial

Nuläge

Genom att anpassa buffert- och återfyllningskomponenternas densitet och vattenkvot kan konstruktionsförutsättningarna uppfyllas för många olika material. Metodiken som SKB kallar för anpassad utformning har utvärderats och utvecklats vidare inom ramen för nyligen genomförda teknikutvecklingsprojekt. En central del i detta arbete är de metoder med vilka materialen karaktäriseras (tabell 11-1). Metodvalen i tabellen är de som tillämpas just nu, men kan komma att förändras baserat på framtida utvecklingsarbete. De olika karaktäriseringsnivåerna är även valda för att användas på olika ställen i tillverkningsprocessen vid Kärnbränsleförvaret.

Nedan följer en översiktlig beskrivning av hur material kan utvärderas och hur deras utformning kan anpassas. Material som bedöms kunna uppfylla den långsiktiga funktionen köps in i mindre volymer, provtas och karaktäriseras stegvis i enlighet med karaktäriseringsnivå 1 och 2 i tabell 11-1. De bästa materialen, för vilka en buffert och/eller återfyllningsutformning kan tas fram, köps in i större volymer varefter kvaliteten bekräftas (nivå 1) och ett test för fullskaleproduktion genomförs (nivå 3). Vid behov genomförs även kompletterande analyser (nivå 2).

Det senaste teknikutvecklingsprojektet där sju olika material utvärderats indikerar att SKB kommer att kunna etablera en lista med potentiella leverantörer och material med respektive utformningar för såväl buffert som återfyllning. Detta är positivt ur både ett kvalitets- och upphandlingsperspektiv. Med flera material tillgängliga kan materialvalet göras baserat på en integrerad syn utifrån dess långsiktiga funktion, produktion av komponenter och kostnad.

Tabell 11-1. Metoder för karaktärisering av bentonit.

Provtagning	
	Provtagning, märkning och arkivering av bentonitlera för materialkaraktärisering vid Äspölaboratoriet
Karaktäriseringsnivå 1	
1a	Bestämning av vatteninnehåll i bentonit Bestämning av granulstorleksfördelning på bentonit
1b	Kemanalys av bentonitlera med röntgenfluorescensspektroskopi, XRF Bestämning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet – snabbmetod Bestämning av katjonutbyteskapacitet (CEC) i bentonitlera med Cu-trietylentetramin/UV-vis Bestämning av kol och svavel i bentonit
Karaktäriseringsnivå 2	
	Bestämning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet Extrahering av utbytbara katjoner, EC Fasanalys av bentonitlera med röntgendiffraktion, XRD Bestämning av partikelstorlek Bestämning av kompakteringskurva för bentonit Enaxliga tryckförsök på bentonit Bestämning av termiska egenskaper för bentonit
Karaktäriseringsnivå 3	
	Pellets, dimensioner och hållfasthet Blockvikt, dimensioner och visuell inspektion

Målet för SKB:s buffert- och återfyllningsanläggningar kommer att vara att säkerställa att kvalitets-säkrade komponenter produceras och levereras på ett kostnadseffektivt sätt. Som en del i utvecklingsarbetet har en strategi för processen tagits fram. Processen har brutits ned i fyra huvudsakliga delar:

- Leverantörs- och materialutvärdering.
 - Materialval.
 - Inköp.
- Kvalitetskontroll vid leverans av material i industriell skala.
- Kvalitetskontroll under tillverkningsprocessen.
 - Delprocess Hargshamn (mottagningsanläggning bentonit).
 - Delprocess Forsmark (produktionsanläggning).
- Kvalitetskontroll av komponenterna.

Strategin omfattar även ett förslag hur processen ska kunna styras och organiseras som en del i SKB:s ledningssystem.

Förslag till omfattningen av provtagning och analys har tagits fram för de olika delarna i processen och detta kommer att optimeras allteftersom mer materialstatistik byggs upp. Utgångspunkten är att en kontroll genomförs i samband med leveransen (prover på nivå 1 och 2) samt att materialet kontrolleras i samband med tillverkning av block och pellets då även dimensioner och hållfasthet kontrolleras (nivå 1 och 3). Under de delprocesser där materialet processas från grövre granuler till produktionsmaterial kontrolleras framför allt processtyrande parametrar såsom vatteninnehåll och granulstorleksfördelning (nivå 1a).

SKB har under de senaste Fud-perioderna byggt upp ett laboratorium på Äspö som kan genomföra huvuddelen av analyserna i enligt med tabell 11-1. Ett fåtal analyser skickas fortfarande till externa laboratorier. Laboratoriet möjliggör att provtagnings- och analysmetodik kan testas och utvecklas inför byggandet av Kärnbränsleförvaret.

Program

För att ha ett robust och tillförlitligt system för kvalitetssäkring inför integrationstester och samfunktionsprovning i Kärnbränsleförvaret i Forsmark behöver stegen i de preliminära kvalitetsplanerna provas för stora volymer material i samband med kommande fullskaletester. Detta för att bygga upp en förståelse för materialens homogenitet i olika skalor och därmed kunna optimera provtagningsplaner och kvalitetsplaner. I detta arbete kommer en god förståelse för materialleverantörernas kvalitetssystem att vara viktiga. Planer för hur implementering i slutförvarsanläggningen ska ske behöver också detaljeras.

En strategi för hur bearbetade de upphandlade bentonitmaterialen ska vara behöver läggas fast. Detta påverkar utformningen av anläggningen i mottagningshamnen. Om inhomogena material handlas upp behöver anläggningen och kvalitetssystemet anpassas för att kunna homogenisera material i stor skala.

11.5.2 Tillverkning av buffertkomponenter

Nuläge

Buffertblock har historiskt tillverkats i relativt stora mängder och har under den senaste perioden tillverkats för de försök som har gjorts på fullskaleblock. Undersökningar har gjorts för att undersöka hur frånvaro av smörjmedel under produktionen påverkar blocken och tester som har gjorts (Eriksson 2017) tyder på att detta ska fungera. I dessa tester har även homogeniteten med avseende på densitet undersökts. Utan smörjmedel blir homogeniteten i densitet något mindre än när smörjmedel används men skillnaderna i densitet inom blocket är relativt små jämfört med skillnaderna inom deponeringshålet efter installation. Det bedöms att tillverkningsmetoden som används i dag skulle kunna användas i en framtida produktionsbyggnad för att kunna producera buffertblock med tillräcklig kapacitet och kvalitet.

Den formteknik som används i dag är dock ganska arbetsintensiv och processen behöver effektiviseras för att öka materialutbyte och automatisera produktion. Pressformen för att tillverka buffertblocken håller därför på att ses över för att minska behovet av bearbetning av buffertblocken samt att förenkla produktionen.

Parallellt med arbetet med pressformen så pågår även arbete med att utreda möjligheten att dela upp buffertblocken i mindre delar, så kallade segmenterade block, för att kunna använda mindre och billigare pressar. Detta skulle underlätta produktion och hantering av blocken under produktion men samtidigt blir installationen svårare.

Tillverkningsprocessen har uppdaterats och detaljer för hur materialen beter sig samt kraven i de olika processtegen håller på att detaljeras för att kunna användas vid en detaljprojektering av produktionsutrustningen.

Program

Produktionsprocessen kommer att fortsätta att optimeras för att kunna producera blocken på ett effektivt sätt. Processen kommer också att fortsatt behöva detaljeras och krav och förutsättningar i de olika processtegen behöver förfinas inför detaljprojekteringen av produktionssystemet.

Större serier av buffertblock kommer att produceras för att få bättre statistik på hur stora variationer i densitet och dimensioner som kan förväntas i produktion. Buffertblock kommer även att produceras av nya bentonitmaterial för att säkerställa att tillverkningen fungerar även med andra material.

Vidareutveckling för de segmenterade blocken kommer att genomföras. Bland annat kommer fullstora block för ett deponeringshål att tillverkas. De segmenterade blocken kommer sedan installeras i ett deponeringshål i Äspölaboratoriet för att få erfarenheter av hur installationen fungerar. När det gäller pelletstillverkningen så kommer nya metoder för att mäta kvaliteten att tas fram.

11.5.3 Tillverkning av återfyllningskomponenter

Nuläge

Tillverkningen av återfyllnadsblocken bedöms vara en industriellt mogen process med maskiner och teknik som används inom industrin. Tillverkningen liknar väldigt mycket liknade produktion i industrin av till exempel eldfast tegel. Skillnaden är egentligen att storleken på återfyllnadsblocken är större än de som normalt produceras. Detta gör att bland annat avluftningen av blocken tar längre tid. I en framtida produktion så antas vacuum användas i formen vilket underlättar avluftningen och minskar risken att instängd luft under högt tryck orsakar sprickor i blocken. Detta har inte kunnat testas eftersom utrusning saknas för detta.

Återfyllnadsblock har tidigare tillverkats för fullskaleförsök och resultaten från de tillverkningarna visar att det är viktigt att ha koll på materialet och ha en jämn kvalitet för att uppnå de krav som ställs på densitet och dimensioner.

Program

Produktionsprocessen kommer att fortsätta att optimeras för att kunna producera blocken på ett effektivt sätt. Processen kommer också att fortsatt behöva detaljeras och krav och förutsättningar i de olika processtegen behöver förfinas inför detaljprojekteringen av produktionssystemet. Även för återfyllningsblocken kommer större serier att behöva tillverkas för att utöka den statistik som finns. Detta kan även underlätta för att förfinas kraven på materialet, till exempel granulstorleksfördelning och vattenkvot.

Precis som buffertpellets så kommer även återfyllningspellets behöva kvalitetstestas för att kontrollera att de uppfyller de ställda kraven. Därför kommer metoder för kvalitetstest av återfyllnadspelletts också att tas fram.

11.6 Deponering och installation av buffert och återfyllning

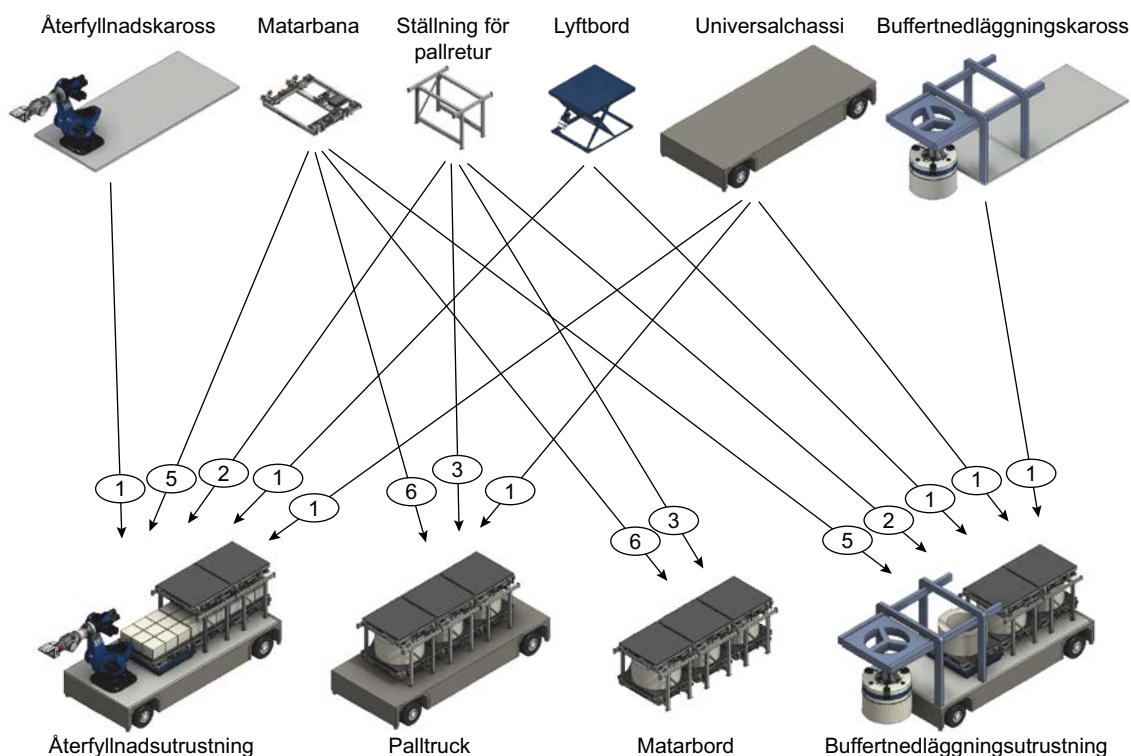
Strategin för utrustningar och tekniska system är att i möjligaste mån använda tillgängliga standardutrustningar. Finns inga standardutrustningar utreds möjligheten att göra en modifierad standard och sista alternativet är att utveckla en egen specialmaskin. För transport och installation av buffert- och återfyllningskomponenter i Kärnbränsleförvaret behövs en del specialmaskiner.

Strategin avseende utrustningar för transport och installation av buffert- och återfyllningskomponenter bygger på ett modultänk med användning av samma utrustningar för flera tillämpningar (figur 11-14). Att använda moduler har flera fördelar som till exempel:

- Snabbare felavhjälpning.
- Lättare att upprätthålla servicekompetens.
- Enklare reservdelshållning.
- Lägre utvecklingskostnader.

Från figur 11-14 kan utläsas att transportutrustning, bufferthanteringsutrustning samt återfyllningsutrustning alla bygger på ett universalchassi, vilket är en nyckelkomponent i denna strategi. Utredningar pågår för att verifiera att det är möjligt att konstruera ett universalchassi som uppfyller SKB:s krav och kan användas för planerade tillämpningar.

Respektive utrustning testas först separat för att därefter testas integrerat med andra utrustningar och system. Fullskaliga integrationstester där deponering av kapsel, installation av buffert, återfyllning och plugg kommer att utföras vid Äspölaboratoriet eller annan lämplig plats. Syftet är att verifiera att SKB:s sekvens för deponering och återfyllning fungerar som avsett innan detaljerad utformning görs av de specialutrustningar som behöver finnas i Kärnbränsleförvaret.



Figur 11-14. Strategi för modularisering.

11.6.1 Deponering

I Kärnbränsleförvaret krävs utrustning för att kunna utföra processer som till exempel deponering av kapslar. I flertalet av dessa processer finns enskilda moment som kräver att de utförs på ett kontrollerat och säkert sätt samt med hög repeterbarhet vilket gör att det krävs en del automatiserade funktioner.

Nuläge

För att styra och övervaka automatiserade funktioner och processer i industriella tillämpningar används i de flesta fall något slags överordnat system. Det överordnade systemet ger en operatör möjlighet att få en överblick av vad som händer i processen. För att dessa processer ska kunna visualiseras i systemet krävs att utrustningen eller maskinen har ett gränssnitt som kan överföra adekvat information till det överordnade systemet. Ett demonstrationssystem som ger olika prototypmaskiner och utrustningar möjlighet att styras och övervakas oberoende av leverantör har tagits fram och utformats för att kunna hantera alla funktioner på en prototyp av deponeringsmaskin.

Under 2015 slutfördes provning av detta demonstrationssystem med hjälp av prototypmaskinen för deponering, Magne, som visar att de uppställda kraven på tillförlitlighet, tillgänglighet och repeterbarhet vid automatiserad drift är möjliga att uppfylla. Resultatet av provningskampanjerna visar att tekniken är tillämpbar och går att implementera även på en deponeringsmaskin som framförs i ett helautomatiskt läge utan förare som assisterar färderna.

Program

Baserat på utfört arbete kommer automationsgraden i Kärnbränsleförvaret att läggas fast för deponering och återfyllning, därefter vidtar fortsatt utveckling av de överordnade systemen som behövs för att styra processerna.

Under Fud-perioden kommer även vidareutveckling ske av deponeringsmaskinens mekaniska komponenter såsom greppverktyg och vinsch. Skyddslucka för deponeringshåll kommer också att utvecklas.

Behov av ytterligare teknikutveckling för återtag av kapslar, buffert och del av återfyllning ska tydliggöras under Fud-perioden.

11.6.2 Installation av buffert

Nuläge

Under den gångna Fud-perioden har SKB testat två installationsmetoder i full skala i deponeringshål i Äspölaboratoriet (Luterkort et al. 2017). En av metoderna var planerad att användas i relativt torra deponeringshål och den andra i relativt våta deponeringshål. Metoden för torra deponeringshål fungerade väl och bufferten kunde stå i deponeringshålet med en kapsel utrustad med värmare under tre månader utan att buffertens densitet påverkades menligt. Metoden för våtare deponeringshål där ett utvecklat buffertskydd installerades i buffertens övre del visade sig fungera sämre. Det uppstod sprickor i buffertblocken vid kapseltoppen och den termiska gradienten medförde att vatten kondenserades i sprickorna. Det kunde konstateras att denna installationsmetod inte var robust. Det kunde dock visas att metoden för torra deponeringshål, där buffertblock och kapsel installeras i rak följd och sedan står utan stöd tills återfyllningen installeras, fungerar väl för en stor majoritet av de planerade deponeringshålen i Forsmark. Sekvensen för deponering görs så att buffert i våta deponeringshål får stöd av återfyllningen efter relativt kort tid. Därmed kan flertalet av de våta hålen också användas.

Prototyp för buffertlyftverktyg har funnits och testats sedan en tid tillbaka. Även prototyputrustning för att installera pellets i deponeringshål har tagits fram och testats vid Äspölaboratoriet.

Program

Under Fud-perioden behöver kunskapen om de tidiga termiska, hydrauliska och mekaniska processerna i bufferten för olika vatteninflöden vidareutvecklas. Kunskapen behöver vara tillräckligt utvecklad för att kunna bedöma hur processerna påverkas av olika utformning av buffertkomponenterna, till exempel inverkan av segmenterade block. Storleken på hävning och eventuell krympning för olika vatteninflödessituationer behöver kunna bestämmas så att hänsyn kan tas när bufferten utformas. Gränsen mellan torra och våta deponeringshål behöver också bestämmas baserat på kunskapen om de tidiga THM-processerna. För att åstadkomma detta kommer tester i olika skala och modellering att genomföras.

För att verifiera att installation av buffert fungerar som avsett och genererar en utformning inom acceptabla intervall kommer en ny prototyputrustning att utvecklas och konstrueras. Tester kommer att genomföras i fullskala både ovan jord och vid underjordsförhållanden som en del av integrations-testerna på Äspölaboratoriet.

11.6.3 Installation av återfyllning

Nuläge

Utrustning för installation av återfyllning har utvecklats och testats och testerna avslutades med ett installationstest i full skala i Äspölaboratoriet (figur 11-15). Totalt installerades 12 meter återfyllning i en tunnel på 450 meters djup med samma dimensioner som en framtida deponeringstunnel. Installationen genomfördes med prototyputrustning och en del tillfälliga lösningar med manuell hantering som inte kommer att användas i Kärnbränsleförvaret, vilket gör att slutsatser om kapaciteten inte kan dras. Bedömningen är ändå att föreslaget installationskonceptet är lämpligt för återfyllning. Testet visade att det går att installera block och pellets så att installerad densitet blir tillräcklig för att återfyllningen ska uppfylla sina krav (Arvidsson et al. 2015). En ny utrustning för automatisk installation av pelletsbädden har tagits fram som prototyp och har provats med gott resultat.

En viktig fråga vid återfyllningsinstallation är kunskapen om vattenfördelningen i berget och information om storleken av vatteninflödet till deponeringstunneln, som fås från detaljundersökningarna som sker i samband med uttag av tunnlar. I samarbete med Posiva har arbete utförts för att ta fram metoder för vattenhantering under installationsskedet. Arbetet har resulterat i ett flertal metoder som kan tillämpas, där valet av metod beror av vatteninflödets storlek och fördelning i deponeringstunneln (Sandén et al. 2018a).



Figur 11-15. Blockinstallation på 450 meters djup vid Äspölaboratoriet.

Program

För att verifiera att installation av återfyllning fungerar som avsett och genererar en utformning inom acceptabla intervall kommer en prototypustning för återfyllningsinstallation konstrueras under Fud-perioden. Tester kommer att genomföras i fullskala både ovan jord och vid underjordsförhållanden som en del av integrationstesterna på Äspölaboratoriet.

Vad gäller vattenhantering vid återfyllningsinstallation kommer arbetet fortgå för att utveckla och testa lämpliga metoder. Potentiella metoder kommer även att behöva testas i fullskala. Samarbete med Posiva pågår och kommer att fortsätta kring dessa frågor. Om tunnelprofilen ändras på grund av ändrad uttagsmetod behöver återfyllningens utformning anpassas.

11.7 Borrhålsförslutning

Det finns ett stort antal undersökningsborrhål i anslutning till det område där ovanjordsanläggningen för Kärnbränsleförvaret föreslås placeras samt i den berggeometri som är föreslagen för underjordsanläggningen. Ett antal av dessa borrhål behöver förslutas före byggstart. Övriga undersökningsborrhål som i dag är öppna behöver förslutas under senare skeden av byggprocessen då de kan utnyttjas för övervakning under byggskedet. För utbyggnaden av SFR finns också ett antal borrhål som behöver förslutas inför byggskedet.

Syftet med förslutningen är att återställa berggrundens hydrauliska egenskaper så att borrhålen inte bildar flödesvägar för grundvatten och därmed inte heller bidrar till en ökad spridning av radionuklider till markytan (från en kapsel om den skadas).

Nuläge

SR-Sites utvärdering av referensutformningen för borrhålsförslutningen visade att inverkan av dåligt förslutna borrhål var mycket begränsad samt att kraven möjligen var högt ställda då även öppna borrhål utan förslutning verkar ha mycket begränsad inverkan på grundvattenflödet i Kärnbränsleförvaret.

Även efterföljande känslighetsanalyser (Luterkort et al. 2012) visar att en hydraulisk konduktivitet hos förslutningsmaterialet upp till 10^{-6} m/s inte medför en signifikant ökad spridning av radionuklider till markytan. Detta föranleder att SKB nu har ändrat kravet på borrhålsförslutningens täthet. SKB har genom ett teknikutvecklingsprojekt tagit fram en metod för borrhålsförslutning för att möta de nya kraven. Projektet har genomfört verifierande laboratorieförsök av förslutningens ingående material (sand, bentonit, betong och kopparexpanders) samt genomfört ett fullskaligt installationsförsök i borrhål KAS13 på Äspö. Laboratorieförsöken och installationsförsöket har dokumenterats i en teknisk rapport (Sandén et al. 2018b).

Den föreslagna metoden kan sammanfattas enligt följande:

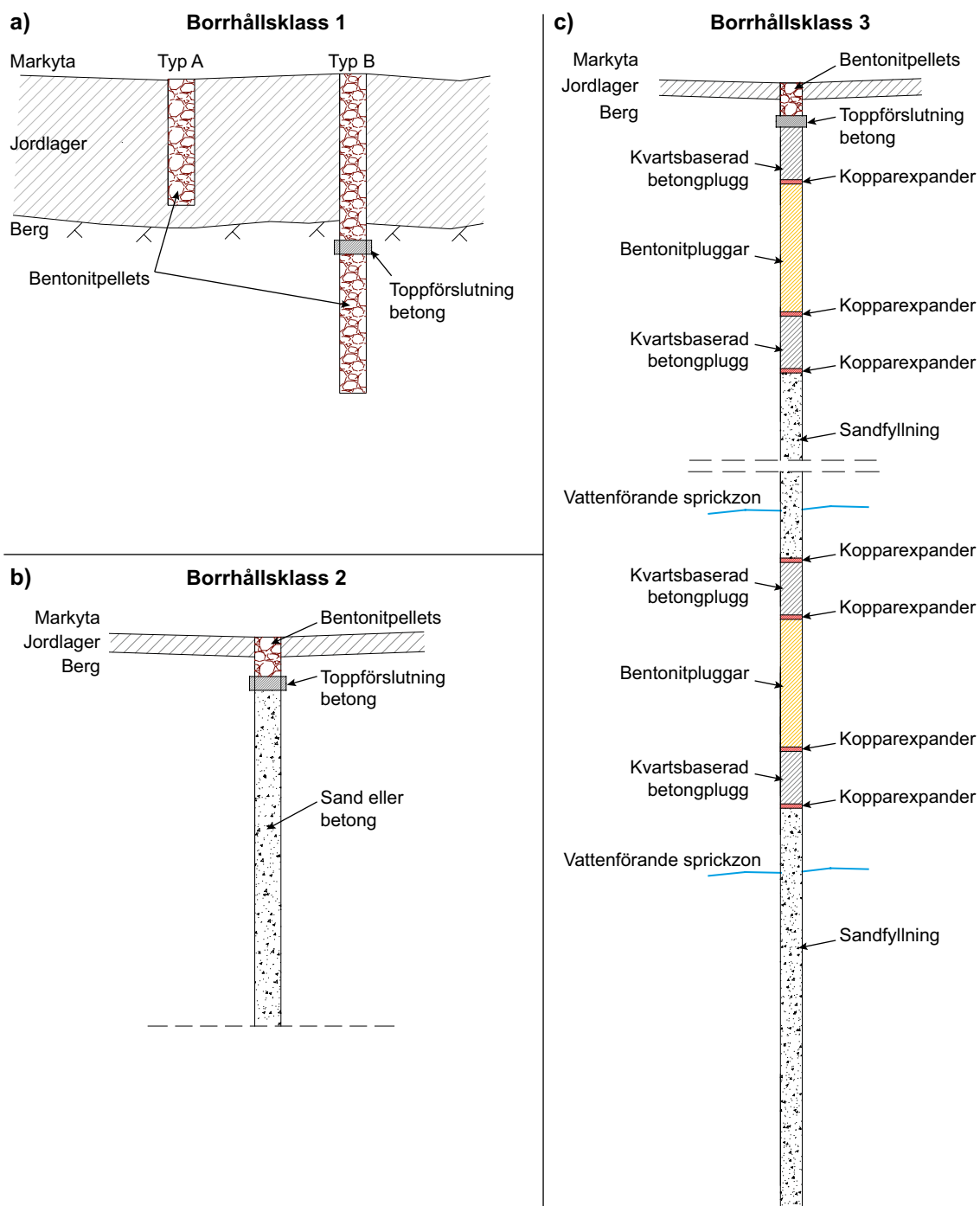
- Indelning av undersökningsborrhål i tre klasser, borrhålsklass 1–3 baserat på hydraulisk kontakt med förvaret, borrhålsdjup och avstånd till förvaret.
- Förenklad installationsmetod för borrhålsförslutning av undersökningsborrhål som inte står i hydraulisk kontakt med förvaret. Dessa borrhål tillhör borrhålsklass 1 och 2 där klass 1 innefattar grunda borrhål och klass 2 är djupare. Borrhålen i klass 1 försluts med bentonitpellets (figur 11-16a). Borrhålen i klass 2 försluts med sand eller betong i den del av borrhålet som går i berg. Den övre delen av borrhålet, som går i jord, försluts med bentonitpellets (figur 11-16b).
- Borrhålsförslutning enligt sandwichmetoden för borrhålsklass 3. Borrhål i denna klass står i hydraulisk kontakt med förvaret och kräver därför den tätaste förslutningen. Dessa hål försluts till största delen med sand samt med strategiskt placerade tätsektioner bestående av bentonit, koppar och betong (figur 11-16c).

I det genomförda fullskalförsöket installerades två olika sorters betong (kvartsbaserad betong och anläggningsbetong), 106 meter sand, cirka tio meter bentonit och sju kopparexpanders.

Program

Baserat på resultaten från utvecklingen av metod för borrhålsförslutning har följande analyser gjorts avseende kvarstående frågor:

- Installation har i dagsläget genomförts i kärnborrhål med diametern 76 mm. För att vara säker på att metoden även fungerar för grövre hammarborrhål bör tester genomföras i denna typ av borrhål.
- Betong ingår som en installationskomponent i borrhålsförslutningen. Betongens långtidsegenskaper behöver utvärderas.
- I borrhålsklasser 1 och 2 finns i designen i dag en toppförslutning av platsgjuten betong. Behovet av toppförslutningen behöver utvärderas vidare.
- I borrhålsklasser 2 och 3 utgörs installationsmaterialet till största del av sand. Sanden är ensgraderad med en kornstorleksfördelning på 0–2 mm. I bergvolymen i Forsmark förekommer sprickstrukturer med aperturer större än 2 mm vilket medför att det kan finnas en risk att en del av sanden försvinner ut i dessa med risk för att sandfyllningens densitet i borrhålet förändras med tiden. Omfattningen av detta behöver utredas ytterligare.
- Installation av borrhålsförslutningens tätsektioner i borrhålsklass 3 sker med en borrhög. I djupa borrhål är transporten av borrhålssträngen ner till avsedd nivå tidskrävande. Därför finns det behov av att utvärdera möjligheterna till att optimera installationen av tätsektioner.



Figur 11-16. a) Design för borrhålsförslutning av borrhål i borrhållsklass 1. b) Design för borrhålsförslutning av borrhål i borrhållsklass 2. c) Design för borrhålsförslutning av borrhål i borrhållsklass 3.

11.8 Förslutning

11.8.1 Förslutning av Kärnbränsleförvaret

Nuläge

En förenklad utformning av förslutningen har föreslagits baserat på utförda känslighetsanalyser. Dessa beskrivs i Luterkort et al. (2012). Förslutningskomponenternas storlek och funktion kan ha påverkan på förvarets utformning, vilket gör att fortsatta insatser behövs på detta område.

Program

En övergripande förslutningsplan kommer att tas fram för att ge ytterligare detaljer avseende förslutningssekvens och förslutningspluggarnas funktion och storlek.

11.8.2 Förslutning av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SR-PSU samt efterföljande analyser har resulterat i uppdaterade krav på förslutningskomponenterna för SFR. Behov finns därför av vidareutveckling av utformningen och ytterligare studier rörande installation av förslutningen. Detaljprojektering av utbyggnaden av SFR samt fördjupad kunskap om bergets egenskaper kan också påverka utformningen av förslutningskomponenterna. Baserat på översynen uppdateras förslutningsplanen inför PSAR.

Nuläge

I samband med inlämnandet av ansökan om utbyggnad av SFR utarbetade SKB en förslutningsplan för den utbyggda anläggningen (Luterkort et al. 2014). Förslutningen beskrivs på konceptuell nivå och inför PSAR kommer kunskapen kring material, konstruktion och installation att fördjupas.

Avgränsade studier av enskilda förslutningskomponenter, exempelvis modellering av betongpluggar, har genomförts under perioden för att utveckla förståelsen för egenskapsutvecklingen över tid och för att detaljera kravbilden. Vidare har förstudier bedrivits rörande de praktiska förutsättningarna för förslutningens genomförande för delar av den befintliga anläggningen. Studierna syftar till att utgöra underlag för en sammanhållen uppdatering av förslutningskonceptet i ett senare skede.

Program

Kravbilden kopplat till anläggningens förslutning fortsätter att utvecklas under Fud-perioden, dels egenskapskraven för olika återfyllnads- och förslutningskomponenter, dels de praktiska förutsättningarna för installation i förvaret.

SKB planerar för en fortsatt teknikutveckling av betongpluggar för att åstadkomma en robust utformning som möter aktuell kravbild och de praktiska förutsättningarna i förvaret. Då den slutgiltiga layouten för utbyggnaden bestämts kan eventuellt en mer noggrann dimensionering av varje betongplugg behöva initieras.

Baserat på en utvecklad kravbild kan utvecklingen av konceptet för jorddammspluggen och övergångsmaterialet fortsätta. I första hand förutses beräkningar, parameterstudier samt modellering för att studera egenskapsutvecklingen över tid hos jorddammspluggen och dess olika materialkomponenter.

Den utvecklade kravbilden ligger även till grund för en mer detaljerad analys av hur bentoniten i de täta sektionerna ska utformas och installeras. Möjliga lösningar för att uppnå tillräckligt hög densitet i de hydrauliskt täta sektionerna med bentonitpellets eller granulerad bentonit behöver identifieras och värderas.

12 Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden över den tid som avfallet ska isoleras för att det inte ska utgöra en hälsorisk för människor eller andra organismer. Berggrunden ska också utgöra en barriär som så långt som möjligt förhindrar eller fördröjer transporten av radionuklider från ett förvar till ytsystemet. För att detta ska kunna uppnås behövs dels tillräcklig kunskap om förhållandena i berggrunden och om de processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaret, dels behöver slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen utformas på ett sådant sätt att de långsiktigt stabila förhållandena inte äventyras. En stor del av de forsknings- och teknikutvecklingsfrågor som berör berget och slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen är gemensamma för de tre olika förvaren.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns ett antal frågor som behöver vidare insatser. När det gäller både Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR behöver dessa frågor vara lösta inför SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga milstolpar. Den nyligen genomförda säkerhetsvärderingen av SFL baserades på befintlig kunskap om berget som barriär och på det som tidigare tagits fram för Kärnbränsleförvaret och SFR. Säkerhetsvärderingen av SFL har pekat på några områden där ytterligare kunskap behövs (se även kapitel 6).

Bergutrymmen utgörs av de utrymmen och konstruktioner i berget som krävs för slutförvarsanläggningarnas undermarksdelar. Vid utformning av bergutrymmena behöver hänsyn tas till:

- Utrymmenas rumsliga geometri och placering.
- Det berg som omger utrymmena och som påverkats av byggnationen.
- Konstruktioner och främmande material, som används för tätning, bergförstärkning och genomförande av verksamheterna i anläggningen, och som efter deponering, återfyllning respektive förslutning finns kvar i eller på berget som omger utrymmena.

För bergets funktion som barriär när det gäller Kärnbränsleförvaret är det främst placeringen av deponeringsområden och deponeringshål, med hänsyn tagen till bergets termiska, hydrogeologiska, mekaniska och kemiska egenskaper, som är viktig.

12.1 Karaktärisering och modellering av bergets egenskaper

12.1.1 Bergmassans mekaniska egenskaper

Kopplade modeller av bergmassan förutsätter att bergets mekaniska egenskaper kan beskrivas i olika skalor. Beskrivningarna måste på ett korrekt sätt representera ett kristallint sprickigt berg med hänsyn tagen till dess inneboende deformationszoner och sprickor i olika skalor. Empiriskt baserade metoder för karaktärisering av bergmassans mekaniska egenskaper är mycket effektiva för utformning och konstruktion av förvaren, men analys av säkerhet efter förslutning kräver en djupare och mer grundläggande förståelse och karaktärisering av de kopplade termiska, hydrauliska och mekaniska processer (THM-processer) som påverkar bergmassans beteende.

De numeriska verktygen för att modellera en syntetisk bergmassa har kontinuerligt utvecklats och på senare år genomgått en snabb utveckling. Med syntetisk bergmassa (Synthetic Rock Mass, SRM) avses modeller av berg i vilka spricknätverken är explicit representerade tillsammans med de mellanliggande, så kallade intakta, blocken.

Nuläge

För karaktärisering av bergmassans mekaniska (M) och hydromekaniska (HM) egenskaper har diskontinuum-metoder baserade på den diskreta elementmetoden (DEM) i programvarorna UDEC (Itasca 2014b) och 3DEC (Itasca 2013) utvecklats. Dessa verktyg har använts av SKB som komplement till den traditionella, empiriskt baserade, metodiken för beräkning av bergmassans mekaniska egenskaper (se till exempel Olofsson och Fredriksson 2005, Glamheden et al. 2007).

Partikelbaserade verktyg av typen Particle Flow Codes (se till exempel Itasca 2014a) har tidigare visat förmåga att återge grundläggande och mer subtila aspekter av sprickbildning och sprickpropagering i berg (Potyondy och Cundall 2004). Även denna typ av programvaror har på senare tid utvecklats till att kunna inkludera diskreta spricknätverk och därmed möjliggjort mer komplexa representationer av bergmassan (Mas Ivars et al. 2011). Utvecklingen av programvarorna har gjort det möjligt att modellera brott i intakt berg och att inkludera effekten av isolerade (ej blockdefinierande) sprickor på bergets hållfasthet och styvhet. Modellering av SRM är emellertid alltså begränsad av numerisk beräkningskapacitet, vilket ger begränsningar i termer av modellstorlek (skala), detaljeringsgrad och komplexitet. Trots detta har SRM-modeller på ett avgörande sätt kunnat bidra till framtagandet av DFN-baserade (Discrete Fracture Network), analytiska ekvationer som kan beskriva bergmassans egenskaper. En strategi där analytiska och numeriska modeller kombineras har tagits fram, och Darcel et al. (2015) har nyligen tillämpat denna strategi för Posivas räkning med syftet att definiera en analytisk metod för att förutsäga effektiva elastiska egenskaper vid olika skalor (upp till 100 meter). Under de senaste tre åren har strategin vidareutvecklats med avseende på elastiska egenskaper (Davy et al. 2018a, Darcel et al. 2018).

HM-egenskaperna hos enskilda sprickor har avgörande betydelse för bergets barriärfunktion eftersom de styr hur de lokala spricktransmissiviteterna varierar med spänningen och bergmassans styvhet, samt hur hållfasthet påverkas i olika skalor. SKB har tillsammans med Posiva och NWMO deltagit i Post-projektet (Fracture parameterisation for repository design and post-closure analysis), vilket syftade till att förbättra kunskapen om hur en sprickas skjuvegenskaper kan skalas upp. Slutsatser och lärdomar från Post-projektet om sprickors skjuvhållfasthet, baserat på laboratorietester, numeriska simuleringar och skjuvtester på sprickor in situ, sammanfattas av Siren et al. (2017). Baserat på rekommendationerna från Post-projektet har en andra fas påbörjats, i vilken NWMO och SKB samarbetar. Denna nya projektfas fokuserar på laboratorietester och numerisk och analytisk modellering. Nyligen har Stigsson och Mas Ivars (2019) presenterat en förbättrad procedur för att uppskatta JCR (Joint Roughness Coefficient) baserat på karterat sprickspår. Effekten av storskalig undulation på sprickors skjuvmekaniska beteende har studerats med stöd av SKB (Lönqvist och Hökmark 2015). I ett doktorandprojekt studerades effekterna av sprickgeometri på hydromekaniska egenskaper hos kristallin berggrund (Thörn 2015).

I samband med höga normalspänningar över sprickor minskar effekten av dilatation (volymökning), men det finns fortfarande osäkerhet i hur mycket detta påverkar transmissiviteten. En ökning av normalspänningen från 2 till 4 MPa föreföll att undertrycka ökningen av transmissiviteten mycket effektivt i hydromekaniska skjuvtester utförda av Olsson (1998) och Esaki et al. (1999), å andra sidan observerades transmissivetsökningar på mellan en och två storleksordningar vid tester som utfördes under höga normalspänningar på artificiellt skapade granitsprickor. Det är emellertid inte klart om beteendet hos de artificiella sprickorna kan anses vara representativt för naturliga sprickor. Ett försök som utfördes med en normalspänning av 20 MPa, och en upprepad skjuvning i omvänd riktning, gav obetydliga transmissivitetseffekter för skjuvbelopp upp till 10 millimeter. I den nuvarande förståelsen av THM-aspekter i Forsmark och Laxemar (Hökmark et al. 2010) antas att höga normalspänningar dämpar transmissivitetseffekter.

De osäkerheter som fortfarande finns rörande sprickornas HM-egenskaper handlar således främst om skaleffekten och om förändringar av transmissivitet som funktion av skjuv- och normallast.

Program

Insatser planeras för att fortsätta med utvecklingen av en ”state of the art”-metodik för beräkningar av bergmassans hydromekaniska egenskaper. Metodiken ska omfatta följande:

- Etablering av effektiva HM-egenskaper i olika skalor baserade på DFN för initialtillståndet.
- Egenskaper hos och regler för ansättning av egenskaper på DFN, som till exempel sprickors transmissivitet, behöver analyseras och utvecklas så att ett relevant initialtillstånd kan erhållas. Hur detta kan konceptualiseras i storskaliga modeller (till exempel DarcyTools, 3DEC) behöver utredas.
- Jämförelse mellan modellering och in situ- och/eller laboratorietester används för att etablera konstitutiva samband för att beskriva hur de effektiva HM-egenskaperna varierar med spänningsfältet och porvattentrycket.

För att förbättra den hydromekaniska förståelsen av sprickor planeras insatser för att klarlägga sambanden mellan sprickapertur och transmissivitet. Den hydrauliska aperturen, och därmed transmissiviteten, är en funktion av mekanisk apertur, dess standardavvikelse och sprickkontaktytan. En genomgång planeras av utförda arbeten (litteraturstudie), med koppling till flödestester i samband med skjuvning i kristallint, hårt, berg och analoga material. Dessutom planeras flödesförsök under skjuvning med olika initiala normalspänningsnivåer för att avgöra om, och i så fall i vilken omfattning, höga normalspänningar begränsar transmissivitetsökningen. Numerisk, HM-kopplad, modellering av flödesförändring som effekt av skjuvning ska också genomföras.

Följande mekaniska egenskaper och parametrar för sprickor behöver fastställas eller uppskattas för att kunna bedöma sprickors påverkan på byggbarhet och på förvarens säkerhet efter förslutning:

- Normalspänningens påverkan på normalstyvhet, skjuvstyvhet, friktionsvinkel, kohesion och dilatansvinkel.
- Det skjuvbelopp där dilatansen börjar och upphör.
- Effekterna av sprickmineraler och spricktjocklek (mineralutfyllnad) på sprickors mekaniska och hydrauliska egenskaper.
- Skaleffekter på skjuvhållfasthet, normalstyvhet, skjuvstyvhet och dilatansvinkel, som en funktion av sprickråhet, undulation, kontaktyta och mineralutfyllnad.

12.1.2 Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning

SSM ansåg att vissa konceptuella frågeställningar från granskningen av Fud-program 2013 inte i tillräcklig omfattning beaktats i Fud-program 2016. SSM betonade speciellt frågeställningar om sprickbildning, sprickpropagering och sammanlänkning av existerande sprickor i närheten av deponeringshålen. De processer och scenarier där SSM särskilt önskade ytterligare analyser gällde reaktivering av deformationszoner och spricköppning/-stängning på grund av storskaliga termiskt inducerade spänningar i slutförvarsanläggningens närområde eller nära ytan (Min et al. 2005, 2013, 2015, Rutqvist och Tsang 2008), samt inverkan av en inlandsis på spricköppning/-stängning, sprickpropagering och kortslutning av spricknätverket mellan närliggande deponeringshål (Min et al. 2005, 2015, Backers och Stephansson 2012). Angående modelleringstekniska aspekter framhöll SSM att när det gäller bergmekanik och kopplade processer så bör SKB i modelleringen eftersträva att kvantifiera inverkan av realistiska sprickgeometrier på bergets tillstånd och på processer relevanta för säkerheten.

Nuläge

Vad gäller långsiktig hållfasthet och stabilitet presenterades i Fud-program 2010 en samordnad utredning som behandlar mikrosprickors uppträdande, subkritisk sprickbildning och krypning (Damjanac och Fairhurst 2010). Utredningsarbetet var baserat på tolkning av resultat från korttidsprovning av krypning i bergprover, numeriska modellanalyser av effekten av minskad sprickråhet på grund av spänningskorrosion av bergets hållfasthet samt belägg från plattetektoniska processer och observationer av bergspänningar i bergtäkter. Publikationens slutsatser var sammanfattningsvis att en spänningströskel (det vill säga en deviatorisk spänning som kan upprätthållas på obestämd tid) existerar för kristallina bergarter (40–60 procent av enaxlig tryckhållfasthet). Vidare var en slutsats att en extrapolation av en exponentiell anpassningsmodell till resultaten av korta kryptester ger en realistisk, tidsberoende, hållfasthet motsvarande en drivande spänningsrelation (från engelskans Driving Stress Ratio) av cirka 0,45. Detta innebär att en linjär extrapolation till en slutgiltig nollhållfasthet är obefogad (Potyondy 2007).

SKB har sedan Fud-program 2007 utrett mycket långsiktiga processer för bergets hållfasthetsutveckling. Det finns dock fortfarande ett behov av att studera dynamiska processer hos sprickor och förkastningar som utlöses under mycket korta tidsperioder och vid överskridandet av materialens hållfasthet, exempelvis vid jordskalv, vilket även SSM påpekade i sin granskning av Fud-program 2016. I detta sammanhang bör även temperaturpåverkan beaktas. Vidare finns ett behov av att genomföra studier för att klarlägga om tidsberoende spricktillväxt påverkar stabiliteten och vattengenomsläppligheten i Kärnbränsleförvarets närområde under förvarets olika faser. I sådana studier

kommer man att behöva ta hänsyn till spänningskorrosion vid sprickändar (det vill säga subkritisk spricktillväxt vilken påverkas av de grundvattenkemiska förhållandena) i alla belastningsfall (drag, skjuvning, rivning) i och med att spricktillväxten inte bara sker under drag, utan även under skjuvning eller rivning vid starkt inspända förhållanden (Backers 2005, Backers och Stephansson 2012).

Program

Följande utveckling avseende modelleringskapacitet och modelleringsförmåga planeras:

- Sprickpropagering. Utveckling av analytisk och numerisk metodik för att studera hur sprickor växer ihop på olika skalor. För detta behövs ett program med begränsat antal laboratorieförsök.
- Bergets långsiktiga hållfasthet. En kompletterande litteraturstudie och datainsamling planeras.
- Transmissivitetsförändringar i bergmassan på grund av spänningsförändringar som orsakas av bergguttar eller av seismisk, termisk eller glacial last, inklusive inverkan av realistiska sprickgeometrier.
- Spjälkning och dess inverkan på transmissiviteten kring deponeringshål och -tunnlar som effekt av spänningsförändringar orsakade av bergguttar samt av seismisk, termisk och glacial last.

12.1.3 Bergspänningar

Bergspänningsmodellen för Forsmark innehåller stora osäkerheter, och det finns ett behov av insatser för att försöka reducera dessa osäkerheter. I sin granskning av Fud-program 2010 påpekade SSM att SKB bör följa upp de tidigare ansatserna som förefaller ha gett lovande resultat för Laxemar och Forsmark (Mas Ivars och Hakami 2005, Hakami 2006, Hakami och Min 2009). SSM ansåg vidare att SKB bör studera hur bergspänningsmodellerna för Kärnbränsleförvarets närområde förhåller sig till de storskaliga spänningsmodellerna som används för att beräkna spänningarna under en glacial cykel (Lund et al. 2009). En uppdaterad bergspänningsmodell i 3D baserad på aktuell geologisk strukturmodell (Stephens och Simeonov 2015) har tagits fram (Hakala et al. 2019). Det huvudsakliga syftet med modellen var att förbättra metodiken för att i hög upplösning (30–100 meters block) beskriva rumslig variabilitet i spänningsellipsoidens form och riktning.

Nuläge

Två projekt avseende bergspänningsmätningar har utförts under de senaste åren. Slits-projektet (Slim borehole Thermal Spalling) har utvecklat en metod för bestämning av bergspänningarnas orientering (Hakami 2011) i borrhål. Metoden bygger på att inducera termiska spänningar i ett borrhål tills spjälkning uppstår och, med antagande om korrelation mellan spänningsfältet och de inducerade sprickornas orientering, kan den största horisontella huvudspänningen beräknas. Det andra projektet (Hakala et al. 2013) har tagit fram en LVDT-cell (Linear Variable Differential Transformer) för bergspänningsmätning i tunnlar. Instrumentet installeras i ett antal pilotborrhål med diametern 120 millimeter i en tunnelsektion och överborras därefter med en diameter på 200 millimeter. Töjningsdata från LVDT-givarna, som mäter i fyra olika riktningar, tillsammans med en detaljerad laserskannad modell av tunnelavsnittet där mätningen utförts samt en elasticitetsmodul uppmätt på solida borrhåll från pilot-hålen ligger till grund för inversmodellering av det rådande spänningsfältet. Verifierande mätningar med LVDT-cell i Äspölaboratoriet på 450-metersnivån, där spänningsfältet är väl karakteriserat, visar att resultaten från mätningarna med LVDT-cellen överensstämmer med resultat från tidigare studier som bland annat inkluderat överborrningsmätningar, och med tidigare utvecklad spänningsmodell (Christiansson och Janson 2003).

Program

Den nya uppdaterade bergspänningsmodellen för Forsmark i 3D (Hakala et al. 2019) är en av komponenterna i den uppdaterade metodiken för kontinuerlig bearbetning av geologisk data och bergspänningsdata som utvecklas och som kommer att utgöra en bas för uppdaterade beräkningar av risken för spjälkning och stabilitet inom olika förvarsvolymer. Den uppdaterade metodiken kommer också att ge randvillkor för övrig modellering av inducerade sprickrörelser (på grund av seismisk, termisk och glacial belastning) och kopplade hydromekaniska processer. Planen är sedan att modellen ska uppdateras kontinuerligt i samspel med uppdateringar av den geologiska strukturmodellen

och när nya bergspänningsdata (direkta och indirekta) finns tillgängliga i samband med uppförandet av Kärnbränsleförvaret. De detaljerade planerna för detta redovisas i det detaljundersökningsprogram som kommer att lämnas in till SSM som en del i ansökan att uppföra förvaret.

12.1.4 Modellering av diskreta spricknätverk

Diskreta spricknätverk, DFN, används inom modellering av bergmekanik, grundvattenflöde samt transport av lösta ämnen. Den explicita beskrivningen av enskilda sprickor innebär en stor fördel genom att storheter som används i modelleringen kan mätas direkt i fält (till exempel sprickintensitet och orientering). Beskrivningen och parameteriseringen av enskilda sprickor utgör ofta viktig indata vid analys av frågor som spelar stor roll för förvarens säkerhet efter förslutning (till exempel buffererosion och spridning av radionuklider från en skadad kapsel), liksom för frågor som behöver besvaras under konstruktions- och driftfasen. DFN-modellering inkluderar, förutom modellering av explicita nätverk, även olika metoder för att skala upp DFN-modeller till kontinuum-modeller, vilka ofta används på större skala. Både de explicita och de uppskalade modellerna utgör indata för bergmekanisk-, hydrogeologisk-, hydrogeokemisk- och transportmodellering.

Nuläge

Under Fud-perioden har verktyg- och metodik för konditionerade (betingade) DFN-modeller utvecklats. Syftet med denna metodik är att öka determinismen i de stokastiska DFN-modellerna, främst i närheten av tunnlar och deponeringshål där olika typer av data kan inhämtas. En ökad determinism förväntas leda till att de storheter som beräknas i grundvattenflödesmodeller baserade på underliggande konditionerade DFN-modeller, och som propageras till olika analyser av säkerhet efter förslutning, får lägre osäkerhet. Vidare möjliggör en större determinism att modellerna även kan användas för att testa olika kriterier för att förkasta/acceptera deponeringshålspositioner. Metodiken för konditionering, implementerad i två olika verktyg, har testats med data från förenklat beskrivna syntetiska platser och har presenterats i Bym och Hermanson (2018), resp Appleyard et al. (2018). Den metodik som användes i Appleyard et al. (2018) har även med framgång testats på data från Onkalo i Finland i Baxter et al. (2018).

Ett sätt att öka konfidensen i modelleringstekniken är att utforska andra DFN-verktyg med vilka alternativa sprickkonceptualiseringar kan utprovas. Mofrac är ett beräkningsverktyg för DFN-modellering som ursprungligen tagits fram av Srivastava (2002). Programmet har en regelbaserad sprickgenerator som främst bygger på de geostatistiska samband som kan härledas från platsundersökningar ovan och under jord. De genererade sprickorna i nätverken är strikt konditionerade till inmätta strukturer såsom lineament, sprickspår och borrhålsintercept, och programmet stöder generering av undulerande sprickytor och trunkering.

I ett projekt som leds av CEMI (Kanada) i samarbete med NWMO, Mirarco (Kanada) och SKB, uppdateras och utökas källkoderna som ursprungligen togs fram av Srivastava (2002) med syftet att möjliggöra bredare användningsområden inom främst gruv- och kärnavfallsindustrin. Mofrac har testats mot både syntetiska data och platsdata (Junkin et al. 2017, 2018). Arbetet med vidareutveckling av Mofrac kommer att fortsätta under Fud-perioden.

Vidare har ytterligare en alternativ metod, UFM (nearly Universal Fracture Model), för generering av DFN-modeller tagits fram i ett samarbetsprojekt mellan Itasca, Université de Rennes och SKB (Davy et al. 2010, 2013, 2018a, b, Lavoine et al. 2017, Le Goc et al. 2017, Darcel et al. 2018). Metoden fokuserar på sprickbildningsprocessen vid genereringen av spricknätverken. Det har kunnat påvisas att sprickornas storleksfördelning kan beskrivas som resultatet av två huvudprocesser:

- En tillväxtprocess, vars hastighet, dl/dt , förefaller vara proportionell mot sprickstorlek, l , upphöjt till en konstant, b , enligt: $dl/dt = Cl^b$, där C är en proportionalitetskonstant.
- En hierarkisk bromsningsprocess i vilken (pre-)existerande stora sprickor bromsar eller förhindrar tillväxten av mindre sprickor.

Denna metodik förenklar delvis den statistiska analysen av sprickdata genom införandet av en generell, dubbelt Pareto-fördelad, modell som förefaller kunna förklara större delen av data från platsundersökningarna i skalor relevanta för analyserna av säkerhet efter förslutning. Metodiken erbjuder även ett generiskt verktyg att utifrån enkla regler styra initiering, tillväxt och terminering av sprickor som kan

konditioneras mot observationer in situ (se vidare under Program). En fördel med UFM-konceptet relativt genereringsmetoder baserade på statistiska fördelningar är att de resulterande spricknätverken bättre efterliknar uppmätt data i termer av hur sprickor trunkerar mot varandra. Modellerna blir därmed visuellt mer verklighetstroga och konfidensen kan därmed anses öka.

UFM-modellerna har under Fud-perioden även använts inom hydrogeologiska applikationer, där det undersökts hur man från en geologiskt definierad DFN-modell som innehåller samtliga sprickor reducerar spricknätverket till de sprickor som är potentiellt hydrauliskt aktiva, det vill säga öppna. Även effekter av korrelations samband mellan sprickstorlek och transmissivitet, och mellan spänning (rock stress) och transmissivitet, har undersökts. Vidare har de resulterande modellerna jämförts med motsvarande Poissoniska modeller som SKB traditionellt använt i exempelvis Forsmark platsmodellering (Follin et al. 2007). Resultaten indikerar att UFM-modellerna generellt är mer kanaliserade, men har lägre effektiv permeabilitet, än motsvarande Poissoniska modeller. Dessa resultat är konsistenta med tidigare resultat (Maillot et al. 2016) där DFN-modeller har genererats som enbart innehåller hydrogeologiskt potentiellt aktiva sprickor. I Le Goc et al. (2018) har kalibrering av modellerna gjorts mot PFL-data (Posiva flödeslogg-data) och dessutom har metoder utvecklats för att effektivt kunna diskriminera resulterande modeller genom jämförande analys mot underliggande data. Tekniken för jämförelsen baseras på att beräkna effektiv permeabilitet samt en så kallad ”chanelling indicator” (som kvantifierar flödets kanalisering i enskilda sprickor och spricknätverk) som funktion av mätningarnas rumsliga skala. Denna jämförelse har visat sig kraftfull för att kunna avfärda vissa modeller (parameterkombinationer) i ett tidigt analyskede.

Vidare pågår ett projekt om kvantifiering av osäkerheter hos objekt karterade i borrhål och hur dessa osäkerheter påverkar tolkning av data mätta i borrhål samt vilka effekter det har på diskreta spricknätverksmodeller (Stigsson och Munier 2013, Stigsson 2016, 2018).

Program

Under Fud-perioden fortsätter framtagandet av en ny modelleringsmetodikrapport för DFN som beskriver nästa generation av DFN-modeller (det vill säga konceptuella antaganden samt databehov). I detta arbete ingår även att implementera den ovan nämnda metodiken för konditionering som tagits fram i SKB:s olika modelleringsverktyg. Inom ramen för framtagandet av metodikrapporten ska även ett antal konceptuella frågor kopplade till DFN-modellering belysas. Dessa inkluderar bland annat sambandet mellan intensitet och storlek för vattenförande sprickor, möjlig heterogen fördelning av sprickintensitet (effekt av kluster), deformationszonernas hydrauliska egenskaper och möjligheten att applicera ett DFN-koncept för beskrivning av dessa zoner samt osäkerheter i sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet. Även metoder som baseras på genetisk sprickgenerering, snarare än rent statistiska metoder, studeras (se nedan).

Effekter av osäkerhet i mätdata ska studeras vidare. Tidigare utfört arbete visar hur olika mätosäkerheter påverkar den totala osäkerheten i orientering för sprickor karterade i borrhål (Stigsson och Munier 2013, Stigsson 2016). Ett pågående forskningsprojekt handlar dels om hur denna totala osäkerhet kan uppskattas, dels om hur den totala osäkerheten propageras vidare då DFN-baserade modeller för flöde och transport upprättas. Den framtagna metodiken för att uppskatta total osäkerhet i orientering kan även appliceras på till exempel sprickorienteringar karterade i tunnlar och deponeringshål.

Vid användningen av DFN-modeller i SKB:s hydrogeologiska modellering antas sprickor typiskt vara planparallella. För att hantera detta i den efterföljande transportmodelleringen ansätts ibland skalningsfaktorer för att approximera effekten av den kanalbildning som uppstår på grund av intern aperturvariabilitet (det vill säga rumslig variation av sprickvidden hos enskilda sprickor). Med utveckling av högpresterande databehandling (High Performance Computing, HPC) kan i dag spricknätverk med intern variabilitet simuleras. Flera olika aspekter kan belysas, dels validiteten av det förenklade angreppssätt som skalningsfaktorer innebär, men minst lika viktigt är att undersöka hur kalibrering av modeller mot mätdata påverkas då intern sprickheterogenitet inkluderas. Vidare kan möjliga kanalbildningseffekter i spricknätverket och inom enskilda sprickor studeras. Ett samarbetsprojekt med Posiva fortsätter där bland annat beräkningsverktyget DFNworks (Hyman et al. 2015) används för att belysa frågorna. Resultaten av detta arbete kommer att gå direkt in i den nya DFN-metodiken.

De insatser som initierades i Fud-program 2016 för att utöka förståelsen av alternativ DFN-konceptualisering fortsätter under Fud-perioden. Givet utfallet av dessa insatser, kommer de alternativa modellkoncepten att beskrivas i modelleringsmetodikrapporten för DFN som likvärdiga koncept relativt den traditionella, statistiskt baserade metoden.

Utveckling av användargränssnitten för modellering med till exempel Mofrac och UFM planeras, och för att underlätta utbyte av spricknätverksmodeller mellan olika verktyg kommer speciella funktioner för interaktion mellan verktygen att tas fram. Vidare planerar SKB att ytterligare förfinas UFM-metodiken genom införande av alternativa initieringsprocesser för sprickbildning, som hittills antagits vara likformiga i rummet, och genom införande av korrelationer till sprickorienteringar och därmed indirekt till paleospänningsfält (det vill säga hur spänningsfältet varierat över tiden). Vidare kommer möjligheten att definiera en mättnadsgrad, det vill säga ett tillstånd då sprickbildning väsentligen avstannar, att undersökas med utgångspunkt från global energiförbrukning i sprickbildningsprocessen. Dessutom planeras utveckling av en ny metod för att kontinuerligt nästla olika skalor med syfte att effektivisera genereringen av stora modeller. Då koderna fortfarande är i en utvecklingsfas föreligger även ett behov av att utveckla ett effektivt användargränssnitt och interaktioner med andra DFN-koder och arbetet med detta har initierats.

SKB fortsätter även vidareutvecklingen av DFN-modellerna av UFM-typ för hydrogeologisk analys. Specifikt ska nu undersökas hur delvis öppna/slutna sprickor samt generell intern sprickvariabilitet kan inkluderas i UFM-konceptet, samt vilka effekterna av detta blir på resulterande konnektivitetsstruktur, flöde och transport. Även användandet av grafteori för att på ett förenklat sätt studera flöde och transport i denna typ av enskilda sprickor och spricknätverk ska studeras. Den funktionalitet som tas fram ska implementeras i ett nytt paket av beräkningsverktyg, DFNLab, inriktat på just UFM-konceptet. UFM-konceptet kommer, tillsammans med andra möjliga genetiskt baserade sprickgenereringskoncept, att ingå som potentiellt viktiga delar i den nya DFN-metodiken.

Ett pågående doktorandprojekt fortsätter (del av EU-projektet Enigma) där det med hjälp av fältexperiment på Äspölaboratoriet och numerisk modellering utreds om konditionering av spricknätverk (på deponeringshållsskala) kan ske på data från hydrauliska tester kombinerade med spårämnesförsök och geofysiska mätningar (GPR, Ground Penetrating Radar). Specifikt injiceras färskvatten med tillsatt spårämne i ett borrhål under tunnelgolv medan genombrott studeras i närliggande borrhål. Det injicerade vattnets salinitetsdifferens jämfört med formationsvattnet med förhöjd salthalt möjliggör GPR-mätningar från tunnelns golv för att studera spricknätverkets egenskaper. Under Fud-perioden ska detta projekt avslutas och rapporteras.

12.2 Seismisk påverkan på förvarens säkerhet

Under de antaganden som gjordes i SR-Site ger effekten av jordskalv på säkerhet efter förslutning ett betydande riskbidrag för Kärnbränsleförvaret (SKB 2011b). Riskbidraget är mycket starkt kopplat till de frekvens-magnitudsamband som föreslagits för kort (Bödvarsson et al. 2006) och lång sikt (Hora och Jensen 2005, Fenton et al. 2006). Osäkerheterna i framför allt de långsiktiga prognoserna är betydande, i synnerhet vad gäller skalvaktiviteten i samband med avsmältningen av en inlandsis. En underskattning av den seismiska aktiviteten medför en underskattning av långsiktig risk, medan en överskattning leder till en överdimensionering av slutförvarsanläggningen.

Metodiken för modellering av jordskalvens effekter på ett KBS-3-förvar har utvecklats under lång tid (Fälth och Hökmark 2006, Fälth et al. 2007, 2008), och har efter omfattande tester (Fälth et al. 2014) och fallstudier (Fälth et al. 2016, 2017, Fälth 2018) nått en hög mognadsgrad. Emellertid krävs ett utökat antal beräkningsfall för att ringa in ett pessimistiskt, men relevant, utfallsrum, samt ett antal alternativa konceptualiseringar, för att ytterligare utmana den antagna pessimismen i nuvarande angreppssätt. Övriga utvecklingsinsatser som indirekt berör skalvmodellering redovisas i avsnitt 12.2.3.

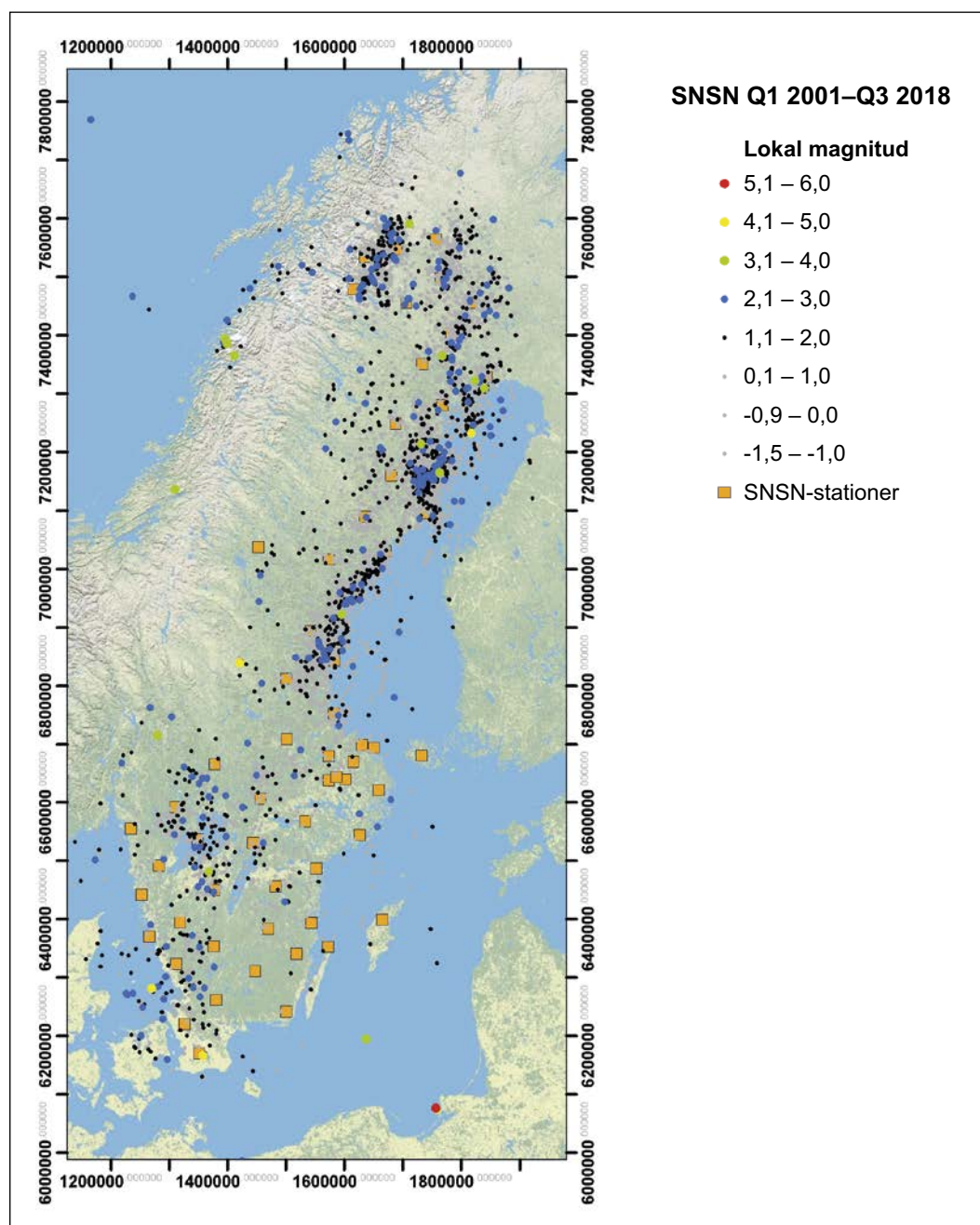
I säkerhetsvärderingen för SFL har ingen analys gjorts av vilka effekter ett eventuellt jordskalv kan ha på förvarets barriärsystem. I framtida analyser för SFL behöver barriärsystemets tålighet för dessa processer utvärderas. Resultaten kan bidra till optimering av förvarsdesignen.

De studier som planeras i föreliggande forskningsprogram syftar till att ytterligare öka förståelsen av de glacialt inducerade skalven, och dess kopplingar med nutida seismicitet, med målet att genom fördjupad förståelse minska osäkerheterna och därmed öka tilltron till analyser av säkerhet efter förslutning.

12.2.1 Seismisk övervakning

Nuläge

Det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) har sedan starten av det automatiska systemet år 2000 registrerat, lokaliserat och beräknat fokalmekanismer för mer än 9000 jordskalv (figur 12-1) med magnituder mellan cirka -2 och 5 . Under 2008 instrumenterades den sista större utbyggnaden av nätet, i sydvästra Sverige, och sedan dess har SNSN en god täckning i de seismiskt mest aktiva områdena av landet. I dagsläget finns 65 fasta stationer installerade samt ett varierande antal temporära stationer.



Figur 12-1. Jordskalv registrerade med svenska nationella seismiska nätet (SNSN 2015) under åren 2001–2018. Data från SNSN (Böðvarsson 2012).

Sedan 2008 samlar SNSN kontinuerligt in data i realtid från samtliga stationer, vilket gör att mängden data för analys ökat signifikant jämfört med tidigare år då endast datasegment från detekterade händelser samlades in. Det nya förfinade seismiska nätet har på ett fundamentalt sätt förbättrat möjligheterna till tolkning av jordskalvsaktiviteten i Sverige vilket, jämte paleoseismiska studier, utgör fundamentet för prediktion av framtida skalvaktivitet. Kontinuerlig, långsiktig övervakning av skalv är kritisk för att kunna fånga upp mönster av frekvens och magnitud, som kan variera i både tid och rum.

En tomografisk analys (se exempelvis Tryggvason och Linde 2006), som ger en tredimensionell hastighetsmodell är avslutad och rapportering pågår. Resultatet har använts för omlokaliseringar av jordskalven. Kopplat till detta har även en så kallad "multi-event-analys" av jordskalvslokaliseringarna genomförts vilket avsevärt förbättrat precisionen på lägesbestämningarna och beräknade magnituder. Omlokaliseringarna utgör underlag till pågående omberäkningar av fokalmekanismer och spänningsinversion vilket bland annat används till att beräkna spänningsfält på stora djup.

Program

Vad gäller det fasta seismiska nätet planerar inte SKB för några särskilda insatser inom Fud-perioden och samarbetet med SNSN fortgår som planerat. Däremot planeras en utvidgning av det fasta nätverket med ett antal temporära stationer (avsnitt 12.2.2).

12.2.2 Undersökningar av glacialt inducerade förkastningar

Nuläge

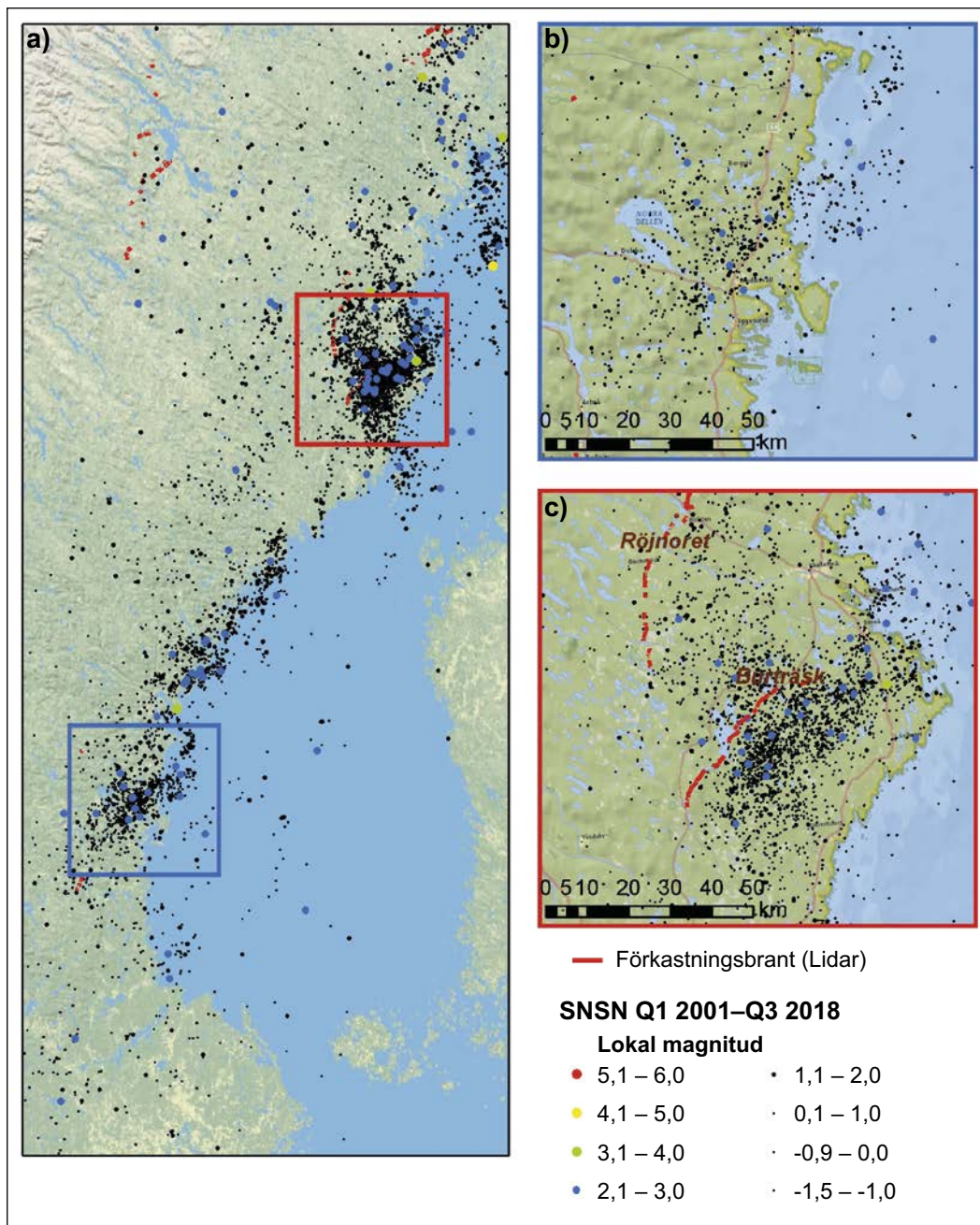
Burträsk är det mest seismiskt aktiva området i Sverige (figur 12-2c). Uppsala universitet har sedan några år tillbaka förtätat de seismiska stationerna i Burträskområdet för att få mer precisa data (Lund et al. 2015, 2016). Resultatet av förtätningen har varit mycket lyckosamt då det har kunnat visas att skalven ansamlas längs den förkastningsbrant som först identifierades av Lagerbäck och Sundh (2008) och senare detaljerades av Mikko et al. (2015). Reflektionsseismik har tidigare visat ett väldefinierat förkastningsplan ner till cirka tre kilometers djup med stupning omkring 55° (Juhlin och Lund 2011). Jordskalven ansamlas i detta plans förlängning och analyserna indikerar vidare (pågående arbete) att endast den övre skorpan, ner till 15–20 kilometer, deltog i den postglaciala reaktiveringen av deformationszonen (Lund et al. 2015). Detta påverkar beräkningar av skalvets storlek, och har stor betydelse för vår förståelse av glacialt inducerade skalv och därmed vår förmåga att hantera framtida skalv.

Registreringar av SNSN (2015) visar ett mycket distinkt, nordostligt strykande, kluster av skalv nordväst om Iggesund (figur 12-2b). Då en klar korrelation mellan recenta skalv och glacialt inducerade förkastningar har kunnat påvisas för merparten av de hittills registrerade förkastningarna (Lindblom et al. 2015) innebär detta att det kluster av skalv som identifierats nordväst om Iggesund är en stark indikation på att det kan finnas en hittills oupptäckt, glacialt inducerad förkastning i detta område. Den relativa närheten till Forsmark gör det särskilt angeläget att dessa indikationer undersöks närmare.

Lantmäteriets Lidar-mätningar (Lysell 2013, Lantmäteriet 2015) har ommodellerats för Uppland till en högre upplösning (1 meter). Baserat på detta har till de tidigare rapporterade analyserna (Mikko et al. 2015) en kompletterande, mer högupplöst, analys av potentiella förkastningsbranter genomförts (Öhrling et al. 2018). Resultatet av denna studie bekräftar de tidigare genomförda studierna i undersökningsområdet (Lagerbäck och Sundh 2003, 2008, Lagerbäck et al. 2004, 2005, Mikko et al. 2015) i det att det inte är möjligt att bekräfta förekomsten av glacialt inducerade förkastningar i Uppland.

Program

Ett projekt har initierats för att fördjupa undersökningarna av Burträskförkastningen (figur 12-2c), det i dagsläget mest seismiskt aktiva området i Sverige. Huvudsyftet med projektet är att erhålla en ökad förståelse för de mekanismer som bidrog till och triggade de stora glacialt inducerade skalven i norra Skandinavien. Avsikten är att använda seismisk data från området kring Burträskförkastningen (Lund et al. 2016) som grund för att bygga en numerisk modell av förkastningen (Fälth et al. 2014) och för att konstruera ett bakgrundsspänningsfält som kan appliceras i modellen (Fälth et al. 2014). Genom simulering av glacialt inducerade förkastningsrörelser för olika modellantaganden (exempelvis variationer av materialegenskaper, spänningsmodell, portryck) och jämförelser med observationer av förkastningsrörelser på markytan från Burträskområdet är målsättningen att undersöka vilka parametrar som främst inverkar på förkastningens stabilitet och rörelse.



Figur 12-2. a) Kluster av skalv registrerade av SNSN (2015) i b) nordväst om Iggesund och c) i anslutning till Burträskförkastningen. Förkastningsbranter är identifierade av Mikko et al. (2015) på basis av Nya nationella höjddatabasen, NNH, (Lantmäteriet 2015) samt av Lagerbäck och Sundh (2008) med hjälp av främst fotogrammetri och kartering.

För området nordväst om Iggesund (figur 12-2b) har ett projekt nyligen initierats med avsikt att identifiera källan till det seismiskt aktiva stråket. Projektet omfattar upprättande av ett tätt nätverk av temporära seismiska stationer för att öka precisionen i lokaliseringarna och därmed möjliggöra en identifiering av den struktur som i dagsläget är seismiskt aktiv. Vidare planeras strukturgeologiska studier vilka bland annat inkluderar Lidar-analyser och strukturmodellering, kvartärgeologiska fältstudier samt vid behov uppföljande undersökningar med reflektionsseismik.

De kompletterande Lidar-undersökningar av Uppland som har genomförts (Öhring et al. 2018) kan inte bekräfta förekomsten av några glacialt inducerade skalv i det undersökta området. Emellertid krävs för ett fåtal identifierade lineament kompletterande fältstudier för att dessa definitivt ska kunna avfärdas som glacialt inducerade förkastningar. Sådana fältstudier kommer sannolikt att

genomföras under 2019. I ett första skede kommer lineamenten att undersökas med traditionella kvartärgeologiska fältmetoder och om möjligt strategiskt lokaliserade grävningar. Om resultatet från dessa undersökningar visar att lineamenten fortfarande är svårtolkade kommer även kompletterande studier med geofysiska metoder att genomföras.

12.2.3 Modellering av seismisk påverkan på slutförvar

Nuläge

En metodik för modellering av jordskalv och dess effekter på ett slutförvar definierades i Fälth och Hökmark (2006) och tillämpades efter ytterligare förfining (Fälth et al. 2007, 2008) i SR-Site (Fälth et al. 2010), delvis i form av ett doktorandprogram (Fälth 2018). Förutom dessa insatser har utveckling av metodik och beräkningsverktyg skett i samarbete med Posiva med tillämpning på bergspänningsförhållanden vid slutet av den senaste glaciationen (Fälth och Hökmark 2011, 2012) och i nutid (Fälth och Hökmark 2015). Metodikens utveckling och olika tillämpningar har sammanfattats i en särskild rapport (Hökmark et al. 2018) där även modelleringsresultat från de senaste åren redovisas. Bland annat har följande aspekter analyserats:

- Effekten av mycket stora skalv i förvarets närområde (Fälth och Hökmark 2015).
- Effekten av förgrenade förkastningar.
- Implementering av undulerande målsprickor (det vill säga de sprickor som hyser de inducerade skjuvrörelserna) (Lönnqvist och Hökmark 2015).
- Implementering av undulerande förkastningsytor och en förbättrad konceptualisering av förkastningskanter (Fälth et al. 2017, Fälth 2018).
- Analys av nutida och inducerade skalv (Hökmark et al. 2018).
- Effekten av spricknätverk (DFN) runt målsprickor (Hökmark et al. 2018).
- Effekten av termisk last för skjuvlastfallet (Hökmark et al. 2018).

Program

De analyserade skjuvlastfallen har avsiktligt baserats på vad som bedömts vara pessimistiska eller mycket pessimistiska förhållanden och antaganden. Med ökad processförståelse, underbyggd av observationer, kan mer realistiska antaganden avsevärt reducera uppskattningen av inducerad skjuvning, och därmed av långsiktig risk, men även erbjuda möjlighet att optimera förvarslayouten. Tidigare modeller har använt representativa randvillkor och egenskaper för förvarsvolymen, men inte fullt ut utforskat den effekt som naturlig variabilitet och osäkerhet av dessa villkor och egenskaper kan ha på de beräknade skjuvbeloppen. Följande studier planeras:

- Utredda hur spänningsfältets variabilitet, i både riktning och magnitud, inom förvarsvolymen påverkar beräknade skjuvbelopp samt om möjligt kvantifiera dessa effekter till storlek och plats.
- Utredda effekten av alternativa glaciationsmodeller (med avseende på olika storlek, utbredning, uthållighet och dynamik) på beräknade skjuvbelopp (avsnitt 14.2).
- Förfinad konceptualisering av förkastningarnas undulation och kanter.
- Fördjupade studier av målsprickornas konceptualisering (främst undulation).
- Modellering av målsprickor nära (100–200 meter) förkastningen och om möjligt även målsprickor som konnekterar till förkastningen.
- Modellering av randtöjningens (eng forebulge) effekt på branta förkastningar.
- Fördjupade analyser av stabiliteten av branta, lokala, deformationszoner i Forsmark.
- Modellering av målsprickor med orienteringar som maximerar skjuvbeloppet i olika delar av förvarsvolymen.
- Inkludera interaktionen mellan bentonit, kapsel och berg i beräkning av skjuvbelopp.
- Utveckla hanteringen av upprepade skalv och dessas effekt på framför allt målsprickorna.

12.3 Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen

12.3.1 Utveckling av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen

SKB använder i huvudsak beräkningsverktygen ConnectFlow, DarcyTools och MikeShe för hydrogeologisk och yhydrologisk modellering, men även det generella simuleringsverktyget Comsol. För modellering av vattendrag och deras interaktion med grundvattnet används även Mike11, ett endimensionellt verktyg för kanalströmning som har en direkt koppling till MikeShe.

Beräkningsverktygen används primärt för olika ändamål men är helt eller delvis överlappande. ConnectFlow och DarcyTools används primärt för frågeställningar kring det djupa grundvattensystemet, men de hanterar även det yttnära grundvattensystemet, medan MikeShe primärt används för det yttnära grundvattensystemet och yhydrologin (med koppling till atmosfäriska processer), men verktyget hanterar även delar av det djupa systemet. Beräkningsverktygen är funktionella för sina respektive användningsområden, men behöver underhållas och vidareutvecklas för att bibehålla sin aktualitet.

Nuläge

SKB:s förmåga till hydrogeokemisk modellering har utvecklats för att inkludera geokemiska processer och transportprocesser i de hydrogeologiska beräkningsverktygen DarcyTools och ConnectFlow. Transport i detta fall rör huvudsakligen de kemiska komponenter som styr grundvattnets salinitet, densitet, pH samt redox-egenskaper. I fallet med DarcyTools har denna utökade förmåga erhållits genom att skapa ett gränssnitt till modelleringsverktyget Pflotran som är konstruerat för HPC-maskiner. Detta kopplade modelleringsverktyg har fått beteckningen iDP (Molinerio et al. 2016, Ebrahimi et al. 2018). För ConnectFlows del har för ändamålet allmänt tillgängliga rutiner från PhreeqC inkluderats (Joyce et al. 2015). Båda beräkningsverktygen har till exempel använts för att studera hur lakvatten från cement påverkar grundvattenkemin samt möjliggör studier angående om och hur vatten med förhöjd alkalinitet kan nå deponeringshålspositioner. ConnectFlow har vidareutvecklats så att reaktiv transport kan simuleras i DFN-modulen. Beräkningsverktyget iDP har även använts för att studera reaktiv transport (Trincherio et al. 2017a, Iraola et al. 2017) och syreinträngning i berg (Trincherio et al. 2017b, 2018b, 2019). I Trincherio et al. (2017a) samt i Trincherio et al. (2019) har bergmatrisen simulerats som ett mikro-DFN, det vill säga bergmatrisen har heterogena porositetsegenskaper samt även heterogen fördelning av mineral där sorption kan ske. Ett annat beräkningsverktyg som har använts och har visat sig användbart är integrationen Comsol – PhreeqC (Nardi et al. 2014, iMaGe 2019).

Övrig DarcyTools-utveckling som skett under Fud-perioden hänför sig främst till nya beräkningsrutiner för bestämning av samtliga kvantitativa storheter som går vidare till beräkningar i analysen av säkerhet efter förslutning. Vidare har rutiner för konnektivitetsanalys mellan olika Cad-objekt och spricknätverket utvecklats (objekt såsom tunnlar och borrhål kan skapa konnektivitet mellan tidigare icke-konnekterade sprickor), spårbarheten av körningar har förbättrats genom nya utdatafiler, rutinerna för sprickgenerering har skrivits om (dock fortfarande enbart Poissonska nätverk), möjligheten att läsa och importera DFN-nätverk från flertalet andra koder har inkluderats, förberedelser för geometrisk konditionering har genomförts, samt har rutinerna för kontroll av konvergens under numeriska körningar moderniserats till dagens programmerings- och datorstandard.

I ConnectFlow har även funktionalitet utvecklats i PhreeqC-kopplingen för att direkt beräkna lokala K_d -värden (för sorption av radionuklider). En förutsättning för den geokemiska kopplingen i DFN-modeller var att först implementera multikomponent advektion och matrisdiffusion i dessa. Vidare har även densitetsdrivet flöde samt partikeltransport i explicita DFN-modeller implementerats, samt har funktionaliteten för nästlade modeller förbättrats. Slutligen har även anjon-exklusion samt ytkomplexering lagts till som möjliga processer.

I säkerhetsvärderingen för SFL (SKB 2019c) identifierades att gränsytan mellan betongåterfyllnad och berg samt mellan bentonitåterfyllnad och berg är avgörande för vattenflödet genom SFL och för transporten av lösta ämnen från SFL till det omgivande berget. Egenskaperna hos dessa gränssytor är därmed av stor betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning.

Inom ramen för säkerhetsvärderingen för SFL har en ny metod för detaljerad analys av flödesvägar och flödestider inom och mellan olika jordlager utvecklats (Joyce et al. 2019, Johansson och Sassner 2019). Genom en förfinad numerisk beskrivning av olika jordlager i MikeShe är det nu möjligt att mer i detalj studera flödesvägar inom och mellan olika jordlager från det att vattnet lämnar berget till dess att det lämnar den mättade grundvattenzonen på markytan. Detta medför i sig att beskrivningen av flöden från bergöverytan till olika biosfärsobjekt kan förfinas. I stället för att exportera vattenbalanser från MikeShe-modellen till dosmodellen för hela biosfärsobjekt kan nu endast den del av objektet som faktiskt exponeras av djup grundvattenutströmning studeras.

Vidare har fokus för modellutveckling av ydrologiska modeller för Fud-perioden fokuserat på evapotranspirationsprocesser. Den potentiella evapotranspirationen, PET, har hittills beräknats av SMHI med hjälp av Penmanekvationen enligt Eriksson (1981) och Sjögren et al. (2007). Studier baserat på mätningar i till exempel Norunda visar att den ursprungliga Penmanekvationen eller anpassningar av den inte är optimal för boreala skogsekosystem, medan mindre komplexa modeller baserade enbart på temperatur är enklare och robustare att kalibrera för hydrologiska tillämpningar (Halldin 1988, Grelle et al. 1997, Oudin et al. 2005, Rohde et al. 2006). Både i platsmodellen SDM-Site och i säkerhetsanalysen SR-Site har SKB observerat att Penmanekvationen så som den tillämpats av SMHI överskattar den faktiska evapotranspirationen i Forsmark. SKB har därför genomfört en studie där olika beräkningsmetoder för PET utvärderats och applicerats på Forsmark i syfte att hitta en så effektiv metod som möjligt. Denna nya platsanpassade beräkningsmetod kommer att implementeras i relevanta verktyg inför kommande uppdateringar av platsmodellen.

Den största insatsen vad gäller integration mellan ytligt och djupt grundvatten har under Fud-perioden skett inom ramen för platsförståelsearbetet. En uppdaterad modelleringsmetodik för platsbeskrivande modellering med fokus på bättre interaktion mellan såväl konceptuell som kvantitativ modellering för hydrologi och hydrogeologi pågår. Arbetet kommer att avslutas under 2019.

Program

Inledningsvis noteras att den primära utvecklingen av hydrogeologiska modeller som behövs i kommande steg av SKB:s program kopplar till utveckling av DFN-metodik som beskrivs i avsnitt 12.1.4. Övriga utvecklingsinsatser inom hydrogeologisk modellering beskrivs i detta avsnitt. Dessa insatser ska primärt ses som löpande utveckling för att upprätthålla och utveckla beräkningsverktygens funktionalitet i linje med den vetenskapliga forskningens framsteg.

Utvecklingen av de hydrokemiska beräkningsverktygen iDP (DarcyTools–Pflotran) och ConnectFlow–PhreeqC kommer att fortsätta för att kunna appliceras på fler problem där reaktiv transport har betydande inverkan, till exempel simulering av experiment i fält, stöd för platsmodellering och säkerhetsanalys, transport av icke-radioaktiva miljöstörande ämnen, inverkan av lakvatten från cement samt inträngning av glacialt vatten. Utvecklingen av den DFN-baserade reaktiva transportmodelleringen i ConnectFlow fortsätter. Användandet och utvecklingen av beräkningsverktyg Comsol–PhreeqC (iMaGe 2019) fortsätter, och vidare kommer även funktionalitet för att koppla ihop DarcyTools och PhreeqC att etableras under perioden.

Ytterligare insatser ska göras för att ta hänsyn till variation i tid och rum av mineral och grundvattensammansättning. De förenklingar som ligger till grund för det dynamiska K_d -konceptet ska ytterligare analyseras för att fullt ut kunna försvara metodiken. Vidare planeras en utveckling där de hydrogeokemiska beräkningsverktygen (Pflotran, DarcyTools och/eller ConnectFlow) och transportmodellen (Marfa) kopplas samman på ett effektivare sätt. För Marfa planeras även att inkludera processen diffusion in i stagnant vatten i sprickplan.

Ytterligare utvecklingsinsatser för ConnectFlow gäller primärt kodparallellisering samt andra insatser för att förbättra kodprestanda, specifikt för reaktiv transport i DFN-modeller samt i nästlade kontinuum/DFN-modeller.

När funktionalitet nu finns i DarcyTools att beräkna de storheter som behövs för analys av säkerhet efter förslutning, behövs en större insats för att verifiera att DarcyTools ger likvärdiga resultat som ConnectFlow, eller att eventuella skillnader kan förklaras på ett försvarbart sätt. En delvis upprepning av de hydrogeologiska analyser som genomfördes med ConnectFlow i SR-Site (Joyce et al. 2010) planeras därför.

Det behöver också undersökas hur den metodik för konditionering (betingning) som tas fram inom utvecklingen av DFN (avsnitt 12.1.4) bäst inkorporeras i DarcyTools. Svårigheten här är att DarcyTools skalar upp den explicita DFN-modellen till ett kontinuum innan grundvattenflöde simuleras, vilket innebär att geometrisk-hydraulisk konditionering i dagens version av DarcyTools i praktiken är omständligt och tidskrävande. Som beskrivits ovan har dock funktionalitet för rent geometrisk konditionering redan införts i DarcyTools. I praktiken kan det visa sig att geometrisk konditionering är tillfyllest och mer praktiskt givet rådande önskemål om snabba uppdateringar av modeller och den kombinerade geometrisk-hydrauliska konditioneringens numeriskt tunga beräkningskrav. Dock kommer möjliga angreppssätt för kombinerad konditionering i DarcyTools att utredas vidare.

Under Nuläge beskrevs hur mikro-DFN-metoder har utvecklats för att beskriva matrisdiffusion och sorption i detalj på mineralkornsskala. Dessa modeller är inte användbara på de rumsskalor som är intressanta för säkerhetsanalysen. Ett projekt har därför initierats om hur dessa mikro-DFN-modeller skalas upp för användning i modeller för radionuklidtransport på större skalor.

Ett doktorandprojekt har påbörjats för att förstå och kvantifiera igensättning (ansamling av geologiskt material i sprickor, på engelska "clogging") under olika hydrogeologiska och hydrogeokemiska betingelser (Doolaeghe et al. 2019). Syftet är att ta fram en beskrivande modell, samt att implementera denna matematiskt i en DFN-modell för att kunna studera hur igensättning påverkar hydraulisk konnektivitet samt transportegenskaper i ett diskret spricknätverk.

En relaterad fråga är igensättning som uppstår i förvaret på grund av introducerade material såsom bentonit. En motsvarande numerisk studie planeras för att förstå i vilken omfattning eroderad bentonit kan påverka flödesförhållandena i spricknätverket runt ett förvar.

Detaljerade modeller för att beräkna vattenflödet genom SFL och transporten av lösta ämnen från SFL till det omgivande berget kommer att utvecklas.

Ett doktorandprojekt har påbörjats i syfte att utveckla en platsspecifik modell för kopplad modellering av hydrologi och biogeokemiska processer med fokus på kol. Kol har länge använts som en analog för hur radionuklider rör sig inom och mellan olika ekosystem. Modellen utvecklas för Krycklans avrinningsområde utanför Umeå i Västerbotten. Syftet med modellutvecklingen är dock att ingående processer och ekvationer ska kunna appliceras på såväl Forsmark som andra analoga platser, till exempel Two Boat Lake på Grönland. Genom detta utvecklingsarbete fås en bättre koppling mellan flödes- och transportmodeller inom ytsystemet. Det är en stor fördel om flöden och biogeokemisk transport och processer kan hanteras i samma modellverktyg.

Inom ramen för det operativa detaljundersökningsprogrammet för ytsystemet planeras en rad integrerande insatser för kopplad kemi- och yhydrologisk modellering i syfte att studera transportprocesser i utströmningsområden av olika ålder och karaktär. Ett antal typekosystem som representerar olika stadier av landskapsuccession för ett framtida klimat i Forsmark ska identifieras. Multidisciplinära undersökningar ska utföras i syfte att få ett bra dataunderlag för modellstudier inom kommande säkerhetsanalyser. Ett huvudsyfte med dessa modellstudier är att bättre beskriva transporten av lösta ämnen från bergövertyta till upptag i växter.

12.3.2 Processer som påverkar den hydrokemiska miljön

Nuläge

Som beskrivits ovan pågår utveckling av hydrokemiska beräkningsverktyg där transport av lösta ämnen kopplas med kemiska reaktioner. Dessa verktyg används bland annat för att simulera syre-nedträngning i berggrunden och sulfidtransport i Kärnbränsleförvarets närområde. Utvecklingen har dokumenterats i flera publikationer (Trincheri 2017b, 2018b, 2019). Effekterna av heterogeniteten i distributionen av järn(II)-mineral i bergmatrisen har därmed kunnat belysas. Jämförelsen med de analytiska ekvationerna som användes i SR-Site visar att dessa ger pessimistiska värden för syreinträngning i bergmatrisen.

I ett nyligen avslutat samarbetsprojekt tillsammans med Posiva har processer som kan påverka förekomst och koncentrationer av sulfid på förvarsdjup undersökts grundligt. Projektet har resulterat i ett

flertal rapporter (Chukharkina et al. 2016a, b, Nilsson et al. 2017, Johansson et al. 2019, Svensson D et al. 2017b, Bengtsson et al. 2017a, b, Haynes et al. 2019, King och Kolář 2019, Pečala et al. 2019), och avrapporteringen av vissa modelleringsresultat håller på att slutföras. Några slutsatser som man kan dra baserat på resultat från projektet är:

- Aluminium ska inte användas i borrhålssektioner då detta generar betydligt större mängd vätgas än rostfritt stål. Vätgas utgör en betydelsefull energikälla för bland annat sulfatreducerande bakterier.
- Bentonitleran utgör i sig själv en sänka för sulfid.
- Olika leror har olika tröskeldensiteter över vilken mikrobiell sulfidbildning inte sker.

SKB har även varit koordinator för EU-projektet Mind (Microbiology In Nuclear waste Disposal, <http://www.mind15.eu>). I projektet har nedbrytning av organiskt material i låg- och medelaktivt avfall samt mikrobiella processer i ett förvar för använt kärnbränsle studerats. Ett antal publikationer finns tillgängliga via projektets hemsida. Resultaten från Mind indikerar, med stöd av tidigare studier, bland annat att mikrobiell aktivitet endast kan ske i närvaro av nitrat (NO_3^-) vid $\text{pH} > 10$. Flera av resultaten bekräftar tidigare studier som gjorts rörande till exempel tröskeldensiteter och salthalt (avsnitt 11.3.1 samt projektets webbplats). Framför allt har Mind skapat ett värdefullt nätverk av forskare som jobbar med mikrobiella frågor i förvarsmiljö.

Kvantkemisk modellering har använts för att fördjupa den mekanistiska förståelsen för bakteriell sulfatreduktion, vilket i förlängningen kan komma att användas för att på ett mer precist sätt beskriva svavelkemin i grundvattnet på förvarsdjup (Wójcik-Augustyn et al. 2019).

Program

Utvecklingen av hydrokemiska beräkningsverktyg fortsätter, och rapporteringen från sulfidprojektet kommer att slutföras. SKB ska utvärdera olika metoder för att analysera organiskt material, i syfte att hitta den mest lämpliga metoden för att karaktärisera så många som möjligt av de huvudsakliga lösta organiska ämnena i grundvattnet. Dessa ämnen kan potentiellt utgöra en energikälla för sulfatreducerande bakterier och därmed resultera i produktion av sulfid. Andra mikrobiella processer kommer att studeras, såsom effekten av tillförsel av acetat på sulfat- och uranreduktion i djupa grundvatten.

I enlighet med vad SSM efterfrågar i sin granskning av SR-Site (SSM 2018) kommer vittringsstudier rörande ytlagren i Forsmark att utföras. Dessa processer kan öka salthalten i nedträngande meteoriskt vatten, vilket kan bidra till att minska den negativa effekten av sötvatten på bentonit, speciellt under längre perioder av tempererat klimat. Bland annat kommer effekterna av den gradvisa urlakningen av kalcit i markprofilen att undersökas vid sidan av andra faktorer som formar den kemiska miljön.

12.3.3 Transportegenskaper och processer som påverkar ämnestransport i berget

Bergets transportegenskaper och transportprocesserna i berget för både radioaktiva eller miljöstörande ämnen utgör ett viktigt kunskapsområde för analyser av förvarens säkerhet efter förslutning. Det gäller att beakta transport av lösta ämnen både till förvaret och från förvaret. Fokus när det gäller transport till förvaret rör främst reaktiva eller korroderande komponenter såsom löst syre, sulfid och lakvatten från cement, men även salthalten i grundvattnet är av intresse. Då det gäller transport från förvaret är det främst radionuklider som transporteras med grundvattnet och samtidigt interagerar med berget som står i fokus. Samma metodik kan användas då det gäller transport av miljöstörande ämnen. Kunskaperna som genereras inom området utgör även viktiga förutsättningar för till exempel konstruktion av förvaren och för tolkning av fältmätningar.

De viktigaste processerna som påverkar transport av lösta ämnen är matrisdiffusion och sorption. Behovet av ytterligare utveckling och kunskapsuppbyggnad gäller speciellt konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar samt vidareutveckling av modelleringsverktyg. En grundläggande förståelse är av vikt även när det gäller advektiv transport, dispersion, elektromigration, gastransport och kolloidburen transport. Ökade kunskaper kan framför allt leda till mindre pessimistiska antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning.

Under de senaste åren har hydrogeologisk modellering utvecklats så att geokemiska processer och transportprocesser nu kan integreras med flödesmodelleringen (avsnitt 12.3.1). Insatser behövs för att vidareutveckla och testa dessa nya verktyg samt att utöka deras användningsområden (till exempel genom att inkludera mikrobiella processer) för användning inom platsmodellering och säkerhetsanalys.

Nuläge

När det gäller transport av lösta ämnen har det gjorts insatser framför allt inom områdena matrisdiffusion och sorption, vad gäller konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar och vidareutveckling av modelleringsverktyg (till exempel Marfa). Insatser har även gjorts kring advektiv transport (Soler et al. 2019), dispersion, elektromigration (Puukko et al. 2018), gastransport (Silva et al. 2019b) samt röntgenbaserad mikrotomografi (Iraola et al. 2017, Voutilainen et al. 2018) för att öka förståelsen av transportprocesser samt erhålla indata (till exempel Byegård et al. 2017) till beräkningsverktygen. Känslighetsstudier av transportparametrar har även gjorts för att undersöka inverkan av bergets variabilitet, till exempel kalcitförekomst på sprickytor samt dess inverkan på sorption och matrisdiffusion (Drake et al. 2018, Crawford och Löfgren 2019). Inverkan av möjlig radiell matrisdiffusion från kanaler i sprickor har studerats (Neretnieks 2017). Inverkan av diffusion in i stagnant vatten i sprickor samt därigenom ökad matrisdiffusion har implementerats i Chan3d (Shahkarami 2017).

Teoretiska studier av sorptionsmekanismer har utförts (CROCK 2013), vilket gör det möjligt att ta fram sorptionsdata för bergmaterial av varierande storlek och vid olika geokemiska betingelser. En förstudie angående sorption på cement och korrosionsprodukter har utförts.

Traditionellt är K_d en konstant fördelningskoefficient som anger hur mycket av ett ämne som är sorberat respektive i lösning. Marfa, som har utvecklats för att kunna applicera ett dynamiskt K_d -koncept där K_d är en funktion av mineral- och grundvattensammansättning i tid och rum (Trincherio et al. 2016), har vidareutvecklats i säkerhetsvärderingen för SFL (Trincherio et al. 2018a).

SKB Task Force för grundvatten- och transportmodellering utgör en viktig internationell plattform för modellering av fältförsök, konceptuell förståelse, jämförelse av resultat och beräkningsverktyg, demonstration samt utbildning. Inom Task 8 har modellering utförts kopplat till experimentet Brie (Bentonite Rock Interaction Experiment) som utförts i Äspölaboratoriet. Där studerades den hydrauliska interaktionen mellan berg och bentonit, där återmättnadsprocessen var en central del av frågeställningen, vid två nedskalade experimentella deponeringshål som är 30 centimeter i diameter. Denna studie utvärderas i två publikationer (Finsterle 2019, Finsterle et al. 2018). Dessutom har ett omfattande arbete gjorts inom modelleringsuppgiften Task 9 som fokuserar på modellering av försök som undersöker bergets transportegenskaper, såsom matrisdiffusion och sorption. De experiment som utgör grund för modelleringsövningen är Repro (Aalto et al. 2009, Poteri et al. 2018a, b) som genomförs i Onkalo i Finland samt LTDE-SD (Nilsson et al. 2010) som utfördes i Äspölaboratoriet. Utvärderingen av den första deluppgiften återfinns i Soler et al. (2019).

Kunskapsläget inom modellering av gastransport, både då det gäller löst gas i grundvatten (Silva et al. 2019b) och som tvåfasflöde (Dessirier et al. 2017), har förbättrats till gagn för framtida analyser av säkerhet efter förslutning.

SKB har även stöttat ett doktorandarbete (Krall 2016) om sprickmineraler och uranförekomst i Forsmark. Stabiliteten av uranmineral och amorfa faser har studerats som funktion av ändrade geokemiska förhållanden. Arbetet indikerar att oxidation av uran(IV) till uran(VI) har skett geologiskt tidigt, samt att dessa äldre uran(VI)-mineral är lösliga vid rådande grundvattenkemiska förhållanden.

Program

För att reducera osäkerheten i transportparametrar planeras nya mätningar på platsspecifikt material under väldefinierade förhållanden. Avsikten är att bestämma sorptionsdata speciellt för de nuklider där data saknas och bedöms vara av vikt för säkerhetsanalysen. Målet är att kunna uppskatta de osäkerheter som är relaterade till skillnader mellan lab- och in situ-mätningar, olika storleksfördelningar på bergmaterial, mineralfördelningar, komplexbildning samt geokemi. Variabiliteten i transportparametrar ska även kunna hanteras vid modellering. Sorption på cement och korrosionsprodukter ska studeras

vidare. Utvecklingen av elektromigration för att bestämma transportparametrar fortsätter både experimentellt och på modelleringssidan för att stödja experimenten och deras tolkning. Ett annat mål är att undersöka matrisdiffusionens inverkan på porvatten och salthalt. De teoretiska studierna av sorptionsmekanismer fortsätter.

Det finns planer på långtidsförsök, in situ eller under motsvarande förhållanden, med interaktion av radioaktiva spårämnen med naturlig kalcit för att se hur metallutbytet mellan kalcit och grundvatten ser ut (i den yttersta delen av kalcitkristallerna), och hur organisk komplexering i grundvattnet påverkar detta utbyte.

Inom SKB Task Force för grundvatten- och transportmodellering kommer Task 9 att fortsätta med modellering enligt beskrivning under Nuläge med fokus på rapportering av modellering rörande LTDE-SD samt prediktiv modellering av genomdiffusionsförsöket TDE (Aromaa et al. 2018) inom Repro. I en av modelleringssuppgifterna är målet att dra nytta av de kunskaper som har erhållits vid modellering av fältförsök för användande i säkerhetsanalysen. Kunskaperna har erhållits under arbetet med Task 9, men även från föregående modelleringssuppgifter i till exempel Task 4 och 6.

12.3.4 Klimatets inverkan på processer i geosfären

Större temperatursänkningar vid markytan kan orsaka att marken fryser och om frysningsperioden varar mer än två år i sträck uppstår per definition permafrost. Permafrost i jord och berg leder till minskad permeabilitet och orsakar volymförändringar vilket i sin tur kan leda till nybildning, vidgning och/eller propagering av befintliga sprickor. Hur det hydrogeologiska systemet påverkas under olika stadier av permafrosttillväxt eller avsmältning är platsspecifikt och behöver analyseras i platsmodeller.

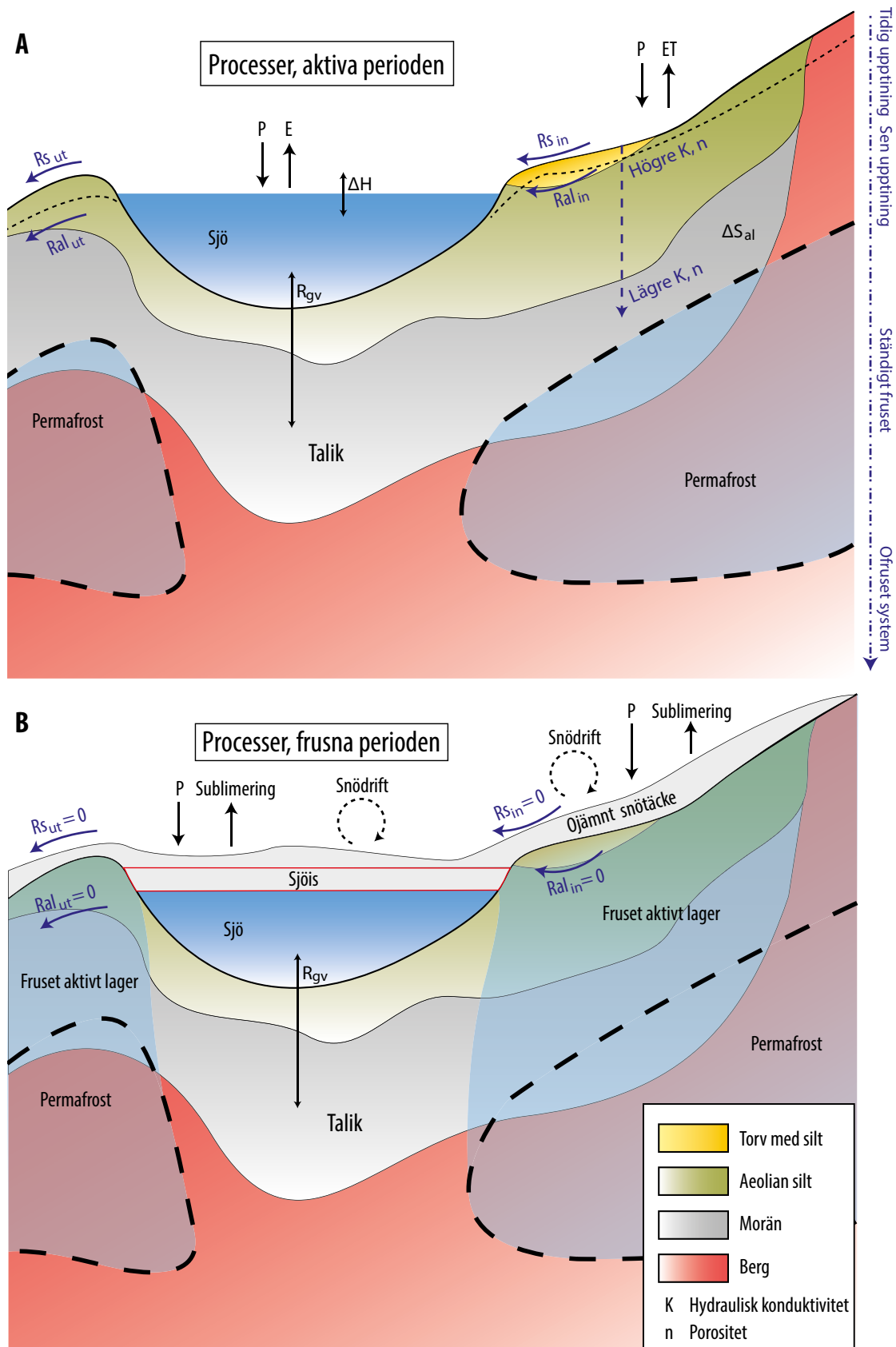
Islasten från en inlandsis påverkar det hydrogeologiska systemet olika beroende på isens termala bottenförhållanden. På djupet är det främst viktigt huruvida isen är bottenfrusen eller botten-smältande. Om isen är bottenfrusen representerar den en stor ”mekanisk” last som kan leda till komprimering av bergets porsystem. Om isen är botten-smältande genereras vatten vid isens botten. Vattnet infiltrerar marken och grundvattentrycket byggs upp på motsvarande sätt som islasten. Vid mer genomsläppliga berggrunder leder den senare situationen inte till så stora förändringar av det hydrogeologiska systemet (även om det hydrostatiska trycket ökar).

Nuläge

Det råder en begränsad förståelse kring hur frysnings- och upptiningsprocesser styr hydrologin i periglaciala områden, och en starkt bidragande orsak till detta är en allmän brist på data för att kunna konceptualisera det hydrologiska periglaciala systemet (Vaughan et al. 2013, Bring et al. 2016). Inom ramen för Grasp (Greenland Analogue Surface Project) har därför hydrologin i permafrostmiljöer (periglaciala miljöer) studerats på avrinningsområdesskala och SKB har genom Grasp-projektet stärkt sin konceptuella kunskap och processförståelse för permafrosthydrologi.

Fältundersökningar, tillsammans med konceptuell och numerisk modellering, har utförts i syfte att öka den konceptuella förståelsen av det hydrogeologiska systemet. Fältundersökningarna, som startades 2010, har utförts i ett litet avrinningsområde på västra Grönland i närheten av Kangerlussuaq. I områden med permafrost uppstår två grundvattensystem, ett ovan permafrosten i det aktiva lagret och ett ständigt ofruset system under permafrosten. Det aktiva lagret tinar och fryser beroende på årstid och i detta lager uppstår en ytlig grundvattenströmning under sommarhalvåret (figur 12-3). Undersökningarna inom Grasp har fokuserats på det aktiva lagret då detta har stor inverkan på hur vatten fördelas inom området. I avrinningsområdet finns en sjö som har en talik under sig, det vill säga ett ofruset område i den i övrigt frusna omgivande marken. Taliken utgör en kontakt med det ofrusna grundvattensystemet under permafrosten. Genom att mäta trycknivåvariationer i både sjö och talik har vattenutbytet mellan sjön, det aktiva lagret och det djupa ofrusna systemet under permafrosten kunnat studeras. Tryckvariationer i berget har mätts inom ramen för det avslutade GAP-projektet (Greenland Analogue Project).

Analys av insamlade data har lett till en ökad förståelse för det periglaciala hydrologiska systemet, och huvudsakliga hydrologiska flöden har identifierats och kvantifierats. Den resulterande konceptuella modellen som ligger till grund för den numeriska modellering som utförts för avrinningsområdet presenteras i figur 12-3.



Figur 12-3. Konceptuell modell över hydrologin i det av SKB undersökta periglaciala avrinningsområdet på Grönland (Johansson et al. 2015). Två modeller har tagits fram, en för den aktiva och en för den frusna perioden. R_s – ytavrinning, R_{al} – strömning i aktiva lagret, R_{gv} – grundvattenutbyte mellan sjö och talik, P – nederbörd, E – evaporation, ET – evapotranspiration, ΔH – sjönivåvariation, ΔS_{al} – magasinförändring i det aktiva lagret.

Under Fud-perioden har kunskapen från Grasp-projektet vad gäller hantering av aktiva lagrets dynamik i MikeShe-modellen använts i ett doktorandprojekt i syfte att undersöka tjälens påverkan på hydrologin. Tjäle har hittills försumrats i de hydrologiska modeller SKB har etablerat för Forsmark. I doktorandprojektet har man använt kunskap från Grönland och implementerat tjäle i en MikeShe modell över Krycklans avrinningsområde. Modellstudien visar att tjäle har stor inverkan på avrinningsprocesserna under snösmältningen och fördelningen mellan ytvatten och grundvatten påverkas av tjälbildning framför allt i torvrika marker och våtmarker (Jutebring Sterte et al. 2018). Då Forsmark karaktäriseras av relativt hög andel våtmarker utgör denna studie ett viktigt underlag inför kommande uppdateringar av den hydrologiska platsmodellen i Forsmark.

Under 2017 kom en vetenskaplig publikation ut inom ramen för Grasp (Lindborg 2017) och 2018 en publikation som berör tjälprocesser i boreala landskap (Jutebring Sterte et al. 2018).

Om inte den mekaniska lasten och det hydrauliska trycket samverkar kan till exempel en ensidig höjning av det hydrostatiska trycket, speciellt nära ytan, orsaka spricköppning, sprickskjuvning samt sprickpropagering. I den nuvarande THM-analysen (analys av termo-hydro-mekaniska förhållanden) av effekten av glaciation på bergmassans egenskaper har ett värsta scenario antagits baserat på en låg gränssättning av sprickornas normalstyvhet, ett antagande som leder till att sprickorna är väldigt känsliga för normalspänningsvariationer (Hökmark et al. 2010). En bättre förståelse för hur islasten påverkar den underliggande bergmassan skulle göra att det på ett mer realistiskt sätt går att gränssätta konsekvenserna av glaciationscykeln på bergmassans THM-beteende och därmed även på dess transportegenskaper.

Under de senaste 20 åren har SKB deltagit i forskningsprojektet Decovalex, vilket syftade till att utveckla och validera programvara för modellering av THM-processer i sprucket berg (Chan et al. 2005). SKB har även bidragit med handledning inom ett doktorandprogram på Chalmers tekniska högskola. Doktorandprojektet har delvis fokuserat på olika aspekter av permafrosttillväxt och frysning av grundvatten i berggrunden, där till exempel volymförändringar skulle kunna leda till nybildning och/eller öppning och propagering av befintliga sprickor, se till exempel Lönnqvist och Hökmark (2013). Vidare har state of the art-kunskap om processer och modelleringsförmåga rapporterats av Selvadurai et al. (2014). Dock finns fortfarande olösta frågor och osäkerheter som behöver åtgärdas för att bedöma möjliga effekter av permafrost på berggrunden inför kommande milstolpar, till exempel PSAR och SAR för Kärnbränsleförvaret respektive SFR.

Den utveckling av kopplade hydrogeologiska och hydrogeokemiska beräkningsverktyg som gjorts och som beskrivs i avsnitt 12.3.1 möjliggör att geokemiska processer och transportprocesser nu kan modelleras för flödesförhållanden som ändras kontinuerligt i tiden, till exempel för de ändringar som sker under en glaciationscykel.

Program

Fokus för programmet är att utveckla förståelsen för de spatiala och transienta förändringar av bergets och markens egenskaper som orsakas av permafrost och glaciationer, och som påverkar grundvattenflöde och transport av lösta ämnen. Kunskapen om vattenflöde och transport genom frusen mark behöver utvecklas och därför planeras in situ-försök på Grasp-lokalen, i kombination med modellering där specifika effekter av vattnets temperatur på vattenströmning och permafrostdynamik ska studeras.

Värdet av de meteorologiska och hydrologiska tidsserierna som har samlats in på Grönland inom ramen för de avslutade projekten Grasp och GAP ökar ju längre övervakningen pågår. Längre tidsserier ger ökad förståelse för den naturliga variationen och minskar osäkerheten i de modeller som byggs upp för det periglaciala systemet. Det etablerade övervakningsprogrammet på Grönland kommer därför att hållas i gång, i ett första steg de närmaste två åren.

Projekten Grasp och GAP har var för sig bidragit med ny och värdefull kunskap för såväl SKB som det vetenskapliga samfundet. Data från de två projekten har emellertid inte analyserats tillsammans och den konceptuella förståelsen av det kopplade glaciala-subglaciala-periglaciala systemet är fortfarande bristfällig. Även om de två projekten har bidragit med mycket ny kunskap om processer i områden med djup, kall, kontinuerlig permafrost så återstår flera kunskapsluckor kopplade till när permafrost växer till respektive smälter av. SKB planerar därför ett nytt projekt för

perioden 2019–2022 där dessa kunskapsluckor samt kopplingen mellan det glaciala och periglaciala systemet står i fokus. Tillsammans med andra kärnavfallsorganisationer och representanter från den akademiska världen startar SKB ett nätverk med fokus på platsspecifik hydrologisk modellering i periglaciala miljöer. Nätverket kommer i huvudsak att fokusera på tre frågeställningar; det kopplade glaciala-periglaciala systemet, hydrologiska processer i sporadisk, diskontinuerlig permafrost samt biogeokemiska processer i periglaciala miljöer. Inom detta nätverk planerar SKB att finansiera en doktorandtjänst.

Tredimensionella THM-modeller i olika skalor kommer att etableras och osäkerhetsspannet kommer att utredas. Problemställningen är i högsta grad platsspecifik och därför kommer modeller som tar hänsyn till påverkan av islaster och möjliga termala bottenförhållanden hos en framtida inlandsis i Forsmark att etableras. Denna utveckling är inledningsvis av forskningskaraktär; fungerande, platsspecifika modeller kan vara tillgängliga tidigast inför en ansökan om drifttillstånd.

Det finns ett behov av att öka kunskapen om effekter av frysning på bergets mekaniska stabilitet på olika djup. Spricköppning och sprickbildning kan orsaka nya flödesvägar i berget närmast tunnelöppningarna, även långt efter förslutning av förvaret. Studier för att utveckla den grundläggande förståelsen för brottmekanismerna kommer därför att genomföras, och tredimensionella THM-kopplade modeller som inkorporerar både DFN-beskrivningar och mekaniska egenskaper som är relevanta för de olika förvarerna kommer att etableras.

De kopplade hydrogeologiska och hydrogeokemiska modelleringsverktygen kommer att användas för att analysera geokemisk utveckling under en glaciationscykel. Här inkluderas tempererade och glaciala klimatförhållanden samt förhållanden med permafrost för att studera om och hur dagens geokemiska och hydrogeologiska förhållanden återuppstår efter en glaciationscykel. Den nya kunskapen ska tillämpas till exempel inom platsspecifik och strålsäkerhetsrelaterad modellering av Forsmark.

12.4 Detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering

Detaljundersökningar (inklusive övervakning) och platsbeskrivande modellering som utförs i samband med slutförvarsanläggningarnas uppförande och drift, ger steg för steg information om bergets egenskaper, tillstånd och underlag för bedömning av kravuppfyllelse. Detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering genomförs fullt integrerat med bergarbeten vid respektive förvarsanläggningens uppförande och, specifikt för Kärnbränsleförvaret, under den påföljande successiva utbyggnaden av deponeringsområden under driftskedet.

12.4.1 Metodik för detaljundersökningar

Sedan publiceringen av detaljundersökningsprogram vid uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret (SKB 2016) har arbetet med referensutformningen av anläggningen i Forsmark fortsatt, liksom arbetet med uppdatering av konstruktionsförutsättningar avseende säkerhet efter förslutning. Som en del av den fortsatta utvecklingen av detaljundersökningsprogrammet till operativa program, fortsätter arbetet med att ta fram, alternativt uppdatera och beskriva metoder, instrument och modelleringsmetodik för att verifiera att ställda krav uppfylls.

Detaljundersökningarna med tillhörande platsbeskrivande modellering har flera syften. De ska ge den information som behövs för framdriften av bergarbeten samt bidra till en ökad kunskap om förhållanden av betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning. Under uppförandet av Kärnbränsleförvaret, och i ännu högre grad under driftskedet när deponeringstunnlar successivt byggs ut, är en viktig uppgift att successivt anpassa anläggningen till rådande bergförhållanden så att de krav som är kopplade till förvarets kärntekniska säkerhet (konstruktionsförutsättningar) uppfylls. Insamlade data och uppdaterade modeller som beskriver berggrunden ger dessutom det samlade underlaget till förnyade analyser av säkerhet efter förslutning. Detaljundersökningarna ska även täcka det informationsbehov som behövs för miljökontroll.

Nuläge

Detaljundersökningsprogrammet (SKB 2016) utgör en grundval för upprättandet av operativa program som beskriver detaljundersökningar och modellering med tillhörande kvalitetssäkring under olika skeden av Kärnbränsleförvarets uppförande och drift. Harmoniserade konstruktionsförutsättningar för ett förvar för använt kärnbränsle har gemensamt upprättats av Posiva och SKB (Posiva SKB 2017). SSM har i granskningen av ansökan om KBS-3-systemet pekat på kvarvarande behov och osäkerheter kopplat till platsförståelse och realisering (SSM 2018).

Arbete med ett preliminärt program för detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering under beredning av deponeringsområden har påbörjats. Detta program innefattar beskrivning av strategier för undersökningscykler och platsbeskrivande modellering i samband med beredningen av stam-, transport- och deponeringstunnlar och deponeringshål, med föregående pilotborrhål. Vidare har arbete med det operativa programmet för beredningen av tillfarter och centralområde påbörjats. Detta program innefattar detaljundersökningar och platsbeskrivande modellering i samband med framdriften av skipschakt och ramp, med efterföljande beredning av centralområde och resterande tre serviceschakt, de senare utbrutna genom stigortsborrning. Som en underbyggnad till de operativa programmen har arbete med uppdatering av ämnesvis och integrerad modelleringsmetodik utförts, liksom utveckling av metoder och instrument, de senare har inledningsvis inriktats på de verktyg som ska användas under uppförande av tillfarter och centralområde i Kärnbränsleförvaret, samt viss sådan utveckling för deponeringsområden som beräknas ta lång tid i anspråk och därför behöver påbörjas tidigt.

Program

Inför PSAR och detaljprojekteringen kommer under Fud-perioden ett operativt program för detaljundersökningar med tillhörande modellering inför byggstart av tillfarter och centralområde att upprättas. Vidare kommer ett preliminärt operativt program för deponeringsområden att upprättas. Fokus för båda programmen ligger sålunda på Kärnbränsleförvaret, men utvecklade metoder/verktyg och modelleringsmetodik kan även användas inom ramen för utbyggnaden av SFR, och även för SFL, oavsett var detta förvar lokaliseras. Verktyg avser här instrument för mätningar, liksom data-system inklusive beräkningsverktyg och programvara som används för visualisering och modellering, inklusive tillhörande strategier för dess tillämpningar. Strategier och metodik för kontroll av krav på säkerhet efter förslutning (konstruktionsförutsättningar) såsom kontroll av skadezon, förekomst och kvantifiering av spjälkning, och hydrauliska kriterier för acceptans av deponeringshål, kommer att utarbetas och provas.

Övrig utveckling för detaljundersökningar i deponeringsområden kommer huvudsakligen att fortsätta under Fud-perioden.

12.4.2 Modelleringsmetodik inom detaljundersökningar

Projektering, byggproduktion, platsförståelse och säkerhet efter förslutning definierar de varierande behov och krav som platsbeskrivande modellering möter under förvarets byggande och drift. Projektering och byggproduktion har behov av kontinuerliga prognoser i tunnelskala, vilket innebär att anpassad och delvis ny modelleringsmetodik och nya prognosverktyg behöver tas fram. Metodiken tar fasta på en tidig och nära samtolkning och integration av geologisk och hydrogeologisk information för identifiering och kategorisering av kritiska strukturer (avsnitt 12.4.3), och av det hydrauliskt konnekterade spricknätverket. Spricknätverket utgör den geometriska basen för fortsatt platsbeskrivande modellering i anläggningsdelskala (till exempel tillfarter, centralområde eller ett enskilt deponeringsområde) eller anläggningsskala (hela förvaret inklusive dess tillfarter). Övriga ämnesområden, det vill säga hydrogeokemi, bergmekanik, termiska egenskaper, transportegenskaper och ytsystem, inkluderar och integrerar kontinuerligt ny information från övervakning i befintliga borrhål och karakterisering av nya pilotborrhål och tunnlar. Förutom att ligga till grund för ämnesspecifik beskrivande modellering ger denna information tillkommande stöd för den modellering i form av enhålstolkningar och entunneltolkningar, vilka utgör grundläggande byggstenar i den fortsatta integrerade deterministiska geometriska modelleringen i 3D. Den senare kopplar mot

den stokastiska beskrivningen av sprickor (DFN), se avsnitt 12.1.4, i bergmassan mellan de deterministiskt modellerade deformationszonerna. Vissa initialt stokastiskt beskrivna sprickor/strukturer förväntas successivt erhålla en sådan informationsmässig underbyggnad att de kan (om-)tolkas som deterministiska strukturer, främst i beskrivningen av deponeringsområden i tunnelskala.

En föränderlig och störd miljö under byggande och drift av förvaret utgör en viktig utgångspunkt för vidareutvecklingen av modelleringsmetodik för samtliga ämnesområden. En effektiv övervakning och uppmätta förändringar relaterade till fastställda referensnivåer utgör viktiga förutsättningar för effektiv uppföljning av effekter av den successiva utbyggnaden av förvaret och för kalibrering av kvantifierande modeller.

Nuläge

I dagsläget föreligger metodikrapporter för geologisk och hydrogeokemisk modellering under detaljundersökningarna i koncept. Arbete pågår med motsvarande dokument för övriga ämnesområden.

Program

Fortsatt utveckling av ämnesvis och integrerad modelleringsmetodik planeras ske under Fud-perioden. Tillämpning och test av den metodik som föreligger i koncept planeras i samband med fortsatta arbeten i Äspölaboratoriet, i Forsmark och i samarbete med Posiva i Onkalo. Resultatet av sådana tester ligger till grund för fortsatt förfining och inbördes anpassning av de ämnesvisa metodikrapporterna.

12.4.3 Kritiska strukturer och volymer

Begreppet kritiska strukturer och volymer innebär geologiska strukturer eller bergvolymer med egenskaper som kan ha negativ inverkan på ett KBS-3-förvars byggbarhet och säkerhet efter förslutning. Kritiska strukturer indelas i tre klasser med hänsyn till deras påverkan på förvarsområdets layout (Munier och Mattila 2015). I klass 1 (CS1) ingår strukturer och volymer med egenskaper som innebär att de inte kan accepteras inom förvarsområdet. Dessa har styrt vid platsvalet för Kärnbränsleförvaret och har skapat gränsdragningarna för förvarsområdet. I klass 2 (CS2) ingår strukturer och volymer med egenskaper som innebär att de kan accepteras mellan deponeringsområden men inte i en deponeringstunnel, och som därmed styr layout för enskilda deponeringsområden inom förvarsområdet. I klass 3 (CS3) ingår strukturer och volymer med egenskaper som innebär att de inte får genomskära deponeringshål, och som därmed styr placering av deponeringshål och acceptans av deponeringshål. Vidare innefattas i begreppet kritisk struktur även strukturens stabilitet manifesterad i en tunnel samt strukturens betydelse för flöde och retention (Posiva SKB 2017). Metoder behöver vidareutvecklas för effektiv karaktärisering och klassificering av kritiska strukturer, liksom QA-system för att göra denna klassificering spårbar.

Nuläge

Metodiken för analys av jordskalvens påverkan på ett KBS-3-förvar har kontinuerligt utvecklats sedan dess första tillämpning i SR-Can och därefter i SR-Site (Fälth 2018). Framför allt har en omfattande matris av fallstudier genomförts med avsikt att adressera den konservatism som präglade de tidigare modelleringsinsatserna (se även avsnitt 12.2.3). Resultatet av dessa ansträngningar pekar mot att de kritiska radierna, det vill säga den minsta spricka som kan utgöra ett hot mot säkerhet efter förslutning, är väsentligen mycket större än vad som tidigare kunnat redovisas. De kritiska radierna överstiger i samtliga delar av slutförvaret cirka 200 meter. I praktiken innebär detta därför att de strukturer som är kritiska för kapselns integritet (CS3, per Munier och Mattila 2015) i själva verket är mindre deformationszoner vilka kan identifieras med traditionella karterings- och undersökningsmetoder. De svårigheter som tidigare var kopplade till identifiering av relativt små, enskilda, sprickplan är därmed inte längre aktuella. Speciellt framtagna metoder för identifiering av dessa kommer sannolikt därför heller inte att krävas. Detta styrks även av sprickstudier i Olkiluoto, Finland (Nordbäck och Mattila 2018) som visar att enskilda sprickplan inte blir större än motsvarande 150 meter i radie innan de länkar ihop med nätverk av andra sprickplan till mindre deformationszoner.

En återstående utmaning är metodik för kategorisering av kritisk struktur med avseende på grundvattenflöde och retention, till exempel med avseende på transportmotståndet (F-faktorn). Denna typ av analys kräver att den enskilda konduktiva strukturen analyseras som modellerad i sitt sammanhang, det vill säga i en hydrogeologisk flödesmodell baserad på deterministiskt modellerade deformationszoner och stokastisk DFN. Det är sålunda den summerade F-faktorn för aktuell flödesväg, där den aktuella potentiellt kritiska strukturen ingår, som är avgörande för den aktuella strukturens kategorisering. Detta innebär att även om den enskilda strukturen enskilt kan uppvisa en hög F-faktor, så är den integrerade F-faktorn för flödesvägen avgörande för om strukturen kategoriseras som kritisk eller inte.

Program

Resultat av såväl modellering som kartering av potentiellt kritiska strukturer visar att dessa i storlek motsvarar mindre deformationszoner, för vilka traditionella karteringsmetoder (Cosgrove et al. 2006, SKB 2016) bedöms tillfyllest för säker identifikation i KBS-3-förvaret. Särskilda forskningsinsatser för framtagande av nya eller förbättrade karteringsmetoder bedöms därför inte vara nödvändiga.

Fördjupade analyser av kritiska strukturer med avseende på skjuvning av kopparkapslar med använt kärnbränsle, inklusive effekter av multipla skalv, se avsnitt 12.2.3.

Fortsatt utveckling av metodik för DFN-baserad modellering av grundvattenflöde som innefattar både deterministiskt modellerade deformationszoner och den stokastiskt beskrivna naturligt uppspruckna bergmassan, se avsnitt 12.1.1. Med dessa modeller kan kritisk struktur med avseende på grundvattenflöde och retention analyseras.

12.4.4 Jordströmmar i Forsmarksområdet

Lågfrekventa och statiska elektriska fält i jordskorpan genereras av naturligt förekommande processer och av elektrisk infrastruktur. Då jord- och berglagren, i varierande grad, är elektriskt ledande kommer dessa elektriska fält att vara associerade med elektriska strömmar. Dessa statiska jordströmmar kan under vissa förhållanden öka korrosionen av metall i underjordiska anläggningar. I Forsmarksområdet finns en elektrod installerad som är en del av den högspända likströmslänken Fenno-Skan, vilken sammanbinder det svenska och finska elnätet. Beroende på den aktuella lasten i länken flyter elektrisk ström in eller ut ur elektroden, typiskt ett par hundra ampere. Strömmarna från Fenno-Skan ger ett väsentligt bidrag till de statiska jordströmmar som observeras i området.

Nuläge

Korrosionsangrepp på utrustning för hydrologisk övervakning som är monterad i borrhål i Forsmark har satts i samband med jordströmmar från Fenno-Skan. Problem med korrosion av denna utrustning i vissa borrhål har föranlett ett antal undersökningar genom åren (se Thunehed 2017, 2018 för sammanfattning). Problemen har observerats alltsedan mätningarna i Forsmark inleddes (Nissen et al. 2005), men de har tilltagit efter utbyggnaden av Fenno-Skan (Fenno-Skan 2 togs i drift 2011). För att minska problemen har katodiska skydd installerats i borrhålen. Det har visat sig att denna åtgärd inte är tillräcklig, och dessutom att den vid vissa driftfall på Fenno-Skan även kan bidra till ökad gasbildning, varför ytterligare åtgärder har diskuterats (Sandberg och Taxén 2017).

Betydelsen av Fenno-Skan för säkerheten efter förslutning när det gäller SFR har utretts (SKB 2014d, Löfgren och Sidborn 2018). Efter förslutning kommer metall i SFR att korrodera (aerobt eller anaerobt), oavsett om det finns ett jordströmsfält eller inte. En ökad korrosionshastighet bedöms inte ha någon påverkan på analysens slutsatser för dessa komponenter. Betydelsen av Fenno-Skan är därmed liten för säkerheten efter förslutning för SFR (SKB 2014d).

Inverkan av jordströmmar orsakade av befintliga och tänkta framtida högspänningsinstallationer på korrosion av kopparkapslarna i ett KBS-3-förvar i Forsmark har också tidigare studerats (Taxén et al. 2014), med slutsatsen att läckströmmar ger försumbara bidrag till den totala korrosionen.

Program

Utrustningen i instrumenterade borrhål förändras nu enligt förslag som tagits fram genom SKB:s samarbete med Swerea Kimab (Sandberg et al. 2017). Under 2019 har en undersökning av borrhålens jordsystem inletts. Syftet är att utarbeta ytterligare åtgärder som kan vidtas parallellt med de ovan nämnda. Även fortsatt kartläggning av källorna till och utbredningen av jordströmmarna i Forsmarksområdet planeras ske under Fud-perioden, inklusive eventuell påverkan på säkerhet efter förslutning för slutförvaren.

12.5 Tunnelproduktion

De olika delarna av undermarksanläggningarna ska uppfylla olika krav och konstruktionsförutsättningar beroende på deras funktion under drift och efter förslutning. Bergssalar i SFR kommer att drivas med konventionell teknik, vilket medför att ingen särskild teknikutveckling krävs. För bergarbeten i tillfarter (ramp och schakt) och centralområde krävs ingen ytterligare teknikutveckling, utan metoder för skonsam sprängning finns utvecklade. De speciella kraven och konstruktionsförutsättningarna som gäller för deponeringstunnlar och deponeringshål i Kärnbränsleförvaret skiljer sig från förutsättningar som gäller för andra byggobjekt. Det innebär utmaningar, såväl för det tekniska utförandet av deponeringshålen som för vilka undersökningsmetoder som ska användas för att välja placering och hur man ska verifiera att kriterierna uppfyllts. En stor del av arbetet inom teknikutveckling för tunnelproduktion handlar om att identifiera teknik och material som är kända och beprövade i branschen och som även uppfyller kraven och konstruktionsförutsättningarna för Kärnbränsleförvaret.

12.5.1 Injektering

Injektering av bergutrymmen i Kärnbränsleförvaret möter större utmaningar än i normala infrastrukturprojekt. För att injekteringen inte ska ge en negativ påverkan på berget som barriär finns striktare krav på vilka injekteringsmaterial som kan accepteras, hur injekterings-skärmen utformas samt att injekteringen utförs med begränsad och mycket kontrollerad spridning. Det höga grundvattentrycket på förvarsdjup kräver även annan injekteringsdesign för att kunna motverka erosion av injekteringsmedel, och för att förhindra hydraulisk vidgning av sprickor.

Nuläge

Erfarenheterna från tidigare genomförd injektering (Funebag och Emmelin 2011, Johansson et al. 2013, Funebag 2016) har analyserats och utvärderats och omsatts till uppdaterade metodbeskrivningar för injektering med låg-pH-material, anpassade för de olika typmiljöer som kan förväntas förekomma vid drivningen av bergutrymmen i Kärnbränsleförvaret (se Jansson et al. 2019). Arbetet har även omfattat att ta fram strategi för kontroll och verifiering av injekteringsresultat.

Program

Riktlinjer för injektering implementeras i SKB:s program för Kärnbränsleförvaret för att inarbetas i ledningssystemet.

12.5.2 Tunneldrivning för deponeringstunnlar

Nuläge

Baserat på deponeringssekvensen i Kärnbränsleförvaret, där flera olika maskiner och utrustningar används, behöver tunnelgolvet vara tillräckligt plant för att tunneln ska vara lättframkomlig och för att minska utrustningens slitage och behov av underhåll. Metod för drivning av deponeringstunnlar är i dag sprängning, men alternativa metoder i form av mekanisk brytning utreds för att åstadkomma ett planare tunnelgolv, jämnare tunnelkontur och minskad skadezon.

Program

Under Fud-perioden kommer utredning av metoder för mekanisk brytning att fortgå, för att ta fram underlag som stödjer teknikbeslut för byte av metod för drivning av deponeringstunnlarna.

12.5.3 Borring av deponeringshål

Nuläge

SKB har följt Posivas utvecklingsarbete avseende borring av deponeringshål. Posiva har borrar tio vertikala, fullstora experimentella hål i Onkalo, fördelade på två demonstrationstunnlar (Railo et al. 2015, 2016). För att göra metoden för borring av deponeringshål mer produktionseffektiv har maskinleverantörer kontaktats för att utreda flera möjliga borrheter.

Program

En bormaskin för borring av deponeringshål ska tillverkas och metoden för borring av deponeringshål kommer att testas och senare verifieras i samband med integrationstest som planeras vid Äspölaboratoriet eller annan lämplig plats (avsnitt 11.6).

13 Ytekosystem

13.1 Översikt

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar i första hand till att skapa underlag för beräkningar av potentiell radioaktiv dos till människa och miljö i analysen av de olika förvarens säkerhet efter förslutning. Programmet ger också underlag för miljökonsekvensbedömningar, miljöövervakning och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift. Dessutom bidrar programmet till ett långsiktigt bevarande av kompetens inom området, vilket är nödvändigt för SKB:s framtida arbete med analys av säkerhet för befintliga och planerade förvar. De aktuella forskningsfrågorna för de tre olika förvaren inom området ytekosystem överlappar till stor del varandra. SKB bedömer att det inom området inte finns några kritiska kvarstående forskningsfrågor som i nuläget måste lösas inför PSAR för Kärnbränsleförvaret respektive för ett utbyggt SFR. Strålsäkerhetsmyndighetens granskningar pekar emellertid på ett antal frågor som SKB behöver lösa i kommande redovisningar. I säkerhetsvärderingen för SFL har SKB tagit fasta på SSM:s granskningskommentarer och visar på möjliga vägar för det fortsatta arbetet med att tillämpa SKB:s metodik för att beskriva biosfärsprocesser och beräkna ackumulation i ytsystemet. Detta arbete behöver komplettering av underlag och vidareutveckling av metoder inför kommande säkerhetsanalyser.

Det finns ett antal frågor som behöver vidare insatser, antingen för att det har framkommit i myndigheternas kommentarer till granskningen av inlämnade ansökningar, eller för att SKB har bedömt att det behövs för att minska osäkerheter i kommande säkerhetsanalyser. De viktigaste kvarstående frågorna inom ytekosystem finns inom fyra olika områden; 1) upptagsvägar och upptagsmekanismer för olika organismer, 2) temporal och spatial heterogenitet i landskapet, 3) transport- och ackumulationsprocesser, och 4) radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper för viktiga ämnen i förvaren.

En översikt av SKB:s arbete inom ämnesområdet under senare år återfinns i det specialnummer av *Ambio* som publicerades 2013 (Kautsky et al. 2013). I arbetet med den senaste säkerhetsanalysen SR-PSU har SKB publicerat rapporter som redovisar antaganden i modelleringen av de ytnära ekosystemen (SKB 2015a), data och modeller som använts för dosberäkningarna (Grolander 2013, Saetre et al. 2013, Tröjbom et al. 2013) och tillämpningen av de använda modellerna i säkerhetsanalysen (SKB 2014a). I säkerhetsvärderingen för SFL har flera ansatser gjorts för att minska osäkerheter i analysen och för att bemöta svagheter som påtalats i granskningar av säkerhetsanalyserna SR-Site och SR-PSU. Dessa ansatser redovisas nedan och i underlagsrapporterna till säkerhetsvärderingen för SFL (SKB 2019a).

Granskningskommentarer från SSM, Kärnavfallsrådet, Kungliga Vetenskapsakademien och Stockholms universitet på Fud-program 2016 bekräftar att de insatser som gjorts och planeras är ändamålsenliga, relevanta och har god vetenskaplig kvalitet. SKB strävar efter att även fortsatt upprätthålla en hög vetenskaplig kvalitet, med ett effektivt utnyttjande av begränsade resurser. En viktig del för att uppfylla detta är samarbeten med olika forskargrupper, både nationellt och internationellt. På det nationella planet samarbetar SKB till exempel med grupper som arbetar i Krycklan (Laudon et al. 2013) och Skogaryd, platser som ingår i Vetenskapsrådets nationella nätverk SITES (<http://www.fieldsites.se>), och internationellt medverkar SKB i flera olika nätverk (till exempel Bioprota, <http://www.bioprota.org/>).

Nedan redovisas kort de frågor inom ytekosystem som bedöms vara viktigast för Fud-perioden samt vilka planer SKB har för att arbeta med dessa frågor. En komplett redovisning av resultaten från de senaste årens forskning och utveckling inom området återfinns i rapporteringen från de senaste säkerhetsanalyserna och från den nyss avslutade säkerhetsvärderingen för SFL. I forskningsprogrammet för Kärnbränsleförvaret kommer planerade insatser inför SAR att specificeras i detalj.

13.2 Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer

Nuläge

Frågor kring upptagsvägar och -mekanismer för radionuklider innefattar både organismer och de akvatiska och terrestra ekosystem som de ingår i. Vid dosberäkningar används traditionellt koncentrationsfaktorer (CR), vilka beskriver koncentrationen av ett ämne i organismen jämfört med den i födan eller i omgivande media (vatten, jord eller sediment). Mätningar har tidigare gjorts för ett flertal element i relevanta ekosystem. Det finns dock luckor i dessa mätningar, vilket SSM tidigare påpekat, och senast vid granskningen av SR-PSU pekade SSM på behovet av parade växt- och markprover för vissa ekosystem.

De empiriskt bestämda CR-värdena är emellertid behäftade med stora osäkerheter och SKB har därför arbetat långsiktigt med att utveckla alternativa metoder för att uppskatta radionuklidupptag i organismer (till exempel Kumblad and Kautsky 2004, Konovalenko 2012). I tidigare säkerhetsanalyser har kolupptag i växter och djur baserats på den specifika aktiviteten av oorganiskt kol, det vill säga aktiviteten relativt det stabila ämnet. I SR-PSU antogs upptaget av klor vara begränsat av växternas näringsbehov, och i säkerhetsvärderingen för SFL har SKB även använt en modell för ett reglerat upptag för två andra växtnäringämnen (kalium och kalcium). I samband med tidigare Fud-granskningar har SSM uppmuntrat detta arbete, och senast i granskningen av SR-PSU uttryckte sig SSM positivt till att SKB fortsätter arbetet med att fördjupa kunskapen om biologiskt upptag av radionuklider.

För de flesta större djur är upptaget av radionuklider främst kopplat till födointag, och därför har SKB:s arbete fokuserat på att beskriva näringskedjor. Initialt sker upptaget i näringskedjan via växter och är alltså kopplat till systemets primärproduktion. SKB:s tidigare arbete kring upptagsmekanismer för akvatiska och terrestra system har beskrivits i ekosystemböckerna (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010), där beskrivningarna till stor del baserats på data från SKB:s platsundersökningar.

Senare tids forskning indikerar att vissa radionuklider kan ackumuleras nära rinnande vatten (Lidman et al. 2017a, Tiwari et al. 2017, Ingri et al. 2018, Ledesma et al. 2018), men också att det finns andra processer som kan påverka omsättning och transport av radionuklider i rinnande vatten, till exempel gasutbyte (Natchimuthu et al. 2017a, b, Wallin et al. 2018). Processerna påverkas direkt eller indirekt av metabolismen hos växter eller mikroorganismer, men även av kemiska och abiotiska processer (avsnitt 13.4 och 13.5) och SKB utesluter inte att rinnande vatten kan ha en större betydelse för radionuklidomsättning i ytekosystemen i vissa framtidsscenarier än vad som tidigare antagits.

Generella mekanismer för upptag av radionuklider i terrestra ekosystem har tidigare studerats med hjälp av Coup- och Traceymodellerna (Gärdenäs et al. 2009). Dessa modeller har under de senaste åren vidareutvecklats för att inkludera bladupptag av våtdeposition i jordbrukssystem (Gärdenäs et al. 2017), och i säkerhetsvärderingen för SFL implementerades även en enkel representation av bladupptag och allokering av radionuklider i växter i de modeller som används för konsekvensberäkningar i samband med bevattning (SKB 2019a). Under arbetet med SFL användes även en semi-empirisk modell för att bättre beskriva de processer som styr klorupptag i växter (SKB 2019a). Modellen utvecklades ursprungligen för en skog i Frankrike (Montelius et al. 2016), och har nu parametriserats med fältdata från Forsmark.

Vid arbetet med säkerhetsanalysen för SFR har inlagring av organiskt kol, gastransport och upptag av koldioxid via rötter bedömts som viktiga för att beskriva omsättningen av kol-14. Biosfärsmodellen uppdaterades i enlighet med detta i SR-PSU (Saetre et al. 2013). Efter synpunkter från SSM:s externa granskare (Walke et al. 2017) har SKB inom säkerhetsvärderingen för SFL fortsatt arbetet med att utveckla den integrerade modelleringen av stabilt och radioaktivt kol. I den preliminära granskningen av SR-PSU ansåg SSM att SKB bör fortsätta utvecklingen av kol-14-modelleringen och verifiera den genom jämförelser av modellresultat med data och andra kol-14-modeller. SKB deltar aktivt i den internationella arbetsgruppen för kol-14 i Bioprot. I säkerhetsanalysen används bland annat det försiktiga antagandet att allt kol-14 är tillgängligt för fixering via fotosyntes (i form av koldioxid eller vätekarbonat). Att detta är ett rimligt antagande i omäta jordlager har påvisats experimentellt (Hoch et al. 2014), men i syrgasfria miljöer kan kol-14 även tänkas nå biosfären i form av metan.

Detta skulle kunna påverka hur stor del av ett kol-14-utsläpp som är tillgängligt för upptag i växter och resten av näringskedjan, och om det beaktades i transport- och dosmodelleringen skulle det därmed kunna ha en effekt på beräknade doser.

Under de senaste åren har SKB initierat arbeten för att beskriva metanomsättning i naturliga ekosystem (Natchimuthu et al. 2015), och genom ett samarbete med Linköpings universitet har SKB tillgång till ett stort och aktivt vetenskapligt nätverk. Innovativ metodutveckling har resulterat i nya mätmetoder (Bastviken et al. 2015, Gålfalk et al. 2015) och värdefulla kunskaper om metanflöden i olika biotoper (Natchimuthu et al. 2015, 2017b, Denfeld et al. 2016, Wallin et al. 2018). Metan som når ytekosystem från berget kan oxideras av mikroorganismer och omvandlas då till biomassa eller koldioxid. Den del som inte oxideras kan avges till atmosfären på olika sätt, såsom via bubbelflöde, diffusion genom vatten, eller genom transport via luftkanaler i vattenlevande växter. Kol-14 från radioaktivt avfall kan alltså antingen nå atmosfären som metan eller koldioxid (CO₂), eller också tas upp av näringsväven via metanoxiderande mikroorganismer eller via växtupptag av koldioxid som bildats genom metanoxidation. Metanavgången visar en stor dynamik och variation i till exempel rinnande vatten (Natchimuthu et al. 2017b, Lupon et al. 2019) och istäckta sjöar (Denfeld et al. 2016). Samtidigt verkar inte vegetationstypen spela någon avgörande roll för metanomsättningen i våtmarker (Milberg et al. 2017). Preliminära resultat från metanmätningar i Forsmark visar mycket hög metanemission från en våtmark, vilket indikerar att metanbildning och metanavgång kan vara viktiga i en typ av miljö där radionuklidutsläpp från ett förvar skulle kunna ske. Transport och upptag av gas kan också vara av betydelse för andra ämnen som kan dunsta, till exempel selen, jod och klor (Hardacre and Heal 2013). I naturliga vatten förekommer klor oftast som den relativt mobila organiska kloridjonen, men under vissa förhållanden kan det bilda organiska föreningar, vilka har andra upptags- och upplagringsvägar än organiskt klor. Uppehållstiden för klor i terrestra system är därför väldigt lång, och det finns ett antal olika pooler av klor som beter sig på sinsemellan helt olika sätt (Bastviken et al. 2013). Omvandlingen och upptaget styrs av biologiska processer i marken och växterna. Kunskaperna om avdunstning (volatilisering) av klor har sammanfattats i en rapport (Svensson 2019). Den nya bilden av klor som börjar framträda är baserad på studier i markmiljöer, men motsvarande studier i akvatiska system saknas, se säkerhetsvärderingen för SFL (SKB 2019a), se också avsnitt 13.5.

Analysen av doser till andra organismer än människa som gjordes i SR-Site har därefter uppdaterats av Jaeschke et al. (2013). Den uppdaterade metodiken har använts i analysen för SR-PSU, och har där integrerats med transport- och ackumulationsberäkningarna (SKB 2014a). I granskningen av SR-PSU uttryckte sig SSM positivt till denna metodikutveckling (SSM 2019). SKB ser att modeller som beskriver upptag och ackumulation av ämnen i näringsvävar och ekosystem ger en möjlighet till oberoende jämförelser med Erica-verktyget.

SKB har testat nya metoder för att beskriva organismsammansättningen på platserna, för att därigenom kunna identifiera organismer som kan exponeras eller överföra radionuklider, eller störas av annan verksamhet vid förvaret. Förekomsten av gölgroda i gölar med potentiell grodförekomst undersöktes genom eDNA-analyser på vattenprover. Studien visade att detta kan vara en användbar metod för översiktliga inventeringar (Eiler et al. 2018).

Program

SKB kommer att fortsätta det långsiktiga arbetet som syftar till att ersätta eller komplettera koncentrationsfaktorer för organismer med mekanistiska modeller. För existerande modeller planeras en validering med fältdata (till exempel näringsämnen och andra stabila ämnen). I rekommendationerna för ett fortsatt övervakningsprogram i Forsmark (Berglund and Lindborg 2017) föreslås kompletterande provtagningar i olika biotoper. Under den kommande femårsperioden planeras nya och koordinerade provtagningar av växt- och jordprover inom det operativa detaljundersökningsprogrammet (avsnitt 12.4). Ett syfte med provtagningen är att fylla de luckor som i dag finns vad gäller element (avsnitt 13.5). Analyserna planeras ske med använda mildare lakningsprocesser än tidigare för att bättre representera vad som är växttillgängligt. Det ger också ett underlag för utvecklingen av mekanistiska modeller för ämnen som tas upp passivt (till exempel med vatten), respektive aktivt (till exempel näringsliknande ämnen). Dessutom planeras en jämförelse av resultat från de CR-baserade metoder som använts hittills med resultat från allometrisk metod (till exempel Beresford et al. 2016).

Som en fortsättning på arbetet med sjöekosystemmodellen kommer en modell för rinnande vatten att utvecklas. Trots att rinnande vatten på många sätt liknar sjöekosystemen så kan skillnader när det gäller hydrologin, förutsättningar för kemisk utfällning av olika ämnen (avsnitt 13.5) och biologiska upptagsmekanismer ge andra förutsättningar för ackumulation av radionuklider och dos. Parallellt med detta kommer arbete med utveckling av den terrestra ekosystemmodellen att fortsätta, med fokus på växters rotupptag, och på kopplingar mellan radionuklidupptag och vattentransport respektive primärproduktion.

Pågående studier av egenskaper hos klor i terrestra och akvatiska miljöer (våtmarker, sjöar och rinnande vatten) kommer att fortsätta med syftet att utveckla modellerna för transport och ackumulation av klor-36. I det fortsatta arbetet planeras nya mätningar av organiskt bundet klor (avsnitt 13.5) som sedan länkas till flödet av klor genom systemet samt till biologisk produktion, för att därigenom kunna modellera klorets kretslopp. I modellerna kommer även avdunstning av klor som beskrivs i avsnitt 13.5 att inkluderas.

Betydelsen av gastransport, till exempel av metan och koldioxid, i vatten, mark och atmosfär kommer fortsatt att undersökas tillsammans med upptagsprocesser av gas genom primärproduktion och mikrobiell metabolism. Metanflödet från djupa marklager i naturliga ekosystem kommer att studeras i samarbete med Linköpings universitet med hjälp av nyutvecklade mätmetoder, för att kunna bedöma i vilken utsträckning det späds ut av ytligare producerad metan och hur stor andel som oxideras respektive frigörs till atmosfären. Fortsatt arbete planeras för att studera emissionerna och kvantifiera källorna av metan i Forsmark.

SKB kommer även fortsättningsvis att aktivt delta i Bioprotas arbete med kol-14.

13.3 Temporal och spatial heterogenitet i landskapet

En av de viktigaste faktorerna för beräknad dos vid ett utsläpp är landskapets utseende och dynamik. Beroende på vilken typ av ekosystem ett utsläpp sker till och vilka egenskaper ekosystemet har i förhållande till när utsläppet sker kan den beräknade dosen påverkas flera storleksordningar.

Nuläge

Som ett underlag för säkerhetsanalyser i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har SKB tagit fram en beskrivning av de företeelser och processer som styr landskapets utveckling fram till i dag (Söderbäck 2008). Den historiska beskrivningen har, tillsammans med beskrivningen av dagens landskap och förståelsen för hur det fungerar (SKB 2008, 2009b), använts för att beskriva en sannolik utveckling av landskapet under olika antaganden om framtida klimat och strandlinjeutveckling. Landskapsutvecklingen i Forsmark styrs av klimatvariation och strandlinjeförskjutning (kapitel 14). Förutom dessa storskaliga och långsamma förändringar påverkas landskapet också av sediment som tillförs och omlagras, vilket bland annat innebär att sjöar grundas upp och växer igen (Brydsten and Strömngren 2010). När successionen gör att olika ekosystem avlöser varandra förändras de kemiska och fysikaliska egenskaperna hos mark och vatten, liksom artsammansättningen av växter och djur.

I landskapets topografiska lågpunkter, till exempel i anslutning till sjöar, vattendrag och våtmarker, återfinns översvämningsområden samt hydrologiska utströmningsområden för djupt grundvatten (avsnitt 13.4). Förutsättningarna för transport och ackumulation av radionuklider i dessa områden bestäms dels av topografien och egenskaper i det lokala och regionala avrinningsområdet, dels av utströmningsområdets egenskaper som till exempel storlek och lagertjocklekar. Den digitala höjddmodellen och jorddjupsmodellen har uppdaterats inom platsmodelleringen (Sohlenius et al. 2013). Dessa uppdaterade geometriska modeller behöver inarbetas i landskapsmodellerna (se nedan).

Det finns en naturlig samvariation mellan storlek och egenskaper hos de utströmningsområden som kan nås av utsläpp, och denna samvariation är starkt beroende av var i landskapet objekten är belägna. Objektens position är även kopplat till avrinningsområdets storlek och påverkar vilka tidsperioder som utsläpp till objektet är möjlig (Berglund et al. 2013). Variationer i den lokala topografien, jordlagerföljden och ekosystemsuccessionen kan också förväntas skapa en heterogenitet inom ett utströmningsområde, vilket SSM påpekat i granskningarna av SR-Site och Fud-program 2013. I SR-SFL redovisas hur doserna från radionuklider med olika egenskaper påverkas av i vilken

typ av ekosystem som utsläppen sker, men också av utströmningsområdenas egenskaper i form av storlek och lagertjocklekar (SKB 2019a, d).

För att undersöka hur småskalig variation i topografi och jordlagertjocklekar påverkar transport och ackumulering av radionuklider som når ett utströmningsområde har SKB påbörjat simuleringar med Comsol-verktyget (von Schenck et al. 2015, Silva et al. 2015, Abarca et al. 2016b). Studierna omfattar det viktigaste utströmningsområdet för SFR, en markprofil i Krycklanområdet i Västerbotten (Abarca et al. 2017) samt ett utströmningsområde i Laxemar. Eftersom det under senare år har utvecklats verktyg som kopplar ihop vattenflöden med kemiska och fysikaliska processer som sorption och utfällning i rumsligt distribuerade modeller så finns det numera goda förutsättningar att studera hur till exempel flödesvägar, lagermäktigheter och redoxzoner påverkar ackumulering av olika ämnen och hur löst organiskt material påverkar ämnestransport, se vidare avsnitt 13.4.

Det doktorandarbete i Krycklanområdet (Lidman 2013) som SKB tidigare har finansierat har fortsatt i form av en postdoktorstjänst. Flera arbeten därifrån visar att landskapets storskaliga mosaik av skog och våtmark har en stor inverkan på olika ämnens masstransport, samt att gradienter i tunna skikt kan ha en stark påverkan på både förekomstformer och ackumulering av olika ämnen (Lidman et al. 2016, 2017a, Tiwari et al. 2017, Ingri et al. 2018, Ledesma et al. 2018). Dessutom har arbetet gett flera viktiga underlagsrapporter för SKB:s säkerhetsanalyser (Lidman et al. 2017b, SKB 2019a).

För att förstå landskapets inverkan på grundvattenrörelser och ämnestransport under ett kallt klimat-tillstånd har ett område på Grönland framför isranden studerats inom Grasp (avsnitt 12.3.4). Där har bland annat det hydrologiska samspelet mellan det aktiva lagret, sjö och talik studerats, liksom betydelsen av vindburen deposition för bildningen av sjösediment och för dessa sediments kemiska egenskaper. Två doktorsavhandlingar har publicerats (Johansson 2016, Lindborg 2017). De beskriver hydrologi respektive materialomsättningen i området (Lindborg et al. 2016a, b, Rydberg et al. 2016, Petrone et al. 2016). De nya kunskaperna från Grasp har ännu inte utnyttjats fullt ut för att förstå våra platser i Sverige.

SKB har deltagit aktivt i IAEA-projekten EmrasII och Modaria I och II. En arbetsgrupp inom Modaria I och II har arbetat för att åstadkomma en samsyn när det gäller beskrivning av den kommande klimatutvecklingen (IAEA 2016, Lindborg et al. 2017, 2018). Projektet är viktigt för en gemensam syn på klimatutvecklingen och hur den kan påverka ytnära ekosystem. Resultaten från arbetet i Modaria används för närvarande i en pågående revidering av IAEA:s Biomass-metodik (Lindborg 2018) inom ramen för Bioprota.

Som beskrivits ovan har SKB sedan platsundersökningarnas start utvecklat en landskapsmodell för att beskriva utvecklingen av havsbassänger, sjöar och jordlager. Modellen har använts i säkerhetsanalyserna SR-Site och SR-PSU (Brydsten and Strömberg 2010, 2013, Lindborg et al. 2013), men verktygen och metoderna som använts behöver uppdateras inför kommande säkerhetsanalyser för att kunna möta framtida behov, men också för att säkra fortsatt kompetens inom området. För att beskriva landskapsutveckling har SKB därför initierat ett arbete med en alternativ modell, Untamo (Pohjola et al. 2014), som är utvecklad av Posiva och som delvis bygger på SKB:s tidigare landskapsmodellering.

I granskningen av SR-PSU fick SKB en del kritik för brist på transparens i dosberäkningar då dessa drivs av komplexa och svåröverblickbara stödmodeller (Walke et al. 2015). Dock visar erfarenheterna från SR-PSU att det är svårt att förutse och förenkla förlopp som är beroende av landskapets utveckling innan utsläppsdynamiken är känd (Kautsky et al. 2016). SKB avser därför att arbeta vidare med förenklade modeller, men i första hand kommer detta att göras i anslutning till resultatutvärderingen (till exempel SKB 2019a, se även avsnitt 13.4). Säkerhetsvärderingen för SFL visar att en mer komplex modell, där man utnyttjar förståelsen för hur jordbruksmark åldras, ger lägre doser än den förenklade modell som användes i basfallet (SKB 2019a). Orsaken till lägre dos är olika beroende på radionuklid.

Program

Insikterna från arbetet med Comsol-modellerna i säkerhetsvärderingen för SFL kommer att vidareutvecklas för potentiella utströmningsområden i Forsmark, för att allsidigt belysa betydelsen av olika antaganden kring rumslig spridning och upplösning för beräknad dos till den mest exponerade gruppen. SKB bedömer att fortsatt arbete med Comsol-verktyget ger möjlighet att besvara eller illustrera flera frågor kring den rumsliga upplösningen.

Modellering av landskapsutveckling eller utveckling av enskilda ekosystem kommer att undersökas genom att jämföra SKB:s tidigare resultat och landskapsmodellen Untamo. Kunskaperna från Grasp och Krycklan kommer att tillämpas på Forsmarksområdet för att därigenom beskriva effekter av ett kallare klimat på landskapsnivå.

SKB kommer även fortsatt aktivt att delta i det internationella arbetet som syftar till att beskriva den långsiktiga utvecklingen på landskapsnivå inom Bioprot och i en eventuell fortsättning av IAEA-programmet Modaria II.

13.4 Transport- och ackumulationsprocesser

Med transportprocesser avses här framför allt abiotisk transport som sker med vatten, partiklar och i viss mån med gas. Med ackumulationsprocesser avses processerna i lösa avlagringar (till exempel sorption), men däremot inte upptag av radionuklider i organismer (avsnitt 13.2).

Transportmodellering är en central komponent i såväl ekosystem- som dosmodellering. Hydrologin påverkar både vilka områden som kan komma att bli kontaminerade vid ett eventuellt utsläpp av radionuklider och vilka mängder och koncentrationer av nuklider som når dessa områden, medan sorption avgör hur mycket som kan ackumuleras i marklagren eller associeras till partiklar. Osäkerheterna i sorptionen (K_d) är ofta mycket stora, vilket påverkar dosberäkningarna.

Nuläge

I avrapporteringen till säkerhetsvärderingen för SFL beskrivs hur den nuvarande kunskapen om transport- och ackumulationsprocesser i biosfären har använts i säkerhetsvärderingen (SKB 2019a).

I granskningen av SR-Site påpekade SSM betydelsen av uppdelningen av marklager. I säkerhetsvärderingen för SFL undersöktes hur uppdelningen av marklager påverkar den modellerade transporten av radionuklider. Då diskretiseringen av de undre marklagren i biosfärsmodellen ökades så sänktes också dispersionen i beräkningarna så att den motsvarar den makro-dispersion som kan observeras i fältförsök. Det påverkade ackumulation och tidsförlopp, men effekten var starkt beroende av biosfärsobjektets och radionuklidernas egenskaper (SKB 2019a). Trots att effekterna av modelluppdateringen för de flesta dosbidragande radionuklider i områden med hög grundvattenutströmning är begränsad, bedömer SKB att den nya modellen ger en mer rättvisande bild av effekterna av radioaktivt sönderfall under transporten genom jordlager, och avser därför att använda den finare diskretiseringen i kommande säkerhetsanalyser.

Urancedjans sönderfallsprodukter uppvisar sinsemellan olika transportegenskaper, och i säkerhetsvärderingen för SFL genomfördes en modelleringsstudie som visade betydelsen av halveringstiden, sorptionen och transporthastigheten i de olika marklagren (SKB 2019a). Förutom att Comsol-verktyget ger möjlighet att förfina tids- och rumsupplösning (avsnitt 13.3) så utgör det också ett komplement till den modellering som gjorts med det hydrologiska verktyget MikeShe. Comsol ger möjlighet att i detalj studera mekanismer som drivs av fysikaliska, kemiska och biologiska processer, liknande det man kan göra med Coup-modellen (Gärdenäs et al. 2009, 2017), samtidigt som man kan använda landskapet som en drivande faktor för vattenflöden. Ett projekt studerade möjligheten att med Comsol beräkna K_d -värden som varierar över tid och rum (Silva et al. 2015, Abarca et al. 2016b)

I säkerhetsvärderingen för SFL detaljstuderades radionuklidtransporten i det objekt som gav högst doser. En tredimensionell Comsol-modell beräknade vattenflöden och sorption i olika regolitlager (SKB 2019a). Modelleringen visade att för flera lager var flöden och halter koncentrerade till ett fåtal områden, medan andra lager effektivt spred ut radionukliderna i en stor volym. Samma modell användes för att jämföra med förenklad modell i Ecolego (SKB 2019a). En mer detaljerad MikeShe-modell studerade hydrologin i samma område (Johansson and Sassner 2019), vilket gav ett liknande mönster av utströmningsområden. En svårighet i flera av dessa detaljstudier är att resultaten påverkas mycket av hur de fysiska avgränsningarna görs vilket kräver fortsatt arbete för att ge jämförbara resultat.

Den välstuderade så kallade S-profilen i Krycklan (Lidman et al. 2017a) har implementerats i Comsol-verktyget. Modellen visar urans speciering i olika organiska komplex och jämförs med mätningar i profilen. Databasen i det kemiska modellverktyget Phreeqc har uppdaterats för att kunna hantera organiska syror bättre, eftersom komplexering med dessa är avgörande för urans och många andra radionuklidens mobilitet i dessa miljöer. I samma område startades ett doktorandprojekt med fokus på ämnestransport nära ytan. I ett första steg studerades tjälens betydelse för interaktionen mellan yt- och grundvatten (Jutebring Sterte et al. 2018) och ett fortsatt arbete planeras med reaktiv transport (avsnitt 12.3.1).

Vid transporten av radionuklider från terrestra till akvatiska ekosystem spelar ofta den bäck- eller strandnära zonen en avgörande roll genom att den jämfört med normala skogsjordar ofta har lägre pH, mer reducerande förhållanden och högre koncentration både av fast organiskt material, som kan binda många radionuklider, och av löst organiskt material, som kan transportera radionuklider som annars inte skulle vara mobila. Detta kan leda till att koncentrationen av vissa ämnen, exempelvis torium, är hundrafalt högre i markvattnet i den bäcknära zonen än i normala skogsjordar. Inga tydliga skillnader har dock kunnat påvisas när det gäller upptaget i vegetationen, vilket troligtvis hänger samman med att dessa ämnen i hög grad är bundna till löst organiskt kol och därmed inte är biotillgängliga (Lidman et al. 2017a). För den långsiktiga transporten av radionuklider genom landskapet är det dock en viktig miljö, eftersom den kontrollerar vad som hålls kvar i de terrestra systemen och vad som transporteras vidare till ytvattnen (Ledesma et al. 2018). Betydelsen av dessa organiska jordar för transporten av olika huvud- och spårelement är även synlig ända upp på landskapsnivå (Tiware et al. 2017). Av speciellt intresse för att förstå den långsiktiga massbalansen i dessa miljöer är lantanidserien, i synnerhet europium som också i Forsmarksområdet uppvisar ett avvikande beteende. Europium har därför potential att fungera som spårämne i löst fas och som ett verktyg för att kvantifiera vittrings- och ackumulationsprocesser i jordar.

SSM och dess granskare har efterfrågat enklare radionuklidtransportmodeller som ett komplement till de som används i säkerhetsanalysen (SSM 2019). I säkerhetsvärderingen för SFL påbörjades utveckling av en jämviktsmodell av den befintliga radionuklidtransportmodellen för att enkelt och snabbt kunna undersöka hur olika parametrar och antaganden påverkar modellresultaten. I säkerhetsvärderingen för SFL implementerades också en förenklad hydrologisk modell som beskriver vertikalflödena som en funktion av avrinningen (SKB 2019a).

För att beräkna effekten av kvävespridning från utsläpp av sprängmedelsrester vid bygge och drift av förvaren i Forsmark har de oceanografiska modellerna uppdaterats med kunskap som tagits fram genom platsundersökningar och forskning (se sammanfattning i Aquilonius 2010). Resultaten från dessa studier, tillsammans med resultaten från det så kallade Predo-projektet, ett samarbetsprojekt för nya beräkningsmetoder av doser från driften av kärntekniska anläggningar, kommer att ge värdefulla insikter om vattentransporten i havsområdet utanför Forsmark.

Program

När det gäller hydrologi och transport beskrivs flera aktiviteter som även berör ytsystemen i avsnitt 12.3. En viktig fråga som SSM påpekat vid granskningarna av de senaste säkerhetsanalyserna är hur man från en detaljerad hydrologisk modell skapar parametrar som beskriver hydrologiska flöden som sedan kan användas i säkerhetsanalysen för att beskriva huvuddragen av transport med hjälp av en enkel boxmodell. I säkerhetsvärderingen för SFL påbörjades en studie (SKB 2019a) som kommer att fortsätta med data från Forsmarksområdet. Alternativ till dagens metod kommer att undersökas, med målsättningen att utveckla en metodik som fångar transporten av vatten och lösta ämnen under längre tidsperioder och på ett rättvisande, enkelt och lättbegripligt sätt, men samtidigt bibehåller en transparens om vilka faktiska mekanismer som styr transporten.

Som nämnts i avsnitt 13.2 planeras en fortsatt utveckling av modellen för rinnande vatten. Förutom vattnets rörelser till och i vattendragen finns flera kemiska processer som sker i övergången från land till vatten (avsnitt 13.5), och detta kan starkt påverka förutsättningar för ackumulering av radionuklider och därmed potentiell dos. Avsikten är att utveckla en radionuklidtransportmodell för detta heterogena ekosystem.

Fortsatta studier av Krycklanområdet förväntas ge värdefulla insikter kring processerna lakning, mobilisering och ackumulation av ämnen i ett landskapsperspektiv. Ett delmål är att med hjälp av kemiska och hydrologiska randvillkor modellera ackumulation, lakning och ämnestransport i ett tvärsnitt av ett avrinningsområde.

I säkerhetsvärderingen för SFL genomfördes en studie av urans sönderfallskedja i samband med modelleringen av ytekosystemen. Denna studie kommer att utvecklas under den kommande perioden. Arbetet planeras bland annat att omfatta transport och exponering av radon, och syftar till att belysa betydelsen av olika transporthastigheter för den beräknade dosen. I platsmodelleringen planeras att den oceanografiska modellen uppdateras och anpassas för ämnestransport i området.

13.5 Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen

Förutom att olika ämnen tas upp i olika organismer och näringskedjor (avsnitt 13.2) och transporteras och ackumuleras på olika sätt i lösa avlagringar (avsnitt 13.4), så har de också olika kemiska och radiologiska egenskaper. Dessa egenskaper, i samverkan med den kemiska miljön som ämnena befinner sig i, påverkar både deras mobilitet och radiotoxicitet. Detta avsnitt avser framför allt att beskriva programmet för att mäta eller sammanställa dessa grundläggande egenskaper.

Nuläge

Inför säkerhetsanalysen SR-PSU sammanställdes de koncentrationsfaktorer (CR) och sorptionsdata (K_d) som användes i analysen av ytnära ekosystem i Forsmark (Tröjbom et al. 2013), och dessa har därefter uppdaterats inför säkerhetsvärderingen för SFL. Värdena baseras i första hand på mätningar från platsen och i andra hand på tillgängliga internationella data. Under åren 2009–2019 har SKB deltagit i IAEA-programmen EmrasII och Modaria I, II. Inom dessa program har aggregerade CR- och K_d -värden sammanställts, och dessa kommer att publiceras i en kommande IAEA-rapport. Delar av detta arbete har redan publicerats i andra sammanhang (Wood et al. 2013, IAEA 2014, 2016). Posiva har också sammanställt intressanta kemidata från ytnära ekosystem i Finland (t.ex. Haavisto and Toivola 2017, Kuusisto 2017, Lahdenperä 2017), vilket möjliggör jämförelser med SKB:s data.

Det finns ett behov av att komplettera den genomförda sammanställningen med data för några ämnen som bedöms vara viktiga för SKB:s olika slutförvar (till exempel radium, molybden, nickel, klor, kol-14).

För att få en överblick av molybdens egenskaper och dess väg från källan till förvaret arrangerade SKB en workshop med cirka 30 deltagare från kärnkraftsindustrin, SKB samt inbjudna forskare (Lidman et al. 2017b). I arbetet med säkerhetsvärderingen för SFL har nya data för molybden och nickel från SKB:s platsundersökningar, Krycklanområdet samt litteraturen ställts samman (SKB 2019a).

En grundlig genomgång och syntes av tillgängliga kemidata för ytvatten (sjöar, vattendrag och hav), ytnära grundvatten, jordar, sediment och biota från platsundersökningsområdena har genomförts, med speciellt fokus på molybden och nickel (Lidman et al. 2017b, SKB 2019a). Molybden visade överlag hög mobilitet, utom i starkt reducerande miljöer som torvjordar eller organiska sjö- och havssediment, där kraftig ackumulation av ämnet kunde observeras. Nickel visade generellt stora likheter med många andra tvåvärda övergångsmetaller, vilket tyder på att denna grupp generellt styrs av liknande processer. För både nickel och molybden kunde konstateras att de platspecifika K_d -värdena åtminstone kvalitativt återspeglar de transport- och ackumulationsmönster som kan observeras i platsundersökningsområdena.

En inledande studie av omsättningen av klor i Forsmark visar på ovanligt höga klorkoncentrationer i fältskiktet (Svensson et al. 2018). Andra nya studier av klors omsättning och förekomstform (Montelius et al. 2016, Svensson T et al. 2017, Svensson 2019) finns sammanfattade i SKB (2019a).

Den kemiska miljön som ett ämne befinner sig i är mer eller mindre avgörande för ämnets kemiska förekomstform (speciering), vilket i förlängningen avgör ämnets egenskaper i denna miljö. Den

kemiska miljön kan karaktäriseras med hjälp av pH, redox, halter av huvudkonstituenten (dvs dominerande an- och katjoner) och mängden löst organiskt material. Genom en rad olika processer som landhöjning, klimatförändringar, vittring och ekosystemsuccesjon kan den kemiska miljön på en plats förändras över tiden.

Förekomsten av våtmarker och andra organiska jordar är viktig för många radionuklidens mobilitet. Detta beror främst på att koncentrationen av löst organiskt kol (DOC) ökar, vilket i sin tur leder till lägre pH och en ökad löslighet för järnutfällningar (Köhler et al. 2014). Detta har stor betydelse för mobiliteten hos många svårslösliga radionuklider, då de i vattenfas ofta förekommer bundna till antingen kolloidalt järn eller DOC. Utströmmande djupt grundvatten kan också ha en signifikant effekt på vattenmiljön (avsnitt 13.4) genom att det påverkar både pH och DOC-halten, och därmed också mobiliteten hos många radionuklider (Lidman et al. 2016).

Forsmarksområdet kännetecknas av riklig förekomst av kalcit i jorden, vilket bland annat leder till högt pH och höga karbonatkoncentrationer i vattnet. Genom urlakningsprocesser förväntas kalcitens påverkan på vattenkemin gradvis minska under de kommande årtusendena, vilket kan förväntas få stor betydelse för mobiliteten hos flera viktiga radionuklider. Bland annat förväntas uran bli betydligt mindre mobilt i ett framtida landskap med mindre kalcitpåverkan. Studier från Krycklans avrinningsområde i norra Sverige visar att kvoten uran-234/uran-238 kan fungera som en indikator för djupare grundvatten (Lidman et al. 2016) och även i Forsmark syns tydliga skillnader mellan uran från berggrunden och uran från de kvartära avlagringarna.

Vid sidan av organiskt material är järn potentiellt viktigt både för sorption (till exempel ferrihydrit) och kolloidal transport av ett flertal radionuklider i oxiderande miljöer (Dahlqvist et al. 2007). Den naturliga landskapsutvecklingen i platsundersökningsområdena med avsnörning av sjöar och sedermera bildning av våtmarker kan dock, tillsammans med klimatförändringar, leda till att tidigare oxiderande miljöer försumpas. Detta kan i sin tur destabilisera järn(III)-utfällningar och därmed mobilisera ämnen som är bundna till dem (Ingri et al. 2018).

Avfallet i SFL och SFR innehåller även potentiella miljögifter. SKB anordnade 2016 en workshop med representanter från andra avfallsorganisationer för att få en överblick över vilka ämnen det handlar om, vilka metoder som kan användas och vilka problem som kan uppstå när man försöker bedöma effekterna av dessa miljögifter (Thorne and Kautsky 2016). SKB har även deltagit i Bioprotas program och andra workshoppar där miljögifter i förvar för radioaktivt avfall diskuteras (NRPA 2018).

Program

I planerna för det fortsatta provtagnings- och övervakningsprogrammet för Forsmark föreslås kompletterande provtagningar för olika ämnen (Berglund and Lindborg 2017). Inom det operativa programmet planeras kompletterande provtagningar för element och radionuklider där platsdata i dag saknas. Detta underlag kommer att möjliggöra en mer nyanserad beskrivning av sorptionsegenskaper (K_d) där man utnyttjar andra mjukare lakningsmetoder (än totalinnehåll, se också avsnitt 13.2) och bättre tar hänsyn till den kemiska miljön i utströmningsområden.

Klorid, som tidigare har betraktats som den dominerande formen av klor i naturen, har visat sig vara mer reaktiv än man tidigare trott, och mängden organiskt klor är i många miljöer betydligt högre än mängden lättlöslig klorid (avsnitt 13.2). SKB fortsätter en fördjupad utvärdering av klorelets fördelningsmönster, med målsättningen att knyta det observerade mönstret till processer i ekosystemen. Det innebär att förekomster av oorganiskt och organiskt klor i vatten, sediment, bottenlevande djur, växter, djurplankton och fisk kommer att kartläggas. Dessutom planeras en uppskattning av omsättningen av organiskt klor i sediment och vatten, samt en studie för att beskriva de totala flödena av flyktiga organiska klorföreningar från olika miljöer.

I det fortsatta arbetet med att uppskatta upptags- och transportprocesser för metan och koldioxid (avsnitt 13.2) kommer mätningar att genomföras för att bestämma halter av stabila isotoper hos dessa ämnen och därigenom kunna separera transport från djupare jordlager och horisontella ytliga flöden. Mätningarna kompletteras med nya metoder som effektivare kan kartlägga flöden av metan och koldioxid (bland annat med hjälp av sensornätverk och en hyperspektral kamera för metan).

Inom det operativa programmet planeras undersökningar med syfte att beskriva hur den mark-kemiska miljön kommer att förändras över tid i Forsmark, för att i förlängningen ge en bild av olika ämnens rörlighet och fastläggning i ett framtida landskap. Detta kommer att göras genom studier av representativa ekosystem i närheten av Forsmark, men belägna på högre höjd över nuvarande havsstrandlinje och därmed äldre än ekosystemen i Forsmark.

Fortsatta studier i Krycklanområdet syftar till att öka kunskapen om urlakning och anrikning av olika ämnen i en bäcknära zon. Järnkolloider (tillsammans med DOC) är viktiga för att transportera mer svårslösliga radionuklider. De påverkar mobiliteten och biotillgängligheten och därmed upptag i biota. En studie om hur man kan använda lantanider som spårämnen för lakning har påbörjats i Krycklan och kommer att fortsätta i Forsmarksområdet. Med tanke på uran och dess sönderfallsdöttrar kommer en grundligare genomgång av isotopdata från de naturliga sönderfallskedjorna från platsundersökningsområdena att genomföras.

14 Klimat och klimatrelaterade processer

I avsnitt 4.9 beskrivs ett antal övergripande frågor inom SKB:s klimatarbete som behöver vidare insatser, antingen för att det har framkommit i myndigheternas kommentarer vid granskning av inlämnade ansökningar eller för att SKB själv har bedömt att det behövs för att minska osäkerheter i pågående eller kommande säkerhetsanalyser. Dessa kvarstående frågor rör:

- i) Historiska klimatförändringar – klimat under Weichsel och holocen.
- ii) Inlandsisars dynamik och beteende.
- iii) Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning.
- iv) Ålder och långsiktig stabilitet hos berggrundsytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av glacial erosion.
- v) Validering av permafrostmodell.
- vi) Variabilitet hos klimat och inlandsisar under de kommande en miljon åren.
- vii) Beskrivning av inlandsisars hydrologi från Greenland Analogue Project (GAP).

De flesta av dessa frågor rör alla tre slutförvaren, det vill säga Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL. I detta kapitel beskrivs det nuvarande kunskapsläget och pågående eller planerade insatser inom de ovanstående områdena mer ingående.

14.1 Historiska klimatförändringar

Den rådande klimatförändringen resulterar i förhöjda temperaturer både globalt och i Skandinavien som en följd av mänskliga utsläpp av växthusgaser (IPCC 2013). Åtskilliga studier har visat att effekten av mänsklig påverkan på klimat i form av förhöjda växthusgasnivåer och högre temperaturer kan komma att vara synliga i 10 000- till 100 000-tals år (Clark et al. 2016, Ganopolski et al. 2016, Lord et al. 2019). Den exakta tiden för hur länge mänsklig påverkan på klimatsystemet kommer att vara märkbar är svårt att avgöra eftersom denna är starkt kopplad till bland annat hur mycket växthusgaser som människan kommer att släppa ut i framtiden, och därmed hur stor uppvärmningen i slutändan kommer att bli (till exempel Zickfeld and Herrington 2015). Detta belyses också i SKB:s klimatrappporter som tas fram inom de olika säkerhetsanalyserna, vilka i detalj beskriver den förväntade klimatutvecklingen globalt och i Forsmark för de kommande 10 000–100 000 åren under olika utsläppsscenarioer, baserat på den senaste vetenskapliga litteraturen inom området.

Trots att de nuvarande utsläppen av växthusgaser kan komma att påverka klimatet upp till 100 000-tals år, så förväntas klimatet i Forsmark *vid någon tidpunkt* inom de kommande en miljon åren, vilken är den relevanta tidsskalan för säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret och SFL, åter domineras av naturliga klimatvariationer i form av upprepade glaciationscykler. SKB använder sig därför av en referensglaciation för att beskriva hur klimat, inlandsis, permafrost, havsnivå och denudation (erosion plus vittring) kan te sig under en typisk glaciationscykel. I SKB:s säkerhetsanalyser analyseras effekten av referensglaciationen på hydrogeologi, geokemi, geosfär, landskapsutveckling, förvarsbarriärer och, slutligen, förvarets funktion och säkerhet efter förslutning. Referensglaciationen utgör även en vetenskaplig utgångspunkt för att konstruera och analysera effekten av andra tänkbara klimatutvecklingar som skulle kunna ha större påverkan på de olika förvarens säkerhet efter förslutning. Referensglaciationen utgörs av ett framtida scenario där rekonstruerade förhållanden för den senaste glaciala cykeln (Weichselglaciationen och nuvarande interglacialen holocen) upprepas för de kommande 100 000 åren. Under den gångna Fud-perioden ingick SKB:s metodik att hantera klimat i ett internationellt IAEA-program för att adressera frågan kring klimatförändringar och landskapsutveckling vid analyser av långsiktig förvarssäkerhet för förvar av radioaktivt avfall (Lindborg et al. 2018).

SKB:s framtida klimatscenarier behöver vara väl underbyggda och beskrivna för att kunna utgöra underlag till analysen av förvarens säkerhet efter förslutning. För att uppnå detta använder sig SKB både av naturliga historiska klimatarkiv och av simuleringar med klimatmodeller och andra datormodeller.

14.1.1 Klimat under Weichsel och holocen

Nuläge

Under Fud-perioden har arbetet med rekonstruktioner av klimatet under olika perioder av Weichsel, holocen och den förra interglacialen eem fortsatt genom analyser av sjösediment från Sokli i norra Finland. Studien analyserar ovanligt mäktiga och fossilrika sediment av senkvartär ålder bevarade in situ i Sokli-sänkan. Studierna bidrar med viktig information om hur snabbt klimatet i Skandinavien kan skifta under olika faser av en glaciationscykel, samt med kvantifiering av hur kraftiga klimatvariationerna kan vara i form av temperatur och i vissa fall nederbörd.

I tillägg till tidigare vetenskapliga artiklar redovisade i Fud-program 2016, har studierna av sjösediment från Sokli i norra Finland under den senaste Fud-perioden resulterat i sju vetenskapliga artiklar (Pliikk et al. 2016, 2019, Shala et al. 2017, Sánchez Goñi et al. 2017, Kylander et al. 2018, Helmens et al. 2018, Salonen et al. 2018), samt i ett stort antal abstracts presenterade vid internationella symposier. Det doktorandprojekt som studerade klimatet under interglacialen eem baserat på data från Sokli fullföljdes under samma period, och resulterade i en doktorsavhandling vid Stockholms universitet (Pliikk 2018).

Resultaten från alla genomförda studier vid Sokli har sammanfattats och satts i ett sammanhang i Helmens (2019). I Helmens (2019) ges en detaljerad rekonstruktion av klimat och miljö för nordöstra Fennoskandia från multiproxydata för i) den nuvarande interglacialen holocen (senaste 11 000 åren), ii) för varma respektive kalla perioder under tidig Weichsel (Marina isotopstadierna (MIS) 5c-d för cirka 115 000 till 90 000 år sedan) samt iii) för den föregående interglacialen eem (perioden MIS 5e för cirka 130 000 till 115 000 år sedan). Resultaten kompletterar tidigare resultat som tagits fram inom samma studie vilka tillhandahåller motsvarande information om klimat och miljö för mitt-Weichsel (MIS3 för cirka 50 000 år sedan) (Helmens 2009) och övergripande för hela Weichsel (MIS 5-2, 130 000 till 15 000 år sedan) (Helmens 2013).

Genom att använda en mängd olika proxydata (geokemiska data, analys av mängden organiskt material (Loss On Ignition), kol/kväveförhållande (C/N), pollen, diatoméer, chironomider och makrofossil) tillsammans med olika kvantitativa metoder att rekonstruera klimat, har detaljerade rekonstruktioner av miljömässiga förhållanden (till exempel avsättningsmiljö, azonal och zonal vegetationsutveckling) och klimatologiska förhållanden (temperatur och nederbörd) gjorts för de undersökta tidsperioderna.

Resultaten från Sokli reviderar delvis tidigare rekonstruktioner av historiska miljö- och klimatförhållanden under de senaste 130 000 åren i norra Fennoskandia (se till exempel Helmens 2009, 2019).

Resultaten från studierna ovan används direkt i beskrivningarna av och motiveringarna till klimatfallen som används i SKB:s säkerhetsarbete, senast i arbetet med PSAR för Kärnbränsleförvaret. Resultaten kommer att användas för att ge en bättre bild av de olika klimat som kan råda vid övergången från varmt interglacialt klimat till kalla istidsförhållanden, såsom till exempel vid starten av SKB:s referensglaciation baserad på Weichsel. Resultaten kring växlingarna i temperatur, nederbörd och vegetation under dessa klimatövergångar kan även användas i det arbete som utförs inom ämnesområdet ytekosystem i SKB:s säkerhetsanalyser. Studierna ger en bättre förståelse för SKB:s referensutveckling och metodiken för att hantera klimat och klimatrelaterade processer i långa tidsperspektiv. Genomförandet av den här typen av studier bidrar också till att förbättra dateringen av terrestra klimatarkiv i Fennoskandia och Europa, speciellt när resultaten jämförs med klimatarkiv från andra platser såsom i Wohlfarth (2013), Helmens (2019) och Schenk och Wohlfarth (2019).

Som ett led i arbetet med studier av historiska klimat från borrhålstemperaturer, har under Fud-perioden, termiska och petrografiska data från ett bergborrhål i Vättern redovisats (Sundberg et al. 2016). Resultaten har även givit information om den glaciala historien och de kvartärgeologiska och hydrologiska förhållandena i Vätternregionen (Preto et al. 2019). Under Fud-perioden har SKB även avslutat och rapporterat en studie av historiska klimat baserat på uppmätta bergtemperaturer i borrhål i Forsmark och Laxemar (Rath et al. 2019). De historiska klimaten rekonstruerade från borrhålstemperaturer kan användas som oberoende data för att förbättra analysen av realismen i vissa av de lufttemperaturer som tidigare konstruerats för Weichselperioden, det vill säga de temperaturdata som är kopplade till SKB:s referensglaciation, inklusive dess osäkerhetsintervall.

Program

Resultaten från studien av sjösediment från Sokli i norra Finland har mycket framgångsrikt bidragit till väldaterad kvantitativ information om hur klimat och miljö i norra Fennoskandia varierat under de senaste 130 000 åren (inkluderande den senaste glaciala cykeln Weichsel). Därför planeras studien kompletteras med en motsvarande kortare studie av en återstående varm interstadial under Weichsel kallad odderade (MIS 5a för cirka 85 000 till 74 000 år sedan). På detta sätt kommer rekonstruktionen av varma och kalla perioder (interstadialer och stadialer) för tidig Weichsel att bli komplett, och det går därmed att ge en komplett beskrivning av hur det gick till när klimatet senast gick från varma interglaciala förhållanden till istidsförhållanden. Resultaten har hittills visat att detta skedde under mycket lång tid och med kraftiga växlingar mellan varma och kalla perioder (Helmens 2013, 2019).

14.1.2 Övergångar mellan olika klimattillstånd i slutet av en glaciation

Nuläge

I Fud-program 2013 och 2016 beskrevs en planerad respektive pågående studie som syftade till att i detalj studera övergångar mellan olika klimattillstånd (till skillnad från de mer statiska klimatmodellstudier SKB tidigare genomfört för de glaciala, periglaciala, och tempererade klimattillstånden, se Kjellström et al. 2009). Den nu genomförda studien använde sig av både geologiska klimatarkiv och klimatmodellering för att ge information och exempel på hur klimatet kan te sig inom och vid övergångarna mellan de olika klimattillstånden. Denna studie har nu avslutats och avrapporteras i Schenk och Wohlfart (2019). Utöver de tidigare publicerade artiklarna redovisade i Fud-programmet 2016, har studien under den senaste Fud-perioden resulterat i ett flertal vetenskapliga artiklar (Muschitiello et al. 2016, 2017, Wohlfarth et al. 2017, 2018, Ahmed et al. 2018, Schenk et al. 2018), samt presenterats vid internationella symposier. Studien inkluderade även ett doktorandarbete vid Stockholms universitet som presenterades 2016 (Muschitiello 2016). Eftersom en slutredovisning av studien nu har gjorts ges nedan en summering av huvudresultaten.

Slutet av den senaste glacialen, Weichsel, karaktäriserades av en sekvens av flera snabba skiften mellan mycket kalla (stadialer) och mycket varma (interstadialer) perioder. Dessa snabba skiften visar på en kraftig instabilitet hos klimatet under den generella trenden av uppvärmning under deglaciationen. Det snabba förloppet hos dessa förändringar står i tydlig kontrast till den gradvisa ökningen av solinstrålningen under sommaren på höga latituder och till den globala ökningen av växthusgaser i slutet av glacialen, vilket indikerar att klimatsystemet responderar icke-linjärt på en generell relativt långsam uppvärmning. Denna instabilitet hos klimatet har kopplats till stora och delvis abrupta variationer i styrkan hos transporten av värme norrut med havsströmmar i Nordatlanten.

För att få mer detaljerad kunskap om och förståelse för klimatets utveckling och variation i Skandinavien och Europa under övergången från ett glacialt istidsklimat till ett varmt interglacialt klimat, utfördes en omfattande multiproxystudie på historiska klimatarkiv vilken kombinerades med resultat från nya högupplösta, globala klimatmodellsimuleringar. Studien fokuserade på klimatövergångarna under den senaste deglaciationen, i synnerhet den varma interstadialen bølling-allerød och den kalla stadialen yngre dryas.

Inom studien sammanställdes även publicerade kvantitativa historiska klimatdata inklusive publicerade data från pollen och växtmakrofossil från hela Europa. Utöver det kvantifierades abrupta klimatologiska och miljömässiga förändringar i södra Sverige under övergången från glaciala till interglaciala förhållanden genom en detaljerad analys av två sjösedimentkärnor från Attemosse och Hässeldala Port.

De multiproxydata som erhöles från de två sjösedimentkärnorna gav information om den terrestra miljöns respons på snabba skiften i hydroklimat och möjliggjorde en kvantifiering av luftens minimum-medeltemperatur under juli månad och ytvattnets medeltemperatur under juli för perioderna pre-bølling, bølling-allerød, yngre dryas samt för tidig holocen. Baserat på uppgifter från flera svenska sjöar konstaterades från analysen av växtmakrofossil att anmärkningsvärt höga sommartemperaturer på åtminstone +16 °C rådde genom hela deglaciationen, från tidpunkten för deglaciationen till tidig holocen (för ungefär 10 000 år sedan).

I kontrast till den varma lufttemperaturen under sommarperioderna som erhöles från växtmakrofossil, visar sjöväntemperaturen som rekonstruerades genom chironomider distinkta skiften mellan kalla stadialer och varma interstadialer. Dessa skiften samvarierar med proxydata från andra biomarkörer vilka indikerar torra betingelser och nederbörd från en sötare källa under stadialer och fuktigare betingelser och en saltare källa till nederbörden under interstadialer.

Den nya högupplösta klimatsimuleringen, vilken tog hänsyn till inlandsisars närvaro, glacio-isostatiska vertikala rörelser hos jordskorpan och låg havsnivå under glaciala förhållanden, indikerade förvånansvärt nog att sommartemperaturerna under yngre dryas-stadialen, som traditionellt ses som en kall period, förblev minst lika höga som under den föregående varma allerød-interstadialen. Detta resultat stämmer också väl överens med de historiska klimatdata från södra Sverige och från de övriga 120 platserna i Europa. De ihållande höga sommartemperaturerna under deglaciationens alla faser är ett resultat av en atmosfärisk blockering av västliga vindar över den Fennoskandiska inlandsisen under sommarperioderna. Den atmosfäriska blockeringen, som är orsakad av inlandsisens närvaro, intensifierades av de kalla nordatlantiska havsytetemperaturerna under yngre dryas-stadialen. Det resulterande varma sommarklimatet förklarar varför värmekrävande växter fortsatt kunde frodas i Skandinavien under yngre dryas. Situationen med den atmosfäriska blockeringen, och de associerade höga temperaturerna, är emellertid bara stabil under en kort sommarperiod då sträng kyla dominerar under vår-, höst- och vinterperioderna under yngre dryas. Resultaten från klimatsimuleringen stödjer därför tidigare studier vilka har indikerat att abrupta skiften i klimatet på höga latituder domineras av förändringar i säsongsvariationen, med en ökad kontinentalitet hos klimatet under de stadiala perioderna.

De överraskande resultaten med mycket varma somrar även under de ”kalla” perioderna under deglaciationen, och övriga resultat återfinns presenterade i detalj i Schenk et al. (2018) och Schenk och Wohlfarth (2019). Resultaten kommer att användas av SKB för att ge en betydligt mer nyanserad bild av klimatförändringarna som kan ske vid klimatövergången från glaciala till interglaciala förhållanden, såsom i SKB:s referensglaciation. Resultaten kan även komma att användas inom biosfärsprogrammet där landskaps- och vegetationsutvecklingen under deglaciationen beskrivs. Liksom studierna beskrivna under avsnitt 14.1.1 bidrar även den här studien till att förbättra dateringarna av terrestra klimatarkiv i Fennoskandia och Europa.

Program

I och med slutredovisningen i Schenk och Wohlfarth (2019) planeras ingen fortsatt detaljerad studie kring klimatövergångar i samband med övergång från kalla istidsklimat till varma interglaciala förhållanden. Dock ingår övergångar mellan klimattillstånd indirekt i flera andra av studierna beskrivna i detta kapitel, till exempel i studien av variabilitet hos klimat och inlandsisar i ett miljönärsperspektiv (avsnitt 14.6) och studien av inlandsisars dynamik och beteende (avsnitt 14.2).

14.2 Inlandsisars dynamik och beteende

Nuläge

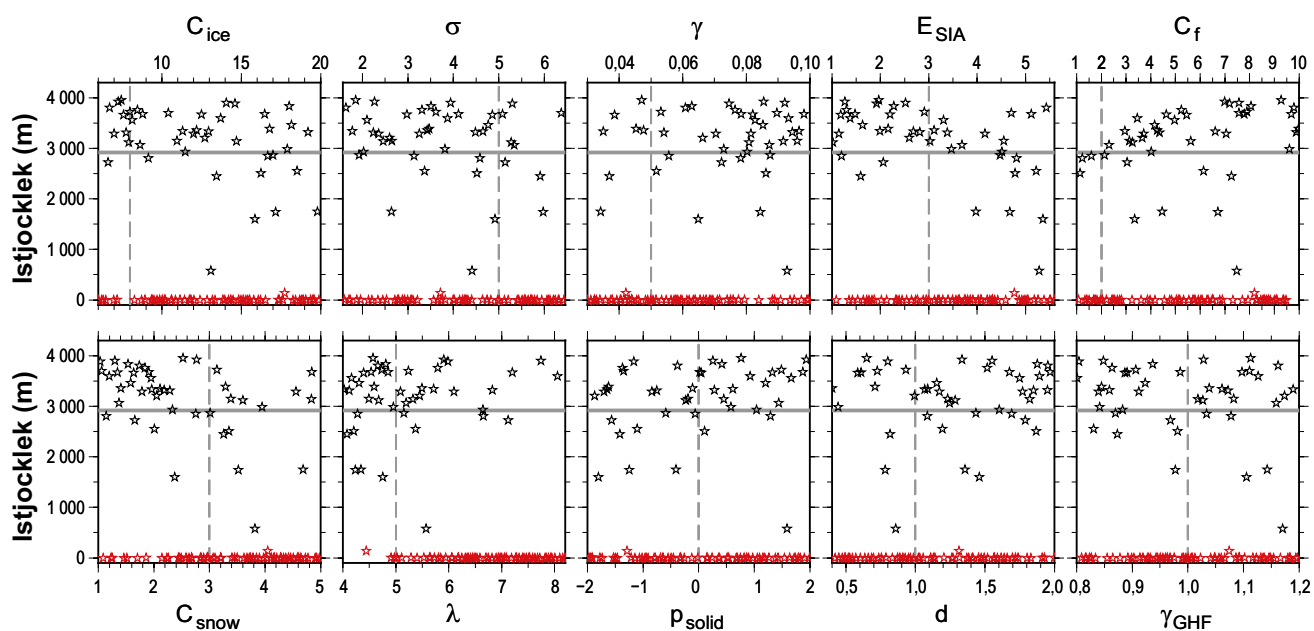
Inom ramen för det senaste Fud-programmet gjordes två dedikerade modelleringsstudier med syftet att uppskatta den största istjockleken över Forsmark, och därmed också det största hydrostatiska trycket vid förvarsdjup, som skulle kunna påverka Kärnbränsleförvaret vid en framtida maximal glaciation. Dessa studier modellerade det glaciala maximum under den näst senaste glaciala cykeln (Saaleglaciationen) vilken är perioden med störst inlandsis i Nordeuropa enligt geologiska och geomorfologiska data. Saaleglaciationens glaciala maximum, vilket simulerats här, inträffade under Marina isotopstadium 6 för runt 140 000 år sedan. Den första studien (Colleoni et al. 2014) undersökte förändringen i istjockleken över Forsmark till följd av i) olika klimat över Eurasien, simulerat för två olika fall, samt ii) genom att en efter en systematiskt variera alla parametrar i inlandsismodellen som påverkar istjockleken. Analyserna av inlandsisarnas tjocklek baserades på jämviktssimuleringar, det vill säga klimatet för den aktuella perioden hölls konstant och isen fick växa till sin största storlek givet det ansatta klimatet.

I uppföljningsstudien (Quiquet et al. 2016) utfördes parameteranalysen mer ingående genom att i jämviktssimuleringarna variera flera parametrar i inlandsismodellen samtidigt för att undersöka hur inverkan av dessa olika parameterkombinationer påverkade den simulerade istjockleken. Det sammantagna resultatet från båda studierna resulterade slutsatsen att inlandsisen över Forsmark maximalt kan bli 4 000 meter tjock (figur 14-1), vilket kan jämföras med antagande i SR-Site då det ansattes till 3 400 meter. Resultaten från de två studierna har även publicerats i vetenskapliga tidskrifter (Colleoni et al. 2016, Wekerle et al. 2016).

De ovan beskrivna studierna av Saaleglaciationen utgör ett viktigt komplement till inlandsisrekonstruktionen av den senaste glaciala cykeln (Weichselglaciationen) som ingår i SKB:s referensglaciation.

Program

I en pågående studie genomförs kompletterande inlandsissimuleringar av hela Saaleglaciationen, det vill säga inte enbart för det glaciala maximum som i de två ovan beskrivna studierna. Den simulerade transienta isutvecklingen från denna studie kommer att, tillsammans med ett flertal andra inlandsisrekonstruktioner, användas som randvillkor till beräkningar av spänningsfältet i jordskorpan vid olika islasthistorier, se avsnitt 12.2.3 samt Lund et al. (2019).



Figur 14-1. Simulerad istjocklek över Forsmark (i meter) vid Saaleglaciationens glaciala maximum (för runt 140 000 år sedan) som en funktion av olika parameterkombinationer i inlandsismodellen (från Quiquet et al. 2016). De svarta stjärnorna representerar individuella jämviktssimuleringar som gav upphov till istjocklekar över Forsmark på minst 500 meter, medan de röda stjärnorna visar simuleringar som inte gav någon is, eller is tunnare än 500 meter. De vågräta linjerna visar den simulerade istjockleken enligt en referenskörning (Colleoni et al. 2014), medan de lodräta linjerna visar värdet av respektive parameter i denna referenskörning. De undersökta parametrarna är: C_{ice} = avsmältningskoefficient för is (angiven enhet: $\text{mm } ^\circ\text{C dag}^{-1}$), C_{snow} = avsmältningskoefficient för snö ($\text{mm } ^\circ\text{C dag}^{-1}$), σ = standardavvikelsen av luftens dygnsmedeltemperatur ($^\circ\text{C}$), λ = luftens temperaturavtagande med höjden ($^\circ\text{C km}^{-1}$), γ = koefficient som reglerar hur mycket nederbörden ändras med temperaturen ($^\circ\text{C}^{-1}$), p_{solid} = lufttemperatur vid vilken nederbörden övergår från snö till regn ($^\circ\text{C}$), E_{sia} = förstärkningsfaktor av isens flöde (enhetlös), d = koefficient som reglerar mängden återfrysning av smältvatten (m), C_f = koefficient som reglerar isflödets friktion mot markytan vid områden med snabba isflöden (enhetlös) och γ_{GHF} = faktor som reglerar det geotermiska värmeflödet från markytan (enhetlös). För en detaljerad beskrivning av dessa parametrar, se Quiquet et al. (2016). Resultaten visar att isens tjocklek över Forsmark maximalt når 4 000 meter i denna känslighetsanalys.

SKB planerar att göra en genomgång av publicerade paleo-rekonstruktioner av inlandsisar för Fennoskandia för att utvärdera de inlandsisrekonstruktioner för Weichsel- och Saaleglaciationerna som används i SKB:s säkerhetsarbete. Denna studie planeras ligga till grund för en analys av inverkan av relativt snabba klimatförändringar (tidsskala runt 1 000 år, som bland annat observerats på Grönland under Weichselperioden, se till exempel Dansgaard et al. 1993) på iskantens läge och variabilitet i Fennoskandia.

Denna studie om inlandisens variabilitet kopplar också till analysen av glacialerosion (avsnitt 14.4). Resultaten från de pågående glacialerosionsstudierna kan tillsammans med uppskattningar av antalet fram- och tillbakaryckningar hos iskanten över Forsmark användas för en bättre uppskattning av storleken på glacialerosionen under den kommande årmiljonen.

14.3 Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning

Nuläge

Nuvarande kunskapsläge kring havsnivåvariationer av relevans för Forsmark finns beskrivna i klimatrapporterna för PSAR för Kärnbränsleförvaret och SFR (rapporterna kommer att publiceras under 2020). I dessa rapporter sammanställdes data på tänkbara relativa havsnivåvariationer, inklusive osäkerheter, på tidsskalorna fram till år 2100, 10 000 år samt 100 000 år. Informationen om framtida havsnivåvariationer är av stor relevans både i SKB:s säkerhetsanalyser och som underlag vid konstruktionen och driften av Kärnbränsleförvaret och vid driften av SFR fram till förslutning.

Den relativa havsnivån vid Forsmark, och dess variation över tiden, utgörs av nettoresultatet från isostatiska förändringar (jordskorpans rörelse, vilken i Forsmark domineras av återhämtning efter den senaste glaciationen) och eustatiska havsnivåvariationer (förändringar i havsnivån till följd av till exempel förändringar i volym och fördelning av havsvatten i världens hav). Dagens värde på den isostatiska upplyftningen i Forsmark är 6,7 mm/år (Vestøl et al. 2019). Den isostatiska upplyftningen förväntas vara relativt oförändrad fram till år 2100 och därmed kunna kompensera för en ansevärd del av den eustatiska havsytehöjningen.

Havsnivåvariationerna fram till år 2100 har i SKB:s arbete delats in i: i) långsamma, stadigvarande, och (i relativ närtid) icke-reversibla processer, samt ii) snabba, kortvariga och reversibla processer. De förra utgörs av höjningen av medelhavsytan (globalt och/eller lokalt) till följd av exempelvis smältning av inlandsisar och glaciärer och termisk expansion av havsvatten, och den senare av den tillfälliga havsytehöjning som sker vid kraftiga stormtillfällen.

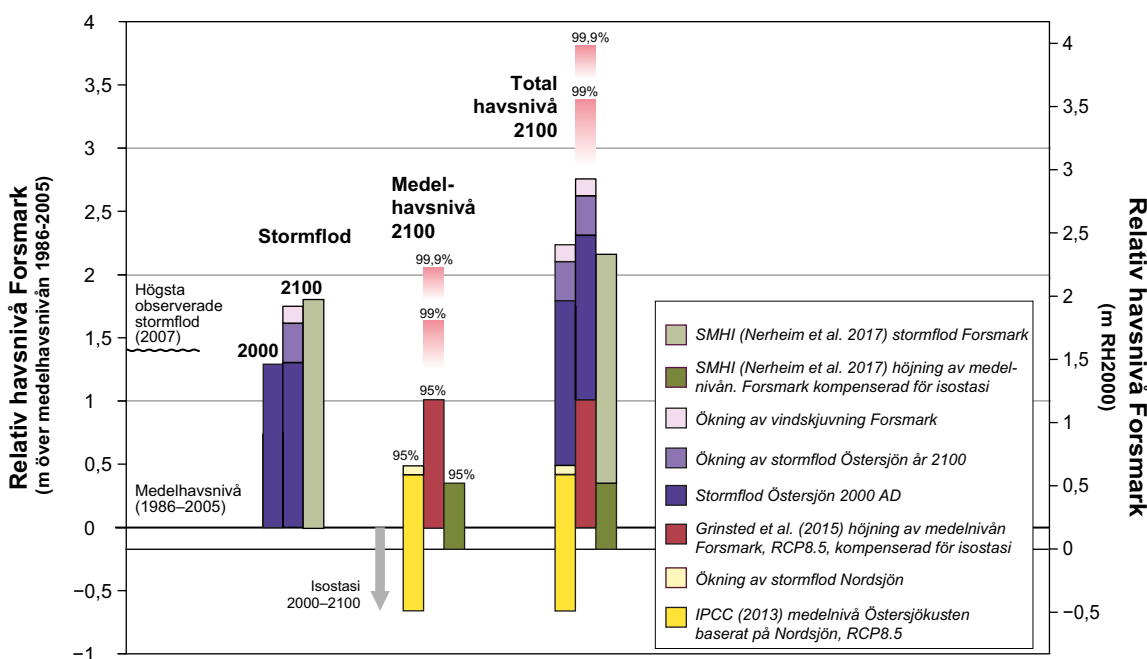
Det råder stora osäkerheter kring storleken på framtida havsnivåvariationer, både vad gäller den långsamma, stadigvarande utvecklingen av medelhavsytan och de snabba, kortvariga variationerna vid storm. Osäkerheterna i medelhavsytan utveckling är kopplade till hur stor den globala uppvärmningen kommer att bli samt hur inlandsisarna kommer att reagera på denna uppvärmning. För att ta hänsyn till dessa osäkerheter används ofta probabilistiska modeller för att uppskatta hur mycket havsnivån kommer att ändras i framtiden. Dessa modeller tar hänsyn till osäkerheterna genom att återge sannolikheter för hur mycket havsnivån kommer att höjas givet en viss sannolikhetsfördelning vid ett visst klimatscenario. Osäkerheterna i framtida variationer i havsnivå vid storm är framför allt kopplade till hur lågtryckssystem och stormar på Östersjön och Bottenhavet kommer att uppträda i framtiden, men även vilken frekvensfördelning stormarna kommer att ha.

Figur 14-2 sammanfattar den uppskattade totala ändringen av havsnivån vid Forsmark fram till år 2100 samt de individuella bidragen till denna från stormar, höjningen av medelhavsnivån samt isostasin. Figuren visar data från olika källor, bland annat uppskattningar av höjningen av den globala medelhavsytan från IPCC (2013) samt från Grinsted et al. (2015) som använde en probabilistisk modell för att undersöka ändringar av den relativa havsnivån i norra Europa vid en stark global uppvärmning (IPCC:s utsläppsscenario RCP8.5). Grinsted-studien användes som *worst-case* för hur den relativa havsnivån kan komma att ändras fram till åren 2080–2100. I figur 14-2 presenteras den maximala relativa havsytehöjningen vid Forsmark inom konfidensintervallen 5–95 procent,

1–99 procent och 0,1–99,9 procent med utsläppsscenario RCP8.5. Den totala havsnivåhöjningen vid Forsmark beräknades därefter genom att addera den relativa havsnivåhöjningen från Grinsted et al. (2015) till bidraget från stormar som har beräknats med en återkomsttid på 100 år (Meier 2006) samt en förväntad ökning av vindhastigheten vid Forsmark år 2100 (Nerheim 2008). Det totala, pessimistiskt beräknade, högsta vattenståndet i Forsmark år 2100 i detta scenario uppskattas till mellan +2,8 och +3,9 meter vid kraftiga stormtillfällen beroende på sannolikhetsnivå för höjningen av medelhavsytan (figur 14-2). Det är viktigt att notera att våghöjd inte inkluderats i denna analys.

I relation till konstruktionen och driften av förvaren i Forsmark är det av stor vikt att konstatera att den långsamma stadigvarande höjningen av medelhavsytan, vilken är behäftad med störst osäkerhet, är observerbar över tid. Detta gör att man under kommande årtionden kommer att kunna monitera och se hur den utvecklas och därmed även har möjlighet att vidta ytterligare åtgärder utöver de som planeras idag om så behövs.

I tillägg till analysen av den tänkbara höjningen av den relativa havsnivån på kort sikt (fram till år 2100) har även en grundlig genomgång gjorts av hur den relativa havsnivån globalt och vid Forsmark kan komma att ändras under de kommande 10 000 åren som följd av olika scenarier av global uppvärmning. Resultatet av denna analys för Forsmark exemplifieras i figur 14-3 för klimatscenariot RCP8.5. Den gröna kurvan visar den uppskattade isostatiska förändringen vid Forsmark baserat på GIA-modellering (GIA – Glacial Isostatic Adjustment) (SKB 2010a) medan de blå kurvorna visar utvecklingen av den globala havsytan de kommande 10 000 åren baserat på studierna Clark et al. (2016) och Levermann et al. (2013). Dessa studier utgör den högsta respektive lägsta projektionen av havsnivåhöjning på längre tidsskalor för klimatscenario RCP8.5 enligt dagens kunskapsläge, och har därför använts för att uppskatta osäkerheten i utvecklingen av den relativa havsnivån.

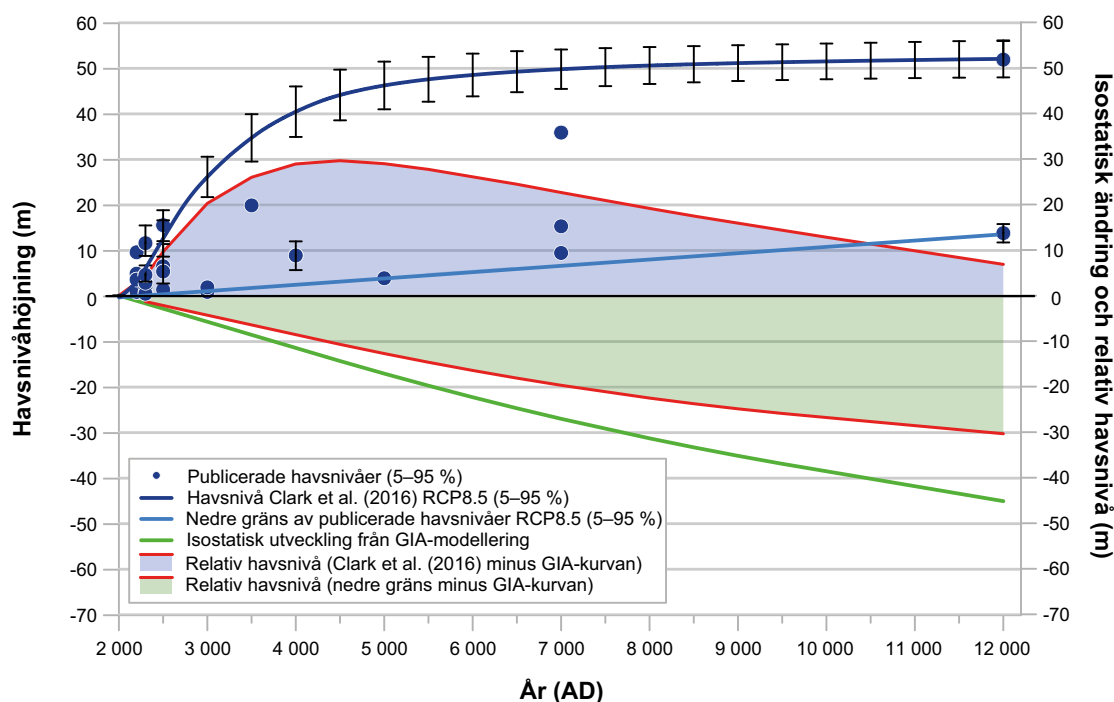


Figur 14-2. Uppskattad maximal relativ havsnivå i Forsmark år 2100. Staplarna längst till vänster visar den högsta havsnivån orsakad av snabba temporära processer vid stormtillfällen för år 2000 och 2100. Staplarna i mitten visar den lokala höjningen av medelhavsytan från tre olika studier, kompenserad för isostatisk landhöjning, för år 2100, orsakad av långsamma stadigvarande processer. Staplarna längst till höger visar den totala maximala havsyttehöjningen vid Forsmark år 2100 med hänsyn tagen till både höjningen av medelhavsytan och den tillfälliga höjningen vid storm. Notera att den isostatiska upphöjningen av jordskorpan kompenserar för cirka 0,67 meter av havsyttehöjningen från år 2000 till 2100. Havsnivån redovisas i meter över dagens medelnivå (för perioden 1986–2005) (vänstra y-axeln) och i höjdsystemet RH2000 (högra y-axeln).

Ändringen i den relativa havsnivån vid Forsmark under de kommande 10 000 åren baserat på Clark et al. (2016) och Levermann et al. (2013) illustreras av de röda kurvorna i figur 14-3. Som en följd av den stora osäkerheten i den globala havsnivåhöjningen på dessa tidsskalor kan den relativa havsytan i Forsmark under de kommande 10 000 åren antingen innebära en fortsatt regression, där marken likt i dag fortsätter att stiga ur havet (nedre röda linjen) eller en transgression där havet under en period stiger så mycket att land översvämmas med en maximalt höjd relativ havsnivå på upp till 30 meter runt år 4500 (övre röda linjen) varefter den relativa havsnivån långsamt sjunker igen. Förhållandena med en relativ havsnivå högre än dagens skulle i detta klimatfall och enligt denna projektion av havsytteförändring kunna hålla i sig ända fram till runt år 15 700 (utanför diagrammet). Mot bakgrund av denna stora osäkerhet i framtida havsnivå hanteras de två fallen som två tänkbara varianter i SKB:s klimatfall.

Program

SKB kommer fortsätta att bevaka forskningsområdet som rör framtida havsyttevariationer. En uppdatering av kunskapsläget kring höjningen av medelhavsytan i närtid (fram till år 2100, figur 14-2) planeras att genomföras under Fud-perioden. Dessutom planeras en studie med syfte att beräkna bidraget till havsnivåhöjningen från stormar med återkomsttider upp till 10 000 år och längre, det vill säga för betydligt längre återkomsttider än de 100 år som ligger till grund för resultaten i figur 14-2. Studien planerar även att inkludera en probabilistisk uppskattning av hur mycket den totala havsnivån (höjningen av medelhavsytan plus höjningen av stormflod) kommer att stiga vid Forsmark fram till år 2100 för klimatscenerierna RCP2.6 (låga utsläpp), RCP4.5 (medelhöga utsläpp) och RCP8.5 (höga utsläpp). Resultaten från denna studie förväntas ge en mer detaljerad bild av hur den maximala havsnivån vid kraftiga stormar, under pessimistiska antaganden, kommer att ändras fram till år 2050, 2080 och 2100.



Figur 14-3. Ändringen i relativ havsnivå i Forsmark under de kommande 10 000 åren för IPCC:s utsläppsscenario RCP8.5 (kraftig global uppvärmning). De blå punkterna visar projektioner av den globala medelhavsytan från olika studier från den vetenskapliga litteraturen publicerade fram till mitten av 2018. De blå kurvorna visar utvecklingen hos den globala medelhavsytan under de kommande 10 000 åren baserat på Clark et al. (2016) (övre blå kurva) och Levermann et al. (2013) (nedre blå kurva). Dessa två studier utgör den högsta respektive lägsta projektionen av global havsyttehöjning under de kommande 10 000 åren enligt dagens kunskapsläge. Den gröna kurvan visar den isostatiska utvecklingen vid Forsmark beräknad från GIA-modellering (SKB 2010a). De röda kurvorna visar den resulterande ändringen av den relativa havsytan vid Forsmark, det vill säga summan av de blå kurvorna och den gröna kurvan. Den mycket stora skillnaden mellan de två utvecklingarna i relativ havsnivå illustrerad med de två röda kurvorna visar tydligt den mycket stora osäkerhet som råder kring hur havsyttenivån i Forsmark skulle kunna påverkas fram till år 12 000 vid kraftig global uppvärmning.

Dessutom planeras en uppdatering av information och kunskapsläget från den vetenskapliga litteraturen kring havsnivåförändringar i det mångtusenåriga perspektivet (figur 14-3), inklusive högsta nivå/längsta period med havstäckta förhållanden som kan orsakas av kraftig global uppvärmning. Detta påverkar bland annat den framtida landskapsutvecklingen i Forsmark vilken ingår som en viktig del i SKB:s säkerhetsanalyser för Kärnbränsleförvaret och SFR.

14.4 Ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av glacial erosion

Nuläge

Tidigare studier har visat att omfattningen av den totala glaciala erosionen och denudationen i Forsmarksområdet, generellt sett, varit begränsad fram till i dag, och att den kommer att fortsätta vara det även i framtiden (Olvmo 2010). En huvudledning till denna slutsats är den mycket flacka berggrundstopografin i området. GIS-studien i Olvmo (2010) genomfördes med en förhållandevis grov rumslig upplösning, vilket gör att resultaten inte nödvändigtvis är tillämpbara på detaljnivå. Därför fanns ett flertal kvarvarande frågor kring omfattningen av den glaciala erosionen och denudationen när man studerade Forsmarksområdet mer i detalj. Studien utnyttjade dessutom enbart en metod, trots att det under senare år utvecklats nya metoder och tagits fram nya dataset som kan användas för en förbättrad kvantifiering av mängden glacial erosion som skett fram till i dag. I kommentarerna till tidigare Fud-program skriver SSM bland annat: *För att belägga nuvarande bedömning av frysnings på kärnbränsleförvarsdjup finner SSM det angeläget att SKB genomför de planerade studierna för att klarlägga osäkerheten i de uppskattade värdena för glacial erosion samt utvärderingen av permafrostmodellernas tillförlitlighet.* Även i SSM:s granskning av SR-Site påpekades behovet av att vidare undersöka och motivera SKB:s ståndpunkt att framtida denudation och glaciala erosion vid Forsmark kommer att vara begränsad.

Mot bakgrund av punkterna ovan inleddes under 2015 en omfattande studie kring ålder och stabilitet hos berggrundsytan, inklusive djup av och hastighet hos tidigare glacial erosion, i Forsmarksområdet och Uppland. Exempel på frågeställningar som ingår i studien är: i) hur omfattande har denudationen (erosion plus vittring), och specifikt den glaciala erosionen, varit i Forsmark under alla senkvartära glaciationsperioder, samt under hela perioden sedan det Subkambriska peneplanet bildades, när man studerar området i detalj? ii) vilka glaciala erosionsprocesser har agerat i landskapet fram till i dag i Forsmark? iii) med vilken hastighet skulle det dokumenterade området med kraftigare glacial erosion 20–30 km sydost om Forsmark (se Olvmo 2010) eventuellt kunna växa mot platsen för Kärnbränsleförvaret? och iv) mot bakgrund av bland annat resultat från punkterna ovan, hur stor glacial erosion kan man förvänta sig under de kommande 100 000 och en miljon åren i Forsmark och vid platsen för Kärnbränsleförvaret?

Studien är nu genomförd och redovisas i Hall et al. (2019). Resultat från studien har även presenterats löpande vid vetenskapliga symposier (Moon et al. 2017, 2018, Hall et al. 2018, Heyman et al. 2018, 2019, Krabbendam et al. 2019).

Fyra olika metoder användes, kopplade till varsin delstudie; i) geomorfologisk analys av berggrunden: användandet av det Subkambriska peneplanet som en referensyta mot vilken uppskattningar av mängden glacial erosion under Pleistocen kan göras, ii) kartering och geomorfologisk analys av fördelning och egenskaper hos glaciala landformer primärt i lösa jordtäcket för att förstå rumsliga mönster och verksamma processer hos den glaciala erosionen, iii) sprickanalys: studier av sprickor i berggrunden, inklusive sprickartering och modellering av spänningsfältet i övre delen av berggrunden (kopplat till sprickors bidrag till berggrundens potentiella erosionsbenägenhet), samt iv) uppskattning av berggrundsyntans ålder och kvantifiering av erosionshastigheter under tidigare inlandsisar genom kosmogen datering.

Resultaten från de ovan nämnda studierna har tillhandahållit en detaljerad bild av omfattningen av den totala mängden glacial erosion som skett i Forsmark fram till i dag. När dessa resultat kombineras med de simulerade perioderna med inlandsis över Forsmark under de kommande en miljon åren (från studien redovisad i figur 14-5, avsnitt 14.6), kan den totala glaciala erosionen under den kommande årmiljonen uppskattas preliminärt till mellan några få och ett flertal tiotal meter, beroende på var i landskapet man befinner sig. För detaljerade beskrivningar av de omfattande resultaten i studien, se Hall et al. (2019).

Program

Sydost om Forsmark finns, liksom nämnt ovan, ett område med observerat kraftigare glacial erosion. Delprojektet som studerade den potentiella laterala tillväxthastigheten hos detta område genomfördes inte fullt ut inom projektet ovan. Denna del planeras därför att genomföras och avslutas under Fud-perioden. Studien syftar till att uppskatta hur snabbt detta relativt kraftigt glacialt påverkade område skulle kunna växa mot förvarsområdet under framtida perioder med glaciala förhållanden i Forsmark (till exempel enligt figur 14-5). Studien omfattar detaljkartering och analys av berggrundsformer och sediment, viss fjärranalys med fältkontroller, samt eventuellt kosmogen datering.

Kompletterande studier kring den identifierade glaciala erosionsprocessen ”glacial ripping” planeras även att genomföras under Fud-perioden.

Resultaten från dessa studier planeras bidra till en bättre vetenskapligt underbyggd uppskattning av eventuell förändring i Kärnbränsleförvarets förvarsdjup under kommande årmiljonen samt för att bättre belägga nuvarande bedömning av frysning på kärnbränsleförvarsdjup. Dessutom kommer resultaten innehålla information om det ytnära bergets sprickighet vilket planeras användas inom ämnesområdena bergmekanik och hydrogeologi (avsnitt 12.1.4).

14.5 Validering av permafrostmodell

Nuläge

Tillväxt och avsmältning av permafrost är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar inom det periglaciala klimattillståndet, oavsett typ av avfall och förvarskoncept. Periglacialt klimattillstånd råder under en betydande del (cirka en tredjedel) av tiden i SKB:s referensglaciationscykel. Förekomst av permafrost påverkar kraftigt grundvattnets flödesmönster, både på djupet och ytnära i geosfären. Även grundvattnets sammansättning kan påverkas genom saltutfrysning.

I Fud-program 2013 och 2016 beskrevs planer och pågående arbete för att genomföra en validering av den permafrostmodell som har använts i säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010a) och SFR (Brandefelt et al. 2013).

Denna modellvalideringsstudie pågick under Fud-perioden. Studien har presenterats vid ett internationellt symposium (Hartikainen et al. 2018). De permafrostsimuleringar som utförts inom ramen för SKB:s säkerhetsanalyser, och motsvarande arbete för Posiva, har under Fud-perioden även presenterats i en doktorsavhandling vid Aaltouniversitetet i Finland (Hartikainen 2018).

Program

Valideringen av permafrostmodellen kommer att fortsätta och planeras att avslutas under Fud-perioden. I arbetet ingår verifiering av nuvarande och tidigare versioner av permafrostmodellen genom att tillämpa dem på studieområdet för GAP på västra Grönland (avsnitt 14.7) där permafrostdjup och bergets temperatur till delar är kända.

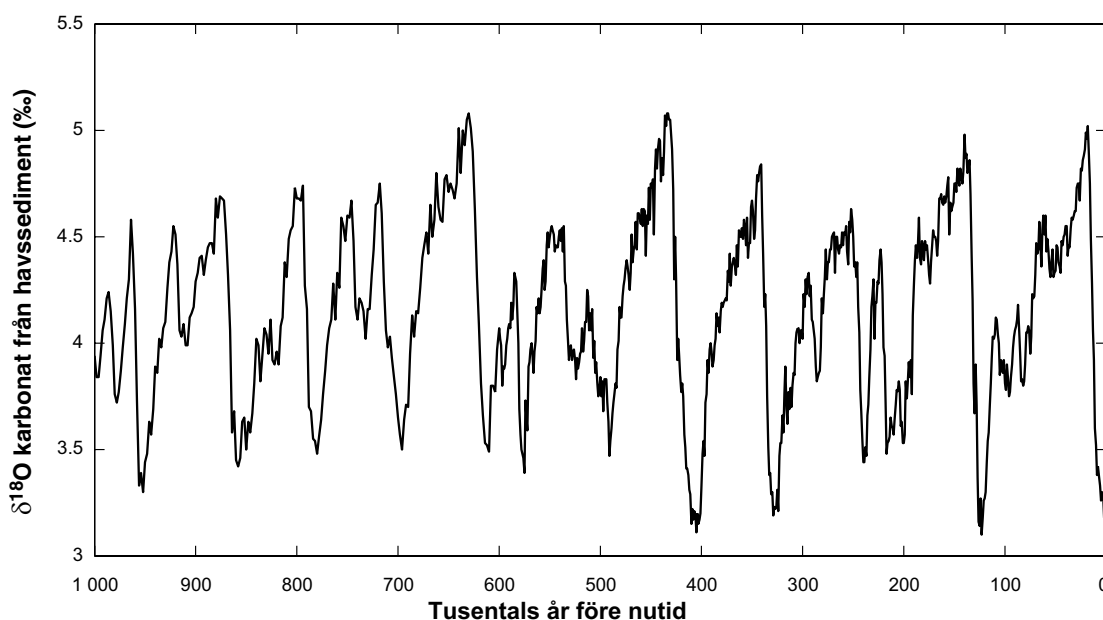
Olika förvarskoncept, med olika typer av barriärer, är olika känsliga för degradering genom frysning. Till exempel skulle betongbarriärer uppvisa kraftigare fysisk degradering än bentonitbarriärer, om dessa skulle frysa. Dessutom ger olika förvarsdjup olika förutsättningar för frysning eftersom frysning alltid börjar uppe vid markytan. I det föreslagna förvarskonceptet för SFL (avsnitt 2.1.1) ingår att förvaret placeras på tillräckligt djup för att undvika negativa effekter av frysning på de tekniska barriärerna. I en framtida fullständig analys av säkerhet efter förslutning för SFL behöver därför maximalt djup för frysning under perioder av kallt klimat utvärderas för vald plats.

14.6 Variabilitet hos klimat och inlandsisar under de kommande en miljon åren

Nuläge

SKB:s klimatarbete för Kärnbränsleförvaret och SFL har hittills nästan uteslutande fokuserat på historiska klimat och de första 120 000 åren i framtiden. Dels har referensglaciationscykeln konstruerats (avsnitt 14.1), baserad på den senaste glaciala perioden (Weichselglaciationen och holocen), och dels har ett antal kompletterande klimatfall definierats, utifrån bland annat referensglaciationscykeln, vilka beskriver alternativa klimatutvecklingar för denna tidsperiod. Två exempel på kompletterande klimatfall är fallen global uppvärmning och förlängd global uppvärmning där det antas att den nuvarande interglaciala perioden med tempererat klimat förlängs med 50 000 respektive 100 000 år på grund av den pågående globala uppvärmningen och på naturliga variationer i solinstrålning. Andra exempel på ett kompletterande klimatfall är förlängd inlandsisutbredning och maximalt tjock inlandsis, där inlandsisen i det första fallet ligger längre över förvaret än i referensglaciationscykeln medan isen i det andra fallet är betydligt mäktigare, med maximala isostatiska tryck som följd, än i referensglaciationscykeln (se även avsnitt 14.2).

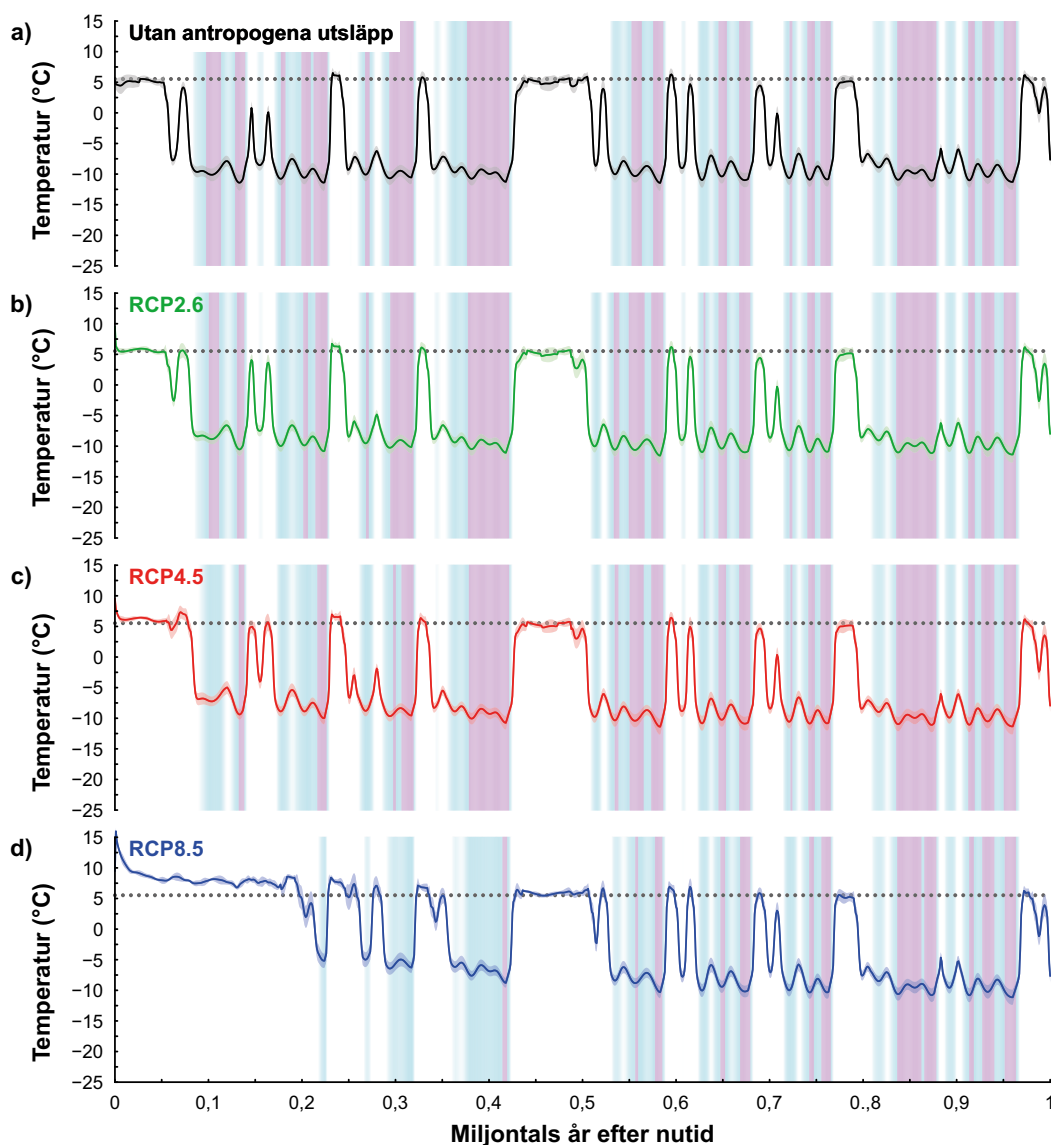
Den resterande perioden efter de första 120 000 åren upp till en miljon år har i säkerhetsanalyserna hanterats genom att anta en upprepning av referensglaciationscykeln. Även om denna metodik, kompletterad med klimatfall med längre period av nedisning samt med maximalt tjock inlandsis, täcker in extremerna i parametrar av vikt för förvarssäkerheten relaterade till nedisning, och därmed är tillräcklig ur ett säkerhetsanalysperspektiv, så ger den en förenklad bild av den klimatvariabilitet man kan förvänta sig i ett enmiljonårs-perspektiv. Detta illustreras i figur 14-4 som visar den relativa variationen av syre-18 från havssediment vilken ger en uppskattning av hur den globala isvolymen har varierat under de senaste en miljon åren. Av figur 14-4 framgår tydligt att det finns en betydande variabilitet i längden hos olika glaciala perioder, regelbundenheten med vilken de inträffar (inklusive hur ofta de inträffar), samt storleken (volymen) hos de inlandsisar som byggs upp. Variabiliteten i längden hos de glaciala perioderna samt storleken på isarna täcks till viss del in av de klimatfall som använts i säkerhetsanalysarbetet, medan den faktiska framtida variabiliteten i när och hur ofta de glaciala perioderna kan komma att inträffa inte beaktas med hittillsvarande metodik.



Figur14-4. Variationer av $\delta^{18}O$ från havssediment för de senaste en miljon åren (Lisiecki och Raymo 2005). Höga värden på $\delta^{18}O$ indikerar en relativt stor global isvolym på kontinenterna och låga temperaturer i djuphavet medan låga värden på $\delta^{18}O$ indikerar en relativt liten global isvolym och höga havstemperaturer.

I Fud-programmet 2016 beskrevs ett planerat samarbetsprojekt med Posiva som hade för avsikt att undersöka klimatet (lufttemperatur och nederbörd) samt förekomsten av inlandsis över förvarsplatserna i Forsmark och Olkiluoto under de kommande en miljon åren. Studien har nu avslutats och rapporterats i Lord et al. (2019). Studien har även presenterats vid två internationella symposier (Lord et al. 2018a, b).

Resultaten visar att vid måttlig global uppvärmning (som motsvarar IPCC:s klimatscenario RCP4.5 och SKB:s klimatfall global uppvärmning) så inträffar nästa nedisning i Forsmarksområdet om cirka 150 000 år, medan den vid stark global uppvärmning (motsvarar IPCC:s klimatscenario RCP8.5 och klimatfallet förlängd global uppvärmning) inträffar först om drygt 400 000 år, se figur 14-5. Notera här att glaciala förhållande har startat tidigare på andra platser, innan inlandsisen nått fram till Forsmark.



Figur14-5. Årsmedeltemperatur i luften (°C) för de kommande en miljon åren vid Forsmark för (a; svart linje) ett fall utan antropogena utsläpp av växthusgaser, (b; grön linje) IPCC:s utsläppsscenario RCP2.6 (låga utsläpp), (c; röd linje) för utsläppsscenario RCP4.5 (medelhöga utsläpp) och (d; blå linje) för utsläppsscenario RCP8.5 (höga utsläpp). För perioder med istäckta förhållanden över Forsmark redovisas lufttemperaturen vid markytan som om isen inte varit närvarande. Lufttemperaturen har modellerats för vart tusende år. Det färgade osäkerhetsbandet kring lufttemperaturkurvorna visar osäkerheten (en standardavvikelse). Motsvarande information finns även för nederbörd. De vertikala banden visar en uppskattning på perioder när den Fennoskandiska inlandsisen kan komma att täcka Forsmark. Lila band visar perioder med hög sannolikhet för istäckta förhållanden medan cyanfärgade perioder har en lägre sannolikhet, se Lord et al. (2019). En kraftigare cyanfärg indikerar lägre osäkerhet. Under perioder utan färgade vertikala band råder isfria förhållande i Forsmark. Modellen har utvärderats genom simulering av de föregående 800 000 åren inklusive den senaste glacialcykeln och jämförelser med klimatdata för dessa perioder (se Lord et al. 2019). De prickade grå linjerna visar dagens temperatur i Forsmarksområdet.

Resultaten visar att lufttemperaturen och nederbörden i Forsmark kan komma att vara starkt påverkade av dagens antropogena utsläpp av växthusgaser i flera hundratusen år vid kraftiga utsläpp. Därefter domineras klimatet återigen av naturlig variabilitet driven av variationer i solinstrålning orsakade av variationer i jordens banparametrar runt solen. Den senare hälften av enmiljonårs-perioden i Lord et al. (2019) karaktäriseras av återkommande glaciationer i Forsmark (figur 14-5), likt Weichselrekonstruktionen, med en till två perioder av istäckta förhållanden per glacialcykel.

De simulerade framtida perioderna med inlandsis över Forsmark från Lord et al. (2019) har används för en kvantifiering av framtida glacial erosion tillsammans med resultat från studien av historisk glacial erosion i Forsmark (avsnitt 14.4).

SKB har även deltagit i en studie där geotermiska data för Finland och Sverige har satts ihop och utvärderats (Veikolainen et al. 2019). De svenska data har tidigare tagits fram inom ramen för SKB:s klimatarbete (Näslund et al. 2005). Datasetet är planerat att användas som indata i kommande inlandsissimuleringar beskrivna nedan.

Program

Studien av Lord et al. (2019) kommer att ha en viktig roll för att illustrera och undersöka inverkan av en mer realistisk klimatvariabilitet i SKB:s arbete på tidsskalan en miljon år.

Det simulerade klimatet och de framtida perioderna av nedisning vid Forsmark under de kommande en miljon åren från Lord et al. (2019) planeras att användas för ett kompletterande klimatfall, vilket i ett första steg kan användas för att utvärdera realismen i de klimatfall som tidigare ingått i SKB:s säkerhetsanalyser och säkerhetsvärderingar för Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL. Beroende på resultaten från denna utvärdering kan den simulerade lufttemperaturen och nederbörden från Lord et al. (2019) sedan komma att användas för att driva en dynamisk 3D-inlandsismodell integrerad en miljon år in i framtiden. Resultatet från en sådan simulering förväntas bland annat kunna ge en indikation på vilken inverkan en mer realistisk klimatvariabilitet har på isutbredningen samt på inlandsisens möjlighet att passera Forsmark vid flertalet tillfällen under samma glaciala cykel (avsnitt 14.2).

14.7 Beskrivning av inlandsisars hydrologi från Greenland Analogue Project (GAP)

Nuläge

Studien Greenland Analogue Project (GAP) bedrevs mellan åren 2008 och 2013. Resultaten analyseras och publiceras fortlöpande. De två slutrapporterna från GAP (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016) publicerades under 2016, vid ett och samma tillfälle i SKB:s, Posivas och NWMO:s rapportserier. Dessa två rapporter sammanfattar de data som samlats in kring glacial hydrologi, hydrogeologi, glaciologi, meteorologi, geologi och geokemi från undersökningsområdet på västra Grönland, samt den vetenskapliga förståelse och de konceptuella modeller som resulterat från studien. Vid publiceringen av slutrapporterna för GAP hade 43 vetenskapliga artiklar publicerats i internationella peer-review-tidskrifter (se sammanställning i Appendix A i Claesson Liljedahl et al. 2016), 19 rapporter i SKB:s, Posivas och NWMO:s rapportserier (avsnitt 1.3 i Claesson Liljedahl et al. 2016), samt ett stort antal symposiebidrag. För referenser till dessa publikationer hänvisas läsaren till rapporterna ovan. Ytterligare rapporter och vetenskapliga artiklar samt symposiebidrag har publicerats under perioden 2016–2019 (till exempel Drake et al. 2017, Puigdomenech et al. 2017, Vidstrand 2017, Hasholt et al. 2018, Henkemans et al. 2018, Ruskeenieni et al. 2018, van As et al. 2018). I dagsläget har GAP-projektet producerat över 50 vetenskapliga publikationer, 8 doktorsavhandlingar samt 20 rapporter.

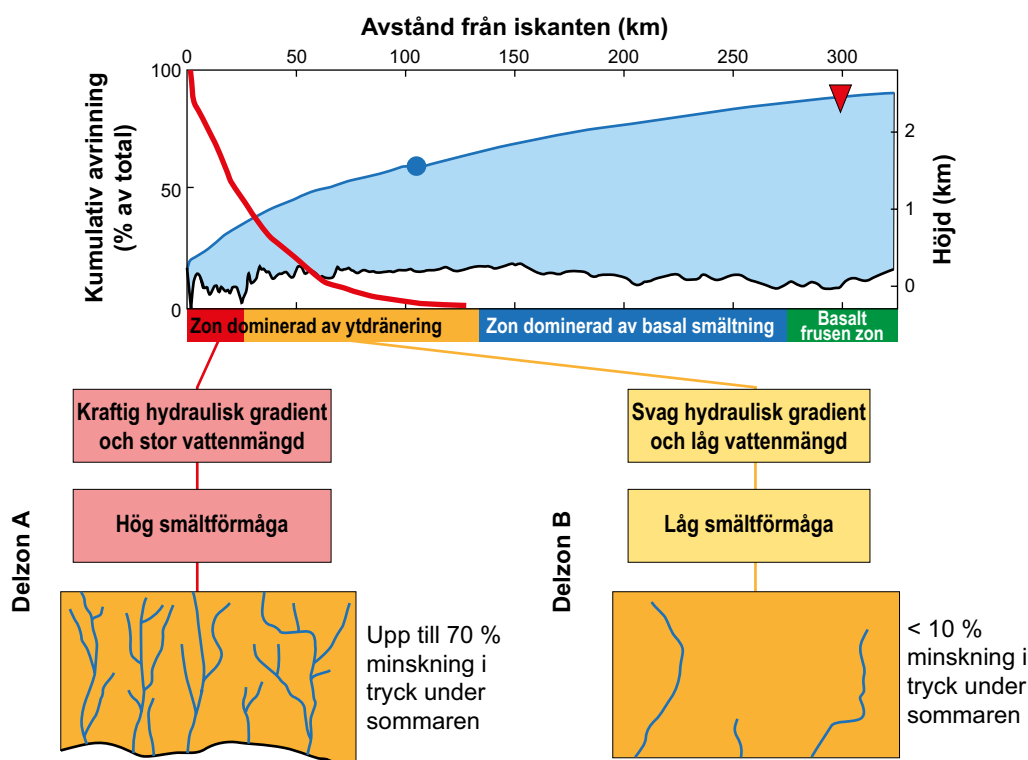
GAP initierades för att öka processförståelsen för hur klimatförändringar, och särskilt glaciationer, kan komma att påverka funktionen hos ett slutförvar och dess omgivning på lång sikt. GAP har resulterat i en utvecklad och förfinad förståelse när det gäller en rad olika processer som är av stor vikt vid analyser av långsiktig förvarssäkerhet, framför allt avseende randvillkor för grundvattenmodellering, bentonitstabilitet och landskapsutveckling.

GAP har bidragit till förbättrad processförståelse inom fyra områden. Ett område handlar om transienta smältprocesser samt var och hur grundvatten bildas under en inlandsis. En ny konceptuell modell för inlandsisars hydrologi, med fyra distinkta områden med olika hydrologiska egenskaper, har utarbetats

(figur 14-6). Fältobservationer och modelleringsresultat tyder bland annat på att mer än 75 procent av den studerade delen av den grönländska inlandsisen har bottenmältande förhållanden, med förekomst av fritt vatten. Inlandsisens centrala del är bottenfrusen. För en detaljerad beskrivning av de hydrologiska egenskaperna hos de olika zonerna i den konceptuella modellen, viktiga som randvillkor i framtida hydrogeologiska simuleringar vid nedisning, se figur 14-6, men framför allt avsnitt 5.1 i Claesson Liljedahl et al. (2016).

Ett annat område handlar om hur trycket hos vattnet under isen varierar rumsligt och med tiden. Med hjälp av tryckinformation och termisk information från 23 borrhål som borrats genom inlandsisen har den konceptuella förståelsen av isens basala dräneringssystem reviderats (Claesson Liljedahl et al. 2016). De hydrauliska mätningarna och analyserna från isborrhålen tyder på att isövertrycket (det vill säga en vattenpelare som motsvarar 92 procent av istjockleken) är en representativ och korrekt beskrivning av det basala hydrauliska trycket över större delen av inlandsisen och över större delen av året.

GAP har även bidragit till förbättrad processförståelse när det gäller hur djupt smältvatten kan tränga ner i berggrunden och vilken kemisk sammansättning detta vatten har. De stabila vattenisotopsignaturerna ($\delta^2\text{H}$ och $\delta^{18}\text{O}$) visar att grundvatten från två av bergborrhålen framför inlandsisen har sitt ursprung från glacialt smältvatten. Nedträngning av glacialt smältvatten har sannolikt underlättats av att det rått övervägande glaciala förhållanden i GAP-området under många miljoner år, samt av den lokala geologin och sprickfördelningen och närvaron av stora hydrauliska gradienter. De relativt låga koncentrationerna av natrium och klor i grundvattnet är sannolikt en konsekvens av vatten/berginteraktioner samt diffusion, medan kalcium och sulfat i dessa vatten beror på upplösning av mineralet gips, som förekommer som sprickutfyllnadsmineral på djup större än 300 meter.



Figur 14-6. Nyetablerad konceptuell modell för inlandsisars hydrologi, med fyra distinkta zoner med fundamentalt olika hydrologiska egenskaper (från Claesson Liljedahl et al. 2016). Notera att zonen dominerad av yttränering i sig är indelad i två delar: i) delzon A och ii) delzon B. I delzon A domineras den basala hydrologin av att ett transient nätverk av dräneringstunnlar utvecklas under sommaren, upp till 15–20 km från iskanten. Trycket i tunnarna har under smältsäsongen en mycket kraftig dygnsvariation (30–105 procent av isövertrycket). Hydrologin i delzon B har fortfarande ett kraftigt vattenflöde på grund av tillförseln av ytsmältvatten, men den lägre gradienten hos isöverytan medför en generell avsaknad av diskreta större dräneringstunnlar. Detta är ett huvudresultat i GAP-studien; att tillväxten av dräneringstunnlar under sommaren, från inlandsisens kant mot de inre delarna, kraftigt begränsas av en minskad smältförmåga hos det basala hydrologiska systemet (avsnitt 5.1 i Claesson Liljedahl et al. 2016).

Uppmätta heliumkoncentrationer i vattnet indikerar uppehållstider som överstiger hundratusentals år. Detta, tillsammans med den omfattande förekomsten av det lättlösliga mineralet gips på djup större än 300 meter, tyder på stabila förhållanden vid det djupa borrhålet vid iskanten, med ett begränsat grundvattenflöde under permafrosten. Under permafrosten råder reducerande förhållanden.

Permafrost och talikar (ofrusna delar i ett i övrigt fruset område) har också studerats inom projektet. Studieområdet ligger i ett område med kontinuerlig permafrost, som vid inlandsisens rand når en tjocklek av 350–400 meter. Det är sannolikt att permafrost inte existerar under större delen av de stora bottenmäl-tande delarna av isen. Ett undantag är vid iskanten, där en kil av permafrost troligen sträcker sig in under isen. Ofrusna talikar som sträcker sig genom hela permafrostens mäktighet, och på så vis möjliggör utbyte av djupt grundvatten och ytvatten, är vanligt förekommande i området. Projektet har för första gången någonsin bekräftat förekomsten av en sådan talik under den sjö vid vilken man borrar ett av bergborrhålen. Provtagning från detta borrhål har vidare resulterat i den första informationen om grundvatten-sammansättning samt hydrologiska data från en talik nära en inlandsis.

För mer detaljerad information kring resultaten ovan, se Claesson Liljedahl et al. (2016).

SKB har tillsammans med Posiva, NWMO och Nagra kompletterat studierna i GAP genom en mindre glacialhydrologisk studie (ICE) i samma undersökningsområde på Grönland. ICE initierades 2014 och slutfördes under 2016, vilket genererade tre säsonger av fältdata. Slutrapporten för ICE publicerades 2019 (Harper et al. 2019). Projektet innebar att ett blocksegment (700×700×700 meter) av inlandsisen i samma område där GAP utfördes detaljstuderades. I detta segment hetvattenborrades nio borrhål till botten av inlandsisen och ett omfattande dataset genererades från sensorer i dessa borrhål under tre år (2014–2016). Data från detta blocksegment analyserades och tolkades i relation till den ~50 km långa datatransekt som GAP studerade, med syfte att öka förståelsen för de processer som studerades inom ICE (Harper et al. 2019). Projektet har hittills resulterat i fem publicerade artiklar vilka summeras i Harper et al. (2019).

Följande processer har studerats inom ICE:

- 1. Kortvariga mycket höga subglaciala tryck:** Forskning vid dalglaciärer har visat att mycket höga men kortvariga tryckpulser kan förekomma i det basala dräneringssystemet. Inga sådana höga tryckpulser har dokumenterats från den grönländska inlandsisen, men detta har inte tidigare kunnat studeras då instrumenteringen i isborrhålen inte har haft kapacitet att registrera så kortvariga tryckpulser. ICE-projektet utvecklade specialsensorer för att kunna studera kortvariga tryckpulser.
- 2. Tryckgradienter på en skala motsvarande istjockleken:** Resultat från GAP visar på tryckgradienter vid botten av inlandsisen i storleksordningen 16 kPa/m. Det är dock okänt hur långt dessa höga gradienter kan upprätthållas, och det är inte känt huruvida gradienterna kan existera över längdskalor på 10-tals till 100-tals meter. ICE-projektet designades för att studera tryckgradienter i denna skala.
- 3. Transmissivitet och infiltrationsförmåga:** En avsevärd informationsmängd har insamlats inom GAP vad gäller trycksituationen vid botten av inlandsisen, men hur stor del av den underliggande berggrunden som påverkas av detta vattentryck är okänt, och var något som studerades vidare inom ICE. Detta är viktig information då andelen berggrund som är täckt av vatten bestämmer storleken på inströmningsområdet för grundvatten.

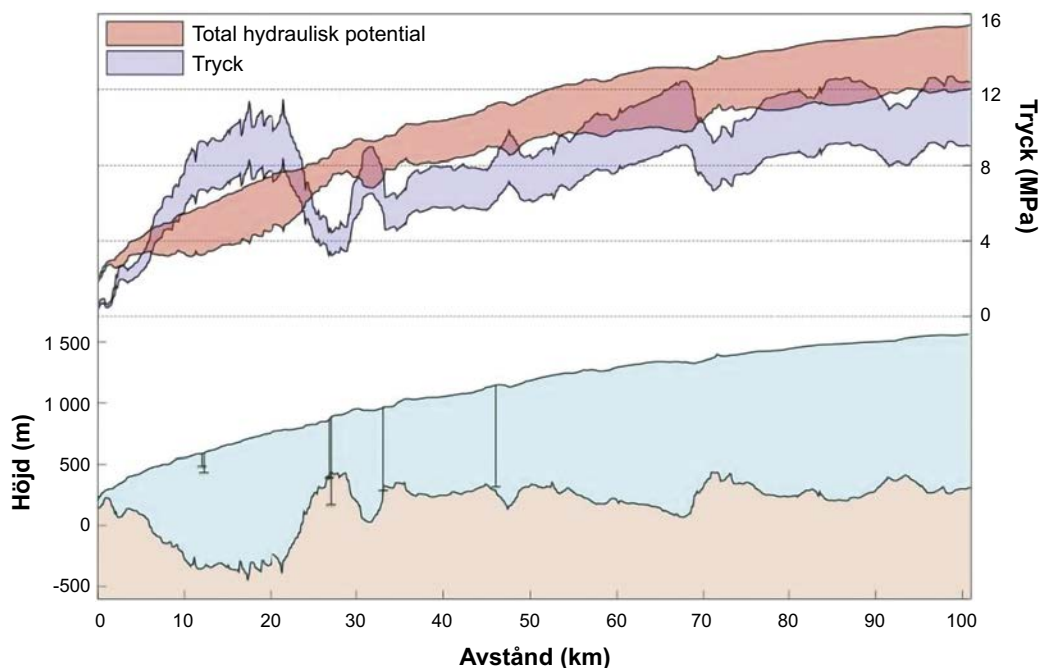
ICE-projektet har resulterat i både en underbyggd och förfinad förståelse av de frågor som studerades inom GAP, och har resulterat i en mer detaljerad och bättre kvantifierad förståelse. Dessutom har projektet lett till nya resultat av processer som inte undersöktes under GAP (Harper et al. 2019). Resultaten från ICE och GAP visar att överytan av berget under inlandsisen utgörs av berg med ett tunt sedimentlager, vilket indikerar att det subglaciala dräneringssystemet är hårt snarare än ett poröst och moränliknande medium. De hydrauliska mätningarna från ICE bekräftar resultaten från GAP och bekräftar slutsatsen att isövertrycket är en representativt och korrekt beskrivning av det basala hydrauliska trycket över större delen av inlandsisen och över större delen av året. Två typer av tryckgradienter har identifierats: i) en primär gradient som drivs av storskaliga longitudinella skillnader i isövertrycket, och ii) sekundära lokala gradienter som beror av dynamiken i det subglaciala dräneringssystemet (figur 14-7). Data från ICE visar att tryckförändringar i dräneringssystemet beror av den basala flödesdynamiken samt mekanisk anpassning till dräneringssystemets volym. Rumsligt lokaliserade och mycket sällsynta tryckpulser, motsvarande magnituder på 0,72 MPa, registrerades i det subglaciala dräneringssystemet. Tillförlitliga uppskattningar av vattenvolymförändringar i det basala dräneringssystemet hämmas av isdeformationen, då det är svårt att med tillräcklig noggrannhet läsa ut höjdförändringar av isöverytan. Inlandsisens storskaliga geometri återspeglar förstärkt basal glidning, vilket troligen avspeglar tillgången till vatten vid gränssnittet is/berg.

Program

I kommentarerna till Fud-program 2016 skriver SSM bland annat att: *SSM ser positivt på SKB:s genomförda studier på Grönland. Vidare ser myndigheten positivt på att SKB fortsättningsvis ska övervaka det djupa borrhålet framför isfronten. Det är dock inte helt klart för SSM vad SKB anser med att en viss nivå av övervakning ska fortgå under den kommande Fud-perioden. SSM anser att den bör inkludera tidsmässigt upprepande mätningar, dvs. ett övervakningsprogram, för att säkerställa resultaten som erhållits från det djupa borrhålet.*

De stora fält- och modelleringsarbetena inom GAP och ICE är avslutade, men övervakning av det djupa borrhålet vid isranden som når förvarslignande djup kommer att fortgå under perioden 2019–2021. Övervakningen omfattar regelbunden registrering av tryck, temperatur och elektrisk konduktivitet i borrhålet. Vidare är det möjligt att vid behov ta vattenprover och gasprover från borrhålet samt utföra temperaturmätningar längs borrhålet för att erhålla termiska data för permafroststudier osv. Nätverket av väderstationer på och framför inlandsisen kommer att upprätthållas under samma period.

Den nyutvecklade konceptuella modellen av inlandsisars hydrologi kommer att anpassas och tillämpas vid kommande hydrogeologisk modellering av området i Forsmark. Randvillkoren för de hydrogeologiska modellerna kan på så sätt förbättras vid simulering av grundvattenflöde under nedisade perioder. Även övrig kunskap kring hydrologi, geokemi och glacial hydrologi kommer att tillämpas i SKB:s säkerhetsanalysarbete där glaciation ingår i analysen. Även den omfattande kunskap som erhållits från GAP och Grasp kring permafrost/talikal/yhydrologi i periglaciala områden kommer att tillämpas vid analysen av säkerhet efter förslutning i Forsmark, speciellt inom ämnesområdena hydrogeologi och ytekosystem. Under Fud-perioden ska SKB ingå i ett internationellt permafrosträtverk där flera kärnavfallsorganisationer och universitet ingår för att vidare studera hydrologin i det periglaciala landskapet (avsnitt 12.3.4). Inom ramen för detta nätverk kommer ett arbetsområde utgöras av systemförståelse där kopplingen mellan de glaciala och subglaciala systemen och hur dessa interagerar med det periglaciala hydrologiska systemet studeras numeriskt och konceptuellt.



Figur 14-7. Basalt hydrauliskt tryck och total hydraulisk potential längs transekten genom GAP/ICE-området på Grönland, vilken sträcker sig från iskanten ~100 km inåt isen. Isöverytan och bergöverytans topografi längs profilen illustreras här tillsammans med positioner och djup för de borrhål som borrar i och igenom isen (vertikala linjer). Blått skuggat fält i övre panelen visar vattentryck, vilket erhålls från istjockleken och uppmätta vattentryck i borrhål, och motsvarar 0,8–1,1 gånger isövertrycket. Den totala hydrauliska potentialen (rött skuggat fält) inkluderar basalt vattentryck och höjdpotentialen. Gradienterna för den totala hydrauliska potentialen återspeglar därför förändringar i istjocklek och bergöverytans höjd, kombinerat med de lokala tryckgradienterna som härstammar från basala processer (figur från Wright et al. 2016). Den här typen av information kommer att användas tillsammans med annan information för att ansätta randvillkor vid framtida grundvattensimuleringar under glaciala förhållanden.

Del III

Avveckling av kärntekniska anläggningar

- 15 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar
- 16 Planering för avveckling inom Uniper
- 17 Planering för avveckling inom Vattenfall
- 18 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar
- 19 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

Del III – läsanvisning

I del III av Fud-program 2019 presenteras planeringen och ansvarsfördelningen för genomförandet av avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och SKB:s anläggningar. Här ges också en sammanfattning av det utvecklingsarbete som är kopplat till avvecklingen, och som i vissa fall redovisats i del II.

15 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar

I detta kapitel beskrivs översiktligt kravbilden som gäller vid avveckling av kärntekniska anläggningar som anges i SSM:s föreskrifter och i miljöbalken. Här redogörs även för hur kravbilden påverkar upplägget av ett generiskt avvecklingsprojekt i form av olika skeden och faser. Vidare redogörs för arbetsfördelningen mellan kärnkraftsföretagen och SKB gällande avveckling och omhändertagande av det uppkomna radioaktiva avfallet. I efterföljande kapitel detaljeras beskrivningen av hur arbetet kommer att bedrivas inom respektive koncern och inom respektive avvecklingsprojekt med fokus på strategier och planerade åtgärder.

15.1 Begrepp och krav

Avveckling av en kärnkraftsreaktor omfattar avställningsdrift, eventuell servicedrift samt nedmontering och rivning. Avställningsdrift är verksamheten från det att kärnkraftsreaktorn slutgiltigt ställts av till dess att allt bränsle avlägsnats från anläggningen. I de fall nedmontering och rivning inte kan inledas omedelbart efter avställningsdriften vidtar en period av servicedrift under vilken anläggningen underhålls i väntan på att nedmontering och rivning kan påbörjas.

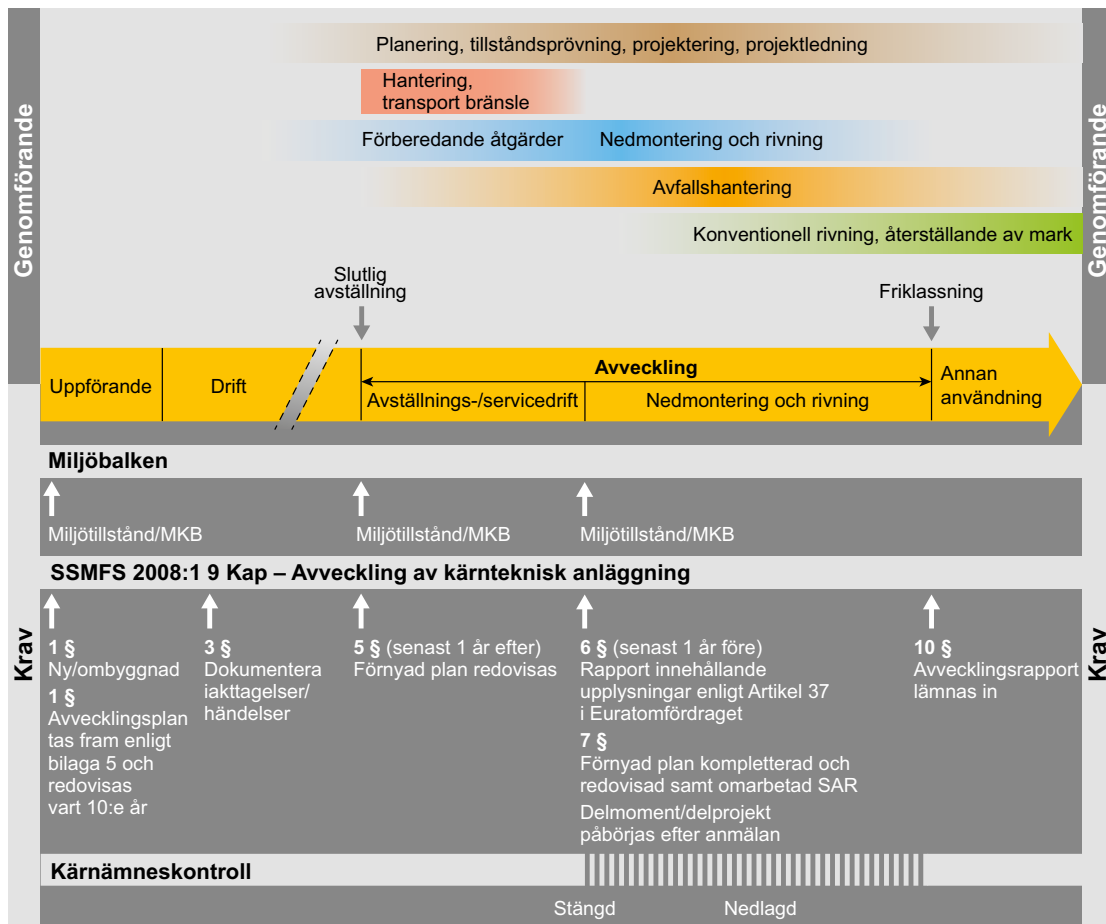
Under nedmontering och rivning pågår aktiviteter för att omhänderta de radioaktivt kontaminerade anläggningsdelarna i form av processystem, byggnader och eventuell kontaminerad mark. Nedmonterings- och rivningsfasen avslutas då anläggningen nått ett tillstånd som gör den möjlig att friklassa. När SSM godkänner en ansökan om friklassning befrias verksamheten vid anläggningen från skyldigheter enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen. Anläggningen upphör därigenom att beaktas som kärnteknisk, vilket innebär att resterande rivning och återställande av mark kan ske utan restriktioner enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen.

Figur 15-1 visar schematiskt hur avvecklingen av en kärnkraftsreaktor genomförs i förhållande till den kravbild som finns på anläggningen under dess livscykel. Figurens övre del presenterar de aktiviteter som planeras att ske på anläggningen och den undre delen visar kraven enligt miljöbalken och SSM:s föreskrifter.

De huvudsakliga tillståndprocesserna som styr ett avvecklingsprojekt är: tillstånd enligt miljöbalken, och godkännande enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen. Enligt miljöbalken ska en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) lämnas in både innan slutlig avställning av anläggningen och som en del i ansökan om att få utföra nedmontering och rivning, se figur 15-1. I samband med slutlig avställning väntas den befintliga MKB:n kunna omarbetas då avställnings- och servicedrift till stor del kommer att likna den tidigare driften. Inför nedmontering och rivning krävs däremot att en ny och ändamålsenlig MKB tas fram. Miljökonsekvensbeskrivningen tillsammans med samråd utgör grunden för tillstånd enligt miljöbalken.

I enlighet med kärntekniklagen och strålskyddslagen samt gällande förordningar, tillståndsvillkor och föreskrifter ska bland annat följande dokument utarbetas inför och i vissa fall löpande under genomförandet av avvecklingen:

- Avvecklingsplan och avvecklingsstrategi.
- Avfallsplan.
- Säkerhetsredovisning.
- Underlag enligt Euratomfördragets Artikel 37.
- Delmoment-/delprojektanmälan.
- Avvecklingsrapport.
- Kontrollprogram för friklassning.



Figur 15-1. Översikt över de olika faserna för genomförandet av en reaktors avveckling samt SSM:s och miljöbalkens krav för avveckling under en kärnteknisk anläggnings livslängd.

Avvecklingsplanen ska redovisas för SSM medan avfallsplan och säkerhetsredovisning (SAR) ska delges för formellt godkännande enligt SSMFS 2008:1. Vidare ska även underlag tas fram för information till Europeiska kommissionen i enlighet med Euratomfördragets Artikel 37. Den formella rapporten skickas till Europeiska kommissionen av SSM men respektive avvecklingsprojekt tar fram underlagsrapporter till SSM.

Under nedmontering och rivning krävs anmälan av de åtgärder som kommer att vidtas i anläggningen. Dessa fördelas rent praktiskt i olika delmoment/delprojekt som anmäls successivt allteftersom avvecklingen fortskrider. Varje delmomentsanmälan ska innehålla uppgifter om bland annat skyddsåtgärder, teknikval och riskbedömningar och ska formellt säkerhetsgranskas.

När nedmontering och rivning är slutförd ska en avvecklingsrapport lämnas till SSM där erfarenheter från avvecklingen och anläggningens sluttillstånd beskrivs.

Under avvecklingen finns även krav på rapportering inom området för kärnämneskontroll. Rapporteringen omfattar bland annat bokföringsrapporter, upprättande av aktivitetsprogram samt årlig uppdatering av områdesbeskrivning. Krav på rapportering upphör efter skriftlig bekräftelse från SSM om att anläggningen uppnått status ”nedlagd anläggning” enligt förordning (Euratom) nr 302/2005.

Utöver ovanstående kravbild finns även avvecklingsrelaterade krav utfärdade av andra kravställare. Dessa krav, som inte beskrivs närmare i detta dokument, inkluderar bland annat lagar och förordningar som övervakas av Miljödepartementet, Arbetsmiljöverket, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Transportstyrelsen och berörd kommuns byggnadsnämnd.

Avvecklingen av de svenska kärnkraftverken påverkas därutöver av de planerade drifttiderna för kärnkraftverken och tillgänglighet av mellanlager och slutförvar för rivningsavfall. Den övergripande planeringen redovisas i avsnitt 3.5 och detaljeras nedan.

15.2 Ansvar och arbetsfördelning

Tillståndshavaren för en kärnteknisk anläggning har ansvaret för avvecklingen enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen, finansieringslagen och SSM:s föreskrifter. För det radioaktiva avfallet sträcker sig ansvaret tills att det är friklassat eller tills att SSM har godkänt slutlig förslutning av aktuellt slutförvar, och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt 10 § kärntekniklagen (SFS 1984:3).

Vattenfall AB är huvudägare för Ringhals AB och Forsmarks Kraftgrupp AB. Uniper är huvudägare för OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB. Tillståndshavare för kärnkraftsreaktorerna är Barsebäck Kraft AB (Barsebäck 1–2), Forsmarks Kraftgrupp AB (Forsmark 1–3), OKG Aktiebolag (Oskarshamn 1–3) respektive Ringhals AB (Ringhals 1–4). För Ågestareaktorn är Vattenfall AB tillståndshavare. SKB ansvarar för sina anläggningar Clab och SFR samt de framtida anläggningarna Clink, Kärnbränsleförvaret och SFL. För att det kärntekniska tillståndet ska gå över till någon annan krävs ett regeringsbeslut.

För att effektivisera arbetet med avvecklings- och avfallsfrågor har arbetsområden fördelats mellan olika aktörer på såväl företagsnivå som på koncernnivå. De industrigemensamma åtagandena inom hantering av avfallet utförs i normalfallet koordinerat från SKB, medan det inom de två industrikoncernerna, Vattenfall och Uniper, varierar något hur avvecklingsrelaterade frågor hanteras. Detta avsnitt beskriver arbetsformerna och fördelningen av arbetsuppgifter.

15.2.1 Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB

Tillståndshavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer. SKB:s huvuduppgift är att få till stånd slutförvar för rivningsavfall enligt tillståndshavarnas behov. SKB sammanställer det utvecklingsbehov som identifierats av tillståndshavarna, samordnar generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall, och sammanställer även de avvecklingsrelaterade kostnaderna som inrapporteras från tillståndshavarna.

Enligt kärntekniklagen ska kärnkraftsföretagen i samråd utarbeta ett program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet samt de övriga åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Det är SKB som på uppdrag av kärnkraftsföretagen, och i samarbete med dessa, utarbetar Fud-programmen och ger in dem till SSM, se avsnitt 1.2.

Generella metoder och rutiner för rivningsarbete

SKB har i uppdrag att samordna de generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall som behövs för avvecklingsarbetet. Uppgifter som SKB svarar för är bland annat att ta fram typbeskrivningar som beskriver hur avfallet uppfyller de acceptanskriterier som gäller i respektive slutförvar. Avfallsproducenten tar fram typbeskrivningsspecifikationer som utgör underlag till typbeskrivningen men även är del i avfallsproducenternas SAR och ska visa hur avfallet uppfyller acceptanskriterier för tillverkning och mellanlagring på anläggningen. Vidare har SKB i uppgift att gemensamt för kärnkraftsföretagen vid behov utveckla nya avfallsbehållare för rivningsavfallet, se avsnitt 7.5.

För att uppnå en optimal nationell samordning, har kärnkraftsföretagen gemensamt kommit överens om uppgifter som SKB samordnar i anknytning till avfallshantering, exempel på detta har varit framtagande av guideline och gemensamma riktlinjer för friklassning (SKB 2011a, Berglund et al. 2016) samt riktlinjer för redovisning av avvecklingsplaner (Calderon 2014).

Respektive kärnkraftsföretag ansvarar för det framtida rivningsinventariet medan SKB svarar för att sammanställa inventariet och utgöra kravställare på avfallet så att det kan transporteras och deponeras i respektive slutförvar.

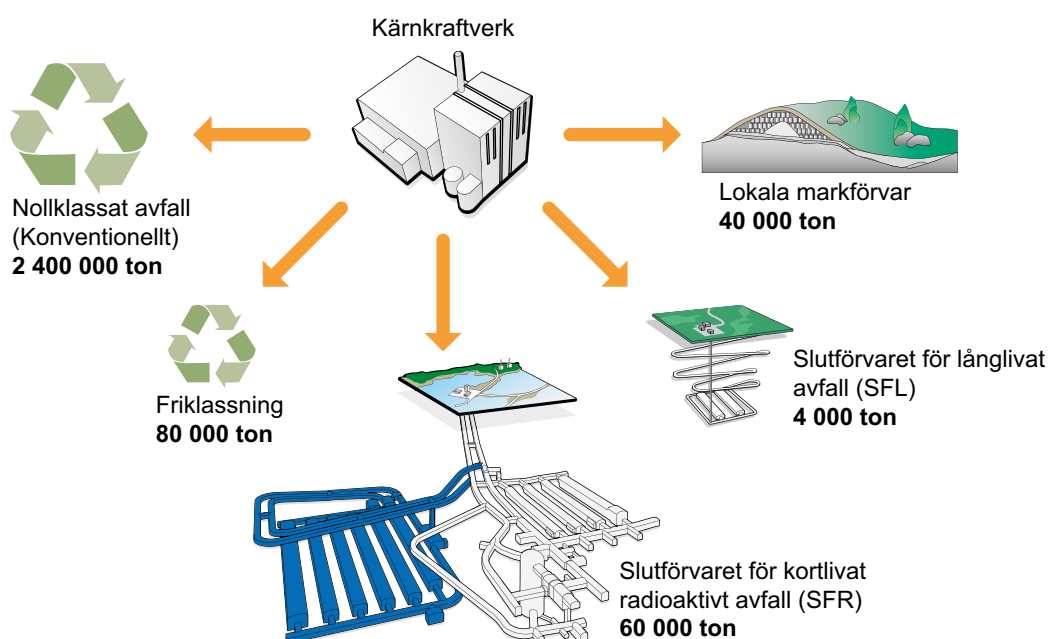
Genom ett nära samarbete mellan kärnkraftsföretagen och SKB kan hanteringen av det radioaktiva avfallet ske optimalt över hela kedjan från nedmontering och rivning till deponering och förslutning av slutförvar.

Avfall under nedmontering och rivning

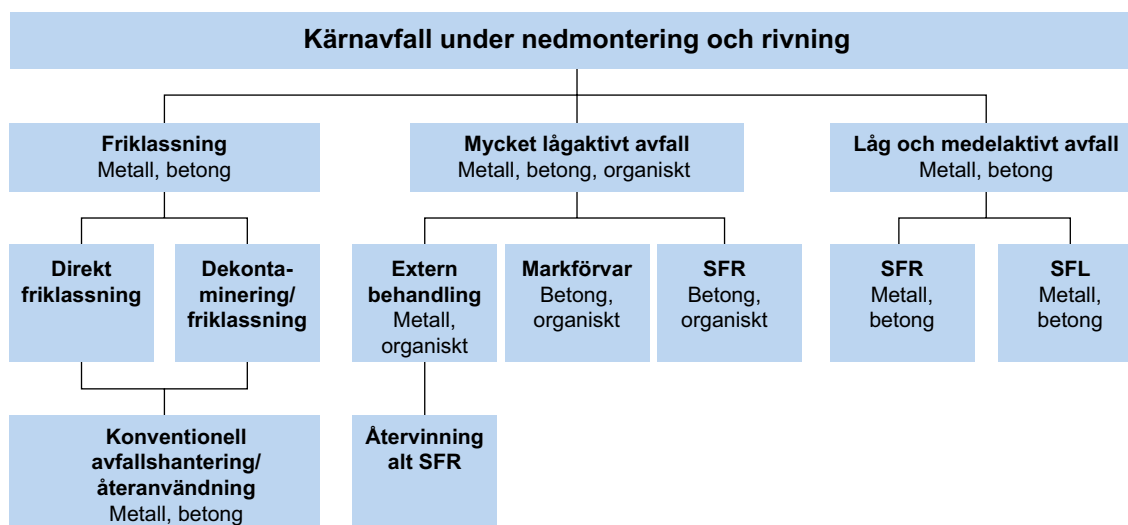
Under nedmontering och rivning av ett kärnkraftverk uppstår stora mängder avfall. Avfallet är av samma typ som det avfall som uppstår under drift, med skillnaden att volymerna kommer vara större under nedmontering och rivning. Avfallet kommer från olika delar av anläggningen med stora variationer i radioaktiv föroreningsgrad. Nivån på föroreningsgrad är det som avgör den efterföljande hanteringen och slutlig avbördningsväg eller omhändertagande för avfallet.

Merparten av avfallet kan hanteras konventionellt då det härrör från anläggningsdelar där radioaktivt material inte har hanterats eller där det historiskt inte detekterats någon kontamination. Detta avfall benämns som nollklassat avfall vilket innebär att hanteringen föregåtts av en initial bedömning där avfallet kategoriserats som extremt liten risk för förorening (ELR). Kategorisering av avfall finns beskrivet i rapporten SKB (2011a) och i Berglund et al. (2016).

Avfall som inte kan nollklassas sorteras efter lämplig avbördningsväg. En sammanställning över prognostiserat rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken per avbördningsväg samt principer för avbördningsvägar av kärnavfall under nedmontering och rivning presenteras i figur 15-2 och 15-3.



Figur 15-2. Sammanställning över prognostiserat rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken.



Figur 15-3. Kärnkraftverkens principer för avbördningsvägar för kärnavfall under nedmontering och rivning.

Kostnader för avveckling

Kärnkraftsföretagen är enligt kärntekniklagen skyldiga att svara för kostnaderna för de åtgärder som behövs för att omhänderta kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla anläggningarna. På uppdrag av kärnkraftsföretagen tillser SKB vart tredje år att en kostnadsberäkning tas fram enligt finansieringslagen, se avsnitt 1.3. Inbetalda medel förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden.

Kärnkraftsföretagen tar fram kostnadsuppskattningar för avveckling av respektive kärnkraftsreaktor och översänder dessa till SKB. SKB sammanställer uppskattningarna och tar fram en övergripande kostnadsuppskattning samt osäkerhetsanalys, vilka sedan ligger till grund för de avgifter och säkerhetsbelopp som regeringen beslutar om.

Transportsystemet

SKB ansvarar för transport av använt kärnbränsle och kärnavfall från kärnkraftverken till mellanlager och slutförvar. Transportsystemet består av fartyget m/s Sigrid, specialfordon och olika typer av transportbehållare, se avsnitt 2.3. Fartyget och fordonen används både för transporter av låg- och medelaktivt avfall och för använt kärnbränsle. De olika transportbehållarna är specifikt utvecklade för respektive avfallstyp. I det fall nya transportbehållare behöver utvecklas, ansvarar SKB för genomförandet.

Kärnavfall kan, i de fall detta anses motiverat, transporteras utanför SKB:s system. Detta kan exempelvis gälla större komponenter.

15.2.2 Arbetsfördelning inom Uniper

Unipers nukleära avvecklingsportfölj omfattar avvecklingen av OKG Aktiebolags och Barsebäck Kraft AB:s anläggningar. Arbetsfördelningen finns beskriven i respektive tillståndshavares avvecklingsstrategi och avvecklingsplaner, där det framgår att Uniper har som mål att koordinera avvecklingen av de avställda reaktorerna Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

Sedan våren 2017 koordineras det strategiska arbetet för avvecklingen inom Uniper funktionellt inom ramen för Project Performance Center (PPC). PPC har till uppgift att identifiera eventuella synergier för en optimerad avveckling av anläggningarna. I PPC:s uppgift ligger också att stödja och följa upp genomförandet av avvecklingsprogrammen.

Styrgruppen för PPC består av representanter från Sydkraft Nuclear Power (SNP) och tillståndshavarna OKG Aktiebolag (OKG) respektive Barsebäck Kraft AB (BKAB). PPC rapporterar både till SNP och till Unipers centrala funktion för projektstyrning (UTG). Principerna har sin utgångspunkt i att vd för respektive tillståndshavare ytterst beslutar i frågor rörande genomförandet av avvecklingen. Avvecklingen hanteras på OKG vidare av avdelning A (Avveckling) med stöd av övriga OKG där vissa funktioner delas (med Oskarshamn 3 och de gemensamma anläggningarna som är i fortsatt drift). På BKAB är organisationen renodlad för rådande avvecklingsskede då samtliga anläggningar på området ska avvecklas. Inom både OKG och BKAB pågår en anpassning av organisationen till storskalig nedmontering och rivning. Omorganisationen planeras vara genomförd under hösten 2019. Organisationen kommer bygga på de huvudsakliga funktionerna under avveckling i form av avfallshantering, nedmontering och rivning, drift och underhåll samt skydd och säkerhet.

15.2.3 Arbetsfördelning inom Vattenfall

År 2015 tillsattes en linjefunktion inom Vattenfall AB med uppgift och ansvar att koordinera, samordna och driva avvecklingsfrågor inom Vattenfallkoncernen, affärsenheten Business Unit Nuclear Decommissioning (BUND). Genom etableringen av BUND separerades koncernens avvecklingsverksamhet från dess kraftproduktion och tydliga verksamhetsfokus skapades för drift respektive avveckling. Etableringen av BUND möjliggjorde även centralisering av koncernens avvecklingskompetens till en för ändamålet dedikerad organisatorisk enhet.

Inom BUND har det beslutats att planering och genomförande av koncernens avvecklingsuppdrag primärt ska bedrivas i programform. Bakgrunden till detta är att kärnteknisk avveckling innebär en mångfasetterad och multidisciplinär utmaning som sträcker sig över långa tidsperioder, vilket gör att

effektmål blir styrande snarare än explicit mätbara projektmål. Genom att tillämpa programstyrning möjliggörs att det komplexa nätverk av frågeställningar som behöver adresseras hanteras på ett transparent och synkroniserat vis.

BUND:s uppdrag är att se till att säkerheten står i fokus och att avvecklingsplaneringen sker effektivt med tydliga prioriteringar inom och mellan avvecklingsprogrammen. BUND svarar även för koncern-gemensam optimering mellan avvecklingsprogram och sörjer för att säkerställa strategisk avvecklings-specifik kompetens samt strategiskt utvecklingsstöd i verksamheten.

All analys och planering inför operativa avvecklingsåtgärder genomförs av BUND på uppdrag av, och i nära samverkan med, tillståndshavaren. Tillståndshavaren ser till att kompetens rörande anläggningen och dess historik finns tillgänglig för avvecklingsprogrammen och ansvarar för att säkerställa tydliga och realistiska ekonomiska och tekniska förutsättningar för avvecklingen. Tillståndshavaren ser även till att slutlig avställning sker på ett optimalt vis och att bränslet transporteras bort samt att separering sker av eventuella anläggningar eller system som ska lämnas kvar på platsen.

En överföring av befintliga kärntekniska tillstånd för Ringhals 1 och 2 planeras ske till Vattenfall AB snarast efter det att anläggningarna är bränslefria.

15.3 Nationell och internationell samordning

15.3.1 Industrigemensam samordning

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avvecklingsfrågorna inom kärnkraftsföretagen och mellan kärnkraftsföretagen och SKB samt övriga tillståndshavare för att kunna säkerställa att hela kedjan från avvecklingsplanering till slutförvaring av avfallet sker på ett optimalt sätt. Olika forum finns för att stödja detta, där även en del internationella forum är betydelsefulla.

På nationell nivå finns SKB:s Fud- och plangrupp där kärnkraftsbolagen ingår. I gruppen sker samordning av SKB:s arbete med Fud-programmen och planrapporterna.

För att ytterligare stödja linjechefer inom SKB och kärnkraftsföretagen rörande avveckling och avfallshantering har ett forum för avfallschefer etablerats där SKB är sammankallande. Detta ger möjligheten att fatta beslut inom deltagarnas mandat för att få fokus på viktiga frågor och prioritera bland det arbete som SKB och kärnkraftsföretagen bedriver.

I samband med tidigare stängning av reaktorerna i Oskarshamn och Ringhals har ett utökat behov av samarbete och samordning uppstått inom avvecklingsplanering, inte minst inom koncernerna Vattenfall och Uniper, men även mellan kärnkraftsföretagen och SKB. Samarbetena omfattar exempelvis mellanlagring av avfall i väntan på att planerade slutförvar är i drift eller att optimera hanteringen av vissa avfallsfraktioner.

SKB och kärnkraftsföretagen deltar även i internationella forum inom området avveckling. Deltagande i OECD/NEA:s samarbetsprogram och IAEA:s program är två exempel. Det huvudsakliga arbetet inom OECD/NEA som tidigare skett under Working Party for Dismantling and Decommissioning (WPDD) kommer att bedrivas inom OECD/NEA under Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management (CDLM) och inom IAEA i gruppen International Decommissioning Network (IDN).

Barsebäck Kraft AB och AB SVAFO är även medlemmar i OECD/NEA:s CPD (Co-operative Programme for the Exchange of Scientific and Technical Information concerning Nuclear Installation Decommissioning Projects) med dess undergrupp TAG (Technical Advisory Group).

15.3.2 Samordning Uniper

PPC som har det funktionella uppdraget att koordinera avvecklingsportföljen inom Uniper utgörs i det praktiska arbetet av ett antal arbetsgrupper med representanter från OKG och BKAB bestående av personal med fackområdeskunskap samt projektledare inom respektive område. Arbetsgruppernas ämnesfokus varierar över tid. Resultatet från arbetet inom ramen för PPC ger på strategisk nivå underlag till den fortsatta implementeringen av OKG:s och BKAB:s avvecklingsprogram.

15.3.3 Samordning Vattenfall

Inom Vattenfall har flera forum skapats för att samordna avvecklingsfrågorna inom koncernen. Avvecklingsrådet utgör ett forum för beslut om inriktning och angreppssätt för avvecklingen av Ringhals 1 och 2. Syftet är att åstadkomma en säker och kostnadseffektiv avveckling av Ringhals 1 och 2 samtidigt som fortsatt säker och stabil drift av Ringhals 3 och 4 säkras. Frågor som hanteras i Avvecklingsrådet inkluderar strategiska frågor såsom exempelvis tillståndsfrågor, planering, infrastruktur och personalrelaterade frågor.

Strategiskt forum för avfallshantering och avveckling, Strata, har bildats för att säkerställa att olika verksamheters strategier och planer för avveckling och avfallshantering samordnas och optimeras. Detta utifrån olika aspekter såsom säkerhet, myndighetskrav, kostnadseffektivitet och andra externa och interna intressenters krav.

Inom ramen för Samverkansområde Avfall (SO Avfall) bedrivs koncernintern samverkan inom avfalls- och avvecklingsområdet, till exempel vad gäller friklassning, avfallsdokumentation och generellt erfarenhetsutbyte. Inom koncernen finns även ett kompetenscenter inom avfallsområdet, med ett huvudsakligt syfte att långsiktigt verka för att kompetens- och resursbehovet inom området kan mötas.

En viktig del för kompetensuppbyggnaden inom Vattenfall är att arbeta med erfarenhetsåterföring från avvecklingen på ett strukturerat och genomtänkt sätt. Avvecklingskompetens och erfarenheter som erhållits inom koncernen vid avvecklingen av R2-reaktorn i Studsvik ska samordnas och överföras till avvecklingen av Ågesta och Ringhals 1 och 2. Likaledes pågår insatser på att utbyta erfarenheter och utnyttja samordningsfördelar, exempelvis inom upphandlingsområdet, mellan Vattenfalls avvecklingsverksamheter i Tyskland och den i Sverige.

Det finns även ett antal råd och forum inom Vattenfall som hanterar mer operativa frågeställningar inom avvecklingen av Ringhals 1 och 2 samt Ågestareaktorn.

15.4 Resurser och kompetens

Avveckling av kärntekniska anläggningar kommer i Sverige pågå ända fram till 2070-talet, då anläggningarna för omhändertagande av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall ska avvecklas. Denna avvecklingsverksamhet kommer inte ske i ett jämt flöde, utan kommer genomföras i tre huvudsakliga etapper; en på 2020-talet (nu), en på 2040-talet och den slutliga på 2070-talet. En utmaning är därmed att säkerställa tillgång till kompetens för alla tre avvecklingsetapperna, eftersom behovet av avvecklingskompetens mellan etapperna kommer vara begränsat i Sverige.

Att säkra kompetens inom områden viktiga för slutförvaring av kärnavfall samt nedmontering och rivning, kommer alltså vara en för bolagen strategiskt viktig fråga på både kort och lång sikt. För att säkra kompetens inom landet kommer ett samarbete med universitet och högskolor vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, samt att fortsätta uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden.

Nuläge

En nyckel för att klara den första etappen är att arbeta strukturerat med kompetensuppbyggnad och erfarenhetsåterföring inom avvecklingsområdet. En viktig del är den organiska uppbyggnaden av kompetens; det behöver säkerställas att den avvecklingskompetens och de erfarenheter som erhållits vid avvecklingen av bland annat de tidigare forskningsreaktorerna kan nyttjas i avvecklingen av de kommersiella reaktorerna.

På motsvarande sätt är det viktigt att ha ett löpande utbyte inom och mellan bolagens tyska respektive svenska verksamheter, i syfte att säkerställa överföring av relevanta erfarenheter och lösningar för en säker och effektiv avveckling.

Vidare har bolagen etablerat kontakter med internationella leverantörer med betydande erfarenhet av praktisk avvecklingsverksamhet, och olika former av samverkan har initierats med syfte att inhämta och bygga upp relevant kompetens.

På dessa sätt möjliggörs att erfarenheter och kompetens successivt byggs upp och säkras inom branschen till slutfasen av den första avvecklingsetappen.

Ett annat exempel är den kursverksamhet inom backend-området som branschen etablerat inom KSU; här finns utbildningar inom såväl avfallshantering som avveckling.

Program

Att säkra att kompetens och erfarenheter bevaras till kommande etapper är en betydande utmaning. Men en viktig beståndsdel är att noggsamt och strukturerat dokumentera de praktiska erfarenheter som bolagen gör under avvecklingen, att tydligt beskriva hur organisation och styrning lämpligen bör utformas beroende på arbetsuppgiften, hur en anläggning i drift bäst kan förberedas inför rivning till exempel vad gäller dokumentation, vilka olika former av avvecklingskoncept som finns, vilka erfarenheter som finns kopplat till dessa samt vilka koncept som fungerar relaterat till olika typer av anläggningar och i olika kontext. Lite förenklat kan detta sammanfattas med att efter att denna avvecklingsvåg är avslutad, så har branschen etablerat en "blåkopia" över hur avveckling bäst planeras, styrs och genomförs med hänsyn till säkerhet och effektivitet.

Utöver detta är det givetvis kritiskt att anläggningskännedom samt formell kompetens inom till exempel strålskydd långsiktigt säkerställs. Detta kräver såväl ett branschgemensamt samarbete som en samverkan med utbildningsväsendet.

Ett exempel på ett branschgemensamt samarbete är Svenskt Kärntekniskt Centrum, SKC, en centrumbildning där kärnkraftverken, Westinghouse Electric Sweden AB, KTH, Chalmers tekniska högskola och Uppsala universitet sedan 27 år stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

Ett annat exempel på branschsamverkan är att Vattenfall och Uniper i Sverige samt TVO i Finland etablerat ett nätverk för framtida kompetensförsörjning, BWR Future, där avancerad ingenjörskompetens blir tillgänglig som en flexibel resurs. Uppdragen kommer att bedrivas i form av projekt. Varje företag i nätverket kan vid behov begära expertstöd och deltagande i verksamheten är frivilligt. Resursnätverket kommer att fokusera på teknologi för kokvattenreaktorerna i Olkiluoto, Forsmark och Oskarshamn.

Det är slutligen viktigt att notera att även om behovet av avvecklingskompetens inom Sverige kommer vara begränsat mellan avvecklingsetapperna, så kommer det internationellt att pågå avvecklingsverksamhet i stor skala och under lång tid. Därmed kommer behovet globalt vara stort över tid, vilket innebär att motivet att etablera och bevara kompetens över tid kommer att vara betydande, vilket med hög sannolikhet innebär att relevant kompetens kommer att finnas tillgänglig internationellt under hela den svenska avvecklingsperioden.

16 Planering för avveckling inom Uniper

Planeringen av Unipers avvecklingsportfölj sker på strategisk nivå inom ramen för Project Performance Center, PPC, i syfte att identifiera och ta tillvara synergier mellan avvecklingsprogrammen på OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB. Med utgångspunkt i en säker och kostnadseffektiv avveckling har ett koncept på portföljnivå utvecklats med en rivningssekvens där en kritisk linje ligger sekventiellt (efter varandra) mellan avvecklingsprogrammen och de olika anläggningarna. Förhållningssättet medger att nyttan av upplärningseffekter kan maximeras i både planering och genomförande. Den tekniska sekvensen är också uppbyggd för att skapa en hög grad av flexibilitet.

16.1 Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling

Barsebäcksverket är beläget på Barsebäckshalvön i Kävlinge kommun, cirka 20 km norr om Malmö. Det ägs och förvaltas av Barsebäck Kraft AB (BKAB). Barsebäcksverket producerade el under åren 1975–2005. Reaktorn i block 1 (B1) har varit permanent avställd sedan 1999 och reaktorn i block 2 (B2) sedan 2005, se figur 16-1.

Avvecklingen av BKAB:s kärntekniska anläggningar beskrivs i Avvecklingsplan för Barsebäcksverket.

I slutet av 2019 beräknas att samtliga erforderliga tillstånd för start av nedmontering och rivning har erhållits. Barsebäck 1 (B1) och Barsebäck 2 (B2) kommer att påbörja nedmontering och rivning under 2020. Under genomförandet av nedmontering och rivning kommer de olika arbetspaketen/delmomenten framöver anmälas enligt gällande tillståndsvillkor.

Reaktorernas interna delar har segmenterats. Förberedande åtgärder har genomförts enligt gällande tillståndsvillkor. Anläggningarna har kartlagts radiologiskt och avfallet i respektive delmoment har tilldelats preliminära lösningar för omhändertagande.

Den genomförda och fortsatta planeringen av avvecklingen av B1 och B2 bygger på att använda beprövad teknik och beprövade metoder. Tekniska, säkerhetsmässiga och organisatoriska beroenden har identifierats och därefter har en sekvens för arbetspaketen/delmomenten fastställts. Utifrån den sekvensen genomförs successivt detaljplanering och upphandling för respektive arbetspaket/delmoment. Förhållningssättet bygger på att minska tekniska och säkerhetsmässiga risker. Under avvecklingen agerar BKAB som en beställarorganisation. Tidiga dialoger förs med leverantörer som också involveras i planeringen för att optimera genomförandet.

Hanteringslinjer för radiologiskt och friklassningsbart avfall är etablerade. Avfallslogistiken är dimensionerad efter rivningssekvensen och den radiologiska kartläggningen. BKAB har redundans i hanteringslinjerna för att minska risken för störningar i avfallslogistiken, se figur 15-3.

Då avvecklingen av B1 och B2 genomförs innan utbyggt SFR är i drift behöver BKAB bygga ett nytt mellanlager för det lågaktiva radioaktiva avfallet. För det långlivade radioaktiva avfallet som mellanlagras i befintligt lager i väntan på SFL undersöks alternativ med extern mellanlagring. Mellanlagret för långlivat avfall utnyttjas till cirka 50 procent så det kommer även att rymma avfallskollin från de segmenterade reaktortankarna. BKAB avser inte att etablera något markförvar eftersom den kärntekniska verksamheten ska upphöra och området ska friklassas i sin helhet. Möjligheten att använda OKG:s markförvar planeras som ett alternativ till att deponera avfallet i SFR.

Dekontaminering och friklassning av byggnader planeras att vara genomfört 2028.

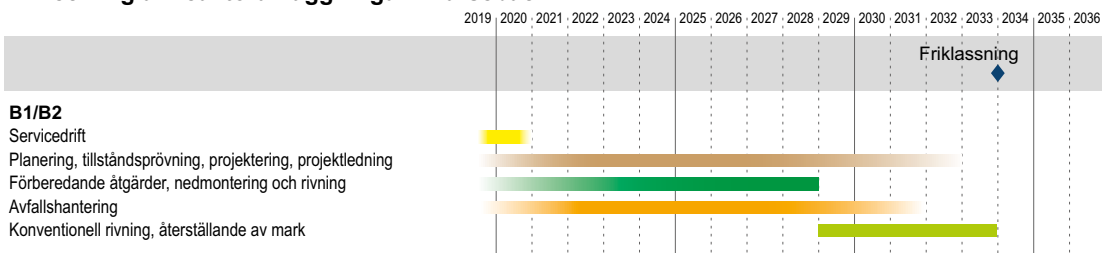
Konventionell rivning och iordningställande av mark sker i anslutning till att det radioaktiva avfallet transporterats till SFR.

I figur 16-2 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Barsebäcks kärnkraftverk.



Figur 16-1. Vy över Barsebäcks kärnkraftverk med de två BWR-reaktorerna B2 (närmast i bild) och B1. Foto Jenny Eliasson, Malmö Museer.

Avveckling av reaktoranläggningar i Barsebäck



Figur 16-2. Principiell översikt av Barsebäcks Kraft AB:s tidsplan för avveckling.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen redovisas i avvecklingsplan, avfallsplan och mer detaljerat i respektive delmomentsredovisning. Redovisade avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori baseras på resultat från den radiologiska kartläggningen som även kommer att uppdateras löpande under rivningen.

16.2 OKG Aktiebolags planering för avveckling

OKG Aktiebolag (OKG) äger kärnkraftsreaktorerna Oskarshamn 1 (O1), Oskarshamn 2 (O2) och Oskarshamn 3 (O3) samt ett antal gemensamma serviceanläggningar som benämns Block 0 (O0). Förlägningsplatsen för reaktorerna är belägen på Simpevarpshalvön intill Östersjön, omkring tre mil nordost om Oskarshamn. O1, O2 och O3 är alla kokvattenreaktorer (BWR), se figur 16-3.

År 1966 gavs tillstånd att uppföra O1. Anläggningen fasades in på kraftnätet första gången 1971 och invigdes 1972. 1969 gavs tillstånd att uppföra O2 och anläggningen togs i drift 1974. O3 togs i drift 1985. O1 och O2 är belägna intill varandra medan O3 är beläget något mer norrut från de övriga.

Genomförandet av avvecklingen av OKG:s kärntekniska anläggningar beskrivs i gällande avvecklingsstrategi och respektive avvecklingsplaner.

16.2.1 Oskarhamn 1 och Oskarhamn 2

O1 och O2 befinner sig under nedmontering och rivning. O1 ställdes slutligt av sommaren 2017. För O2 som genomgått ett omfattande moderniseringsprogram togs beslut om att inte återstarta anläggningen och den slutliga avställningen fastställdes till slutet av 2016. Samtliga erforderliga tillstånd för start av nedmontering och rivning har erhållits för båda reaktorerna. Under genomförandet av nedmontering och rivning kommer de olika arbetspaketen/delmomenten framöver anmälas enligt gällande tillståndsvillkor.

Den genomförda och fortsatta planeringen av avvecklingen av O1 och O2 (inklusive den gemensamma avfallsanläggningen, 0AVF) bygger på planering av stora projekt, där standardiserade planeringsprocesser baserade på Lean-principer tillämpas (Lean – metodik för att maximera nytta och minimera slöseri). Tekniska, säkerhetsmässiga och organisatoriska beroenden har identifierats varefter en sekvens för genomförandet av de olika arbetspaketen har fastställts. Detaljplaneringen under storskalig nedmontering och rivning byggs därefter upp successivt för respektive arbetspaket/delmoment. Förhållningssättet bygger på att minska tekniska och säkerhetsmässiga risker. Under avvecklingen avser OKG att utgöra en beställarorganisation. Tidiga dialoger förs med leverantörer som också involveras tidigt i planeringen för att optimera genomförandet.

Anläggningarna har hittills tömts på bränsle och segmenteringen av reaktorernas interna delar planeras att avslutas under inledningen av 2020. Ett antal förberedande åtgärder har också genomförts. En radiologisk kartläggning av anläggningarna har gjorts, liksom en 3D-skanning. Anläggningarnas byggnadsdelar och material har delats in i olika spår för material- och avfallshantering.

Material och avfall som uppkommer i samband med avvecklingen är av samma typ som det som uppkommer under drift, med skillnaden att volymerna kommer vara större under avvecklingen. Det innebär att material- och avfallshanteringen behöver anpassas, men att beprövade tekniker och metoder kan användas. De större material- och avfallsmängderna under avvecklingen ställer krav på en väl fungerande material- och avfallslogistik. Avfallslogistiken kommer att byggas upp successivt baserat på flöde av material/avfall per tidsenhet, vilket kan erhållas genom att koppla ihop den tekniska rivningssekvensen med den radiologiska kartläggningen.

SFR och SFL är otillgängliga vid avvecklingen av O1 och O2 (inklusive 0AVF). Material- och avfallshanteringen behöver optimeras ur ett helhetsperspektiv, där möjliga och rimliga avbördningsvägar, såsom geologiska slutförvar, lokal friklassning, extern behandling och lokala markförvar, vägs mot varandra. Det innebär att redundans i avbördningsvägar eftersträvas där så är möjligt, och att en förordad avbördningsväg baseras på en samlad bedömning av faktorer som kostnad, risk, miljö, Alara-principer etcetera.

Vid avvecklingen av O1 och O2 (inklusive 0AVF) behöver det avfall som ska slutförvaras i det utbyggda SFR eller SFL mellanlagras på plats, tills slutförvaren är i drift och tillgängliga. Det innebär att för det lågaktiva avfallet som ska transporteras till SFR krävs att det befintliga mellanlagret LLA (lagringsbyggnad för lågaktivt avfall) utökas. Däremot bedöms mellanlagring av medelaktivt avfall som ska transporteras till SFR och långlivat avfall som ska till SFL, rymmas i det befintliga mellanlagret BFA (bergrum för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall).

Det befintliga lokala markförvaret MLA (markförvar för slutförvaring av mycket lågaktivt avfall) behöver utökas för att kunna ta emot det mycket lågaktiva avfallet från avvecklingen av O1 och O2 (inklusive 0AVF). Utökningen av markförvaret krävs också för avfallet från den återstående driften av Oskarhamn 3. Markförvarets planerade utökning kommer också anpassas för avfall från avvecklingen av BKAB:s anläggningar.

Dimensioneringen av både mellanlager och markförvar styrs av behovet baserat på en optimal fördelning av de olika avbördningsvägarna utifrån angivna faktorer. Utökningarna av mellanlager och markförvar hanteras i separata tillståndprocesser.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen redovisas i respektive avvecklingsplan, och för anläggningarna under nedmontering och rivning även i gällande avfallsplan och mer specifikt i respektive delmomentsredovisning. För anläggningarna under nedmontering och rivning finns mer ingående avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori, baserat på resultat från den radiologiska kartläggning av anläggningarna som genomförs och kommer fortgå under avvecklingsprojektet. Den totala mängden material och avfall från avvecklingen av O1 och O2 (inklusive 0AVF) uppskattas till omkring 300 000 ton, av dessa bedöms radioaktivt material och avfall utgöra en mindre del (omkring 5–10 procent).

Dekontaminering och friklassning av byggnader kommer pågå parallellt med nedmontering och rivning. Friklassning av byggnaderna planeras vara genomförd 2028.

Konventionell rivning inklusive reaktorbyggnaderna för O1 och O2 samt återställning av mark sker i anslutning till rivning av O3 och gemensamma anläggningar omkring 2050–2055.

I figur 16-4 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Oskarshamns kärnkraftverk.

16.2.2 Oskarshamn 3 och gemensamma anläggningar

Oskarshamn 3 planeras att drivas fram till 2045. Därefter planeras nedmontering och rivning inledas parallellt med att anläggningen töms på bränsle. Vid tidpunkten för avveckling av O3 förväntas en industrialisering av nedmonterings- och rivningsarbetet ha skett mot bakgrund av att ett flertal avvecklingsprojekt då har genomförts. Detta tillsammans med erfarenheterna från avvecklingen av O1 och O2 borgar för en optimering av avvecklingen.

Beträffande avveckling av de gemensamma anläggningarna tillhörande Block 0 kommer den gemensamma avfallsanläggningen (0AVF) att avvecklas i samband med avvecklingen av O1 och O2. 0AVF kommer att avvecklas när anläggningen inte längre behövs för avvecklingen av O1 och O2. Starten för nedmontering och rivning av den gemensamma avfallsanläggningen är planerad till 2025. Tillståndsprocesser och planering för 0AVF hanteras i samband med avveckling av O1 och O2. Övriga anläggningar inom Block 0 kommer att avvecklas i anslutning till avvecklingen av O3.

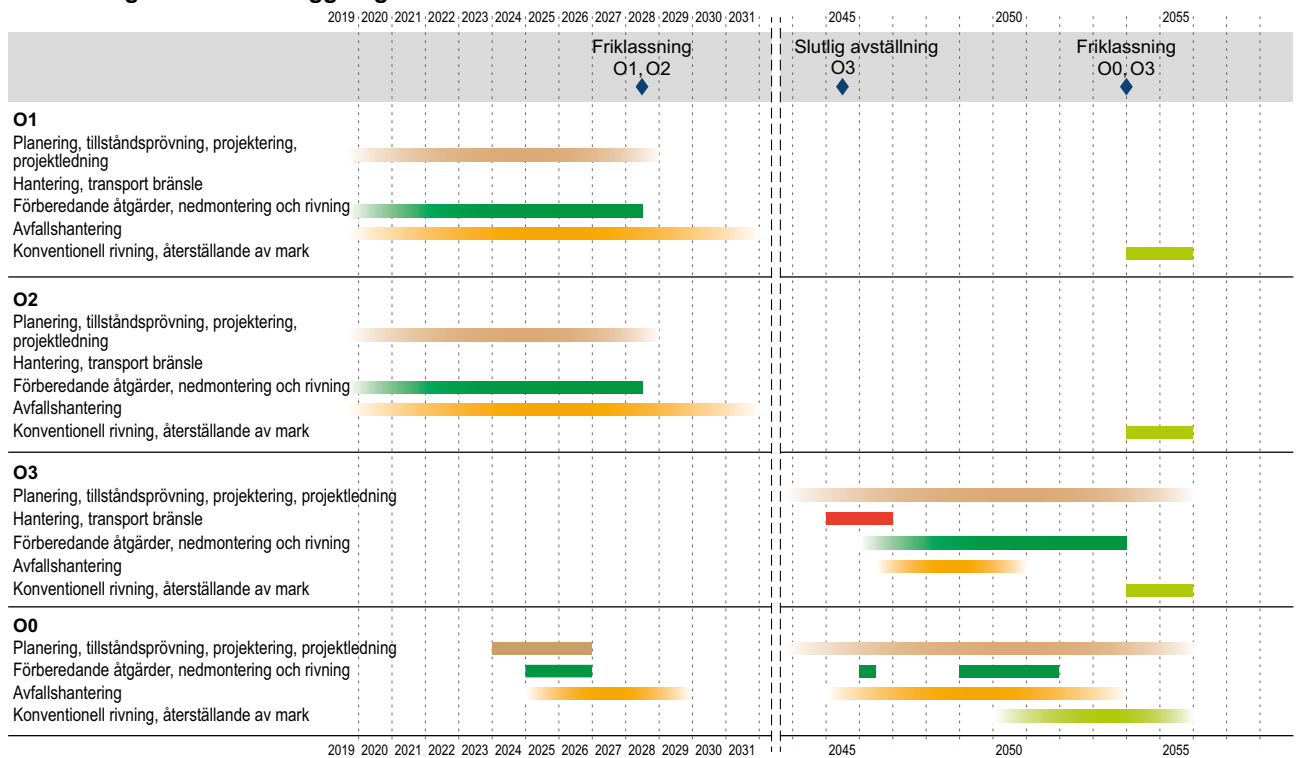
Avvecklingsplaneringen för O3 och Block 0 kommer att fortsätta under pågående drifttid enligt ordinarie rutiner, där erfarenheter från avvecklingen av O1 och O2 samt 0AVF tas tillvara. Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen redovisas i respektive avvecklingsplan och baseras på mängderna från tidigare genomförda rivningsstudier. Den totala mängden material och avfall från avvecklingen av O3 och de gemensamma anläggningarna uppskattas till omkring 400 000 ton. Av dessa totala mängder bedöms radioaktivt material och avfall utgöra en mindre del (omkring 5–10 procent).

Konventionell rivning av O3 planeras till omkring 2054–2055. Nedmontering och rivning av de gemensamma anläggningarna planeras i två etapper. Första etappen, 2046, avser sådana anläggningar som inte krävs för avvecklingen av O3 medan nästa etapp avser återstående anläggningar och rivs i anslutning till rivning av O3. Återställning av samtliga anläggningsplatser sker omkring 2050–2055 och på ett sådant sätt och i sådan omfattning att annan industriell verksamhet kan etableras.



Figur 16-3. Vy över OKG:s kärnkraftverk med de tre BWR-reaktorerna O1, O2 och O3 från vänster till höger i bild.

Avveckling av reaktoranläggningar i Oskarshamn



Figur 16-4. Principiell översikt av OKG:s tidsplan för avveckling (O0 är gemensamma anläggningar som redovisas separat).

17 Planering för avveckling inom Vattenfall

I detta kapitel beskrivs Vattenfalls avvecklingsplanering på en övergripande nivå. Planerna gäller därmed såväl Ågestareaktorn som reaktorerna i Forsmark och Ringhals.

Under avställningsdriften planeras förutom bränsletransporter, avställning av system och omhändertagande av driftavfall även förberedande aktiviteter inför nedmontering och rivning att genomföras. Dessa förberedande aktiviteter, exempelvis dekontaminering av primärsystem, syftar till att göra efterföljande arbete så säkert och effektivt som möjligt. Detta åstadkoms bland annat genom att sänka dosraten vid arbete och vistelse i anläggningen och genom att öka möjligheterna till flexibilitet under nedmonteringen genom att flytta moment från tidskritisk linje (moment som påverkar slutdatum på projektet). En möjlighet är även att omhänderta vissa icke radioaktiva eller lågaktiva system såsom turbin- och generatorsystem för att optimera avfallshanteringen inför det att nedmontering och rivning påbörjas i stor skala.

Avvecklingsprogrammets organisation kommer att ha som uppgift att planera och verkställa de olika ingående projekten där kontrakterade entreprenörer används som huvudsaklig arbetskraft under genomförandefasen. Målsättningen med detta är att programorganisationen ska kunna hållas liten och effektiv.

För att få ett effektivt genomförande av avvecklingsprogrammen ska förutsättningar och omfattning vara väl definierade på förhand. Tiden för nedmontering och rivning ska optimeras utifrån förutsättningar att avvecklingen påbörjas utan dröjsmål efter avställning med en sammanhållen genomförandefas. Detta innebär att servicedrift ska minimeras samt att nedmontering och rivning pågår tills anläggningens beslutade sluttillstånd uppnåtts.

Genomförandet under nedmonteringen och rivningen kommer att delas upp i ett lämpligt antal avgränsade paket/etapper. För att uppnå effektivitet planeras nedmonterings- och rivningsaktiviteter i möjligaste mån att pågå parallellt i hela anläggningen. Planeringen av arbetsmomentens genomförande och inbördes kronologi kommer under hela avvecklingen att optimeras utifrån Alara och bästa möjliga teknik för att minimera dos och maximera effektivitet.

SKB:s ägarbolag har sedan Fud-program 2016 ändrat den strategiska inriktningen avseende utformningen av det utbyggda SFR, vilket medför konsekvenser för omhändertagandet av reaktortankar från kokvattenreaktorerna. Den uppdaterade strategin innebär att reaktortankarna från Vattenfalls BWR-anläggningar kommer att segmenteras på plats i anläggningen. Segmenteringen av interndelarna sker med vattentäckning i hanteringsbassängen. Beroende på slutligt val av metod kan segmenteringen ske mekaniskt (exempelvis sågning, klippning, vattenskärning) alternativt termiskt (exempelvis plasmaskärning, laserskärning, gnistning) och liknande. För Ringhals 2, som är en tryckvattenreaktor, finns ett inriktningsbeslut om segmentering av både tank och interndelar. Såväl interndelar som tank innehåller tillräckligt höga halter av långlivade radionuklider för att avfallet ska behöva slutförvaras i SFL. Då SFL öppnas först 2045 underlättar segmentering den långa tidsperiod av mellanlagring som måste ske lokalt på Ringhals fram till dess att avfallet kan omhändertas av SKB.

En avgörande skillnad från driften av en anläggning är den betydligt större mängd avfall som uppstår under avvecklingen. Detta gör att kapaciteten för hantering av vissa avfallsströmmar måste öka väsentligt under avvecklingen för att inte hindra framdriften i projektet. Kapacitetsökningen kan uppnås på flera olika sätt om så krävs, bland annat genom att anpassa befintliga byggnader för avfallshantering eller andra lokaler som inte behövs efter avställningen. Nya byggnader kan även behöva uppföras eller mobila lösningar införas på kärnkraftverket för att klara av kapacitetsbehoven.

Generellt gäller att avfallshanteringen ska vara motiverad och effektiv. Detta uppnås genom att klassificera avfallet innan det genereras och sortera det direkt vid uppkomst. Bearbetning av kärnavfall ska minimeras och i möjligaste mån genomföras i anslutning till avfallsets uppkomst. Skapande av sekundäravfall ska vara motiverad, i annat fall undvikas. Stora komponenter ska kunna deponeras hela där detta är motiverat ur ett kostnads- och säkerhetsperspektiv. Tidskrävande avfallsbearbetning genomförs enbart om det sker med säkerställd nytta.

Avfallshanteringen inklusive mellanlagring och slutförvaring ska optimeras ur ett sammanhållet drift- och avvecklingsperspektiv på koncernnivå. Olika avfallsscenarioer analyseras inom koncernen där markförvar är ett deponeringsalternativ men även andra bortskaffningsalternativ analyseras. Utgångspunkten är att utöka kapacitet för omhändertagande av avfallet där det bäst lämpar sig ur ett koncernperspektiv.

Avvecklingsprogrammets framdrift ska till rimlig nivå göras oberoende av avfallsbehandlings-, avfallstransport- och färdiga slutförvarskapaciteter. För transport ska SKB:s transportsystem primärt nyttjas, men programmen är inte exklusivt bundna till detta. Koordinering av framför allt bränsletransporter ska ske på koncernnivå med målet att minimera påverkan på avvecklingsprogrammen.

Uppskattningsvis utgör den konventionella avfallsströmmen cirka 95 procent av den totala avfallsmängden. Majoriteten av detta avfall utgörs av rivningsmassor från byggnader. För att minimera kraven på efterhantering av avfallet sker dekontaminering av byggnader inför rivning. För de rivningsmassor som uppstår till följd av systemdemontering etableras ett friklassningsförfarande i linje med befintlig friklassningshandbok (Berglund et al. 2016).

Sluttillståndet för avvecklingen är friklassad industritomt. Sluttillstånd för respektive avvecklingsprogram kan dock vara friklassningsbar industritomt där byggnader och infrastruktur som är av nytta för fortsatt verksamhet, och som är möjliga att friklassa utan att de rivs, lämnas medan övriga installationer rivs. Friklassningen kan hanteras via ett separat projekt eller av linjeverksamhet beroende på vad som är optimalt för respektive anläggning. Den konventionella byggnadsrivningen sker till cirka en meter under mark och kvarvarande hålrum återfylls med rivningsmassor. Det översta marklagret återställs till den status som den fortsatta industriella verksamheten på platsen kräver.

17.1 Ringhals AB:s planering för avveckling

Ringhals kärnkraftverk är beläget på Väröhalvön inom Varbergs kommun i Hallands län. Verket har fyra reaktorer varav Ringhals 1 (R1) är av reaktortypen BWR och Ringhals 2 (R2), Ringhals 3 (R3) och Ringhals 4 (R4) är av reaktortypen PWR. Förutom R1–R4 finns inom området även gemensamma byggnader och faciliteter för avfallshantering, kontor, verkstäder, förråd, tillfartsvägar med mera, och upptar totalt 2,5 kvadratkilometer, se figur 17-1.



Figur 17-1. Ringhals kärnkraftverk med reaktor 1 och 2 till höger i figur och reaktor 3 och 4 till vänster. I centrum av förlägningsplatsen finns bland annat kontorslokaler och lunchrestaurang. Strax ovanför R1 i bilden syns verkets avfallsområde vilket inkluderar hantering, konditionering och lagring av kärnavfall.

Ringhals 1 och 2 byggdes under 1970-talet och placerades inom ett gemensamt driftområde. Under 1980-talet byggdes Ringhals 3 och 4, vilka förlades till ett driftområde som ursprungligen var skilt från R1 och R2 men som senare länkades ihop med desamma via en transportväg. Detta ger goda förutsättningar för att åter separera blockparen och möjliggöra parallell drift och avveckling inom olika driftområden efter slutlig avställning av R1 och R2.

Området är stort då det ursprungligen var tänkt för ytterligare ett antal reaktorer. Detta gör att ytor finns tillgängliga för exempelvis tillfällig lagring av avfall och möjlighet till olika transportvägar på området vilket möjliggör en effektiv logistik. Avvecklingen av R1 och R2 underlättas även rent avfallslogistiskt av att den befintliga avfallsanläggningen är placerad intill R1.

I omedelbar närhet av förlägningsplatsen ligger Videbergs hamn som används för transport av bland annat bränsle och avfall.

Övergripande planering

Avvecklingen av reaktorerna i Ringhals återges i två avvecklingsplaner, en för R1 och R2 och en för R3 och R4. Dessa avvecklingsplaner bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras i inledningen av kapitlet. Ringhals AB (RAB) planerar för drift av reaktorerna R1 och R2 till slutet av 2020 respektive slutet av 2019. Detta grundar sig på beslut som fattades under 2015 att R1 och R2 tas ur drift tidigare än planerat. För reaktorerna R3 och R4 kvarstår planeringsförutsättningarna om drift till 2041 respektive 2043. Avställningsdriften bedöms i dagsläget pågå under cirka 18 månader för R1 och cirka 26 månader för R2, då kylbehov och kapacitet för bränsletransport beaktats.

I december 2015 inleddes arbetet med att planera nedmontering och rivning av Ringhals 1 och 2, i dag samlat i ett program kallat R12D. Fokus hittills har varit att analysera de tekniska, legala, tidsmässiga samt affärsmässiga förutsättningarna för avvecklingen samt att i detalj utvärdera hur de specifika momenten under avvecklingen ska lösas på bästa sätt. Detta inkluderar analys av bland annat rivningsmetodik, organisation och avfallshantering. Vidare planeras att minska dosraten i anläggningen, genom en så kallad systemdekontaminering. I avvecklingsplanen beskrivs de aktiviteter som analyseras eller genomförs under de olika programfaserna.

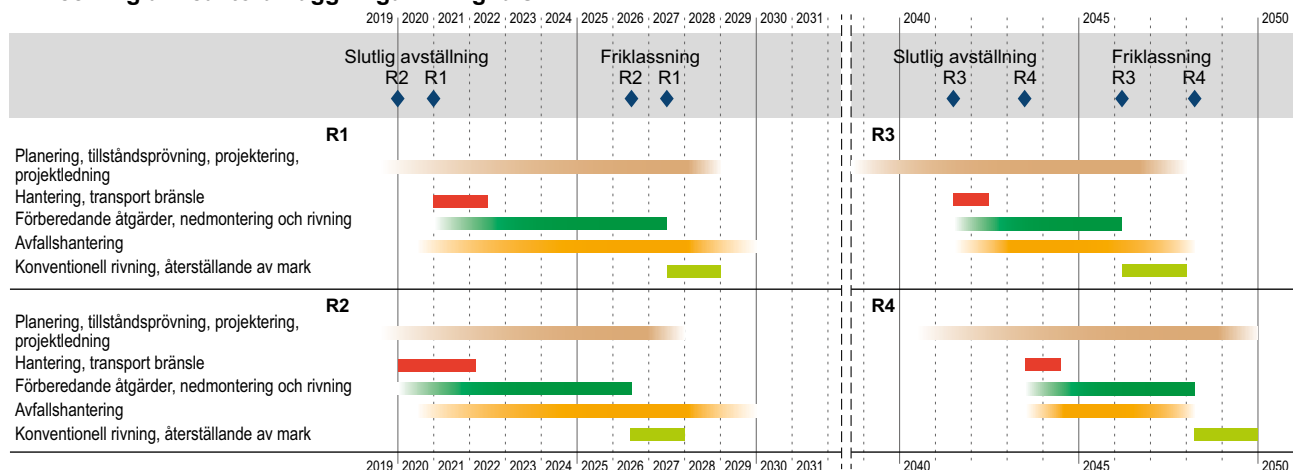
Under 2018 har Ringhals AB erhållit tillstånd enligt miljöbalken för slutlig avställning samt servicedrift av Ringhals 1 och 2, och har därefter även lämnat in ansökan om ändringstillstånd där reaktorerna tillåts övergå från avställningsdrift och servicedrift till fullständig nedmontering och rivning.

I samband med avställningsbeslutet för Ringhals 1 och Ringhals 2 startades även projekt Sture, Säker och Trygg Utfasning av Reactorer 1 och 2, på Ringhals som syftar till att identifiera, analysera och genomföra åtgärder som krävs för att Ringhals 3 och 4 ska kunna drivas vidare när Ringhals 1 och 2 avvecklas. Projektet ska bland annat se till att blockparet som ska drivas vidare fysiskt separeras från det som ska avvecklas (Projekt Split), ombesörja bränslebortförel från sista härdarna samt dränera system och forsla bort driftavfall. Projektet kommer också att se till att åtgärder under avställningsdriften genomförs. Exempel på sådana åtgärder är bland annat systemdekontaminering efter slutlig avställning och övriga förberedande aktiviteter som behövs inför nedmontering och rivning. Under våren 2019 lämnade Vattenfall AB in en ansökan om överföring av de kärntekniska tillstånden för Ringhals 1 och 2 från Ringhals AB till Vattenfall AB. Planeringen är att tillstånden förs över efter genomförd avställningsdrift. Ringhals AB har skickat in en avsiktsförklaring till SSM som redogör för bolagets åtgärder för att förbereda för en flytt av dessa tillstånd.

Ett nära samarbete sker mellan projekt Sture och program R12D under förberedelsearbetet och under genomförandet av avställningsdrift inklusive de förberedande åtgärderna.

I figur 17-2 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Ringhals kärnkraftverk.

Avveckling av reaktorläggningar i Ringhals



Figur 17-2. Principiell översikt av Ringhals AB:s tidsplan för avveckling.

Avfallshantering

Eftersom slutlig avställning av R1 och R2 inträffar vid en tidpunkt då utbyggda SFR ännu inte har tagits i drift krävs mellanlagring av det radioaktiva avfallet som uppstår. Detta kan ske lokalt på Ringhals kärnkraftverk och/eller externt. Genom mellanlagring på kärnkraftverket minimeras de externa beroendena kopplat till avfallshanteringen vilket gör att detta alternativ är förstahandsvalet för de flesta avfallsströmmar. Bedömningen är att mellanlagring på kärnkraftverket kan ske i befintlig infrastruktur, det vill säga inga nya mellanlager planeras.

Reaktortanksegment från R1 kan på grund av det relativt ringa aktivitetsinnehållet deponeras i SFR. De mest neutronaktiverade interndelarna segmenteras och paketeras för mellanlagring inför framtida deponering i SFL. Interndelar som befunnit sig en bit från härdregionen såsom fuktavskiljare och ångseparator planeras att segmenteras och deponeras i SFR.

Reaktortankarna och interndelarna hos R2, R3 och R4 behöver till följd av sin kraftigare aktivering deponeras i SFL. För R2 finns ett inriktningsbeslut om att segmentera tank och interndelar, för Ringhals 3 och 4 är sluthanteringen ännu inte beslutad. Mellanlagring sker på Ringhals till dess att SFR är utbyggt respektive SFL tagits i drift.

17.2 Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling

Forsmarks kraftstation är belägen på ostkusten, cirka fyra kilometer norr om Forsmarks bruk, och inom Östhammars kommun i Uppsala län. Inom anläggningen finns tre kärnkraftsreaktorer, Forsmark 1 (F1), Forsmark 2 (F2) och Forsmark 3 (F3), se figur 17-3. Till kraftverket hör även byggnader för tillfälligt boende, förråds- och verkstadsbyggnader och administrationsbyggnader. En hamn finns anlagd som bland annat används av fartyg för transport av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall till SKB:s anläggningar.

F1 och F2 är sammanbyggda anläggningar medan F3 ligger fristående placerat nordväst om dessa. Gemensamma anläggningar såsom tillfartsväg, hamn, vatten- och avloppsreningsverk, vattentorn och administrationsbyggnader utnyttjas av samtliga tre reaktorblock samt av SFR. Områdets utrymme ger goda förutsättningar för parallell drift och avveckling. Stora ytor finns även tillgängliga för buffertlagring och för etablering av olika transportalternativ.



Figur 17-3. Forsmarks kraftstation med de tre BWR-reaktorerna F1, F2 och F3 från vänster till höger i bild.

Övergripande planering

Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA) planerar för 60 års drift för var och en av de tre reaktorerna vilket innebär slutlig avställning för F1 år 2040, F2 år 2041 och F3 år 2045. Vid slutlig avställning inleds avställningsdrift vars längd i största mån ska minimeras, vilket i dagsläget bedöms vara cirka 12 månader.

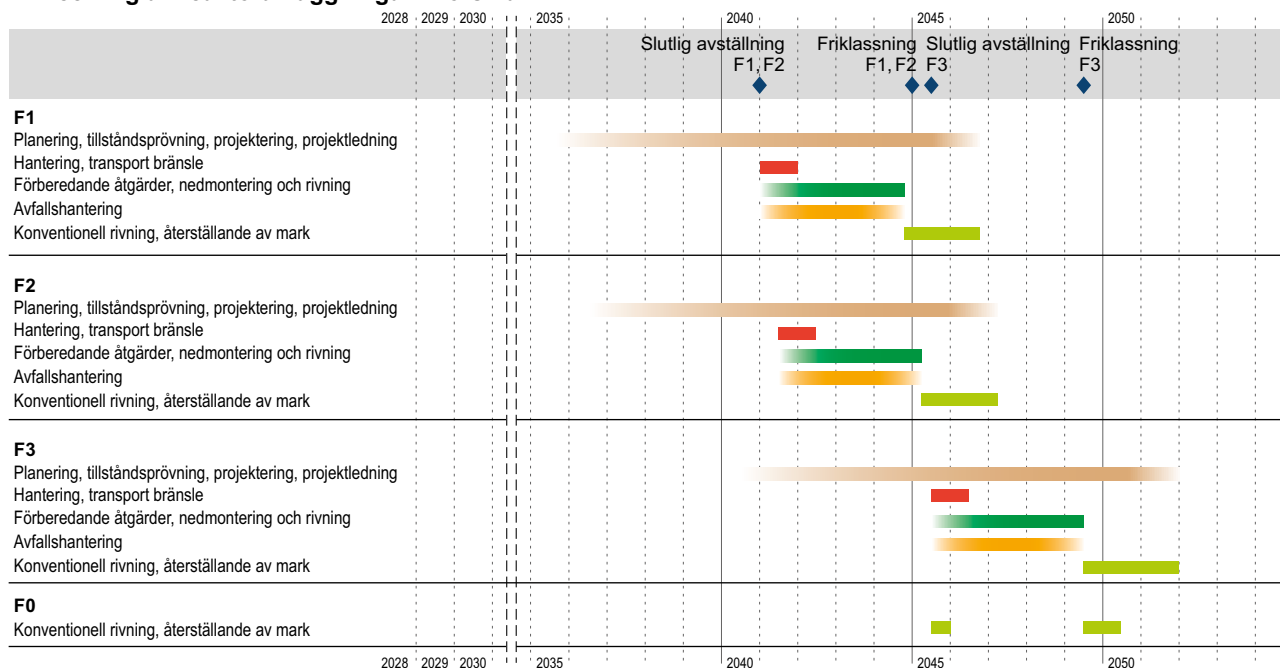
Avvecklingen av F1, F2 och F3 återges i avvecklingsplanen och bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras inledningsvis i kapitel 17. F1 och F2 förväntas komma att nedmonteras och rivas på ett sätt som maximerar synergivinster och minimerar behovet av anläggningsseparation alternativt servicedrift. I slutet av avvecklingsprojekten för F1 och F2 etableras avställningsdrift på F3 vilket gör att avveckling förväntas pågå på området utan uppehåll från starten av det första projektet till dess att den sista reaktorn slutligt nedmonterats. I figur 17-4 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Forsmarks kärnkraftverk.

Grundplaneringen utgår från att SFR är i drift vid tidpunkten för nedmontering och rivning av Forsmarks anläggningar vilket innebär att behovet av mellanlagring kan begränsas till det långlivade avfallet som ska deponeras i SFL. Det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet skickas direkt efter emballering till SFR.

Avfallshantering

När nedmontering och rivning startas 2040 förväntas SFR vara utbyggt och SFL vara nära driftsättning. Detta innebär att det kan bli nödvändigt med mellanlagring av avfall som ska till SFL under en begränsad tid.

Avveckling av reaktorläggningar i Forsmark



Figur 17-4. Principiell översikt av Forsmarks Kraftgrupp AB:s tidsplan för avveckling (F0 är gemensamma anläggningar som redovisas separat).

Ett antal avfallsströmmar planeras användas efter avställning. Bränsle kommer att transporteras till Clink och sedan vidare till Kärnbränsleförvaret. Övrigt avfall kommer att sorteras upp i kortlivat avfall och långlivat avfall (till SFL), det kortlivade avfallet som inte kan friklassas kommer sedan att sorteras upp beroende på aktivitetsinnehåll och deponeras i markförvar eller i SFR.

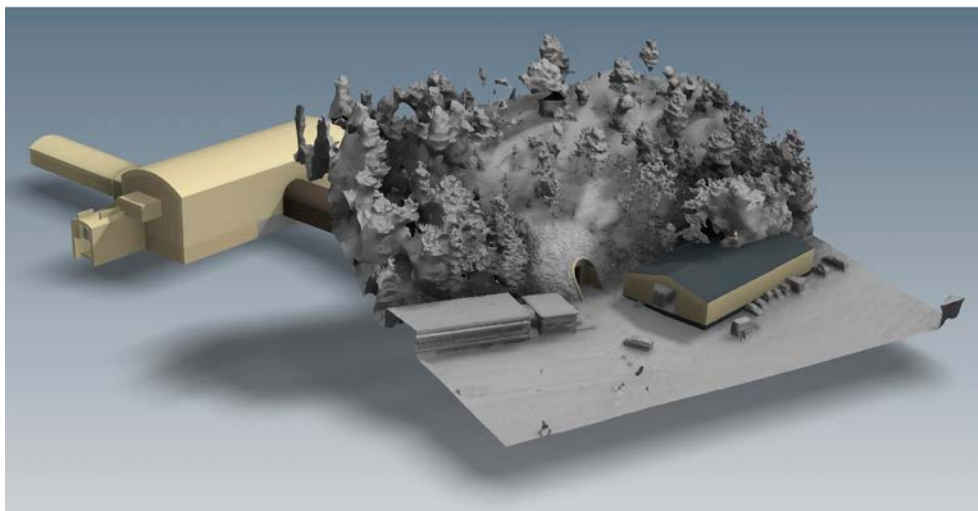
Reaktortankarna från F1–F3 med dess interndelar kommer att segmenteras, vissa interndelar såsom fuktavskiljare, ångseparator och reaktortank planeras att deponeras i SFR och vissa interndelar såsom härdgaller, härdinstrumentering, delar av moderatortank, moderatortanklock och patron-uppställningsplatta planeras att deponeras i SFL.

17.3 Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn

Ågestaanläggningen, som är lokaliserad cirka 20 kilometer söder om Stockholm, i Huddinge kommun, Stockholms län, var den första kommersiellt elproducerande kärnkraftsanläggningen i Sverige. Ågestareaktorn var en tungvattenmodererad PWR-reaktor på 80 MW som dels försörjde Farsta med fjärrvärme, dels elnätet med 10–12 MW el.

Själva reaktorn, och ett flertal andra viktiga anläggningsdelar, är förlagda i ett bergtrum, se figur 17-5. Bergtrummet fungerade tillsammans med ett plåtskal som inneslutning. Reaktortanken och de två återstående ånggeneratorerna är belägna inuti inneslutningen. Inne i bergtrummet, men utanför plåtskalet, ligger kontrollrummet, kontroll- och ställverksbyggnad, samt transporttunnel och reservutgång.

Till följd av att Ågestaanläggningen är inrymd i ett bergtrum är utrymme och möjligheter begränsade för att hantera och mellanlagra avfall på plats. Ågestas lokalisering gör att alla transporter måste ske med landtransport, med ett eventuellt undantag för reaktortanken som initialt också måste nyttja landtransport men därefter möjligen med fartyg. Lokaliseringen nära tätbebyggt område gör dessutom att de biltransporter som måste genomföras kommer att påverka närboende och närliggande anläggningar i viss grad.



Figur 17-5. 3D-vy över Ågestareaktorn som är inrymd i ett bergum.

Övergripande planering

Vattenfall har valt att genomföra avvecklingen av Ågesta i programform. Ett program består av ett flertal sammankopplade projekt och utredningar. Arbetsspaketen kompletterar varandra i syfte att successivt uppnå ett långsiktigt effektmål. Arbetsspaketen i Vattenfalls avvecklingsprogram för Ågesta är bland annat framtagande av tillståndsdokumentation, upphandling av rivningsentreprenader, kartläggning och karaktärisering av anläggningen. Samtliga definierbara arbetsspaketen kompletterar varandra i syfte att nå programmets effektmål: en säker och effektiv avveckling. Programmet styrs av Business Unit Nuclear Decommissioning, BUND, där en del av personalen hyrs in från AB SVAFO.

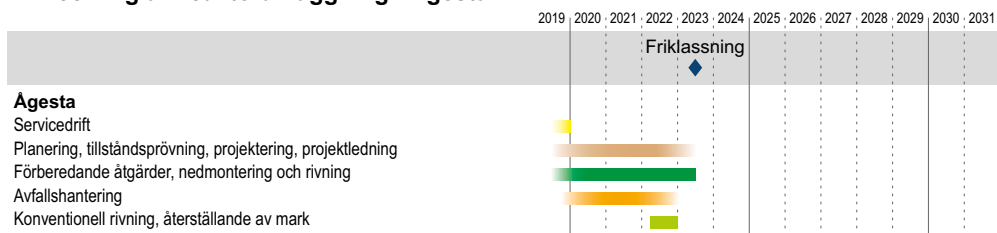
Vattenfalls slutmål är att avlägsna radioaktivt material så att anläggningen, det vill säga berggrummet, turbinhallen, mark och underjordsanläggningar kan friklassas och det kärntekniska tillståndet kan upphävas.

Nuvarande miljötillstånd för den pågående servicedriften av Ågestareaktorn löper ut 2020. Under 2018 har samtliga ansökningshandlingar som krävs för ansökan om miljötillstånd, miljökonsekvensbeskrivning och samrådsprocess lämnats in till Mark- och miljödomstolen. Inriktningen är att nödvändiga tillstånd och godkännanden enligt miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen finns på plats under senare delen av 2019. Figur 17-6 återger tidsplanen för den planerade avvecklingen av Ågestareaktorn.

Nedmontering och rivning inleds efter att alla tillstånd erhållits och när arbetet kan påbörjas med hänsyn tagen till den tid som krävs för förberedande åtgärder. Arbetet delas upp i två större delmoment, segmentering av reaktortank på plats i Ågesta samt nedmontering av övriga kontaminerade system, komponenter och strukturer. Arbetsinsatserna inom de två delmomenten kommer till stor del att kunna utföras samtidigt då de inte stör varandra med avseende på logistik, bemanning, stråldoser etcetera. Möjligheten till att använda kompetens och resurser samt erfarenheter på ett effektivt sätt kan också nyttjas optimalt i och med att personal finns tillgänglig i anläggningen för ett flertal arbeten.

Reaktortanken i Ågesta planeras att segmenteras på plats. I delmomentet ingår arbetsinsatser som borttagning av isolering och sanering av asbest, packning av avfall i standardavfallsbehållare samt avsökning och transport till Studsvik för mellanlagring alternativt vidare hantering hos Cyclife Sweden AB.

Avveckling av reaktorläggning i Ågesta



Figur 17-6. Principiell översikt av tidsplanen för den planerade avvecklingen av Ågestareaktorn.

Avfallshantering

De olika avfallsströmmar som kommer att genereras i samband med nedmontering och rivning av Ågestareaktorn har bestämts och för varje avfallsström har olika hanteringssteg identifierats fram till slutlig friklassning eller deponering via något av de deponeringsalternativ som finns. Planen är att transportera bort avfallet från området till mellanlagring i AB SVAFO:s anläggningar i Studsvik i avvaktan på drifttagna slutförvar.

18 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar

SKB:s anläggningar är bland de sista kärntekniska anläggningarna att avvecklas i Sverige och avvecklingen ligger långt fram. Avvecklingsplaneringen beskrivs av den anledningen väldigt övergripande och hänvisar till befintliga avvecklingsplaner för mer detaljerad information.

18.1 Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

SKB är tillståndshavare för Clab och kommer även fortsättningsvis att vara det när integreringen av den planerade inkapslingsdelen är klar och anläggningen i stället benämns Clink. Avvecklingsplanen för Clink uppdaterades under 2013 i samband med hanteringen av kompletteringar gällande tillståndsansökan för Clink. En uppdatering kommer att ske igen i samband med framtagandet av PSAR för anläggningen under Fud-perioden. Clink kommer att avvecklas när allt använt kärnbränsle kapslats in och deponerats i Kärnbränsleförvaret. Tidsplanen är beroende av när den sista kärnkraftsreaktorn tas ur drift. Enligt nuvarande planering kan avvecklingen av Clink inledas omkring 2065 och vara avslutad inom fem till sju år.

Under arbetet med att ta fram avvecklingsplanen för Clink har det inte framkommit något motiv till att avvecklingen skulle bli mer komplicerad än för övriga kärntekniska anläggningar vars avveckling ligger närmare i tiden. Nedmonteringen och rivningen bör kunna genomföras med låg dos till personal och mängden kort- och långlivat radioaktivt avfall som uppstår beräknas bli begränsad. Avfallet från nedmontering och rivning ska enligt gällande planer skickas till SFR för slutförvaring.

Målet med avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och återställa Clink till en friklassad anläggning. Detta innebär att byggnader inklusive all utrustning och mark ska friklassas.

SKB tog under 2013 fram en studie för avveckling av Clink i syfte att ge underlag till utbyggnaden av SFR gällande avfallsinventarium samt som kostnadsuppskattning för planarbetet (Edelborg et al. 2014).

Under 2016 uppdaterade SKB avvecklingsplanen för Clab. Uppdateringen genomfördes för att harmonisera med gällande föreskrifter från SSM samt att följa den gemensamma strukturen för en avvecklingsplan (Calderon 2014).

18.2 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SKB tog under 2012–2013, inför ansökan enligt kärntekniklagen för utbyggnaden av SFR, fram en ny avvecklingsplan för anläggningen (Calderon 2013).

Avvecklingen av SFR påbörjas när den huvudsakliga verksamheten upphör med syfte att inte återupptas. Avvecklingen fortsätter, till dess att anläggningen ovan mark är friklassad och radiologiska skäl inte förhindrar etablering av annan industriell verksamhet på platsen. De anläggningsdelar som kan bli föremål för rivning i samband med avveckling (ovanmarksdelarna) betraktas som konventionella då de inte innehåller något radioaktivt material. En radiologisk kartläggning av anläggningen kommer att behöva göras för att utesluta eventuell kontaminering av byggnadsdelar som varit i kontakt med avfallsbehållare under drift, exempelvis terminalbyggnaden. Målet med avvecklingen är att enligt definition uppnå en friklassad anläggning. Hur långt rivningen ska bedrivas beror därefter främst på den fortsatta användningen av anläggningsområdet.

Tidsplanen för när SFR ska avvecklas är kopplad till när de sista, nu befintliga, kärnkraftverken och SKB:s övriga kärntekniska anläggningar är demonterade och friklassade. Med nuvarande planering kan avvecklingen av SFR inledas i slutet av 2060-talet.

SKB tog under 2018, inför den återkommande helhetsbedömningen och redovisningen av anläggningens säkerhet och strålskydd, fram en ny avvecklingsplan för befintligt SFR (Calderon 2018). Uppdateringen skedde även för att harmonisera med gällande föreskrifter från SSM samt för att följa den branschgemensamma strukturen för en avvecklingsplan.

SKB planerar att under Fud-perioden uppdatera avvecklingsplanen för utbyggt SFR. Uppdateringen genomförs i samband med framtagandet av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) för anläggningen.

18.3 Slutförvaret för långlivat avfall

Ingen avvecklingsplan finns ännu framtagen för SFL, eftersom utformningen av detta slutförvar befinner sig på konceptstadiet. En avvecklingsplan planeras att tas fram i samband med F-PSAR för anläggningen. Avvecklingen kommer att inledas i samband med förslutning av förvaret vilket beräknas ske i mitten av 2050-talet, se avsnitt 3.3.4.

18.4 Kärnbränsleförvaret

En avvecklingsplan för Kärnbränsleförvaret togs initialt fram för ansökningarna enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet (Hallberg och Tiberg 2010).

En uppdatering av avvecklingsplanen utarbetades under 2017. Uppdateringen genomfördes för att harmonisera med gällande föreskrifter samt för att följa den branschgemensamma strukturen för en avvecklingsplan.

Avvecklingen vidtar efter det att den huvudsakliga driften avslutats, det vill säga när allt använt kärnbränsle deponerats och deponeringstunnlarna återfyllts och pluggats. Avvecklingen innebär förslutning av återstående delar av undermarksdelen och rivning av ovanmarksdelen. Förslutningen av undermarksdelarna är en del av förvarets barriärfunktion och av betydelse för säkerheten efter förslutning. SKB:s arbete med förslutning beskrivs i avsnitt 11.8.1.

När avvecklingen startar kommer det inte att finnas någon kontamination i anläggningen. Rivningen utförs därför som för en konventionell anläggning. Det konventionella avfallet sorteras och återvinns i möjligaste mån, eller läggs på deponi. Farligt avfall hanteras enligt gällande bestämmelser. Därefter genomförs en markundersökning som ligger till grund för efterbehandling av området.

19 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

I detta kapitel ges en översikt av det genomförda och planerade utvecklingsarbetet som rör avveckling av kärntekniska anläggningar. I avsnitt 19.1 presenteras genomförda och planerade industrigemensamma utvecklingsarbeten. I avsnitt 19.2 och 19.3 presenteras genomförda och planerade utvecklingsarbeten inom Uniper respektive Vattenfall.

19.1 Industrigemensamt utvecklingsarbete

Det industrigemensamma utvecklingsarbetet rörande avveckling av kärntekniska anläggningar bedrivs i stor utsträckning av SKB gemensamt med kärnkraftsföretagen. Flera av aktiviteterna beskrivs därför mer i detalj i del I och del II, se hänvisningar.

19.1.1 Långlivat avfall

Nuläge

För att kunna friklassa Barsebäckverket efter genomförd avveckling har intresse funnits att undvika mellanlagring under lång tid av kärnavfall på anläggningen. Under den gångna Fud-perioden har möjligheten att mellanlagra avfallet i SFR till dess att SFL tas i drift analyserats. Slutsatsen av analysen är att mellanlagring inte ska ske i SFR utan måste ske lokalt hos kraftverken alternativt externt. Mellanlagring av långlivat avfall beskrivs även i avsnitt 3.3.4.

Innan slutlig konditionering av långlivat avfall kan genomföras behöver acceptanskriterier för avfallet fastställas. Under den gångna Fud-perioden har en säkerhetsvärdering av det föreslagna slutförvarskonceptet för SFL genomförts. Säkerhetsvärderingen utgör underlag och förutsättningar för utvecklingen av acceptanskriterier. Arbete med att utveckla preliminära acceptanskriterier kommer att fortsätta under Fud-perioden, se även avsnitt 3.3.4.

De kraftbolag som påbörjat segmentering av interndelar och varit i behov av att lagra långlivat avfall har under den gångna Fud-perioden arbetat med att ta fram typbeskrivningsspecifikationer (TBS). TBS:er för avfallstyperna B100 och O100, på BKAB respektive OKG, har tagits fram och ett ställningstagande från SKB har erhållits. Ställningstagandet medger att avfallskollin kan tillverkas under förutsättning att avfallet inte slutkonditioneras.

Program

En stor del av det långlivade avfallet från kärnkraftverken kommer att uppstå innan den planerade driftsättningen av SFL. Detta betyder att tillräckliga planeringsförutsättningar behöver fastläggas i samband med kärnkraftverkens projektplanering för avveckling, för att minimera risken att behöva omkonditionera avfallet efter att det har placerats i mellanlager. Den pågående planeringen av SFL ger viktiga förutsättningar för kärnkraftverkens avvecklingsplanering.

19.1.2 Hantering av BWR-reaktortankar och stora komponenter

Under 2017 fattade Vattenfall och Uniper beslut om att inte deponera hela BWR-reaktortankar i SFR utan att dessa ska segmenteras innan deponering.

Ett arbete under Fud-perioden har, utifrån beslutet att segmentera BWR-reaktortankarna till SFR, varit att optimera hanteringskedjan av BWR-reaktortankarna från hantering på den kärntekniska anläggningen till slutdeponering i SFR. Arbetet har identifierat möjliga avfallsbehållare för tillståndshavarna att tillämpa för avfall till bergssalen för reaktortankar (BRT) i utbyggt SFR.

19.1.3 Utveckling av betongkonstruktioner och material till SFL

SKB har under den gångna Fud-perioden genomfört en utredning rörande val av material och metod för grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av bergssalen för hårdkomponenter med

betong, se vidare avsnitt 10.3. SKB har även låtit genomföra en studie rörande interaktioner mellan cement och bentonit för den föreslagna utformningen av bergssalen för historiskt avfall (BHA) i SFL, se vidare avsnitt 10.1.5.

Givet de långa tidsperioder som återstår till uppförande av SFL ser SKB i dagsläget inget behov av ett särskilt experimentellt utvecklingsprogram för utformning av material och teknik för uppförande av betongkonstruktioner och återfyllnad av SFL.

19.1.4 Mycket lågaktivt avfall

De senaste åren har miljöfrågorna fått ökat fokus inom branschen och flera utvecklings- och förbättringsarbeten kopplade till mycket lågaktivt avfall har genomförts hos avfallsproducenterna. Åtgärderna syftar dels till att bättre följa avfallshierarkin genom ett ökat fokus på förebyggande åtgärder, återanvändning och återvinning, dels till förbättrad långsiktig säkerhet. Branschen har även arbetat för en utökad dialog med myndigheter och andra intressenter. För att optimera förutsättningarna att fortsättningsvis kunna utveckla hanteringen av mycket lågaktivt avfall på bästa sätt krävs flera olika insatser vilket beskrivs i avsnitt 3.2.

19.1.5 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

Arbete har bedrivits för att utveckla avfallsbehållare samt transportbehållare för att möjliggöra en optimal hantering av avfallet under nedmontering och rivning. Detta arbete beskrivs i avsnitt 7.5.

Program

ATB 1T, som under avvecklingsprojekten kommer att användas för transport av ståltankar är under utveckling i samarbete med amerikanska Holtec. Den nya avfallstransportbehållaren planeras att certifieras och driftsättas till 2020, se avsnitt 7.5.3.

En förutsättning för att kunna transportera kärnavfallet från kärnkraftverken till slutförvaren är att det finns tillämpliga avfallstransportbehållare. Ett arbete med att identifiera huruvida SKB:s transportsystem behöver kompletteras med ytterligare avfallstransportbehållare avses påbörjas under Fud-perioden.

19.1.6 Icke-reguljära bränslen

En förutsättning för att kunna påbörja nedmontering och rivning i ett avvecklingsprojekt är att anläggningen är fri från gammalt bränsle. Detta inkluderar skadat bränsle som finns i anläggningen. Under Fud-perioden har ett projekt, med målsättningen att omhänderta allt skadat bränsle vid anläggningarna, pågått.

Projektet har omhändertagit och tömt Oskarshamnsreaktorerna O1 och O2 på allt skadat bränsle. Det skadade bränslet har transporterats till Studsvik för behandling varefter hittills en delmängd har kapslats in i speciella behållare (så kallade transportboxar) och transporterats till Clab för mellanlagring. I samband med att skadat bränsle skickas till Studsvik kommer studier av utvalda bitar av det skadade bränslet att initieras under Fud-perioden, se avsnitt 8.1.

I Ringhals har skadat bränsle omhändertagits från reaktorerna R2, R3 och R4 och placerats i fem specialutformade behållare (så kallade Quivers). Tre av dessa Quivers har förslutits och är redo för transport till Clab för mellanlagring. I och med det är R2 tömd på skadat bränsle. R3 och R4 har vardera en Quiver vilka har lämnats kvar öppna i syfte att omhänderta skadade bränslestavar i framtiden. Ringhals 1 tömdes på skadat bränsle under ett pilotprojekt innan projekt Skadat bränsle startades.

I Forsmark har ett antal skadade bränslestavar omhändertagits från reaktorerna F1 och F2 med hjälp av Quivers.

Med introduktionen av Quivers har SKB etablerat en ny, praktisk, säker och långsiktigt kostnads-effektiv metod för att omhänderta skadade bränslestavar på kärnkraftverken, se även avsnitt 8.3.

Program

Under Fud-perioden kommer projektet Skadat bränsle att fullföljas med de kvarstående huvudsakliga uppgifterna. Det omfattar bland annat att:

- Omhändertar skadade bränslestavar på Oskarshamn 3 och Forsmark 3 med hjälp av de specialutformade behållarna Quivers.
- Omhändertar skadade bränslestavar från Forsmark 2 och 3 med hjälp av de specialutformade behållarna transportboxar.
- Transportera fyllda Quivers från Ringhals, Forsmark och Oskarshamn till Clab samt transportera fyllda transportboxar från Studsvik till Clab.

19.1.7 Harmoniserad tillståndsprocess

En grundläggande förutsättning för att kunna genomföra de planerade avvecklingsprojekten är att kravställda tillstånd erhålls. Då flera avvecklingsprojekt planeras att genomföras parallellt, och det är av vikt att milstolpar nås inom utsatt tid, finns en nytta av att samtliga tillståndshavare tillsammans med berörda instanser har en enhetlig process.

Under den gångna Fud-perioden har arbete skett inom ett antal områden för att erhålla en harmoniserad tillståndsprocess. Arbete har främst bedrivits via Kärnkraftsindustrins säkerhetskoordineringsgrupp (KSKG) och framtagande av gemensamma ställningstaganden, så kallade position papers (KPP). KPP har tagits fram inom följande områden:

- Säkerhetsredovisning under avveckling av en kärnteknisk anläggning – övergripande krav och innehåll.
- Principer för kategorisering av extremt liten risk för radioaktiv förorening (ELR).
- Delmoment.
- Kontrollprogram för friklassning.

Program

Arbete med att inom prioriterade frågor hitta gemensamma arbetssätt mellan tillståndshavarna kommer att fortgå under Fud-perioden. Exempel på områden där behov finns att komma fram till gemensamma förhållningssätt och arbetsprocesser inom industrin är:

- Metodik och samsyn för utarbetandet av acceptanskriterier (waste acceptance criteria), typbeskrivningar och typbeskrivningsspecifikationer WAC/TB/TBS för utbyggda slutförvarsdelar och rivningsavfall.
- Avvecklingsrapport/arkivering inför upphörande av tillstånd enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen.

19.1.8 IT-stöd för avvecklingsdokumentation

Under den gångna Fud-perioden har SKB inlett en dialog med tillståndshavarna för att samordna arbetet med radiologisk kartläggning och karakterisering av rivningsavfall för de tillståndshavare som står i begrepp att inleda nedmontering och rivning av kraftproducerande reaktorer.

Program

Den information som behövs för karakterisering av rivningsavfall kommer i vissa avseenden att skilja sig från den information som kravställs för driftavfall. För rivningsavfallet kommer information om radionuklid- och materialsammansättning i hög grad baseras på resultat från den radiologiska kartläggning som genomförs innan avfallet uppstår. Det blir således viktigt att dokumentera information som gör det möjligt att spåra avfall i enskilda kollin till information som tagits fram under radiologisk kartläggning. SKB arbetar för att kunna ta emot kartläggningsinformation och uppdaterade prognoser för rivningsavfall för att på så sätt utarbeta ett lämpligt format för ett framtida avfallsregister för rivningsavfall, se även avsnitt 7.2.1.

19.1.9 Internationellt utvecklingsarbete

Under perioden har SKB och kärnkraftsföretagen bevakat och deltagit i det internationella utvecklingsarbetet som pågår inom avveckling och teknik för nedmontering och rivning.

Det huvudsakliga utbytet sker inom OECD/NEA:s samarbetsprogram men även IAEA:s program är av vikt. Det sistnämnda fokuserar i högre grad på utvecklingen av IAEA:s Safety Standards som ligger till grund för medlemsländernas kravbild.

Inom OECD/NEA har arbetet inom området för avveckling intensifierats i och med att världens första generation av kommersiella reaktorer närmar sig slutet av sin livslängd. Ett fokusområde som OECD/NEA har arbetat med under perioden är hur hanteringen av mycket lågaktivt avfall och friklassningsbart material under avveckling av kärntekniska anläggningar kan optimeras.

Ett samarbete mellan den svenska kärnkraftsindustrin och spanska Enresa startade under Fud-perioden i syfte att utbyta erfarenheter och kunskap gällande avveckling av kärntekniska anläggningar.

Program

SKB och kärnkraftsföretagen kommer även fortsättningsvis att delta i de internationella nätverken inom avveckling, vilka ger såväl nytta som möjlighet att bidra med erfarenheter. Det finns förutsättningar till ett djupare utbyte i fortsättningen då flertalet avvecklingsprojekt har startats i Sverige. Mer erfarenhet byggs då upp inom landet och behovet att inhämta information ökar.

Exempelvis kommer deltagande att ske inom OECD/NEA och CDLM (Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management). Då CDLM är nystartad finns möjlighet att påverka utvecklingen inom de områden som CDLM kommer att bedriva arbete.

Samarbetet och kunskapsutbytet mellan Enresa och den svenska kärnkraftsindustrin kommer även det att fortgå under Fud-perioden.

19.1.10 Metodutveckling för svärmätbara nuklider

Program

Inom ramen för den radiologiska kartläggningen, som genomförs inför nedmontering och rivning, kommer modeller för radiologiska beräkningar att uppdateras. Vidare kommer de mätningar som genomförs inom den radiologiska kartläggningen att användas för att verifiera beräknade resultat och för att eventuellt omarbeta beräkningsmodellerna. Ett uppdaterat inventarium för svärmätbara nuklider i rivningsavfallet kan därefter bestämmas från beräknade och uppmätta värden. SKB för kontinuerlig dialog med tillståndshavarna för att säkerställa att den information som tas fram under radiologisk kartläggning kan nyttjas för karaktärisering av det rivningsavfall som avses deponeras i SFR eller SFL, se även avsnitt 7.2.2.

19.2 Utveckling inom Uniper

Project Performance Center (PPC) etablerades 2017 med uppdraget att koordinera Unipers avvecklingsportfölj. PPC har hittills fokuserat på olika scenarier för avveckling med avseende på tidpunkt för genomförandet och hur dessa scenarier förhåller sig till teknisk sekvens, organisation, avfallshantering och finansiering. Arbetet har föranlett ett förordat alternativ där avvecklingsprogrammen för B1/B2 och O1/O2 sker med en kritisk linje som ligger sekventiellt mellan anläggningarna.

Barsebäck Kraft AB

BKAB har utifrån samarbetet med OKG utvecklat avvecklingsplaneringen avseende nedmontering, radiologisk kartläggning, avfallshantering och mellanlagring, organisation och styrning. Detta beskrivs i den kompletterade avvecklingsplanen, avfallsplanen och SAR för nedmontering och rivning.

Exempel på genomförda aktiviteter:

- Reaktortankens interna delar är segmenterade på B1 och B2. Avfallet förvaras i lokalt mellanlager. Planering för extern mellanlagring fortgår.
- Objekt (byggnader eller del av) som kategoriserats som extremt liten risk för förorening har kartlagts och verifierats.
- Fördjupad radiologisk kartläggning av material pågår med syfte att adressera avfallet till lämpligaste avbördningsväg.
- Typbeskrivningsspecifikationer har tagits fram för rivningsavfall.
- Teknik och process för hantering av det radiologiska avfallet har fastställts.

OKG Aktiebolag

Anpassningar av anläggningarna och separationsåtgärder fortgår. Det intensiva planeringsarbetet som initierades inför föregående Fud-period har fortsatt. Ett flertal utredningar har genomförts både på strategisk och på taktisk nivå, i vissa fall med tillhörande genomförande av faktiska aktiviteter i anläggningarna. Detaljerna för detta framgår av OKG:s avvecklingsplanering som redovisats i samband med de tillståndsprövningar som hållits och kan sammanfattas enligt nedan:

- Det finns en dedikerad avdelning för avveckling (avdelning A) av OKG:s anläggningar. Avdelningen etablerades under hösten 2016. Avdelningens utformning har varit flexibel baserat på de huvudsakliga aktiviteterna och anpassats därefter. Anpassningar av organisationen kommer också att fortgå.
- Det strategiska arbetet och den övergripande avvecklingsplaneringen har fortsatt och kommer också att fortsätta. Arbetet sker i samarbete med BKAB inom ramen för förutsättningarna för PPC.
- Arbetet med tillståndshantering har fortgått och samtliga tillstånd för start av nedmontering och rivning har erhållits avseende O1, O2 inklusive OAVF.
- Faktiska fysiska aktiviteter utgörs exempelvis av:
 - Anläggningarna har tömts på bränsle.
 - Kartläggning av anläggningarna i form av karaktärisering och kategorisering av material. Kartläggningen har därefter fortsatt med byggnader och byggnadsdelar.
 - Reaktortankarnas interna delar har segmenterats på O2 och därefter på O1 (pågår för O1).
 - Fullsystem-dekontaminering har genomförts på O2. Planering pågår för genomförande på O1.
 - Flertal anpassningar av anläggningarna samt separationsåtgärder har genomförts och kommer att fortgå.

Program

Utvecklingsbehovet bedöms i princip vara detsamma för både BKAB och OKG, där fokus ligger på att fortsätta anpassningen till processen för avveckling och därefter vidareutveckling av denna process. De huvudsakliga aktiviteterna utgörs av:

- Det strategiska arbetet kommer att fortgå under avvecklingen men med förändrat fokus till förankring, implementering och uppföljning.
- Den tidigare övergripande planeringen övergår successivt till projektering och detaljprojektering och därefter till genomförande, allt eftersom den tekniska sekvensen fortskrider.
- Vidareutveckling av avvecklingens olika funktionella delprocesser – material- och avfallshantering, nedmontering och rivning, drift och underhåll samt skydd och säkerhet. Det kan exempelvis omfatta utveckling och optimering av kartläggning av anläggningarna, markförvar, mellanlager, friklassning, logistik etcetera.
- Anpassning och utveckling av organisation och ledningssystem kommer att fortgå.
- Framtagning av en lättillgänglig och funktionell erfarenhetsåterföring mellan BKAB och OKG för att uppnå läroeffekter inom den tekniska sekvensen, samt avseende långsiktig erfarenhetsåterföring till avvecklingen av O3 och O0.

19.3 Utveckling inom Vattenfall

Vattenfall har fattat strategiskt beslut om att all avveckling ska samordnas inom Vattenfallkoncernen genom affärsområdet BUND. Det skapar förutsättningar för synergieffekter mellan i dag pågående avvecklingsarbete, R2-reaktorn i Studsviksområdet, till kommande avveckling av Ågesta och Ringhals 1 och Ringhals 2. Dessutom skapas förutsättningar för utveckling och samordning mellan avvecklingen i Tyskland och Sverige.

Sedan föregående Fud-program har organisationen och styrningen byggts upp och ett ledningssystem finns implementerat i organisationen. Vidare har olika samverkansformer/projekt inom koncernen skapats som stöd för ledning och styrning, exempelvis:

- Strategiskt forum för kompetens och bemanningsfrågor. Målet är att utarbeta bästa möjliga lösningar för de kommande årens behov av kompetenser inom drift och avveckling.
- I samband med avställningsbeslutet för Ringhals 1 och 2 startades projekt Sture (Säker och Trygg Utfasning av Reaktor 1 och 2). Frånsett fysiska separeringsåtgärder ansvarade Sture även för den tillståndsprocess som krävs för att kunna ställa av Ringhals 1 och Ringhals 2. Detta tillstånd erhöles under 2018.

Vattenfall har även tagit fram ett utbildningsprogram tillsammans med KSU kallat "Avveckling grund". Syftet med utbildningen är att stärka kompetensen inom organisationen samt ge en gemensam plattform för avvecklingsfrågor.

Vidare har Vattenfall utvecklat avvecklingskoncept både tekniskt och kommersiellt samt beslutat att avvecklingen av Ågesta och Ringhals ska genomföras i programform. Den strategiska inriktningen för programmen är också beslutad.

Program

En stor del av utvecklingsarbetet inom Vattenfallkoncernen kommer att genomföras som en integrerad del av programmen inför och under avvecklingen av Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågesta. Inför nedmonterings- och rivningsfasen av Ringhals 1 och Ringhals 2 kommer det, under den kommande treårsperioden, exempelvis bedrivas en hel del avfallsförberedande utredningsarbete. Följande områden kommer vara särskilt angelägna att utreda:

- Friklassning (av system, byggnader och mark), inklusive dekontaminering och mätsystem.
- Interntransporter samt mellan- och avklingningslagring.
- Avfallsprocessoptimering.
- Emballage- och konditioneringsoptimering.
- Volymoptimering och slutförvarskopplingar (mycket lågaktivt, kortlivat och långlivat avfall).

Utöver avfallsrelaterade frågeställningar planeras även en rad övriga utvecklingsaktiviteter, såsom:

- Utveckla kostnadsmodellen för att beräkna och värdera kostnader för avveckling av kärnteknisk anläggning. Planen är att modellen ska redovisa risker och osäkerheter samt ge möjlighet att utföra känslighetsanalyser.
- Vidareutveckla och anpassa portfölj-, program- och projektprocessen. Detta syftar bland annat till att säkerställa att avvecklingsaktiviteterna optimeras såväl vad gäller tid och tempo som att det faktiska arbetet genomförs säkert och effektivt.
- Vidareutveckla ledningssystemet för att säkerställa en funktionell styrning av avvecklingsaktiviteterna så att arbetet alltid kan ske säkert och effektivt.
- Inom alla relevanta områden inhämta externa och interna erfarenheter och anpassa dessa till avvecklingsverksamhet och därigenom etablera best practice. Här är även erfarenheter utanför den kärntekniska sektorn av intresse, inte minst vad gäller säkerhet och arbetsmiljö under rivning.

- Som ett led i att se till att tillräckligt med resurser med rätt kompetens finns tillgänglig inom Vattenfall för att kunna fullfölja den planerade verksamheten för att omhänderta avfallet kommer en strategisk kompetensplan att utarbetas. Häri ingår även den organiska uppbyggnaden av kompetens; avvecklingskompetens och erfarenheter som erhållits inom koncernen vid avvecklingen av R2-reaktorn i Studsvik ska kunna överföras till avvecklingen av Ågesta och Ringhals 1 och Ringhals 2.

Under den efterföljande treårsperioden kommer den planerade avvecklingen av Ågesta vara färdigställd, och avvecklingen av Ringhals 1 och 2 vara under genomförande. Utvecklingsbehoven för den perioden kommer därmed vara starkt knutna till de erfarenheter som gjorts under avvecklingen av Ågesta, samt de behov som identifierats under den slutliga planeringsfasen av avvecklingen av Ringhals 1 och 2.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Aalto P, Aaltonen I, Ahokas H, J Andersson, Hakala M, Hellä P, Hudson J, Johansson E, Kempainen K, Koskinen L, Laaksoharju M, Lahti M, Lindgren S, Mustonen A, Pedersen K, Pitkänen P, Poteri A, Snellman M, Ylä-Mella M, 2009. Programme for repository host rock characterisation in the ONKALO (ReRoC). Posiva Working Report 2009-31, Posiva Oy, Finland.

Abarca E, Sampietro D, Miret M, von Schenck H, 2016a. Initial modelling of the near-field hydrogeology. Exploring the influence of host rock characteristics and barrier properties. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-16-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Abarca E, Sampietro D, Roman-Ross G, Molinero J, Lidman F, Kautsky U, 2016b. Reactive transport model of Uranium mobility in the riparian zone. I Proceedings of the 2nd International Conference in Radioecological Processes, Sevilla, Spain, 6–9 November 2016.

Abarca E, Sáinz-García A, Sampietro D, García D, Molinero J, Saetre P, Kautsky U, 2017. Impact of transport pathways in radium accumulation under groundwater discharge areas. Poster at the 16th International Conference on the Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere – Migration 2017, Barcelona, Spain, 10–15 September 2017.

Abarca E, Sampietro D, Molinero J, von Schenck H, 2019. Modelling of the near-field hydrogeology – temperate climate conditions. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aghili B, Sederholm B, Ahlström J, Trägårdh J, 2014. Korrosionsprovning av ingjutna stålstänger i betongblock och ingjutna bergbultar. Fem års exponering i Äspölaboratoriet. SKB R-14-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlbom K, Leijon B, Liedholm M, Smellie J, 1992. Gabbro as a host rock for a nuclear waste repository. SKB TR 92-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlford K, 2019. Mätning av Tc-99 och I-129 i reaktorvatten med ICPMS. SKBdoc 1706378 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahmed E, Parducchi L, Unneberg P, Ågren R, Schenk F, Rattray J E, Han L, Muschitiello F, Pedersen M W, Smittenberg R H, Yamoah K A, Slotte T, Wohlfarth B, 2018. Archaeal community successions in Late glacial lake sediments: evidence from ancient DNA. Quaternary Science Reviews 181, 19–29.

Alonso U, Missana T, García Gutiérrez M, Morejón J, Mingarro M, Fernández A M, 2019. CIEMAT studies within POSKBAR project. Bentonite expansion, sedimentation and erosion in artificial fractures. SKB TR-19-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson E, 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson-Östling H C M, Sandström R, 2009. Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. SKB TR-09-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson-Östling H C M, Hagström J, Danielsson M, 2018. Phosphorus in copper intended for spent nuclear fuel disposal. SKB R-17-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Appleyard P, Jackson P, Joyce S, Hartley L, 2018. Conditioning discrete fracture network models on intersection, connectivity and flow data. SKB R-17-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aquilonius K (red), 2010. The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aromaa H, Helariutta K, Ikonen J, Yli-Kaila M, Koskinen L, Siitari-Kauppi M, 2018. Analysis of ^3H , ^{36}Cl , ^{133}Ba , ^{134}Cs and ^{22}Na from synthetic granitic groundwater: an in situ through diffusion experiment at ONKALO. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 318, 1161–1169.

- Arvidsson A, Josefsson P, Eriksson P, Sandén T, Ojala M, 2015.** System design of backfill. Project results. SKB TR-14-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Babaahmadi A, 2015.** Durability of cementitious materials in the long-term contact with water. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Backers T, 2005.** Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading. Doktorsavh. Potsdam: GeoForschungsZentrum. (Scientific Technical Report STR; 05/05)
- Backers T, Stephansson O, 2012.** ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45, 1011–1022.
- Bagger A, Arán-Ais R M, Halldin Stenlid J, Campos dos Santos E, Arnarson L, Degn Jensen K, Escudero Escribano M, Roldan Cuyena B, Rossmeisl J, 2019.** Ab initio cyclic voltammetry on Cu(111), Cu(100) and Cu(110) in acidic, neutral and alkaline solutions. *ChemPhysChem*. doi:10.1002/cphc.201900509
- Bastviken D, Svensson T, Sandén P, Kylin H, 2013.** Chlorine cycling and fates of ³⁶Cl in terrestrial environments. SKB TR-13-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bastviken D, Sundgren I, Natchimuthu S, Reyier H, Gålfalk M, 2015.** Technical Note: Cost-efficient approaches to measure carbon dioxide (CO₂) fluxes and concentrations in terrestrial and aquatic environments using mini loggers. *Biogeosciences* 12, 3849–3859.
- Bauhn L, 2018.** The interaction of dissolved hydrogen with α -radiolytic oxidants during nuclear fuel dissolution. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Bauhn L, Ekberg C, Fors P, Spahiu K, 2017.** The effect of bromide on oxygen yields in homogeneous α -radiolysis. *MRS Advances* 2, 711–716.
- Bauhn L, Hansson N, Ekberg C, Fors P, Delville R, Spahiu K, 2018a.** The interaction of molecular hydrogen with α -radiolytic oxidants on a (U,Pu)O₂ surface. *Journal of Nuclear Materials* 505, 54–61.
- Bauhn L, Hansson N, Ekberg C, Fors P, Spahiu K, 2018b.** The fate of hydroxyl radicals produced during H₂O₂ decomposition on a SIMFUEL surface in the presence of dissolved hydrogen. *Journal of Nuclear Materials* 507, 38–43.
- Baxter S, Appleyard P, Hartley L, Hoek J, Williams T, 2018.** Exploring conditioned simulations of discrete fracture networks in support of hydraulic acceptance of deposition holes. Application to the ONKALO demonstration area. Posiva SKB report 07, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Becker R, Öijerholm J, 2017.** Slow strain rate testing of copper in sulfide rich chloride containing deoxygenated water at 90°C. Report SSM 2017:02, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Bengtsson A, Edlund J, Hallbeck B, Heed C, Pedersen K, 2015.** Microbial sulphide-producing activity in MX-80 bentonite at 1750 and 2000 kg m⁻³ wet density. SKB R-15-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bengtsson A, Blom A, Hallbeck B, Heed C, Johansson L, Stahlén J, Pedersen K, 2017a.** Microbial sulphide-producing activity in water saturated MX-80, Asha and Calcigel bentonite at wet densities from 1500 to 2000 kg m⁻³. SKB TR-16-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bengtsson A, Blom A, Johansson L, Taborowski T, Eriksson L, Pedersen K, 2017b.** Bacterial sulphide-producing activity in water saturated iron-rich Rokle and iron-poor Gaomiaozi bentonite at wet densities from 1750 to 1950 kg m⁻³. SKB TR-17-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Beresford N A, Wood M D, Vives i Batlle J, Yankovich T L, Bradshaw C, Willey N, 2016.** Making the most of what we have: application of extrapolation approaches in radioecological wildlife transfer models. *Journal of Environmental Radioactivity* 151, 373–386.
- Berglund J-Å, De la Gardie F, Herschend B, Lorenz H, 2016.** Friklassning vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. SKB R-16-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Berglund S, Lindborg T (red), 2017.** Monitoring Forsmark – evaluation and recommendations for programme update. SKB TR-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Berglund S, Bosson E, Sassner M, 2013. From site data to safety assessment – Analysis of present and future hydrological conditions at a coastal site in Sweden. *Ambio* 42, 425–434.

Betova I, Bojinov M, Lilja C, 2018. Hydrogen generation during interaction of oxide covered copper with deoxygenated aqueous solution. *Electrochimica Acta* 274, 143–151.

Bhaskaran G, Carcea A, Ulaganathan J, Wang S, Huang Y, Newman R C, 2013. Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept. SKB TR-12-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Birgersson M, Goudarzi R, 2017. Summary report on “sauna” effects. SKB TR-17-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Birgersson M, Goudarzi R, 2018. Investigations of gas evolution in an unsaturated KBS-3 repository. SKB TR-18-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Björck M, Taxén C, Vuoristo T, Elger R, Zavalis T, Wikström L, Sparr M, 2019. Embedded oxide particles in Friction Stir Welds. Effect on creep and corrosion properties. Posiva SKB Report 10, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Björkbacka Å, 2015. Radiation induced corrosion of copper. Doktorsavh. KTH.

Björkbacka Å, Johnson C M, Leygraf C, Jonsson M, 2016. Role of the oxide layer in radiation-induced corrosion of copper in anoxic water. *The Journal of Physical Chemistry C* 120, 11450–11455.

Björkbacka Å, Johnson C M, Leygraf C, Jonsson M, 2017. Radiation induced corrosion of copper in humid air and argon atmospheres. *Journal of The Electrochemical Society* 164, C201–C206.

Björkblad A, Faleskog J, 2018. Evaluation of Cu-OFP Creep crack growth and theoretical fracture models for Cu-OFP. Posiva SKB Report 03, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bodén A, Pettersson S, 2011. Development of rock bolt grout and shotcrete for rock support and corrosion of steel in low-pH cementitious materials. SKB R-11-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bodén A, Sievänen U, 2005. Low-pH injection grout for deep repositories. Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). SKB R-05-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bodin J, 2003. Sänksmide: material, konstruktionsanvisningar, tillverkning, användning. Mölndal: IVF.

Brandefelt J, Näslund J-O, Zhang Q, Hartikainen J, 2013. The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years. SKB TR-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bring A, Fedorova I, Dibike Y, Hinzman L, Mård J, Mernild S H, Prowse T, Semenova O, Stuefer S L, Woo M-K, 2016. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121, 621–649.

Brydsten L, Strömgren M, 2010. A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Brydsten L, Strömgren M, 2013. Landscape development in the Forsmark area from the past into the future (8500 BC – 40,000 AD). SKB R-13-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Byegård J, Hakami E, Hjerne C, Nordqvist R, Cvetkovic V, Drake H, Tullborg E-L, Winberg A, 2017. TRUE-1 Completion. Final report. SKB TR-12-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bym T, Hermanson J, 2018. Methods and workflow for geometric and hydraulic conditioning. DFN-R – status report 2013–2015. SKB R-17-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Böðvarsson R, 2012. Swedish National Seismic Network (SNSN). A short report on recorded earthquakes during the fourth quarter of the year 2011. SKB P-12-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Böðvarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006. Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Börgesson L, Hernelind J, 2017.** Modelling of the mechanical interaction between the buffer and the backfill in KBS-3V. Modelling results 2015. SKB TR-16-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Sandén T, Dueck A, Andersson L, Jensen V, Nilsson U, Olsson S, Åkesson M, Kristensson O, Svensson U, 2015.** Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes. EVA Project. SKB TR-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Åkesson M, Birgersson M, Hökmark H, Hernelind J, 2016a.** EBS TF – THM modelling. BM 1 – Small scale laboratory tests. SKB TR-13-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Åkesson M, Kristensson O, Dueck A, Hernelind J, 2016b.** EBS TF – THM modelling. BM 2 – Large scale field tests. SKB TR-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hedström M, Birgersson M, Karnland O, 2018.** Bentonite swelling into fractures at conditions above the critical coagulation concentration. SKB TR-17-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Calderon M, 2013.** Avvecklingsplan för ett utbyggt SFR. Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall. SKB P-13-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Calderon M, 2014.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar ”guideline” SKBdoc 1416378 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Calderon M, 2018.** Avvecklingsplan för SFR. SKBdoc 1579139 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederqvist L, Garpinger O, Nielsen I, 2018.** Evaluation of depth controller for friction stir welding of copper canisters. Posiva SKB Report 08, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chan T, Christiansson R, Boulton G S, Ericsson L O, Hartikainen J, Jensen M R, Mas Ivars D, Stanchell F W, Vistrand P, Wallroth T, 2005.** DECOVALEX III BMT3/BENCHPAR WP4: The thermo-hydro-mechanical responses to a glacial cycle and their potential implications for deep geological disposal of nuclear fuel waste in a fractured crystalline rock mass. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, 805–827.
- Chen J, Qin Z, Martino T, Shoesmith D W, 2017a.** Effect of chloride on Cu corrosion in anaerobic sulphide solutions. Corrosion Engineering, Science and Technology 52, 40–44.
- Chen J, Qin Z, Martino T, Shoesmith D W, 2017b.** Non-uniform film growth and micro/macro-galvanic corrosion of copper in aqueous sulphide solutions containing chloride. Corrosion Science 114, 72–78.
- Chen J, Behazin M, Binns J, Birch K, Boyle C, Freire-Canosa J, Cheema G, Crowe R, Doyle D, Garisto F, Giallonardo J, Gobien M, Guo R, Hobbs M, Hunt N, Ion M, Jensen M, Keech P, Kremer E, Lam T, Lawrence C, Leung H, Liyanage T, McKelvie J, Medri C, Mielcarek M, Kennell-Morrison L, A Murchison, Parmenter A, Stahmer U, Sui Y, Sykes E, Yang T, Zhang X, 2018a.** Technical program for long-term management of Canada’s used nuclear fuel – Annual report 2017. NWMO-TR-2018-01, Nuclear Waste Management Organisation, Kanada.
- Chen J, Qin Z, Martino T, Guo M, Shoesmith D W, 2018b.** Copper transport and sulphide sequestration during copper corrosion in anaerobic aqueous sulphide solutions. Corrosion Science 131, 245–251.
- Chen J, Guo M, Martino T, Ramamurthy S, Noël J J, Shoesmith D W, Lilja C, Johansson A J, 2019.** The distribution of corrosion damage to copper surfaces exposed to aqueous sulphide solutions. SKBdoc 1706406 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chen S, Wang P, Zhang D, 2014.** Corrosion behaviour of copper under biofilm of sulfate-reducing bacteria. Corrosion Science 87, 407–415.
- Christiansson R, Janson T, 2003.** A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 1161–1172.
- Chukharkina A, Blom A, Pedersen K, 2016a.** Microbial sulphide production during consumption of H₂ and organic compounds released from stationary borehole equipment. SKB R-16-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Chukharkina A, Blom A, Pedersen K, 2016b.** Release of H₂ and organic compounds from metallic and polymeric materials used to construct stationary borehole equipment. SKB R-16-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Claesson Liljedahl L, Kontula A, Harper J, Näslund J-O, Selroos J-O, Pitkänen P, Puigdomenech I, Hobbs M, Follin S, Hirschorn S, Jansson P, Kennell L, Marcos N, Ruskeeniemi T, Tullborg E-L, Vidstrand P, 2016.** The Greenland Analogue Project: Final report. SKB TR-14-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Clark P U, Shakun J D, Marcott S A, Mix A C, Eby M, Kulp S, Levermann A, Milne G A, Pfister P L, Santer B D, Schrag D P, Solomon S, Stocker T F, Strauss B H, Weaver A J, Winkelmann R, Archer D, Bard E, Goldner A, Lambeck K, Pierrehumbert R T, Plattner G-K, 2016.** Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Climate Change* 6, 360–369.
- Cleveland C, Moghaddam S, Orazem M E, 2014.** Nanometer-scale corrosion of copper in de-aerated deionized water. *Journal of The Electrochemical Society* 161, C107–C114.
- Cleveland C, Orazem M E, Moghaddam S, 2016.** Response to “Comment on Nanometer-Scale Corrosion of Copper in De-Aerated Deionized Water” [*J. Electrochem. Soc.*, 161, C107 (2014)]. *Journal of the Electrochemical Society* 163, Y5–Y11.
- Colleoni F, Wekerle C, Masina S, 2014.** Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark – estimate of maximum ice sheet thicknesses. SKB TR-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Colleoni F, Wekerle C, Näslund J-O, Brandefelt J, Masina S, 2016.** Constraint on the penultimate glacial maximum Northern Hemisphere ice topography (~140 kyrs BP). *Quaternary Science Reviews* 137, 97–112.
- Corkhill C L, Bailey D J, Tocino F Y, Stennett M C, Miller J A, Provis J L, Travis K P, Hyatt N C, 2016.** Role of microstructure and surface defects on the dissolution kinetics of CeO₂, a UO₂ fuel analogue. *ACS Applied materials & Interfaces* 8, 10562–10571.
- Cosgrove J, Stanfors R, Röshoff K, 2006.** Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. SKB R-06-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, Löfgren M, 2019.** Modelling of radionuclide retention by matrix diffusion in a layered rock model. SKB R-17-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- CROCK, 2013.** Collaborative Project “Crystalline ROCK retention processes”, EURATOM EC 7th Framework Program. KIT Scientific Report 7656: Final Workshop Proceedings, Karlsruhe, Germany, 2013.
- Cronstrand P, 2007.** Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cronstrand P, 2016.** Long-term performance of the bentonite barrier in the SFR silo. SKB TR-15-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cvetković B Z, Salazar G, Kunz D, Tits J, Szidat S, Wieland E, 2018.** Quantification of dissolved organic carbon-14-containing compounds by accelerator mass spectrometry in a corrosion experiment with irradiated steel. *Radiocarbon* 60, 1711–1727.
- Dahlqvist R, Andersson K, Ingri J, Larsson T, Stolpe B, Turner D, 2007.** Temporal variations of colloidal carrier phases and associated trace elements in a boreal river. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 5339–5354.
- Damjanac B, Fairhurst C, 2010.** Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 513–531.
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, Hammer C U, Hvidberg C S, Steffensen J P, Sveinbjörnsdóttir A E, Jouzel J, Bond G, 1993.** Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220.
- Darcel C, Le Goc R, Davy P, 2015.** ONKALO POSE experiment – Effective elastic properties of fractured rocks. Posiva Working Report 2015-17, Posiva Oy, Finland.

Darcel C, Davy P, Le Goc R, Mas Ivars D, 2018. Rock mass effective properties from a DFN approach. I Proceedings of the 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Seattle, Washington, 20–22 June 2018. American Rock Mechanics Association.

Dario M, Molera M, Allard B, 2004. Effect of organic ligands on the sorption of europium on TiO₂ and cement at high pH. SKB TR-04-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Davis J R (red), 2001. Copper and copper alloys. Materials Park, OH: ASM International.

Davy P, Le Goc R, Darcel C, Bour O, de Dreuzy J R, Munier R, 2010. A likely universal model of fracture scaling and its consequence for crustal hydromechanics. *Journal of Geophysical Research* 115. doi:10.1029/2009jb007043

Davy P, Le Goc R, Darcel C, 2013. A model of fracture nucleation, growth and arrest, and consequences for fracture density and scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118, 1393–1407.

Davy P, Darcel C, Le Goc R, Mas Ivars D, 2018a. Elastic properties of fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 6521–6539.

Davy P, Darcel C, Le Goc R, Munier R, Selroos J-O, Mas Ivars D, 2018b. DFN, why, how and what for, concepts, theories and issues. I Proceedings of the 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Seattle, Washington, 20–22 June 2018. American Rock Mechanics Association.

Delandar A H, Haghghat S M H, Korzhavyi P, Sandström R, 2016. Dislocation dynamics modeling of plastic deformation in single-crystal copper at high strain rates. *International Journal of Materials Research* 107. doi:10.3139/146.111433

Delandar A H, Gorbatov O I, Selleby M, Gornostyrev Y N, Korzhavyi P A, 2018a. *Ab-initio* based search for late blooming phase compositions in iron alloys. *Journal of Nuclear Materials* 509, 225–236.

Delandar A H, Sandström R, Korzhavyi P, 2018b. The role of glide during creep of copper at low temperatures. *Metals* 8, 772. doi:10.3390/met8100772

Denfeld B A, Ricão Canelhas M, Weyhenmeyer G A, Bertilsson S, Eiler A, Bastviken D, 2016. Constraints on methane oxidation in ice-covered boreal lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121, 1924–1933.

Dessirier B, Frampton A, Jarsjö J, 2017. Two-phase flows during re-saturation of sparsely fractured bedrock and bentonite around canisters for deep storage of spent nuclear fuel. Modelling Task 8 of SKB Task Forces GWFTS and EBS. SKB P-17-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Dong C, Mao F, Gao S, Sharifi-Asl S, Lu P, Macdonald D D, 2016. Passivity breakdown on copper: influence of temperature. *Journal of The Electrochemical Society* 163, C707–C717.

Doolaege D, Davy P, Darcel C, Le Goc R, Selroos J-O, 2019. Characterization of the spatial distribution of clogging in fracture networks from core-log data, and impact on network connectivity from DFN modelling. EGU General Assembly 2019, EGU2019–16360.

Dou W, Jia R, Jin P, Liu J, Chen S, Gu T, 2018. Investigation of the mechanism and characteristics of copper corrosion by sulfate reducing bacteria. *Corrosion Science* 144, 237–248.

Drake H, Suksi J, Tullborg E-L, Lahaye Y, 2017. Quaternary redox transition in deep crystalline rock fractures at the western margin of the Greenland ice sheet. *Applied Geochemistry* 76, 196–209.

Drake H, Mathurin F, Zack T, Schäfer T, Roberts N, Whitehouse M, Karlsson A, Broman C, Åström M, 2018. Incorporation of metals into calcite in a deep anoxic granite aquifer. *Environmental Science & Technology* 52, 493–502.

Dueck A, Goudarzi R, Börgesson L, 2016. Buffer homogenisation. Status report 3. SKB TR-16-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Dueck A, Börgesson L, Kristensson O, Malmberg D, Åkesson M, Hernelind J, 2019. Bentonite homogenisation lab and modelling. SKB TR-19-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Duro L, Grivé M, Gaona X, Bruno J, Andersson T, Borén H, Dario M, Allard B, Hagberg J, Källström K, 2012.** Study of the effect of the fibre mass UP2 degradation products on radionuclide mobilisation. SKB R-12-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dvinskikh S, Szabó Z, Wold S, 2016.** To what extent is organic waste degrading in high pH water of Äspö type? KTH. SKBdoc 1570764 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ebrahimi H, Trincherro P, Molinero J, de Vries L M, 2018.** User's manual of iDP version 3.2. SKB P-15-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Edelborg M, Anunti Å, Oliver L, Lundkvist N, Leveau N, 2014.** Decommissioning study of Clink. SKB R-13-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eiler A, Löfgren A, Hjerne O, Nordén S, Saetre P, 2018.** Environmental DNA (eDNA) detects the pool frog (*Pelophylax lessonae*) at times when traditional monitoring methods are insensitive. Scientific Reports 8, 5452.
- Elfving M, 2017.** Komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR – avfallskollin och kringgjutning i 1BMA och 2BMA. SKBdoc 1571075 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Elfving M, Evins L Z, Gontier M, Graham P, Mårtensson P, Tunbrant S, 2013.** SFL concept study. Main report. SKB TR-13-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Elfving M, Lundin M, von Schenck H, 2017.** Vidareutvecklad utformning av förvaringsutrymmet 2BMA i utbyggd del av SFR. SKBdoc 1569813 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson M, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engman C, 2018.** FEM analysis of the mechanical integrity for the canister intended for storage of spent nuclear fuel with regard to copper creep ductility. Report 2018:17, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Enzell J, Malm R, 2019.** Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Project summary and evaluation of the final results. SKB TR-18-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson B, 1981.** Den "potentiella" evapotranspirationen i Sverige. Norrköping: SMHI. (SMHI rapporter, RMK 28)
- Eriksson D, Bultmark F, Andersson H, 2015.** Gasevakuering genom betongbarriär i 2BMA. SKBdoc 1409731 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2017.** Compaction properties of bentonite clay. SKB TR-16-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Esaki T, Du S, Mitani Y, Ikusada K, Jing L, 1999.** Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, 641–650.
- Fenton C H, Adams J, Halchuk S, 2006.** Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. Geotechnical and Geological Engineering 24, 579–592.
- Fidalgo A B, 2017.** Experimental studies of radiation-induced dissolution of UO₂: The effect of intrinsic solid phase properties and external factors. Doktorsavh. KTH.
- Fidalgo A B, Jonsson M, 2016.** Can H₂ enhance the oxidative dissolution of UO₂? Journal of Nuclear Materials 477, 85–87.
- Fidalgo A B, Kumagai Y, Jonsson M, 2018.** The role of surface-bound hydroxyl radicals in the reaction between H₂O₂ and UO₂. Journal of Coordination Chemistry 71, 1799–1807.
- Fidalgo A B, Roth O, Puranen A, Evins L Z, Spahiu K, Askeljung C, 2019.** Powder leaching study for grain boundary inventory of two high burnup fuels. MRS Advances 4, 981–986.
- Finsterle S, 2019.** Overall evaluation of Tasks 8A–D, F, and water-uptake test related to modelling of the interaction between engineered and natural barriers. Task 8 of SKB Task Forces EBS and GWFTS. SKB TR-17-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Finsterle S, Lanyon B, Åkesson M, Baxter S, Bergström M, Bockgård N, Dershowitz W, Dessirier B, Frampton A, Fransson Å, Gens A, Gylling B, Hančilová I, Holton D, Jarsjö J, Kim J-S, Kröhn K-P, Malmberg D, Pulkkanen V-M, Sawada A, Sjöland A, Svensson U, Vidstrand P, Viswanathan H, 2018.** Conceptual uncertainties in modelling the interaction between engineered and natural barriers of nuclear waste repositories in crystalline rock. I Norris S, Neeft E A C, Van Geet M (red). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. London: Geological Society. (Special Publications 482) doi: 10.1144/SP482.12
- Follin S, Levén J, Hartley L, Jackson P, Joyce S, Roberts D, Swift B, 2007.** Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Forsström A, Becker R, Öijerholm J, Yagodzinskyy Y, Hänninen H, Linder J, 2017.** Hydrogen absorption in copper as a result of corrosion reactions in sulphide and chloride containing deoxygenated water at 90 °C in simulated spent nuclear fuel repository conditions. I Proceedings of EUROCORR 2017 – The Annual Congress of the European Federation of Corrosion, 20th International Corrosion Congress and Process Safety Congress, Prague, Czechia, 3–7 September 2017.
- Fridh K, 2017.** Frysegenskaper hos calciumurlakad betong – hur kan SFR påverkas av långvarig kontakt med grundvatten och de temperaturer som råder vid förvaret vid en permafrost? Experimentella studier. TVBM 7220, Lunds tekniska högskola.
- Fujiwara K, Tani J, Hironaga M, Tanaka M, 2017.** Corrosion behaviour of aluminium under simulated environmental conditions of low-level waste. Corrosion Engineering, Science and Technology 52, 162–165.
- Funehag J, 2016.** Efterinjektering av TASS-tunneln. Design, genomförande och resultat från efterinjektering. SKB R-11-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Funehag J, Emmelin A, 2011.** Injektering av TASS-tunneln. Design, genomförande och resultat från förinjekteringen. SKB R-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, 2018.** Simulating earthquake rupture and near-fault fracture response. Doktorsavh. Uppsala universitet.
- Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, 2011.** Modelling end-glacial earthquakes at Olkiluoto. Posiva Working Report 2011-13, Posiva Oy, Finland.
- Fälth B, Hökmark H, 2012.** Modelling end-glacial earthquakes at Olkiluoto. Expansion of the 2010 study. Posiva Working Report 2012-08, Posiva Oy, Finland.
- Fälth B, Hökmark H, 2015.** Effects of hypothetical large earthquakes on repository host rock fractures. Posiva Working Report 2015-18, Posiva Oy, Finland.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2007.** Seismically Induced Shear Displacements in Repository Host Rock Fractures. I Proceedings of the 9th Canadian conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, 26–29 June 2007.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2008.** Seismically induced slip on rock fractures – expanded study with particular account of large earthquakes. I Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Fransisco, California, 29 June – 2 July 2008.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, Mai P M, Roberts R, Munier R, 2014.** Simulating earthquake rupture and off-fault fracture response: Application to the safety assessment of the Swedish nuclear waste repository. Bulletin of the Seismological Society of America 105, 134–151.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, 2016.** Simulation of co-seismic secondary fracture displacements for different earthquake rupture scenarios at the proposed nuclear waste repository site in Forsmark. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 84, 142–158.

- Fälth B, Lund B, Hökmark H, 2017.** Simulation of co-seismic off-fault stress effects: influence of fault roughness and pore pressure coupling. I Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, Louisiana, 11–15 December 2017.
- Ganopolski A, Winkelmann R, Schellhuber H J, 2016.** Critical insolation–CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200–2003.
- Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gimeno M, Auqué L, Gómez J, 2019.** Hydrogeochemical conditions during periods with glacial and periglacial climate conditions. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Giroud N, Tomonaga Y, Wersin P, Briggs S, King F, Vogt T, Diomidis N, 2018.** On the fate of oxygen in a spent fuel emplacement drift in Opalinus Clay. *Applied Geochemistry* 97, 270–278.
- Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007.** Rock Mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glaus M A, Van Loon L R, 2008.** Degradation of cellulose under alkaline conditions: new insights from a 12 year degradation study. *Environmental Science & Technology* 42, 2906–2911.
- Glaus M A, Van Loon L R, Achatz S, Chodura A, Fischer K, 1999.** Degradation of cellulosic materials under the alkaline conditions of a cementitious repository for low and intermediate level radioactive waste. Part I: Identification of degradation products. *Analytica Chimica Acta* 398, 111–122.
- Gorbatov O I, Delandar A H, Gornostyrev Y N, Ruban A V, Korzhavyi P A, 2016.** First-principles study of interactions between substitutional solutes in bcc iron. *Journal of Nuclear Materials* 475, 140–148.
- Gordon A, Sjögren L, Taxén C, Johansson A J, 2017.** Retrieval and post-test examination of packages 4 and 5 of the MiniCan field experiment. SKB TR-16-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gordon A, Pahverk H, Börjesson E, Sjögren L, Karlsson O, Bergqvist H, Lindberg F, Johansson A J, 2018.** Corrosion morphology of copper in anoxic sulphide environments. SKB TR-18-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Graham P, Malm R, Eriksson D, 2015.** System design and full scale testing of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Main report. SKB TR-14-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grambow B, Vandenborre J, Suzuki-Muresan T, Philippini V, Abdelouas A, Deniard P, Jobic S, 2017.** Solubility equilibrium and surface reactivity at solid/liquid interfaces of relevance to disposal of nuclear waste. *Journal of Chemical Thermodynamics* 114, 172–181.
- Granfors M, 2017.** Round-robin of hydrogen content in copper determined by melt extraction and gas analysis. SKB R-17-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grelle A, Lundberg A, Lindroth A, Morén A-S, Cienciala E, 1997.** Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season. *Journal of Hydrology* 197, 70–87.
- Grinsted A, Jevrejeva S, Riva R E, Dahl-Jensen D, 2015.** Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Climate Research* 64, 15–23.
- Grolander S, 2013.** Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gålfalk M, Olofsson G, Crill P, Bastviken D, 2015.** Making methane visible. *Nature Climate Change* 6, 426–430.
- Gärdenäs A, Eckersten H, Reinlert A, Gustafsson D, Jansson P-E, Ekström P-A, Avila R, Greger M, 2009.** Tracey – a simulation model of trace element fluxes in soil-plant system for long-term assessment of a radioactive groundwater contamination. SKB TR-09-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Gärdenäs A I, Berglund S L, Bengtsson S B, Rosén K, 2017.** The grain storage of wet-deposited caesium and strontium by spring wheat — A modelling study based on a field experiment. *Science of The Total Environment* 574, 1313–1325.
- Haavisto F, Toivola, M, 2017.** Studies on the aquatic environment at Olkiluoto and reference area: 6. Poojoki River in 2014–2015. Posiva Working Report 2017-13, Posiva Oy, Finland.
- Hadi J, Wersin P, Jenni A, Greneche J M, 2017.** Redox evolution and Fe-bentonite interaction in the ABM2 experiment, Äspö Hard Rock Laboratory. Nagra Technical Report 17-10, Nagra, Switzerland.
- Hakala M, Siren T, Kempainen K, Christiansson R, Martin D, 2013.** In-situ stress measurements with the new LVDT-cell – method description and verification. Posiva Report 2012-43, Posiva Oy, Finland.
- Hakala M, Ström J, Valli J, Juvani J, 2019.** Structural control on stress variability at Forsmark. SKB R-19-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami H, 2006.** Numerical studies on spatial variation of the in situ stress field at Forsmark – a further step. Site descriptive modelling Forsmark – stage 2.1. SKB R-06-124, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami E, 2011.** Rock stress orientation measurements using induced thermal spalling in slim boreholes. SKB R-11-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami E, Min K-B, 2009.** Modelling of the state of stress. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Goodfellow B W, Heyman J, Moon S, Caffee M W, Ebert K, Hättestrand C, Krabbendam M, Martel S J, Näslund J-O, Perron T, Stuart F M, Stroeven A P, 2018.** Glacial erosion of the Sub-Cambrian Peneplain in Sweden. EGU General Assembly 2018, EGU2018-13835-1.
- Hall A M, Ebert K, Goodfellow B W, Hättestrand C, Heyman J, Krabbendam M, Moon S G, Stroeven A P, 2019.** Past and future impact of glacial erosion in Forsmark and Uppland, Sweden. SKB TR-19-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallberg B, Tiberg L, 2010.** Preliminär plan för avveckling – slutförvar för använt kärnbränsle. SKB P-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Halldin S, 1988.** Swedish evaporation research – a review. *Hydrology Research* 19, 303–340.
- Halldin Stenlid J, Johansson A J, Brinck T, 2019.** The local electron attachment energy and the electrostatic potential as descriptors of surface–adsorbate interactions. *Physical Chemistry Chemical Physics* 21, 17001–17009.
- Hanström U, 2019.** Logistikutredning av SKB:s transportsystem på lång sikt. SKBdoc 1690508 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hardacre C J, Heal M R, 2013.** Characterization of methyl bromide and methyl chloride fluxes at temperate freshwater wetlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 977–991.
- Harper J, Hubbard A, Ruskeeniemi T, Claesson Liljedahl L, Kontula A, Hobbs M, Brown J, Dirkson A, Dow C, Doyle S, Drake H, Engström J, Fitzpatrick A, Follin S, Frapé S, Graly J, Hansson K, Harrington J, Henkemans E, Hirschorn S, Humphrey N, Jansson P, Johnson J, Jones G, Kinnbom P, Kennell L, Klint K E S, Liimatainen J, Lindbäck K, Meierbachtol T, Pere T, Pettersson R, Tullborg E-L, van As D, 2016.** The Greenland Analogue Project: Data and processes. SKB R-14-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harper J, Meierbachtol T, Humphrey N, 2019.** Greenland ICE project. Final report. SKB R-18-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartikainen J, 2018.** Continuum thermodynamic modelling of porous medium with application to ground freezing. Doktorsavh. Aalto-universitetet, Finland.
- Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Hartikainen J, Claesson Liljedahl L, Kolisoja P, Kontula A, Kouhia R, Näslund J-O, van As D, Zwinger T, 2018.** Thermal evolution of a Holocene arctic environment in western Greenland. Extended abstract presented at the SCAR and IASC Conference Polar 2018, Davos, Switzerland, 15–26 June 2018. Abstract A-938-0026-01129.
- Hasholt B, Van As D, Mikkelsen A B, Mernild S H, Yde J C, 2018.** Observed sediment and solute transport from the Kangerlussuaq sector of the Greenland Ice Sheet (2006–2016). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 50, S100009. doi:10.1080/15230430.2018.1433789
- Haynes H M, Nixon S, Lloyd J R, Birgersson M 2019.** Verification of microbial sulfide-producing activity in Calcigel bentonite at saturated densities of 1750 and 1900 kg m⁻³. SKB P-19-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- He X, Ahn T, Gwo J-P, 2018.** Corrosion of copper as a nuclear waste container material in simulated anoxic granitic groundwater. *Corrosion* 74, 158–168.
- Hedin A, 2019.** Scoping calculations of hydrogen degassing from Cu-OFP. SKBdoc 1716281 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, Lilja C, Johansson A J, 2017.** Copper corrosion in pure water – scientific and post-closure safety aspects. I Proceedings of the 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Charlotte, NC, 9–13 April 2017. American Nuclear Society.
- Hedin A, Johansson A J, Lilja C, Boman M, Berastegui P, Berger R, Ottosson M, 2018.** Corrosion of copper in pure O₂-free water? *Corrosion Science* 137, 1–12.
- Hedström M, Ekvý Hansen E, Nilsson U, 2016.** Montmorillonite phase behaviour. Relevance for buffer erosion in dilute groundwater. SKB TR-15-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2009.** Climate, vegetation and lake development at Sokli (northern Finland) during early MIS 3 at ~50 kyr: Revising earlier concepts on climate, glacial and vegetation dynamics in Fennoscandia during the Weichselian. SKB TR-09-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2013.** The last Interglacial-Glacial cycle (MIS 5-2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. SKB TR-13-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2019.** The last 130 000 years in Fennoscandia reconstructed based on a long and fossil-rich sediment sequence preserved at Sokli in northern Finland. New evidence for highly dynamic environmental and climate conditions. SKB TR-18-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, Katrantsiotis C, Salonen J S, Shala S, Bos J A A, Engels S, Kuosmanen N, Luoto T P, Väiliranta M, Luoto M, Ojala A, Risberg J, Weckström J, 2018.** Warm summers and rich biotic communities during N-Hemisphere deglaciation. *Global and Planetary Change* 167, 61–73.
- Henkemans E, Frapé S K, Ruskeenieni T, Anderson J N, Hobbs M, 2018.** A landscape-isotopic approach to the geochemical characterization of lakes in the Kangerlussuaq region, west Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine research* 50, S100018. doi:10.1080/15230430.2017.1420863
- Hernelind J, 2019a.** Design parameters effect on tensile stresses for the copper shell. SKBdoc 1707582 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hernelind J, 2019b.** Extended canister analyses with emphasis on tensile stresses and uneven swelling pressure. SKBdoc 1614038 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Heyman J, Goodfellow B W, Caffee M W, Hall A M, Hättestrand C, Ebert K, Näslund J-O, Stroeven A P, 2018.** Glacial erosion of Forsmark, east-central Sweden, based on bedrock ¹⁰Be and ²⁶Al. I Proceedings of the 4th Nordic Workshop on Cosmogenic Nuclides, Geiranger, Norway, 4–6 June 2018.
- Heyman J, Goodfellow B W, Stroeven A P, Hall A M, Caffee M W, Hättestrand C, Ebert K, Näslund J-O, Hippe K, Krabbendam M, Martel S, Moon S, Perron T, Stuart F, 2019.** Erosion of low-relief basement by the Fennoscandian ice sheet based on bedrock ¹⁰Be and ²⁶Al. INQUA 2019, Dublin, Ireland, 25–31 July 2019.
- Hoch A R, Lever D A, Shaw G, 2014.** Uptake of carbon-14 in the biosphere: Summary report. NPO004437, AMEC, UK.

- Hora S, Jensen M, 2005.** Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Report 2005:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Huotilainen C, Saario T, Toivonen A, 2018.** Review of the Aaltonen-mechanism. SKB R-18-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Huttunen-Saarivirta E, Rajala P, Carpén L, 2016.** Corrosion behaviour of copper under biotic and abiotic conditions in anoxic ground water: electrochemical study. *Electrochimica Acta* 203, 350–365.
- Huttunen-Saarivirta E, Rajala P, Bomberg M, Carpén L, 2017.** EIS study on aerobic corrosion of copper in ground water: influence of micro-organisms. *Electrochimica Acta* 240, 163–174.
- Huttunen-Saarivirta E, Ghanbari E, Mao F, Rajala P, Carpén L, Macdonald D D, 2018.** Kinetic properties of the passive film on copper in the presence of sulfate-reducing bacteria. *Journal of The Electrochemical Society* 165, C450–C460.
- Huttunen-Saarivirta E, Ghanbari E, Mao F, Rajala P, Carpén L, Macdonald D D, 2019a.** Erratum: Kinetic properties of the passive film on copper in the presence of sulfate-reducing bacteria [J. Electrochem. Soc., 165, C450 (2018)]. *Journal of The Electrochemical Society* 166, X5.
- Huttunen-Saarivirta E, Rajala P, Carpén L, Wang J, Liu F, Ghanbari E, Mao F, Dong C, Yang J, Sarifi-Asl S, Macdonald D D, 2019b.** Response to Comments on E. Huttunen-Saarivirta et al., “Kinetic Properties of the Passive Film on Copper in the Presence of Sulfate-Reducing Bacteria” [J. Electrochem. Soc., 165, C450 (2018)]. *Journal of The Electrochemical Society* 166, Y17–Y26.
- Hyman J D, Karra S, Makedonska N, Gable C W, Painter S L, Viswanathan H S, 2015.** DFNWORKS: A discrete fracture network framework for modelling subsurface flow and transport. *Computers & Geosciences* 84, 10–19.
- Hällgren A, 2018.** Utredningsrapport – Grunden för en långsiktig kompetens-försörjning inom strålsäkerhetsområdet. SSM2017-134-23, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Högberg C-J, Karlsson O, Randelius M, Johansson A J, 2017.** Surface morphology and elemental composition of copper canisters for disposal of spent nuclear fuel. SKB P-17-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Höglund L-O, 2001.** Project SAFE. Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Höglund L-O, 2014.** The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Höglund L-O, Bengtsson A, 1991.** Some chemical and physical processes related to the long-term performance of the SFR repository. SKB SFR 91-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Fälth B, Lönnqvist M, Munier R, 2018.** Earthquake simulations performed to assess the long-term safety of a KBS-3 repository. Overview and evaluation of results produced after SR-Site. SKB TR-19-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- IAEA, 2014.** Modelling of biota dose effects. Report of working group 6 biota dose effects modelling of EMRAS II Topical heading reference approaches for biota dose assessment Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS II) programme. IAEA TECDOC-1737, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2016.** Environmental change in post-closure safety assessment of solid radioactive waste repositories. IAEA TECDOC-1799, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Ibrahim B, Zagidulin D, Behazin M, Ramamurthy S, Wren J C, Shoesmith D W, 2018.** The corrosion of copper in irradiated and unirradiated humid air. *Corrosion Science* 141, 53–62.
- Idiart A, Laviña M, 2019.** Modelling of concrete degradation in a one-million-year perspective – Hydro-chemical processes. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Idiart A, Shafei B, 2019.** Modelling of concrete degradation – Hydro-chemical processes. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Idiart A, Laviña M, Coene E, 2019a.** Modelling of concrete degradation – Hydro-chemo-mechanical processes. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Idiart A, Olmeda J, Laviña M, 2019b.** Modelling of concrete degradation – influence of concrete mix design. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- iMaGe, 2019.** iMaGe platform. Tillgänglig: <https://image-modelling.net>
- Ingri J, Conrad S, Lidman F, Nordblad F, Engström E, Rodushkin I, Porcelli D, 2018.** Iron isotope pathways in the boreal landscape: Role of the riparian zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 239, 49–60.
- IPCC, 2013.** Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Iraola A, Trincherio P, Voutilainen M, Gylling B, Selroos J-O, Molinero J, Svensson U, Bosbach D, Deissmann G, 2017.** Microtomography-based Inter-Granular Network for the simulation of radionuclide diffusion and sorption in a granitic rock. *Journal of Contaminant Hydrology* 207, 8–16.
- Itasca, 2013.** 3DEC – 3 Dimensional Distinct Element Code. Version: 5.0. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.
- Itasca, 2014a.** PFCSuite – Particle Flow Code. Version: 5.0. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.
- Itasca, 2014b.** UDEC – Universal Distinct Element Code. Version: 6.0. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.
- Jaeschke B, Smith K, Nordén S, Alfonso B, 2013.** Assessment of risk to non-human biota from a repository for the disposal of spent nuclear fuel at Forsmark. Supplementary information. SKB TR-13-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jansson T, Funehag J, Vidstrand P, 2019.** 2019 Injektion av deponeringsområdet i förvaret för använt kärnbränsle – Historik, metodik och strategi. SKB R-18-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jensen V, Karnland O, Hedström M, 2018.** Oedometer test on ion-exchange resins under alkaline water conditions. *Clay Technology* AB. SKBdoc 1868189 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, 2019a.** Corrosion of copper in repository-like field tests: compilation and analysis of data. SKBdoc 1713264 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, 2019b.** Surface examination of a copper heater used for investigations of gas evolution in an unsaturated KBS-3 repository. SKBdoc 1696574 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, Lilja C, Sjögren L, Gordon A, Hallbeck L, Johansson L, 2017.** Insights from post-test examination of three packages from the MiniCan test series of coppercast iron canisters for geological disposal of spent nuclear fuel: impact of the presence and density of bentonite clay. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 54–60.
- Johansson A J, Lilja C, Hedin A, 2019.** Corrosion of copper in repository-like field tests: compilation and analysis of data. IHLRWM 2019, Knoxville, TN, 14–18 April 2019.
- Johansson E, 2016.** The influence of climate and permafrost on catchment hydrology. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Johansson E, Sassner M, 2019.** Development of methodology for flow path analysis in the surface system – Numerical modelling in MIKE SHE for Laxemar. A report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson E, Stenberg L, Olofsson I, Karlzén R, 2013.** Utbyggnad av Äspölaboratoriet 2011–2012. Karakterisering, projektering och tunneldrivning. SKB R-13-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson E, Gustafsson L-G, Berglund S, Lindborg T, Selroos J-O, Claesson Liljedahl L, Destouni G, 2015.** Data evaluation and numerical modeling of hydrological interactions between active layer, lake and talik in a permafrost catchment, Western Greenland. *Journal of Hydrology* 527, 688–703.

- Johansson L, 2019.** Exposure of copper to sulphate reducing bacteria and verification of a biofilm. Batch 2. SKBdoc 1701933 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson L, Stahlén J, Taborowski T, Petersen K, Lukkari S, Marmo J, 2019.** Microbial release of iron from Olkiluoto rock minerals. Posiva Working Report 2018-30, Posiva Oy, Finland.
- Jonsson M, Rydén, 2014.** Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns rör, lock och botten. SKBdoc 1414374 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, Emilsson G, Emilsson L, 2018.** Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, Sarnet J, Holst L, 2019.** Statistisk värdering av kopparkomponenternas geometriska kvalitet. SKB R-18-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Josefsson J, Andersson-Östling H C M, 2019.** SSRT testing of Cu. SKB R-18-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Joyce S, Simpson T, Hartley L, Applegate D, Hoek J, Jackson P, Swan D, Marsic N, Follin S, 2010.** Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark. SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Joyce S, Applegate D, Appleyard P, Gordon A, Heath T, Hunter F, Hoek J, Jackson P, Swan D, Woollard H, 2015.** Groundwater flow and reactive transport modelling in ConnectFlow. SKB R-14-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Joyce S, Appleyard P, Hartley L, Tsitsopoulos V, Woollard H, Marsic N, Sidborn M, Crawford J, 2019.** Groundwater flow and reactive transport modelling of temperate conditions. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juhlin C, Lund B, 2011.** Reflection seismic studies over the end-glacial Burträsk fault, Skellefteå, Sweden. *Solid Earth* 2, 9–16.
- Junkin W, Janeczek D, Bastola S, Wang X, Cai M, Fava L, Sykes E, Munier R, Srivastava R, 2017.** Discrete fracture network generation for the Äspö TAS08 tunnel using MoFrac. I Proceedings of the 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, 25–28 June 2017. American Rock Mechanics Association.
- Junkin W, Fava L, Ben-Awuah E, Srivastava R, 2018.** Analysis of MoFrac-generated deterministic and stochastic discrete fracture network models. I Proceedings of the 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Seattle, Washington, 20–22 June 2018.
- Jutebring Sterte E, Johansson E, Sjöberg Y, Huseby Karlsen R, Laudon H, 2018.** Groundwater-surface water interactions across scales in a boreal landscape investigated using a numerical modelling approach. *Journal of Hydrology* 560, 184–201.
- Kalinowski M, 2015.** Betongcylinder I-1B med ingjutna metallprover. CBI Betonginstitutet. SKBdoc 1495415 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kalinowski M, 2018.** Kemisk sammansättning hos bentonitlera. RISE CBI Betonginstitutet. SKBdoc 1692024 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlsson K, 2017.** Urlakning av betong med elektrisk migration och frysning under tvång. TVBM-5109, Lunds tekniska högskola.
- Kautsky U, Lindborg T, Valentin J, 2013.** Humans and ecosystems over the coming millennia: a biosphere assessment of radioactive waste disposal in Sweden. *Ambio* 42, 381–526.
- Kautsky U, Saetre P, Berglund S, Jaeschke B, Nordén S, Brandefelt J, Keesmann S, Näslund J-O, Andersson E, 2016.** The impact of low and intermediate-level radioactive waste on humans and the environment over the next one hundred thousand years. *Journal of Environmental Radioactivity* 151, 395-403.
- Keith-Roach M, Elert M, 2018.** Estimation of doses arising from the incineration of very low level organic waste from the decommissioning of nuclear power plants in a conventional waste incineration plant. Kemakta AR 2018-23, Kemakta Konsult AB.

- Keith-Roach M, Lindgren M, Källström K, 2014.** Assessment of complexing agent concentrations in SFR. SKB R-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kienzler B, Duro L, Lemmens K, Metz V, De Pablo J, Valls A, Wegen D H, Johnson L, Spahiu K, 2017.** Summary of the Euratom collaborative project FIRST-Nuclides and conclusions for the safety case. Nuclear Technology 198, 260–276.
- King F, Kolář M, 2019.** Copper Sulfide Model (CSM) – model improvements, sensitivity analyses, and results from the Integrated Sulfide Project inter-model comparison exercise. SKB TR-18-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Lilja C, 2013.** Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water. SKB TR-13-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Lilja C, 2014.** Localised corrosion of copper canisters. Corrosion Engineering, Science and Technology 49, 420–424.
- King F, Orazem M E, 2017.** Preliminary report on the development of a kinetic model for the corrosion of copper in pure water. SKBdoc 1602591 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Chen J, Qin Z, Shoesmith D, Lilja C, 2017.** Sulphide transport control of the corrosion of copper canisters. Corrosion Engineering, Science and Technology 52 sup1, 210–216.
- Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J-O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000-year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kong D, Dong C, Zhao M, Ni X, Man C, Li X, 2018.** Effect of chloride concentration on passive film properties on copper. Corrosion Engineering, Science and Technology 53, 122–130.
- Konovalenko L, 2012.** Element transport in marine coastal ecosystems – modelling general and element-specific mechanisms. Stockholms universitet.
- Kopp R, Baldner K-R, Ji W, Nieschwitz P-J, 1988.** Einfluss des Sattelkantenradius beim Recken. Stahl und Eisen 108, 901–905.
- Kosec T, Hren M, Legat A, 2017.** Monitoring copper corrosion in bentonite by means of a coupled multi-electrode array. Corrosion Engineering, Science and Technology 52, 70–77.
- Krabbendam M, Hall A M, Goodfellow B, Hättestrand C, Heyman J, Näslund J-O, Stroeven A P, 2019.** Jacking, fracking and ripping: a late-stage ice-sheet erosion pulse. I Proceedings of the Madison Symposium IGS 2019, Glacial Erosion and Sedimentation, Madison, Wisconsin, 12–17 May 2019.
- Krall L, 2016.** The mobility of natural uranium at Forsmark, Sweden, through geologic time. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Kumagai Y, Fidalgo A B, Jonsson M, 2019.** Impact of stoichiometry on the mechanism and kinetics of oxidative dissolution of UO₂ induced by H₂O₂ and γ -irradiation. The Journal of Physical Chemistry C 123, 9919–9925.
- Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Models for transport and fate of carbon, nutrients and point source released radionuclides to an aquatic ecosystem. SKB TR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kuusisto J, 2017.** Geochemical and physical properties and in situ distribution coefficients of the deep soil pits OL-KK25 and OL-KK26 at Olkiluoto. Posiva Working Report 2017-2, Posiva Oy, Finland.
- Kylander M, Pliikk A, Rydberg J, Löwemark L, Salonen J S, Fernández-Fernández M, Helmens K F, 2018.** Sediment Geochemistry of the Eemian Sequence at Sokli, NE Finland: New insights from XRF core scanning data into boreal lake ontogeny during the Eemian (Marine Isotope Stage 5e) at Sokli, northeast Finland. Quaternary Research 89, 352–364.
- Köhler S J, Lidman F, Laudon H, 2014.** Landscape types and pH control organic matter mediated mobilization of Al, Fe, U and La in boreal catchments. Geochimica et Cosmochimica Acta 135, 190–202.

- Lagerblad B, Trägårdh J, 1994.** Conceptual model for concrete long time degradation in deep nuclear waste repository. SKB TR 95-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerblad B, Golubeva M, Cirera J R, 2016.** Lämplighet för krossberg från Forsmark och SFR att användas som betongballast. SKB P-16-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerblad B, Rogers P, Vogt C, Mårtensson P, 2017.** Utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA. SKB R-17-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, 2003.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- och post-glacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002. SKB P-03-76, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, 2008.** Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Research Paper C 836, Sveriges geologiska undersökning.
- Lagerbäck R, Sundh M, Johansson H, 2004.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- och post-glacial faulting in the Forsmark region. Results from 2003. SKB P-04-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svedlund J-O, Johansson H, 2005.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002–2004. SKB R-05-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerlund J, 2014.** Utveckling av kringgjutningsbruk för 1BMA – Injekteringsförsök i betongspalt. Rapport U14:71, Vattenfall Research and Development AB. SKBdoc 1441135 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerlund J, 2015a.** Injektering av sprickor med kringgjutningsbruk för 1BMA. Rapport VRD-R03:2051, Vattenfall Research and Development AB. SKBdoc 1479371 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerlund J, 2015b.** Utveckling av kringgjutningsbruk för 2BMA. Rapport VRD-R01:2051, Vattenfall Research and Development AB. SKBdoc 1471727 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerlund J, Thorsell P-E, Liljeby E, 2014.** Utveckling av kringgjutningsbruk för 1BMA. Rapport U14:02, Vattenfall Research and Development AB. SKBdoc 1425185 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lahdenperä A M, 2017.** Reference Lake Sediments, Geochemistry and in situ Distribution Coefficients, K_d Values, Southwestern Finland. Posiva Working Report 2017-16, Posiva Oy, Finland.
- Lantmäteriet, 2015.** Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. Version 2.2. Gävle: Lantmäteriet.
- Laudon H, Taberman I, Ågren A, Futter M, Ottosson-Löfvenius M, Bishop K, 2013.** The Krycklan Catchment Study – A flagship infrastructure for hydrology, biogeochemistry, and climate research in the boreal landscape. *Water Resources Research* 49, 7154–7158.
- Lavoine E, Davy P, Darcel C, Munier R, 2017.** A discrete fracture network model with stress-driven nucleation and growth. I Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting, New Orleans, Louisiana, 11–15 December 2017.
- Ledesma J L J, Futter M N, Blackburn M, Lidman F, Grabs T, Sponseller R A, Laudon H, Bishop K H, Köhler S J, 2018.** Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters. *Ecosystems* 21, 297–315.
- Le Goc R, Darcel C, Davy P, 2017.** Advanced DFN models from multi-support data for underground facilities. *Procedia Engineering* 191, 1015–1022.
- Le Goc R, Davy P, Darcel C, Selroos J-O, 2018.** Discrimination of Discrete Fracture Network models using structural and flow data. I Proceedings of the 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Seattle, Washington, 20–22 June 2018. American Rock Mechanics Association.
- Leijon B, 1998.** Nord-syd/Kust-inland. Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige. SKB R-98-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Leijon G, Ahlström J, Andersson-Östling H C M, 2018.** In situ hydrogen charging of OFP copper during creep. SKB R-17-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lemmens K, Gonzalez-Robles E, Kienzler B, Curti E, Serrano-Purroy D, Sureda R, Martínez-Torrents A, Roth O, Slonszki E, Mennecart T, Günther-Leopold, Hozer Z, 2017.** Instant release of fission products in leaching experiments with high burnup nuclear fuels in the framework of the Euratom project FIRST-Nuclides. *Journal of Nuclear Materials* 484, 307–323.
- Leoni M, Börgesson L, Keto P, 2018.** Numerical modelling of the buffer swelling test in Äspö HRL. Validation of numerical models with the buffer swelling test data. SKB TR-17-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Levermann A, Clark P U, Marzeion B, Milne G A, Pollard D, Radic V, Robinson A, 2013.** The multimillennial sea-level commitment of global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 13745–13750.
- Li Y, Korzhavyi P, Sandström R, Lilja C, 2017.** Impurity effects on the grain boundary cohesion in copper. *Physical Review Materials* 1, 070602(R). doi:10.1103/PhysRevMaterials.1.070602
- Lidman F, 2013.** Radionuclide transport in the boreal landscape – Uranium, thorium and other metals in forests, wetlands and streams. Doktorsavh. Umeå universitet.
- Lidman F, Peralta-Tapia A, Vesterlund A, Laudon H, 2016.** $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ in a boreal stream network – Relationship to hydrological events, groundwater and scale. *Chemical Geology* 420, 240–250.
- Lidman F, Boily Å, Laudon H, Köhler S J, 2017a.** From soil water to surface water – how the riparian zone controls element transport from a boreal forest to a stream. *Biogeosciences* 14, 3001–3014.
- Lidman F, Källström K, Kautsky U, 2017b.** Mo-93 from the grave to the cradle. Report from a workshop on molybdenum in radioactive waste and in the environment. SKB P-16-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindblom E, Lund B, Tryggvason A, Uski M, Bödvarsson R, Juhlin C, Roberts R, 2015.** Microearthquakes illuminate the deep structure of the endglacial Pärvie fault, northern Sweden. *Geophysical Journal International* 201, 1704–1716.
- Lindborg T, 2017.** Climate driven landscape development: physical and biogeochemical long-term processes in temperate and periglacial environments. Doktorsavh. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Lindborg T (red), 2018.** BIOPROTA. BIOMASS 2020: Interim report. BIOPROTA report, produced in association with IAEA MODARIA II working group 6. SKB R-18-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T, Brydsten L, Sohlenius G, Strömgren M, Andersson E, Löfgren A, 2013.** Landscape development during a glacial cycle: Modeling ecosystems from the past into the future. *Ambio* 42, 402–413.
- Lindborg T, Rydberg J, Tröjbom M, Berglund S, Johansson E, Löfgren A, Saetre P, Nordén S, Sohlenius G, Andersson E, Petrone J, Borgiel M, Kautsky U, Laudon H, 2016a.** Biogeochemical data from terrestrial and aquatic ecosystems in a periglacial catchment, West Greenland. *Earth System Science Data* 8, 439–459.
- Lindborg, T, Rydberg J, Tröjbom M, Berglund S, Johansson E, Löfgren A, Saetre P, Nordén S, Sohlenius G, Andersson E M, Petrone J, Borgiel M, Kautsky U, Laudon H, 2016b.** Biogeochemical data from terrestrial and aquatic ecosystems in a periglacial catchment, West Greenland. Supplement to: Lindborg, T et al. (2016): Biogeochemical data from terrestrial and aquatic ecosystems in a periglacial catchment, West Greenland. *Earth System Science Data* 8, 439–459. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.860961>
- Lindborg T, Smith G M, Thorne M, 2017.** Latest international developments and practice in addressing climate change and landscape evolution in post closure safety assessments. I Proceedings of the International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Charlotte, NC, 9–13 April 2017. American Nuclear Society.

- Lindborg T, Thorne M, Andersson E, Becker J, Brandefelt J, Cabianca T, Gunia M, Ikonen A T K, Johansson E, Kangasniemi V, Kautsky U, Kirchner G, Klos R, Kowe R, Kontula A, Kupiainen P, Lahdenperä A M, Lord N S, Lunt D J, Näslund J-O, Nordén M, Norris S, Pérez-Sánchez D, Proverbio A, Riekkö K, Rübner A, Sweeck L, Walke R, Xu S, Smith G, Pröhl G, 2018.** Climate change and landscape development in post-closure safety assessment of solid radioactive waste disposal: Results of an initiative of the IAEA. *Journal of Environmental Radioactivity* 183, 41–53.
- Lisiecki L E, Raymo M E, 2005.** A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 20. doi:10.1029/2004PA001071
- Lord N, Lunt D J, Richards D, 2018a.** Investigating the role of orbital forcing on East Asian monsoons using a statistical emulator. EGU General Assembly 2018, EGU2018-18143.
- Lord N S, Lunt D J, Richards D, 2018b.** Using a climate emulator to investigate orbital forcing and climatic changes during the Pleistocene. AGU Fall Meeting, Washington, DC, 10–14 December 2018, abstract #PP53C-1213.
- Lord N S, Lunt D, Thorne M, 2019.** Modelling changes in climate over the next 1 million years. SKB TR-19-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2019.** Hydrogen sorption capacity of crystal lattice defects and low Miller index surfaces of copper. SKBdoc 1708457 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lousada C M, Soroka I L, Yagodzinskyy Y, Tarakina N V, Todoshchenko O, Hänninen H, Korzhavyi P A, Jonsson M, 2016.** Gamma radiation induces hydrogen absorption by copper in water. *Nature Scientific Reports* 6, 24234. doi:10.1038/srep24234
- Lousada C M, Johansson A J, Korzhavyi P A, 2017a.** Molecular and dissociative adsorption of water and hydrogen sulphide at perfect and defect Cu(110) surfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics* 19, 8111–8120.
- Lousada C M, Johansson A J, Korzhavyi P A, 2017b.** Molecular and dissociative adsorption of water at a defective Cu(110) surface. *Surface Science* 658, 1–8.
- Lousada C M, Johansson A J, Korzhavyi P A, 2018.** Adsorption of hydrogen sulfide, hydrosulfide and sulfide at Cu(110) – Polarizability and cooperativity effects. First stages of formation of a sulfide layer. *ChemPhysChem* 19, 2159.
- Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- Lund B, Buhcheva D, Tryggvason A, Berglund K, Juhlin C, Munier R, 2015.** The Burträsk endglacial fault: Sweden's most seismically active fault system. EGU General Assembly, Vienna, 12–17 April 2015, id. 12358.
- Lund B, Buhcheva D, Juhlin C, Munier R, 2016.** Reactivation of an Ancient Shear Zone in the Fennoscandian Shield: The Burträsk Endglacial Fault. AGU Fall Meeting, San Francisco, California, 12–16 December 2016, abstract #S53A-2806.
- Lund B, Schmidt P, Näslund J-O, 2019.** Triggering of intraplate seismicity by variations in glacier loading. EGU General Assembly 2019, EGU2019-16081.
- Lundgren K, 2005.** Jod-129: Uppskattning av aktivitet i driftavfall från svenska LWR. SKB R-05-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lundgren K, 2006.** Mo-93, Tc-99 och Cs-135: Uppskattning av aktivitet i driftavfall från svenska LWR. 06-0031R. ALARA Engineering. SKBdoc 1393386 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lupon A, Denfeld B A, Laudon H, Leach J, Karlsson J, Sponseller R A, 2019.** Groundwater inflows control patterns and sources of greenhouse gas emissions from streams. *Limnology and Oceanography* 64, 1545–1557.
- Luterkort D, Gylling B, Johansson R, 2012.** Closure of spent fuel repository in Forsmark. Studies of alternative concepts for sealing of ramp, shafts and investigation boreholes. SKB TR-12-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Luterkort D, Nyblad B, Wimeliuus H, Pettersson A, Aghili B, 2014.** SFR förslutningsplan. SKBdoc 1358612 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Luterkort D, Johannesson L-E, Eriksson P, 2017.** Buffer design and installation method. Installation report. SKB TR-17-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lysell G, 2013.** Ny Nationell Höjdmmodell, NNH. Lantmäteriets nyhetsbrev 2013:1, Lantmäteriet, Gävle.
- Löfgren A (red), 2010.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Sidborn M, 2018.** Modelling of bounding corrosion rates of reactor pressure vessels in SFR due to earth currents. SKB R-16-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Hökmark H, 2013.** Approach to estimating the maximum depth for glacially induced hydraulic jacking in fractured crystalline rock at Forsmark, Sweden. *Journal Of Geophysical Research: Earth Surface* 118, 1777–1791.
- Lönnqvist M, Hökmark H, 2015.** Assessment of method to model slip of isolated, non-planar fractures using 3DEC. I Proceedings of 13th International Symposium on Rock Mechanics (ISRM Congress 2015), Canada, 10–13 May 2015. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Magnusson H, 2017.** Thermodynamic evaluation of impurity elements in OFP copper. SKB R-17-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Magnusson H, Bergqvist H, 2018.** Characterisation of different Cu-OFP grades using TEM. SKB R-17-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Magnusson H, Frisk K, 2017.** Diffusion, permeation and solubility of hydrogen in copper. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* 38, 65–69.
- Maier A C, Benarosch A, El Jamal G, Jonsson M, 2019.** Radiation induced dissolution of U_3Si_2 – A potential accident tolerant fuel. *Journal of Nuclear Materials* 517, 263–267.
- Maillot J, Davy P, Le Goc R, Darcel C, de Dreuzy J R, 2016.** Connectivity, permeability, and channeling in randomly distributed and kinematically defined discrete fracture network models. *Water Resources Research* 52, 8526–8545.
- Malmberg D, Åkesson M, 2018.** Modelling the interaction between engineered and natural barriers. Task 8 of SKB Task Forces EBS and GWFTS. SKB P-17-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mao F, Dong C, Sharifi-Asl S, Lu P, Macdonald D D, 2014.** Passivity breakdown on copper: influence of chloride ion. *Electrochimica Acta* 144, 391–399.
- Martino T L, 2018.** Electrochemical and corrosion examination of copper under deep geologic conditions for the application of nuclear waste containers. Doktorsavh. The University of Western Ontario, Kanada.
- Martino T, Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2017.** The kinetics of film growth and their influence on the susceptibility to pitting of copper in aqueous sulphide solutions. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 61–64.
- Martino T, Chen J, Guo M, Ramamurthy S, Shoesmith D W, Noël J J, 2019a.** Comments on E. Huttunen-Saarivirta et al., “Kinetic Properties of the Passive Film on Copper in the Presence of Sulfate-Reducing Bacteria” [*J. Electrochem. Soc.*, 165, C450 (2018)]. *Journal of The Electrochemical Society* 166, Y13–Y16.
- Martino T, Smith J, Chen J, Quin Z, Noël J J, Shoesmith D W, 2019b.** The properties of electrochemically-grown copper sulfide films. *Journal of The Electrochemical Society* 166, C9–C18.
- Mas Ivars D, Hakami H, 2005.** Effect of a sub-horizontal fracture zone and rock mass heterogeneity on the stress field in Forsmark area – a numerical study using 3DEC. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mas Ivars D, Pierce M E, Darcel C, Reyes-Montes J, Potyondy D O, Young R P, Cundall P A, 2011.** The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48, 219–244.

- Meier H E M, 2006.** Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Climate Dynamics* 27, 39–68.
- Mikko H, Smith C A, Lund B, Ask M, Munier R, 2015.** LiDAR-derived inventory of post-glacial fault scarps in Sweden. *GFF* 137, 334–338.
- Milberg P, Törnqvist L, Westerberg L M, Bastviken D, 2017.** Temporal variations in methane emissions from emergent aquatic macrophytes in two boreonemoral lakes. *AoB Plants* 9, plx029. doi:10.1093/aobpla/plx029
- Min K-B, Stephansson O, Jing L, 2005.** Effect of stress on mechanical and hydraulic rock mass properties – application of DFN-DEM approach on data from site investigation at Forsmark, Sweden. I Proceedings of the ISRM International Symposium, EUROCK 2005, Brno, Czech Republic, 18–20 May 2005.
- Min K-B, Lee J, Stephansson O, 2013.** Implications of thermally-induced fracture slip and permeability change on the long-term performance of a deep geological repository. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 61, 175–288.
- Min K-B, Lee J, Stephansson O, 2015.** Rock Mechanics – Evolution of fracture transmissivity within different scenarios in SR-site – Main review phase. Technical Note 2013:37, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Molinero J, Trinchero P, de Vries L M, Ebrahimi H, Svensson U, 2016.** The BRIDGE project. Development, testing and application of a high performance computing framework for reactive transport modelling in crystalline rocks (iDP). SKB R-15-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Montelius M, Svensson T, Lourino-Cabana B, Thiry Y, Bastviken D, 2016.** Chlorination and dechlorination rates in a forest soil — A combined modelling and experimental approach. *Science of The Total Environment* 554–555, 203–210.
- Moon S, Goodfellow B W, Perron J T, Martel S J, Caffee M W, Ebert K, Hall A, Hättestrand C, Heyman J, Mas Ivars D, Näslund J-O, Stroeven A, 2017.** Interaction of strong compressive stresses with topography: implications for bedrock fractures in Forsmark, Sweden. GSA Annual Meeting, Seattle, Washington, USA, 22–25 October 2017, abstract #300641.
- Moon S, Perron J T, Martel S J, Goodfellow B W, Mas Ivars D, Simeonov A, Munier R, Näslund J-O, 2018.** The controls of present-day topographic stress on subsurface bedrock fracture openness in Forsmark, Sweden. AGU Fall Meeting, Washington, DC, 10–14 December 2018, abstract #EP14A-08.
- Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE. Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Morsing Johansson J, Pedersen K, 2019.** Continued measurements of stored samples from previous studies of H₂ emission in sealed compartments containing copper in O₂-free water. SKBdoc 1707895 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Mattila J, 2015.** MEMO on terminology. POS-021685, ver 1.0, Posiva Oy.
- Muschitiello F, 2016.** Deglacial impact of the Scandinavian Ice Sheet on the North Atlantic climate system. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Muschitiello F, Lea J, Greenwood S L, Nick F M, Brunberg L, MacLeod A, Wohlfarth B, 2016.** Timing of the first drainage of the Baltic Ice Lake synchronous with the onset of Greenland Stadial 1. *Boreas* 45, 322–334.
- Muschitiello F, Pausata F S R, Lea J M, Mair D W F, Wohlfarth B, 2017.** Enhanced ice sheet melting driven by volcanic eruptions during the last deglaciation. *Nature Communication* 8, 1020. doi:10.1038/s41467-017-01273-1
- Myllykylä E, 2017.** Investigation of ThO₂ as a structural analogue for spent nuclear fuel dissolution under repository conditions. Doktorsavh. Helsingin yliopisto. Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo. (VTT Science 156)
- Myllykylä E, Koivula L, Tanhua-Tyrkkö M, Helariutta K, Lavonen T, Ollila K, Siitari-Kauppi M, 2017a.** Direct alpha spectrometry for analysing leached ThO₂ pellets. *Journal of Nuclear Materials* 493, 69–76.

- Myllykylä E, Lavonen T, Koivula L, Ollila K, Siitari-Kauppi M, 2017b.** Dissolution of ThO₂: study of dissolution process with initial ²²⁹Th spike. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 311, 225–235.
- Mårtensson P, 2015.** Äspö Hard Rock Laboratory. Concrete and Clay. Installation report. SKB P-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2017a.** SFL: Metod för grundläggning av betongkonstruktion i BHK. SKBdoc 1532426 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, 2017b.** SFL: Metod för återfyllnad av BHK med betong. SKBdoc 1542482 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson P, Vogt C, 2019.** Concrete caissons for 2BMA. Large scale test of design and material. SKB TR-18-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nardi A, Idiart A, Trincherio P, de Vries L M, Molinero J, 2014.** Interface COMSOL-PHREEQC (iCP), an efficient numerical framework for the solution of coupled multiphysics and geochemistry. *Computers & Geosciences* 69, 10–21.
- Natchimuthu S, Sundgren I, Gålfalk M, Klemedtsson L, Crill P, Danielsson Å, Bastviken D, 2015.** Spatio-temporal variability of lake CH₄ fluxes and its influence on annual whole lake emission estimates. *Limnology and Oceanography* 61, 13–26.
- Natchimuthu S, Sundgren I, Gålfalk M, Klemedtsson L, Bastviken D, 2017a.** Spatiotemporal variability of lake pCO₂ and CO₂ fluxes in a hemiboreal catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122, 30–49.
- Natchimuthu S, Wallin M B, Klemedtsson L, Bastviken D, 2017b.** Spatio-temporal patterns of stream methane and carbon dioxide emissions in a hemiboreal catchment in Southwest Sweden. *Scientific Reports* 7, 39729.
- NDA, 2015.** Solubility studies in the presence of polycarboxylate ether superplasticisers. NDA DRP LOT 2: Integrated Waste Management WP/B2/7. Nuclear Decommissioning Authority, UK.
- Neretnieks I, 2017.** Solute transport in channel networks with radial diffusion from channels in a porous rock matrix. SKB R-15-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, Moreno L, 2018.** Revisiting bentonite erosion understanding and modelling based on the BELBaR project findings. SKB TR-17-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, Moreno L, 2019.** Some mechanisms that influence bentonite erosion in a KBS-3 repository – an exploratory study. SKB TR-18-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Neretnieks I, Moreno L, Liu L, 2017.** Clay erosion – impact of flocculation and gravitation. SKB TR-16-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nerheim S, 2008.** Extrema vattenstånd för ett högt klimatscenario perioden 2071–2100 för Forsmark och Oskarshamn. Rapport 2008–80, SMHI.
- Nerheim S, Schöld S, Persson G, Sjöström Å, 2017.** Framtida havsnivåer i Sverige. Norrköping: SMHI. (Klimatologi 48)
- Nietsch J A, 2018.** Mechanical testing of copper – Flow curve investigation. IBF Aachen GmbH. SKBdoc 1677332 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson A-C, Pedersen K, Hallbeck B, Johansson J, Tullborg E-L, 2017.** Development and testing of gas samplers in tunnel environments. SKB R-16-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson K, Byegård J, Selnert E, Widestrand H, Höglund S, Gustafsson E, 2010.** Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Results from rock sample analyses and modelling. SKB R-10-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson S, 2019.** Dragprover och kornstorleksundersökning av kopparlock och -rör. PRO18-0097, Exova Materials Technology AB. SKBdoc 1671548 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nissen J, Gustafsson J, Sandström R, Wallin L, Taxén C, 2005.** Some corrosion observations and electrical measurements at drill sites DS4, DS7 and DS8. Forsmark site investigation. SKB P-05-265, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Nordbäck N, Mattila J, 2018.** Brittle fault systems of the ONKALO underground research facility. Posiva Working Report 2018-20, Posiva Oy, Finland.
- NRPA, 2018.** Study of issues affecting the assessment of impacts of disposal of radioactive and hazardous waste. StrålevernRapport 2018:6, Norwegian Radiation Protection Authority, Østerås, Norway.
- Näslund J-O, Jansson P, Fastook J L, Johnson J, Andersson L, 2005.** Detailed spatially distributed geothermal heat-flow data for modeling of basal temperatures and meltwater production beneath the Fennoscandian ice sheet. *Annals of Glaciology* 40, 95–101.
- Näslund J-O, Mårtensson P, Lindgren M, Åstrand P-G, 2017.** Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong. SKBdoc 1572377 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ochs M, Colàs E, Grivé M, Olmeda J, Campos I, Bruno J, 2014.** Reduction of radionuclide uptake in hydrated cement systems by organic complexing agents: Selection of reduction factors and speciation calculations. SKB R-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ollila K, 2019.** Copper corrosion experiments in pure water under anoxic conditions. Posiva Working Report 2018-19, Posiva Oy, Finland.
- Olofsson I, Fredriksson A, 2005.** Strategy for a numerical Rock Mechanics Site Descriptive Model. Further development of the theoretical/numerical approach. SKB R-05-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson R, 1998.** Mechanical and hydromechanical behaviour of hard rock joints: a laboratory study. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Olsson S, Jensen V, Johannesson L-E, Hansen E, Karnland O, Kumpulainen S, Kiviranta L, Svensson D, Hansen S, Lindén J, 2013.** Prototype Repository. Hydro-mechanical, chemical and mineralogical characterization of the buffer and tunnel backfill material from the outer section of the Prototype Repository. SKB TR-13-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olvmo M, 2010.** Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. SKB TR-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ottosson M, Boman M, Berastegui P, Andersson Y, Hahlin M, Korvela M, Rerger R, 2017.** Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate. *Corrosion Science* 122, 53–60.
- Ottosson M, Boman M, Berastegui P, Andersson Y, Hahlin M, Korvela M, Berger R, 2018.** Response to the comments by P. Szakálos, T. Åkermark and C. Leygraf on the paper “Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate”. *Corrosion Science* 142, 308–311.
- Oudin L, Hervieu F, Michel C, Perrin C, Andréassian V, Anctil F, Loumagne C, 2005.** Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303, 290–306.
- Padovani C, King F, Lilja C, Féron D, Necib S, Crusset D, Deydier V, Diomidis N, Gaggiano R, Ahn T, Keech P G, Macdonald D D, Asano H, Smart N, Hall D S, Hänninen H, Engelberg D, Noël J J, Shoesmith D W, 2017.** The corrosion behaviour of candidate container materials for the disposal of high-level waste and spent fuel – a summary of the state of the art and opportunities for synergies in future R&D. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 227–231.
- Padovani C, Pletser D, Jurkschat K, Armstrong D, Dugdale S, Brunt D, Faulkner R, Was G, Johansson A J, 2019.** Assessment of microstructural changes in copper due to gamma radiation damage. SKB TR-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Peķala M, Alt-Epping P, Wersin P, 2018.** 3D and 1D dual-porosity reactive transport simulations – model improvements, sensitivity analyses, and results from the Integrated Sulfide Project inter-model comparison exercise. Posiva Working Report 2018-31, Posiva Oy, Finland.
- Petrone J, Sohlenius G, Johansson E, Lindborg T, Näslund J-O, Strömngren M, Brydsten L, 2016.** Using ground-penetrating radar, topography and classification of vegetation to model the sediment and active layer thickness in a periglacial lake catchment, western Greenland. *Earth System Science Data* 8, 663–677.

- Pettersson S, 2013.** Feasibility study of waste containers and handling equipment for SFL. SKB R-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Plikk A, 2018.** The Eemian Interglacial at Sokli, northern Finland: A multi-proxy environmental and climatic reconstruction based on a 9 m long lacustrine sediment sequence. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Plikk A, Helmens K F, Fernández-Fernández M, Kylander M, Löwemark L, Risberg J, Salonen J S, Väiliranta M, Weckström J, 2016.** Development of an Eemian (MIS 5e) Interglacial palaeolake at Sokli (N Finland) inferred using multiple proxies. *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology* 463, 11–26.
- Plikk A, Engels S, Luoto T P, Nazarova L, Salonen J S, Helmens K F, 2019.** Chironomid-based temperature reconstruction for the Eemian Interglacial (MIS 5e) at Sokli, northeast Finland. *Journal of Paleolimnology* 61, 355–371.
- Pohjola J, Turunen J, Lipping T, Ikonen A, 2014.** The estimation of future surface water bodies at olkiluoto area based on statistical terrain and land uplift models. Posiva Working Report 2014-11, Posiva Oy, Finland.
- Posiva SKB, 2017.** Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Poteri A, Andersson P, Nilsson K, Byegård J, Skålberg M, Siitari-Kauppi M, Helariutta K, Voutilainen M, Kekäläinen P J, 2018a.** The Second Matrix Diffusion Experiment in the Water Phase of the Repro Project: WPDE 2. Posiva Working Report 2017-24, Posiva Oy, Finland.
- Poteri A, Andersson P, Nilsson K, Johan B, Skålberg M, Siitari-Kauppi M, Helariutta K, Voutilainen M, Kekäläinen P, Ikonen J, Sammaljärvi J, Lindberg A, Timonen J, Kuva J, Koskinen L, 2018b.** The First Matrix Diffusion Experiment in the Water Phase of the REPRO Project: WPDE 1. Posiva Working Report 2017-23, Posiva Oy, Finland.
- Potyondy D O, 2007.** Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 677–691.
- Potyondy D O, Cundall P A, 2004.** A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, 1329–1364.
- Preto P, Stranne C, Greenwood S, Jakobsson M, Näslund J-O, Sundberg J, Swärd H, O'Regan M, 2019.** Geothermal evidence for groundwater flow through glacial and glaciofluvial sediments below Lake Vättern, Sweden. *Geologiska Föreningen Förhandlingar (GFF)*.
- Puigdomenech I, Tullborg E-L, Kontula A, Lamminmäki T, 2017.** Glacial meltwater and moraine interaction: Evolution of near-surface waters at Kangerlussuaq, western Greenland. *Procedia Earth and Planetary Science* 17, 778–781.
- Puranen A, Granfors M, Ekeröth E, Spahiu K, 2016.** Lessons learned from leaching of dry milled high burnup UO₂ fuel under H₂ atmosphere. *MRS Advances* 1, 4169–4175.
- Puranen A, Barreiro A B, Evins L, Spahiu, K, 2017.** Spent fuel leaching in the presence of corroding iron. *MRS Advances* 2, 681–686.
- Puranen A, Roth O, Evins L Z, Spahiu K, 2018.** Aqueous leaching of high burnup UO₂ fuel under hydrogen conditions. *MRS Advances* 3, 1013–1018.
- Puukko E, Lehto J, Lindberg A, Voutilainen M, 2018.** Electromigration experiments for studying transport parameters and sorption of cesium and strontium on intact crystalline rock. *Journal of Contaminant Hydrology* 217, 1–7.
- Pålbrink L, Rydman O, 2013.** Frysning av betong under inverkan av tvång: en experimentell studie av frostens inverkan på betongkonstruktionerna i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall efter en permafrost. TVBM-5091, Lunds tekniska högskola.
- Qin Z, Daljeet R, Ai M, Harhangi N, Noël J J, Ramamurthy S, Shoesmith D, King F, Keech P, 2017.** The active/passive conditions for copper corrosion under nuclear waste repository environment. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 45–49.

Quiquet A, Colleoni F, Masina S, 2016. Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark, Sweden and Olkiluoto, Finland. Phase 2: impact of ice sheet dynamics, climate forcing and multi-variate sensitivity analysis on maximum ice sheet thickness. SKB TR-16-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Railo A (red), Laitinen I (red), Mustonen S, Kasunen P, Joutsen A, Ikonen A, Nuijten G, 2015. Design and construction of the equipment and experimental deposition holes, in ONKALO Demonstration tunnel 1. Posiva Working Report 2015-25, Posiva Oy, Finland.

Railo A (red) Laitinen I (red), Mustonen S, Kosunen P, Joutsen A, Mellanen S, Ikonen A, Hollmen K, Nuijten G, 2016. Design and construction of the equipment and experimental deposition holes, in ONKALO Demonstration tunnel 2. Posiva Working Report 2016-27, Posiva Oy, Finland.

Rath V, Sundberg S, Näslund J-O, Claesson Liljedahl L, 2019. Paleoclimatic inversion of temperature profiles from deep boreholes at Forsmark and Laxemar, Sweden. SKB TR-18-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rohde A, Lindström G, Rosberg J, Pers C, 2006. Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. Rapport Series A 66, Uppsala universitet.

Ruskeenieni T, Engström J, Lehtimäki J, Vanhala H, Korhonen K, Kontula A, Claesson Liljedahl L, Näslund J-O, Pettersson R, 2018. Subglacial permafrost evidencing re-advance of the Greenland Ice Sheet over frozen ground. *Quaternary Science Reviews* 199, 174–187.

Rutqvist J, Tsang C-F, 2008. Review of SKB:s work on coupled THM Processes within SR-Can. External review contribution in support of SKI:s and SSI:s review of SR-Can. SKI Report 2008:08, Statens kärnkraftinspektion.

Rydberg J, Lindborg T, Sohlenius G, Reuss N, Olsen J, Laudon H, 2016. The importance of eolian input on lake-sediment geochemical composition in the dry proglacial landscape of western Greenland AU - Arctic, Antarctic, and Alpine Research 48, 93–109.

Saetre P, Nordén S, Keesmann S, Ekström P-A, 2013. The Biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU. SKB R-13-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Salonen J S, Helmens K F, Brendryen J, Kuosmanen N, Väiliranta M, Goring S, Korpela M, Kylander M, Philip, Pliik A, Renssen H, Luoto M, 2018. Abrupt high-latitude climate events and decoupled seasonal trends during the Eemian Interglacial. *Nature Communications* 9, 2851. doi:10.1038/s41467-018-05314-1

Sánchez Goñi M F, Desprat S, Daniau A, Bassinot F C, Polanco-Martínez J M, Harrison S P, Allen J R M, Scott Anderson R, Behling H, Bonnefille R, Burjachs F, Carrión J S, Cheddadi R, Clark J S, Combourieu-Nebout N, Mustaphi C J C, Debussck G H, Finch J M, Fletcher W J, Giardini M, González C, Gosling W D, Grigg L D, Grimm E C, Hayashi R, Helmens K F, Heusser L E, Hill T, Hope G, Huntley B, Igarashi Y, Irino T, Jacobs B, Jiménez-Moreno G, Kawai S, Kershaw A P, Kumon F, Lawson I T, Ledru M-P, Lézine A-M, Liew P M, Magri D, Marchant R, Margari V, Mayle F E, McKenzie G M, Moss P, Müller S, Müller U C, Naughton F, Newnham R M, Oba T, Pérez-Obiol R, Pini R, Ravazzi C, Roucoux K H, Rucina S M, Scott L, Takahara H, Tzedakis P C, Urrego D H, van Geel B, Valencia B G, Vandergoes M J, Vincens A, Whitlock C L, Willard D A, Yamamoto M, 2017. The ACER pollen and charcoal database: a global resource to document vegetation and fire response to abrupt climate changes during the last glacial period. *Earth System Science Data* 9, 679–695.

Sandberg B, Taxén C, 2017. Åtgärd mot läckströmspåverkan från Fenno-skan på monitoringsutrustningen vid Forsmark, med minimal inverkan på vattenkemin. Swerea KIMAB rapport 12243:8 rev 1. SKBdoc 1574322 ver. 3.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Börgesson L, Nilsson U, Dueck A, 2017. Full scale Buffer Swelling Test at dry backfill conditions in Äspö HRL. In situ test and related laboratory tests. SKB TR-16-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Marjavaara P, Fritzell A, 2018a. Water handling during backfilling. Development report. Posiva SKB Report 05, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Sandén T, Nilsson U, Johannesson L-E, Hagman P, Nilsson G, 2018b.** Sealing of investigation boreholes. Full scale field test and large-scale laboratory tests. SKB TR-18-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, 2016.** The role of cell structure during creep of cold worked copper. *Materials Science & Engineering A* 674, 318–327.
- Sandström R, 2017.** Formation of a dislocation back stress during creep of copper at low temperatures. *Materials Science & Engineering A* 700, 622–630.
- Sarnet J, Holst L, 2017.** Åldring, deformationsåldring, blåsprödhet av segjärn. SKBdoc 1602640 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Satoh H, Ishii T, Owada H, 2013.** Dissolution of compacted montmorillonite at hyperalkaline pH and 70 °C: *in situ* VSI and *ex situ* AFM measurements. *Clay Minerals* 48, 285–294.
- Schatz T, Akhanoba N, 2017.** Bentonite buffer erosion in sloped fracture environments. Posiva 2016-13, Posiva Oy, Finland.
- Schatz T, Kanerva N, Martikainen J, Sane P, Olin M, Seppälä A, Koskinen K, 2013.** Buffer erosion in dilute groundwater. Posiva 2012-44, Posiva Oy, Finland.
- Schenk F, Wohlfarth B, 2019.** The imprint of hemispheric-scale climate transitions on the European climate during the last deglaciation (15.5 ka to 9 ka BP). SKB TR-18-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Schenk F, Väiliranta M, Muschitiello F, Tarasov L, Heikkilä M, Björck S, Brandefelt J, Johansson A V, Näslund J-O, Wohlfarth B, 2018.** Warm summers during the Younger Dryas cold reversal. *Nature Communications* 9, 1634. doi:10.1038/s41467-018-04071-5
- Sederholm B, Ahlström J, Trägårdh J, Kalinowski M, 2018.** Korrosionsprovning av injekterade bergbultar och provstänger av stål ingjutna i betongblock – resultat efter nio års exponering i Äspö-tunneln. Rapport KIMAB-2018-170 Swerea /KIMAB. SKBdoc 1706958 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Selvadurai A P S, Suvorov A P, Selvadurai P A, 2014.** Thermo-hydro-mechanical processes in fractured rock formations during glacial advance. *Geoscientific Model Development Discussions* 7, 7351–7394.
- Senior N A, Newman R C, Artymowicz D, Binns W J, Keech P G, Hall D S, 2019.** Communication – A method to measure extremely low corrosion rates of copper metal in anoxic aqueous media. *Journal of The Electrochemical Society* 166, C3015–C3017.
- Shahkarami P, 2017.** The effect of stagnant water zones and velocity dispersion. Doktorsavh. KTH.
- Shahkarami P, 2019.** Input data report for near-field and geosphere radionuclide transport modelling in the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shala S, Helmens K F, Luoto T P, Salonen J S, Väiliranta M, Weckström J, 2017.** Comparison of quantitative Holocene temperature reconstructions using multiple proxies from a northern boreal lake. *The Holocene* 27, 1745–1755.
- Shelton A, Sellin P, Missana T, Schäfer T, Červinka R, Koskinen K, 2018.** Synthesis report: Colloids and related issues in the long term safety case. SKB TR-17-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sidborn M, Marsic N, Crawford J, Joyce S, Hartley L, Idiart A, de Vries L M, Maia F, Molinero J, Svensson U, Vidstrand P, Alexander R, 2014.** Potential alkaline conditions for deposition holes of a repository in Forsmark as a consequence of OPC grouting. Revised final report after review. SKB R-12-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Silva O, Abarca E, Molinero J, Kautsky U, 2015.** An equivalent Kd-based radionuclide transport model implemented in COMSOL Multiphysics® software. I Proceedings of the COMSOL Conference, Grenoble, France, 14–16 October 2015.
- Silva O, Coene E, Molinero J, Laviña M, Idiart A, 2019a.** Gas release from the BHK vault – Multiphase flow modelling of the near-field. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Silva O, Sáinz-García Á, Molinero J, 2019b.** Gas release from the SFL repository and migration through the geosphere. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sipilä K, Arilahti E, Lehtikuusi T, Saario T, 2014.** Effect of sulphide exposure on mechanical properties of CuOFP. Corrosion Engineering, Science and Technology 49, 410–414.
- Siren T, Hakala M, Valli J, Christiansson R, Mas Ivars D, Lam T, Mattila J, Suikkanen J, 2017.** Parametrisation of fractures – Final report. Posiva 2017-01, Posiva Oy, Finland.
- Sjögren J, Hillgren R, Wern L, Jones J, Engdahl A. 2007.** Oskarshamn site investigation. Hydrological and meteorological monitoring at Oskarshamn, July 2005 until December 2006. SKB P-07-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009a.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009b.** Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. SKB TR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010a.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010b.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010c.** Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010d.** Platsval – lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-10-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011a.** Kärntekniska industrins praxis för friklassning av material, lokaler och byggnader samt mark. SKB R-11-15, Svensk kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011b.** Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013a.** Låg- och medelaktivt avfall i SFR. Referensinventarium för avfall 2013. SKB R-13-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b.** Plats för slutförvaring av kortlivat rivningsavfall. SKB P-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c.** Site description of the SFR area of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a.** Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b.** F-PSAR SFR – Allmän del 1 kapitel 3 – Konstruktionsregler. SKBdoc 1220377 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014c.** Model summary report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014d.** Svar på Föreläggande om redovisning rörande betydelsen av jordströmmar vid SFR. SKBdoc 1434594 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e.** Uppdatering av rapporten Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB P-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2014f. Uppdatering av rapporten Principer, strategier och system för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB P-14-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2015a. Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU. SKB R-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2015b. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2016. Detaljundersökningsprogram vid uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret. SKB R-16-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2017. Svar till SSM på begäran om komplettering kring försprödningsmekanismer för kapseln. SKBdoc 1602500 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019a. Biosphere synthesis for the safety evaluation SE-SFL. SKB TR-19-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019b. Låg- och medelaktivt avfall i SFR. Referensinventarium för avfall 2016. SKB R-18-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019c. Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL. Main report for the safety evaluation SE-SFL. SKB TR-19-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019d. Radionuclide transport and dose calculations for the safety evaluation SE-SFL. SKB TR-19-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019e. Supplementary information on canister integrity issues. SKB TR-19-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2019f. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2017. SKB TR-18-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Small J S, Nykyri M, Vikman M, Itävaara M, Heikinheimo L, 2017. The biogeochemistry of gas generation from low-level nuclear waste: Modelling after 18 years study under *in situ* conditions. Applied Geochemistry 84, 360–372.

SNSN, 2015. Svenska Nationella Seismiska Nätet. Uppsala Universitet, Institutionen för Geovetenskaper. Tillgänglig: <http://www.snsn.se/>

Sohlenius G, Strömgren M, Hartz F, 2013. Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Soler J M, Neretnieks I, Moreno L, Liu L, Meng S, Svensson U, Trincherro P, Iraola A, Ebrahimi H, Molinero J, Vidstrand P, Deissmann G, Říha J, Hokr M, Vetešník A, Vopálka D, Gvoždík L, Polák M, Trpkošová D, Havlová V, Park D-K, Ji S-H, Tachi Y, Ito T, 2019. Evaluation and modelling report of Task 9A based on comparisons and analyses of predictive modelling results for the REPRO WPDE experiments. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB R-17-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Soroka I, Jonsson M, 2019. Radiation induced corrosion of copper – an update on the mechanism. SKBdoc 1706535 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Srivastava R M, 2002. Probabilistic discrete fracture network models for the Whiteshell Research Area. Report 06819-REP-01200-10071-R00, Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Toronto, Kanada.

SSM, 2018. Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning. Rapport 2018:07, Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM, 2019. Granskningsrapport – Utbyggnad och fortsatt drift av SFR. Del III: Långsiktig strålsäkerhet. SSM2017-5969-2, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Stahlén J, 2019. Exposure of copper to sulphate reducing bacteria and verification of a biofilm. Batch 1. SKBdoc 1701925 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Stenlid J H, 2017. Computational studies of chemical interactions: molecules, surfaces and copper corrosion. Doktorsavh. KTH.

- Stenlid J H, Johansson A J, Kloo L, Brinck T, 2016a.** Aqueous solvation and surface oxidation of the Cu₇ nanoparticle: Insights from theoretical modeling. *The Journal of Physical Chemistry C* 120, 1977–1988.
- Stenlid J H, Soldemo M, Johansson A J, Leygraf C, Göthelid M, Weissenrieder J, Brinck T, 2016b.** Reactivity at the Cu₂O(100):Cu–H₂O interface: a combined DFT and PES study. *Physical Chemistry Chemical Physics* 18, 30570–30584.
- Stenlid J H, Johansson A J, Leygraf C, Brinck T, 2017.** Computational analysis of the early stage of cuprous oxide sulphidation: a top-down process. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 50–53.
- Stenlid J H, Campos dos Santos E, Johansson A J, Pettersson L G M, 2019.** On the nature of the cathodic reaction during corrosion of copper in anoxic sulfide solutions. *Journal of The Electrochemical Society* 166, C196–C208.
- Stephens M B, Simeonov A, 2015.** Description of deformation zone model version 2.3, Forsmark. SKB R-14-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stigsson M, 2016.** Orientation uncertainty of structures measured in cored boreholes: Methodology and case study of swedish crystalline rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49, 4273–4284.
- Stigsson M, 2018.** Did you forget the measurement uncertainty doing your connectivity analysis? I Proceedings of the 2nd DFNE Symposium, Seattle, Washington, 2018. Paper DFNE 18-237.
- Stigsson M, Mas Ivars D, 2019.** A novel conceptual approach to objectively determine JRC using fractal dimension and asperity distribution of mapped fracture traces. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52, 1041–1054.
- Stigsson M, Munier R, 2013.** Orientation uncertainty goes bananas: An algorithm to visualise the uncertainty sample space on stereonets for oriented objects measured in boreholes. *Computers & Geosciences* 56, 56–61.
- Sui F, Sandström R, 2016.** Slow strain rate tensile tests on notched specimens of copper. *Materials Science & Engineering A*, 663,108–115.
- Sui F, Sandström R, 2018.** Basic modelling of tertiary creep of copper. *Journal of Materials Science* 53, 6850–6863.
- Sui F, Sandström R, Wu R, 2018.** Creep tests on notched specimens of copper. *Journal of Nuclear Materials* 509, 62–72.
- Sundberg J, Näslund J-O, Claesson Liljedahl L, Wrafter J, O'Reagan M, Jakobsson M, Preto P, Larsson S Å, 2016.** Thermal data for paleoclimate calculations from boreholes at Lake Vättern. SKB P-16-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svemar C, Johannesson L-E, Graham P, Svensson D, Kristensson O, Lönnqvist M, Nilsson U, 2016.** Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report. SKB TR-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Lundgren C, Johannesson L-E, Norrfors K, 2017a.** Developing strategies for acquisition and control of bentonite for a high level radioactive waste repository. SKB TR-16-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Lundgren C, Wikberg P, 2017b.** Experiments with bentonite and sulphide – results from experiments 2013–2016. SKB P-16-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Johannesson L-E, Lundgren C, Kronberg M, Kronberg H, Bladström T, 2019a.** Developing strategies and methods for material control of bentonite for a high level radioactive waste repository. SKB TR-19-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Kalinowski B E, Turner S, Dopson M, 2019b.** Activity of sulfate reducing bacteria in bentonite as a function of water availability. SKBdoc 1708461 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson T, 2019.** Measurements and fluxes of volatile chlorinated organic compounds (VOCl) from natural terrestrial sources. Measurement techniques and spatio-temporal variability of flux estimates. SKB TR-18-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Svensson T, Montelius M, Andersson M, Lindberg C, Reyier H, Rietz K, Danielsson Å, Bastviken D, 2017.** Influence of multiple environmental factors on organic matter chlorination in podsol soil. *Environmental Science & Technology* 51, 14114–14123.
- Svensson T, Löfgren A, Kautsky U, Saetre P, Avila R, Bastviken D, 2018.** Chlorine distribution in a forest ecosystem gradient – role of understory. I Proceedings of the 20th European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2016, Vienna, Austria, 4–13 April 2018.
- Szakálos P, Åkermark T, Leygraf C, 2018.** Comments on the paper “Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate” by M. Ottosson, M. Boman, P. Berastegui, Y. Andersson, M. Hahlin, M. Korvela, and R. Berger. *Corrosion Science* 142, 305–307.
- Söderbäck B (red), 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taborowski T, Pedersen K, 2019.** Methanogens in SFR. SKB R-18-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tadesse A, Fredriksson H, 2018.** On the solidification and structure formation during casting of large inserts in ferritic nodular cast iron. *Metallurgical and materials transactions B* 49, 1223–1235.
- Tang L, Bager D H, 2013.** A study of consequences of freezing of concrete structures for storage of nuclear waste due to permafrost. SKB TR-12-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taniguchi N, Kawasaki M, 2008.** Influence of sulfide concentration on the corrosion behaviour of pure copper in synthetic seawater. *Journal of Nuclear Materials* 379, 154–161.
- Tasdigh H, 2015.** Assessment of the impact of fiber mass UP2 degradation products on nickel(II) and europium(III) sorption. Examensarbete. KTH.
- Tasi A G, 2018.** Solubility, redox and sorption behavior of plutonium in the presence of α -D-isosaccharinic acid and cement under reducing, alkaline conditions. Doktorsavh. Karlsruhe Institute of Technology.
- Taxén C, 2013.** Ytprofiler på kopparkapslar från deponeringshål 5 och 6 i försöksserien Prototyp. SKB P-13-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Sandberg B, Lilja C, 2014.** Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters. SKB TR-14-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Wickström L, Sparr M, 2017.** Corrosion properties of cold worked or welded copper materials. SKB R-17-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén, C, Flyg J, Bergqvist H, 2018.** Stress corrosion testing of copper in sulfide solutions. SKB TR-17-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Flyg J, Bergqvist H, 2019.** Stress corrosion testing of copper in near neutral sulfide solutions. SKB TR-19-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thorne M, Kautsky U, 2016.** Report on a workshop on toxicants other than radionuclides in the context of geological disposal of radioactive wastes. SKB P-16-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thorsell P-E, 2013.** Studier av frysningssegenskaper hos betong från 1 BMA. SKB P-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thunehed H, 2017.** Compilation and evaluation of earth current measurements in the Forsmark area. SKB R-14-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thunehed H, 2018.** Measurements of potential fields caused by earth currents and estimation of the bulk electric resistivity between deep boreholes at Forsmark. SKB P-18-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thörn J, 2015.** The impact of fracture geometry on the hydromechanical behaviour of crystalline rock. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Tissot H, Wang C, Halldin Stenlid J, Panahi M, Kaya S, Soldemo M, Ghadami Yazdi M, Brinck T, Weissenrieder, 2019.** Interaction of atomic hydrogen with the $\text{Cu}_2\text{O}(100)$ and (111) surfaces. *Journal of Physical Chemistry C*. doi:10.1021/acs.jpcc.9b03888

- Tiwari T, Lidman F, Laudon H, Lidberg W, Ågren A M, 2017.** GIS-based prediction of stream chemistry using landscape composition, wet areas, and hydrological flow pathways. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122, 65–79.
- Tobin S J, Fugate M L, Trelle H R, DeBaere, P, Sjöland A, Liljenfeldt H, Hu J, Backstrom, U, Bengtsson M, Burr T, Eliasson A, Favalli A, Gauld I, Grogan B, Jansson P, Junell H, Schwabach, P, Vaccaro S, Vo D T, Wildestrand H, 2016.** Nondestructive assay data integration with the SKB-50 assemblies –FY16 Update. LA-UR-16-28290. Los Alamos National Laboratory.
- Trincherio P, Painter S, Ebrahimi H, Koskinen L, Molinero J, Selroos J-O, 2016.** Modelling radionuclide transport in fractured media with a dynamic update of K_d values. *Computers & Geosciences* 86, 55–63.
- Trincherio P, Molinero J, Deissmann G, Svenson U, Gylling B, Ebrahimi H, Hammond G, Bosbach D, Puigdomenech I, 2017a.** Implications of grain-scale mineralogical heterogeneity for radionuclide transport in fractured media. *Transport in Porous Media* 116, 73–90.
- Trincherio P, Puigdomenech I, Molinero J, Ebrahimi H, Gylling B, Svensson U, Bosbach D, Deissmann G, 2017b.** Continuum-based DFN-consistent numerical framework for the simulation of oxygen infiltration into fractured crystalline rocks. *Journal of Contaminant Hydrology* 200, 60–69.
- Trincherio P, Ebrahimi H, Colas E, Fernández-García D, 2018a.** Assessing nickel and molybdenum transport in the bedrock at SFL using a dynamic K_d approach. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-17-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Trincherio P, Molinero J, Ebrahimi H, Puigdomenech I, Gylling B, Svensson U, Bosbach D, Deissmann G, 2018b.** Simulating oxygen intrusion into highly heterogeneous fractured media using high performance computing. *Mathematical Geosciences* 50, 549–567.
- Trincherio P, Sidborn M, Puigdomenech I, Svensson U, Ebrahimi H, Molinero J, Gylling B, Bosbach D, Deissmann G, 2019.** Transport of oxygen into granitic rocks: Role of physical and mineralogical heterogeneity. *Journal of Contaminant Hydrology* 220, 108–118.
- Tryggvason A, Linde N, 2006.** Local earthquake (LE) tomography with joint inversion for P- and S-wave velocities using structural constraints. *Geophysical Research Letters* 33. doi:10.1029/2005GL025485|
- Tröjbom M, Grolander S, Rensfeldt V, Nordén S, 2013.** K_d and CR used for transport calculations in the biosphere in SR-PSU. SKB R-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vaccaro S, Gauld I C, Hu J, De Baere P, Peterson J, Schwabach P, Smejkal A, Tomanin A, Sjöland A, Tobin S, Wiarda D, 2018.** Advancing the Fork detector for quantitative spent nuclear fuel verification. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 888, 202–217.
- Van As D, Hasholt B, Ahlström A P, Box J E, Cappelen J, Colgan W, Fausto R S, Mernild S H, Mikkelsen A B, Noël B P Y, Petersen D, Van den Broeke M R, 2018.** Reconstructing Greenland Ice Sheet meltwater discharge through the Watson River (1949–2017). *Arctic, Antarctic, Alpine Research* 50. doi:10.1080/15230430.2018.1433799
- van den Bos B, 2018.** Pre study of eddy current testing to detect forging laps on copper lids. SKBdoc 1531045 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vaughan D G, Comiso J C, Allison I, Carrasco J, Kaser G, Kwok R, Mote P, Murray T, Paul F, Ren J, Rignot E, Solomina O, Steffen K, Zhang T, 2013.** Observations: Cryosphere. I IPCC. *Climate Change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Veikkolainen T, Kukkonen I T, Näslund J-O, 2019.** Radiogenic heat production analysis of Fennoscandian Shield and adjacent areas in Sweden. *Geophysical Journal International* 218, 640–654.
- Vestøl O, Ågren J, Steffen H, Kierulf H, Tarasov L, 2019.** NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *Journal of Geodesy.* doi: 10.1007/s00190-019-01280-8

- Vidstrand P, 2017.** Concept testing and site-scale groundwater flow modelling of the ice sheet marginal-area of the Kangerlussuaq region, Western Greenland. SKB R-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- von Schenck H, 2018.** Thermal evolution of the repository – the effect of heat generating waste. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-18-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- von Schenck H, Bultmark F, 2014.** Effekt av bitumensvällning i silo och BMA. SKB R-13-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- von Schenck H, Kautsky U, Gylling B, Abarca E, Molinero J, 2015.** Advancing the modelling environment for the safety assessment of the Swedish LILW repository at Forsmark. MRS Online Proceedings Library 1744, 223–228.
- von Schenck H, Åstrand P-G, Abarca E, Sampietro D, 2018.** Inverkan av återfyllnads-material på grundvattenflöde och radionuklidtransport i 2BMA. SKBdoc 1601117 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Voutilainen M, Sammaljärvi J, Muuri E, Donnard J, Duval S, Siitari-Kauppi M, 2018.** Digital autoradiography on C-14-labelled PMMA impregnated rock samples using the BeaverTM. MRS Advances 3, 1161–1166.
- Walke R C, Kirchner G, Xu S, Dverstorp B, 2015.** Post-closure biosphere assessment modelling: comparison of complex and more stylised approaches. *Journal of Environmental Radioactivity* 148, 50–58.
- Walke R, Limer L, Shaw G, 2017.** In-depth review of key issues regarding biosphere models for specific radionuclides in SR-PSU. I SSM's external expert's review of SKB's safety assessment SR-PSU – dose assessment, K_d -values and safety analysis methodology. SSM rapport 2017:33, Strålsäkerhetsmyndigheten, del 2.
- Wallin M B, Campeau A, Audet J, Bastviken D, Bishop K, Kokic J, Laudon H, Lundin E, Löfgren S, Natchimuthu S, Sobek S, Teutschbein C, Weyhenmeyer G A, Grabs T, 2018.** Carbon dioxide and methane emissions of Swedish low-order streams—a national estimate and lessons learnt from more than a decade of observations. *Limnology and Oceanography Letters* 3, 156–167.
- Weber J, 2017.** Fundamental insights into the radium uptake into barite by atom probe tomography and electron microscopy. Doktorsavh. Forschungszentrum Jülich GmbH. (FZ Jülich Energy & Environment 367)
- Weber J, Barthel J, Brandt F, Klinkenberg M, Breuer U, Kruth M, Bosbach D, 2016.** Nano-structural features of barite crystals observed by electron microscopy and atom probe tomography. *Chemical Geology* 424, 51–59.
- Weber J, Barthel J, Klinkenberg M, Bosbach D, Kruth M, Brandt F, 2017.** Retention of ^{226}Ra by barite: The role of internal porosity. *Chemical Geology* 466, 722–732.
- Wekerle C, Colleoni F, Näslund J-O, Brandefelt J, Masina S, 2016.** Numerical reconstructions of the penultimate glacial maximum Northern Hemisphere ice sheet: sensitivity to climate forcing and model parameters. *Journal of Glaciology* 62, 607–622.
- Wessely O, Shahkarami P, 2019.** Development of radionuclide transport models for the near-field. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Winberg A, 2010.** Säkerhetsrelaterade platsegenskaper – en relativ jämförelse av Forsmark med referensområden med avseende på säkerhetsrelaterade platsegenskaper. SKB R-10-63, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wohlfarth B, 2013.** A review of Early Weichselian climate (MIS 5d-a) in Europe. SKB TR-13-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wohlfarth B, Muschitiello F, Greenwood S L, Andersson A, Kylander M, Smittenberg R H, Steinthorsdottir M, Watson J, Whitehouse N J, 2017.** Hässeldala – a key site for Last Termination climate events in northern Europe. *Boreas* 46, 143–161.

- Wohlfarth B, Luoto T P, Muschitiello F, Väiliranta M, Björck S, Davies S M, Kylander M, Ljung K, Reimer P J, Smittenberg R H, 2018.** Climate and environment in southwest Sweden 15.5–11.3 cal. ka BP. *Boreas* 47, 687–710.
- Wold S, 2014.** Are colloids released from different materials in SFR to the saturating groundwater? KTH. SKBdoc 1466123 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wood M D, Beresford N A, Howard B J, Copplestone D, 2013.** Evaluating summarised radionuclide concentration ratio datasets for wildlife. *Journal of Environmental Radioactivity* 126, 314–325.
- Wright P J, Harper J T, Humphrey N F, Meierbachtol T W, 2016.** Measured basal water pressure variability of the western Greenland Ice Sheet: Implications for hydraulic potential. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121, 1134–1147.
- Wu M, Behazin M, Nam J, Keech P, 2019.** Internal corrosion of used fuel container. NWMO-TR-2019-02, Nuclear Waste Management Organisation, Canada.
- Yang H, Cui D, Grolimund D, Rondinella V V, Brüttsch R, Amme M, Kutahyali C, Wiss A T, Puranen A, Spahiu K 2017.** Reductive precipitation of neptunium on iron surfaces under anaerobic conditions. *Journal of Nuclear Materials* 496, 109–116.
- Yanagisawa O, Lui T S, 1983.** Influence of the structure on the 673 K embrittlement of ferritic spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 24, 858–867.
- Yang Q, Toijer E, Olsson P, 2019.** Analysis of radiation damage in the KBS-3 canister materials. SKB TR-19-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Zickfeld K, Herrington T, 2015.** The time lag between a carbon dioxide emission and maximum warming increases with the size of the emission. *Environmental Research Letters* 10, 031001. doi:10.1088/1748-9326/10/3/031001
- Åkerblom E, 2015.** Analys av Tc-99 och I-129 på vattenprov. N-15/337, Studsvik Nuclear AB. SKBdoc 1522753 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, 2018.** Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Gas tightness test. SKB P-17-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Börgesson L, Sandén T, Goudarzi R, 2019.** Vapor transport in bentonite. Laboratory investigations and theoretical study. SKBdoc 1712120 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Öhrling C, Peterson G, Mikko H, 2018.** Detailed geomorphological analysis of LiDAR derived elevation data, Forsmark. Searching for indicatives of late- and postglacial seismic activity. SKB R-18-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Förkortningar

0AVF	Gemensam avfallsanläggning på Oskarshamnsverket.
ABM	Alternativa buffertmaterial. Experiment i Äspölaboratoriet där möjliga buffertmaterial undersöks.
Alara	As low as reasonably achievable. Begränsning av stråldoser så långt detta rimligen kan åstadkommas med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhällsliga faktorer.
AM	Aktivt mellanlager vid Studsvik.
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Frankrike.
Asha	Indisk bentonit från Kutch-regionen.
ATB	Avfallstransportbehållare.
ATB 1T	En ny behållare för transport av långlivat låg- och medelaktivt avfall i BFA-tankar.
B1	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 1.
B2	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 2.
Beacon	Bentonite mechanical evolution. EU-projekt.
Belbar	Bentonite erosion: effects on the long term performance of the engineered barrier and radionuclide transport. EU-projekt.
BFA	Bergrum för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall på Simpevarpshalvön i Oskarshamn.
BHA	Bergssal för historiskt avfall i SFL.
BHK	Bergssal för hårdkomponenter i SFL.
BKAB	Barsebäck Kraft AB.
BLA	Bergssal för lågaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för lågaktivt avfall (1BLA) och ytterligare fyra bergssalar (2–5BLA) planeras i den utbyggda delen av SFR.
BMA	Bergssal för medelaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för medelaktivt avfall (1BMA) och ytterligare en bergssal (2BMA) planeras i den utbyggda delen av SFR.
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Ministerium ansvarigt för atomenergi i Tyskland.
BTF	Betongtankförvar i SFR, främst avsett för avvattnad jonbytarmassa.
Brie	Bentonite Rock Interaction. Experiment vid Äspölaboratoriet.
BUND	Business Unit Nuclear Decommissioning inom Vattenfall.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor. Reaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och reaktor 1 i Ringhals är kokvattenreaktorer.
Calcigel	Bentonit från Tyskland.
CEC	Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet.
CEMI	Centre for excellence in mining Innovation. Kanada.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle.
Comsol	Beräkningsverktyg för modellering och simulering av komplexa fysikbaserade system. Comsol Inc.
Covra	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval. Organisation med ansvar för radioaktivt avfall i Nederländerna.
CR	Koncentrationsfaktorer.
CSH	Kalciumsilikathydrat.
DBD	Deponering i djupa borrhål.

DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverk.
Disco	Modern spent fuel dissolution and chemistry in failed container conditions. EU-projekt.
DOC	Dissolved organic carbon. Löst organiskt kol.
DOE	U.S. Department of Energy. Amerikanska energidepartementet.
Domplu	Dome plug experiment. Fullskaletest i Äspölaboratoriet för att testa och demonstrera det kompletta pluggsystemet.
ELR	Kategorisering av förorening – extremt liten risk för förorening.
EmrasII	Environmental Modelling for Radiation Safety. IAEA-projekt.
Enresa	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall samt avveckling av kärnkraftverken i Spanien.
Erica	Environmental risk from ionising contaminants. Beräkningsverktyg för att analysera biologiska effekter av joniserande strålning i livsmiljöer och ekosystem.
ESS	European Spallation Source. Spallationsanläggning i Lund som byggs, ägs och drivs av ett europeiskt konsortium för forskningsinfrastruktur (ERIC).
Eurad	European Joint Research Programme on Radioactive Waste Management. EU-program.
F1	Kärnkraftsreaktor Forsmark 1.
F2	Kärnkraftsreaktor Forsmark 2.
F3	Kärnkraftsreaktor Forsmark 3.
FEP	Features, events and processes. Egenskaper, händelser och processer som kan påverka säkerheten efter förslutning av ett slutförvar.
F-PSAR	Förberedande preliminär säkerhetsredovisning.
FSW	Friction stir welding. Friktionssvetsning.
GAP	Greenland Analogue Project.
GIA	Glacial isostatic adjustment.
GIS	Geographic information system. Geografiskt informationssystem.
GPR	Ground Penetrating Radar. Georadar.
Grasp	Greenland Analogue Surface Project.
HM	Hydromekaniska egenskaper, faktorer eller processer.
HPC	High performance computing. Högpresterande databehandling.
IAEA	Internationella kärnenergiorganet.
ICE	Greenland ICE project. Glacialhydrologisk studie som kompletterar studierna i GAP.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change. Förenta nationernas klimatpanel.
ISA	Isosaccharinsyra.
ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) vilka kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
Kaeri	Korea Atomic Energy Research Institute. Kärntekniskt forskningsinstitut i Sydkorea.
KBS-3-metoden	KBS-3-metoden har fått sitt namn då den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet.
KBS-3H	KBS-3-metoden med horisontell deponering.
K_d	Sorptionskoefficient, fördelningskoefficient.
KSU	Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB.
KTB	Transportbehållare för kapslar med använt kärnbränsle.
KTH	Kungliga Tekniska högskolan.
KTL	Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen).

LOT	Long term test of buffer material. Experiment i Äspölaboratoriet med syfte att ta reda på hur i första hand bentonitlera uppför sig vid förhållanden som liknar dem i ett slutförvar för använt kärnbränsle.
LTDE-SD	Long term diffusion experiment – Sorption-diffusion. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet.
LVDT	Linear Variable Differential Transformer.
Marfa	Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field. Beräkningsverktyg för modellering av radionuklidtransport.
MikeShe	Beräkningsverktyg för modellering av hydrogeologi och yhydrologi.
Mind	Microbiology In Nuclear waste Disposal. EU-projekt.
MiniCan	Miniature Canister Corrosion Experiment. Experiment i Äspölaboratoriet.
Mirarco	Mining Innovation Rehabilitation and Applied Research Corporation. Kanada.
MIS	Marina isotopstadier.
MMD	Mark- och miljödostolen.
Modaria	Modelling and Data for Radiological Impact Assessments. IAEA-projekt.
Modern2020	Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal. EU-projekt.
MoFrac	Beräkningsverktyg för DFN-modellering.
Mox	Mixed oxide fuel. Blandoxidbränsle.
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming, USA.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Schweiz.
NEA	Nuclear Energy Agency. Ett samarbetsorgan för kärnenergifrågor inom OECD.
NRC	United States Nuclear Regulatory Commission.
NWMO	Nuclear Waste Management Organization. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Kanada.
O1	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 1.
O2	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 2.
O3	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 3.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OKG	OKG Aktiebolag.
Ondraf/Niras	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Belgien.
Onkalo	Den berganläggning som Posiva uppför på Olkiluoto sedan 2004. Onkalo används för forskning och utveckling, men planeras också utgöra tillfarten till själva slutförvaret.
PAN	Polyakrylonitril.
PhreeqC	Beräkningsverktyg för transport- och geokemimodellering.
Posiva	Posiva Oy. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Finland.
PPC	Project Performance Center inom Uniper.
PSAR	Preliminär säkerhetsredovisning.
Puram	Public Limited Company for Radioactive Waste Management. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Ungern.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor. Reaktorer R2, R3 och R4 i Ringhals samt Ågestareaktorn är tryckvattenreaktorer.
R1	Kärnkraftsreaktor Ringhals 1.
R2	Kärnkraftsreaktor Ringhals 2.

R3	Kärnkraftsreaktor Ringhals 3.
R4	Kärnkraftsreaktor Ringhals 4.
RCP	Representative Concentration Pathways. Scenarier över tänkbara framtida koncentrationer av växthusgaser i atmosfären, vilka ger olika fall för hur mycket växthuseffekten kan komma att förstärkas.
Redox	En redoxreaktion är en kemisk reaktion där ett ämne reduceras samtidigt som ett annat ämne oxideras.
RK&M	Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations. Avslutat projekt inom OECD/NEA.
RWM	Radioactive Waste Management. Organisation med ansvar för omhändertagande av radioaktivt avfall i Storbritannien.
RWMC	Radioactive Waste Management Committee. OECD/NEA.
SAR	Säkerhetsredovisning.
Scale	Beräkningsverktyg för kriticitet- och resteffektberäkningar.
Scip	Studsvik Cladding Integrity Project. Projekt lett av OECD/NEA och Studsvik.
SFL	Slutförvaret för långlivat avfall.
SFR	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SNSN	Svenska nationella seismiska nätet.
SRM	Synthetic rock mass. Modell av en bergvolym med en sannolik fördelning av sprickor i olika skalor.
SR-PSU	Redovisning av säkerhet efter förslutning inför SFR-utbyggnad. Publicerad i augusti 2015.
SR-Site	Redovisning av säkerhet efter förslutning av Slutförvaret för använt kärnbränsle, publicerad av SKB i mars 2011. Site efter engelskans "site" (plats).
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling.
STF	Säkerhetstekniska driftförutsättningar.
Sture	Säker och Trygg Utfasning av Reaktor 1 och 2 (Ringhals)
Surao	Správa úložišť radioaktivních odpadů. Myndighet/organisation med ansvar för radioaktivt avfall i Tjeckien.
Suus	Säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen.
Task Force GWFTS	Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om grundvattenflöde och transport av lösta ämnen i berget.
Task Force EBS	Task Force on Engineered Barrier Systems. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om de tekniska barriärerna i det framtida slutförvaret.
TBS	Typbeskrivningsspecifikationer.
THM	Termiska, hydrauliska, mekaniska (egenskaper, faktorer eller processer).
TURVA-2012	Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle i Olkiluoto, Finland. Publicerad av Posiva 2012.
UFM	Nearly universal fracture model. Metod för att generera ett spricknätverk vid modellering av en bergvolym.
WAC	Waste acceptance criteria. Acceptanskriterier för avfall.
WP-cave	Ett koncept för ett kompakt geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle som tidigare föreslagits som alternativ till KBS-3-metoden.
XRD	X-ray diffraction. Röntgendiffraktion.

