

September 2016



Fud-program 2016

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 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1104-8395

ID 1547070

September 2016

Fud-program 2016

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

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

© 2016 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 det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet från kärnkraftsreaktorerna. Enligt kärntekniklagen ska tillståndshavarna till de svenska reaktorerna vart tredje år utarbeta ett 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 Fud-programmen och lämna in dem till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). SKB presenterar nu Fud-program 2016 som tagits fram i samverkan med kärnkraftsföretagen för att uppfylla kärntekniklagens krav.

Inför Fud-program 2016 har samrådsmöten med SSM genomförts med syfte att säkerställa att de villkor som regeringen i sitt beslut om Fud-program 2013 ställt på Fud-program 2016 uppfylls. SSM har presenterat sina förväntningar på Fud-program 2016 i en promemoria vilken också har diskuterats vid dessa samråd. Vid utarbetandet av Fud-program 2016 har SKB beaktat de synpunkter som framförts vilket är en av anledningarna till en förändrad struktur på programmet jämfört med tidigare Fud-program. Den nya strukturen inkluderar en utvecklad handlingsplan för verksamheten vilken möjliggör att forsknings- och utvecklingsinsatser motiveras utifrån behoven för anläggningar och slutförvar. Vidare redovisas avvecklingsfrågor i en egen del.

Inför Fud-program 2016 är situationen dessutom speciell med två samtidigt pågående tillstånds-ärenden i Mark- och miljödomstolen samt hos SSM, ett för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle och ett för utbyggnaden av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR. För att undvika dubbel redovisning görs i föreliggande Fud-program, vid behov, hänvisningar till ansökningar eller andra redovisningar som lämnats till SSM eller Mark- och miljödomstolen.

Parallellt med dessa tillståndsprocesser bedriver SKB fortsatt forskning och teknikutveckling som behövs för att kunna projektera, uppföra och driva KBS-3-systemet och det utbyggda SFR på ett rationellt sätt samtidigt som krav på säkerhet efter förslutning, låg stråldos vid drift av anläggningarna samt begränsad påverkan på yttre miljö uppfylls. Framdriften av pågående tillståndsprövningar och det som där framkommer inklusive eventuella tillståndsvillkor kan komma att påverka SKB:s tidsplaner och prioriteringar av forskning och utveckling under de kommande åren. I det sammanhanget bör det noteras att SKB i Fud-program 2016 inte fullt ut hunnit värdera och inarbeta de synpunkter som SSM framfört i sitt yttrande om KBS-3-ansökan till Mark- och miljödomstolen i juni 2016.

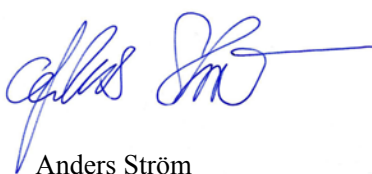
Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, är det förvar som planeras att tas i drift sist. För att kunna omhänderta det långlivade avfallet pågår den utveckling och forskning som bedöms krävas för att detta arbete ska kunna fortskrida enligt plan.

När det gäller avveckling av kärntekniska anläggningar presenteras i detta program de åtgärder för nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorer samt det utvecklingsarbete som planeras.

Stockholm i september 2016
Svensk Kärnbränslehantering AB



Christopher Eckerberg
Vd



Anders Ström
Beställare Fud-program 2016

Sammanfattning

Det svenska systemet för att ta hand om radioaktivt avfall delas in i två huvuddelar, en för det låg- och medelaktiva avfallet och en för det använda kärnbränslet. Mellanlagret för använt kärnbränsle (Clab), och Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), har tillsammans med transportsystemet varit i drift sedan 1980-talet. Andra anläggningar och anläggningsdelar återstår att bygga. Samtidigt pågår planering och utveckling av metoder för avveckling av kärnkraftsreaktorer.

I Fud-program 2016 presenterar tillståndshavarna för de svenska kärnkraftreaktorerna och SKB sina planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2017–2022. Fud-program 2016 har en ny struktur jämfört med Fud-program 2013, för att uppfylla de villkor regeringen ställt på att motiven för de planerade insatserna tydligt ska framgå samt att redovisningen för avveckling utvecklas. Samråd har genomförts med Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) avseende avvecklingsplaneringen och programmets nya struktur.

Fud-program 2016 består av fyra delar:

- Del I Verksamhet och handlingsplan
- Del II Avfall och slutförvaring
- Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar
- Del IV Övriga frågor

I del I beskrivs verksamhet och handlingsplan för att ta hand om och slutförvara radioaktivt avfall och använt kärnbränsle från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Utgående från handlingsplanen motiveras och sammanfattas de planerade insatserna inom forskning och teknikutveckling 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 II beskrivs planerade forsknings- och teknikutvecklingsinsatser under denna Fud-period. 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 slutförvararen. Nulägesbeskrivningen av kunskapsläget redovisas översiktligt och hänvisar till mer detaljerad resultatredovisning i underlagsrapporter.

I del III presenteras planeringen för avvecklingen av kärnkraftsreaktorerna och SKB:s anläggningar liksom de beroenden och den flexibilitet som finns i systemet samt det utvecklingsarbete som planeras.

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

Del I Verksamhet och handlingsplan

Den svenska kraftindustrin har under drygt 50 år producerat elektricitet med kärnkraft. Under denna tid har en stor del av det system som behövs för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och det radioaktiva avfallet från driften av reaktorerna, byggts upp.

De anläggningar som är i drift i det svenska systemet i dag är Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), lokala markförvar vid kärnkraftverken samt fartyget m/s Sigrid. I föreliggande program ges en översiktlig beskrivning av dessa. SKB och kärnkraftverken har i egenskap av tillståndshavare för anläggningarna i drift skyldighet att för var och en av dem lämna olika redovisningar till SSM som inte redogörs för i detta Fud-program.

För det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet återstår att bygga och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. I detta ingår en ny anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet i anslutning till Clab (den integrerade anläggningen benämns Clink), behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och ett slutförvar för kapslar med använt kärnbränsle.

För omhändertagande av det låg- och medelaktiva avfallet behöver SFR byggas ut, ytterligare ett slutförvar – Slutförvaret för långlivat avfall (SFL) etableras och behållare för transporter av långlivat avfall anskaffas. Vidare behöver kärnkraftverkens avfallshantering anpassas så att avvecklingsprojekt kan genomföras enligt plan.

Planeringsförutsättningar

Inför Fud-program 2016 har förutsättningarna ändrats med två samtidigt pågående tillståndsärenden i Mark- och miljödomstolen och hos SSM, ett för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle och ett för utbyggnaden av SFR för drift- och rivningsavfall. För att undvika dubbel redovisning görs i föreliggande Fud-program, vid behov, hänvisningar till ansökningar eller andra redovisningar som lämnats till Mark- och miljödomstolen eller SSM.

Under 2015 har dessutom beslut fattats om en förtida avställning av fyra reaktorer (Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 och Ringhals 2). Det medför att den totala mängden bränsle som ska tas om hand inom ramen för kärnavfallsprogrammet minskar. Dock kommer en större mängd bränsle tidigare till Clab i samband med att sluthärdarna från de fyra reaktorerna transporteras dit. En annan konsekvens är att nedmontering och rivning av sju reaktorer kommer att påbörjas, innan SFR-utbyggnaden tagits i drift. Detta innebär att större mängder radioaktivt avfall behöver mellanlagras av kärnkraftverken. Belastningen på transportsystemet kommer att öka när SFR-utbyggnaden och Kärnbränsleförvaret tas i drift.

Stegvis process

Vid etablering av nya anläggningar utgår SKB i sin planering från den stegvisa beslutsprocess som har sin grund i kärntekniklagen och SSM:s föreskrifter. Förfarandet innebär att SKB successivt behöver lämna allt mer detaljerade säkerhetsredovisningar till SSM.

- Först ska *ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken* om att få uppföra, inneha och driva anläggningen lämnas in till SSM respektive Mark- och miljödomstolen. Regeringen beslutar om tillåtlighet och tillstånd varefter villkor för verksamheten fastställs av SSM respektive domstolen.
- *Innan en kärnteknisk anläggning får uppföras* ska en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) godkännas av SSM.
- När system och processer i anläggningen prövats och fungerar som avsett ska säkerhetsredovisningen (SAR) förnyas. När SSM godkänt denna redovisning kan *provdrift* påbörjas. Innan en anläggning kan tas i *rutinmässig drift* ska säkerhetsredovisningen kompletteras med erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM.

Plan för genomförande

Stora osäkerheter finns i både KBS-3-systemets och SFR-utbyggandens tidsplaner, särskilt under tillståndsskedet då SKB inte styr händelseutvecklingen. Inte desto mindre har SKB en genomarbetad plan för genomförande utifrån aktuella förutsättningar.

Tillståndsprövningarna för KBS-3-systemets delar för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle pågår. SKB har besvarat frågor och begäranden om kompletteringar till både SSM och Mark- och miljödomstolens remissinstanser. Kungörelse av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen gjordes i januari 2016. SSM lämnade sitt yttrande i miljöbalksärendet till Mark- och miljödomstolen i juni 2016. SKB tar nu fram erforderliga underlag så att PSAR för Kärnbränsleförvaret och Clink kan lämnas till SSM under Fud-perioden.

Det använda kärnbränslet mellanlagras i dag i Clab. Under den tid det tar att uppföra och driftsätta inkapslingsdelen kommer den mängd använt kärnbränsle som behöver mellanlagras i anläggningen att överstiga den tillståndsgivna mängden på 8 000 ton. SKB har därför, som en del av ansökan om att uppföra och driva Clink, även ansökt om att öka mellanlagringskapaciteten till 11 000 ton. Under Fud-perioden planerar SKB att lämna in en PSAR för Clab med mellanlagringskapacitet på 11 000 ton till SSM.

SKB lämnade 2014 in ansökningar om tillstånd enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att bygga ut SFR för att kunna deponera tillkommande kortlivat drift- och rivningsavfall. Tillståndsprövningen pågår och SKB besvarar frågor och begäranden om kompletteringar. Nästa steg är att ta fram de underlag som behövs för en PSAR för det utbyggda SFR, vilken lämnas till SSM under Fud-perioden.

Kärnbränsleförvaret och det utbyggda SFR bedöms kunna tas i drift omkring 2030.

SFL är det förvar som planeras att tas i drift sist. Fram till drifttagning finns det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom säkerhetsutvärdering av förvarskonceptet, val av plats, analys av säkerheten efter förslutning, framtagning av ansökningar och själva uppförandet. SKB planerar att lämna in tillståndsansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att få uppföra, inneha och driva SFL för att det ska kunna tas i drift omkring 2045.

Fortsatt forskning och teknikutveckling

SKB:s och tillståndshavarnas planering av framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för slutförvaren utgår från den stegvisa beslutsprocessen. 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.

SKB har som en del av ansökningarna om tillstånd till att uppföra Kärnbränsleförvaret, inkapslingsdelen av Clink och utbyggnaden av SFR gjort samlade redovisningar av kunskapsläge och status på teknikutveckling. I samband med det har även betydelsen av kvarstående osäkerheter, vad gäller att kunna uppfylla kraven på skydd av människor och miljö mot strålning efter förslutning av förvaren, utvärderats. För SFL har en konceptstudie genomförts och ett koncept valts för vilket en säkerhetsutvärdering nu pågår. Den planeras bli klar 2018 och utfallet kommer att klargöra behovet av framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för SFL.

Dessa redovisningar ligger, tillsammans med de synpunkter som lämnats i samband med prövningen av ansökningarna samt granskningar av tidigare Fud-program, till grund för planerade insatser avseende forskning och teknikutveckling inom olika ämnesområden. 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 komponenter som ingår i systemet.
- Behov av kunskap och kompetens av kontroll och provning för att verifiera att barriärer och komponenter produceras och installeras enligt godkända specifikationer och därmed uppfyller kraven.

Dessutom behövs mer kunskap om inventariet för det låg- och medelaktiva avfallet, egenskaperna hos det använda kärnbränslet och utveckling av teknik för hantering av både avfall och använt kärnbränsle.

Utifrån detta har den forskning och teknikutveckling som behövs för att lösa förvarens utformnings- och konstruktionsfrågor, samt den forskning som behövs för att genomföra analys av förvarens säkerhet efter förslutning, kunnat identifieras och motiveras.

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. Här presenteras behovet av den forskning och utveckling som identifierats för de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet.

Det låg- och medelaktiva avfallet

Forskningen kring det låg- och medelaktiva avfallet görs för att få en fördjupad processförståelse för avfallet som ska slutförvaras i SFR eller SFL. Forskningen omfattar nedbrytning av organiska material, gasbildning och effekter av svällande material. Hantering och konditionering av framför allt det långlivade låg- och medelaktiva avfallet ska utvecklas under perioden, och inför hanteringen och konditioneringen behöver preliminära acceptanskriterier för långlivat avfall formuleras .

Inför avveckling av kärnkraftsreaktorer behöver avfallsbehållare och avfallstransportbehållare utvecklas för det långlivade avfallet. Teknikutveckling för hantering av reaktortankar och andra stora komponenter planeras genomföras. Kunskapen om radionuklidinventariet för respektive slutförvar behöver fördjupas för att minska de osäkerheter som finns i prognoser för avfallsmängder och innehåll av radionuklider i avfallskollin. Särskilda insatser görs för de nuklider som är svåra att mäta, men som på ett avgörande sätt bidrar till den radiologiska risken efter förslutning av förvaren.

Det använda kärnbränslet

Programmet för forskning och teknikutveckling avseende det använda kärnbränslet omfattar såväl insatser för bättre processförståelse som utveckling av teknik och kontrollmetoder för hantering av bränslet.

Om en kapsel skulle bli otät och vatten tränga in är bränslets egenskaper avgörande för om och när det kan frigöras radioaktiva ämnen. Generellt löser bränslet upp sig mycket långsamt, vilket fördröjer spridning av radioaktiva ämnen. Bränslets förmåga att lösa upp sig och framför allt den hastighet som det sker med, är central för utvärderingen av förvarets säkerhet efter förslutning. Till exempel behövs upplösningsdata för nya typer av så kallat dopat bränsle och för högutbränt bränsle. Den andel radionuklider som inte ligger inbäddad i bränslematrisen och därmed snabbt kan frigöras, behöver kvantifieras och upplösning av metalldelar i bränsleelement och styrstavar behöver studeras vidare. Dessutom behövs djupare förståelse för speciering och löslighet av frigjorda radionuklider i en skadad, vattenfylld kapsel.

Programmet avseende hantering av bränsle omfattar flera delar, från krav på information om bränslets egenskaper innan det används till att utforma ett program för kärnämneskontroll som är internationellt godkänt. Under de kommande åren ska fortsatta utredningar göras om hur information om det använda kärnbränslet bäst kan hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet. Skadat bränsle och udda bränsletyper kräver särskild hantering i en eller flera separata processer inför slutförvaringen, vilket fordrar fortsatt utveckling. Utvecklingsarbetet innefattar även resteffektsbestämning och kriticitetsverifieringar för samtliga anläggningar och transporter som ingår i KBS-3-systemet.

Kapsel

I Kärnbränsleförvaret är kopparkapseln den inneslutande barriären. Fortsatt arbete rör såväl forskning kring kopparkapseln 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 kräver fortsatta insatser. Sulfid är den långsiktigt dominerande kopparkorrodanten i ett KBS-3-förvar. En bättre förståelse för detaljerna kring sulfidkorrosion stärker den vetenskapliga grunden för säkerhetsanalysen. Förståelsen för krypning hos koppark vid mekaniska belastningar är ofullständig. För att kunna förbättra modelleringen av krypning vid utvärderingen av kapseln hållfasthet, behöver bland annat förståelsen stärkas för hur inblandning av fosfor leder till gynnsamma krypegenskaper.

Avseende kapselns konstruktion kommer SKB att förnya design- och defektanalysen baserat på aktuella konstruktionsförutsättningar. Till detta krävs bland annat en uppdaterad materialmodell för kapselns segjärnsinsats. Ytterligare processförståelse behövs för att fastlägga erforderliga krav på väte, syre, svavel och fosfor i kapselkoppar och krav på kopparhalten i insatsens segjärn.

En förutsättning för ett kvalificerat produktionssystem för kapseln är att teknik och metoder för produktion av kapslar finns utvecklade och fungerar i industriell skala. Samma sak gäller teknik och metod för svetsning av kapslar samt för kontroll av kapslar. Den utrustning som ska användas i Clink behöver anpassas till den nukleära miljön där.

Cementbaserade material

Cementbaserade material förekommer i SFR i avfallsmatriser, barriärer och konstruktioner och har också en central funktion i att upprätthålla säkerheten efter förslutning i SFR och i det planerade SFL. Kunskapen om och förmågan att modellera utvecklingen av materialens egenskaper över tid behöver förstärkas inför kommande analyser av säkerheten efter förslutning. Det handlar om förändringar i materialet som orsakas av kemiska processer såsom interaktioner med grundvattnet eller komponenter lösta i grundvattnet, och av den mekaniska processen såsom tryck från svällande material, inre gastryck eller frysning av porvatten i betong.

SKB planerar att genomföra utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och val av material till de olika förvaren. Fokus under denna Fud-period kommer att ligga på utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i bergssalen för medelaktivt avfall i den utbyggda delen av SFR, samt på att utveckla robusta låg-pH-material för pluggar, injekteringsmaterial och bergförstärkning i Kärnbränsleförvaret.

Buffert, återfyllning och förslutning

Lermaterial används i alla tre slutförvaren: som buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret, i silofyllningen i SFR och som barriär i bergssalen för historiskt avfall i SFL. För Kärnbränsleförvaret behöver utformning av buffert, återfyllning och förslutning vidareutvecklas inför den fortsatta projekteringen av såväl slutförvarsanläggningen som produktionssystemet för bentonitkomponenter. Behov av åtgärder för kvalitetssäkring under tillverkning, hantering och installation behöver ytterligare detaljeras.

För utformning av återfyllning i Kärnbränsleförvaret krävs framför allt insatser avseende verifiering av återfyllningens förmåga att begränsa lerbuffertens svällning uppåt i deponeringshålen. Förslutningssekvensen för Kärnbränsleförvaret kommer att utvecklas.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns frågor kring lerbarriärerna som kräver vidare insatser, bland annat kring homogenisering och vattenupptag, erosionsprocesser som kanalbildning och kolloidfrigörelse, mikrobiell sulfatreduktion, mineralstabilitet samt bentonitbarriärernas hydromekaniska egenskaper.

I SFL är interaktionen mellan det cementingjutna avfallet och bentoniten en process som kräver fortsatt arbete. Där kommer också utfallet av säkerhetsvärderingen att ge underlag för att precisera vilka ytterligare insatser som behövs för det fortsatta arbetet. För SFR anses kunskapsläget i huvudsak vara tillfredsställande avseende silofyllningen, medan vissa insatser krävs avseende återfyllningen och förslutning av borrhål.

Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvarsanläggningar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden över den tid som avfallet ska isoleras. För att detta ska uppnås behövs tillgång till metoder för att undersöka och karakterisera berget på en tillräckligt detaljerad nivå. Vidare behöver slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen utformas på ett sådant sätt att de långsiktigt stabila förhållandena inte äventyras, och för att kunna utvärdera säkerhet efter förslutning behövs även kunskap om processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaret.

Analysen av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret visar att skjuvrörelser i berget till följd av jordskalv skulle kunna orsaka kapselskador. För att minska den negativa effekten av skalv utvecklar SKB metoder för identifieringen av kritiska strukturer i berget så att deponering av kapslar i anslutning till dessa kan undvikas. Förståelse för skjuvrörelser i berget är också viktig för att kunna ställa tillräckliga krav på kapsels tålighet. Den största kvarvarande osäkerheten rör sambandet mellan jordskalvens frekvens och magnitud och hur dessa varierar under en glaciationscykel. Därför planeras studier av paleoseismiska händelser (förhistoriska jordskalv) och fördjupade studier av mätdata från skalv registrerade av det svenska nationella seismiska nätet. Insatser inom karakterisering och modellering av bergmassans mekaniska egenskaper planeras också, liksom vidare insatser kring klimatets inverkan på processer i geosfären. Särskilda insatser planeras inom DFN-modellering, det vill säga modellering av bergets spricknätverk.

Teknikutveckling inom bergområdet fortsätter under denna Fud-period för att möjliggöra byggstart av Kärnbränsleförvaret. Ett detaljundersökningsprogram med tillhörande modellering ska utarbetas inför uppförandet av förvaret. För detta ska metoder, instrument och modelleringsmetodik tas fram.

En uppdatering av metoder för tunnelproduktion planeras också. Referensmetod för tunnelproduktion av deponeringstunnlar är sprängning men utredningar av alternativa metoder pågår, bland annat för att åstadkomma ett tillräckligt plant tunnelgolv. Metoder för bergutbyggnad behöver vara fastställda inför detaljprojektering av Kärnbränsleförvarets deponeringsområden. De bergarbeten som blir aktuella vid utbyggnaden av SFR kan däremot genomföras med befintlig teknik.

Ytekosystem

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 säkerheten efter förslutning för de olika förvaren. Programmet ger också ytterligare underlag för miljöövervakning, bedömningar av eventuella miljöförändringar och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift.

De viktigaste kvarstående frågorna inom området handlar om upptagsvägar och upptagsmekanismer för olika organismer, temporal och spatial heterogenitet i landskapet, transport- och ackumulationsprocesser samt radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos vissa ämnen. För SFL behöver kompletterande data för vissa radionuklider tas fram innan ansökningar om att uppföra förvaret kan lämnas in.

Klimat och klimatrelaterade processer

Det övergripande syftet med arbetet om klimatfrågor är att presentera vetenskapligt underbyggda scenarier för framtida klimatutveckling som utvärderingen av förvarens säkerhet efter förslutning kan baseras på. Viktiga delar i arbetet är att öka processförståelsen, validera de anpassningar av klimatmodeller som används för att beskriva spännvidden av de klimat som slutförvaren kan komma att utsättas för under kommande 100 000 till 1 miljon år. Frågor som fortsatt behöver studeras handlar bland annat om ålder och stabilitet hos bergrundsytan i Forsmark, paleoklimat under förra istidscykeln och klimatvariationer som utgör övergångar mellan olika klimatdomäner. Ytterligare studier av havsnivåvariationer i närtid och på lång sikt kommer att genomföras, liksom validering av permafrostmodeller.

Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar

Tillståndshavarnas planering för avveckling av kärnkraftsreaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn, Ringhals och Ågesta har vidareutvecklats sedan Fud-program 2013. Detta gäller såväl planerade åtgärder för nedmontering och rivning som strategier för teknikutveckling.

Planeringsförutsättningar

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. De två tillståndprocesser

som styr ett avvecklingsprojekt är: Tillstånd enligt miljöbalken, och godkännande enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen.

Plan för genomförande

I dagsläget befinner sig reaktorerna Barsebäck 1 och Barsebäck 2 i servicedrift och Oskarshamn 2 planeras ej att återstartas efter en tids avställning. Ytterligare tre reaktorer kommer att slutligt ställas av inom de närmaste åren: Oskarshamn 1 i samband med revisionen sommaren 2017 och Ringhals 1 och Ringhals 2 i samband med revisionerna 2020 respektive 2019. Ågesta kärnkraftverk befinner sig sedan 1974 i servicedrift och inriktningen är att kunna inleda nedmonteringen och rivningen senast 2020.

Övriga sex reaktorer planeras att slutligt ställs av efter 60 års drift, vilket innebär att mellan 2040 och 2045 blir det aktuellt med slutlig avställning av tre reaktorer i Forsmark, två i Ringhals och en reaktor i Oskarshamn.

Generellt gäller att tiden för avveckling ska hållas så kort som möjlig, bland annat genom att förbereda så mycket som möjligt inför nedmontering och rivning samt utnyttja samordningseffekter. Den ursprungliga strategin för avvecklingen förutsatte att utbyggnaden av SFR var driftsatt innan nedmontering och rivning påbörjas. Som följd av senareläggning av SFR:s utbyggnad har strategin ändrats och rivningsavfallet kommer att mellanlagras på kärnkraftverken eller externt i väntan på att det kan transporteras till SFR.

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avvecklingsfrågorna både mellan kärnkraftsföretagen, mellan dessa och med SKB och 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 internationella forum är betydelsefulla.

För att effektivisera arbetet med avvecklings- och avfallsfrågor har arbetsområden fördelats mellan olika aktörer på såväl företagsnivå som koncernnivå. De industrigemensamma åtagandena avseende hantering av avfallet koordineras i normalfallet av SKB, medan det inom de två industrikoncernerna, Uniper (reaktorerna i Barsebäck och Oskarshamn) och Vattenfall (reaktorerna i Ringhals och Forsmark samt Ågestareaktorn), varierar något.

Utvecklingsinsatser

Utifrån tidigare genomfört utvecklingsarbete och nuvarande avvecklingsplanering finns behov av ett antal utvecklingsinsatser för att kunna genomföra avvecklingen av de svenska kärnkraftverken på ett säkert och effektivt sätt. Insatserna rör områdena som till stor del är gemensamma för tillståndshavarna och relaterar mer till bränsle- och avfallshantering, tillståndprocesser, logistik, resurser och samordning än till grundforskning och utveckling av ny teknik, även om anpassningar av tillgänglig teknik kommer att behövas. Avvecklingen av de kärntekniska anläggningar som SKB är tillståndshavare för ligger tämligen långt fram i tiden.

Del IV Övriga frågor

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

Bevarande av information och kunskap över generationer

Frågorna om bevarande av information och kunskap om förslutna slutförvar för radioaktivt avfall 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 Kärnbränsleförvaret ska förslutas, vilket beräknas ske tidigast omkring 2085. Det är inte möjligt, varken för SKB, myndigheter eller andra delar av samhället, att i dag definitivt bestämma hur man ska gå tillväga så långt in i framtiden. SKB anser att en meningsfull handlingsplan är att ha ett arbetssätt som syftar till att hålla frågan levande, utveckla arbetet och sprida kunskapen om behovet. SKB deltar bland annat i OECD/NEA:s arbetsgrupp för frågor om hur man kan bevara information och kunskap om slutförvar för radioaktivt avfall över generationer.

Deponering i djupa borrhål

Vid deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål är den viktigaste säkerhetsfunktionen den isolering och fördröjning av radioaktiva ämnen som berget erbjuder. Detta bygger på antagandet att grundvattnet är stagnant på stora djup till följd av att det har hög salthalt och därmed hög densitet vilket motverkar omblandning med det lättare sötvattnet som ligger ovanför. Det stora djupet medför dock nackdelar såsom svårigheter med karakterisering av omgivande berg samt dålig kontroll över hanteringen vid deponering eller eventuellt återtag.

Sedan Fud-program 2013 har SKB i de kompletteringar som lämnats till Mark- och miljödomstolen i tillståndsärendet för Kärnbränsleförvaret, bland annat jämfört deponering i djupa borrhål med deponering enligt KBS-3-konceptet avseende deponeringsprocessen, förslutning och kärnteknisk säkerhet under drift och efter förslutning.

Bedömningen från tidigare Fud-program kvarstår, det vill säga att konceptet deponering i djupa borrhål är i dag inte tillräckligt utvecklat för att utgöra en realistisk metod för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB har dock för avsikt att fortsättningsvis bevaka området och i relevanta sammanhang delta i internationella forum avseende djupa borrhål.

Innehåll

Del I Verksamhet och handlingsplan

1	Introduktion	21
1.1	Förutsättningar	21
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	21
1.1.2	Grundläggande principer	22
1.1.3	Planeringsförutsättningar avseende reaktorernas drift	23
1.1.4	Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet	23
1.2	Program för forskning, utveckling och demonstration	25
1.3	Fud-program 2016 och dess relation till andra redovisningar till SSM	27
1.4	Samverkan med Posiva	29
1.5	Finansiering	29
2	Beskrivning av avfallssystemet	31
2.1	Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall	31
2.1.1	Anläggningar för kortlivat avfall	31
2.1.2	Anläggningar för långlivat avfall	34
2.2	Anläggningar inom KBS-3-systemet	35
2.3	Transportsystemet	39
3	Plan för genomförande	41
3.1	Effekter av förtida avställning	41
3.2	Huvudtidsplan för kärnavfallsprogrammet	41
3.3	Genomförandeplan för låg- och medelaktivt avfall	44
3.3.1	Nuläge	44
3.3.2	Övergripande planering	44
3.3.3	Kortlivat avfall	44
3.3.4	Långlivat avfall	47
3.4	Genomförandeplan för använt kärnbränsle	52
3.4.1	Nuläge	53
3.4.2	Övergripande planering	54
3.4.3	Mellanlagring	55
3.4.4	Inkapsling	56
3.4.5	Transporter av bränsle	58
3.4.6	Slutförvaring	58
3.5	Genomförandeplan för avveckling av kärntekniska anläggningar	60
3.5.1	Översikt avveckling	60
3.5.2	Nuläge och övergripande planering	61
3.6	Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar	62
3.6.1	Kärnkraftsreaktorernas drifttider	62
3.6.2	Drifttagning av det utbyggda Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	63
3.6.3	Mellanlagringskapacitet för låg- och medelaktivt avfall	64
3.6.4	Drifttagning av Slutförvaret för långlivat avfall	64
3.6.5	Lokalisering av Slutförvaret för långlivat avfall	64
3.6.6	Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink	64
3.6.7	Horisontell deponering – KBS-3H	65
4	Arbetsätt, resurser och kompetens	67
4.1	Forskning	67
4.1.1	Mål för forskning	67
4.1.2	Styrning av forskning	67
4.1.3	Strategi	67
4.2	Teknikutveckling	68
4.2.1	Mål för teknikutveckling	68
4.2.2	Styrning av teknikutveckling	69

4.2.3	Teknikutvecklingsprocess	69
4.2.4	Konstruktionsförutsättningar	70
4.2.5	Kvalitetsstyrning och kontroll	71
4.3	Arbetsverktyg	71
4.3.1	Databaser	71
4.3.2	Modell- och beräkningsverktyg	72
4.3.3	Platsmodeller	73
4.3.4	Kvalitetssäkring	73
4.4	Resurser och kompetens	73
4.4.1	Inom SKB	74
4.4.2	Kompetensnätverk och leverantörer	74
4.4.3	Samarbeten	75
4.5	SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	76
4.5.1	Äspölaboratoriet	76
4.5.2	Kapsellaboratoriet	77
4.5.3	Övriga laboratorier	78
5	Fortsatt forskning och teknikutveckling	79
5.1	Framtida insatser	79
5.2	Översikt av respektive slutförvar och Clink	80
5.2.1	Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall	80
5.2.2	Slutförvaret för långlivat avfall	81
5.2.3	Kärnbränsleförvaret och Clink	82
5.3	Det låg- och medelaktiva avfallet	85
5.3.1	Radionuklidinventarium	85
5.3.2	Processförståelse	85
5.3.3	Hantering av det låg- och medelaktiva avfallet	86
5.3.4	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	86
5.4	Det använda kärnbränslet	86
5.4.1	Processförståelse	87
5.4.2	Hantering av det använda kärnbränslet	87
5.4.3	Bränsleinformation, kriticitet och kärnämneskontroll	87
5.5	Kapsel för använt kärnbränsle	88
5.5.1	Processförståelse	88
5.5.2	Konstruktion och tillverkning	88
5.5.3	Kontroll och provning	89
5.6	Cementbaserade material	89
5.6.1	Processförståelse	89
5.6.2	Konstruktion, tillverkning och installation	90
5.7	Buffert, återfyllning och förslutning	91
5.7.1	Processförståelse	92
5.7.2	Konstruktion, tillverkning, installation och kontroll	93
5.8	Berg	94
5.8.1	Processförståelse	95
5.8.2	Produktion, verifiering och kontroll	96
5.9	Ytekosystem	97
5.10	Klimat och klimatrelaterade processer	97
5.11	Avveckling	98
5.12	Övriga frågor	98

Del II Avfall och slutförvaring

6	Det låg- och medelaktiva avfallet	103
6.1	Radionuklidinventarium	103
6.1.1	Referensinventarium	103
6.1.2	Metodutveckling för svärmätbara nuklider	104
6.1.3	Osäkerheter i radionuklidinventariet	105
6.2	Acceptanskriterier för långlivat avfall	106
6.3	Konditionering av långlivat avfall	106

6.3.1	Stabilisering av avfall i ståltankar	106
6.3.2	Omlastning av avfall	107
6.4	Hantering av reaktortankar och stora komponenter	107
6.5	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	108
6.5.1	Avfallsbehållare för avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB	108
6.5.2	Avfallsbehållare för rivningsavfall	108
6.5.3	Avfallstransportbehållare för nya avfallsbehållare	109
6.6	Nedbrytningsprodukter från organiskt material och dess interaktioner med radionuklider	109
6.6.1	Nedbrytningsprodukter från cellulosa	110
6.6.2	Nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedel	110
6.6.3	Nedbrytningsprodukter från cementtillsatsmedel	110
6.7	Korrosion av aluminium och zink	111
6.8	Mikrobiell gasproduktion	111
6.9	Svällande avfall – bitumeningjuten jonbyttarmassa	112
7	Det använda kärnbränslet	113
7.1	Icke-reguljära bränslen	113
7.2	Åldring av bränsle	114
7.3	Resteffekt och bränslemätning	114
7.4	Bränsleinformation	115
7.5	Kriticitet	116
7.6	Kärnämneskontroll	117
7.7	Bränsleupplösning och radionuklidkemi	118
7.7.1	Bränsleupplösning	118
7.7.2	Radionuklidspeciering och lösligheter	120
8	Kapsel	123
8.1	Korrosion	123
8.1.1	Sulfidkorrosion	123
8.1.2	Lokal korrosion	125
8.1.3	Kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten	126
8.1.4	Strålningsinducerad korrosion	127
8.1.5	Spänningskorrosion	128
8.1.6	Verifiering av olika kopparmaterial för korrosionskänslighet	129
8.2	Kopparkrypning	129
8.2.1	Fosfors inverkan	130
8.2.2	Deformation och brott	131
8.3	Konstruktion	132
8.3.1	Designanalys	132
8.3.2	Vätets roll i koppar	134
8.3.3	Krav på maximal kopparhalt i segjärn	135
8.4	Tillverkning	136
8.4.1	Kopparkomponenter	136
8.4.2	Kapselns insats	137
8.4.3	Svetsning	139
8.4.4	Kontroll och provning	140
9	Cementbaserade material	143
9.1	Cementmaterial – utveckling efter förslutning	143
9.1.1	Grundvattenpåverkan	143
9.1.2	Modellering av gastransport	144
9.1.3	Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall	144
9.1.4	Påverkan från korrosion av metalliskt avfall	145
9.1.5	Bentonitens inverkan på cementbaserade material	146
9.1.6	Inverkan av tillsatsmaterial	147
9.1.7	Frysning	148
9.1.8	Inre och yttre laster	149
9.2	Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR	149

9.2.1	Bergssal för medelaktivt avfall	150
9.2.2	Bergssal för reaktortankar	151
9.2.3	System för gastransport	153
9.3	Utformning av betongkonstruktioner och material till SFL	154
9.3.1	Bergssal för hårdkomponenter	154
9.3.2	Kringgjutning av avfallsbehållare	154
9.4	Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret	155
9.4.1	Plugg till deponeringstunnlar	155
9.4.2	Låg-pH-cementmaterial för injektering och bergförstärkning	156
10	Buffert, återfyllning och förslutning	157
10.1	Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad	157
10.1.1	Kanalbildning/erosion	157
10.1.2	Vattenupptag i bufferten	159
10.1.3	Svällning, homogenisering och självläkning	161
10.1.4	Ångcirkulation	164
10.1.5	Mikrobiell sulfidbildning	166
10.2	Bentonitmaterialets egenskaper i mättat tillstånd	167
10.2.1	Materialsammansättning	167
10.2.2	Svälltryck och hydraulisk konduktivitet	168
10.2.3	Skjuvhållfasthet	168
10.3	Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad	170
10.3.1	Buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion	170
10.3.2	Sulfidbildning och sulfidtransport	173
10.3.3	Självläkning av bentonit	174
10.3.4	Långsiktig stabilitet av bentonit	174
10.4	Utformning av barriärer	176
10.4.1	Buffert i Kärnbränsleförvaret	176
10.4.2	Återfyllning i Kärnbränsleförvaret	178
10.4.3	Utformning av lerbarriärer i SFL	178
10.5	Tillverkning samt kontroll och provning av buffert- och återfyllningskomponenter	179
10.5.1	Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial	179
10.5.2	Tillverkning av buffertkomponenter	180
10.5.3	Tillverkning av återfyllningskomponenter	181
10.6	Deponering och installation av buffert och återfyllning	182
10.6.1	Deponering i Kärnbränsleförvaret	182
10.6.2	Buffert	184
10.6.3	Återfyllning	184
10.7	Borrhålsförslutning	185
10.7.1	Kärnbränsleförvaret	185
10.7.2	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	186
10.8	Förslutning	187
10.8.1	Förslutning av Kärnbränsleförvaret	187
10.8.2	Förslutning av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	187
11	Berg	189
11.1	Detaljundersökningar	189
11.1.1	Metodik för detaljundersökningar	190
11.1.2	Kritiska strukturer	190
11.1.3	Modelleringsmetodik inom detaljundersökningar	192
11.2	Tunnelproduktion	192
11.2.1	Injektering	193
11.2.2	Tunneldrivning för deponeringstunnlar	193
11.2.3	Borrning av deponeringshål	194
11.3	Modellering av diskreta spricknätverk	194
11.4	Hydrokemi- och transportmodellering	196
11.5	Koppling mellan ytnära och djupt grundvatten	197
11.6	Utveckling av hydrogeologiska beräkningsverktyg	198

11.7	Påverkan av islast på bergets flödes- och transportegenskaper	199
11.8	Effekt av frysning på bergets flödes- och transportegenskaper	200
11.9	Hantering av glaciationscykel i hydrokemi- och transportmodellering	202
11.10	Effekt av frysning på bergets mekaniska egenskaper	202
11.11	Seismisk påverkan på säkerhet efter förslutning	203
	11.11.1 Seismisk övervakning	203
	11.11.2 Undersökningar av glacialt inducerade förkastningar	203
	11.11.3 Undersökning av möjlig tsunami	206
	11.11.4 Modellering av seismisk påverkan på slutförvarsanläggningen	206
11.12	Bergmassans mekaniska egenskaper	208
11.13	Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning	210
11.14	Bergspänningar i Forsmark	211
12	Ytekosystem	213
12.1	Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer	213
12.2	Landskapets utseende och dynamik	216
12.3	Transport- och ackumulationsprocesser	218
12.4	Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos vissa potentiellt viktiga ämnen	220
13	Klimat och klimatrelaterade processer	223
13.1	Ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark	223
13.2	Klimatvariationer	224
	13.2.1 Klimatet i SKB:s referensglaciation	224
	13.2.2 Klimatförändringar: övergångar mellan olika klimattillstånd	225
	13.2.3 Första tidpunkt för framtida kallt klimat, permafrost och inlandsistillväxt	226
13.3	Havsnivåvariationer, isostasi och strandlinjeförskjutning	228
13.4	Validering av permafrostmodell	229
13.5	Nyutvecklad beskrivning av inlandsisars hydrologi från GAP	230
Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar		
14	Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar	235
14.1	Begrepp och krav	235
14.2	Ansvar och arbetsfördelning	237
	14.2.1 Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB	237
	14.2.2 Arbetsuppdelning inom koncernerna	238
14.3	Nationell och internationell samordning	238
15	Planering för avveckling inom Uniper	239
15.1	Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling	239
15.2	OKG Aktiebolags planering för avveckling	241
16	Planering för avveckling inom Vattenfall	245
16.1	Vattenfalls avvecklingsplanering	245
16.2	Ringhals AB:s planering för avveckling	247
16.3	Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling	249
16.4	Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn	250
17	Planering för avveckling av SKB:s anläggningar	253
17.1	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle	253
17.2	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	253
17.3	Slutförvaret för långlivat avfall	253
17.4	Kärnbränsleförvaret	254
18	Beroenden och flexibilitet	255
18.1	Avvecklingsaktiviteter under denna Fud-period	255
18.2	Flexibilitet kring externa beroenden	257
	18.2.1 Slutlig avställning	257

18.2.2	Avställningsdriftens slut	258
18.2.3	Uppstart av delprojekt/delmoment	258
18.2.4	Friklassning av anläggning	259
18.3	Flexibilitet kring interna beroenden	259
18.3.1	Anläggningsseparation inför avveckling	259
18.3.2	Förberedande åtgärder	260
18.3.3	Bränsletransport	260
18.3.4	Mellanlagringskapacitet i Clab	261
18.3.5	Hantering av reaktortankar	261
18.3.6	Hantering av långlivat avfall	262
18.3.7	Friklassning och hantering av mycket lågaktivt avfall	262
18.3.8	Resursplanering för kritiska resurser och funktioner nationellt	262
19	Fortsatta aktiviteter inom avveckling	265
19.1	Nuläge	265
19.1.1	Industrigemensamt utvecklingsarbete	265
19.1.2	Utvecklingsarbete inom Uniper	266
19.1.3	Utvecklingsarbete inom Vattenfall	267
19.2	Program	268
19.2.1	Industrigemensamt utvecklingsarbete kring avfall och slutförvaring	268
19.2.2	Övrig industrigemensam utveckling	270
19.2.3	Utvecklingsbehov inom Uniper	270
19.2.4	Utvecklingsbehov inom Vattenfall	271
Del IV Övriga frågor		
20	Bevarande av information och kunskap genom generationer	275
20.1	Genomfört arbete	275
20.2	Pågående och kommande arbete	276
20.2.1	Records, Knowledge and Memory across Generations	276
20.2.2	Assembling Alternative Futures for Heritage	276
21	Deponering i djupa borrhål	279
21.1	Nuläge	279
21.1.1	Genomföra deponering	279
21.1.2	Förvarets utveckling efter förslutning	279
21.1.3	Arbete utfört sedan Fud 2013	280
21.2	Bedömning och fortsatt arbete	282
21.2.1	SKB:s bedömning	282
21.2.2	Fortsatt arbete	282
Referenser		283
Bilaga Förkortningar		305

Del I

Verksamhet och handlingsplan

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

1 Introduktion

Den svenska kraftindustrin har under drygt 50 år producerat elektricitet med kärnkraft. År 1964 togs landets första kärnkraftsreaktor i drift. Under denna tid har en stor del av det system som behövs för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och det radioaktiva avfallet från driften av reaktorerna byggts upp. Systemet består av Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), lokala markförvar samt fartyget m/s Sigrid och transportbehållare.

För omhändertagandet av det använda kärnbränslet på ett långsiktigt säkert sätt återstår 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 slutförvarats så kan anläggningarna avvecklas och slutförvaret förslutas. I KBS-3-systemet ingår en anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet i anslutning till Clab, 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 avfallet behöver SFR byggas ut, ytterligare ett slutförvar – Slutförvaret för långlivat avfall (SFL) etableras och behållare för transporter av långlivat avfall anskaffas.

Beslut om förtida avställning av reaktorerna Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 respektive Ringhals 2 har tagits under år 2015. Eftersom avvecklingen av reaktorerna påbörjas innan det utbyggda SFR är klart för att ta emot och deponera rivningsavfallet behöver tillståndshavarna anordna mellanlager för rivningsavfall.

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.

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 radioaktivt avfall och använt kärnbränsle som uppkommer i verksamheten. Tillståndshavaren är också skyldig att på ett säkert sätt avveckla sina anläggningar där verksamhet inte längre ska bedrivas. Tillståndshavare för kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals och Barsebäck är Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB och Barsebäck Kraft AB. Dessa företag benämns fortsättningsvis kärnkraftsföretagen.

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 det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. För detta ändamål äger och driver SKB ett transportsystem och anläggningar för avfallshantering.

Tillståndshavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer. SKB har i detta sammanhang fått i uppdrag av kärnkraftsföretagen att delta i planeringen och genomförandet av kommande avveckling. SKB:s medverkan avser i huvudsak sammanställning av det utvecklingsbehov som identifierats av tillståndshavarna, samordning av generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall, och sammanställning av de avvecklingsrelaterade kostnaderna som inrapporteras från tillståndshavarna.

Enligt kärntekniklagen ska kärnkraftsföretagen i samråd utarbeta ett 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. Ett sådant program (Fud-program) ska vart tredje år lämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Programmen granskas och utvärderas av SSM efter en omfattande remissbehandling. De granskas även av Kärnavfallsrådet. SSM och Kärnavfallsrådet lämnar synpunkter till regeringen, som tar ställning till om programmet uppfyller de krav som ställs i kärntekniklagen och om eventuella riktlinjer ska ges avseende den fortsatta verksamheten.

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

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. Enligt lagen (SFS 2006:647) om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet (finansieringslagen) är kärnkraftsföretagen skyldiga att betala en avgift för bland annat den framtida avfallshanteringen och avvecklingen. På uppdrag av kärnkraftsföretagen upprättar SKB i enlighet med finansieringslagen en kostnadsberäkning vart tredje år, se avsnitt 1.5. Inbetalda medel förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden.

Förutom det radioaktiva avfall som SKB tar emot från kärnkraftsföretagen tar SKB också emot visst radioaktivt avfall från andra företag. Detta regleras genom avtal mellan SKB och respektive företag. SKB har för närvarande avtal med AB SVAFO, Studsvik Nuclear AB, Cyclife AB¹ samt European Spallation Source ERIC (ESS). Westinghouse Electric Sweden AB och SKB har ingått en avsiktsförklaring beträffande slutförvaring av långlivat radioaktivt avfall.

1.1.2 Grundläggande principer

Hanteringen av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Inriktningen för arbetet med omhändertagande av det radioaktiva avfallet har dessutom fastställts genom en lång rad politiska beslut och uttalanden som kan sammanfattas i följande punkter:

- Det använda kärnbränslet och det radioaktiva avfallet 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 kärnavfallet 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.

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.
- 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.

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.

Flerbarriärprincipen 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 eller barriärfunktioner 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 lägre 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-programmet vid flera tillfällen genomfört utvärderingar av olika strategier och system för att ta hand om använt kärnbränsle. I den senaste utvärderingen (SKB 2014j) 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 strålskyddskrav.

Metoden, vars utveckling påbörjades under slutet av 1970-talet, kännetecknas av att

- det använda kärnbränslet kapslas in i täta, lastbärande kapslar som är motståndskraftiga mot korrosion
- kapslarna deponeras i kristallint berg på 400–700 meters djup
- kapslarna omges av en buffert som förhindrar vattenflöde och skyddar dem
- de utrymmen i berget som krävs för deponering återfylls och försluts.

Internationellt är KBS-3-metoden en av de metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle där utvecklingen kommit längst. Metoden genomförs i Finland (se avsnitt 1.4) och övervägs som slutförvaringsmetod i flera andra länder, bland annat Kanada, Sydkorea, Storbritannien, Taiwan och Tjeckien.

1.1.3 Planeringsförutsättningar avseende reaktorernas drift

Planeringen för avfallssystemet baseras på kärnkraftsföretagens 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. Anledningen till den förtida avställningen är att kärnkraftsföretagen bedömer att det inte är ekonomiskt lönsamt att driva dessa reaktorer längre. För reaktorerna i Oskarshamn innebär beslutet att Oskarshamn 1 ställs av vid halvårsskiftet 2017 medan Oskarshamn 2 som ställts av för ombyggnad inte kommer att återstartas. För reaktorerna i Ringhals innebär det att Ringhals 1 och Ringhals 2 ställs av vid halvårsskiftet 2020 respektive 2019. För övriga sex reaktorer är den planerade drifttiden, liksom i Fud-program 2013, 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4.

Reaktorernas planerade drifttid är en viktig faktor för planeringen av kärnavfallsprogrammet. Utifrån drifttiderna görs prognoser för de mängder radioaktivt avfall och använt kärnbränsle som ska omhändertas samt när i tiden behov för mellanlagring och slutförvaring uppstår. I avsnitt 3.1 ges en beskrivning av hur den förtida avställningen påverkar SKB:s och kärnkraftsföretagens plan för genomförande av kärnavfallsprogrammet.

1.1.4 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet

Omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet styrs till stor del av avfallets egenskaper. Avfallet delas in i kategorier efter graden av radioaktivitet (låg-, medel- eller högaktivt) samt efter aktivitetens livslängd (kort- eller långlivat avfall). Gradens av radioaktivitet styr hur avfallet hanteras fram till slutförvaring. Det medelaktiva avfallet och det högaktiva använda kärnbränslet kräver en strålskärmad hantering medan det lågaktiva avfallet kan hanteras utan strålskärmmning. 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.

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).

Hur stor mängd avfall som uppkommer och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Planeringen är baserad på avfallet från det nuvarande kärnkraftsprogrammet. Avfallsmängderna är beroende av reaktorernas drifttid samt tillgänglighet och andra driftförhållanden. Uppskattade mängder radioaktivt avfall och använt kärnbränsle baseras på respektive kärnkraftsföretags prognoser.

Låg- och medelaktivt avfall

Det låg- och medelaktiva avfallet indelas i kort- och långlivat avfall. Kortlivat avfall innehåller en signifikant mängd radionuklider med en halveringstid på maximalt 31 år⁴ och endast en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Långlivat avfall innehåller signifikanta mängder av radionuklider med långa halveringstider.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och vid 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 eller i markförvar. Markförvaren, där avfall med mycket låg aktivitet deponeras, drivs i kärnkraftsföretagens regi medan SFR drivs av SKB. Enligt nuvarande tillstånd kommer cirka 37 000 kubikmeter kortlivat driftavfall att slutförvaras i markförvar vid Forsmarks, Oskarshamns och Ringhals kärnkraftverk. I SFR kommer, enligt nuvarande prognoser, cirka 170 000 kubikmeter samt nio reaktortankar från kokvattenreaktorer att slutförvaras. Huvuddelen av det kortlivade avfallet kommer från kärnkraftverken. Övrigt kortlivat avfall kommer från Clab och Clink (Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle) samt från anläggningar som tillhör Studsvik Nuclear AB och AB SVAFO.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade hårdkomponenter, reaktortankar från tryckvattenreaktorer (PWR) och styrtstavar från kokvattenreaktorer (BWR). De långlivade radionukliderna bildas av stabila grundämnen i till exempel stål när dessa utsätts för stark neutronstrålning från reaktorhärden. Den totala mängden långlivat låg- och medelaktivt avfall uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter, varav cirka en tredjedel kommer från kärnkraftverken. Resten kommer från anläggningar som drivs av andra företag (se 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 strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. 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. Resteffektens storlek beror framför allt på utbränning och hur länge bränslet avklingat. 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 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.

I den mängd använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret ingår, förutom allt använt bränsle från de svenska kärnkraftverken (inklusive bränsle från Ågestareaktorn) även bränslerester

⁴ Kortlivat avfall definieras enligt IAEA:s "IAEA Safety Glossary Terminology used in nuclear safety and radiation protection 2007 Edition" som radioaktivt avfall som inte innehåller signifikanta nivåer av radionuklider med halveringstider längre än 30 år. SKB använder samma definition men med gränsen satt till 31 år för att inkludera cesium-137, vilken används som nyckelnuklid för att uppskatta innehåll av andra radionuklider.

från provningsprogram i Studsvik samt så kallat Mox-bränsle (mixed oxide fuel). Dessa bränsletyper utgör en mycket liten del av den totala mängden. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från Ågesta samt cirka två ton använt kärnbränsle från Studsvik Nuclear AB:s undersökningsverksamhet mellanlagras i dag i Clab. I Clab lagras även 23 ton Mox-bränsle 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 åter-sändas till Sverige.

1.2 Program för forskning, utveckling och demonstration

Kärntekniklagen reglerar Fud-programmets periodicitet och omfattning. Programmet ska dels innehålla en översikt över samtliga åtgärder som behövs för att ta hand om det radioaktiva avfallet, dels närmare redovisa de åtgärder som avses vidtas inom en tidsrymd om minst sex år. Programmet ska lämnas in vart tredje år till SSM, som gör en granskning och utvärdering avseende planerad forsknings- och utvecklingsverksamhet, redovisade forskningsresultat, alternativa hanterings- och förvaringsmetoder samt planerade åtgärder. Efter en omfattande remissbehandling överlämnar SSM ärendet till regeringen som tar ställning till om programmet uppfyller de krav som ställs i kärntekniklagen och om eventuella riktlinjer avseende den fortsatta verksamheten. Även Kärnavfallsrådet lämnar sin självständiga bedömning av programmet till regeringen.

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 kärnkraftsföretagen 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 program för forskning, utveckling och demonstration. 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 redovisades en kort sammanfattning av de Fud-program som SKB har presenterat fram till och med år 2007 och i Fud-program 2013 finns en kort sammanfattning av Fud-program 2010. Samtliga inlämnade program har remissbehandlats och därefter godtagits av regeringen, i några fall med krav på kompletterande redovisning eller anvisningar om hur SKB ska beakta framförda remissynpunkter. I figur 1-1 ges en översikt av presenterade forsknings- och utvecklingsprogram och andra milstolpar i utvecklingsarbetet.

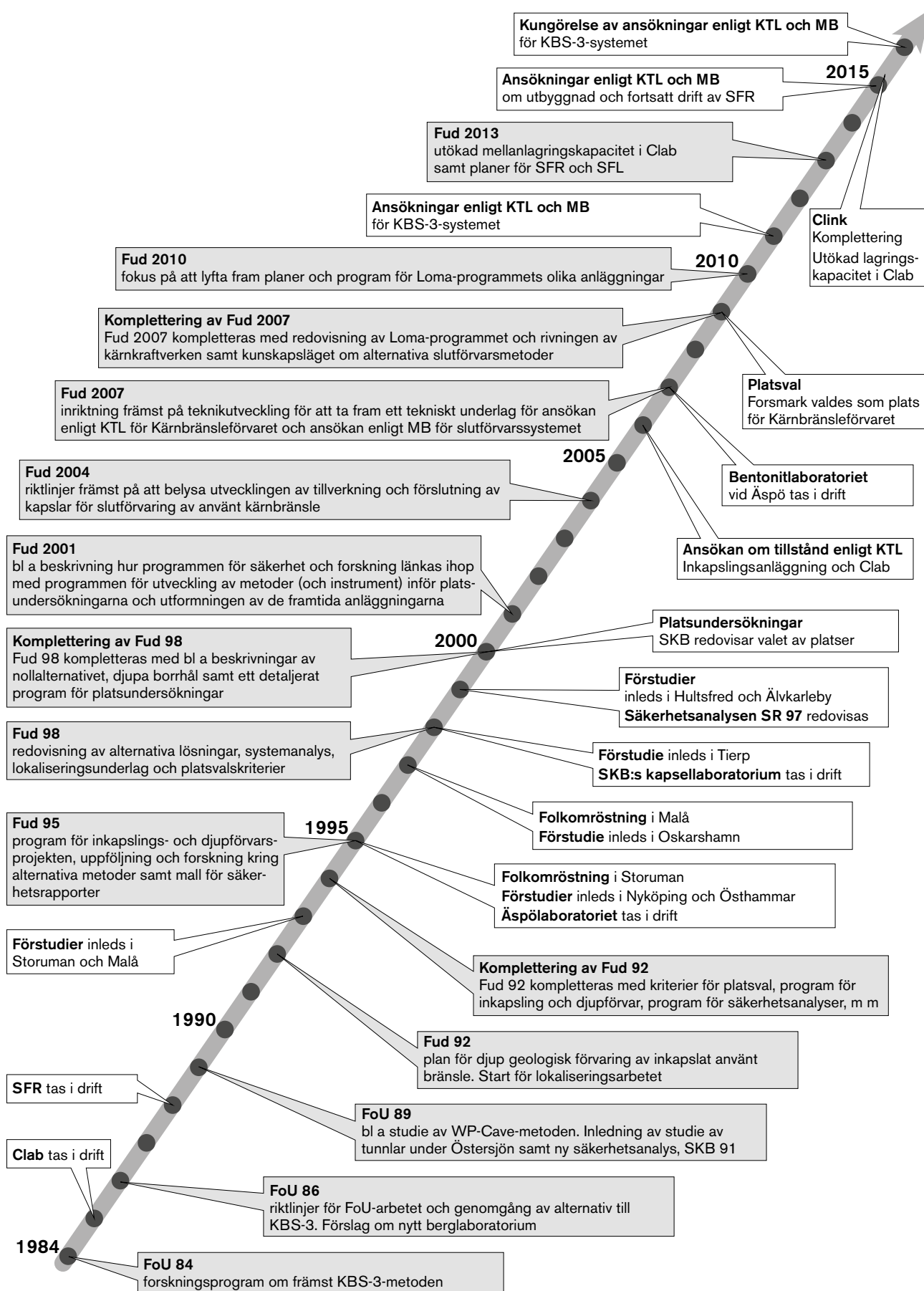
Fud-program 2013

Redovisningen i Fud-program 2013 delades in i fem delar: SKB:s verksamhet och handlingsplan, Låg- och medelaktivt avfall, Använt kärnbränsle, Forskning för analys av långsiktig säkerhet samt Samhällsvetenskaplig forskning. Forskning och teknikutveckling bedrivs till stor del i egen regi, men sker även i samarbete med universitet och högskolor runt om i världen. SKB samarbetar också med systerorganisationer i andra länder och under 2013 inleddes planeringen för att fördjupa samarbetet med Posiva i Finland.

Programmets första del gav en översiktlig beskrivning av SKB:s verksamhet och de åtgärder som SKB planerar att genomföra. I handlingsplanen presenterade SKB sina planer på att ansöka om utökad lagringskapacitet i Clab. I dag har SKB tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle i Clab.

I del två och tre gavs mer detaljerade beskrivningar av åtgärderna för låg- och medelaktivt avfall respektive använt kärnbränsle.

Vid tiden för Fud-program 2013 hade en lokaliseringsutredning genomförts för SFR-utbyggnaden. SKB redovisade att utbyggnaden kommer att placeras på ett större djup än den befintliga anläggningen.



Figur 1-1. Milstolpar i SKB:s utvecklingsprogram.

Arbetet med SFL detaljerades mer och särskilt det inledda arbetet med att välja slutförvarskoncept beskrevs. Dessutom utvecklades kärnkraftsföretagens och SKB:s planer avseende avveckling av sina respektive kärntekniska anläggningar.

Teknikutvecklingen avseende det använda kärnbränslet beskrevs med målet att gå från principlösningar till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process. En stor del av det återstående arbetet består av att bygga upp ett produktionssystem med tillhörande kvalitetskontroller.

Slutsatsen från säkerhetsanalysen SR-Site, som redovisades 2011, är att det går att bygga ett kärnbränsleförvar som uppfyller SSM:s krav på säkerhet efter förslutning. Programmet för framtida forskningsinsatser inriktades på de faktorer som SR-Site visat bidrar till risk och där förutsättningarna anses kunna förbättras genom ytterligare insatser. För det låg- och medelaktiva avfallet pågick då säkerhetsanalysen för det utbyggda SFR och konceptstudier för SFL. Det konstaterades att resultaten från SFR-utbyggnadens säkerhetsanalys och konceptstudien för SFL till stor del kommer att styra den fortsatta forskningen.

SSM fann efter sin granskning att den redovisade verksamheten var tillräckligt allsidig och att de planerade åtgärderna var tillräckligt ändamålsenliga och att Fud-program 2013 därmed uppfyllde kärntekniklagens krav. Kärnavfallsrådet framförde att SKB gjort betydande framsteg mot tidigare år. Regeringen beslutade att programmet uppfyllde kärntekniklagens krav och ställde som villkor att SKB skulle fortsätta samråda med SSM i frågor som rör avvecklingsplaner och rivningsstudier. SKB skulle även säkerställa att kommande Fud-program blir tydligare, mer strukturerade och klargör hur forsknings- och utvecklingsinsatser planeras, motiveras och utvärderas i syfte att fylla kärntekniklagens krav. Reaktorinnehavarna och SKB skulle även noga överväga de övriga påpekanden som SSM, Kärnavfallsrådet och andra instanser gjort vid granskningen av programmet.

1.3 Fud-program 2016 och dess relation till andra redovisningar till SSM

Utöver Fud-programmen lämnar SKB och kärnkraftsföretagen även in andra redovisningar till SSM där man redogör för sina planer avseende hantering och slutförvaring av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle samt avveckling av de kärntekniska anläggningarna. Inför Fud-program 2016 är situationen speciell med två samtidigt pågående tillståndsärenden i Mark- och miljödomstolen (MMD) samt hos SSM, ett för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle och ett för utbyggnaden av SFR för drift- och rivningsavfall.

Inför Fud-program 2016 har samrådsmöten med SSM genomförts. Syftet var att säkerställa att de villkor som regeringen ställt på Fud-programmet uppfylls. Villkoren avser 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. Vidare har SSM presenterat sina förväntningar på Fud-program 2016 i en promemoria (SSM 2016). Även denna promemoria har diskuterats vid samrådsmötena.

SKB har vid utarbetandet av detta Fud-program beaktat de synpunkter som framförts vid samråden. SKB har särskilt noterat myndighetens övergripande synpunkt på Fud-program 2013 där SSM och även regeringen angav att Fud-program 2016 bör vara mer tydligt strukturerad och klargöra hur forskning och utveckling planeras, motiveras och utvärderas med utgångspunkt från de åtgärder som planeras för att uppfylla kraven i KTL. SKB har för detta ändamål genomfört en betydande förändring av strukturen i Fud-program 2016 relativt tidigare program.

SKB:s mål är ett mer strategiskt inriktat Fud-program där planerade åtgärders koppling till de övergripande målen framgår. SKB har i dag en vidareutvecklad och mer detaljerad handlingsplan för implementering av nya anläggningar vilken beskrivs i Del I, Verksamhet och handlingsplan. Fortsatt forskning och teknikutveckling motiveras utifrån de milstolpar som planeras för de nya anläggningarna samt de övriga åtgärder och de kvarstående frågor som förligger avseende dessa. I kapitel 5 ges tydliga kopplingar till programmet i Del II (Avfall och slutförvaring) som mer detaljerat beskriver programmet för de kommande sex åren. Det är den viktigaste förändringen som genomförts för att åstadkomma ett välmotiverat och strukturerat Fud-program 2016.

Sammanfattningsvis delas Fud-program 2016 in i fyra delar:

Del I Verksamhet och handlingsplan, sammanfattar förutsättningarna för Fud-programmet och den övergripande planeringen för att uppfylla lagens krav om säker hantering och slutförvaring av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet samt avveckling av anläggningar. Där beskrivs också hur prioritering av forsknings- och teknikutvecklingsinsatser görs samt hur behovet av kompetens och resurser tillgodoses.

Del II Avfall och slutförvaring, redovisar mer utförligt de åtgärder som planeras under denna Fud-period (2017–2022) mot bakgrund av de resultat som hittills erhållits. Resultaten sammanfattas och referenser ges till mer detaljerade beskrivningar.

Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar, redovisar planeringen för avveckling av de kärntekniska anläggningarna.

Del IV Övriga frågor, redovisar planer för övriga frågor som informationsbevarande och djupa borrhål.

Programmet som presenterades i Fud-program 2013 har till en avgörande del genomförts enligt plan och det ökade kunskapsläget har bidragit till framdrift inom pågående tillståndsärenden. Anpassning har som alltid skett till behoven inom tillståndsärenden samt utifrån ny kunskap uppnådd inom SKB:s pågående projekt och i omvärlden. Utgångspunkten för Fud-program 2016 har varit att strukturerat värdera utfallet sedan Fud-program 2013 för att därefter precisera programmet utifrån aktuella behov enligt handlingsplanen.

Fud-program 2016 inriktar sig främst mot 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 till programmet.

För att undvika dubbel redovisning i föreliggande Fud-program görs vid behov hänvisningar till följande andra redovisningar:

- De ansökningar som SKB har lämnat in för Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen samt kompletteringar till dessa.
- De ansökningar som SKB lämnat in för utbyggnad av SFR samt kompletteringar till dessa.
- Studier och planer för avveckling av kärnkraftsreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar.
- Säkerhetsredovisningar (SAR) och återkommande helhetsbedömningar för SKB:s driftsatta anläggningar Clab och SFR.
- De regelbundna planrapporterna.

Ansökningarna enligt kärntekniklagen för slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet lämnades in i mars 2011. Där redovisas den verksamhet som ska leda fram till bygge, drift och slutlig deponering samt säkerheten under drift och efter förslutning.

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

I december 2014 lämnade SKB in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för utbyggnad av SFR. Dessa ansökningar granskas nu och SKB besvarar löpande kompletteringsbegäranden från myndigheter och remissinstanser.

För de anläggningar som är i drift, Clab och SFR, har SKB i egenskap av tillståndshavare skyldighet att för var och en av anläggningarna lämna olika redovisningar till SSM som inte redogörs för i detta Fud-program. De redovisningar som främst kopplar till Fud-programmet är anläggningarnas säkerhetsredovisningar som ständigt hålls aktuella samt den återkommande helhetsbedömningen av anläggningarnas säkerhet och strålskydd som enligt kärntekniklagen ska göras minst vart tionde år.

Varje kärnteknisk anläggning har en avvecklingsplan som ska tas fram innan anläggningen uppförs och därefter hållas aktuell tills anläggningen är avvecklad. Respektive tillståndshavare anmäler principiella förändringar till SSM och redovisar planen på nytt till myndigheten samtidigt med den återkommande helhetsbedömningen. Avvecklingsplanerna för kärnkraftverken har nyligen uppdaterats och tillställts SSM. Avvecklingsplaner för Kärnbränsleförvaret, Clink respektive det utbyggda SFR ingick som underlag i ansökningarna om att uppföra dessa anläggningar.

Efter olyckan i Fukushima i Japan våren 2011 kom EU:s ministerråd överens om att alla EU-länder skulle stresstesta sina kärnkraftverk. Syftet med dessa tester var att bedöma hur respektive anläggning klarar av extremt osannolika händelser. Det var kärnkraftsindustrin som genomförde stresstesterna, medan SSM granskade dess analyser och sammanställde en nationell rapport som sedan granskades av internationella experter. De nationella rapporterna har därefter följts av nationella handlingsplaner. Regeringen beslutade att även Clab skulle genomgå ett stresstest. Resultaten från stresstestet och handlingsplaner med anledning av dessa resultat redovisades i en rapport som lämnades till SSM 2011. De ytterligare analyser och åtgärder som föranleddes av detta har nu avslutats och redovisats till SSM.

En annan redovisning som kopplar till Fud-programmet är planrapporten, se avsnitt 1.5. Här 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.

1.4 Samverkan med Posiva

Även SKB:s systerorganisation Posiva i Finland 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. Sedan 2004 uppför Posiva en berganläggning (Onkalo) i Olkiluoto. Utbyggnaden är nu nere på tilltänkt förvarsnivå. Onkalo används för forskning och utveckling, men kommer också utgöra tillfarten till själva slutförvaret.

I slutet av 2012 lämnade Posiva in en ansökan om tillstånd för uppförande av en inkapslings- och slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. I februari 2015 lämnade finska strålsäkerhetscentralen (STUK) sitt yttrande över denna ansökan och rekommenderade 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 utfärdade finska regeringen sitt tillstånd till uppförandet av slutförvaret och inkapslingsanläggningen. Posiva planerar att börja bygga anläggningarna under 2016 och avser kunna påbörja provdrift, om tillstånd ges för denna, cirka 2023/2024.

Under 2013 inledde SKB och Posiva planering av ett fördjupat samarbete där målet var att utveckla gemensamma tekniska lösningar för slutförvarssystemet inför driftsättningen. Samarbetet syftar till att lösa de utformningsfrågor och frågor kopplade till kvalitetsstyrning och kontroll som återstår för i första hand de tekniska barriärerna så att myndigheternas krav tillgodoses och så att deponering kan påbörjas enligt Posivas tidsplan. Samarbetet innebär att nu cirka hälften av alla teknikutvecklingsprojekt inom KBS-3-systemet, främst inom kapsel- och bentonitfrågor, samfinansieras av SKB och Posiva. Det innebär visserligen att en del återstående tekniska frågor löses tidigare än de absolut skulle behöva för att klara SKB:s tidsplan, men möjliggör å andra sidan att mer optimerade utformningar kan bli tillgängliga när SKB:s slutförvar driftsätts. SKB och Posiva utreder dessutom förutsättningarna för samarbete kring själva anläggningsprojekten (inkapslingsanläggning och slutförvar), liksom förutsättningarna för gemensam produktion av kapslar och buffertkomponenter.

1.5 Finansiering

Kostnaderna för att ta hand om driftavfallet betalas löpande av kärnkraftsföretagen, medan finansieringen av kärnavfallsprogrammet i övrigt bygger på att kärnkraftsföretagen avsätter medel i en särskild fond, Kärnavfallsfonden. Det senare regleras i finansieringslagen och finansieringsförordningen. Omhändertagande av avfall från andra företag med vilka SKB har avtal finansieras inte via Kärnavfallsfonden utan det finansieras av dessa företag direkt.

Vart tredje år upprättar SKB en kostnadsberäkning, planrapport, på uppdrag av kärnkraftsföretagen. Redovisningen lämnas in till SSM som granskar SKB:s beräkning och lämnar förslag på avgifter och säkerheter. Avgifterna och säkerheternas storlek beslutas av regeringen (med undantag av den säkerhet som ställs för Barsebäck, som beslutas av SSM). Kärnkraftsföretagen betalar in medlen till Kärnavfallsfonden och dessa medel får, enligt regeringens föreskrifter, placeras på räntebärande konto i Riksgäldskontoret, i skuldförbindelser utfärdade av staten och säkerställda bostadsobligationer.

Vid årsskiftet 2015/2016 fanns cirka 58 miljarder kronor i kärnkraftsföretagens andelar av Kärnavfallsfonden (marknadsvärdet). Därutöver har cirka 39 miljarder kronor (i dagens prisnivå) använts för uppbyggnad och drift av dagens system och för forsknings- och utvecklingsarbetet. Under åren 2015 till och med 2017 är den genomsnittliga avgiften 4,1 öre per producerad kilowattimme el för de kärnkraftverk som är i drift. Barsebäck Kraft AB betalar en årlig avgift på 1 042 miljoner kronor under samma period.

Förutom att betala avgifter, ställer kärnkraftsföretagens 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.

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). I systemet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall finns både anläggningar som drivs i avfallsproducenternas regi (lokala markförvar och mellanlager) och anläggningar som drivs, eller kommer att drivas, i SKB:s regi (SFR, SFL, anläggningar inom KBS-3-systemet).

SKB svarar 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 avfallsproducenterna via mellanlager och behandlingsanläggningar till olika typer av slutförvar. Heldragna 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 utbyggt. 1988 togs SKB:s slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, i drift. Dessutom finns det ett antal lokala anläggningar som drivs av kärnkraftsföretagen, AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB. Dessa anläggningar omfattar behandlingsanläggningar, mellanlager och markförvar.

SKB planerar att bygga ut SFR för att få plats för tillkommande kortlivat drift- och rivningsavfall.

För långlivat avfall finns behov av utökad mellanlagringskapacitet. Behovet planeras att lösas dels med lokala mellanlager på kraftverksområdena dels med ett gemensamt mellanlager i det utbyggda SFR. 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

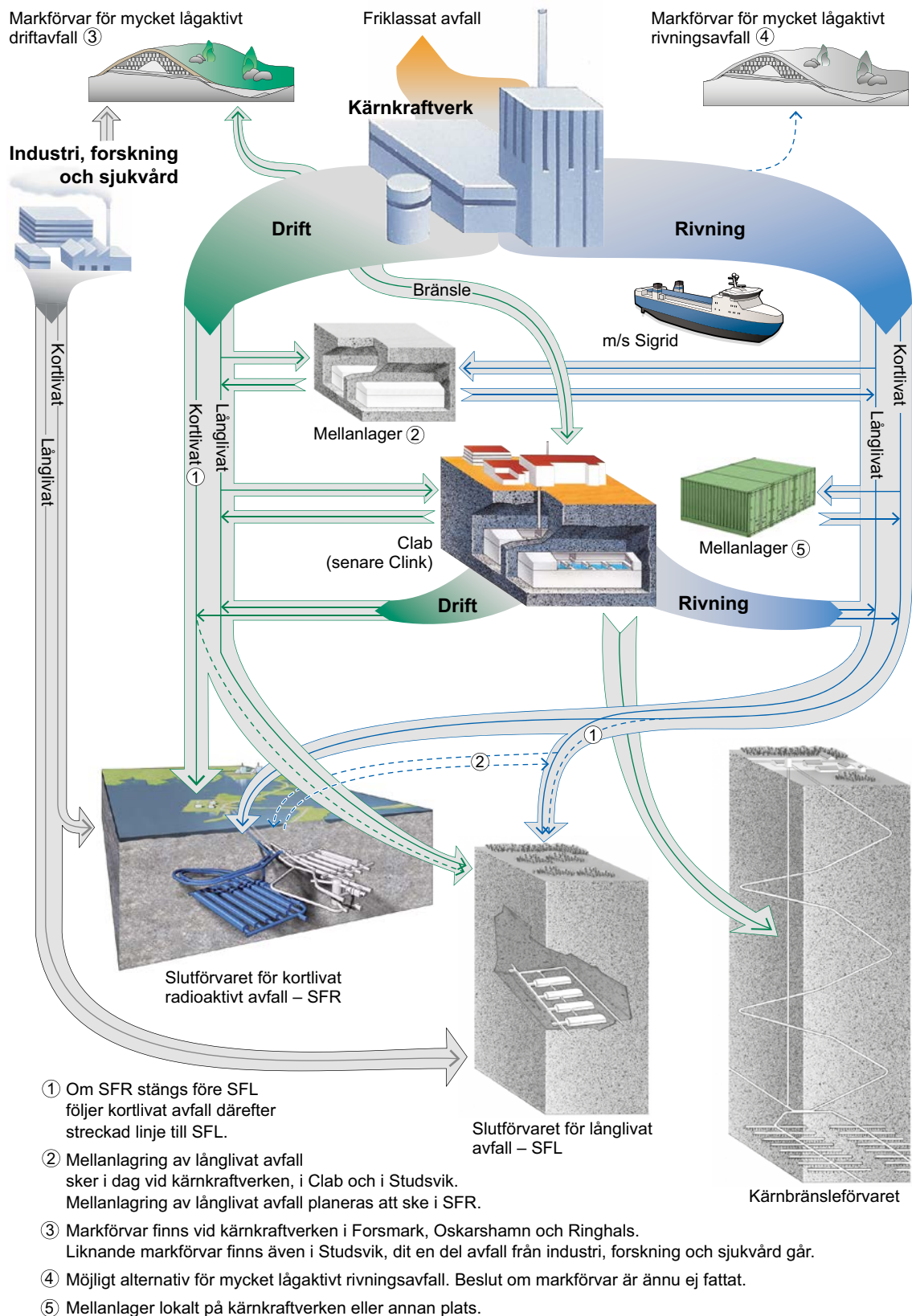
Vid kärnkraftverken och i Studsvik finns behandlingsanläggningar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Här behandlas och förpackas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för deponering i SFR eller i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara att friklassa materialet, reducera volymen,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

Mellanlager

Vid kärnkraftverken finns anläggningar för mellanlagring av kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Dessa fungerar i dag som buffertlager för driftavfall inför vidare hantering såsom behandling, packning och transport till SFR för deponering.

Nedmontering och rivning av de första sju reaktorerna⁵ 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 som ger strålskärning.

⁵ Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågestareaktorn.



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

Markförvar används för att slutförvara avfall med mycket låg aktivitet. Efter cirka 50 år har radioaktiviteten i detta avfall sjunkit till så låga nivåer att det kan friklassas ur strålskyddssynpunkt. I dag finns markförvar på industriområdena vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals samt i Studsvik.

De befintliga markförvarerna på kraftverksområdena är endast licensierade för driftavfall. Då förvarerna har begränsad lagringskapacitet undersöker OKG Aktiebolag och Ringhals AB möjligheten att utöka sina markförvar. Utökningen gäller i första hand för driftavfall men även möjligheten att använda markförvarerna för delar av det lågaktiva avfallet från rivningen av kärnkraftverken, kan bli aktuell.

Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall

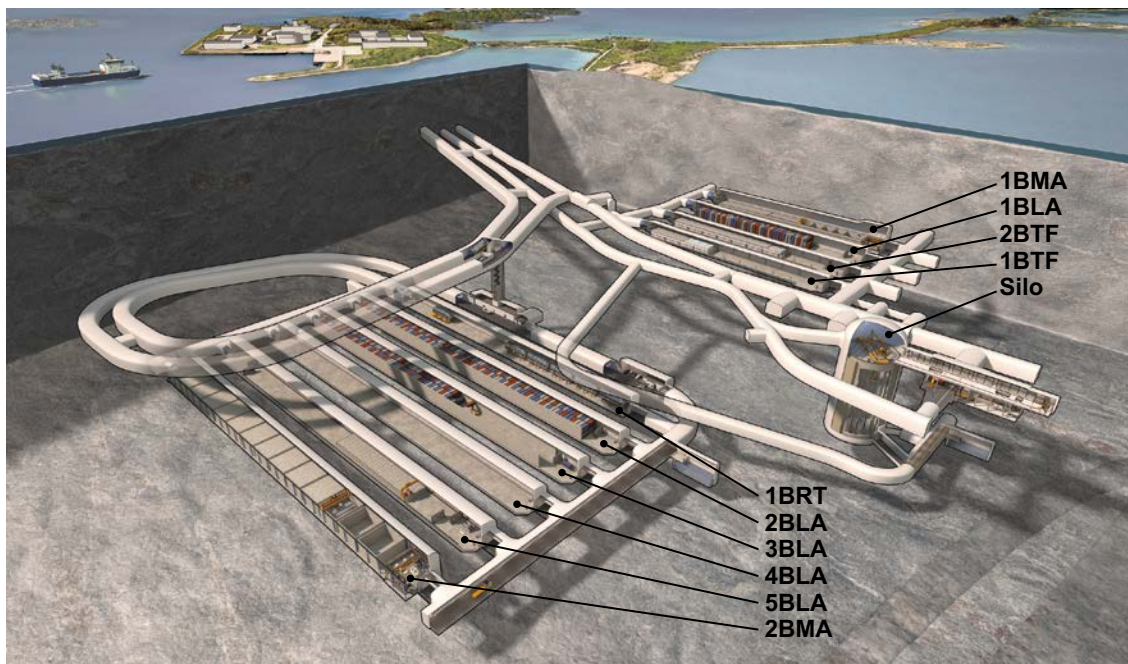
SFR är lokaliserat vid Forsmarks kärnkraftverk, se figur 2-2. Förvaret är placerat under Östersjön med cirka 60 meter bergtäckning. Från hamnen i Forsmark leder två, kilometerlånga, tillfartstunnlar till förvarsområdet. Förvarsutrymmena utgörs i dag av fyra 160 meter långa bergssalar och ett 70 meter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

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 de radioaktiva ämnena 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 2015/2016 hade 38 000 kubikmeter avfall deponerats.



Figur 2-2. 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.



Figur 2-3. När SFR är fullt utbyggt kommer det att ytterligare rymma fyra bergssalar för lågaktivt avfall (2–5BLA), en bergssal för medelaktivt avfall (2BMA) och en bergssal för reaktortankar (1BRT).

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 avhjälpande och förebyggande underhåll även identifiering, hantering och förebyggande av åldersrelaterade försämringar och skador. Under de senaste åren ett antal underhållsprojekt genomförts på SFR. Dessa har omfattat installation av tunnelduk för att skydda barriärer och avfall i bergssalen för medelaktivt avfall (1BMA) och silon samt komplettering av sprinkler i driftbyggnaden. Inom ramen för förnyelsearbeten pågår projekt för utbyte av brandlarm, utrymningslarm, fibernätverk, system för övervakning och styrning (SCADA-system) samt portar och dörrar i undermarksanläggningen.

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 därför ansökt om att få bygga ut anläggningen till att totalt rymma cirka 170 000 kubikmeter avfall samt nio reaktortankar från BWR. Reaktortankarna från PWR planeras att slutförvaras i SFL. Figur 2-3 visar SFR som det enligt nuvarande planer kommer att se ut när det är fullt utbyggt.

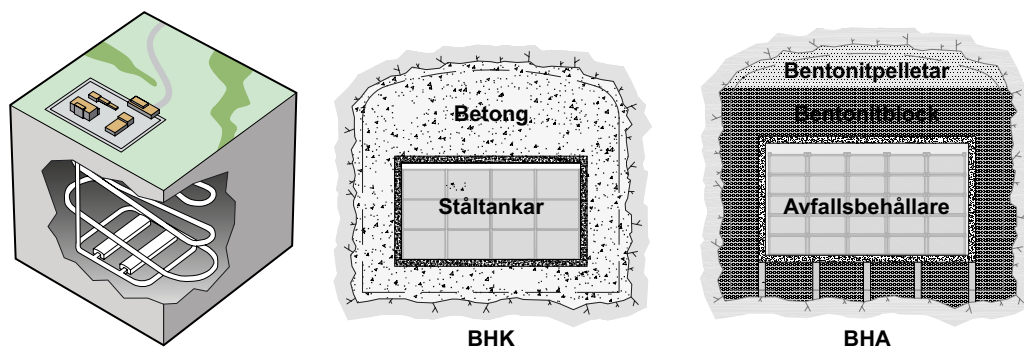
2.1.2 Anläggningar för långlivat avfall

Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken finns i dag möjlighet att segmentera vissa förbrukade hårdkomponenter för att därefter kunna placera dessa i ståltankar för lokal lagring.

För att öka kapaciteten för mellanlagring av det använda kärnbränslet kan SKB på sikt segmentera de BWR-styrstavar som mellanlagras i Clab om ett behov av detta uppstår. En studie pågår för att analysera lämplig teknik och plats för segmentering samt plats för vidare mellanlagring, se avsnitt 3.4.2.

AB SVAFO utreder för närvarande möjligheten att bygga en hanteringsanläggning i Studsvik för så kallat historiskt avfall som härrör från kärnkraftens tidiga utveckling. Anläggningen är tänkt att användas för att sortera och karakterisera avfallet samt förbereda och förpacka det inför slutförvaring. Enligt AB SVAFO:s planer skulle anläggningen kunna tas i drift runt 2022.



Figur 2-4. Preliminär anläggningsutformning (t v) och föreslaget förvarskoncept för SFL med en bergssal för hårdkomponenter (BHK) och en bergssal för historiskt avfall (BHA).

Mellanlager

SFL planeras att driftsättas kring 2045. Fram till dess behöver det långlivade avfallet mellanlagras. I dag mellanlagras den största delen av det långlivade avfallet på kraftverken, 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. För att utöka kapaciteten för att mellanlagra långlivat avfall på sikt har SKB ansökt om att få utnyttja en del av det utbyggda SFR för mellanlagring.

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. Utvecklingen av förvaret är i ett tidigt skede. Ett föreslaget förvarskoncept utvärderas för närvarande med avseende på säkerheten efter förslutning. Lokaliseringen av förvaret är ännu en öppen fråga.

SFL:s förvarsvolym kommer att vara relativt liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar. Den totala lagringskapaciteten uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter. Det föreslagna förvarskonceptet inrymmer två förvarsdelar, en för hårdkomponenter från kärnkraftverken och en för historiskt avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB. Hårdkomponenterna, vilka är metalliskt avfall, utgör cirka en tredjedel av volymen, men innehåller (initialt) huvudparten av aktiviteten. Förvarsdelen för hårdkomponenter planeras att utformas med en teknisk barriär av betong. Den andra förvarsdelen, som ska rymma det långlivade historiska avfallet från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB, föreslås utformas med en teknisk barriär av bentonit. Förvarskonceptet illustreras i figur 2-4.

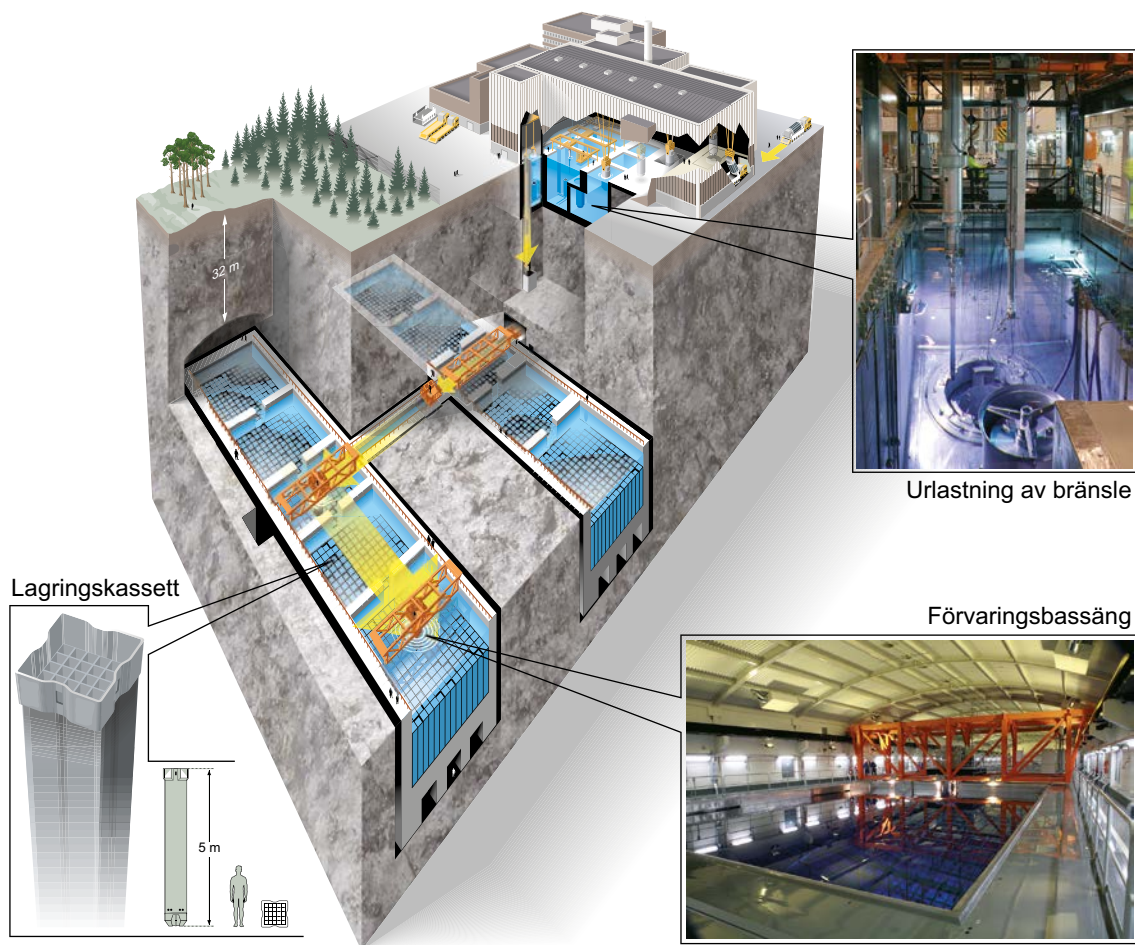
2.2 Anläggningar inom KBS-3-systemet

SKB:s centrala mellanlager för använt kärnbränsle, Clab, har varit i drift sedan 1985.

SKB planerar att bygga en anläggningsdel för inkapsling av kärnbränslet i anslutning till Clab i Oskarshamn samt ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, i Forsmark. Förutom dessa anläggningar planerar SKB att bygga en anläggning för maskinbearbetning och montering av kopparkapslarna.

Centralt mellanlager för använt kärnbränsle

Mellanlagret för det använda kärnbränslet, 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 ner med en bränslehiss till förvaringsdelen där det använda kärnbränslet mellanlagras i vattenbassänger, se figur 2-5.



Figur 2-5. Det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, Clab.

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

Själva lagringsutrymmet består av två bergtrum med cirka 40 meters avstånd mellan dem som förbinds med en vattenfylld transportkanal. Varje bergtrum 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.

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 och redundans, byte av brandvattenrör från galvaniserade stålrör till rostfritt material samt installation av en membranfiltreringsanläggning för en förbättrad rening av utsläppsvatten. En inventering av systemen på Clab har påbörjats för att undersöka behovet av förbättringar på längre sikt. Redan i dag finns ett antal förbättringsprojekt inplanerade. Här ingår bland annat en modernisering och uppgradering av bränslehissen och anläggningsanpassningar för hantering av nya transportbehållare för bränsle. Ytterligare ändringar som övervägs är nya inmatningsvägar för elkraftsförsörjning och modernisering av huvudtraverser. Planering och genomförande av ändringsarbetena i Clab kommer att ske integrerat med planering och uppförande av den nya anläggningsdelen för inkapsling.

Vid årsskiftet 2015/2016 fanns 6 352 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. Bassängerna kan rymma totalt cirka 11 000 ton bränsle under förutsättning att de hårdkomponenter som i dag lagras på Clab lastas ut. Under 2015 ansökte SKB om att utöka den tillåtna mängden till 11 000 ton bränsle.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

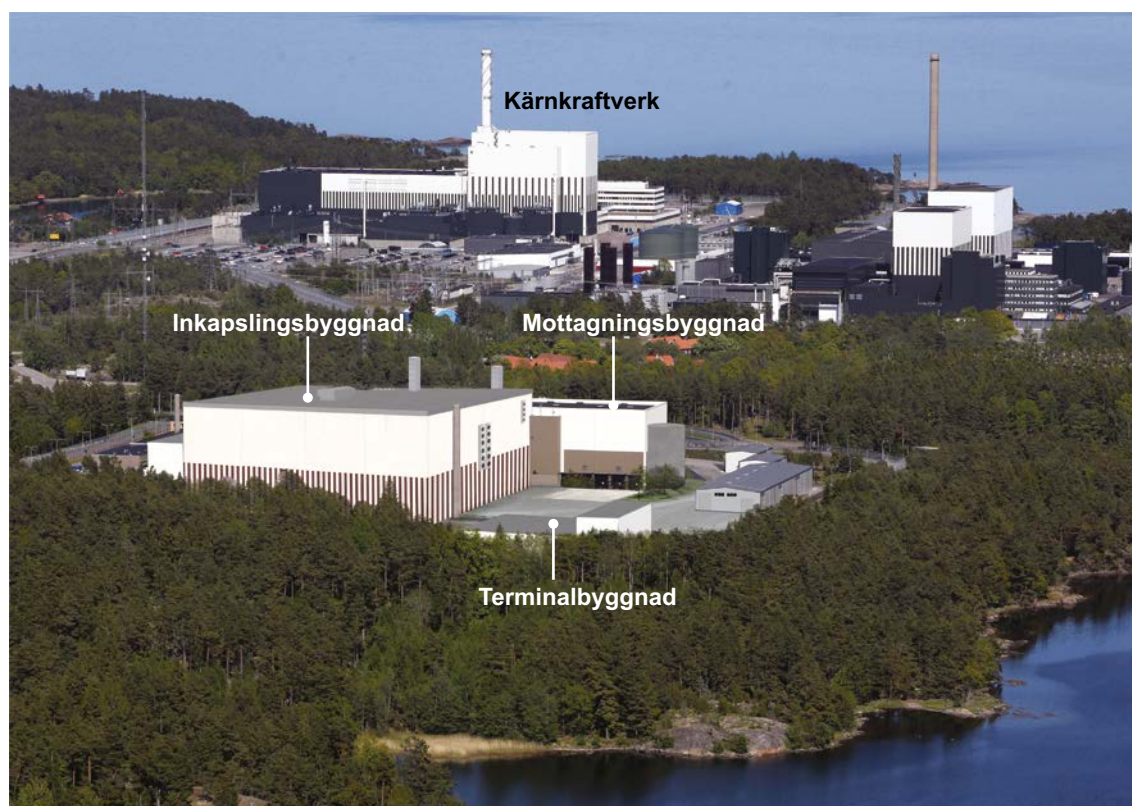
Innan det använda kärnbränslet deponeras ska det kapslas in i kopparkapslar. SKB planerar att göra detta i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab, se figur 2-6. När denna inkapslingsdel sammankopplats med Clab kommer de båda anläggningsdelarna att drivas som en integrerad anläggning, Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle, Clink.

Kapseln som ska användas består av ett kopparkärl och en insats av segjärn, se figur 2-7. Det finns två typer av insatser, en som rymmer tolv element från BWR och en som rymmer fyra element från PWR. Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras, se avsnitt 1.1.4. Dessa kan placeras i någon av de två insatstyperna.

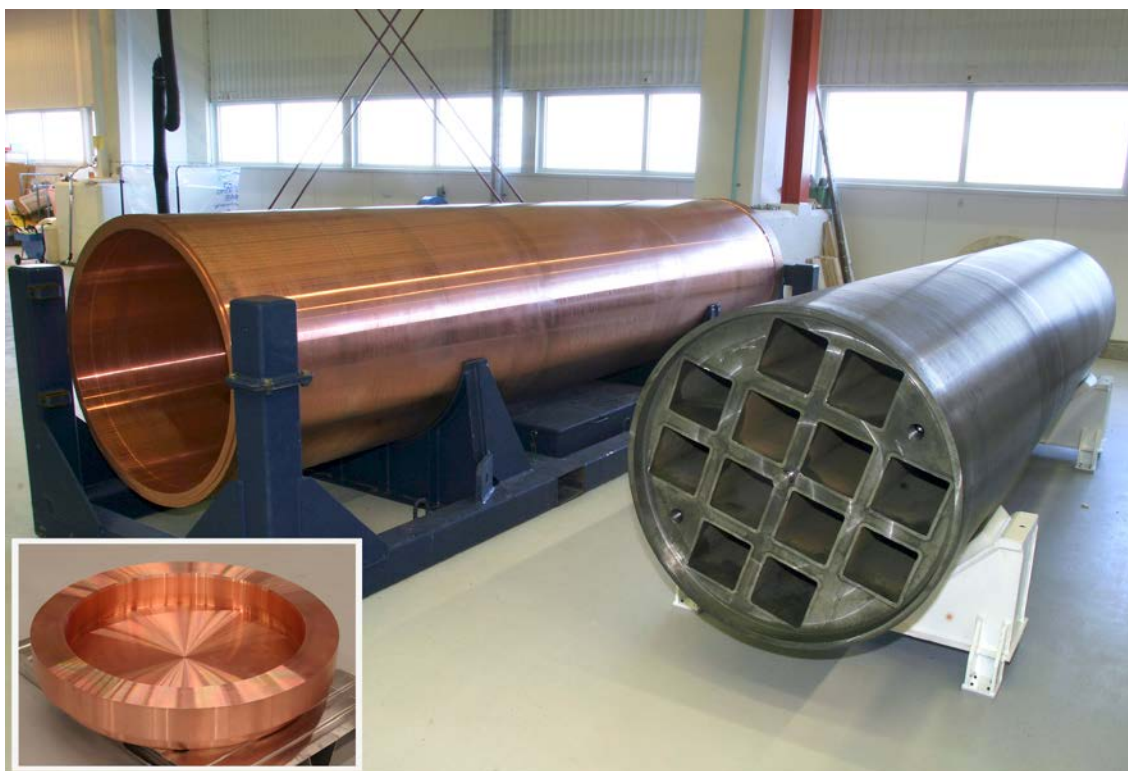
Kapselns olika komponenter, som insats, kopparkärl och lock kommer att produceras av olika underleverantörer. En anläggning kommer att behövas för slutgiltig maskinbearbetning, montering och kvalitetssäkring av kapselkomponenterna. Denna kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning.

I inkapslingsdelen kommer det att finnas ett antal stationer för olika arbetsmoment där all hantering av bränslet sker på avstånd och med strålskärning. Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet placeras i en transportkassett och förs upp i bränslehisnen 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 strålskärmad hantlingscell och lyfts över till kapseln. Luften i kapseln byts ut mot argon innan den försluts. Förslutningen av kopparkapseln görs med friktionsomrörningssvetsning (friction stir welding, FSW). Svetsens kvalitet kontrolleras och om svetsen godkänns förs kapseln vidare till stationen för maskinbearbetning, där överskottsmaterial tas bort. Slutligen görs en ny kvalitetskontroll av svetsen. 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.



Figur 2-6. Bildmontage som visar den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle, Clink.



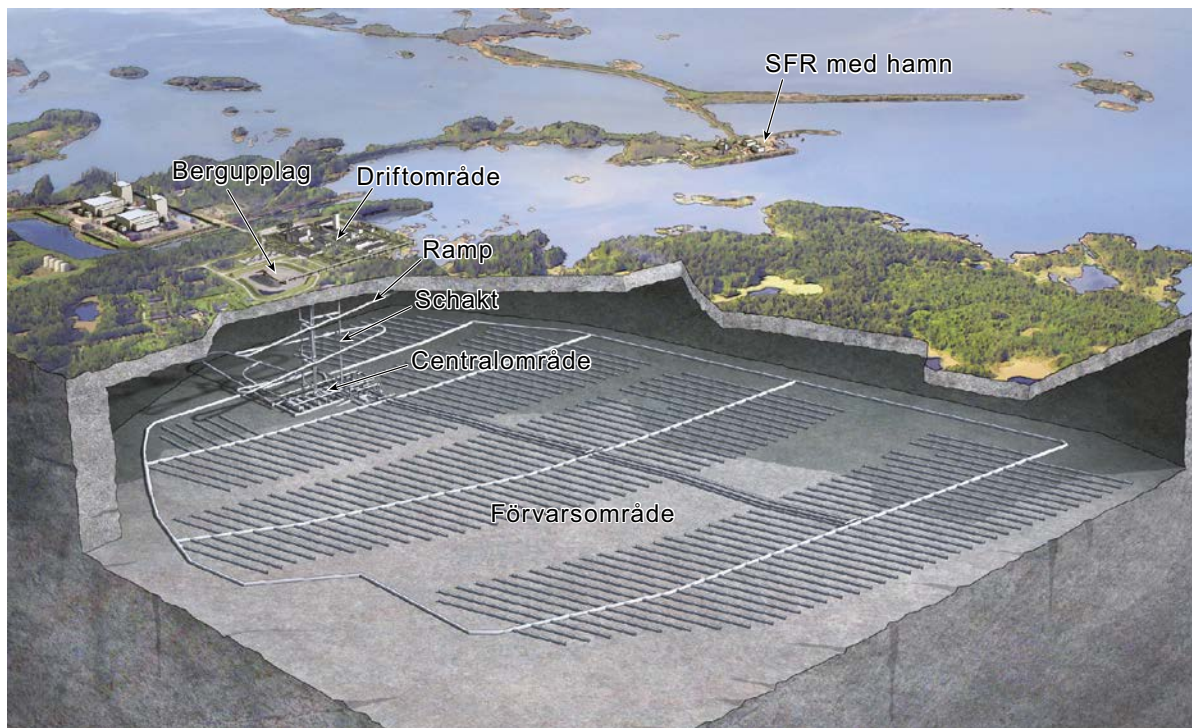
Figur 2-7. Kopparkapsel med insats av segjärn (det infällda fotot visar kopparlocket).

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. Avgörande för valet var att förutsättningarna för att åstadkomma ett långsiktigt säkert förvar bedömdes vara bättre i Forsmark.

Slutförvarsanläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel, se figur 2-8. Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden samt förbindelser till ovanmarksdelen i form av en ramp för fordonstransporter och schakt för hissar och ventilation. Deponeringsområdena, som tillsammans utgör förvarsområdet, kommer att ligga cirka 470 meter under marknivån och bestå av ett stort antal deponeringstunnlar med borrhåla deponeringshål i botten på tunnarna. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen och utformningen av infrastruktur på förvarsnivån, bestäms utifrån bergets egenskaper, bland annat läget av stora deformationszoner, förekomst av långa eller mycket vattenförande sprickor och bergets värmeledningsförmåga. Anläggningen ovan mark omfattas av driftområde, bergupplag, ventilationsstationer och förråd. Anläggningen dimensioneras för en deponeringskapacitet på 200 kapslar per år.

Kapslarna förs ner till deponeringsnivån via rampen med ett specialbyggt transportfordon. Därefter lastas de om till en deponeringsmaskin för att transporteras ut till deponeringsområdet och slutligen deponeras. Efter att kapslarna placerats i deponeringshålen, omgivna av bentonitlera, fylls tunneln igen med lera som kommer att svälla vid kontakt med vatten och försluts med en betongplugg. När allt bränsle har deponerats fylls även övriga utrymmen igen och anläggningarna ovan mark avvecklas.



Figur 2-8. Illustration av möjlig utformning av Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

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 bottenar och dubbel bordläggning. Konstruktionen skyddar lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Sigrid har konstruerats för att ha låg bränsleförbrukning och ge låga utsläpp till luft och vatten och har generellt en lägre miljöpåverkan än sin föregångare. Hon rymmer tolv bränsle- alternativt avfallsbehållare. Normalt gör fartyget, som drivs på entreprenad, 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-containerer. 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, se figur 2-9.

I dag transporteras en del av det långlivade avfallet, styrestavar från BWR, från kärnkraftverken till Clab. Avfallet transporteras i en transportbehållare med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål. Det använda kärnbränslet transporteras från kärnkraftverken till Clab i behållare med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar. Dessa behållare är försedda med kylflänsar för att kyla bort den värme som alstras på grund av bränslets resteffekt. Med anledning av ändrad kravbild för bränsletransportbehållare startade SKB 2013 ett projekt för att ta fram nya behållare. Ett kontrakt har skrivits med en amerikansk behållarleverantör och slutförande av licensieringsunderlag för myndighetsgranskning pågår. De nya behållarna är utformade med dubbla lock för att skydda bränslet mot vatteninträngning efter en olycka. Behållarna konstrueras med utökad kapacitet vilket innebär att färre behållare behövs för att klara de transportmängder som genereras i det svenska systemet.

En ny typ av avfallstransportbehållare håller på att tas fram för att kunna transportera långlivat medelaktivt avfall. Transportbehållarna är avsedda för avfall som är placerat i så kallade ståltankar för torr mellanlagring.

En ökad transportvolym förutses i framtiden i samband med transporter av rivningsavfall och kapslar med använt kärnbränsle. I dagens transportsystem finns överkapacitet så inga större investeringar för att klara den ökade volymen förutses.

För transport av inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret kommer en ny typ av transportbehållare att tas fram.



Figur 2-9. M/s Sigrid samt transportbehållare för kortlivat radioaktivt avfall (ATB) och för hårdkomponenter (TK).

3 Plan för genomförande

I detta kapitel redovisas planering för att uppföra och ta i drift nya och utbyggda anläggningar. Dessutom ger kapitlet en beskrivning av kärnkraftsföretagens och SKB:s handlingsplaner avseende avveckling av kärntekniska anläggningar.

Kapitlet inleds med en kort redovisning av effekter av de nyligen fattade besluten om en förtida avställning av fyra reaktorer. Därefter redovisas planer för att genomföra kärnavfallsprogrammet enligt nuvarande huvudtidsplan. Slutligen beskrivs handlingsalternativ och åtgärder för att hantera större förändringar av planeringsförutsättningarna.

3.1 Effekter av förtida avställning

Sedan Fud-program 2013 har beslut tagits om en förtida avställning av fyra reaktorer (Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 och Ringhals 2) se avsnitt 1.1.3.

En direkt konsekvens av en tidigare avställning är att den totala mängden bränsle som ska tas om hand i systemet minskar. De prognostiserade bränslemängderna, cirka 11 400 ton, överstiger dock fortfarande Clabs maximala mellanlagringskapacitet om 11 000 ton, se avsnitt 2.2.

En större mängd bränsle kommer tidigare till Clab i samband med att sluthärdarna från de fyra reaktorerna transporteras dit; det rör sig om cirka 340 ton bränsle. Samtidigt minskar de årliga bränslemängderna något i takt med att de fyra reaktorerna ställs av. Clab beräknas bli fullt enligt gällande tillstånd, 8 000 ton bränsle, cirka 2023. I början av 2015 ansökte SKB om tillstånd för utökad mellanlagringskapacitet till 11 000 ton, se avsnitt 3.4.3.

Arbetsbelastningen vid Clab då sluthärdarna lastas in kommer att öka då andra aktiviteter samtidigt utförs på anläggningen, se avsnitt 3.4.3. Inlastningen av bränsle planeras därför gemensamt av SKB och kärnkraftsföretagen så att transportererna och mottagningen av bränsle säkerställs. Den åtgärd som nu planeras för att öka lagringsutrymmet för använt bränsle är omlastning av bränsle från normal- till kompaktkassetter. Kompaktkassetterna rymmer fler bränsleelement än normalkassetterna. Motsvarande omlastning har gjorts tidigare i samband med att SKB 1992 fick tillstånd att öka Clabs lagringskapacitet från 3 000 till 5 000 ton bränsle. Enligt planeringen kommer omlastning av bränsle att påbörjas 2018.

En annan konsekvens av den förtida avställningen är att rivning av de första sju reaktorerna kommer att påbörjas innan SFR-utbyggnaden tas i drift för deponering av avfall. Detta innebär att rivningsavfallet behöver mellanlagras lokalt på kraftverksområdena. När det utbyggda SFR tas i drift kommer det kortlivade avfallet att deponeras medan det långlivade avfallet antingen mellanlagras i SFR eller lokalt på kraftverksområdena tills SFR tas i drift, se avsnitt 3.3.3 och 3.3.4. Detta kommer att innebära en ökad belastning på transportsystemet då SFR-utbyggnaden, enligt nuvarande planer, tas i drift 2028 och Kärnbränsleförvaret 2030. I dagens transportsystem finns överkapacitet så den ökade volymen förutses kunna hanteras via god planering och hög tillgänglighet i systemet.

3.2 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. SKB har i sin planering utgått från de olika tillstånd och medgivanden som erfordras enligt denna stegvisa process och angivit dem som milstolpar. De viktigaste milstolparna, vilka är gemensamma för samtliga planerade anläggningar, är:

- **Ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen och miljöbalken att få bygga en ny anläggning** – i vilken SKB som underlag bland annat lämnar en förberedande preliminär säkerhetsredovisning (F-PSAR) där kraven som anläggningen och verksamheten ska uppfylla redovisas. Hur kraven kan uppfyllas med en föreslagen referensutformning och verksamhet redovisas också.

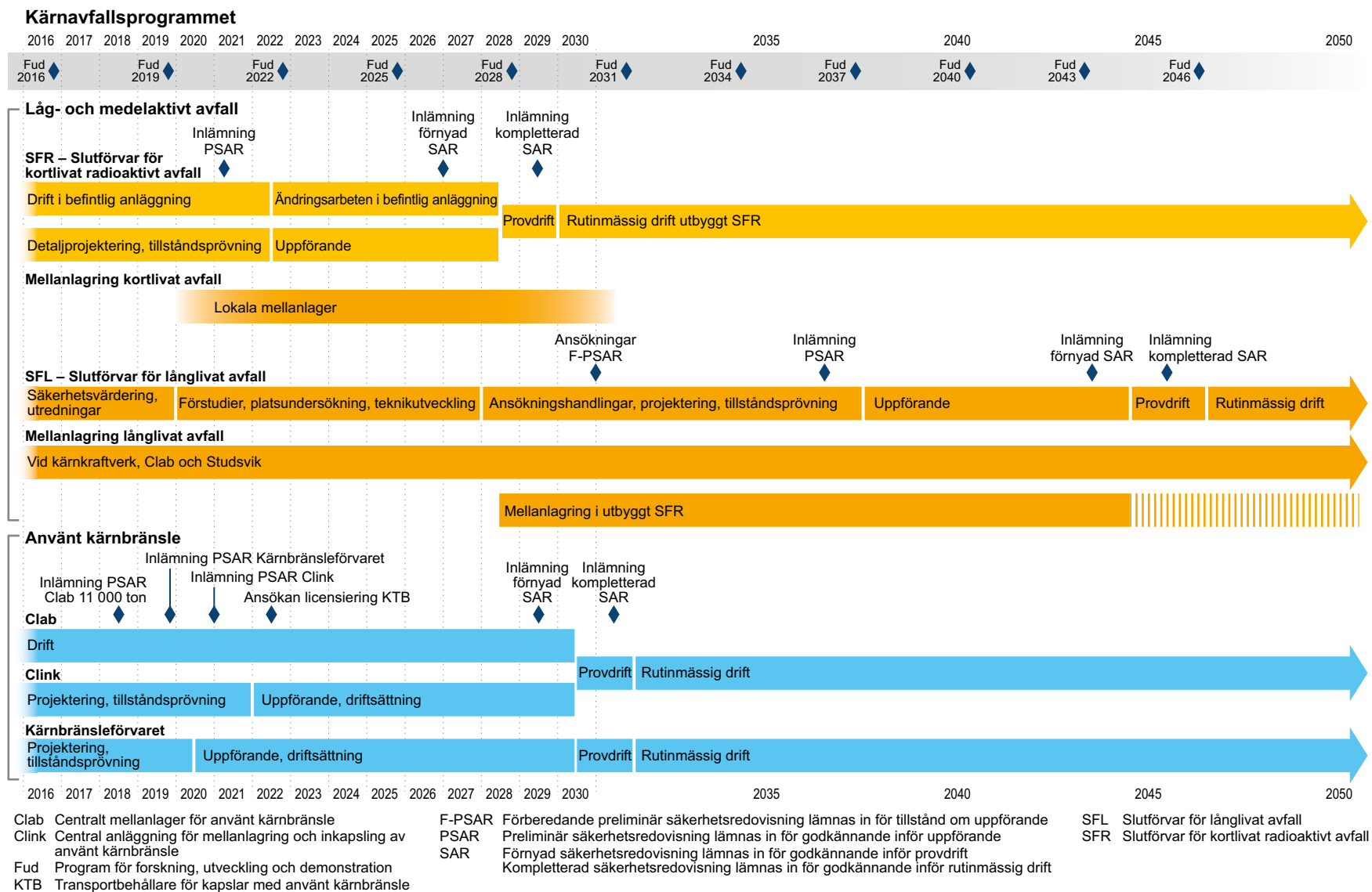
Konsekvenserna för miljön redovisas i en miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Under tillståndsprövningen granskas ansökningarna av SSM och Mark- och miljödomstolen efter att dessa fått in synpunkter från olika remissinstanser. Kommunerna ska i enlighet med paragrafen om det kommunala vetot i miljöbalken tillstyrka verksamheten. Beslut om tillåtlighet enligt miljöbalken (MB) och tillstånd enligt kärntekniklagen (KTL) meddelas av regeringen.

- **Godkännande av säkerhetsredovisning inför uppförande** – efter att tillstånd erhållits enligt kärntekniklagen och miljöbalken måste en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) godkännas av SSM innan SKB får börja uppföra anläggningen. En preliminär säkerhetsredovisning ska i enlighet med 4 kap. 2 § SSMFS 2008:1 redogöra för anläggningens utformning, hur verksamheten anordnas och hur kraven uppfylls.
- **Godkännande av säkerhetsredovisning inför provdrift respektive rutinmässig drift** – för att ta anläggningen i provdrift respektive rutinmässig drift ska en förnyad respektive en kompletterad säkerhetsredovisning (SAR) vara godkänd av SSM. Säkerhetsredovisningen ska sammantaget visa hur anläggningens säkerhet är anordnad för att skydda människors hälsa och miljön mot radiologiska olyckor och för att förhindra obehörig befattning med kärnämne eller kärnavfall. Redovisningen ska avspegla anläggningen som den är byggd, analyserad och verifierad samt visa hur gällande krav på dess konstruktion, funktion, organisation och verksamhet är uppfyllda. För att få medgivande till rutinmässig drift ska säkerhetsredovisningen kompletteras med en redovisning av erfarenheter från provdriften.
- **Godkännande av säkerhetsredovisningen inför förslutning av förvaren** – För att få tillstånd att försluta slutförvaren och avveckla anläggningarna på markytan, ska en kompletterad säkerhetsredovisning (SAR) och en plan för förslutning och avveckling vara godkända av SSM.

När provdriften, som innebär deponering av radioaktivt avfall under förstärkt övervakning och kontroll, övergår i rutinmässig drift, övergår verksamheten i en förvaltningsfas. Erfarenheter från verksamheten kommer att tas tillvara på ett systematiskt sätt. Under drifttiden slutförs även de utredningar som behövs för att slutgiltigt välja teknik för förslutning av förvaret. Bevakning kommer även att ske av utvecklingen inom de vetenskaps- och teknikområden som är av betydelse för strålsäkerheten. I samband med de återkommande helhetsbedömningarna av säkerhet och strålskydd vart tionde år kommer en genomgång att göras av kunskapsläget inom kunskapsområden som är väsentliga för strålsäkerheten.

Var och en av de ovanstående milstolparna är egentligen två: dels SKB:s sammanställning av ansökningar och/eller säkerhetsredovisningar, dels SSM:s och/eller andra myndigheters godkännande av dessa efter genomförd prövning. Tidpunkterna för säkerhetsredovisningar styr när SKB behöver vara klara med sitt underlag och tidpunkter för godkännande när SKB kan påbörja sina aktiviteter. Båda typerna av milstolpar finns redovisade nedan.

Figur 3-1 visar den övergripande tidsplanen, inklusive tidpunkter för kommande ansökningar, för hela kärnavfallsprogrammet. Planeringen för de tillkommande anläggningarna är i stort indelat i teknikutveckling och lokalisering (SFL), projektering och tillståndsprövning, uppförande, provdrift samt rutinmässig drift.



Figur 3-1. Övergripande tidsplan för SKB:s kärnavfallsprogram.

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 omhänderta låg- och medelaktivt avfall på ett långsiktigt säkert sätt. Verksamheten drivs främst av SKB men i vissa delar även av kärnkraftsföretagen.

Nuläget för arbetet med låg- och medelaktivt avfall för att realisera återstående delar av systemet 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 lämnades in under 2015 och 2016.
- Inför utbyggnaden av SFR hanteras frågor kring tillståndsprövningarna, och parallellt pågår fortsatt teknikutveckling, projektering samt byggförberedelser.
- En utvärdering av säkerheten efter förslutning för föreslaget förvarskoncept för SFL startade under våren 2015 och beräknas pågå till mitten av 2018. Säkerhetsvärderingen kommer att utgöra ett viktigt underlag för den fortsatta utvecklingen.
- En första utredning av den process som ska leda fram till att en plats för SFL kan väljas på sikt har genomförts. Fortsatta utredningar kommer att detaljera planeringen och identifiera kompetens- och resursbehov.
- Framtida hantering och mellanlagring av BWR-styrstavar har utretts. Effektivare mellanlagring av BWR-styrstavarna i Clab kan på sikt bli aktuell för att säkra mellanlagringskapacitet för bränsle i Clab.
- En ny avfallstransportbehållare för transport av stältankar med långlivat medelaktivt avfall är under framtagande.

3.3.2 Övergripande planering

Besluten om förtida stängning av fyra reaktorer påverkar genomförandeplanen för låg- och medelaktivt avfall genom utökat behov av mellanlagring samt att avvecklingsplaneringen behöver detaljeras och konkretiseras tidigare.

De slutförvar som SKB planerar att etablera för låg- och medelaktivt avfall omfattar en utbyggnad av SFR och uppförande av SFL. Några av kärnkraftsföretagen har också för avsikt att anordna temporära mellanlager för kortlivat rivningsavfall tills SFR-utbyggnaden tas i drift. Det långlivade rivningsavfallet planeras att mellanlagras lokalt på kraftverken och i SFR-utbyggnaden när denna är driftklar.

SKB har tillsammans med kärnkraftsföretagen utrett vilken lagringskapacitet som finns på respektive anläggning samt vilket lagringsbehov som kommer att uppstå fram tills det utbyggda SFR är i drift. Frågan kring mellanlager av kortlivat avfall, huruvida sådana bör förläggas lokalt eller centralt, har ingått i utredningen och genomfört arbete visar att SKB inte bör driva frågan om ett centralt mellanlager i egen regi.

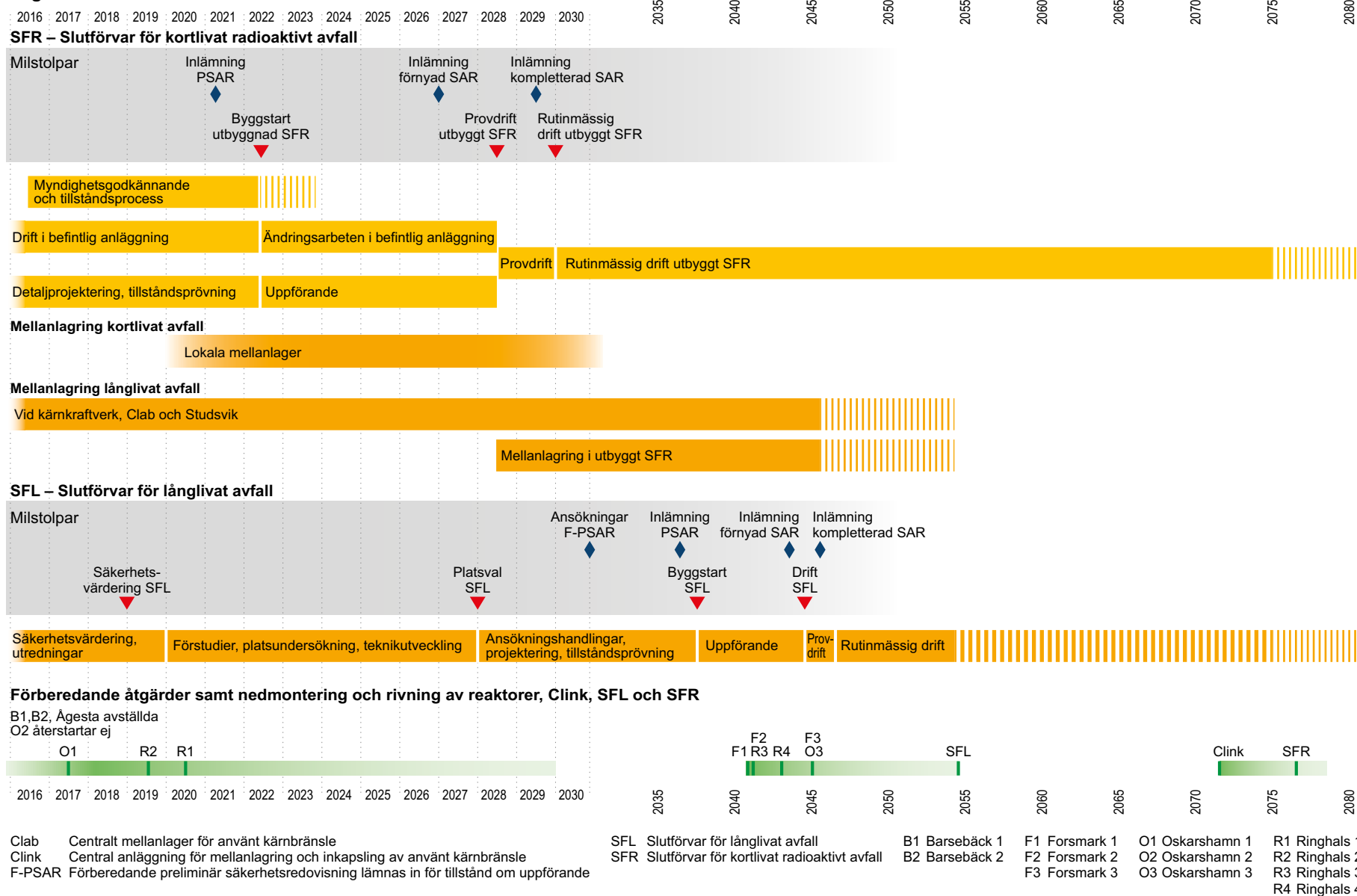
Figur 3-2 illustrerar en översiktlig tidsplan för låg- och medelaktivt avfall, tillsammans med viktiga milstolpar. För att tydliggöra kopplingen mot avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna visar figuren förberedande åtgärder samt nedmontering och rivning av reaktorer, Clink, SFL och SFR.

3.3.3 Kortlivat avfall

Mellanlagring av kortlivat avfall

Arbetet med att nedmontera och riva de sju första reaktorerna planeras att starta innan det utbyggda SFR är klart för drift. Barsebäck Kraft AB, OKG Aktiebolag och Ringhals AB planerar därför att mellanlagra det kortlivade rivningsavfallet på kraftverksområdena alternativt på annan plats. Det kommer även att finnas behov av att mellanlagra driftavfall under perioden då utbyggnaden av SFR pågår. Då bergarbeten utförs i anläggningen kommer det att vara deponeringsstopp i SFR. Om det från kraftverken finns stora behov av deponering under utbyggnaden skulle ett möjligt deponeringsfönster kunna planeras in efter genomförda bergarbeten.

Låg- och medelaktivt avfall



Figur 3-2. Tidsplan för låg- och medelaktivt avfall samt rivning av kärnkraftverken. Streckade staplar markerar osäkerheter och flexibilitet i planeringen.

Dessutom beräknas en förvarsdel i det befintliga SFR, bergssalen för lågaktivt avfall, nå sin lagringskapacitet inom ett par års tid. Det innebär att detta avfall också måste mellanlagras tills SFR är utbyggt.

Barsebäck Kraft AB har befintliga lager som kan användas för mellanlagring. För att möjliggöra mellanlagring av det kortlivade avfall som uppstår vid rivning av Barsebäck 1 och Barsebäck 2 finns behov av att öka befintlig kapacitet. Barsebäck Kraft AB har gjort en intern utredning kring behovet av mellanlager. Utredningen visar att lagringskapaciteten kan möjliggöras på egen anläggning alternativt externt på en annan kärnteknisk anläggning.

OKG Aktiebolag bedömer att lagerkapaciteten behöver utökas på anläggningen för att kunna mellanlagra kortlivat avfall från drift och rivning av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2, som uppkommer innan det utbyggda SFR kan tas i drift. Utökad kapacitet behövs även för mellanlagring av reaktortankar.

Ringhals AB har befintliga lager som kan användas för mellanlagring men kapaciteten behöver utökas för att hantera det kortlivade avfall som uppkommer vid rivning av Ringhals 1 och Ringhals 2 inklusive en reaktortank från Ringhals 1 (BWR).

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 utrymmen kan frigöras i lagren innan utbygganden av SFR inleds.

AB SVAFO planerar att uppföra en ny byggnad för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall. Mellanlagret planeras för att omhänderta avfall från egen verksamhet. Mellanlagret kommer att ligga i Studsvik och planeras att vara i drift kring 2019.

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

Omhändertagande av mycket lågaktivt avfall

Vid nedmontering och rivning av ett kärnkraftverk uppstår det både konventionellt och radioaktivt avfall som behöver tas omhand. Det radioaktiva avfallet kan deponeras i SFR, SFL eller markförvar. Det avfall som inte planeras att deponeras i SFL eller SFR och som innehåller så små mängder radioaktivitet att det bedöms kunna friklassas, hanteras enligt villkorad friklassning⁶ eller placeras i ett markförvar, se avsnitt 18.3.7.

Utbyggnad av SFR

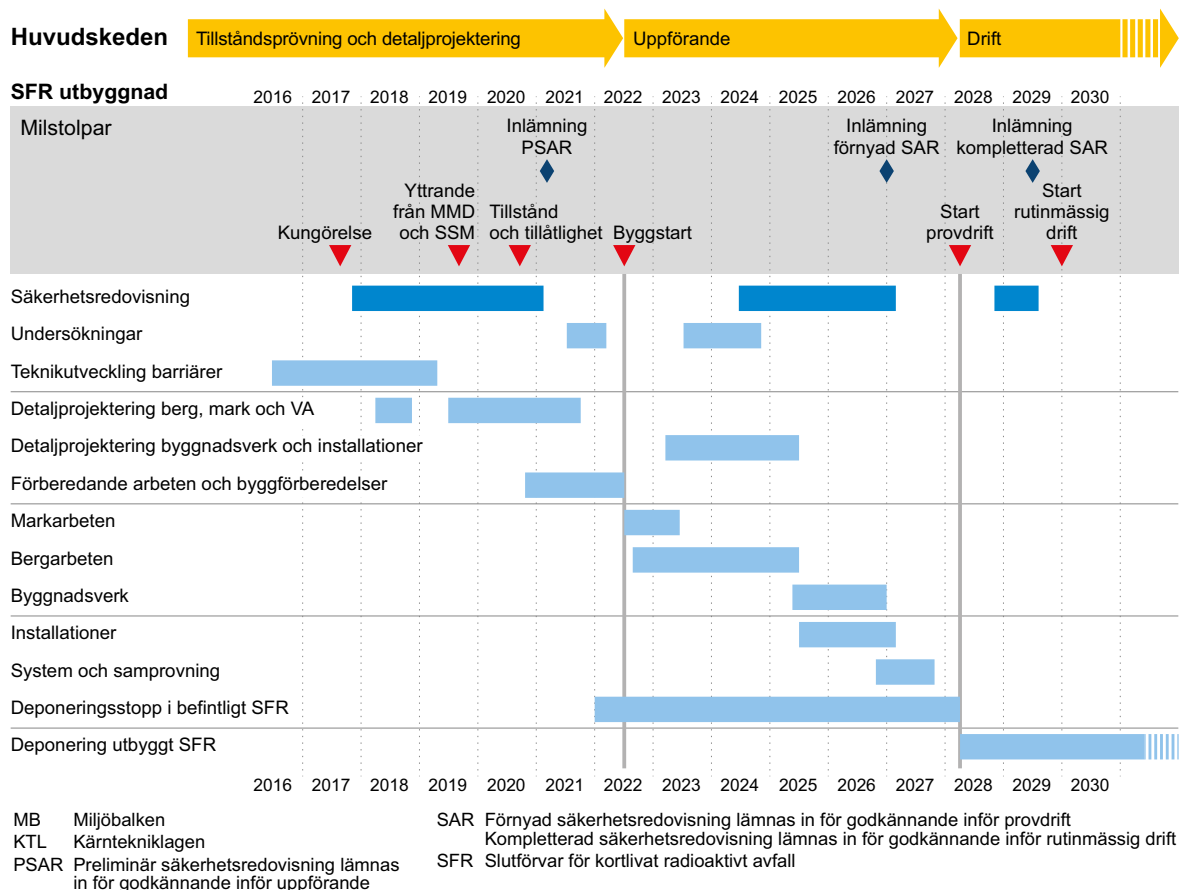
Att ta fram en ansökan för att bygga ut SFR har innefattat detaljerade undersökningar, analyser och beräkningar. En ansökan om att få bygga ut SFR och även kunna slutförvara rivningsavfall i anläggningen lämnades in i december 2014. Enligt SKB:s nuvarande planering, som anpassats till att tillståndsprövningarna bedöms ta längre tid än vad som tidigare avsatts, förväntas utbyggnaden kunna starta under 2022, med en planerad provdrift 2028. En översiktlig tidsplan för utbyggnad av SFR presenteras i figur 3-3.

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 politiska beslut. Initiativet ligger till stor del hos dessa instanser och tidsåtgången beror på deras handläggnings- och beslutstider. SKB:s uppgift består i att på olika sätt bistå i tillståndsprövsprocessen genom att lämna kompletterande uppgifter om detta önskas. Samtidigt fortsätter SKB utvecklingsarbetet med förvarets barriärer.

Under Fud-perioden kommer en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) att upprättas. Denna lämnas in till SSM efter att tillstånd erhållits enligt kärntekniklagen.

⁶ Villkorad friklassning innebär att friklassningen är förbunden med restriktioner för hur materialet får hanteras efter friklassning.



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

Under senare delen av tillståndsprövningarna genomförs även detaljprojektering, byggförberedelser och undersökningar.

Förutsatt att tillståndsprocessen inte drar ut på tiden förväntas nödvändiga tillstånd erhållas så att bygget kan inledas i början av 2020-talet. För att påbörja bygget krävs att SSM godkänner PSAR. Dessutom krävs bygglov från Östhammars kommun för byggande av ovanmarksanläggningen.

Uppförande och driftsättning av utbyggt SFR

Skedet för utbyggnad och överlämning till driftorganisation omfattar aktiviteterna bygge, provdrift och överlämning till rutinmässig drift. Då bergarbeten utförs under byggskedet kommer det att vara deponeringsstopp i anläggningen. Om det från kraftverken finns stora behov av deponering under utbyggnaden skulle ett möjligt deponeringsfönster kunna planeras in efter genomförda bergarbeten. 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 vid årsskiftet 2026/2027. Provdraft med deponering av avfall i den utbyggda delen av SFR antas kunna starta cirka ett år senare. Efter cirka ett års provdrift avser SKB att lämna in en kompletterad SAR. Enligt SKB:s bedömning kan ett godkännande om rutinmässig drift fås cirka 2030.

3.3.4 Långlivat avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utgörs i dagsläget 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. Reaktortankarna kan komma att hanteras med hårdkomponenter och interndelar kvar i tanken.
- Långlivat avfall från Studsvik Nuclear AB:s verksamheter samt från sjukvård, forskning och industri. 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. 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.

I slutet av 2013 presenterade SKB ett förslag till system, inklusive ett förvarskoncept, för slutligt omhändertagande av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet (Elfving et al. 2013). Den föreslagna förvarsutformningen utgår från avfallet och dess egenskaper. Eftersom avfallet grovt kan delas in i två huvudfraktioner, med olika egenskaper rörande både material- och nuklidinnehåll, fördelas avfallet i två förvarsdelar med olika barriärlösningar. Som ett nästa steg i utvecklingen påbörjades 2015 en säkerhetsvärdering av det föreslagna förvarskonceptet. Säkerhetsvärderingen planeras att avslutas 2018. Planeringen för systemets olika delar redovisas under respektive rubrik nedan.

Mellanlagring av långlivat avfall

SFL planeras att driftsättas runt 2045. Då flera reaktorer enligt nuvarande planering kommer att rivras innan slutförvaret står färdigt behövs kapacitet för mellanlagring av det långlivade avfall som uppstår vid rivningen.

Forsmarks Kraftgrupp AB driver i dag ett mellanlager för torr lagring i en byggnad på kraftverksområdet där bland annat långlivat avfall som uppkommit i samband med revisioner och effekthöjningar lagras. Avfallet består av segmenterade interndelar som placerats i ståltankar inför mellanlagringen.

OKG Aktiebolag driver i dag ett mellanlager, i ett bergrum på Simpevarpshalvön (BFA), för torr mellanlagring av långlivat avfall. Drifttillståndet innehas av OKG Aktiebolag, men BFA är godkänt för mellanlagring av hårdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. Hittills 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 i dag ett mellanlager i en byggnad som bedöms ha tillräcklig kapacitet för det långlivade avfall som uppkommer vid rivningen av Ringhals 1 och Ringhals 2. Ringhals AB:s nuvarande planering inkluderar mellanlagring av hela reaktortankar från PWR på det egna området till dess SFL har driftsatts.

Barsebäck Kraft AB har nyligen uppfört en ny byggnad på sitt kraftverksområde för torr mellanlagring av långlivat avfall från drift och rivning av Barsebäck 1 och Barsebäck 2. Avfallet kommer att bestå av segmenterade interndelar som placeras i ståltankar inför mellanlagringen.

AB SVAFO driver i dag 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. AB SVAFO planerar vidare att uppföra en ny byggnad för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall. Mellanlagret kommer att ligga i Studsvik och planeras att vara i drift kring 2019.

SKB planerar för en central mellanlagringslösning för det långlivade avfallet. Som en del i ansökningarna om att bygga ut SFR har SKB ansökt om att mellanlagra långlivat avfall i SFR-utbyggnaden. Ansökan avser långlivat avfall från drift och rivning av kraftverken som utgörs av segmenterade interndelar som placerats i ståltankar inför mellanlagringen. Mellanlagring kan påbörjas när den utbyggda delen av SFR driftsätts, och pågå tills det finns möjlighet att transportera avfallet till SFL eller ett annat mellanlager än SFR. Den förvarsdel som planeras för mellanlagring kommer sedan att nyttjas för slutförvaring av kortlivat rivningsavfall från de sista reaktorerna i programmet.

SKB ser kontinuerligt över behovet av mellanlagring av långlivat avfall i relation till befintlig och planerad kapacitet, för att säkerställa säkra och effektiva mellanlagringslösningar. Mellanlagringskapacitet bedöms som en nyckelfaktor i planeringen av hanteringen av det långlivade avfallet. Med god mellanlagringskapacitet säkras ett robust hanteringssystem för det långlivade avfallet, som är mindre känsligt för förändringar i förutsättningar och tidsplaner.

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

Figur 3-4 visar en översiktlig tidsplan för mellanlagring av långlivat avfall.

Behandling av långlivat avfall

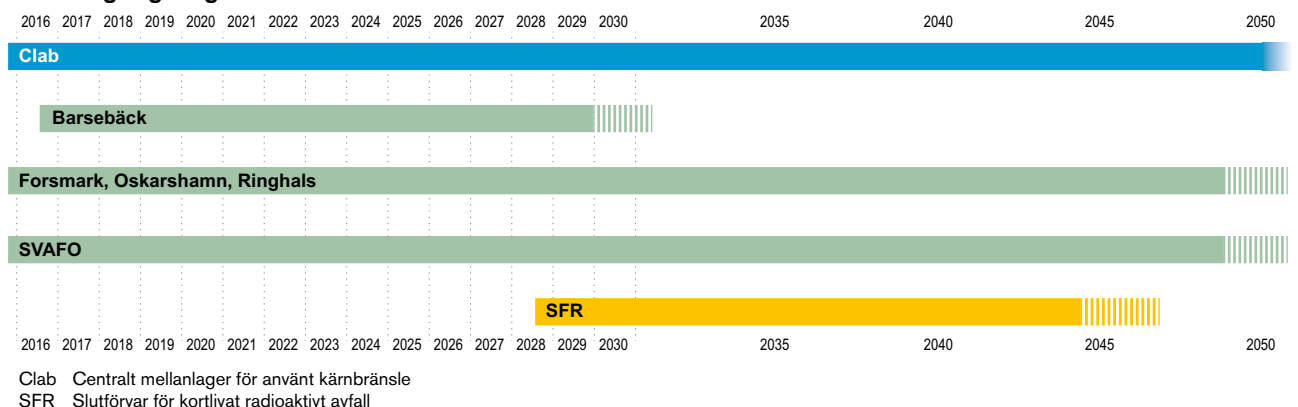
Det kan komma att bli aktuellt med konditionering av det långlivade avfallet innan deponering i SFL. Innan slutlig konditionering kan genomföras behöver acceptanskriterier fastställas för det långlivade avfallet. Utvecklingen av preliminära acceptanskriterier för det långlivade avfallet kommer fortsätta efter att den pågående säkerhetsvärderingen slutförts. Två huvudspår för det långlivade avfallet ingår i nuvarande planering: Stabilisering av metalliskt avfall från kraftverken i ståltankar respektive omlastning och konditionering av avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB i nya behållare anpassade för SFL (Pettersson 2013). Enligt nuvarande planer kommer eventuell konditionering av det långlivade avfallet att göras i samband med deponeringen i SFL. Detta är fördelaktigt ur strålsäkerhetssynpunkt eftersom avfallet då har klingat av under en längre tid. Dessutom måste acceptanskriterierna för SFL ha fastställts innan konditionering sker.

Transporter av långlivat avfall

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för transport av långlivat avfall placerat i ståltank. Transportbehållaren benämns ATB 1T. Den kommer, på grund av aktivitetens innehåll, att 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 Department of Transportation. Godkänt certifikat, Typ B(U), granskas och valideras sedan av SSM. Ansökningshandlingar för licensiering lämnades in till NRC i september 2015. NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) har under 2015 begärt vissa kompletterande tester vilket fördröjt licensieringsprocessen. Enligt den reviderade tidsplanen kommer behållaren att levereras under 2020.

Mellanlagring långlivat avfall



Figur 3-4. Uppskattad tidsplan för mellanlagring av långlivat avfall. SFL planeras att tas i drift cirka 2045.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL

SFL är det förvar som planeras att tas i drift sist. Fram till drifttagning finns det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom utvärdering och analys av säkerheten efter förslutning, val av plats, framtagning av ansökningar, uppförande etc. En översiktlig tidsplan för arbetet med SFL presenteras i Figur 3-5. 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 10 år.

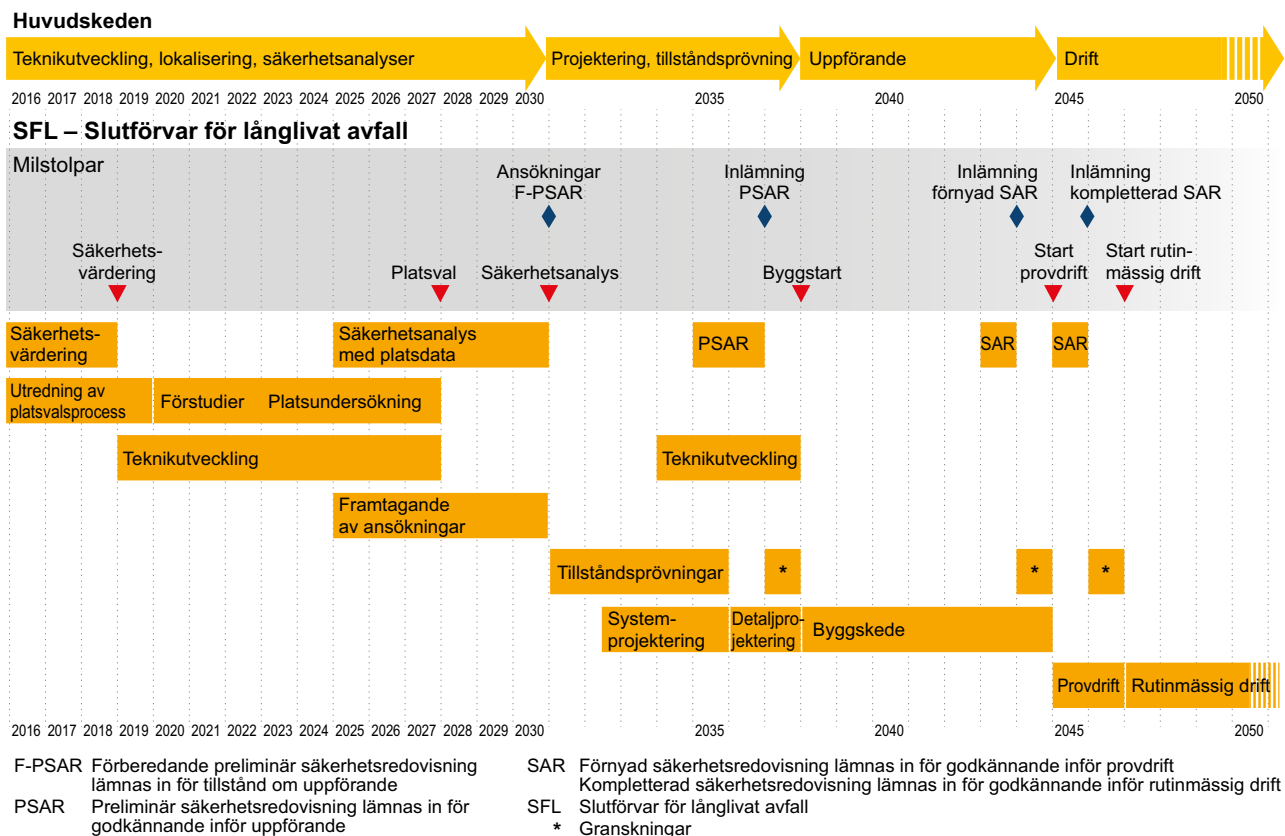
Förvarskoncept för SFL

SKB redovisade 2013 en utredning där olika förvarsutformningar 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 förvarsutformning för det långlivade avfallet presenterats. Enligt förslaget utformas SFL som ett geologiskt slutförvar på ett relativt stort djup med två olika förvarsdelar:

- En förvarsdel för det metalliska avfallet från kraftverken, till exempel hårdkomponenter och reaktortankar från PWR, vilken utformas med en barriär av betong.
- En förvarsdel för det i huvudsak historiska avfallet från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB vilken utformas med en barriär av bentonit.

Utvärdering av säkerheten efter förslutning av SFL

Nästa steg i utvecklingen är att utvärdera det föreslagna förvarskonceptet med avseende på säkerheten efter förslutning. Säkerhetsvärderingen utgör ett steg i den iterativa process som SKB tillämpar för utveckling av slutförvar för radioaktivt avfall, där teknikutveckling och forskning följs av utvärdering av säkerhet efter förslutning.



Figur 3-5. Uppskattad tidsplan för arbetet inför driftsättningen av SFL.

Säkerhetsvärderingen syftar till att ge SKB underlag för att bedöma om det föreslagna konceptet har potential att uppfylla kraven på säkerhet efter förslutning. Vidare ska säkerhetsvärderingen ge underlag för att bedöma under vilka förutsättningar förvarskonceptet (avfallet, barriärerna och förvarets omgivning) har potential att uppfylla säkerhetskraven. Resultaten från säkerhetsvärderingen är nödvändiga för eventuell modifiering av konceptet, utvecklingen av de tekniska barriärerna, acceptanskriterier för avfallet och för val av plats. Utvärderingen ska även ge underlag för att identifiera de områden där SKB behöver förbättra kunskapsläget för att senare kunna utföra fullständiga analyser av säkerheten under drift och efter förslutning för SFL. Säkerhetsvärderingen planeras pågå fram till 2018.

Teknikutveckling

En förstudie rörande slutförvarsanläggningens utformning har genomförts. Syftet med förstudien är att på ett tidigt stadium identifiera utvecklingsbehov och därmed fungera som underlag till teknikutvecklingsplanen för SFL.

Förstudien har nyttjat erfarenheter och kompetens från processkartläggning och projektering av Kärnbränsleförvaret och SFR-utbyggnaden. Resultatet av studien ger en övergripande beskrivning av anläggningens utformning, ingående tekniska system och dess övergripande funktion. Med hjälp av bland annat översiktliga funktionslayouter och flödesscheman beskrivs de processer, aktiviteter och funktioner som förväntas ingå i anläggningens verksamhet.

Med undantag av förvarsutrymmena förväntas inte uppförandet av slutförvarsanläggningen kräva någon teknikutveckling specifikt för SFL. Kommersiellt tillgänglig utrustning bedöms kunna användas och erfarenheter från uppförandet av Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR kommer SFL tillgodo. Däremot bedöms utvecklingen av tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarsdelarna samt hantering och slutförvaring av stora komponenter som till exempel hela PWR-tankar kräva riktade insatser, specifika för SFL.

Beträffande utrustningar och system för driftperioden, exempelvis terminalfordon och traverser, planeras ingen specifik utveckling för SFL utan här kan erfarenheter från SFR och Kärnbränsleförvaret nyttjas.

För återfyllnad av förvarsutrymmena bedöms dock att tekniska lösningar för att installera betong och bentonit behöver utvecklas specifikt för SFL. Parallellt med säkerhetsvärderingen inventeras olika metoder för återfyllnad.

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. SKB kommer därför att i likhet med tidigare processer identifiera och presentera de lokaliseringsfaktorer som utgör grund för värdering och urval.

Som ett resultat av den pågående säkerhetsvärderingen kommer SKB att redovisa säkerhetsrelaterade krav på platsen. Baserat på dessa kommer de lokaliseringsfaktorer som ska användas för platsvärderingen att identifieras och fastställas. Lokaliseringsfaktorerna förväntas inte skilja sig avsevärt från de faktorer som använts i tidigare lokaliseringsprocesser som SKB har genomfört, men en översyn baserad på säkerhetsvärderingens slutsatser och tidigare erfarenheter kommer att göras. Utöver detta planerar SKB, under den kommande treårsperioden, utredningar för att bland annat identifiera kompetensbehov och lämplig organisation för lokaliseringsarbetet. Inriktningen är att i Fud-program 2019 kunna presentera lokaliseringsfaktorerna samt en planering för lokaliseringsprocessen som helhet.

Med lokaliseringsfaktorerna och den kunskap om rikets geologi som förvärvats genom SKB:s tidigare platsvalsprocesser som grund, kan nästa steg i lokaliseringsarbetet påbörjas. Utöver de säkerhetsrelaterade egenskaperna är den lokala acceptansen väsentlig för lokaliseringen, men även andra faktorer såsom hälsa, miljö, infrastruktur och samhällsresurser vägs in. Berörda kommuner och andra intressenter involveras i detta steg i processen som kommer att resultera i en sammanvägd värdering av aktuella platser egenskaper med avseende på lokaliseringsfaktorerna.

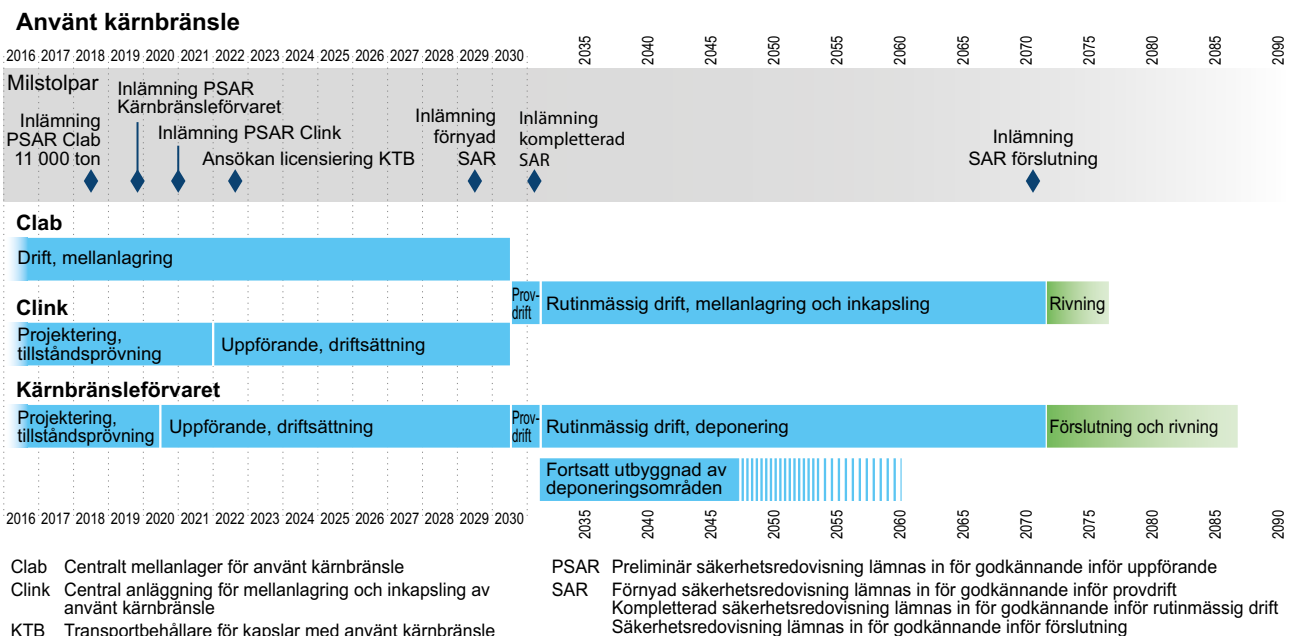
Platsundersökningar utgör nästa steg i processen och syftar till att öka kunskapen om de plats-specifika egenskaperna. Platsundersökningar innebär både karakterisering av bergets egenskaper genom provborrningar och mätningar, och inventering av ekosystemen på ytan. Resultatet av undersökningarna utgör underlag till kommande säkerhetsanalyser och därmed för platsvalet.

Ansökningar, uppförande, drift och förslutning av SFL

Ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för SFL planeras att lämnas in runt 2030. Efter att ansökningarna lämnats in fortsätter arbetet med bland annat systemprojektering. Detaljprojektering påbörjas då tillstånd att uppföra SFL har erhållits. Uppförande och provdrift följs av rutinmässig drift. Förslutning av SFL avses ske 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.

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 3-6 illustrerar en översiktlig tidsplan tillsammans med viktiga milstolpar.



Figur 3-6. Översiktlig tidsplan för KBS-3-systemets olika anläggningar.

3.4.1 Nuläge

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

- Slutförande av tillståndsprovningarna 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 och förberedelser för utökning av mellanlagringskapaciteten i Clab utöver 8 000 ton bränsle.

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 vad som, med aktuella erfarenheter, bedöms som realistiska tidsplaner för tillståndsprocess, uppförande och driftsättning och syftar till att driften av systemet ska starta så tidigt som möjligt.

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

- 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 pågår och SKB besvarar frågor och begäranden om kompletteringar till både SSM och Mark- och miljödomstolen. Kungörelse av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen gjordes i januari 2016. SSM lämnade sitt yttrande till Mark- och miljödomstolen i juni 2016.
- För Kärnbränsleförvaret har systemprojektering av slutförvarets anläggningsdelar och tekniska system genomförts. Nu pågår förberedande arbete inför detaljprojekteringen, vilket bland annat inkluderar kompletterande geotekniska undersökningar, förprojektering och utredningar samt formulering av krav inför detaljprojektering. Kompensatoriska miljöåtgärder har utförts på platsen och det pågår löpande arbete med övervakning av platsen och förvaltning av byggnader, mark och borrhål.
- 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).
- En modernisering av SAR för Clab har genomförts och har nyligen lämnats in till SSM.
- Inom arbetet med konstruktionsförutsättningar för Clab 11 000 ton, fastställs kravbild och specificeras om det behövs ändringar i säkerhetskonceptet. Vidare genomförs en uppdatering av de analyser som är beroende av inventariet.
- Arbetet med PSAR för Clab avseende ökad lagringskapacitet till 11 000 ton inleds 2016/2017 och färdigställs under sommaren 2018.
- Arbetet avseende systemprojektering av den integrerade mellanlagrings- och inkapslingsanläggningen, Clink, har påbörjats.

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.

Jämfört med de planer som redovisades i Fud-program 2013 har tidpunkten för byggstart och idrifttagningen av Kärnbränsleförvaret och Clink senarelagts med cirka ett år. Anledningen till senareläggningen är en anpassning till att tillståndsprövningarna bedöms ta längre tid än vad som tidigare ansatts.

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

- huvudförhandling i Mark- och miljödomstolen
- Mark- och miljödomstolens och SSM:s yttranden till regeringen
- kommunens ställningstagande följt av
- regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet.

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 efter regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet.

Innan uppförande av de anläggningsdelar som har betydelse för säkerheten i Kärnbränsleförvaret kan inledas, ska två dokument lämnas in och godkännas av SSM:

- Den preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR).
- En redovisning av hur SKB, under uppförandet av anläggningen, ska hantera frågor av betydelse för säkerhet under drift och efter förslutning. Redovisningen benämns Suus (Säkerhet under uppförande av slutförvar).

Dokumenterna 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. Under den tid det tar att uppföra Clink samt under den inledande driften av Clink kommer den mängd som mellanlagras i Clab överstiga den i dagsläget tillståndsgivna mängden på 8 000 ton bränsle. SKB har därför ansökt om och planerar åtgärder för att öka kapaciteten för mellanlagring av använt bränsle som en del av ansökan om uppförande och drift av Clink.

Åtgärder för att öka Clabs lagringskapacitet för använt kärnbränsle

Lagringskapaciteten i Clab har två begränsningar, dels tillåten mängd använt bränsle i anläggningen, dels antalet fysiska lagringspositioner i bassängerna. SKB:s tillstånd för Clab omfattar mellanlagring av 8 000 ton bränsle. Enligt dagens prognoser beräknas denna mängd uppnås cirka 2023. Under våren 2015 gjorde SKB en komplettering av ansökan för Clab och Clink enligt kärntekniklagen. I kompletteringen ingår även ett tilläggsyrkande för att utöka den mellanlagrade mängden i Clab till 11 000 ton. För en utökning behövs beslut från både SSM och regeringen.

SKB kommer att upprätta en PSAR för Clab för den utökade lagringskapaciteten och lämna in denna till SSM för godkännande under 2018. Fram till och med 2020 kommer SKB att genomföra de ändringar i anläggningen som krävs för den utökade bränslemängden. Den i dag kända anläggningsändringen för att klara 11 000 ton omfattar en uppgradering av kylkedjan. Därefter förnyas Clabs SAR och SSM:s medgivande om utökning av mellanlagringskapaciteten förväntas komma under senare delen av 2021.

Om inga andra åtgärder vidtas än en tillståndsmässig utökning av lagringskapaciteten kommer Clabs lagringspositioner att vara fyllda cirka 2027. Denna tidpunkt har inte påverkats i någon större utsträckning av den nu beslutade förtida stängningen av fyra reaktorer. För att utöka den fysiska lagringskapaciteten för bränslet planerar SKB att lasta om det bränsle som fortfarande lagras i normalkassetter till kompaktkassetter. Denna åtgärd gör att lagringskapaciteten i Clab beräknas räcka till 2032.

En andra åtgärd, som kan genomföras om behov finns, är att segmentera styrvastavarna från BWR som i dag är utrymmeskrävande. Styrvastavarna från PWR är integrerade i bränslet och kräver inget extra utrymme. Efter segmenteringen skulle BWR-styrvastavarna kunna packas tätare i förvaringskassetterna och föras tillbaka till Clabs lagringsbassänger, alternativt mellanlagras på annan plats. En studie har avslutats i slutet av 2015. Den analyserade lämplig teknik och plats för segmentering och vidare mellanlagring. Ett alternativ som fördes fram i denna är att utföra segmenteringen i bassängerna i Clabs mottagningsdel. Inga åtgärder planeras i dagsläget för de övriga härdkomponenter som lagras i Clab. De enda härdkomponenter som kommer att tas emot i Clab framöver är BWR-styrvastavar och sonder. Andra härdkomponenter mellanlagras på kraftverksområdena. När SFR-utbyggnaden tagits i drift finns det möjlighet att vid behov transportera dessa till SFR för fortsatt mellanlagring där, om tillstånd för detta erhålls.

3.4.4 Inkapsling

Ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra inkapslingsanläggningen och att få inneha och driva den som en integrerad anläggning med Clab lämnades in 2006. Efter SSM:s inledande bedömning meddelade myndigheten att ansökan behövde kompletteras och att Clab och inkapslingsanläggningen skulle betraktas som en anläggning, Clink. SKB redovisade sådana kompletteringar i oktober 2009. I mars 2011 kompletterade SKB sin ansökan avseende Clink och ansökte samtidigt om tillstånd enligt kärntekniklagen för Kärnbränsleförvaret. Samtidigt inlämnades en ansökan enligt miljöbalken för hela slutförvarssystemet, innefattande Clink och Kärnbränsleförvaret. I januari 2015 överlämnade SKB ytterligare en komplettering av ansökan enligt kärntekniklagen för Clink.

Den teknikutveckling som pågår och planeras avser främst processerna kring hanteringen och kontrollen av det använda kärnbränslet, tillverkning av komponenter till kapseln samt förslutningssvetsning och oförstörande provning av komponenter och förslutningssvets. Detta redovisas i kapitel 7 och 8.

Projektering, uppförande och driftsättning av Clink kommer att bedrivas i SKB:s regi.

Tillståndsprovning och projektering

Hur den kärntekniska strålsäkerheten i anläggningen Clink kommer att upprätthållas framgår av den så kallade förberedande preliminära säkerhetsredovisningen (F-PSAR) för anläggningen som lämnades in i samband med kompletteringen 2015. Anläggningens utformning och hur kraven uppfylls kommer stegvis att förtydligas och detaljeras i takt med att teknikutvecklingen drivs framåt samt att synpunkter inkommer från myndigheten under tillståndsprovningen.

Under tillståndsprovningen samt tiden fram till start av uppförandet av inkapslingsdelen kommer SKB att projektera Clink samt upphandla uppförandet. Denna fas kallas för projekterings- och upphandlingsfasen och kommer att vara indelad i fyra delvis överlappande delfaser; anläggningskonfiguration, systemkonstruktion och detaljkonstruktion.

Anläggningskonfigurationsfasen är i princip avslutad men uppdatering av kravbilderna för Clink kan ske utifrån nya eller uppdaterade föreskriftskrav samt utifrån de synpunkter som inkommer från myndigheten under tillståndsprovningen.

SKB avser därefter att gå vidare med systemkonstruktion av Clink. Den ytterligare detaljeringen av konstruktionen och verksamheten som sker i samband med detta, kommer att redovisas i en PSAR för den integrerade anläggningen Clink. SKB kommer därefter att upprätta en plan för uppförande av inkapslingsdelen och anläggningsändringar i Clab.

När SSM godkänt PSAR för Clink kommer SKB att fortsätta detaljkonstruktionen och genomföra de upphandlingar som krävs för att påbörja uppförandet av inkapslingsdelen och genomförandet av de ändringar som behöver göras på mellanlagringsdelen. SKB kommer att meddela de ändringar som behöver göras på mellanlagringsdelen i form av så kallade ändringsärenden i enlighet med kraven i SSMFS 2008:1.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av inkapslingsdelen. Detta innebär bland annat att PSAR för anläggningen har godkänts av SSM.

Uppförandet kommer att vara indelat i två parallella delar, en för ändringsarbeten i befintligt Clab och en för uppförandet av den nya inkapslingsdelen.

Eftersom driften av Clab fortgår under hela uppförandet av inkapslingsdelen kommer entreprenaderna att anpassas så att strålsäkerheten i Clab kan upprätthållas och störningarna på driften minimeras. Utbyggnaden av Clab, etapp 2, genomfördes på liknande sätt och erfarenheterna därifrån är ett viktigt underlag för planering av när inkapslingsdelen projekteras och byggs.

Under perioden då anläggningsarbeten utförs i befintligt Clab kan det uppstå perioder med reducerad kapacitet för mottagning av använt kärnbränsle. Planeringen inför uppförande och driftsättning kommer att vara särskilt viktig för att minimera störningar avseende mottagningen.

Uppförandefasen 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 och samprovras.

Driftsättning

I samband med att anläggningsdelarna kopplas samman kommer inledande tester av driften att genomföras. Eftersom testerna är viktiga för personalutbildningen blir dessa resursintensiva och kan komma att påverka kapaciteten för mottagning av använt kärnbränsle.

De inledande testerna av driften kommer att bestå av tre faser: provning och driftsättning av enskilda system, samfunktionsprovning av Clink samt samfunktionsprovning av hela KBS-3-systemet.

Samfunktionsprovning av Clink innebär att anläggningens funktion provas genom att testköra hela inkapslingsprocessen utan använt kärnbränsle, det vill säga med kopparkapslar och attrapper av bränsleelement. Samfunktionsprovning av KBS-3-systemet innebär att Clink provas tillsammans med transportsystemet och Kärnbränsleförvaret.

Innan provdrift påbörjas tas en förnyad SAR fram och den lämnas in till SSM för godkännande. SKB:s planering är att göra det under 2029. Provdriften antas starta ett år senare. Senare ska säkerhetsredovisningen kompletteras med erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM innan den rutinmässiga driften kan påbörjas. Enligt SKB:s bedömning kan ett godkännande om rutinmässig drift fås i början av 2032.

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 anläggning för sammansättning av kapselkomponenter. Leverantörerna tillverkar segjärnsinsatser och kopparkomponenter till kapslarna enligt SKB:s specifikationer. Dessa levereras till SKB:s anläggning där mekanisk bearbetning, provning 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 kapselproduktionens kvalitetsarbete.

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 samt förslutningssvetsning och oförstörande provning av komponenter och förslutningssvets. Detta redovisas i kapitel 8.

3.4.5 Transporter av bränsle

Transport av bränsle från kärnkraftverken

Arbete pågår för att ersätta SKB:s nuvarande bränsletransportbehållare med nya som uppfyller moderna krav. 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 levereras under perioden 2019–2021. Under 2019 behöver beslut tas om en sjätte behållare ska beställas.

Från augusti 2015 krävs en ny konstruktion av bottenstötdämpare till SKB:s befintliga bränsletransportbehållare. Tidigare gjordes bedömningen att SKB skulle kunna genomföra ett begränsat antal transporter utan anskaffning av nya bottenstötdämpare. Strategin var att genom att vidta kompensatoriska åtgärder och minimera antalet transporter erhålla tillstånd enligt särskild överenskommelse från SSM för de transporter som återstod innan nya transportbehållare som uppfyller kraven tas i drift. Bland annat har besluten om tidigare nedläggningar av kraftverk ändrat förutsättningarna. SKB har därför beslutat att införskaffa nya bottenstötdämpare. I väntan på leverans av dessa har tillstånd att genomföra transporter med befintliga behållare utan bottenstötdämpare enligt särskild överenskommelse erhållits från SSM. Befintliga transportbehållare med nya bottenstötdämpare ska valideras av SSM innan de används.

Transport av inkapslat bränsle

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för transport av inkapslat använt kärnbränsle 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.

SKB har tidigare genomfört förstudier rörande tänkbar utformning av kapseltransportbehållare. Tillsammans med behållarleverantörer har SKB redovisat förslag på konstruktion och funktionalitet till projekten som arbetar med utformning av anläggningar och system i KBS-3-systemet.

Den slutliga konstruktionen av kapseltransportbehållaren tas fram i samarbete med den leverantör som kommer att väljas. Utformningen görs i en iterativ process med fokus på 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 uppskattas till 3–4 år och tillverkning 1–2 år. Kapseltransportbehållaren ska sedan testas tillsammans med Clink och Kärnbränsleförvaret före driftstart.

Första kapseltransportbehållaren ska levereras till Clink och Kärnbränsleförvaret inför provningen av enskilda system. Denna provning kan med dagens tidsplan påbörjas cirka 2025. 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 2027–2030, parallellt med samfunktionsprovning och provdrift.

3.4.6 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 prövning av ansökningarna pågår.

Tillståndsprövning och projektering

Anpassat till tillståndsprövningarnas framdrift görs de förberedelser som krävs för att kunna påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvarets tillfarter kort efter att alla tillstånd är erhållna. 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 bemannas efter de arbetsuppgifter som projektet har.

Parallellt med tillståndsprövningarna projekteras slutförvarsanläggningen. SKB har fullföljt systemskedet och förbereder nu för kommande detaljprojektering. Förberedelserna omfattar även byggtkniska och ingenjörsgelogiska undersökningar, vilka behövs som stöd för projekteringen inför byggstart. 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 behov kan tillgodoses.

Under tillståndsprövningarna sker även arbeten avseende Kärnbränsleförvarets påverkan på den yttre miljön. SKB har ansökt om artskyddsdispens hos Länsstyrelsen i Uppsala i detta ärende. Den av länsstyrelsen beviljade dispensen har överklagats och ärendet ligger nu hos Mark- och miljödomstolen precis som hela ansökan.

Detaljprojekteringen kommer att göras successivt i takt med att anläggningen byggs ut. Detaljprojekteringsresultat 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 anläggningsdelar ovan mark. När anläggningen tagits i drift fortsätter detaljprojekteringen av de delar som byggs ut parallellt för att förbereda nya deponeringsområden. För genomförandet av den detaljprojektering som sker parallellt med utbyggnaden, speciellt av deponeringstunnlar och deponeringshål, behövs även resultat och underlag från teknikutveckling inom berg, se kapitel 11.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått nödvändiga tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av slutförvarsanläggningen. Det innebär bland annat att en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) och en redovisning av hur frågor av betydelse för säkerhet, främst efter förslutning, hanteras under uppförandeskedet, ska ha lämnats in och godkänts av SSM. Uppförandet av undermarksanläggningarna kan indelas i tre huvuddelar: 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 första schaktet sprängs 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 berguppföringen till ytan via berghissen (skipen) har tagits i drift ökar kapaciteten i 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 undermarksarbeten. I första skedet görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor görs i ordning och byggprovisorier etableras.

Drivningen av tillfarterna och centralområdet kommer att ge fördjupade kunskaper om bergförhållandena och erfarenheter som tas tillvara kommer att omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller förändrad förvarsutformning.

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 borrar. Syftet med att färdigställa ett deponeringsområde i detta tidiga skede är dels att samla de geovetenskapliga data som behövs för att underbygga en förnyad säkerhetsredovisning inför provdrift, dels att skapa utrymme för integrationstester och samfunktionsprovning innan överlämnande till provdrift. När driften sedan inleds ska området användas för deponering av de första kapslarna med använt kärnbränsle.

Driftsättning

Driftsättningen av slutförvarets delsystem sker successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras. Exempelvis kommer uppföringssystemet för bergmassor (berglaststation, skipschakt 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, och personalen utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrimningen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning av Kärnbränsleförvaret, 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 byggs 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 10.

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 2030. Innan en anläggning kan tas i rutinmässig drift ska säkerhetsredovisningarna kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM.

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 beskrivs de beroenden som finns i systemet, mellan olika funktioner och mellan dess aktörer. Slutligen redovisas det behov av ytterligare utvecklingsarbete som kvarstår för att möjliggöra avvecklingen av de berörda anläggningarna.

Fud-program 2016 i allmänhet, och del III i synnerhet, utgör tillsammans med respektive tillståndshavares avvecklingsplan(er) och industrins gemensamma kostnadsberäkning i Plan-rapporten tre samverkande, kravställda, toppdokument som redovisar den avveckling som planeras av de svenska kärnkraftverken och övriga befintliga eller planerade kärntekniska 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. Plan-rapporten redovisar den beräknade kostnaden för avvecklingen så som den beskrivs i Fud-programmet och avvecklingsplanerna. Toppdokumentet baseras på underliggande dokumentation, där en central gemensam referens utgörs av de rivningsstudier som genomfördes för respektive förlägningsplats inför Plan-rapporten 2013. Rivningsstudierna är framtagna med kostnadsfokus men beskriver även det tekniska tillvägagångssättet och berör därmed alltifrån organisatoriska till avfallsvolymsmässiga aspekter. Innehåll i rivningsstudier och övrig underlagsdokumentation återges summariskt när de refereras i de tre toppdokumenten.

3.5.1 Översikt avveckling

Avveckling av en reaktor-anläggning omfattar ett flertal aktiviteter för att uppnå en friklassad anläggning. 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 av anläggningen så snart som möjligt efter avställning. När anläggningen/anläggningsdelarna friklassats genomförs konventionell rivning och återställning av mark.

I och med att nedmontering och rivning av Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 och Ringhals 2 påbörjas innan det utbyggda SFR står klart för att ta emot kort- och långlivat 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 18-1 (se del III) visar den övergripande tidsplanen för avveckling av samtliga kärnkraftverk samt SKB:s anläggningar. Här ges en sammanfattning av nuläget för respektive kärnkraftverk samt planeringen för den kommande avvecklingen av dessa anläggningar och SKB:s anläggningar.

Barsebäck Kraft AB

Service drift av Barsebäck Kraft AB:s två reaktorer, Barsebäck 1 och Barsebäck 2, pågår sedan 2006. Beslut har fattats att segmentera reaktortankarnas interndelar och mellanlagra dessa i ståltankar i en ny lagerbyggnad på anläggningen. Byggnaden är uppförd och segmentering startar under hösten 2016.

Framtagning av ett radiologiskt kontrollprogram för friklassning av rivningsmaterial, byggnader och mark har påbörjats. Dessutom har förberedelser och etablering av en projektorganisation inför avveckling inletts.

Nedmontering och rivning av kärnkraftverket planeras att starta 2021 och friklassning planeras ske i slutet av 2020-talet.

OKG Aktiebolag

OKG Aktiebolag har sedan augusti 2016 en ny avdelning i drift med ansvar för avvecklingsverksamheten. 2015 inleddes Decommissioning Preparation Project (DPP) som haft till uppgift att implementera den nya avdelningen samt ta fram de underlag och genomföra de förberedelser som krävs för att Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 ska kunna övergå till avställningsdrift, följt av service drift och därefter nedmonteras och rivs.

Oskarshamn 1 planeras att slutligen ställas av sommaren 2017 och Oskarshamn 2 återstartas inte. Avveckling av de två reaktorerna planeras vara slutförd 2025. Oskarshamn 3 planeras vara i drift fram till 2045.

Ringhals AB

I december 2015 inledde Ringhals AB ett avvecklingsprojekt för Ringhals 1 och Ringhals 2 med syfte att nedmontera och riva anläggningarna. Fokus i närtid är att analysera förutsättningarna för avvecklingen 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 reaktorerna samtidigt som driften av Ringhals 3 och Ringhals 4 kan fortgå enligt planerad verksamhet.

Ringhals 1 och Ringhals 2 planeras att slutligen ställas av sommaren 2020 respektive 2019 och planeras vara avvecklade 2026 respektive 2025. Ringhals 3 och Ringhals 4 planeras vara i drift fram till 2041 respektive 2043.

Forsmarks Kraftgrupp AB

Forsmark Kraftgrupp AB:s samtliga reaktorer planeras vara i drift i totalt 60 år, vilket innebär att Forsmark 1 ställs av år 2040, Forsmark 2 år 2041 och Forsmark 3 år 2045.

Kärnkraftverket planeras vara avvecklat som helhet 2051.

Ågestaanläggningen

Kärnkraftverket i Ågesta befinner sig sedan 1974 i servicedrift. Ett avvecklingsprojekt startade i november 2015. Nedmontering och rivning planeras att starta senast 2020 då miljötillståndet för servicedrift går ut. Avvecklingen planeras att vara genomförd 2025.

SKB:s anläggningar

Avvecklingen av Clink och Kärnbränsleförvaret kan inledas tidigast när allt använt kärnbränsle har deponerats medan avvecklingen av SFR tidigast kan inledas när avfallet från avvecklingen av Clink har deponerats. SFL däremot kan avvecklas då det långlivade avfallet från den sista reaktorn tagits om hand.

3.6 Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar

SKB:s och tillståndshavarnas planering för omhändertagande av avfallet baseras på de förutsättningar och antaganden som gäller i dag för kärnkraftsprogrammet. 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.

3.6.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

Sedan föregående Fud-program har beslut tagits om förtida stängning av de fyra 70-talsreaktorerna Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1 och Ringhals 2. Dessa reaktorer kommer att ställas av inom de närmaste fyra åren, se avsnitt 1.1.3. Planeringen för resterande sex reaktorer, 80-talsreaktorerna, har inte ändrats utan den planerade drifttiden är, liksom i Fud-program 2013, 60 år. 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 80-talsreaktorerna.

Förlängning av de planerade drifttiderna

SKB:s anläggningar inom KBS-3-systemet dimensioneras för att hantera och deponera 6 000 kapslar. Kärnkraftsföretagens aktuella prognoser, med hänsyn tagen till de förtida avställningarna enligt ovan, ger cirka 5 700 kapslar. Detta ger en marginal för eventuella förlängda drifttider för 80-talsreaktorerna. Det dimensionerande kapselantalet om 6 000 kapslar nås om de kvarvarande reaktorer förlänger sin drifttid med cirka fem år, det vill säga till en total drifttid på cirka 65 år. Skulle drifttiden förlängas ytterligare bedöms kapaciteten i Kärnbränsleförvaret kunna ökas, efter vederbörlig tillståndsprövningsprocess, genom att utnyttjade områden på det valda försvarsdjupet tas i anspråk.

Behovet av mellanlagringskapacitet i Clab för bränsle påverkas inte av en förlängning av reaktorer driftdrift 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, se avsnitt 3.6.6.

Dimensioneringen av SFR:s utbyggnad bedöms ge tillräcklig marginal för tillkommande driftavfall vid förlängda drifttider. Dimensioneringen baseras på de tidigare planerade drifttiderna för reaktorer 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 förvaringsvolymen i SFL fram till byggstart, det vill säga 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 så 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 under senare delen av 2021. Enligt dagens prognoser nås 8 000 ton bränsle cirka 2023. 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 sluthärdarna successivt kan transporteras till och mellanlagras på Clab. Mellanlagring av använt bränsle på kraftverken efter slutlig avställning är inte ett önskvärt scenario.

Minskad mängd använt bränsle innebär även att det totala kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Omfattningen beror naturligtvis på hur många reaktorer som skulle beröras och hur mycket drifttiderna förkortas.

Förkortade drifttider skulle troligen också innebära en tidigareläggning av rivningen av berörda reaktorer. SFR kommer enligt planerna även att fungera som mellanlager för långlivat avfall. Om den sista reaktorn rivs innan SFL har tagits i drift behövs en alternativ mellanlagringskapacitet för det långlivade avfallet. Alternativt kan det kortlivade rivningsavfallet från den sista reaktorn mellanlagras på kraftverket tills SFL står färdigt så att mellanlagringen av det långlivade avfallet kan fortsätta i SFR. Slutligen beror detta givetvis på den totala volymen kortlivat avfall i förhållande till SFR:s slutförvarskapacitet och den kapacitet som planeras tas i anspråk för mellanlagring.

3.6.2 Drifttagning av det utbyggda Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SKB planerar att ta det utbyggda SFR i provdrift 2028. Enligt planeringen kommer rivningen av de sju första reaktorerna (inklusive Ågesta) påbörjas innan SFR-utbyggnaden står klar. Det innebär att olika mellanlager för det kort- och långlivade rivningsavfallet behövs, se 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 (långlivat avfall). En försening av SFR-utbyggnaden innebär därmed även en försening av anläggningens friklassning om inte avfallet har 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.

Genom att kraftverken nu planerar för att mellanlagra avfallet så är avfallssystemet inte så känsligt för mindre förseningar av drifttagandet av det utbyggda SFR.

Tidigareläggning

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

3.6.3 Mellanlagringskapacitet för låg- och medelaktivt avfall

Genom att rivningen av de sju första reaktorerna kommer att inledas innan SFR-utbyggnaden står klar för att ta emot avfall så behöver rivningsavfallet mellanlagras. Enligt redovisningen i avsnitt 3.3.4 så bedöms mellanlagringskapaciteten för det långlivade avfallet vara tillräcklig fram till cirka 2040 då de resterande reaktorerna planeras ställas av.

När det gäller det kortlivade och lågaktiva avfallet är volymerna stora och det finns flera alternativ för omhändertagande av avfallet. En del ska till SFR och behöver mellanlagras i avvaktan på att SFR-utbyggnaden kan tas i drift. En del kan placeras i markförvar och en del kan hanteras som konventionellt avfall efter friklassning. Detta avfall skulle i så fall inte behöva mellanlagras.

Det finns således olika scenarier avseende hur stora volymer som kan behöva mellanlagras och var det i så fall ska mellanlagras. Mellanlager för kortlivat avfall finns i dag vid kärnkraftverken, se avsnitt 2.1.1 och 3.3.3, men kapaciteten räcker inte för att ta hand om rivningsavfallet.

3.6.4 Drifttagning av Slutförvaret för långlivat avfall

SKB:s planering är att SFL tas i drift cirka 2045 och de sista reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 ställs av ungefär samtidigt, se avsnitt 3.3.4.

Senareläggning

Om SFL skulle driftsättas senare än nuvarande planering innebär detta en förlängd mellanlagring av det långlivade avfallet i SFR eller på kraftverksområdena. Detta skulle i sin tur kunna påverka kärnkraftsföretagets möjlighet att avveckla den kärntechniska verksamheten på sina områden.

En förlängd mellanlagring av långlivat avfall i den utbyggda delen av SFR kan påverka möjligheten att deponera det kortlivade rivningsavfallet från de sista reaktorerna i programmet i SFR. Det är således viktigt att SFL kan tas i drift som planerat.

Tidigareläggning

Inför Fud-program 2013 gjorde SKB en genomgång av tidsplanen för SFL baserat på en tidsbedömning av de nödvändiga utvecklingsstegen. Genomgången visade att det finns begränsade möjligheter att driftsätta slutförvaret avsevärt tidigare än planerat. 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 samt minska mängden mellanlagrat avfall i SFR.

3.6.5 Lokalisering av Slutförvaret för långlivat avfall

SFL planeras att uppföras som en anläggning med två olika förvarsdelar med olika barriärlösningar. Ett alternativ är att lokalisera de två förvarsdelarna på olika platser. En sådan lösning skulle kunna aktualiseras om det visar sig att kraven på platsen med avseende på säkerheten efter förslutning skiljer sig tydligt åt mellan förvarsdelarna. Den pågående säkerhetsvärderingen syftar till att ta fram underlag för att identifiera lokaliseringsfaktorer som stöd för den fortsatta lokaliseringsprocessen.

Lokalisering av de två förvarsdelarna på olika platser skulle kunna ske på olika sätt, genom att lokalisera delarna enskilt eller genom att lokalisera en eller båda till något annat slutförvar. Konsekvenserna av olika lokaliseringar hanteras inom ramen för lokaliseringsprocessen, där en sammanvägd bedömning av olika lokaliseringsfaktorer ligger till grund för platsvalet. En delad lokalisering förväntas inte öka möjligheterna att tidigarelägga drifttagande av förvaret, såvida inte lokalisering sker till något annat befintligt slutförvar. I så fall skulle byggskedet eventuellt kunna kortas då samutnyttjande av ramp och schakt skulle kunna förkorta tiden för tunneldrivning ned till förvarsdjup.

3.6.6 Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink

Enligt planerna inleds provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink cirka 2030 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. För att mer effektivt utnyttja det fysiska lagringsutrymmet måste bränslet lastas om till kompaktkassetter och, om behov föreligger, segmenteras styrväxarna från BWR för att kunna lagras mer kompakt, se avsnitt 3.4.3. Enligt nuvarande prognoser, där hänsyn tagits till den förtida stängningen av fyra reaktorer, kommer ovanstående åtgärder i Clab att frigöra utrymme så att lagringskapaciteten räcker till cirka 2038. För att kunna mellanlagra 11 000 ton bränsle behöver samtliga hårdkomponenter flyttas från Clabs förvaringsbassänger och mellanlagras någon annanstans.

Senareläggning

Om det skulle uppstå förseningar så att Kärnbränsleförvaret och Clink inte kan tas i drift förrän efter 2038 måste ytterligare åtgärder utföras. I första hand skulle de hårdkomponenter och styrväxar som lagras i Clab kunna lastas ut för att mellanlagras på en annan plats. Avfallet kan då lastas om till ståltankar (så kallade BFA-tankar) för torr mellanlagring. Ståltankar används redan i dag för mellanlagring av denna typ av avfall. Om endast bränsle lagras i Clab kommer lagringspositionerna att räcka till cirka 2042. 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. Alternativet våt lagring är en central del i det nuvarande svenska systemet. Innan SKB fattar beslut om en eventuell utökning kommer även möjligheten till torr mellanlagring av bränsle att utredas. Bland annat måste 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.

3.6.7 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. 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 kapsel 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 om horisontell deponering skulle utföras i stället för vertikal deponering.

En fullskaledemonstration av teknik för KBS-3H, Multi Purpose Test (MPT), pågår sedan 2013 i Äspölaboratoriet. Testet innefattar bland annat tillverkning av fullskalekomponenter, montage och deponering av en supercontainer och distansblock samt installation av en sektionsslugg med tillhörande fyllnadskomponenter. Deponeringshålet och komponenterna har instrumenterats så att det initiala förloppet kan övervakas. Alla dessa moment har kunnat genomföras framgångsrikt.

En utvärdering av hur arbetet med KBS-3H bör fortsätta 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 avseende 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. Återstående utveckling omfattar bland annat materialval och konstruktion av supercontainern samt detaljkonstruktion av packningsstationen, pluggar, tänkt injekteringslösning med Mega-packer och dessutom konstruktion av en deponeringsmaskin. Dessutom skulle nuvarande MPT-försök behöva brytas och utvärderas och sedan kompletteras med ett fullskaleförsök med värmare och på fullt förvarsdjup, som visar att bentoniten sväller och homogeniserar som avsett utanför supercontainern.

Utvärderingen av säkerheten efter förslutning visar att eftersom KBS-3H innebär att mängden bentonitmaterial mellan varje kapsel är betydligt mindre än mellan kapslar i en vertikal deponeringslösning, kan KBS-3H vara betydligt mer känslig för kemisk erosion av bentoniten följt av kopparkorrosion på grund av den sulfid som finns löst i grundvattnet. Detta beror framför allt på att bentoniterosion vid en kapselposition kan sprida sig till flera närliggande positioner.

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. Under alla förhållanden måste det först klarställas att ett byte till KBS-3H inte skulle innebära att säkerheten efter förslutning försämras.

Teknikutvecklingen kommer därför de närmaste åren att fokusera på att färdigställa, industrialisera och optimera systemet för vertikal deponering. Fortsatta forskningsinsatser inom området kemisk erosion kommer dock att fortsätta, se avsnitt 5.7. På längre sikt, och om säkerhetsfrågorna då är lösta, avser dock SKB att åter värdera om det skulle kunna finnas sådana ekonomiska fördelar med KBS-3H att ett skifte ändå skulle kunna vara motiverat.

4 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 som 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.

4.1 Forskning

4.1.1 Mål för forskning

SKB:s naturvetenskapliga forskningsprogram har som mål att trygga säker hantering och slutförvaring av kärnavfallet genom att säkerställa tillgång till den kunskap som behövs för att kunna utforma, lokalisera, få tillstånd för, projektera, uppföra och driva befintliga och planerade 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.

Forskningen har varit en av grundpelarna i SKB:s program sedan starten på 1970-talet och de återstående forskningsinsatser som nu behövs rör i första hand SKB:s befintliga och planerade slutförvar för radioaktivt avfall och använt kärnbränsle (SFR, SFL och Kärnbränsleförvaret).

4.1.2 Styrning av forskning

För att styra forskningen har SKB inrättat ett forskningsråd under ledning av forskningschefen. En viktig funktion för forskningsrådet är att utgöra ett forum där avdelningarna ansvariga för uppförande av anläggningar genom sina representanter i rådet kan säkerställa att SKB:s forskningsresurser används på ett sådant sätt att SKB:s mål uppnås effektivt.

Inriktningen av SKB:s forskningsprogram läggs till stora delar fast i de Fud-rapporter som i enlighet med kärntekniklagen inges till SSM vart tredje år. Som en tidig del i processen att uppdatera SKB:s Fud-program, föredrar SKB:s experter inom olika ämnesområden för forskningsrådet sina förslag till planer för kommande treårsperiod. Forskningsrådet skaffar sig genom föredragningarna en överblick av forskningsbehoven och gör en samlad bedömning och prioritering av behoven av insatser inklusive resursåtgång under i första hand kommande treårsperiod. Planerna ska vara kopplade till kommande beslutssteg för respektive förvar.

4.1.3 Strategi

Den stegvisa beslutsprocessen för kärntekniska anläggningar bygger på successiva uppdateringar och beslut om godkännande av säkerhetsredovisningen under uppförande och drift av respektive anläggning, se avsnitt 3.2. 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 förvar, kan SSM förväntas ställa höga krav på kunskaps-

nivån för de centrala delarna av underlaget. Även om en central milstolpe i kunskapsnivån har passerats när SKB får tillåtlighet och tillstånd att uppföra en ny anläggning 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 vart tionde år enligt krav i kärntekniklagen.

En närliggande utmaning för SKB är tillämpning av naturvetenskaplig kunskap för att kunna utforma det nya slutförvaret för långlivat radioaktivt avfall (SFL) så att det får egenskaper som säkerställer att radionuklider i det radioaktiva avfallet innesluts och/eller fördröjs på ett acceptabelt sätt. Forskningsstöd behövs även i det fortsatta konstruktionsarbetet för utbyggt SFR och för KBS-3-systemet. Det gäller framförallt för framtagandet av praktiskt användbara konstruktionsförutsättningar (krav) på slutförvaren samt för att kunna verifiera att framtagna tekniska lösningar uppfyller dessa krav.

I takt med att ett förvarsprogram utvecklas förändras också den uppsättning frågor som kräver kunskapsuppbyggnad. I ett tidigt skede av utvecklingsarbetet för ett förvar identifieras grundläggande frågor om bland annat barriärernas funktion i en geologisk miljö. Vissa kan besvaras med begränsade insatser medan några centrala frågor kräver forskningsinsatser under lång tid. I senare skeden mognar uppsättningen frågor och få nya frågor tillkommer. Då ett förvarsprogram närmar sig implementering ökar också detaljeringsgraden med vilken tekniska barriärer behöver specificeras och därigenom genereras också nya frågor.

Även om det nu 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 kräva forskning är av flera slag:

- De flesta frågorna genereras/identifieras internt hos SKB vid drift av befintlig förvarsanläggning, utveckling av förvarskoncept och 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 också i omvärlden, till exempel inom det vetenskapliga samfundet och i SKB:s systerorganisationer i andra länder.
- Frågor kan också väckas av SSM och remissinstanser i granskningar av Fud-program och i tillståndsprövningar.
- Förändringar i omvärldskrav kan innebära att nya frågor behöver hanteras.

En viktig del i varje analys av säkerheten efter förslutning är utvärderingen av kunskapsunderlaget både avseende processer och ingående data i analysen. Sådana utvärderingar har ingått i de senaste säkerhetsanalyserna SR-Site för Kärnbränsleförvaret och SR-PSU för det utbyggda SFR och resultaten av dessa utvärderingar ligger väsentligen till grund för forskningsinsatserna som planeras i detta Fud-program. Säkerhetsanalyserna är således fundamentala för prioriteringarna av forskningsprogrammet.

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 avseende metoder för behandling av radioaktivt avfall, upparbetning av använt bränsle, uppkomst av nya avfallstyper och nya typer av reaktorer. Detta sker i huvudsak genom upprätthållande av internationella kontakter och genom att följa branschtidskrifter. I nuläget planeras inga särskilda projekt med denna inriktning.

4.2 Teknikutveckling

4.2.1 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.

4.2.2 Styrning av teknikutveckling

Teknikutvecklingen beställs från de avdelningar på 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 5. 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, beställarfunktionen för teknikutveckling och de funktioner inom SKB som genomför själva utvecklingsarbetet.

4.2.3 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.

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.

4.2.4 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 (2014c). Konstruktionsförutsättningar och kopplingar (relationer) mellan olika krav, samt tekniska specifikationer har samlats och strukturerats i en databas.

Specificering av konstruktionsförutsättningar, teknisk lösning samt analys av säkerhet under drift och efter förslutning måste 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.

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

4.2.5 Kvalitetsstyrning 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 kvalitetsstyrning 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 tillverknings- och provningsprocesser som SKB avser tillämpa visas vara dugliga och ha god förmåga att åstadkomma och kvalitetssäkra produkter som överensstämmer med fastställd utformning.

Tillverknings- och provningsprocessers förmåga att uppfylla sina specificerade uppgifter demonstreras i kvalificeringar.

SKB arbetar vidare med att beskriva hur krav på genomförande av kvalificeringsprocessen ska styras av komponenternas betydelse för förvarens strålsäkerhet samt av den planerade produktionen och möjligheterna att använda beprövad teknik.

Kvalificeringen av varje tillverknings- eller provningsprocess anpassas till den tillverkade eller provade komponentens betydelse för strålsäkerheten, 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 kvalificeringsprocess kommer att genomföras som ett unikt projekt, 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 kontroller vid uppförandet av anläggningarna för att säkerställa att uppförandet utförs på ett sådant sätt att kraven på strålsäkerhet, kvalitet och effektivitet uppnås. 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.

4.3 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 tillståndshavarna 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.

4.3.1 Databaser

Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle innebär hantering av stora mängder data som lämpligen samlas och struktureras i databaser. SKB och tillståndshavarna har databaser som

innehåller information om det radioaktiva avfallet såsom DARK för använt kärnbränsle, Draak för långlivat avfall som mellanlagras i Clab och Triumf för låg- och medelaktivt avfall som deponerats i SFR. Arbetet pågår med en gemensam avfallsdatabas som ska ersätta Triumf.

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.

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 liksom för de krav som ska uppfyllas under projektering av anläggningar och vid anläggningarnas uppförande, drift och avveckling. Det innebär bland annat att krav och konstruktionsförutsättningar på olika detaljeringnivåer, från strålsäkerhetsprinciper och anläggningsövergripande funktioner till utformning av enskilda komponenter, och sambanden mellan dem dokumenteras i databaser (Doors).

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.

4.3.2 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 så 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 2010d, 2014d). Beräkningsverktygen som använts omfattar både kommersiella dataprogram med hundratusentals användare och program speciellt utvecklade för säkerhetsanalyser med kanske 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 2010d) 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 verktygen mer standardiserade, och strävar efter att i större utsträckning nyttja och vid behov göra anpassningar av kommersiella produkter såsom till exempel Comsol och Matlab. En modelldatabas är under uppbyggnad.

4.3.3 Platsmodeller

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

Genom att Forsmark valts som plats för slutförvaren både för använt bränsle och för kortlivat låg- och medelaktivt radioaktivt avfall är det enbart motiverat att underhålla modellerna för Forsmark. 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 utbyggnad 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.

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. Dessa instrument förvaras i Instrumentförrådet som ligger i anslutning till Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Från förrådet har ett en kilometer djupt borrhål borrats som används för test och kalibrering av borrhålsinstrument.

För att kunna modellera och visualisera geovetenskapliga egenskaper i berg i tre dimensioner har SKB utvecklat verktyget RVS (Rock Visualization System). RVS är starkt integrerat med databasen Sicada som också utvecklats och förvaltas av SKB.

4.3.4 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 att leverantörer har rätt kompetens och kan leva upp till SKB:s krav, godkännande av innehåll i databaser, och godkännande av modell- och beräkningsverktyg.

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.

4.4 Resurser och kompetens

SKB har en kompetensförsörjningsprocess fastställd i sitt ledningssystem i syfte att säkerställa att tillräckligt med kompetens finns tillgänglig på kort och lång sikt för att upprätthålla en hög säkerhet och nå verksamhetens uppdrag och mål.

SKB är som verksamhetsutövare skyldigt 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 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.

4.4.1 Inom SKB

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.

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. Inom vissa områden finns inte extern kompetens att tillgå på kommersiell basis, till exempel avseende utveckling av kapslar för använt bränsle, och där har SKB valt att till stor del ha egna resurser (till exempel Kapsellaboratoriet). I vissa fall anser SKB att det är ekonomiskt eller på lång sikt fördelaktigt att ha egen personal i stället för att anlita konsulter. Finns produkter eller tjänster kommersiellt tillgängliga eller hos SKB:s ägare så är den allmänna inriktningen att använda dessa.

SKB behöver 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 (geologi, hydrogeologi, geokemi), materialfrågor (kapselmaterial, lermaterial, cementmaterial), avfall och använt kärnbränsle (kemi, lösligheter etc), ämnestransport (närzon, berg), ytnära ekosystem och klimatutveckling.

Behovet av kompetens för att styra och genomföra teknikutvecklingen utgår från de planer som tas fram, se avsnitt 4.2.2. 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.

4.4.2 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.

SKB samarbetar således med universitet och högskolor för att erhålla kritisk kunskap inom områden där sådan saknas. 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.

4.4.3 Samarbeten

Samarbete med Posiva

Som redovisats i avsnitt 1.4 har SKB sedan ett antal år ett fördjupat samarbete med SKB:s systerorganisation Posiva i Finland. 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 tillgång till Posivas anläggningar, speciellt Onkalo, och får även tillgång till de forskningsinstitutioner, institut och andra experter som Posiva samarbetar med.

Andra avfallsorganisationer

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. Ett exempel är Bioprota, ett samarbete om biosfär, som drivs av både avfallsorganisationer och myndigheter där SKB deltar aktivt.

Internationella organisationer

SKB deltar i ett flertal samarbetsprojekt som genomförs med stöd av EU:s 7:e ramprogram och pågående ramprogram Horizon 2020. SKB deltar i de projekt som passar in i den övergripande planen för forskning och utveckling (se tabell 4-1). Nyttan med EU-projekten är, förutom den finansiering dessa bidrar med, den bredd på kompetens och det kontaktnät som deltagandet för med sig. EU-projekten ger för många områden kontakt med den internationella forskningsfronten vilket är värdefullt för SKB. SKB är en aktiv medlem i den teknikplattform för förstärkt europeiskt samarbete kring slutförvarsfrågor, Implementing Geological Disposal Technology Platform (IGD-TP) som bildades år 2009. Syftet med plattformen är att gemensamt arbeta för att de kärnavfallsprogram som ligger närmast en realisering får stöd för att lyckas i sina ansträngningar. Även om plattformen inte förfogar över några ekonomiska resurser, har den ett indirekt inflytande på hur EU:s forskningsmedel fördelas inom området. Genom samarbetet inom plattformen har ett antal större demonstrations-experiment kunnat genomföras bland annat i Äspölaboratoriet.

NEA är en samarbetsorganisation för kärnenergifrågor inom OECD. Organisationen har som uppgift att genom internationellt samarbete inom vetenskapliga, tekniska och legala frågor främja civil kärnkraft. SKB deltar i ett antal kommittéer och grupper inom NEA. The Radioactive Waste Management Committee, RWMC, består av företrädare från både myndigheter och kärnavfalls- och avvecklingsorganisationer i NEA:s medlemsländer. Under RWMC finns arbetsgrupper som hanterar analys av säkerhet efter förslutning (Integration Group for the Safety Case), frågor om förtroende och acceptans (Forum on Stakeholder Confidence) samt avvecklings- och rivningsfrågor (Working Party on Decommissioning and Dismantling). Förutom kommittéer och grupper genomförs också projekt inom en rad områden bland annat informationsbevarande över generationer (Records, Knowledge and Memory across Generations), sorption av radionuklider (Sorption Project), avveckling (Co-operative Programme on Decommissioning), databas för kemisk termodynamik (Thermochemical Database), databas för egenskaper, händelser och processer i geologiska slutförvar (International FEP-database) och hantering av metadata (Radioactive Waste Repository Metadata Management).

Tabell 4-1. Exempel på EU-projekt som SKB deltar i.

Akronym	Projektnamn	Referens
Lucoex	Large Underground Concept Experiments	www.lucoex.eu
Dopas	Full Scale Demonstration of Plugs and Seals	www.posiva.fi/en/dopas
Belbar	Effect of Bentonite erosion on EBS and radionuclide transport	www.skb.se/belbar
Pebs	Term Performance of Engineered Barrier Systems Completed	www.pebs-eu.de/PEBS
Modern2020	Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal	www.modern2020.eu
Cebama	CEment BAseD Materials: properties, evolution and barrier functions	www.cebama.eu
Mind	Microbiology In Nuclear waste Disposal	www.mind15.eu
Cast	CArbon-14 Source Term	www.projectcast.eu

Det internationella atomenergiorganet IAEA verkar inom flera områden; kärnenergi, kärnsäkerhet, kärnämneskontroll samt tekniskt samarbete. SKB deltar i arbetsgrupper, nätverk och projekt inom dessa områden. Exempel på sådana är nätverk inom låg- och medelaktivt avfall (Disponet), ytekosystem (Modaria), underjordslaboratorier (URF), avveckling av kärntekniska anläggningar (IDN), integrerad analys av säkerhet under drift och efter förslutning (Geosaf II), intrång i förvar (Hidra) samt en expertgrupp inom kärnämneskontroll för slutförvar (Astor).

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.

4.5 SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

4.5.1 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, se figur 4-1. Det underjordiska laboratoriet består av en tunnel från Simpevarvshalvön, 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 4-2 och aktuella experiment redovisas i Äspölaboratoriets årsrapport (SKB 2016c).

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 och utbyggnaden av SFR i Forsmark.

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.

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 delsystem 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 långtidstester som pågår och fullskaletester som planeras att genomföras där.

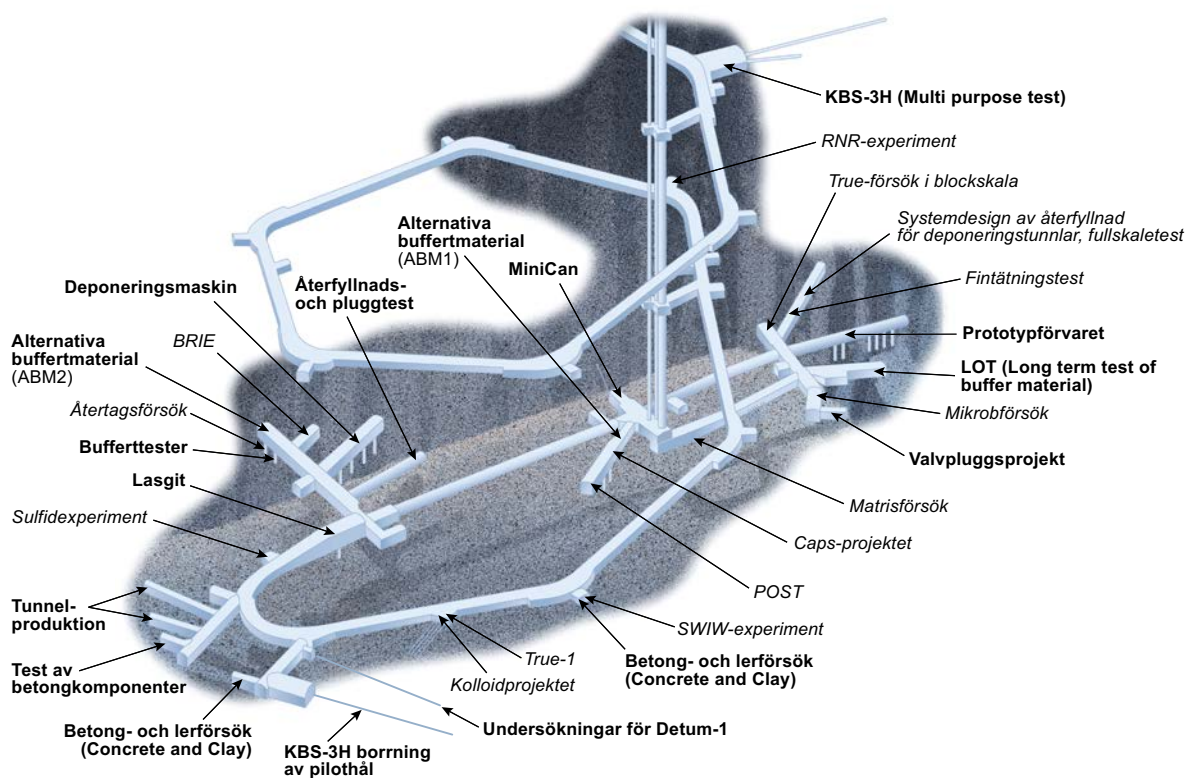
Inför kommande analyser av säkerheten efter förslutning för SFR och SFL genomförs forskningsprojekt fokuserade på studier av interaktioner mellan olika typer av barriärmaterial relevanta för dessa förvar samt för olika typer av material som är representativa för låg- och medelaktivt avfall. Utöver detta planeras experiment kopplade till utveckling av betong- och cementbaserade material samt teknik för uppförande av barriärkonstruktioner i SFR och SFL. Stora delar av pågående utvecklingsprogram för material och teknik för utbyggnaden av SFR kommer att utföras i Äspölaboratoriet.

I särskilda forum, Äspö Task Force, 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 och SKB Task Force on Engineered Barriers Systems (Task Force EBS). Samarbetet syftar till att utvärdera olika koncept och modelleringsmetoder samt främja samverkan mellan experimenterare och modellörer.

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.



Figur 4-1. Åspölaboratoriet är beläget på ön Åspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk.



Figur 4-2. Åspölaboratoriet med pågående (fet stil) och avslutade (kursiv stil) experiment.

4.5.2 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. 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 friktionsomrörningssvetsning med roterande verktyg, utrustningar för oförstörande provning samt hanteringssystem för fullstora kapslar. Figur 4-3 visar utrustningen för friktionsomrörningssvetsning.

4.5.3 Övriga laboratorier

Bentonitlaboratoriet

Sedan 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i Bentonitlaboratoriet som ligger ovan mark i direkt anslutning till Äspölaboratoriet. Försöken som görs i Bentonitlaboratoriet kompletterar de försök som görs i underjordslaboratoriet.

En av barriärerna i samtliga slutförvar är en svällande lera, 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 Bentonitlaboratoriet testar SKB bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. I laboratoriet utvecklar SKB även metoder för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnlarna.

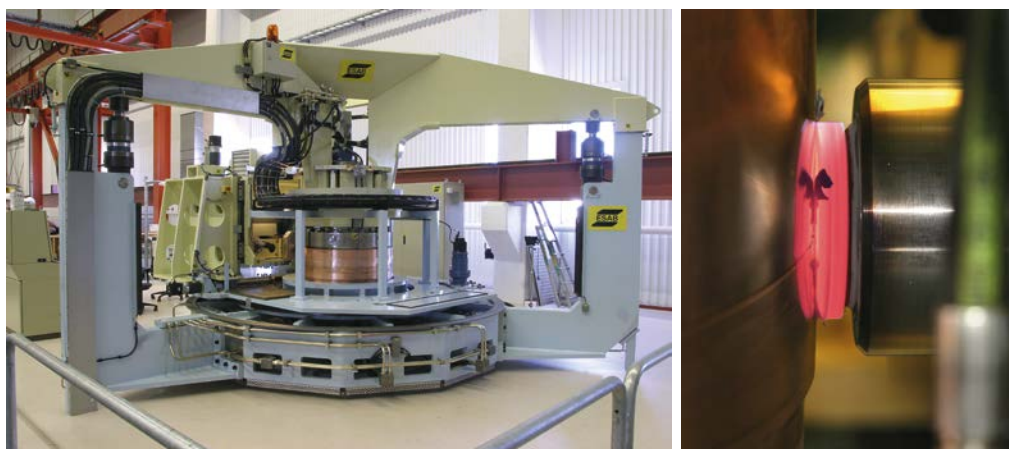
De tester som genomförs i laboratoriet är ofta förberedande tester i olika skalor och omfattning inför tester i full skala på förvarsdjup i Äspölaboratoriet. I laboratoriet finns också utrustning och utrymme för mottagning av bentonitleveranser och blandning av bentonit till önskad vattenhalt.

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.

Materiallaboratoriet

Bentonitlerans fysikalisk-kemiska egenskaper kan studeras i det materiallaboratorium som inrymts i samma byggnad som vattenkemilaboratoriet på Äspö. I laboratoriet förbereds de test- och undersökningsmetoder som ska användas vid kontroll av bentonitleveranser till slutförvaret. Laboratoriet har utrustats med analysteknik som gör att insatser av forskningskaraktär också kan genomföras.



Figur 4-3. Friktionsomrörningssvetsning (friction stir welding) 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 ska sammanfogas.

5 Fortsatt forskning och teknikutveckling

I Sverige inleddes arbetet med att utreda hanteringen och slutförvaringen av det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken i början av 1970-talet (AKA-utredningen). De tekniska lösningar och det system som sedan dess utarbetats för hantering och geologisk slutförvaring av det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken redovisas i kapitel 2. Där beskrivs även de anläggningar som återstår att uppföra för att kunna avveckla och riva kärnkraftverken och slutförvara det uppkomna avfallet. En plan för genomförandet redovisas i kapitel 3.

I detta kapitel redovisas en översikt av de forsknings- och utvecklingsbehov som finns för de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. I avsnitt 5.1 beskrivs grunderna för planeringen av framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatser. I avsnitt 5.2 ges en översikt av de milstolpar som är relevanta för respektive förvar och Clink samt kunskapsläget som erfordras och hur långt teknikutvecklingen ska ha nått vid respektive milstolpe. Därefter beskrivs i avsnitt 5.3 till 5.10 den forskning och teknikutveckling som behövs för att lösa förvarens utformnings- och konstruktionsfrågor, samt den forskning som behövs för att genomföra analys av förvarens säkerhet efter förslutning. I avsnitt 5.11 ges en översikt av teknikutvecklingsbehoven utifrån avveckling av kärntekniska anläggningar. I avsnitt 5.12 sammanfattas övrig verksamhet och kunskap som är relevant för SKB:s uppdrag.

5.1 Framtida insatser

SKB:s och tillståndshavarnas planering av framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatser utgår från den stegvisa beslutsprocessen som redovisats i avsnitt 3.2. De milstolpar som är kopplade till beslutsstegen i form av ansökningar styr när kunskap och utveckling av teknik behöver ha nått en viss nivå medan SSM:s godkännande styr när SKB kan påbörja aktiviteter som uppförande eller drift av anläggningar. Det är naturligt att milstolpar kopplade till inlämnande av ansökningar blir styrande för planeringen av forsknings- och utvecklingsinsatser eftersom de styr när olika frågor ska vara lösta och när redovisning ska ske av aktuellt kunskapsläge och av de tekniska lösningar som är tänkta att användas.

SKB har som del av ansökningarna om tillstånd för att bygga Kärnbränsleförvaret, Clink och utbyggnaden av SFR gjort samlade redovisningar av kunskapsläge och status för teknikutveckling samt utvärderat betydelsen av kvarstående osäkerheter för skydd av människor och miljö mot strålning efter förslutning av förvaren (SR-Site för Kärnbränsleförvaret och SR-PSU för SFR).

För SFL har en konceptstudie genomförts och ett koncept valts för vilket en säkerhetsutvärdering nu pågår. Utfallet av säkerhetsvärderingen som planeras bli klar 2018 kommer att klargöra behovet av framtida forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för SFL. Den kommer också att ge underlag för att precisera platsvalskriterier och för att utforma en lokaliseringsprocess.

Dessa 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 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. Arbetet utförs i enlighet med den styrning av och strategi för forskning som beskrivits i kapitel 4.
- Behov av kunskap och kompetens kring **utformning, konstruktion, tillverkning och installation** av de komponenter som ska användas i anläggningarna. Arbetet utförs i enlighet med den teknikutvecklingsprocess som beskrivits i kapitel 4.
- 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 av slutförvaret och förvarsplatsen.

Dessutom behövs det mer kunskap om inventariet av radionuklider i det låg- och medelaktiva avfallet, egenskaperna hos det använda kärnbränslet och utveckling av teknik för hantering av både avfall och använt kärnbränsle.

5.2 Översikt av respektive slutförvar och Clink

I kapitel 3 anges de viktigaste milstolparna i planeringen av nya anläggningar. I detta avsnitt preciseras de milstolpar och skeden som är relevanta för respektive slutförvar och Clink. Dessutom ges en översikt av det kunskapsläge som erfordras och hur långt teknikutvecklingen ska ha nått vid de olika milstolparna.

5.2.1 Slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall

Inför uppförande

Den förberedande säkerhetsredovisningen (F-PSAR) som togs fram och lämnades in tillsammans med ansökningarna om ett utbyggt SFR kommer att uppdateras till en PSAR inför uppförandet. I denna ingår en uppdatering av säkerhetsanalysen SR-PSU. I samband med detta kommer SKB även att beskriva hur säkerheten i befintlig anläggning kommer att säkerställas under utbyggnaden.

Inför byggstart kommer teknikutveckling avseende barriärerna att bedrivas i syfte att verifiera krav och optimera konstruktionsförutsättningarna, eftersom dessa i sin tur ställer krav på utformning av utbyggnaden av SFR. Motsvarande gäller också för förslutningskomponenter, till exempel pluggar, för att identifiera de krav och konstruktionsförutsättningar som förslutningen ställer på utformning och utförande av bergarbetena.

Innan bergarbetena kan påbörjas ska ett antal undersökningsborrhål i anslutning till utbyggnaden förslutas. Förslutningstekniken kommer att utvecklas och anpassas till förhållandena vid SFR och ett program för kvalitetskontroll ska utformas och fastställas.

Uppförandeskedet

Vid byggstart är konstruktionsförutsättningarna och krav för utbyggnaden fastlagda. Uppförandet inleds med att nödvändig infrastruktur etableras och iordningställs. Under den tid bergarbetena pågår kommer det att vara deponeringsstopp i befintligt SFR. Om behov finns skulle ett deponeringsfönster kunna planeras in efter genomförda bergarbeten. Parallellt med utbyggnaden kommer den befintliga anläggningen att uppgraderas, bland annat med hänsyn till att drifttiden förlängts i förhållande till den ursprungligen planerade.

I slutskedet av uppförandet genomförs verifiering och validering av system och funktioner. Uppförandeskedet avslutas med samfunktionsprovning av helheten.

Inför provdrift

Innan provdrift påbörjas tas en förnyad säkerhetsredovisning (SAR) fram som ska redovisa anläggningen som den är byggd. Analysen av säkerheten efter förslutning kommer att förnyas med plats-specifika kunskaper som erhållits under uppförandeskedet. Den tillkommande informationen används bland annat för att uppdatera den platsbeskrivande modellen (SDM-PSU). 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 modelleras med större säkerhet. Säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) ska också tas fram.

Förslutningsplanen ses över och uppdateras.

Inför rutinmässig drift

Inför rutinmässig drift av det utbyggda SFR tas en kompletterad säkerhetsredovisning (SAR) fram samtidigt som de säkerhetstekniska driftförutsättningarna (STF) uppdateras. Dokumenten är då

kompletterade med erfarenheter från provdriften. I och med att förvarssystemet tas i drift övergår verksamheten i en förvaltningsfas med återkommande helhetsbedömningar av säkerhet och strålskydd vart tionde år.

Provdriften förväntas inte föranleda några särskilda behov av teknikutveckling eller forskning inför rutinmässig drift.

Inför förslutning

Inför nedmontering, rivning och förslutning av anläggningen kommer utveckling att göras beträffande teknik för förslutning och 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.

5.2.2 Slutförvaret för långlivat avfall

Utvecklingen av Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, fokuserar under denna Fud-period på den pågående säkerhetsvärderingen samt att ta fram en strategi för platsvalsprocessen. Säkerhetsvärderingen utgör basen för att identifiera områden för fortsatt forskning och teknikutveckling och därefter formulera det långsiktiga forskningsprogram som behövs för att genomföra fullständiga säkerhetsanalyser. Samtidigt indikerar en översiktlig genomgång av kunskapsläget efter säkerhetsanalysen, SR-PSU, som lämnades in till stöd för ansökningarna för att bygga ut SFR, att de kvarvarande frågeställningar som identifierats för SFR till stor del är giltiga även för SFL.

Säkerhetsvärdering

Utgångspunkten i säkerhetsvärderingen är det föreslagna förvarskonceptet (se avsnitt 2.1.2) och de underlag som tagits fram inom SR-Site och SR-PSU. Forsknings- och utvecklingsbehov som identifieras utgör i sin tur utgångspunkt för formulerandet av ett långsiktigt forskningsprogram kopplat till långlivat avfall och SFL. Säkerhetsvärderingen har även en viktig roll för arbetet med lokalisering av SFL då den förväntas klargöra kraven på berget som barriär.

Lokalisering

Valet av plats för SFL kommer att baseras på de lokaliseringsfaktorer som planeras att tas fram samt kunskap om olika platser och deras egenskaper. Lokaliseringsfaktorerna och utvärderingsparametrarna kommer bland annat baseras på den kravbild för platsen som säkerhetsvärderingen resulterar i. När lokaliseringsfaktorerna fastlagts genomförs en sammanställning av befintligt material av relevans för lokaliseringen. Berörda kommuner och andra intressenter involveras i processen (se avsnitt 3.3.4). Nästa steg i processen är platsundersökningar som innebär att geosfärs- och biosfärsparametrar undersöks och övervakas enligt den metodik SKB utvecklat inom ramen för tidigare lokaliseringar. Arbetet planeras också omfatta utredningar om faktorer som hälsa, miljö, infrastruktur och samhällsresurser.

Inför tillståndsansökan

Till stöd för ansökningar enligt kärntekniklagen och tillåtlighet enligt miljöbalken att bygga SFL inlämnas en förberedande preliminär säkerhetsredovisning, F-PSAR. En plats behöver identifieras och beskrivas som underlag till analysen av förvarets säkerhet efter förslutning.

Teknikutvecklingen behöver vara driven så långt att det i säkerhetsanalysen går att visa att förvaret blir säkert efter förslutning. En första version av konstruktionsförutsättningarna (se avsnitt 4.2.4) behöver presenteras och det ska göras troligt att den tekniska lösningen kan tas fram och installeras på ett sådant sätt att kravuppfyllnaden kan verifieras. För aktuellt förvarskoncept bedöms konstruktioner i förvarsdelarna samt tekniska lösningar för återfyllning vara områden som behöver utvecklas, då dessa skiljer sig jämfört med övriga förvar.

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

Inför uppförande

Inför byggstart 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 uppfyllande av ställda krav.

Arbetet med teknikutvecklingen ska ha utmynnat i underlag för projektering av konstruktioner för förvaret. Projektering kan sedan genomföras parallellt med arbetet att driva rampen ned till förvarsdjup.

Inför provdrift

I likhet med SFR planeras detaljkonstruktion av förslutningskomponenterna att genomföras som underlag till säkerhetsredovisningen (SAR) inför provdrift. Detta underlag ska vara tillräckligt detaljerat för att möjliggöra projektering av förslutningen. Förslutningsplanen uppdateras baserat på de detaljerade beskrivningarna och en rivningsplan tas fram.

5.2.3 Kärnbränsleförvaret och Clink

Inför och under uppförande

Inför byggstart av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink kommer en preliminär säkerhetsredovisning, PSAR, att tas fram för respektive anläggning. Redovisningen av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret kommer att uppdateras, bland annat med delar av det material som redovisats i kompletteringar till ansökan enligt kärntekniklagen, SSM:s synpunkter framförda i granskningen av SKB:s ansökningar och de uppdateringar i initialtillståndet som pågående teknikutveckling leder fram till. Denna redovisning kommer att ingå i PSAR.

I första hand krävs mer kunskap för att analysera osäkerheter och bedöma i vad mån dessa kan reduceras. Detta ger dels en mer realistisk bedömning av säkerheten, dels underlag för optimering av förvaret så att anpassade konstruktionsförutsättningar kan formuleras för förvarets komponenter och layout.

Målet med teknikutvecklingen är att säkerställa att den teknik som behövs för att kunna påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink, finns tillgänglig före byggstart. Det innebär att detaljkonstruktionsfasen (se kapitel 4), väsentligen ska ha passerats för alla barriär-system, förutom de delar som kräver att tester genomförs på plats. För Kärnbränsleförvaret gäller det i första hand undersökningsmetoder och teknik för byggande av förvarets tillfarter. Det underlaget behövs för hantering av frågor som rör strålsäkerhet under uppförandet av tillfarter, centralområde och första deponeringsområdet. Underlaget ska redovisas i Suus (Säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen, se avsnitt 3.4.6).

Vidare behöver de tekniska system (till exempel för deponering och återfyllning) som ska finnas i förvarsområdet utvecklas inför beredningen av PSAR före byggstart.

Att de tekniska systemen väsentligen ska ha passerat detaljkonstruktionsfasen för inkapslingsdelen av Clink, påverkar utvecklingen av den nukleära bränslemätningen. Vidare ska den valda torkmetoden vara verifierad och validerad och arbetet med att införa kärnämneskontroll i utformningen av inkapslingsdelen av Clink och slutförvarsanläggningen ska vara genomfört.

På samma sätt behöver metoder för svetsning och kontroll av kapseln under inkapsling vara konstruerade och anpassade till den nukleära miljö som där råder, även om implementeringsarbete under detaljkonstruktions- och uppförandefaserna för Clink återstår.

Ett produktionssystem för kapseln som är kvalificerat behöver finnas tillgängligt senast i tid för samfunktionsprovning av Clink och Kärnbränsleförvaret. För närvarande utreds även förutsättningar för gemensam kapselproduktion med Posiva och om detta genomförs behöver produktionssystemet vara klart tidigare. Teknik och metoder för produktion av kapslar ska vara utvecklade inför samfunktionsprovning och fungera i industriell skala inför provdrift. Kapselns utformning måste då vara verifierad mot krav, tillverkningsmetoder ska vara verifierade, provnings- och kontrollprocesser ska vara utvecklade och förutsättningar för kvalificering ska redovisas.

Kunskapsuppbyggnaden för frågorna kring säkerhet efter förslutning är i första hand fokuserad på SAR; dock kan tidsplanerna behöva anpassas till det som framkommer under den pågående granskningen av SKB:s ansökan. Inlämnandet av PSAR och SKB:s beslut om byggstart, förutsatt att tillstånd meddelats, innebär under alla omständigheter en viktig avstämningsspunkt för dessa frågor, eftersom långsiktiga insatser krävs för kunskapsuppbyggnaden, och eftersom SKB vid byggstart står inför ett avgörande investeringsbeslut då underlag kring alla frågor som kan påverka den framtida framdriften av projektet behöver finnas.

Byggstart deponeringsområde

Inför byggstart av deponeringsområdet i Kärnbränsleförvaret måste konstruktionsförutsättningarna för detta vara fastlagda och därmed behöver även konstruktions- och installationsmetoder för buffert, återfyllning och pluggar vara färdiga liksom metoder för undersökning av förvarsberget och metodik för uttag av deponeringstunnlar. Konstruktioner och kontrollmetoder som ska tillämpas ska vara verifierade.

Detaljkonstruktion av produktionen av buffert och återfyllning ska vara genomförd som underlag för detaljprojektering av produktionsbyggnad. Detta innebär att följande behöver vara genomfört:

- Kravspecifikationer på material behöver vara fastställda.
- Beslut om pressteknik för buffertblock ska vara fattat.
- Tillverkningsmetoder som fungerar i industriell skala för produktion av bentonitblock och bentonitpelletar för buffert och återfyllning ska vara fastställda.
- Provningsmetoder som fungerar i industriell skala ska vara fastställda.
- Förutsättningar för framtagning av ett system för kvalitetsstyrning och kontroll ska vara fastställda.

I Forsmark har övervakningen av det naturliga systemet fortsatt i det närmaste oförändrat efter platsundersökningen och planeras göra det fram till byggstart av Kärnbränsleförvaret. Viss anpassning har dock gjorts och planeras till följd av genomförda utvärderingar. 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 framförallt den övervakning som kommer att utföras under jord. I Suus-dokumentet som färdigställs till PSAR ingår en plan för hur övervakningen av berget ska genomföras under uppförandet av Kärnbränsleförvaret. I PSAR ges en plan för hur övervakningen ska fortsätta under utbyggnaden av förvaret och under driftskedet, liksom av den övervakning som planeras av de tekniska barriärerna.

Inför provdrift

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

Samfunktionsprovning innebär att samtliga system för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning ska vara tillverkade, installerade och testade. Kvalificeringar av processer med tillhörande utrustningar, personal och leverantörer ska vara genomförda och dokumenterade. System för kvalitetsstyrning och kontroll av kapseltillverkning, produktion av buffert- och återfyllningskomponenter, hantering och installation av kapsel, buffert och återfyllning samt bergbyggnadsprocessen ska vara implementerade.

Inför framtagandet av SAR kommer utvecklingsinsatser att krävas för att kunna hantera tillkommande data från en förvarsutbyggnad i säkerhetsanalysen. Slutsatserna från säkerhetsanalysen SR-Site och de forskningsfrågor som pekas på där samt de synpunkter som SSM framför under sin granskning av ansökningarna, utgör en viktig grund för identifieringen av de frågor kring säkerhet efter förslutning där kunskapen behöver fördjupas inför redovisningen i SAR.

Inför rutinmässig drift av KBS-3-systemet

Innan 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 och med återkommande helhetsbedömningar av säkerhet och strålskydd vart tionde år.

Efter deponering

Det finns i Sverige inga bestämmelser i lagar eller i andra författningar med krav på att exempelvis 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 långsiktiga säkerhet försämras. Det kan finnas situationer där återtag före förslutning kan bli aktuellt.

SKB bedömer att det är principiellt möjligt att både före och efter förslutning återta kapslar från det planerade Kärnbränsleförvaret. Detta har demonstrerats praktiskt i försök gjorda i Äspölaboratoriet, senast i samband med brytningen av det så kallade Prototypförvaret (Svemar et al. 2016). Genomförandet blir betydligt mer arbets- och resurskrävande efter förslutning.

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 återtagat behövs även viss teknikutveckling. Det behöver säkerställas att deponeringsmaskinen kan hämta tillbaka kapslar, även praktiska metoder att hantera bentonitblock som delvis har börjat vattenmättas behöver tas fram.

Kunskapen om förvarsplatsen liksom kvalitetsstyrning och kontroll av produktionsprocessen av förvarets tekniska barriärer är centrala för att kunna värdera säkerheten efter förslutning av Kärnbränsleförvaret. Övervakning av utvecklingen av förvarets barriärer från deponering och fram till förslutning kan ytterligare öka denna kunskap. Det är också en viktig förtroendefråga, även om den tillkommande kunskapen bara kommer att täcka en mycket kort tid av förvarets utveckling. SKB planerar för sådan övervakning, men ett antal begränsningar i vad som är möjligt måste beaktas. Dessutom behöver lämplig metodik och strategi för övervakningen utvecklas och provas.

Övervakningen syftar primärt inte till att hitta tillverkningsfel eller andra avvikelser i material, utrustning eller hantering. Dessa viktiga uppgifter hanteras inom ramen för kvalitetskontrollprogrammet, se avsnitt 4.3.4.

SKB avser, att tillsammans med Posiva, utveckla metodik för övervakning av förvaret. SKB och Posiva deltar även i EU-projektet Modern2020 där dessa frågor studeras. Försök avseende övervakning av tekniska barriärer kommer dessutom att genomföras i den finska anläggningen, Onkalo, och vid Äspölaboratoriet. I samband med dessa försök kommer även olika metoder för övervakning att tas fram och provas. Målet är att utveckla metoder som kan användas för att övervaka utvecklingen av de tekniska barriärerna under förvarsförhållanden under många år, eller till och med i decennier.

Inför förslutning

Som underlag till ansökan om att försluta Kärnbränsleförvaret inlämnas en omarbetad säkerhetsredovisning med en uppdaterad analys av säkerheten efter förslutning samt en plan för förslutning och avveckling. Där redovisas den teknik och det arbetssätt som avses användas vid förslutning av kvarvarande bergutrymmen (förslutning av deponeringstunnlar utförs under driftperioden) och borrhål samt de åtgärder som planeras för att övervaka och kontrollera förvaret och verksamheten vid förslutningen. Den förnyade analysen av säkerheten efter förslutning kommer att baseras på anläggningen som den är byggd och de planerade förslutningsåtgärderna.

5.3 Det låg- och medelaktiva avfallet

I detta avsnitt beskrivs behoven av forskning och utveckling avseende det låg- och medelaktiva avfallet för att få en fördjupad processförståelse för avfallet inklusive avfallsmatris som ska slutförvaras i SFR respektive SFL. Likaså behöver hantering och konditionering av framför allt det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utvecklas. Inför avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna behöver också avfallsbehållare och avfallstransportbehållare utvecklas för det långlivade avfallet. Kunskapen om radionuklidinventariet för respektive förvar behöver fördjupas vilket också kort beskrivs. Det arbete som pågår och planeras under denna Fud-period beskrivs ytterligare i kapitel 6.

5.3.1 Radionuklidinventarium

Fördjupad kunskap om radionuklidinventariet för det låg- och medelaktiva avfallet behövs både inför framtagandet av PSAR inför utbyggnaden av SFR och för säkerhetsvärderingen för SFL. Osäkerheterna gäller såväl prognosticerade avfallsmängder, som innehåll av radionuklider i varje avfallskolli. Radionuklidinventariet uppdateras löpande och särskilda insatser görs för så kallade ”svårsmätbara” nuklider, vilka i många fall bidrar avsevärt till den långsiktiga risken.

5.3.2 Processförståelse

Nedan presenteras studier vars resultat kommer att utgöra underlag till PSAR inför utbyggnaden av SFR. De resultat som är relevanta för SFL kommer även att användas vid utformningen och säkerhetsbedömningen av SFL.

Sorptionspåverkan

I SFR är sorption av radionuklider på cementmineral en av de viktigaste processerna som fördröjer utsläpp av radionuklider. Kemisk degradering av organiskt material i avfallet kan generera produkter som kan komplexbinda med radionuklider och därmed påverka graden av sorption på cementmineral. Likaså förekommer organiska föreningar i form av tillsatsmedel i betong.

Framför allt tre frågeställningar kring nedbrytning av organiskt material kommer att utredas ytterligare: i) Hur nedbrytningsprodukter från cellulosa påverkar plutoniums sorption till cement. Inom SR-PSU identifierades att de mängder cellulosa som deponeras i 1BMA kommer att ge upphov till försämrad sorption av framför allt plutonium. ii) Kartläggning av vilka nedbrytningsprodukter som bildas från filterhjälpmedel och hur dessa påverkar cementens sorptionskapacitet. iii) Hur nedbrytningsprodukter från organiska cementtillsatsmedel påverkar sorptionen av radionuklider genom eventuell komplexbildning. Inför utbyggnaden av SFR är det viktigt att identifiera vilka cementtillsatsmedel som är lämpliga att använda vid uppförandet av betongkonstruktioner.

Gasbildning

Det låg- och medelaktiva avfallet innehåller bland annat metaller och organiskt material. Vid korrosion av aluminium och zink i syrefri miljö produceras vätgas, som kan skada slutförvarets betongkonstruktion om gasens övertryck blir alltför stort. Processen behöver vara bättre känd för att kunna utforma optimala system för gastransport i anläggningen. Genom en experimentell studie där aluminium och zink gjuts in i betong som är mättad med och exponerad för syrgasfritt grundvatten, förväntas SKB få bättre kunskaper om korrosionshastigheten och därmed även gasutvecklingen.

En annan process som potentiellt kan orsaka gasbildning är metanbildning genom mikrobiell nedbrytning av organiskt material, såsom cellulosa. SFR har utformats för att skapa ogynnsamma förhållanden för mikrobiell nedbrytning och i SR-PSU formulerades krav på högt pH och låg halt av organiskt material. Ytterligare studier kommer att genomföras för att öka förståelsen för hur framtida pH-utveckling i olika delar av förvaret kan variera och hur olika pH-förhållanden kan påverka gasbildningen.

Svällning av jonbytarmassor

Svällning av jonbytarmassor är en annan process som potentiellt kan påverka barriärernas integritet och därmed också vattenflöde och radionuklidtransport ut ur förvaret. Experiment med bitumeningjuten jonbytarmassa kommer att genomföras för att uppskatta hur lång tid återmättnadsprocessen tar och när i tiden de uppmätta svälltrycken kommer att uppstå.

5.3.3 Hantering av det låg- och medelaktiva avfallet

Acceptanskriterier för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet definieras 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 och rivning av de kärntekniska anläggningarna. I den pågående säkerhetsvärderingen formuleras krav på avfallet utifrån det föreslagna förvarskonceptet, så kallade preliminära acceptanskriterier för avfallet. Arbetet innefattar också en analys av vad som ska göras med det avfall som i sin nuvarande form inte uppfyller acceptanskriterierna.

Segmenterade hårdkomponenter från uppgraderingar av kraftverken mellanlagras i dag i ståltankar på kraftverken. Även rivningsavfall från kärnkraftverken ska enligt planerna placeras i ståltankar. Framtida acceptanskriterier för det långlivade avfallet kan göra att det blir nödvändigt att stabilisera avfall inför slutlig deponering i SFL. Metod för stabilisering av avfall i ståltankar behöver då utvecklas. Likaså kan i framtiden krav komma att ställas på konditionering och paketering av avfallet från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB, med behov av teknikutveckling som följd.

I Clab förvaras förutom bränsle även hårdkomponenter, främst BWR-styrstavar. I syfte att säkerställa mellanlagringskapaciteten för använt bränsle har olika alternativ för den fortsatta mellanlagringen av bränsle och hårdkomponenter utvärderats, se avsnitt 3.4.3. Segmentering av BWR-styrstavar ses fortfarande som huvudalternativ inför slutförvaring i SFL, för att realisera den behöver fördjupade tekniska studier genomföras. Utvecklingsaktiviteter kopplade till detta kommer att genomföras när Clab behöver frigöra lagringskapacitet för bränsle eller i tidsmässig anslutning till driftsättningen av SFL.

Reaktortankar från PWR planeras att slutförvaras i SFL. Dessa kan segmenteras och hanteras i mindre delar, eller hanteras hela (med eller utan interndelar kvar i tanken). Utredningar för att värdera alternativen ska genomföras som underlag för den fortsatta planeringen av SFL. Hela BWR-reaktortankar avses att deponeras i det utbyggda SFR, och fram till att detaljprojekteringen startar för det utbyggda SFR sker teknikutveckling för att kunna hantera reaktortankarna. Inom denna teknikutveckling utreds även övriga stora komponenter för att belysa fördelar respektive nackdelar med att deponera dessa hela.

5.3.4 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att kunna genomföra utvecklingen av de kärntekniska anläggningarna optimalt behöver utvecklingsarbete ske rörande avfalls- och avfallstransportbehållare för långlivat avfall och för kortlivat rivningsavfall. En ny avfallstransportbehållare för långlivat avfall planeras att certifieras och driftsättas 2020 (ATB 1T) och ytterligare typer av avfallstransportbehållare kan komma att utvecklas. Behovet av avfallstransportbehållare styrs av vilka tillkommande avfallsbehållare som kommer att utvecklas.

Fortsatt teknikutveckling av avfallsbehållare för rivningsavfall, fyrkokill och tvåkokill, ska ske under Fud-perioden. Förutsättningar behöver vara fastlagda inför detaljprojektering av utbyggnaden av SFR.

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

5.4 Det använda kärnbränslet

I detta avsnitt beskrivs behoven av teknikutveckling och forskning som behövs för att få ökad processförståelse för det använda kärnbränslets egenskaper och den kunskap som behövs för utvecklingen av teknik för hantering.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor som kräver 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. I kapitel 7 beskrivs programmet för forskning och teknikutveckling avseende det använda kärnbränslet under denna Fud-perioden.

5.4.1 Processförståelse

Om en kapsel skulle bli otät och vatten tränga in är bränslets egenskaper avgörande för om och när det kan frigöras radioaktiva ämnen. Resultat från säkerhetsanalysen SR-Site visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar har avgörande betydelse för Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för mekanismen för upplösning av bränslematrisen krävs för att stödja de experimentella resultaten och därmed reducera osäkerheterna i kommande säkerhetsanalyser, vilket också uttalas av SSM både inom ramen för tillståndsprövningen och granskningen av Fud-program 2013. Upplösningssdata behövs för nya typer av så kallat dopat bränsle samt för högutbränt bränsle. Den andel radionuklider som inte ligger inbäddade i bränslematrisen, och därmed relativt snabbt kan frigöras, behöver kvantifieras noggrannare liksom hastigheterna för upplösning av metalldelar av bränsleelement och av styrstavar. Det återstår också vissa osäkerheter angående speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider.

5.4.2 Hantering av det använda kärnbränslet

Ikke-reguljära bränslen utgörs av sådana bränslen som väsentligt skiljer sig från det reguljära använda kärnbränslet. Två viktiga exempel på ikke-reguljärt bränsle är skadat bränsle (med flera undergrupper) och bränslerester från analyser av olika slag framför allt från Studsvik. Dessa hanteras, behandlas och analyseras separat med hänsyn tagen till det faktum att dessa bränslen finns i förhållandevis små mängder. Fortsatt planering och hantering för dessa ikke-reguljära bränslen görs under de kommande åren. Principer för hur de små mängderna ikke-reguljärt bränsle ska hanteras i analysen av säkerhet efter förslutning redovisas i PSAR för Kärnbränsleförvaret.

För att säkerställa att bränslet kommer kunna hanteras både i Clab och i inkapslingsanläggningen bedrivs ett program för åldring av bränsle, där förändringar i bränslets egenskaper under lagring i bassängmiljö studeras. SKB kommer också att följa forskningsläget beträffande åldringsförändringar av bränsle mer generallt med syfte att säkerställa att bränslet kommer att vara hanterbart i inkapslingsanläggningen.

5.4.3 Bränsleinformation, kriticitet och kärnämneskontroll

De kommande åren ska fortsatta utredningar göras om hur information om det använda kärnbränslet bäst ska hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.

Då temperaturkrav finns på bentoniten i slutförvaret är resteffekten från bränslet en väsentlig designparameter. Arbete med både kalorimetrisk bestämning, bestämning genom nukleära mätningar (framför allt gamma och neutroner) och beräkningsverktyg fortsätter under perioden. Syftet är att, till Clinks olika milstolpar, kunna ge underlag för utformningen av de delar där mätutrustningen ska finnas samt att säkerställa att tillräcklig kunskap om bränslenas egenskaper finns för att utföra analyser. Samtidigt utvecklas metoder där andra väsentliga bränsleparametrar bestäms, såsom mängd fissilt material, radionuklidinventarium, bränsleidentitet, utbränning, avklingningstid, reaktivitet med mera.

Den utveckling som skett vad gäller kapacitet att analysera kriticitet under de senaste åren konsolideras och effektiviseras, vilket exempelvis innebär att en gemensam datormiljö med VNF (Vattenfall Nuclear Fuel) etableras, rutiner effektiviseras och utökade krav möts som följer av att utbränningskreditering tillämpas. Nuvarande version av beräkningsverktyget Scale uppdateras och valideras. Krav på kriticitetsanalysen från slutförvaret ska verifieras, till exempel avseende påverkan av håligheter i insatsen. Strategi utarbetas för att ta hand om de bränsleknippen som inte möter kapselns krav på utbränning. Arbetet fortsätter med analys av konsekvenser av geometriförändringar inuti kapseln.

Fortsatt arbete med metodik och utrustning för verifiering av bränsle för kärnämneskontroll planeras inför inlämnande av PSAR för Kärnbränsleförvaret och Clink. Arbetet kommer att koordineras bland annat med det ovan nämnda resteffektsprojektet. Arbetet sker i samverkan med IAEA, Euratom och SSM.

5.5 Kapsel för använt kärnbränsle

I detta avsnitt beskrivs behoven av den kompletterande forskning som behövs om kopparkapselns egenskaper inför kommande säkerhetsredovisningar för Kärnbränsleförvaret. Vidare beskrivs behoven av den teknikutveckling som behövs för att kapseln ska kunna produceras, verifieras mot ställda krav och användas inom KBS-3-systemet. En viktig milstolpe är uppdateringen av produktionsrapporten⁷ för kapsel som ska utgöra underlag till PSAR för Kärnbränsleförvaret och PSAR för Clink. I kapitel 8 redogörs för de planerade insatserna under Fud-perioden.

5.5.1 Processförståelse

För analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning finns frågor avseende korrosion och kopparkrypning som kräver vidare insatser, i första hand fram till SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga avstämningspunkter.

Korrosion

Sulfid är den långsiktigt mest dominerande kopparkorrodanten i slutförvarsmiljön. I säkerhetsanalysen SR-Site var det dominerande riskbidraget kapselbrott till följd av sulfidkorrosion efter att bufferten förlorats. En bättre förståelse för detaljerna kring denna korrosionsprocess stärker den vetenskapliga grunden för säkerhetsanalysen. Av avgörande betydelse är också den kvantitativa förståelsen för vilka sulfidhalter som kan finnas i förvarsmiljön, både i lermaterialen och i grundvattnet (se vidare avsnitt 5.7 och 5.8). I övrigt krävs insatser kring lokal korrosion, kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten, strålningsinducerad korrosion och spänningskorrosion, med fokus på den omättade perioden, samt kring verifiering av olika kopparmaterials (basmaterial, kallbearbetat, svetsat etc.) beständighet mot korrosion.

Kopparkrypning

Förståelsen för krypning hos koppar vid mekaniska belastningar är ofullständig. Bland annat behöver förståelsen för hur inblandning av fosfor leder till gynnsamma krypegenskaper stärkas. Resultaten behövs för att förbättra krypmodelleringen i designanalysen av kapseln samt för att ställa krav på fosforhalter i kopparmaterialet, båda till uppdateringen av kapselns initialtillstånd i PSAR.

5.5.2 Konstruktion och tillverkning

När det gäller teknikutveckling för kapseln ska konstruktionsfasen i huvudsak vara slutförd till PSAR. Detta innebär att design- och defektanalyser behöver uppdateras baserat på uppdaterade konstruktionsförutsättningar. Till detta krävs bland annat en uppdaterad materialmodell för insatsens gjutjärn. Ytterligare processförståelse behövs för att fastlägga erforderliga krav på väte, syre, svavel och fosfor i kapselkoppar och krav på kopparhalten i insatsens gjutjärn.

En förutsättning för ett kvalificerat produktionssystem för kapseln är att teknik och metoder för produktion av kapslar finns utvecklade och fungerar i industriell skala. Dessutom behöver teknik och metod för svetsning av kapslar vara så väl utvecklade så att de fungerar i industriell skala. Den utrustning som ska användas i Clink för förslutning av kapslarna, behöver anpassas till den nukleära miljön där.

⁷ Produktionsrapporterna för KBS-3-systemet beskriver hur slutförvarsanläggningen är konstruerad, hur förvaret och dess barriärer byggs och kontrolleras. Produktionsrapporterna utgör en del av säkerhetsredovisningen och det finns produktionsrapporter för det använda bränslet, kapsel, buffert, återfyllning, förslutning och bergutrymmen.

5.5.3 Kontroll och provning

Provning av kapselns komponenter och svetsar görs för att bestämma till exempel egenskaper, dimensioner och förekomst av defekter medan kontroller avser verifiering mot acceptanskriterier.

Till PSAR ska SKB presentera en kontrollordning för kapseln som förutsättning för framtida kvalificeringar. En kontrollordning beskriver SKB:s och leverantörernas egenkontroll, kontroll genom oberoende organ (så kallad tredjepartskontroll) samt SSM:s uppföljning genom granskningar och inspektioner. Det innebär att erforderliga provningstekniker/processer behöver beskrivas och att viktiga acceptanskriterier för kontroller finns framtagna. Avseende oförstörande provning kommer SKB att behöva visa att kapseln, inklusive dess komponenter och svetsar, är provningsbar. För att kunna göra denna bedömning behövs underlag i form av möjliga och troliga defekter, deras acceptabla storlekar samt en övergripande beskrivning av vilka provningstekniker/provningsprocesser som kommer att tillämpas för att säkerställa att icke acceptabla defekter kan upptäckas. Fastställda kontroll- och provningsprocesser kommer däremot inte att finnas utvecklade till PSAR för Clink respektive Kärnbränsleförvaret utan planeras vara klara inför samfunktionsprovningen.

En förutsättning för ett kvalificerat produktionssystem för kapseln är att teknik och metoder för kontroll av kapslar finns utvecklade så att de fungerar i industriell skala. Den kontroll som ska utföras vid Clink behöver även vara anpassad till den nukleära miljön där.

5.6 Cementbaserade material

I detta avsnitt beskrivs den forskning som behövs för att få ökad processförståelse för egenskaperna hos cementbaserade material i avfallsmatriser, barriärer och konstruktioner i slutförvaren. Vidare beskrivs den teknikutveckling som behövs för utformning av betongkonstruktioner, material och produktionsmetoder.

Inför PSAR inför utbyggnaden av SFR, planerar SKB aktiviteter inom båda dessa områden. Inför säkerhetsvärderingen av SFL planerar SKB huvudsakligen arbeten kopplade till utformning av betongkonstruktioner, material och teknik.

Inför detaljprojekteringen av Kärnbränsleförvaret planerar SKB huvudsakligen arbeten kopplade till utformning av låg-pH-cementbaserade material till pluggar samt för injektering och bergförstärkning.

För detaljerat program under Fud-perioden vad gäller cementbaserade material i SFR, SFL och Kärnbränsleförvaret, se kapitel 9. Program som kopplar till cementbaserade material i avfallsmatrisen beskrivs i kapitel 6.

5.6.1 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 komponenter lösta i grundvattnet, alternativt av mekaniska processer, såsom berggrörelser eller tryck orsakade av svällande material, inre gstryck eller frysning av betongens porvatten.

Då cementbaserade material har en central funktion i upprätthållande av säkerheten efter förslutning behöver kunskapen och förmågan att modellera utvecklingen av materialens egenskaper över tid ytterligare förstärkas.

SKB planerar att fortsatt samordna den forskningen som sker kring de långsiktiga egenskaperna för cementbaserade material för de två förvaren, SFL och SFR.

Interaktion och nedbrytning av material

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

nu att utveckla sitt program för studier av interaktioner mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser för att ytterligare öka förståelsen för vilka effekter dessa processer kan ha på egenskaperna hos de cementbaserade materialen över de aktuella tidsrymderna.

I den befintliga silon i SFR och den planerade bergssalen för historiskt avfall, BHA, i SFL kommer kontakt mellan cementbaserade material och bentonit att förekomma. När dessa material en tid efter förslutning vattenmättas kan kemiska interaktioner ske, som medför jontransport samt förändringar av materialens sammansättning, egenskaper och struktur. Studier av interaktioner mellan cementbaserade material och bentonit pågår som ett experiment/långtidsförsök på Äspölaboratoriet.

Organiskt och metalliskt material som bryts ned i en cementmatris kan påverka egenskaperna hos de tekniska barriärerna främst genom att förändra den kemiska sammansättningen i porvattnet och hos cementmineralerna. 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 prover från experimentet Concrete and Clay i Äspölaboratoriet.

Vid tillverkning av cementbaserade material kan förutom cement, vatten och ballast även olika typer av tillsatsmaterial användas för att förändra materialets sammansättning, för att exempelvis säkerställa en god arbetbarhet hos materialet. SKB planerar att inleda en förstudie av hur en förändrad cementsammansättning kan påverka materialens egenskaper under de tidsrymder som täcks in av analysen av säkerheten efter förslutning. Resultaten bedöms behöva finnas tillgängliga inför formuleringen av ett forskningsprogram för SFL, vilket kommer att sättas samman efter genomförd säkerhetsvärdering.

Mekaniska laster och gastransport

När porvattnet i ett cementbaserat material fryser kommer det att expandera och materialet att utsättas för ett inre tryck. Om en tillräckligt stor andel av porvattnet fryser kan det inre trycket bli så stort att sprickor uppkommer i materialet alternativt att materialet helt faller sönder. Vid vilken temperatur detta sker är beroende av materialets porstruktur då vattnets frystemperatur är tydligt beroende av storleken på den por i vilken det är inneslutet. SKB planerar att under Fud-perioden genomföra ytterligare studier kopplade till frysning av färsk och åldrade cementbaserade material, främst betong, under permafrostliknande förhållanden.

Efter förslutning kommer betongkonstruktionen att tillsammans med kringgjutningsbruk och avfallsbehållare/avfall att utsättas för yttre laster från exempelvis grundvattentrycket eller bergutfall. Förvarskomponenterna kan även komma att utsättas för inre tryck från exempelvis svällande avfall eller gasbildande processer. Inom teknikutvecklingen inför utbyggnaden av SFR pågår kartläggning över mekaniska laster på grund av svällande avfall, exempelvis från korrosion och jonbyrtmassa, samt strukturmekanisk påverkan på betongbarriärerna. För att erhålla en ökad systemförståelse med avseende på konstruktioner och spricktillväxt i dessa under uppförande och driftskede kommer SKB att genomföra sprickriskberäkningar för betongkonstruktioner. Resultaten från beräkningarna utgör konstruktionsförutsättningar för uppförande samt förutsättningar för drift och underhåll.

Gas som producerats genom nedbrytning av organiskt avfall och genom metallkorrosion i förvaret, måste kunna transporteras genom de cementbaserade materialen utan att egenskaper relevanta för säkerheten efter förslutning påverkas. Forskning kring gastransport genom cementbaserade material kommer att samordnas med utveckling av material och teknik för uttransport av gas ur en slutförvarskonstruktion.

5.6.2 Konstruktion, tillverkning och installation

Inför utbyggnaden av SFR och inför uppförande av SFL och Kärnbränsleförvaret planerar SKB att genomföra ett omfattande utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och material till de olika förvaren. En stor del av arbetet måste genomföras och avslutas inom denna Fud-period. I följande avsnitt ges en sammanfattning av planerat utvecklingsarbete. De fullständiga programmen presenteras i kapitel 9.

SFR och SFL

Inför PSAR inför utbyggnaden av SFR planerar SKB att genomföra utrednings- och utvecklingsarbeten vilket omfattar utformning av betongkonstruktioner, utveckling av material och produktionsmetod för följande områden och system/komponenter: Kringgjutning, kassuner, hantering och slutförvaring av hela reaktortankar samt system för gastransport. Huvudfokus kommer dock att ligga på utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA samt utveckling och tester av produktionsmetod för uppförande.

För att realisera en förvarsutformning av SFL, med stora mängder betongåterfyllning, behöver material utvecklas och metoder för installationen tas fram. Utvecklingen av dessa delar utgör viktigt underlag för att skapa en första layout av förvaret. Utformning av betongkonstruktioner, material och teknik omfattar de två bergssalarna för historiskt avfall respektive hårdkomponenter i SFL samt för kringgjutning av avfallsbehållare. SKB har i dagsläget inte något utvecklingsarbete av en konstruktionsbetong till de två bergssalarna, BHK och BHA, i SFL. Bedömningen är att den betong som för närvarande utvecklas till kassunerna till 2BMA ska kunna utnyttjas även i SFL. SKB avvaktar därför med ett enskilt utvecklingsprogram till dess att utvecklingsprojektet för 2BMA har utvärderats.

Inför färdigställandet av säkerhetsvärderingen för SFL planeras en studie kopplad till material och metod för grundläggning av en betongkonstruktion på betong direkt mot berg och återfyllning av en bergssal med betong. Programmet omfattar en genomgång av befintliga metoder och material.

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. SKB har sedan tidigare låtit utveckla denna typ av material för injektering, bergförstärkning och till pluggar för deponeringstunnlar. Dock medför de långa tidsperioder som omfattar uppförande, drift och förslutning av Kärnbränsleförvaret att tillgängligheten på de ingående komponenterna i nuvarande recept, kan komma att förändras betydligt och vissa produkter helt utgå. Av denna anledning är det av vikt att recepten är utformade 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.

Inför detaljprojektering planerar SKB att genomföra utrednings- och utvecklingsarbeten inom två områden: Utformning av låg-pH-betong till plugg för förslutning av deponeringstunnel samt utformning av låg-pH-material för injektering och bergförstärkning.

Huvudfokus i dessa utvecklingsarbeten ligger på att säkerställa att de i dag gällande recepten görs mer robusta gentemot förändringar i tillgänglighet av de ingående komponenterna, exempelvis cement eller tillsatsmedel.

5.7 Buffert, återfyllning och förslutning

Huvudsyftet med lerbarriärerna i Kärnbränsleförvaret (buffert och återfyllning), SFR (silofyllning) och SFL (lerbarriär i bergssal för historiskt avfall) är att begränsa vattenflödet runt kapseln respektive runt det låg- och medelaktiva avfallet. Detta åstadkoms med en låg hydraulisk konduktivitet och en svällförmåga som gör att den installerade barriären homogeniseras, fyller hålrum och tätar till mot berget och andra förvarskomponenter.

För Kärnbränsleförvaret behöver utformningen av buffert, återfyllning och förslutning vidareutvecklas så att en tillräcklig grund kan ges för PSAR och för den fortsatta projekteringen av förvaret och produktionssystemet för bentonitkomponenter. Detta redovisas i de produktionsrapporter för KBS-3-systemet som blir underlag till PSAR. Behov av åtgärder för kvalitetssäkring under tillverkning, hantering och installation behöver ytterligare detaljeras. Detta görs genom produkt- och processkartläggningar och genom att ta fram preliminära kvalitetsplaner. För att detta ska vara möjligt – och för att kunna lägga fast tydliga krav och praktiskt genomförbara testmetoder, behövs forskning avseende buffertmaterialets egenskaper och hur det uppför sig efter installation fram till dess att det vattenmättats och fullt svälltryck utbildats.

Ytterligare insatser avseende SFL är beroende av utfallet av säkerhetsvärderingen och kommer att preciseras när den är klar. För SFR anses kunskapsläget i huvudsak tillfredställande avseende silofyllningen medan vissa insatser krävs avseende återfyllning och förslutning av borrhål inför PSAR respektive SAR för utbyggnaden av SFR.

Programmet inom buffert, återfyllning och förslutning redovisas i kapitel 10.

5.7.1 Processförståelse

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor som kräver vidare insatser. Detta gäller samtliga förvar med bentonitbarriärer. 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 pågående säkerhetsvärderingen för SFL kommer att i huvudsak baseras 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 mellan de olika anläggningarna och mycket av resultaten från den forskning som bedrivs för Kärnbränsleförvaret kan också användas framförallt för SFL men också för silon i SFR.

Homogenisering och vattenupptag

I samtliga förvar installeras bentonitbarriärer som komponenter bestående av block, pelletar och hålrum. För funktionen efter förslutningar är det de vattenmättade homogeniserade egenskaperna som är avgörande. Detta gör att det är viktigt att kunna förstå och beskriva både homogeniseringsprocessen i sig och barriärens egenskaper efter vattenmättnad. I dag finns det brister som behöver åtgärdas, i de modeller som beskriver bentonitens mekaniska utveckling. Den styrs till viss del av hur vattenupptaget i leran sker. Det är därför viktigt att öka förståelsen för vattenupptag i bentonit, särskilt för torrare förhållanden. Homogenisering är också viktigt efter massförlust till följd av erosion.

Förångning och saltanrikning

Den relativt höga temperaturen i Kärnbränsleförvaret tillsammans med en långsam vattentillförsel skulle kunna leda till förångning av vatten i bufferten nära kapseln med saltanrikning som följd. Kondensation i den kallare delen av bufferten kommer minska betydelsen av denna process. Fortsatta studier för att förstå sambandet förångning/kondensation under olika förhållanden är dock nödvändiga.

Kanalbildning/erosion

Under perioden från installation av bentonitbarriärerna fram till och med att det hydrostatiska trycket har återställts kan det förekomma mycket höga vattentrycksgradienter i barriärerna. Tillsammans med inflöden av vatten kan detta orsaka kanalbildning och erosion av material. För att kunna utvärdera konsekvenserna av erosionen är det viktigt att kunna förstå hur vatten tas upp i pelletsfyllningarna under olika förhållanden. Ett program med både experiment och modellering har därför initierats. Resultaten kommer att användas för att kunna ställa bättre krav på inflödeskriterier och installationssekvensen. Denna process är gemensam för samtliga förvar med bentonitbarriärer.

Bentonitbarriärernas hydromekaniska egenskaper

Vidare undersökningar av sambanden mellan svälltryck, hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet krävs för olika bentonitmaterial för att ge en grundläggande förståelse för kopplingen mellan bentonitmaterialens sammansättning och egenskaper. Detta är i princip redan avslutat för silomaterialet i SFR, men för Kärnbränsleförvaret och SFL behövs informationen både för den tekniska utformningen och för analysen av säkerheten efter förslutning.

Mikrobiell sulfatreduktion

Mikrobiell reduktion av sulfat i bufferten kan orsaka kapselkorrosion. Vid tillräcklig densitet/tillräckligt svälltryck i bentoniten hämmas den mikrobiella aktiviteten till den grad att sulfatreduktionen kan

försummas. Arbetet med att ta fram vilka gränser detta sker vid kommer att fortsätta. Det är också önskvärt med en större förståelse för den/de processer som begränsar mikrobernas aktivitet. Det är vidare angeläget att bättre förstå den möjliga omfattningen av mikrobiell sulfatreduktion innan bufferten vattenmätas. Resultaten kommer att användas för att förbättra kravspecifikationerna på barriärerna samt att bestämma när mikrobiell reduktion av sulfat inte kan uteslutas i analys av säkerheten efter förslutning.

Kolloidfrigörelse/erosion

För Kärnbränsleförvaret krävs insatser framför allt kring buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion, vilket också är en relevant fråga för SFL. 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.

Mineralstabilitet

Insatser krävs också kring bentonitens långsiktiga stabilitet med hänsyn tagen till temperatur, järninnehåll och cement. För SFL är interaktionen mellan bentonit och cement en av de viktigaste processerna, men informationen behövs också för utvärderingen av silon i SFR.

5.7.2 Konstruktion, tillverkning, installation och kontroll

De huvudsakliga insatserna inom området konstruktion, tillverkning och installation gäller Kärnbränsleförvaret. Insatserna inom förslutning och borrhålsförslutning är relevanta för såväl Kärnbränsleförvaret som för SFR. Ytterligare insatser för SFL kan uppkomma i samband med säkerhetsvärderingen för anläggningen.

Buffert och återfyllning

Utifrån uppdaterade konstruktionsförutsättningar behöver utformningarna för buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret ses över (inför PSAR). Krav på installerad densitet är materialberoende. Då det inte är rimligt att anta att endast ett material kommer att användas under Kärnbränsleförvarets driftperiod behöver en process utvecklas för att utifrån konstruktionsförutsättningar och materialets egenskaper beskriva utformningen kopplad till ett specifikt material. För utformning av återfyllning krävs framför allt insatser avseende verifiering av återfyllningens förmåga att utgöra mothåll till en uppåtsvallande buffert.

Som ett underlag till PSAR färdigställs pågående utvärdering av presstekniker för tillverkning av buffertblock och ett slutligt val av pressteknik görs. I tid till detaljprojektering av produktionsbyggnaden för bentonitkomponenter behöver utveckling avseende teknik och metoder relaterat till produktionen vara klar. Detta innebär att följande behöver vara genomfört:

- Kravspecifikationer på material behöver vara fastställda.
- Tekniken för pressning ska ha vidareutvecklats, vilket för enaxlig pressning innebär arbete för att minimera smörjmedel och bearbetning.
- Tillverkningsmetoder som fungerar i industriell skala för produktion av bentonitblock och bentonitpelletar för buffert och återfyllning ska vara fastställda.
- Provningsmetoder som fungerar i industriell skala ska vara fastställda.
- Förutsättningar för framtagning av ett system för kvalitetsstyrning och kontroll ska vara fastställda.

Till tekniska system för deponering hör till exempel deponeringsmaskin, återfyllningsrobot och transportsystem för buffert och återfyllnadskomponenter. Prototyper eller i alla fall principlösningar finns framme för deponeringsarbetet. Deponeringsprocessen avses bli automatiserad och för att styra och övervaka ett sådant system pågår utveckling av ett överordnat styrsystem. Inför PSAR behöver dock underlag lämnas från pågående utveckling av tekniska system för uppdatering av produktionsrapporter och framtagning av systembeskrivningar. Utrustningarna vidareutvecklas för att finnas framme när de behövs för integrationstester och samfunktionsprovning.

Som underlag till PSAR kommer krav på installationssekvens och installation av buffert- och återfyllningskomponenter uppdateras och tydliggöras. En viktig fråga är till exempel vilka processer som sker i bufferten, och vilken hänsyn som måste tas till dessa, under tiden från det att bufferten placeras i deponeringshålet och 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 verifierade. För att verifiera att installation av buffert och återfyllning fungerar som avsett och ger resultat inom acceptabla intervall behöver tester genomföras i fullskala i underjordsförhållanden.

Förslutning

Förslutningssekvens för Kärnbränsleförvaret behöver utvecklas och krav ställas på layout så att pluggar ryms i de positioner där de behövs.

SR-PSU samt efterföljande analyser kommer att resultera i uppdaterade krav på förslutningskomponenterna för SFR. Inom genomförd teknikutveckling identifierades behov av vidare utveckling för utformning och installation av förslutningen.

Detaljprojektering av utbyggnaden av SFR samt bättre 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 (övrig miljöpåverkan, flexibilitet och kostnadseffektivitet vid installation etc) mer anpassad förslutning. Som en del av översynen kommer behov av verifierande tester att inventeras. Baserat på översynen uppdateras förslutningsplanen inför PSAR.

Borrhålsförslutning

Kortare borrhål kan behöva förslutas före byggstart (Kärnbränsleförvaret) vilket gör det nödvändigt att utveckla krav och metoder för borrhålsförslutning.

I området vid SFR samt där utbyggnaden planeras finns ett antal borrhål som kommer att behöva förslutas. Borrhålen behöver förslutas för att inte äventyra säkerhet efter förslutning men även med hänsyn tagen till säkerheten vid uppförandet av SFR-utbyggnaden. Inför PSAR kommer de borrhål som ligger inom utbyggnadsområdet att förslutas. Övriga borrhål som ligger i området vid SFR kommer att förslutas inför förslutningen av SFR. Det innebär att material och metod för borrhålsförslutning behöver utarbetas inför PSAR och tillämpas i samband med byggstart av utbyggnaden av SFR.

5.8 Berg

Teknikutveckling inom bergområdet behövs som underlag till PSAR och Suus för Kärnbränsleförvaret och för att möjliggöra byggstart (godkänd PSAR, detaljprojekterade tillfarter). Det mesta av den planerade teknikutvecklingen kan genomföras utan nya forskningsinsatser. Ytterligare utveckling bedöms kunna leda till mer effektiva urvalskriterier för deponeringshål, vilket i sin tur medför att färre hål väljs bort i onödan.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor som kräver vidare insatser, i första hand fram till SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga milstolpar. Det fortsatta arbetet med SFL baseras på befintlig kunskap om berget som barriär och det som tas fram för Kärnbränsleförvaret och SFR. Den pågående säkerhetsvärderingen av SFL kan dock komma att peka på områden där ytterligare kunskap behövs.

Nedan sammanfattas de områden med kvarstående frågor vad avser teknikutveckling, forskning och analys av säkerhet efter förslutning för berget. Nuläge och program för Fud-perioden redovisas i kapitel 11.

5.8.1 Processförståelse

Modellering av grundvattenflöde och transport av lösta ämnen

DarcyTools är SKB:s eget beräkningsverktyg för hydrogeologisk simulering. Ett antal olika utvecklingsinsatser planeras framöver bland annat för att kunna ta om hand data från detaljundersökningar för Kärnbränsleförvaret (bland annat ny uppskalningsalgoritm och betingad simulering). Även viss vidareutveckling av de kommersiella verktygen ConnectFlow och MikeShe planeras, samt utvecklingsinsatser för hur de hydrogeologiska modellverktygen ska kopplas mot/integreras med den ytnära beskrivningen som används inom biosfärsmodellering.

Under de senaste åren har hydrogeologisk modellering utvecklats så att geokemiska processer och transportprocesser nu kan integreras med flödesmodelleringen. Insatser krävs för att vidareutveckla och testa dessa nya verktyg samt att utöka deras användningsområden (till exempel mikrobiella processer) för användning inom platsmodellering och säkerhetsanalys.

Inom transport av lösta ämnen krävs insatser framför allt om matrisdiffusion och sorption, vad det gäller konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar och vidareutveckling av modelleringsverktyg. Insatser krävs också kring advektiv transport, dispersion, elektromigration, gastransport och kolloidburen transport. Insatserna kan framför allt leda till mindre pessimistiska antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning, det vill säga bestämning av platsspecifika data med ett reducerat osäkerhetsintervall ska eftersträvas.

Seismisk påverkan på säkerhet

Jordskalv i förvarets närområde kan inducera 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 kapsels tålighet mot skjuvrörelser.

För att minska den negativa effekten av skalv på säkerheten efter förslutning utvecklar SKB, inom ramen för det detaljerade undersökningsprogrammet, metoder för identifieringen av kritiska strukturer utöver den metod med ersättningsparametrar som framtagits och tillämpats inom ramen för SR-Site.

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 och 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 och dess variabilitet under en glaciationscykel. Denna osäkerhet adresseras delvis genom studier av paleoseismiska händelser och fördjupade studier av mätta data från skalv.

Karakterisering och modellering av bergmassans mekaniska egenskaper

Beräkningen av bergspänningar inom förvarsvolymen i Forsmark är behäftad med stora osäkerheter, främst på grund av databrist. För att minska dessa osäkerheter krävs 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.

Modellering av bergmassan 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 hydrogeologiska och geokemiska egenskaper samt transportegenskaper.

Sprickpropagering i kristallint, hårt, berg beror på de termiska och hydrauliska egenskaperna samt på rådande bergspänningsförhållanden. Integrerad modellering krävs därför för att gränssätta betydelsen av den inducerade rörelsen, både i när- och fjärrområdet, som en följd av termiskt, seismiskt eller glacialt inducerade belastningar.

Klimatets inverkan på processer i geosfären

Påverkan på ett slutförvar av det hydrogeologiska systemet under olika stadier av permafrosttillväxt eller avsmältning är platspecifikt 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. Frysning av grundvatten vid kallare klimat leder till minskad permeabilitet och orsakar volymförändringar, vilket kan leda till nybildning av sprickor eller propagering av befintliga sprickor. Lasten från en inlandsis påverkar det hydrogeologiska systemet olika beroende på isens termiska bottenförhållanden. Glacialt smältvatten från varmbottnade inlandsisar kan leda till att utspätt och syresatt grundvatten kan nå Kärnbränsleförvaret.

Modeller som tar hänsyn till klimatets inverkan på platspecifika egenskaper för hydrogeologi, geokemi och transporter, samt klimatets påverkan på processer och egenskaper vid permafrost och glaciation behöver vidareutvecklas för Forsmark.

5.8.2 Produktion, verifiering och kontroll

Metodik för detaljundersökningar med tillhörande modellering

De detaljundersökningar (inklusive övervakning) och modelleringar som utförs i samband med ett slutförvars uppförande och drift, ger steg för steg information om bergets egenskaper och dess lämplighet för deponering, det vill säga hur väl de uppfyller ställda krav för säkerhet efter förslutning. Vid utveckling av detaljundersökningsprogrammet ska metoder, instrument och modelleringsteknik för att verifiera att ställda krav uppfylls, tas fram och beskrivas.

Modelleringsteknik behöver fastläggas för geovetenskaplig modellering i olika skalor och för olika ändamål. Ett viktigt område där ytterligare insatser krävs, både för kommande bergarbeten och för analys av säkerhet efter förslutning, är utveckling av metodiken för DFN-modellering, det vill säga modellering av bergets spricknätverk. Dels ska den pågående utvecklingen av metodik för betingad (konditionerad) DFN-modellering slutföras, dels ska effekten av olika konceptuella antaganden som ligger till grund för DFN-modellering undersökas vidare. Även möjligheten att inkludera hydro-mekaniskt kopplade processer i DFN-modeller ska undersökas.

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 produktions effektiv metod för bergarbeten i deponeringsområdet såsom berguttag av deponeringstunnel och borrning av deponeringshål, kan dock fortsätta fram till 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.
- Metod för borring av deponeringshål, avjämning av botten samt tillverkning av avfasning.
- Undersökningsmetod för val och acceptans av deponeringshål.

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

5.9 Ytekosystem

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 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 12.

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. För SFL behöver kompletterade data för vissa radionuklider tas fram som underlag för F-PSAR.

De viktigaste kvarstående frågorna inom ytekosystem är 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 klor, molybden, gadolinium och nickel).

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

Viktiga delar i arbetet om klimatfrågor är att öka processförståelsen, validera de anpassningar av klimatmodeller som används för att beskriva spännvidden av de klimat som slutförvaren kan komma att utsättas för under kommande 100 000 till 1 miljon år. Dessutom ska övriga ämnesområden i SKB:s säkerhetsanalyser förse med klimatologiska indata, antaganden och randvillkor för olika typer av delanalyser. Övergripande handlar det om att ha processförståelse, ta fram klimathistoria, uppdatera klimatscenarier och modellarbete.

SKB bedömer att det inom området klimat inte finns några kritiska kvarstående forskningsfrågor som måste lösas inför PSAR för Kärnbränsleförvaret eller PSAR för utbyggnaden av SFR. Det finns dock frågor med bäring på alla tre slutförvaren, som behöver studeras vidare. Det rör framför allt i) ålder och stabilitet hos berggrundsytan i Forsmark (inklusive glacial erosion och denudation), ii) paleoklimat under förra istidscykeln, iii) klimatvariationer som utgör övergångar mellan SKB:s klimatdomäner, iv) havsnivåvariationer i närtid och på lång sikt, inklusive isostasi och strandlinjeförskjutning, v) validering av permafrostmodell, vi) arbete med och tillämpning av nyutvecklade beskrivning av inlandsisars hydrologi från genomförda studier av den grönländska inlandsisen (GAP – Greenland Analogue Project) för hydrogeologisk modellering, samt vii) den första möjliga tidpunkten för kallt klimat, permafrost och inlandsistillväxt i Skandinavien.

5.11 Avveckling

Utifrån tidigare genomfört utvecklingsarbete 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, tillståndprocesser, logistik, resurser och samordning än till grundforskning och ren teknikutveckling, även om anpassningar av tillgänglig teknik kommer att behövas.

Hur det konventionella och radioaktiva avfallet ska hanteras och bortskaffas vid avveckling är en förutsättning som har stor betydelse för ett avvecklingsprojekt. Det innebär logistiska utmaningar men även att det behöver finnas fastlagda alternativ för omhändertagande av avfallet innan det börjar genereras. Det material som uppkommer under nedmontering och rivning behöver därför kartläggas och karakteriseras i detalj som underlag till planeringen av bortskaffningsalternativ och framtagning av kriterier för sortering.

När det gäller friklassning och hantering av mycket lågaktivt avfall finns behov av att flera bortskaffningsalternativ är tillgängliga. Ett exempel på alternativ är markförvar som i dag finns på kärnkraftverken för driftavfall. 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 villkorad friklassning behöva tillämpas, vilket innebär att friklassningen är förbunden med restriktioner för hur materialet får hanteras efter friklassningen.

För att kunna genomföra avvecklingen och hanteringen av medelaktivt avfall på ett effektivt sätt planerar SKB och kärnkraftsföretagen att använda avfallsbehållare, benämnda fyrkokill och tvåkokill. Innan behållarna kan tillverkas och införas återstår ett utvecklingsarbete och krav och hantering behöver verifieras av SKB och kärnkraftsföretagen tillsammans.

Att hantera visst radioaktivt avfall i form av stora komponenter kan innebära fördelar, bland annat ur ett dos- och effektivitetsperspektiv. En sådan hantering måste anpassas så att avfall i denna form kan accepteras för transport till och deponering i något av slutförvaren. Ett exempel som tidigare utretts är hanteringen av hela BWR-reaktortankar. Åtgärder behövs för till exempel hanteringen av hela PWR-tankar och andra större komponenter.

Under hela livscykeln för en kärnteknisk anläggning är det av vikt, samt kravställt, att inneha ett register över avfallet som uppkommit på anläggningen. Under avvecklingen kommer mängden material som ska hanteras att vara stor och registreringen av det avfall som genereras behöver ses över bland annat för att säkerställa effektiv registrering och att avfallsdata kan föras över från tillståndshavarna till SKB.

Avvecklingen för de kärntekniska anläggningar som SKB är tillståndshavare för, och därmed ansvarig för att uppfylla kravbilderna, ligger tämligen långt fram i tiden. Där är behovet av utvecklingsarbetet under denna Fud-period begränsat. Det behov som däremot finns kopplar till att hålla avvecklingsplaner aktuella samt under drift tillvarata erfarenheter och händelser av vikt för avvecklingen. Avvecklingsplanen för Clab ses över och en uppdatering planeras för att harmonisera med föreskrifter från SSM samt följa den gemensamma struktur som tagits fram med kärnkraftsföretagen.

En annan aspekt som SKB står inför är att ta hänsyn till kravbilderna för avveckling när nya kärntekniska anläggningar kommer att uppföras, vilket exempelvis gäller Clink och de nya slutförvaren.

5.12 Övriga frågor

Informationsbevarande och djupa borrhål

Frågor om bevarande av information och kunskap om slutförvar och om utvecklingen av andra koncept för slutförvaring, speciellt deponering i djupa borrhål har varit ständigt återkommande under alla åren av samråd inför ansökningarna för inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret. I remissförfarandet av ansökan om KBS-3-systemet enligt miljöbalken, har frågorna fortsatt tagits upp. SKB går därför vidare med arbetet om hur man kan bevara dokument, information och kunskap om slutförvaren över generationer långt in i framtiden och fortsätter bevakningen av utvecklingen inom ämnesområdena borrhål och deponering i djupa borrhål, se del IV.

Framtida mänsklig aktivitet

Att förutsäga vad människor kommer att göra under de tidsperioder som är relevanta för slutförvar av radioaktivt avfall, 100 000-tals – miljontals år, är en omöjlighet. Internationellt och nationellt arbete som gjorts belyser problematiken kring att identifiera relevanta framtida mänskliga aktiviteter som bör ingå i en säkerhetsanalys. I stället för att spekulera om olika typer av mänskliga intrång som skulle kunna ske, rekommenderar IAEA (2011), NEA (2012) och ICRP (2013) att ta fram ett eller flera stiliserade scenarier för att demonstrera robustheten hos ett förvarskoncept.

Det finns en internationell samsyn att framtida mänskliga intrång ska inkluderas i säkerhetsutvärdering av slutförvar. Emellertid finns ingen samsyn hur detta kan göras. Därför startade IAEA 2012 projektet Hydra (Human Intrusion in Disposal of RAdioactive waste). Under fas 1 av projektet föreslogs en metodik för hantering av mänskliga intrång i säkerhetsutvärderingar. SKB deltog aktivt i fas 1 av Hydra och kommer även att delta aktivt i fas 2, där den föreslagna metodiken kommer att testas och utvärderas.

Del II

Avfall och slutförvaring

- 6 Det låg- och medelaktiva avfallet
- 7 Det använda kärnbränslet
- 8 Kapsel
- 9 Cementbaserade material
- 10 Buffert, återfyllning och förslutning
- 11 Berg
- 12 Ytekosystem
- 13 Klimat och klimatbaserade processer

6 Det låg- och medelaktiva avfallet

Detta kapitel redovisar de forsknings- och teknikutvecklingsinsatser som pågår, startas eller avslutas under denna Fud-period avseende det låg- och medelaktiva avfallet. Under perioden ska fördjupad kunskap om radionuklidinventariet för SFR respektive SFL inhämtas. Forskningsinriktade studier syftar till att ge en ökad processförståelse för avfallet och dess avfallsmatris för perioden efter förslutning. Preliminära acceptanskriterier för långlivat avfall behöver formuleras inför hantering och konditionering av detta avfall. Utvecklingsarbete inom området för avfallstransportbehållare och avfallsbehållare behövs inför avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna.

6.1 Radionuklidinventarium

SKB arbetar kontinuerligt med att förbättra metoder för uppskattning och prognos av radionuklidinventariet i det låg- och medelaktiva avfallet. Detta görs genom uppdateringar och kompletteringar av information i databasen Triumf NG (SKB 2010f) vartefter kunskapsläget förbättras. Därutöver pågår arbete med att vidareutveckla metodiken för aktivitetsbestämning av svärmätbara nuklider, vilket görs i samråd med tillståndshavarna. All metodik för bestämning av radionuklidinventariet är förknippad med osäkerheter. SKB har påbörjat arbetet med att inventera och kvantifiera dessa osäkerheter samt att utföra experimentella analyser för att verifiera använda beräkningsmodeller.

6.1.1 Referensinventarium

Nuläge

I sammanställningen av radionuklidinventariet till ansökan om ett utbyggt SFR ingick inte aktivitetsuppskattningen från avveckling och rivning av anläggningarna på Studsviksområdet. Arbeta med att ta fram ett inventarium för rivningsavfall pågår hos respektive tillståndshavare och beräknas vara färdigställt till slutet av 2016.

Databasen över radionuklidinventariet i SFR (Triumf NG) har inventerats med avseende på uppmätta värden för nyckelnukliderna kobolt-60 och cesium-137. En beräkning av totalaktivitet kompletterad med uppskattade MDA-värden (MDA, minsta detekterbara aktivitet) har gjorts för kobolt-60 och cesium-137 för respektive förvarsdel, vilket även berör de nuklider vars aktivitet bestäms genom korrelation mot nyckelnukliderna.

Ett uppdaterat referensinventarium har tagits fram för långlivat avfall från de svenska kärnkraftverken (Herschend 2014) vilket inkluderar befintligt avfall i mellanlager samt prognostiserat avfall från framtida drift och avveckling av kärnkraftverken. Inventariet har bestämts utifrån inrapporterade avfallsdata samt genomförda rivningsstudier (Anunti et al. 2013, Larsson et al. 2013, Hansson et al. 2013). Aktivitetsinnehållet har i huvudsak bestämts genom beräkningar enligt samma metodik som legat till grund för rivningsstudierna. En inventering av de styrestavar som mellanlagras i Clab har genomförts för att möjliggöra en mer detaljerad bestämning av radionuklidinventariet i dessa.

För det historiska avfallet samt avfall från fortsatt drift och avveckling av AB SVAFO:s och Studsvik Nuclear AB:s anläggningar har ett preliminärt inventarium tagits fram för säkerhetsvärderingen av slutförvarskonceptet för SFL. Inventariet är baserat på inrapporterad mängd historiskt avfall, prognos för framtida driftavfall samt de mätningar och beräkningar av aktivitet som gjorts inför rivning av forskningsreaktorn i Studsvik. Inventariet är dock i dagsläget mycket osäkert då dokumentationen rörande stora delar av det historiska avfallet är bristfällig.

Program

Erfarenhet från planeringen av interndelssegmenteringen för reaktorerna B1 och B2 i Barsebäck samt forskningsreaktorn i Studsvik visar att SKB:s befintliga avfallsregister behöver utvecklas för att kunna ta emot och hantera den information som medföljer avfallskollin med segmenterade interndelar. Aktivitetsinnehållet i avfallet kommer att baseras på beräknade aktivitetsnivåer för varje enskilt

segment i kombination med uppmätt dosrat. Avfallsregistret bör därför anpassas för att kunna ta emot information om varje enskilt segment. Dessutom ska det vara möjligt att koppla registret till en beräkningsmodell som utifrån uppmätt dosrat samt drifthistorik kan bestämma aktivitetsinnehållet.

SKB kommer att bevaka resultaten av provtagning och provanalyser från intermedelssegmenteringen på reaktorerna i Barsebäck och forskningsreaktorn i Studsvik för att utifrån dessa data kunna verifiera de beräkningsmetoder som används för uppskattning av inducerad aktivitet samt kontamination på primärsystemsytor.

Den inventering av styrestavar som mellanlagras i Clab, vilken genomförts under 2015, syftade till att ta fram en beräkningsmodell som gör det möjligt att beakta varje styrestavs faktiska drifthistorik vid bestämning av aktivitetsinnehållet. Denna modell kommer att användas för att ge en mer detaljerad beskrivning av radionuklidinventariet i SFL samt som stöd vid fortsatt hantering av styrestavarna fram till deponering i slutförvar.

SKB kommer att bevaka planeringen av spallationsanläggningen ESS för att fortlöpande kunna ta ställning till möjligheten att slutförvara avfall från drift och avveckling av anläggningen.

6.1.2 Metodutveckling för svärmätbara nuklider

Nuläge

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). Vid inventariesammanställningen inför inlämnandet av ansökan om ett utbyggt SFR identifierades en rad förbättringsmöjligheter i denna beräkningsmodell, varför en uppdatering ansågs vara önskvärd.

Sedan 2015 har även metodiken för att ta fram en prognos för innehållet av nukliderna molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135 i driftavfall ändrats, då korrelation mot kobolt-60 och cesium-137 har frångåtts. I stället prognostiseras aktiviteten med hjälp av beräkningsmodellen för svärmätbara nuklider (Lundgren 2005, 2006).

SKB har inventerat innehållet i databasen Triumf NG med avseende på inrapporterad aktivitet från genomförda systemdekontamineringar av reaktorernas primärsystem. Svärmätbara nuklider vars aktivitet bestäms genom mätning av processvatten riskerar att underskattas om vattenanalyser från genomförda systemdekontamineringar inte har kompletterats ordinarie analyser av dessa nuklider. En komplettering av databasen har påbörjats med avseende på inrapporterad frigjord transuranaktivitet för genomförda systemdekontamineringar där data tidigare har saknats. För de systemdekontamineringar där vattenanalyser inte har omfattat transuraner och andra svärmätbara nuklider kommer en schablon av frigjord aktivitet att beräknas utifrån tillgänglig mätdata, mängden upplöst uran i den aktuella reaktorn samt vektorer för bränsle och aktiverade korrosionsprodukter.

De undersökningar som har gjorts vid KTH rörande avgången av kol-14 vid bitumenkonditioneringen av jonbytarmassa som tillämpas på FKA (Forsmarks Kraftgrupp AB) har avslutats. Därutöver har kol-14 i frånluften från FKA:s avfallsanläggning mätts under ett drygt år, och prover på torkade jonbytarmassor har tagits ut och analyserats från samtliga reaktorblock. I och med dessa utredningar anses det i nuläget vara klarlagt att torkningssteget driver av stora mängder oorganiskt kol-14 från jonbytarmassan och i viss utsträckning även organiskt kol-14, varför inga ytterligare analyser är planerade.

Det arbete som beskrevs i Fud-program 2013 rörande inventering av kol-14-aktivitet i avfall från icke-kärnteknisk verksamhet är avslutat och information om aktivitetsinnehållet finns därmed tillgänglig (Johansson 2015).

Program

Vidareutvecklingen av beräkningsmodellen för de svärmätbara nukliderna molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135 i driftavfall pågår. Arbetet innefattar bland annat tillägg av ytterligare mätdataserier för att bättre kunna bestämma ursprunget till frigörelse av aktivitet och således även val av parametervärden. Vidare kommer beräkningarna av koncentrationen i processvatten, vilka i dagens modeller baseras på reaktortyp, att ersättas med reaktorspecifika värden. I den uppdaterade modellen kommer det även vara möjligt att variera det skadade bränslets ålder och utbränningsgrad. I samband med uppdateringen av beräkningsmodellen kommer en korrelation tas fram mellan

bränslerelaterade nuklider och mängden upplöst uran samt mängden fissilt material på härden utifrån förhållandet i respektive reaktors beräknade jämviktshärd. På så sätt finns möjligheten att frångå korrelation av fissionsprodukter mot mängden cesium-137, vilket är önskvärt då cesium har andra spridningsförlopp i reaktorn än många andra bränslerelaterade nuklider.

Inrapporterade mängder transuraner kommer att ses över och kompletteras med ytterligare uppmätta eller beräknade värden för att säkerställa en komplett redovisning av transuranaktivitet i driftavfall.

Vid sammanställningen av radionuklidinventariet för SFR inför PSAR kommer uppdaterade upptagsfaktorer för kol-14 på jonbytarmassor att användas (Aronsson et al. 2016, Aronsson 2016a, b).

SKB är sedan en tid tillbaka delaktigt i ett EU-projekt (Cast, Carbon-14 Source Term) som utreder frågeställningar kring kol-14 såsom frigörelsehastighet av inducerat kol-14 och speciering av organiskt kol-14. Resultat från dessa undersökningar förväntas då projektet avslutas 2017.

SKB bedriver även utveckling av den metodik som används för att fördela den beräknade mängden svärmätbara nuklider på det avfall som producerats. Målsättningen är att kunna styra fördelningen så att aktiviteten tillskrivs det avfall som, i fråga om ursprung och tid för uppkomst, stämmer överens med de system och den driftperiod då aktiviteten uppstod. På så sätt kan osäkerheten i fördelning av svärmätbara nuklider mellan de olika förvarsdelarna i SFR minskas.

För att förbättra uppskattningen av klor-36 i neutronbestrålade komponenter arbetar SKB med att bestämma halten klor-35 i stål före aktivering. Stålprover (representativa för reaktor- och härdkomponentmaterial) har skickats för analys med en nyligen utvecklad metod baserad på en kombination av neutronaktivering och accelererad masspektrometri (Winkler et al. 2015).

I vissa system där aktivitetsinnehållet byggs upp över relativt lång tid kommer långlivade nuklider att kunna ackumuleras medan mer kortlivade nuklider minskar till följd av snabbare sönderfall. Bestämning av svärmätbara nuklider i avfall från dessa system kan inte göras enbart med hjälp av uppmätt kortlivad aktivitet och korrelationsfaktorer eftersom korrelationen mellan nuklider förändras över tid. SKB ser därför ett behov av att utveckla beräkningsmetoder för uppskattning av svärmätbara nuklider i system med långvarig aktivitetsuppbyggnad som till exempel Clabs mellanlagringsbassänger och tankar med obehandlad jonbytarmassa.

6.1.3 Osäkerheter i radionuklidinventariet

Nuläge

Vid sammanställningen av radionuklidinventariet till ansökan om ett utbyggt SFR gjordes en inventering av osäkerheter i de olika metoderna för aktivitetsuppskattning. Osäkerheter som berör samma nuklid vägdes ihop och resulterade i ett påslag per radionuklid som utvärderades i analysen av säkerhet efter förslutning.

För att verifiera beräkningsmodellen för svärmätbara nuklider har ett mätprogram påbörjats. Reaktorvattenprover har under 2014 samlats in från reaktorerna O1 och O3 i Oskarshamn. Proverna har analyserats med ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) för att bestämma koncentrationen av nukliderna teknetium-99 och jod-129 (Åkerblom 2015).

Program

SKB har för avsikt att utveckla hanteringen av osäkerheter i radionuklidinventariet, vilket bland annat omfattar att identifiera fördelningsfunktioner för olika mätvärden samt att se över felfortplantningen av osäkerheter.

Eftersom provberedningen och metoden har visat sig vara lämplig för mätning av teknetium-99 och jod-129 i reaktorvatten planerar SKB att mäta reaktorvattenprover från fler reaktorer under kommande år på motsvarande sätt. Resultat från reaktorvattenmätning för varje typreaktor eftersträvas då detta skulle ge en samlad bild över beräkningsmodellens tillförlitlighet.

SKB undersöker i samarbete med Studsvik Nuclear AB, (SNAB) möjligheten att ta fram en provberedningsmetod för mätning av molybden-93 i reaktorvatten med ICP-MS. Syftet med detta utvecklingsarbete är att i förlängningen kunna genomföra verifierande mätningar även för denna nuklid.

Från de analyser som kommer att genomföras inom ramen för Barsebäck Kraft AB:s (BKAB) provtagningsprogram för projekt Hint och AB SVAFO:s provtagningsprogram för rivning av forskningsreaktorn i Studsvik kommer data för bestämning av osäkerhet i beräknad aktivitet (inducerad aktivitet samt kontamination på systemytor i kontakt med reaktorvattnet) att kunna inhämtas. Dessa data kan dels användas för att kvantifiera osäkerheten i beräknad aktivitet, dels utgöra referensdata för vidareutveckling av beräkningsmetoderna.

6.2 Acceptanskriterier för långlivat avfall

Det finns ett behov av att klargöra planeringsförutsättningarna för hanteringen av det långlivade avfall som uppstår vid drift och rivning av kärntekniska anläggningar. Planeringsförutsättningarna utgör stöd för kraftverkens rivningsplanering och för deras hantering av exempelvis skrotade komponenter som ska slutförvaras i SFL. SKB utvecklar successivt planeringsförutsättningarna för avfallet vartefter planeringen av SFL fortskrider. I takt med att detaljerna kring förvarets utformning konkretiseras kommer planeringsförutsättningarna att kunna preciseras och preliminära acceptanskriterier för avfallet formuleras. Acceptanskriterier för avfallet till SFL läggs fast i samband med ansökningar om att uppföra och driftsätta SFL.

Nuläge

Den pågående säkerhetsvärderingen för SFL syftar bland annat till att formulera krav på avfallet utifrån det föreslagna förvarskonceptet. Kraven kan innefatta begränsningar i såväl nuklid- och materialinnehåll som begränsningar i vilken form som avfallet kan föreligga. Dessa krav utgör grund för den fortsatta utvecklingen av preliminära acceptanskriterier för det långlivade avfallet.

Program

Efter genomförd säkerhetsvärdering görs en inventering av de krav på avfallet som det föreslagna förvarskonceptet ställer. Dessa krav, som relaterar till förvarets säkerhet efter förslutning, tillsammans med exempelvis krav för att möjliggöra säker och effektiv transport, hantering och drift utgör underlag för att formulera preliminära acceptanskriterier för avfallet. Arbetet innefattar även en analys av vad som ska göras med det avfall som i sin nuvarande form inte uppfyller acceptanskriterierna. Inventering och värdering av lämpliga behandlings- och konditioneringsmetoder kommer vid behov att ske, för att identifiera möjliga åtgärder kopplade till avfallet för att detta ska uppfylla acceptanskriterierna. Sådana åtgärder kan exempelvis innefatta sortering eller smältning av avfallet eller särskilda krav på avfallsbehållarens egenskaper. Arbetet påbörjas efter genomförd säkerhetsvärdering.

6.3 Konditionering av långlivat avfall

Utifrån acceptanskriterierna för långlivat avfall behöver tekniska frågor lösas kring hur avfallet ska behandlas och förpackas för att uppfylla acceptanskriterierna. Detta kan exempelvis innefatta utveckling av nya typer av behållare eller utveckling av material och metoder för stabilisering av avfall med cement. Stabilisering av avfallet säkerställer att avfallet inte flyttar på sig under transport och hantering och syftar vidare till att minska tomutrymmet i avfallsbehållaren.

6.3.1 Stabilisering av avfall i ståltankar

Nuläge

Segmenterade hårdkomponenter från uppgraderingar av kraftverken finns i dag bland annat mellanlagrat i ståltankar på kraftverken. Vidare planeras att tillkommande rivningsavfall från kraftverken också ska placeras i ståltankar. Detta görs för närvarande inom Hint-projektet, där BKAB segmenterar hårdkomponenter och interndelar och placerar segmenten i ståltankar.

Skulle acceptanskriterierna för avfallet kräva att de segment som i dag mellanlagras återtagningsbart i ståltankar stabiliseras inför slutligt deponering i SFL, kommer metod och anläggning för stabilisering av avfall i ståltankar att behöva utvecklas.

Program

Under senare delen av Fud-perioden kan det vara aktuellt att påbörja utvecklingen av en metod och anläggning för stabilisering av avfall i ståltankar utifrån preliminära acceptanskriterier för avfallet.

6.3.2 Omlastning av avfall

Avfall från AB SVAFO och SNAB föreligger i en variation av geometrier. För att möjliggöra en säker och effektiv hantering av detta avfall kan avfallet behöva placeras i nya behållare.

Nuläge

Avfallsbehållare för att möjliggöra säker och effektiv hantering av avfall från AB SVAFO och SNAB finns utvecklade på konceptuell nivå inom ramen för SFL konceptstudie (Pettersson 2013). För att använda dessa behållare behöver en omlastningsstation utvecklas, för packning av kokiller, 200-litersfat och 280-liters skyddsfat i behållare.

Program

Skulle acceptanskriterierna för avfallet kräva att de segment som i dag mellanlagras återtagningsbart i ståltankar stabiliseras inför slutlig deponering i SFL, kommer metod och anläggning för stabilisering av avfall i ståltankar att behöva utvecklas. Under senare delen av Fud-perioden kan det bli aktuellt att påbörja denna utveckling.

6.4 Hantering av reaktortankar och stora komponenter

Utvecklingsarbete för omhändertagande av hela BWR-reaktortankar har genomförts under 2013–2015 så att hela kedjan från nedmontering och rivning till deponering i SFR sker på ett optimalt vis.

PWR-reaktortankarna och interndelarna från Ringhals planeras att lagras på anläggningen tills de ska slutförvaras i SFL. Den befintliga avvecklingsplanen för Ågestareaktorn utgår ifrån att reaktortanken segmenteras i anläggningen. Det kan finnas fördelar med att undvika denna hantering och därför behöver alternativa omhändertaganden analyseras.

För mer information kring kärnkraftsföretagens planering och genomförande av avveckling, se del III.

Nuläge

Flera utredningar (Edelborg 2013, Haglind och Egeltun 2014, De la Gardie och Calderon 2014, Olofsgård och Baczynska 2016) som jämför hantering av hela respektive segmenterade BWR-reaktortankar har gjorts som en del i planeringen av SFR-utbyggnaden. En preliminär typbeskrivning för hela BWR-reaktortankar har också tagits fram (SKB 2014e).

Delar av utredningarna är relevanta även för hanteringen av PWR-reaktortankar. Segmentering av PWR-reaktortankar i kraftverket eller på annan plats har utretts av SKB tillsammans med SNAB och Westinghouse. En jämförande analys mellan olika hanteringsalternativ för PWR-reaktortankar genomförs gemensamt av SKB och Vattenfall. Analysen syftar till att belysa hela hanteringskedjan, inklusive rivning, transport och slutförvaring, med avseende på strålsäkerhet, teknik, miljö och kostnader och förväntas presenteras runt årsskiftet 2016/2017.

Kärnkraftsföretagen har under 2015 redovisat för SKB vilka andra större komponenter det kan finnas en nytta med att anpassa avfallssystemet för. Framför allt avser detta anpassningar i det utbyggda SFR. Komponenter som belyses är bland annat ånggeneratorer, tryckhållare och reaktortanklock från PWR-reaktorerna. Utifrån detta underlag har SKB påbörjat utredningar för att redovisa vilka konsekvenser detta får för avfallssystemet eller om det går att hantera inom befintlig planering.

Program

Hela BWR-reaktortankar avses att deponeras i det utbyggda SFR, och fram till att detaljprojekteringen startar för det utbyggda SFR sker teknikutveckling för att kunna hantera reaktortankarna. Detta avser bland annat hur uppställning, igjutning, kringgjutning och förslutning ska gå till, se avsnitt 9.2.2.

Inom denna teknikutveckling utreds även övriga stora komponenter för att belysa fördelar respektive nackdelar med att deponera dessa hela.

Resultatet i genomförd analys avseende PWR-reaktortankar ska användas som underlag i utvecklingsprojektet för reaktorerna i Ringhals och Ågesta samt för SKB:s planering för utformning av SFL och SFR. Slutligt val av omhändertagande och hantering är även avhängigt utvecklingen av acceptanskriterier för avfallet.

6.5 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att kunna genomföra utvecklingen av de kärntekniska anläggningarna optimalt enligt vad som beskrivs i del III behöver utvecklingsarbete ske inom området för avfallsbehållare och avfallstransportbehållare för det låg- och medelaktiva avfallet.

6.5.1 Avfallsbehållare för avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB

Utifrån acceptanskriterierna behöver tekniska frågor lösas kring hur avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB, SNAB, ska behandlas och förpackas för att uppfylla acceptanskriterierna. Detta kan exempelvis innefatta utveckling av nya typer av behållare.

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 driver en förstudie fram till 2017 för att inventera olika metoder att återta, karakterisera, behandla och konditionera låg- och medelaktivt avfall. Syftet med förstudien är att se över möjligheterna att konstruera och bygga en anläggning för att hantera och konditionera AB SVAFO:s avfall inför deponering i slutförvar. Vid en sådan anläggning skulle avfallet kunna konditioneras till önskad behållare. Om AB SVAFO väljer att behandla och konditionera sitt avfall, kommer behovet av nya avfallsbehållare som ”overpack” möjligen att förändras.

Program

Under senare delen av Fud-perioden kan det bli aktuellt att fortsätta utvecklingen av behållare utifrån preliminära acceptanskriterier för avfallet.

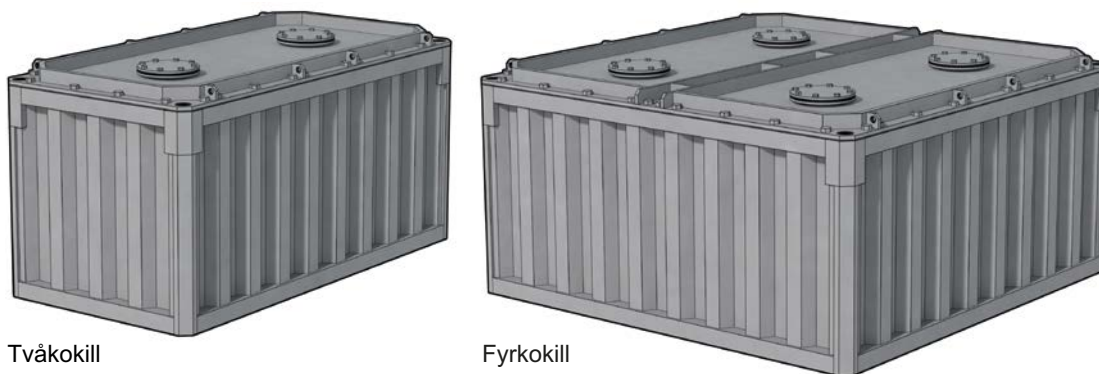
6.5.2 Avfallsbehållare för rivningsavfall

Nuläge

Under 2014 genomfördes ett beredningsarbete där behov och begränsningar belystes för att realisera användandet av fyrkokillen som ett avfallsemballage vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. Utifrån beredningsarbetet beslutade SKB att ta fram konstruktionsunderlag för fyrkokill och även utveckla tvåkokill, se figur 6-1, samt därtill modifiera avfallstransportbehållare. Dimensionerna för fyrkokill respektive tvåkokill motsvarar fyra respektive två plåtkokiller. Plåtkokiller är en typ av avfallsbehållare som används för kortlivat medelaktivt avfall. Arbetet utfördes under 2015 och ger tydligare förutsättningar för kärnkraftverkens utvecklingsplanering samt teknikutvecklingen för utbyggnaden av SFR.

Program

SKB har tillsammans med kärnkraftsföretagen beslutat att det är motiverat att stegvis fortsätta utveckla avfallsbehållarna fyrkokill och tvåkokill för att möjliggöra en effektivare hantering. För att kunna realisera och tillverka behållarna behöver tillverkningsunderlag tas fram och detaljeringsgraden utvecklas inom vissa områden vilket har visat sig nödvändigt i det tidigare arbetet.



Tvåkokill

Fyrkokill

Figur 6-1. Illustration av de två framtida avfallsbehållarna tvåkokill och fyrkokill.

Områden som bland annat behöver utvecklas är behållarnas begränsningar i vikt. Exempelvis skulle en tvåkokill som får väga 20 ton, i stället för hittills antagna 10 ton, medföra att behållarens kapacitet utnyttjas mer effektivt. Vidare behöver även hanteringen för att lyfta behållaren ses över. Ett annat viktigt krav är att behållaren samverkar med kassunerna i 2BMA för att kunna stå emot vattentrycket efter förslutning.

Under de kommande åren kommer SKB bedriva arbetet tillsammans med kärnkraftsföretagen så att underlagen kan användas för upphandling och tillverkning av behållare. Möjlighet finns då till gemensamma upphandlingar beroende på kärnkraftsföretagens behov.

6.5.3 Avfallstransportbehållare för nya avfallsbehållare

Avfallstransportbehållare för långlivat avfall syftar till att möjliggöra säker och effektiv transport av långlivat avfall från kraftverken, SNAB och andra mellanlager till nya mellanlager eller SFL. Behovet av avfallstransportbehållare styrs av val av avfallsbehållare och kapacitetsbehovet. Avfallsbehållare är i sin tur beroende av acceptanskriterier för avfallet.

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 avfallsbehållare. Om nya avfallsbehållare utvecklas kommer även motsvarande transportbehållare att behöva utvecklas. I avvaktan på preliminära acceptanskriterier för det långlivade avfallet bedrivs inget utvecklingsarbete av nya avfallstransportbehållare.

6.6 Nedbrytningsprodukter från organiskt material och dess interaktioner med radionuklider

I SFR är sorptionen av radionuklider på cementmineral en av de viktigaste processerna som fördröjer utsläppet av radionuklider från förvaret. Avfallet innehåller en viss mängd organiskt material vars nedbrytningsprodukter kan interagera med radionuklider på samma sätt som komplexbildare. Dessa ämnen påverkar graden av sorption av radionuklider samt kan binda radionuklider som annars är löslighetsbegränsade och därmed påverka tillgängligheten av radionuklider. Tillsatsmedel i cement kan eventuellt brytas ned till organiska föreningar som också kan påverka sorptionen av radionuklider. Tre program planeras för att öka kunskapen inom detta område.

6.6.1 Nedbrytningsprodukter från cellulosa

Nuläge

Organiskt material förekommer i olika avfallstyper i SFR. En stor andel 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 presenterad i studien för att uppskatta koncentrationen av ISA i SFR (Keith-Roach et al. 2014).

ISA kan fungera som ligand och bilda lösliga metallorganiska komplex med flertalet radionuklider. ISA kan också sorbera på cementmineral och därmed minska tillgängligheten för komplexbildning med radionuklider (Ochs et al. 2014). För systemet cement-plutonium-ISA finns få och ej tillförlitliga data över hur närvaron av ISA i olika koncentrationer påverkar plutoniets förmåga att sorbera till cementmineral. Hittills har den sorptionsreduktionsfaktor som tillskrivits plutonium i närvaro av varierande koncentrationer av ISA varit osäker och SKB har i SR-PSU valt en konservativ sorptionsreduktionsfaktor för plutonium(III)/plutonium(IV). SKB startade under 2014 en studie för att fördjupa kunskapen om detta system.

Program

Experimentella studier och modellering av resultaten pågår med syftet att fördjupa kunskapen om systemet cement-plutonium(III)/plutonium(IV)-ISA. Den pågående studien kommer sannolikt att leda till att nya, mindre osäkra, sorptionsreduktionsfaktorer för plutonium kan implementeras i framtida säkerhetsanalyser för SFR och SFL.

6.6.2 Nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedel

Nuläge

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 lösliga 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 förvarslika 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.

Program

Ytterligare studier av filterhjälpmedel planeras i ett projekt benämnt Cori (Cement Organics Radionuclide Interaction) genom teknikplattformen IGD-TP för förstärkt europeiskt samarbete kring slutförvarsfrågor. SKB deltar i förberedelserna inför ansökan.

6.6.3 Nedbrytningsprodukter från cementtillsatsmedel

Nuläge

I SFR-utbyggnaden kommer stora mängder betong att användas som konstruktionsmaterial. För att erhålla en högkvalitativ betong med lämpliga egenskaper kommer betongtillsatsmedel såsom flytmedel 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 (høgt pH, lågt Eh), och bilda lösliga organiska föreningar vilka kan påverka sorptionen och/eller lösligheten av radionuklider. Innan byggstart av SFR-utbyggnaden är det därför viktigt att SKB har skaffat sig en förståelse av effekten av dessa organiska polymerer så att SKB kan kravställa vilka tillsatsmedel som betongentreprenörer tillåts använda i betongen för att undvika eventuell påverkan av de säkerhetsfunktioner som gäller för förvaret efter förslutning.

Program

Under 2016 startar SKB ett samarbete med KTH där nedbrytningen av en föreslagen tillsatsmedel-familj (polykarboxylatbaserade superplasticerare) ska studeras. Studien syftar till att ta reda på om och i sådana fall hur fort den ingående polymeren bryts ned och vilken/vilka produkter som bildas. Eventuella nedbrytningsprodukters påverkan på sorptionen kommer att studeras.

6.7 Korrosion av aluminium och zink

Anaerob korrosion av aluminium och zink i avfall som deponeras i SFR kan under kort tid orsaka stora mängder vätgas. Under förutsättningen att denna gas inte kan ledas ut ur de betongkonstruktioner som omsluter avfallet på ett kontrollerat sätt kan ett för betongkonstruktionerna skadligt övertryck uppkomma. Den hastighet med vilken vätgas bildas avgörs av hur snabbt metallerna korroderar i slutförvarsmiljön. Det är därför viktigt att förstå korrosionsprocesserna för zink och aluminium för att kunna ansätta realistiska korrosionshastigheter i analysen av säkerhet efter förslutning av SFR dels för att kunna utvärdera potentiella skademekanismer i betongkonstruktionerna, dels för att kunna dimensionera de gasavledande systemen.

Nuläge

SKB har antagit en pessimistisk korrosionshastighet för zink och aluminium på 1 mm/år. Detta, tillsammans med antagandena att all aluminium och zink utgörs av fem millimeter tjocka plåtar vilka korroderar från två sidor samt att korrosionen startar omedelbart efter förslutning (SKB 2015b), resulterar i att allt avfall bestående av aluminium och zink kommer att korrodera under de första två och ett halvt åren efter förslutning. Vätgasutveckling från korrosion av zink och aluminium i förvaret blir med dessa antaganden kortvarig och intensiv.

Experimentet Concrete and Clay, som bedrivs i Äspölaboratoriet (Mårtensson 2015), har resulterat i data som ger ett bättre underlag för beskrivning av korrosionen av aluminium och zink i slutförvarsmiljön. Projektet startade 2010, och även om det huvudsakliga syftet är att kvalitativt skapa en förståelse för hur nedbrytningsprodukter sprids i en cementmatris och i vilken omfattning nya mineral bildas i dessa processer, har det även gett ny information om det metalliska avfallets nedbrytningshastighet.

Under 2015 har prover innehållande aluminium och zink återtagits och analyserats (Kalinowski 2015). Studien visade att korrosionen av aluminium och zink under de fem år som avlöpt sedan experimentet installerades var mycket låga, uppskattningsvis 50 µm/år, vilket ska jämföras med tidigare antaganden på 1 mm/år. Det är även möjligt att en stor andel av den observerade korrosionen skett i samband med tillverkningen av proverna genom en reaktion med den blöta betongen, varför den långsiktiga korrosionshastigheten möjligen är lägre än det beräknade medelvärdet under de fem åren.

Program

SKB har tillsammans med forskare på KTH påbörjat en studie av korrosion av aluminium och zink i betong exponerad för syrgasfritt grundvatten. Under projektet kommer prover fortlöpande att återtas och analyseras efter olika exponeringstider, korrosionsprodukter kommer att karakteriseras spektroskopiskt och korrosionshastigheter kommer att bestämmas med gravimetrisk analys. Studien, som beräknas pågå under åtminstone två år, förväntas ge en fördjupad förståelse för hur vätgasdrivande korrosion av aluminium och zink sker över tid i förvarsmiljön. Tidpunkten för projektets avslutande kommer att avgöras vartefter kunskapen om korrosionsprocessen ökar.

6.8 Mikrobiell gasproduktion

Nuläge

En process som potentiellt kan orsaka gasbildning är metanbildning genom mikrobiell nedbrytning av organiskt material såsom cellulosa. Genom att tillse ogynnsamma förhållanden i SFR för mikrobiell nedbrytning, kan den eventuella gasbildningen begränsas. I SR-PSU formuleras krav på högt pH i förvaret, ett av syftena med högt pH är just att begränsa mikrobiell aktivitet.

Program

Ytterligare studier kommer att öka förståelsen och förutsäga framtida pH-utveckling i olika delar av förvaret och också hur olika pH-förhållanden kommer att påverka gasbildning genom metanbildning.

Inom EU-projektet Mind, där SKB finns representerat, behandlas frågeställningar som belystes i SR-PSU vilka kommer att utredas inför PSAR. Inom projektet kommer till exempel experimentella studier av pH-utveckling och hur detta påverkar utveckling av metangas samt modellering av

mikrobiella processer som är relevanta för låg- och medelaktivt avfall att göras. De publika rapporter som har producerats och kommer att levereras av projektet MIND finns listade på projektets webbplats, www.mind15.eu. Projektet kommer att avslutas 2019 med en syntes av den forskning som bedrivits avseende biologisk nedbryning av avfall och avfallsformer. Kunskapen kring mängden metangas som potentiellt kan bildas behövs för att öka kunskapsnivån när det gäller gastransport och upptagsprocesser av gas i ytsystemet, se avsnitt 12.1.

6.9 Svällande avfall – bitumeningjuten jonbytarmassa

Svällande avfall kan påverka betongbarriärens integritet och därmed påverka uttransporten av radionuklider från SFR. Det är därför viktigt att veta om och hur stort svälltrycket från avfallet kan bli.

Nuläge

Svällande avfall har studerats främst under 1980- och 1990-talen. Resultaten från dessa studier har använts för att modellera effekterna av svällande avfall på betongbarriärerna för silon och IBMA (von Schenck och Bultmark 2014). SKB har efter denna modellering utfört svällningsförsök på torkad jonbytarmassa för att förbättra antagandena om de svälltryck som kan tänkas uppstå i avfallstyperna F.17 och F.18 (Andersson et al. 2014). Resultaten visar att svälltrycket inte kommer att påverka plåtkokillens integritet.

Program

Svällningen av torkade jonbytarmassor av den typ som används vid FKA har studerats av Andersson et al. (2014). I denna studie användes inte bitumen som injutningsmaterial, vilket är fallet för det avfall innehållande jonbytarmassa från FKA som slutförvaras i SFR. Experiment planeras vid Äspö-laboratoriet där den eventuella svällningen av en bitumeningjuten jonbytarmassa kommer att studeras. I dessa experiment kommer också lakningshastigheten av anjoner och katjoner från en bitumeniserad avfallsform att undersökas. SKB har gjort ett konservativt antagande att alla radionuklider injutna i bitumen är tillgängliga för uttransport så fort förvaret återmättats med vatten eftersom data över lakningshastigheter från en sådan avfallsform saknas i litteraturen. Experimenten syftar därmed också till att minska pessimismen i PSAR inför utbyggnaden av SFR.

7 Det använda kärnbränslet

Det använda kärnbränslet är långlivat. Det utgör en mindre del av den totala mängden avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle är högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. 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. Resteffektens storlek beror på hur länge bränslet avklingat och på dess utbränning, det vill säga 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. Kärnkraftsföretagen har i dag planer på att öka utbränningen ytterligare.

I planeringen är det viktigt att klargöra konsekvenserna av en högre utbränning för KBS-3-systemets alla delar. Enligt planeringsförutsättningarna (se avsnitt 1.1.4) kommer den totala mängden använt kärnbränsle som ska slutförvaras att omfatta cirka 6 000 kapslar. 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 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 upparbetning där uran, plutonium och avfallsprodukter separeras.

SKB godkänner i dag nya bränsletyper som införs vid de svenska kärnkraftverken. I denna verifieringsprocess ingår samtliga delar av SKB:s verksamhet som har bäring på bränsle, såsom transportsystem, mellanlager, inkapslingsanläggning och slutförvarsanläggning. Bränsletypernas kompatibilitet med KBS-3-systemet verifieras.

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. Under denna Fud-period kommer utvecklingsarbete att genomföras avseende resteffektsbestämning och kriticitetsverifieringar för samtliga anläggningar och transporter som ingår i KBS-3-systemet. 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 om och när det kan frigöras radioaktiva ämnen. Resultat från säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011b, avsnitt 13.5.11) visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar har avgörande betydelse för Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för mekanismen för upplösning av bränslematrisen krävs för att stödja de experimentella resultaten och därmed reducera osäkerheterna i kommande säkerhetsanalyser, vilket också uttalas av SSM både inom ramen för tillståndsprövningen och granskningen av Fud-program 2013. Det återstår också vissa osäkerheter angående speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider. Forskningsprogrammet för bränsleupplösning och radionuklidkemi beskrivs i avsnitt 7.7.

7.1 Icke-reguljära bränslen

SKB har beslutat att icke-reguljärt bränsle analyseras och behandlas separat från reguljärt bränsle. Som icke-reguljärt bränsle avses bland annat bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik, Mox-bränsle samt skadat bränsle. Icke-reguljära bränslen hanteras i en eller flera separata processer där speciallösningar tas fram, analyseras och genomförs.

Nuläge

Att hantera och tömma de svenska kärnkraftverken på skadat bränsle har påbörjats i ett särskilt projekt. En del av det skadade bränslet har behandlats med en särskild metod, den så kallade Studsvik-metoden, och kommer att föras över till en form som inte kräver vidare behandling före slutförvaring. Metoden går ut på att föra de skadade bränslestavarna till en hot-cell, där stavarna sågas upp i enmeterslängder, torkas enligt internationellt protokoll och därefter kapslas in i speciella hylsor, som är gas- och vattentäta. Även andra metoder, med samma kvalitativa slutresultat, kommer att användas inom projektet.

Program

När kärnkraftverken är tömda på skadat bränsle, ska motsvarande behandling ske av det skadade obehandlade bränslet på Clab. Detaljerad plan för detta är planerad att upprättas för den senare delen av Fud-perioden (2019–2022). Parallellt sker arbete att tillsammans med kärntekniska aktörer utveckla metoder som rationellt kan hantera de mindre mängder skadat bränsle som tros bli producerat efter att verken tömts på befintligt skadat bränsle.

7.2 Åldring av bränsle

Vid Clab inspekteras ett antal individuella bränslen kontinuerligt för att följa förändringar i bränslenas egenskaper under mellanlagring. Åldring av bränsle har även betydelse för inkapslingsanläggningen då hanteringen av bränslena i Clink måste kunna ske på ett planerat sätt. Därför följs utvecklingen för bränslen i Clab och rön från internationell forskning. Då bränslen i Clab hanteras i vattenfyllda bas-sänger är inspektion av bränslena förhållandevis enkel, till skillnad från torrlagring i kapslar där sådan inspektion inte är möjlig på ett enkelt och kontinuerligt sätt.

Nuläge

Brister som har hanterats som följd av åldringshanteringsanalysen är:

- Mottagningskontroll av kärnbränsle.
- Långsiktigt inspektionsprogram för kärnbränsle.
- Automatisering av bränsleinspektion.

Mottagningskontrollen utförs för att säkerställa att bränslet som kommer in i anläggningen är i hanterbart skick. Eventuella hinder för hantering ska föras in i bränsledatabasen.

Ett långsiktigt inspektionsprogram har tagits fram för att styra vilka bränslen som bör följas upp ytterligare. Ett brett urval av bränsletyper har valts. Om oväntade resultat fås vid inspektionerna hanteras detta med åldringsprogrammets metodik.

För att minska risken för hanteringsmissöden i samband med inspektion automatiseras bränsleinspektionen. Det som automatiseras är vilken sekvens som hanteringsmaskinen använder sig av.

Program

Omvärldsbevakning utförs för att hålla sig uppdaterad med de senaste rönen avseende degradering (åldring) av kärnbränsle i bassängmiljö. Detta omfattar forskningsresultat i ämnet samt besök vid och erfarenhetsutbyte med liknande anläggningar. SKB deltar i olika internationella forum där åldringsfrågor berörs, exempelvis IAEA. SKB har gått med i OECD/NEA-projektet Scip III (Studsvik Cladding Integrity Project) och avser att delta aktivt i detta under perioden. SKB tar del av information om olika händelser där missöden skett med bränslen runt om i världen.

7.3 Resteffekt och bränslemätning

Vid deponering behöver ett antal bränsleparametrar vara kända. Resteffekt och kriticitet (neutronmultiplicitet) är fundamentala då de är begränsade av säkerhetsanalysen. Radionuklidinventariet behöver vara känt såväl för analysen av säkerhet efter förslutning som för kärnämneskontrollen. För kärnämneskontrollen behövs också information om bränslets identitet och om borttagna stavar.

Nuläge

SKB driver ett omfattande program för att utveckla tekniker för att bestämma bränslets egenskaper med tillräcklig noggrannhet. Detta görs i breda internationella samarbeten med deltagare från länder i Europa och Asien samt USA. Grunden är att utnyttja både oförstörande och förstörande tekniker med syfte att förstå bränslet tillräckligt, utveckla lämpliga mätmetoder och koder för bestämningen, samt testa dessa på använt kärnbränsle (förstörande tekniker används endast för att bygga upp kunskap om bränsle och oberoende förankra uppnådda resultat med oförstörande mätningar; avsikten är att endast använda oförstörande tekniker i inkapslingsanläggningen). Arbetet syftar ytterst till att ta fram ett mätsystem som kan klara kraven för att karakterisera bränsle som ska kapslas in i inkapslingsanläggningen. Kraven på ett sådant system beror dock på hur mycket annan kunskap som finns om det använda bränslet, till exempel drifhistorik, vilket också utreds, se avsnitt 7.4.

För att säkerställa att mätsystem utvecklas som kan hantera olika kravsituationer har ett antal mål satts upp för systemen. Målen innebär att mätsystemet ska vara permanent, komplett (mäta alla bränsleelement) och robust. Det ska även ge entydiga resultat, ha låg osäkerhet, och en hög genomströmningskapacitet. Komplexitet i mätsystemets uppbyggnad och analys av dess signal är i princip acceptabel så länge bestämningen ger entydiga resultat och systemet har hög genomströmningskapacitet.

Detta skiljer sig på väsentliga sätt från befintliga mättekniker som ofta är framtagna för kärnämneskontrolländamål. Dessa är typiskt mobila, utför provtagning (icke-komplett), är utvecklade för användning i fält och har låg genomströmningskapacitet.

Därför krävs utveckling av instrument och metoder. Tanken är att ett kombinerat mätsystem ska användas för att verifiera bränslets egenskaper, och en kalorimeter finnas för att förankra bestämmelserna framför allt (men inte endast) av resteffekt. Dessutom sker samarbeten med dem som står bakom koder för ändamålet för att utveckla och uppdatera dessa, såsom Scale (Origen) från Oak Ridge National Laboratory.

SKB har sedan Fud-program 2013 genomfört mätningar på 50 bränsleelement som finns i Clab (25 PWR- och 25 BWR-bränslen, vilka går under benämningen SKB-50), inom ramen för ett brett internationellt samarbete, där amerikanska Department of Energy (genom bland annat Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory och Lawrence Livermore National Laboratory) och Euratom utgör stommen. I samarbetet har även funnits deltagare från Japan, Sydkorea och Belgien samt Sverige, bland annat genom Uppsala universitet. Bland annat har samtliga 50 bränsleelement uppmätts med gammasppektroskopiska metoder och en del med kalorimetri och neutrondetektionsmetoder. I Favalli et al. (2016) har bestämning av utbränning, initial anrikning och avklingningstid baserat på gammamätningar genomförts och utvecklats för SKB-50.

Program

Under denna Fud-period avslutas mätningarna med samtliga planerade mätmetoder på de 50 bränsleelementen. En rad nyutvecklade tekniker kommer att testas på en del av bränslena i Clab. Samtidigt analyseras data med syftet att uppnå ovanstående mål.

7.4 Bränsleinformation

Nuläge

Då KBS-3-systemet driftsätts behövs en databas med värden på alla de bränsleegenskaper som är viktiga för bränslets hantering och för säkerhetsredovisningen. Som ett första steg i detta arbete genomför SKB ett projekt rörande bränsleinformation som syftar till att klargöra vilken bränsleinformation som behövs för Clab, Clink, transportsystemet samt Kärnbränsleförverkets drift, säkerhetsredovisning och projektering. Projektet omfattar även en nulägesanalys i syfte att identifiera och dokumentera befintlig bränsleinformation och var denna lagras.

Program

De kommande åren ska fortsatta utredningar göras om hur information om det använda kärnbränslet bäst ska hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.

En viktig uppgift för SKB och kärnkraftverken under de närmaste tre åren blir att ta fram en plan för att säkerställa att den bränsleinformation som behövs inför hantering och slutförvaring i KBS-3-systemet inte går förlorad. Detta är speciellt viktigt vid framtida avveckling av kärntekniska anläggningar.

7.5 Kriticitet

SKB:s program avseende fördjupad och breddad kriticitetsanalys har som övergripande mål att kriticitetsanalyser för alla SKB:s nuvarande och framtida anläggningar ska vara gjorda efter samma metodik för utbränningskreditering och BA-kreditering (BA, brännbara absorbatörer). I ansökningarna för Clink och Kärnbränsleförvaret har den minskning av reaktiviteten som sker då bränslet bestrålas i reaktorn och utbränningen ökar tillgodoräknats i kriticitetsanalyserna, så kallad utbränningskreditering. För Clab tillgodoräknas i dag inte utbränningskreditering vare sig för PWR eller BWR, men för BWR tillämpas BA-kreditering. Detta innebär att hänsyn tas till att allt färskt BWR-bränsle innehåller ett reaktivitetssänkande ämne (BA), främst gadolinium-155. BA-insatsen medför att bränslet har lägre reaktivitet under den första delen av sin utbränning, när det annars skulle vara som mest reaktivt. Då bränslet har stått ett par år i reaktorn kommer BA att ha bränts ut och BA-bränslet kommer ha i stort sett samma reaktivitet som ett lika anriktat bränsle utan BA. Utvecklingen av metodiken och valideringen av beräkningsprogram ska vara i enlighet med moderna internationellt accepterade standarder och krav.

Dessutom ska SKB säkerställa att kompetens avseende kriticitetsfrågor finns.

Nuläge

Under förra perioden genomfördes en implementering av den metod som SKB har använt för utbränningskreditering i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret och som följer en metod som utvecklats av Oak Ridge National Laboratory i USA.

Mer detaljerat har följande gjorts:

- Validering av de beräkningsverktyg som SKB använder för kriticitetsanalys.
- Beskrivning av den metodik och de principer som SKB använder sig av för utbränningskreditering.
- Uppdatering av kriticitetsanalysen för inkapslingsdelen av Clink.
- Uppdatering av kriticitetsanalysen för Kärnbränsleförvaret.
- Säkring av att den kompetens och de verktyg som behövs för att göra kriticitetsanalyser för Clab, Clink och Kärnbränsleförvaret finns tillgängliga inom Vattenfallkoncernen.
- Uppdatering av kriticitetsanalyserna för Clab med moderna beräkningsverktyg och för de bränsletyper som i dag är mest reaktiva.

Program

Viktigast utveckling för denna Fud-period är:

- Industrialisering av den utveckling som skett under föregående period. Det vill säga att utveckla gemensam datormiljö med Vattenfall Nuclear Fuel (VNF), fastlägga rutiner för verifikationsrapporter, bestämma filstrukturer och namnkonventioner, effektivisera rutiner och tillse att de möter utökade krav som följd av utbränningskreditering.
- Uppdatering och validering av ny version av datorkoden Scale.
- Säkerställande att krav som ställs utifrån kriticitetsanalysen, exempelvis rörande håligheter i insatsen, kan verifieras av slutförvarssystemets kontrollsystem.
- Utarbetning av strategi för att ta hand om de bränsleknippen som inte möter kapselns utbränningskrav.
- Fortsättning av arbetet med konsekvenser av geometriförändring inuti kapseln på lång sikt.
- Fortsättning av dialog med SSM kring acceptanskrav för säkerhet mot kriticitet.

7.6 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll syftar till att myndigheter och kontrollorgan ska kunna förvissa sig om att kärnämne inte avleds. SKB:s anläggningar ska uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan. Det innebär att det ska finnas ett administrativt system för redovisning av kärnämne och var det finns placerat, samt tekniska system för kontroll och bevakning av att det inte avleds.

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.

För nya kärntekniska anläggningar ska kontrollen av kärnämne beaktas redan i konstruktionsskedet så att tillsyn och kontroll underlättas. En viktig komponent i systemet för kontroll av kärnämne i Kärnbränsleförvaret är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med godkända ritningar. Detta görs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har angivits och att det inte förekommer utrymmen där man bedriver annan verksamhet än den som angivits.

Moment för kontroll

Det använda bränslets innehåll av kärnämne beror av anrikning, utbränning och avklingningstid. Innehållet kan beräknas antingen utifrån information om bränslets drifhistorik eller utifrån mätningar av gamma- och neutronstrålning i kombination med kalorimetriska mätningar. De metoder som finns tillgängliga kan ge tillräckligt noggrann information om hur mycket kärnämne bränslet innehåller för att tillfredsställa kravet på kärnämneskontroll. För att säkerställa innehållet av kärnämne i varje kapsel kommer bränslet efter att det genomgått mätningar i inkapslingsanläggningens verifieringsposition att placeras så att det inte kan förväxlas med overifierat bränsle. Efter hantering, torkning och placering av bränslet i kapseln 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, även kallat ”rebatching”, 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 förses med sigill och annan utrustning för att säkerställa att kapseln som tas emot i Kärnbränsleförvaret är opåverkad och att inget kärnämne är avlett. Det är alltså väsentligt att det ständigt finns kontinuerlig vetskap om kärnämnets innehåll och dess position (Continuity of Knowledge CoK). Detta säkerställs bland annat genom användning av sigill (mekaniska och elektroniska).

I Kärnbränsleförvaret kontrolleras sigill. I anläggningens mottagningsstation verifieras att kapselidentiteten är överensstämmande med avsänd kapselidentitet i samband med omlastning till deponeringsmaskinen. Slutförvarets olika öppningar är övervakade så att inget kärnämne ska kunna avledas.

Nuläge

SKB har initierat och påbörjat ett arbete för att tillsammans med SSM, Europeiska kommissionen/Euratom och IAEA införa kärnämneskontroll i utformningen av inkapslingsanläggningen. Det har i detta arbete identifierats två huvudområden för behov av teknikutveckling: Verifiering av bränslet och verifiering av kapseln. SKB har beslutat att genomföra mätningar av resteffekt och bränsleverifiering, och ett samarbete med Europeiska kommissionen/Euratom, Department of Energy (DoE) med flera har inletts och delvis genomförts för att utreda huruvida en gemensam mätning för verifiering av bränsle kan genomföras.

Program

Det finns behov av utredningar för kapselverifiering och arbete pågår internationellt inom detta område. SKB har initierat ett arbete där Europeiska kommissionens Joint Research Centre, JRC, i Ispra nu försöker utveckla en teknik att identitetsmärka kapseln på insidan så att den ska kunna

identifieras från utsidan med hjälp av ultraljud. Kravet är att märkningen ska ha minimal påverkan på kapselns integritet, den ska vara autentisk, det vill säga ej möjlig att ändra, bestående samt unik.

I samarbetet med JRC Ispra ska även sigillanvändningen för kapseltransport utvecklas så att hantering, kontroll och verifiering av sigillen ska kunna ske på ett säkert, effektivt och tillförlitligt sätt.

Kraven på kärnämneskontroll för de olika momenten i hantering av använt bränsle och förslutna kapslar är övergripande och omfattande. De övergripande kraven kommer från IAEA som sätter ramarna. Europeiska kommissionen/Euratom ställer också krav på kärnämneskontrollen enligt det fördrag som Sverige skrivit på. Detta innebär att det är viktigt att SKB:s utveckling av metoder och utrustning för hantering, verifiering och logistik sker i samarbete med IAEA och Europeiska kommissionen/Euratom. Ett steg i detta samarbete är framtagningen av Draft BTC (Base Technical Characteristics). De första versionerna av Draft BTC för inkapslingsanläggningen och för slutförvarsanläggningen är inlämnade till Europeiska kommissionen/Euratom för kommentarer. Uppdateringarna och utveckling av Draft BTC sker under lång tid framåt och fastställs först inför provdrift.

Metodik och verifiering för kärnämneskontroll planeras för denna Fud-period och kommer att koordineras bland annat med det ovan nämnda resteffektsprojektet.

7.7 Bränsleupplösning och radionuklidkemi

Detta avsnitt beskriver forskningsprogrammet för bränsleupplösning i slutförvarsmiljö. 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.

7.7.1 Bränsleupplösning

För att öka förståelse 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 har lakningsexperiment med använt bränsle utförts. Resultaten av dessa beskrivs nedan.

Korrosion av de metalldelar, det vill säga konstruktionsmaterial och PWR-styrstavar, som ska deponeras tillsammans med bränslet i kopparkapseln, frigör aktiveringsprodukter. Eftersom korrosion av styrstavar i scenarier med tidigt kapselbrott har visat sig ge ett icke-försumbart bidrag till den radiologiska risken i säkerhetsanalysen, har även en studie för att undersöka korrosion av styrstavar genomförts.

Nuläge

För att öka förståelsen för de processer som sker under bränsleupplösning utförs ofta experiment med syntetiserad urandioxid med tillsatser av grundämnen liknande fissionsprodukter; detta material kallas Simfuel. Fissionsprodukterna, som finns i använt bränsle, påverkar urandioxidens kemiska egenskaper och dess benägenhet att oxideras. Exakt hur, och hur mycket, de påverkar behöver fortsatt undersökas. Därför har studier som syftar till att undersöka skillnaden mellan Simfuel och urandioxid (UO_2) utförts, vilka har visat att Simfuel har en lägre redox-reaktivitet än UO_2 (Sundin et al. 2013, Lousada et al. 2013a). Den viktigaste oxidanten i slutförvarsmiljö förväntas vara radiolytiskt producerad väteperoxid (H_2O_2). Studien har visat att H_2O_2 till viss del sönderdelas katalytiskt på den fasta urandioxidytan och att detta sker mycket effektivare på Simfuel jämfört med ren UO_2 . Därmed är ren UO_2 mer benägen att oxideras av H_2O_2 än Simfuel (Lousada et al. 2013a). Vidare studier med olika typer av metalloxydytor har visat att mekanismen för katalytisk sönderdelning av H_2O_2 sker

genom bildning av OH-radikaler (hydroxylradikaler). Olika oxider visar olika beteende beroende på typ av metalljon, vilket också har effekt på de kinetiska parametrarna för sönderdelning av H₂O₂ (Lousada et al. 2013b).

Katalytisk sönderdelning av H₂O₂ på ytan av använt bränsle är en process som troligtvis kan minska den oxidativa effekten av radiolys i slutförvarsmiljön. I en strävan att ytterligare förstå och beskriva den mekanism som ligger bakom sönderdelningen av H₂O₂ på ytan av Simfuel, har studier utförts som ska belysa de olika stegen i denna process. Ett viktigt steg relaterar till reaktioner som involverar ytbundna OH-radikaler. De ytbundna OH-radikalerna som bildas som ett mellansteg då H₂O₂ sönderdelas katalytiskt på metalloxidytter kan detekteras med en metod som beskrivs av Yang och Jonsson (2014). Med hjälp av denna metod har en övergripande reaktionsmekanism och en kinetisk modell tagits fram som beskriver katalytisk sönderdelning av H₂O₂ på ZrO₂ (zirkoniumdioxid) (Yang och Jonsson 2015). Ytterligare insikt om mekanismen har framkommit genom en kombination av experiment och beräkningar, vilka visar att ZrO₂-ytan katalyserar produktionen av H₂O₂ från vätgas (H₂) och syrgas (O₂) löst i vatten. Detta återföljs av en sönderdelning av H₂O₂ till OH-radikaler på ZrO₂-ytan (Barreiro Fidalgo et al. 2016).

Bränsleytans reaktivitet och katalytiska egenskaper kopplar till ytans struktur och elektrokemi. Resultat från Ramanspektroskopi och XPS (X-ray photoelectron Spectroscopy) av yttrium- och palladium-dopade urandioxid-elektroder har visat existensen av olika kristallografiska domäner. Studierna indikerar anodisk oxidation av icke-stökiometriska domäner i dessa material, vilka är mer elektrokemiskt reaktiva än Simfuel i lösningar med H₂O₂. Dessa mer reaktiva domäner förväntas förekomma huvudsakligen vid korngränserna i använt bränsle (Razdan et al. 2014).

Frågan om hur gammal UO₂ påverkas av alfa-radiolys från UO₂-ytan har belysts genom en granskning av existerande information om uranmalmen i Cigar Lake. I den 1,3 miljarder år gamla uranmalmen återfinns fortfarande uran främst i reducerad form som uraninit. Detta tyder på att inga yttre oxidanter nådde malmen genom den omgivande leran och att de radiolytiska oxidanterna inte har orsakat någon genomgripande oxidation. Med dagens kunskap om effekten av vätgas på oxidanter, kan man dra slutsatsen att oxidanterna troligtvis neutraliserades vid ytan av uraniniten genom en rekombination mellan radiolytiskt producerade reduktanter och oxidanter (Bruno och Spahiu 2014). Radiolytiskt producerade oxidanter kan också påverkas av omgivande material. Ett experiment utfört för att undersöka effekten av bentonit på oxidativ upplösning av UO₂ visar att bentoniten kan försena eller delvis hämma frisättningen av uran till miljön, främst på grund av att oxidanterna delvis förbrukas genom att reagera med bentoniten (Barreiro Fidalgo et al. 2014).

I EU-projektet Redupp genomfördes ett test med tre olika grundvatten med olika salthalt och olika urandioxid-prov. Resultaten från försöket med brackvatten visade, till skillnad mot tidigare resultat, en viss effekt av alfa-strålning (Ollila et al. 2013). Effekten av de tre olika grundvattnen uppvisar en viss variation, men de resulterar alla i en något förhöjd upplösningshastighet jämfört med tidigare experiment med syntetiska grundvatten, samt att samtliga visar att upplösning sker i samband med fällning och/eller sorption. Värt att notera är att de lägsta upplösningshastigheterna uppmättes för det saltaste grundvattnet, vilket indikerar att hög bromidhalt inte påverkar upplösningshastigheten negativt (Evens et al. 2014).

EU-projektet First Nuclides genomfördes med syftet att undersöka effekten av bestrålningshistorik och utbränning på fraktionen snabbt frigjorda nuklider. Resultaten visade att efter några månader avtog frigörelse-hastigheten av både jod och cesium. Vissa ämnen, såsom strontium, uran och teknetium, uppvisade en variation beroende på redoxförhållanden i experimenten (Kienzler och Lemmens 2015). Från det nya dataset som projektet tog fram kan man utläsa att linjär effekt påverkar fissionsgasfrigörelse, och därmed fraktionen snabbt frigjorda nuklider, mer än utbränning. Inom First Nuclides undersöktes effekten av olika tillsatser i bränslet samt effekten av varierande provpreparering. Resultaten var generellt som förväntat, med en fraktion av frigjord jod och cesium lägre än fissionsgasfrigörelsen. Det dopade bränslet (det vill säga med tillsatt krom och aluminium) uppvisade en lägre frigörelse av jod och cesium än standardbränslet (Roth et al. 2013, 2014, Roth 2015).

Studier med fokus på selen-79 utfördes också inom ramen för First Nuclides, och resultaten visar att endast en obetydlig del av selen-79-inventariet, (0,5 till 0,8 procent) frigörs efter ett års lakning. Resultat från både röntgenspektroskopi och termodynamik ger belägg för att en betydande del av selen-79 är tätt bundet till bränslematrisen, vilket kan förklara varför den snabbt frigjorda fraktionen är så pass låg (Curti et al. 2015).

Ett försök att undersöka upplösningen av högt utbränt standardbränsle utfördes i Studsvik med amerikanskt bränsle utbränt till cirka 75 MWd/kgU. Resultaten var svårtolkade, vilket troligtvis berodde på påverkan av kolloider. Den oönskade kolloidbildningen beror sannolikt på provpreparering, framför allt tormalningsproceduren. Därför har en ny studie påbörjats med ett svenskt högutbränt bränsle (65 MWd/kgU) där provet i stället består av icke tormalda fragment. Lakförsöket gjordes i närvaro av vätgas för att efterlikna miljön i en skadad kapsel. De första resultaten är i linje med de förväntade (Puranen et al. 2016).

De styrstavar som planeras att deponeras tillsammans med bränsle i Kärnbränsleförvaret innehåller en legering av silver, indium och kadmium. Hittills har det inte funnits några relevanta lakningsdata för detta material, vilket därför har behövt hanteras med en hög grad av pessimism i säkerhetsanalysen. Nu finns data tillgängliga från en lakningsstudie med både obestrålad och bestrålad styrstav. Den obestrålade staven lakades under både oxiderande och reducerande förhållanden, vilket tydligt påvisade effekten av oxidation på alla tre ingående metaller. Under initialt reducerande förhållanden syns ingen mätbar upplösning av silver, och trots den vattenradiolys som förekom i testet med bestrålad styrstav, indikerar resultaten att den inneboende strålningen hos legeringen inte är tillräcklig för att orsaka signifikant upplösning av silver från materialet (Roth et al. 2015).

Program

Mekanistiska studier som syftar till att öka vår förståelse för strålningsinducerad bränsleupplösning kommer att fortsätta i samarbete med KTH. De fortsatta studierna ska fokusera på de processer som sker vid bränsleytan. Dessa studier, som ska ske inom ramen av ett doktorandprojekt, förväntas belysa den påverkan fissionsprodukter i bränslet har på strålinducerad upplösning av använt bränsle. Vidare ska effekter av fastfasförändringar och matrissammansättning på kinetik och mekanism för strålningsinducerad upplösning av använt bränsle studeras inom ramen av ett doktorandprojekt. Framför allt ska urandioxid dopad med gadolinium, neodym och yttrium studeras, men även effekter av varierande kornstorlek kan ingå, för att belysa effekter av tillsatser och fissionsprodukter på urandioxidens reaktivitet.

Försök med använt bränsle kommer att fortgå i samarbete med Studsvik Nuclear AB. De närmaste åren planeras försök med högutbränt bränsle i autoklav, för att fastställa matrisupplösningshastighet under reducerande förhållanden. Dessutom planeras ett antal försök med bränsle i täta glasampuller. Dessa försök involverar också bränslets interaktion med järn och järnmineral, och de planeras pågå under flera år.

Under denna Fud-period kommer en ansökan om ett nytt EU-projekt att lämnas in, där forskningsprogrammet fokuserar på att studera effekterna av krom och aluminium och eventuellt andra tillsatser på matrisupplösningen. Dessutom planeras lakningsstudier av Mox-bränsle. Dessa studier ska kompletteras med försök med modellsystem, det vill säga syntetiska material vilka utformas och lakas i enlighet med projektets inriktning, samt med kopplade modelleringsstudier i åtanke. Slutligen planeras studier som ska adressera de frågor om den snabbt frigjorda fraktionen som inte kunde besvaras under First Nuclides.

7.7.2 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 förvarsmiljö. 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

I EU-projektet Skin undersöktes sorptions- och upptagsmekanismer för mycket låga koncentrationer av radionuklider i mineral. Sammanfattningsvis har projektet Skin utvecklat en vetenskaplig metodik för att kvantifiera graden av irreversibelt upptag av radionuklider i mineralfaser efter initial ytadsorption (Grambow et al. 2014).

Som en del av Skin-projektet studerades radium-barium-samfällning. Studier av hur koncentration av radium och barium i lösning förändras som funktion av reaktionstiden avslöjar att kinetiken för upptag av radium i baryt under omkristallisation är en komplex process. Övergripande termodynamisk jämvikt nåddes inte i dessa försök, men det är tydligt att de experimentella systemen närmar sig jämvikt. Omvandlingen av ren baryt till en termodynamiskt stabil fast lösning av radium-barium-sulfat behöver 2–3 år vid rumstemperatur. Resultaten visar att den fasta lösningen radium-barium-sulfat bör behandlas som ett termodynamiskt jämviktssystem i ett långsiktigt, geologiskt perspektiv (Brandt et al. 2015). Vidare studier av mekanismen för bildning av radium-barium-sulfat från baryt visar tydligt att radiumupptaget i alla studerade barytpartiklar inte är begränsat till ytan utan omfattar hela fasta fasen (Klinkenberg et al. 2014).

Inom EU-projektet Redupp studerades ytorna hos material med fluoritstruktur, det vill säga samma kristallstruktur som UO_2 och använt bränsle. Fokus för denna studie var att studera effekter av kristallytornas struktur på icke-oxidativ upplösning. Det framkom att den beräknade stabiliteten hos dessa ytor beror av ytstrukturen (Maldonado et al. 2013). En förlängning av detta arbete resulterade i en beskrivning av hur vatten sorberar och reagerar med en UO_2 -yta. Denna studie har åskådliggjort hydroxylering och modifiering av UO_2 -ytan vilken sker för en viss uppsättning ytor och för varierande tryck och temperatur (Maldonado et al. 2014).

För att öka vår förståelse av hur ytorna hos material med fluoritstruktur påverkar upplösningssprocessen, genomfördes, inom ramen för Redupp, lakningsexperiment med ceriumdioxid (CeO_2) och toriumdioxid (ThO_2) (Corkhill et al. 2014). Resultaten visar att ytornas reaktivitet varierar och, för polykristallina material, att det framför allt är korngränser som initialt bidrar till en ökad upplösningshastighet (Corkhill et al. 2014). Inom Redupp genomfördes också studier med fokus på löslighet av ThO_2 (Myllykylä et al. 2013). Lakningsexperiment med ThO_2 påvisar signifikant effekt av karbonathalt i lösningen samt effekt av pH. Högupplöst masspektrometri tillät mätning av mycket låga koncentrationer av torium i lösning, och resultaten är värdefulla för de termodynamiska databaser som används för löslighetsberäkningar. Analyser av de lakade ytorna indikerade att ytans initiala struktur, inklusive korngränser, har en viss effekt på upplösningen (Myllykylä et al. 2013).

Förbättring av data som ingår i de termodynamiska databaser som används för löslighetsberäkningar innebär fortsatt experimentellt arbete, för att ta fram fler och nya data. En sådan studie är genomförd av Zanonato et al. (2014), och syftar till att utöka data om uranyl-speciering. Effekten av temperatur på speciering i system med uran(VI)-hydroxid studerades vid 25 °C och 100 °C. Resultaten visar att en betydande ökning av hydrolys sker vid högre temperatur, men också att förändringar sker i de relativa mängderna av komplex med olika laddning. Mängden komplex med lägre laddning (+1, -1) ökar på bekostnad av de med högre laddning. Temperatur visas ha en viktig effekt på bildning av hydroxid-peroxid-komplex, vilka bildas vid 0 °C men inte förekommer vid 100 °C (Zanonato et al. 2014).

Program

Återstående frågor gällande radium-barium-samfällning ska fortsatt studeras i samarbete med det tyska forskningsinstitutet Forschungszentrum Jülich.

Möjligheten för bildning av det sekundära uranmineralet koffinit har diskuterats och studerats på olika håll under de senaste åren, och en sammanfattning och presentation av nya data ges av Guo et al. (2015). De nya publikationerna motiverar insatser inom detta område, och en studie om koffinitbildning har därför initierats i samarbete med Amphos 21. Detta arbete ska fortsätta under denna Fud-period. Inom ramen för denna studie ska ny information inkorporeras i databaser och löslighetsberäkningar, och sättas i sitt sammanhang.

Uranspeciering behöver fortsatt studeras med tanke på nya data som pekar på möjlig existens av kalcium-uranyl-karbonatkomplex. Detta är relevant även för övriga radionuklider. SKB kommer fortsätta att delta i arbetet med NEA-TDB (NEA/OECD Thermochemical Database), för att utveckla och förbättra de databaser som används för speciering och löslighetsberäkningar.

Delar av ett planerat EU-projekt kommer att beröra kemi i en skadad kapsel, med fokus på interaktion mellan det inkommande grundvattnet och den korroderande kapselinsatsen. Detta ska fylla kunskapsluckor och minska osäkerheter vad gäller radionuklidens speciering och löslighet i förvarsmiljö.

8 Kapsel

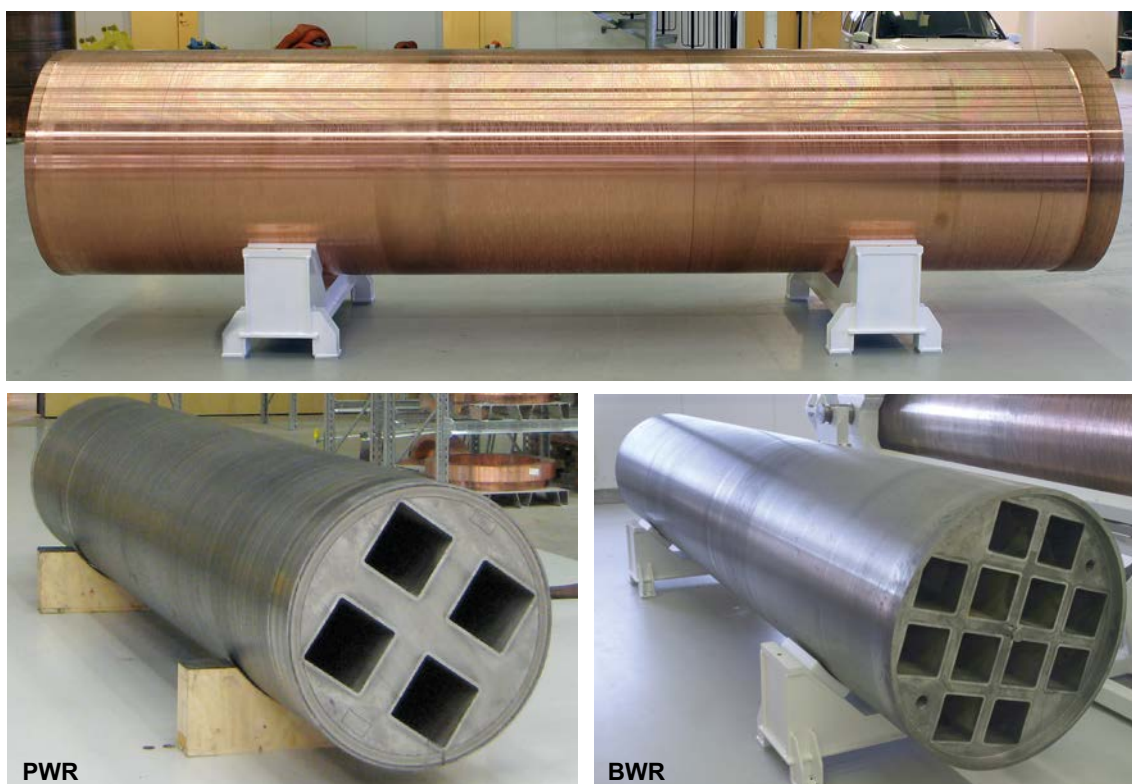
Kapseln har ett cylindriskt kopparhölje och en lastbärande insats av segjärn, se figur 8-1. I insatsen har kanaler av konstruktionsstål gjutits in för att ge plats åt det använda kärnbränslet. Två olika utformningar av insatsen har utvecklats, där kanalernas storlek och antal är anpassade efter bränslelement från tryckvatten- respektive kokvattenreaktorer (PWR- respektive BWR-insatser).

I avsnitt 5.5 gavs en kortfattad beskrivning av SKB:s planerade utvecklingsprogram för kapseln. De mest prioriterade frågeställningarna handlar om: i) forskning rörande korrosion samt kryp av koppar, ii) utveckling av verifieringsmetoder av kapseln samt krav på materialegenskaper och tillåtna defekter, iii) utveckling av tillverkningsteknik för kapselns komponenter, iv) kontroll och provning av kapselns komponenter och svetsar. I detta kapitel ges en mer detaljerad beskrivning av SKB:s program inom dessa områden.

8.1 Korrosion

8.1.1 Sulfidkorrosion

Sulfid är den långsiktigt viktigaste korrodanten för koppar i slutförvarsmiljö. I säkerhetsanalysen SR-Site gav kapselbrott till följd av sulfidkorrosion efter att bufferten eroderats bort det dominerande riskbidraget. För att stärka den vetenskapliga grunden för hanteringen av sulfidkorrosion i kommande säkerhetsanalyser behövs en bättre förståelse för de detaljerade mekanismerna i korrosionsprocessen, liksom bättre grund för de tänkbara sulfidhalter i grundvatten och bentonit som används i säkerhetsanalysen.



Figur 8-1. Det använda kärnbränslet kapslas in i en kopparkapsel. Två olika insatser av segjärn används för PWR- respektive BWR-bränsle.

Nuläge

Bildningen av kopparsulfidfilm på koppar i sulfidlösning, och mekanismerna för detta, har fortsatt studerats med elektrokemiska metoder (EIS, electrochemical impedance spectroscopy) och olika typer av mikroskopi (SEM, scanning electron microscopy; FIB-SEM, focused ion beam-scanning electron microscopy). Framför allt har frågan om vad som begränsar filmtillväxten varit i fokus. Arbetet utförs vid University of Western Ontario i Kanada. Faktorer som inverkar på filmtillväxten är såväl lösningens koncentration av sulfid och klorid som förhållandet mellan dem, och sulfidflödet vid gränsskiktet mellan film och lösning (Chen et al. 2014a). För att studera filmtillväxten vid olika tillflöden av sulfid har stationära och roterande elektroder använts. Vid lågt flöde (med stationära elektroder) begränsas filmtillväxten av diffusionen av sulfid i lösningen. Detsamma gäller initialt vid högre flöde (med roterande elektroder som ger konvektion), men med det bildade sulfidskiktet blir sedan transporten av Cu^+ i kopparsulfidfilmen begränsande (Chen et al. 2014b).

Från experimentella data har ett kritiskt flöde av sulfid uppskattats, under vilket korrosionen kan anses begränsad av masstransporten av sulfid. Dessa kritiska flöden har sedan jämförts med de beräknade flödena i Kärnbränsleförvaret, med data från SR-Site (King et al. 2014). De beräknade sulfidflödena i förvaret är generellt sett flera storleksordningar lägre än det kritiska flödet (både för fallen med intakt respektive eroderad buffert), och korrosionshastigheten hos kapseln kommer att vara begränsad av masstransport av sulfid under i stort sett alla förhållanden. SKB drar därför slutsatsen att sulfidkorrosionen av koppar i Kärnbränsleförvaret är begränsad av masstransport av sulfid, och att detta kan härledas från experimentella resultat. Detta har redovisats som svar på en begäran om komplettering till SSM för ansökan om Kärnbränsleförvaret (SKB 2015c).

Att filmen växer till i gränsskiktet mellan film och lösning (och alltså inte mellan kopparmetallen och filmen) har visats i försök med guldbeläggning på filmen (Chen et al. 2012). Under de förhållanden där tillväxten begränsas av reaktionen i gränsskiktet mellan lösning och kopparsulfidfilm (det vill säga av transporten av Cu^+ genom filmen) blir kopparsulfidfilmen kompakt och delvis passiverande, vilket skulle kunna ge upphov till lokal korrosion (eng pitting). För att detta ska uppstå krävs, förutom högt sulfidflöde, också höga sulfidhalter, $[\text{SH}^-] \geq 5,0 \times 10^{-4} \text{ M}$ (Martino et al. 2014). Sådana halter är högre än de sulfidhalter som förväntas vid Forsmark.

Passivering av koppar i sulfidlösning har också studerats av andra. I Mao et al. (2014) presenteras experimentella data som tolkats som nedbrytning av ett passiverande skikt, och dessa data används sedan i modellering med en PDM (point defect model). Det kan dock inte uteslutas att den uppmätta strömmen påverkats av diffusionsbegränsningar, och därför inte enbart speglar ett passivt beteende hos filmen. Dessa arbeten ingår i ett större projekt i SSM:s regi (Macdonald et al. 2014), som hittills främst resulterat i data till en framtida "mixed-potential-model" för korrosion av koppar i förvaret. I Macdonald et al. (2014) presenteras också modellering av inverkan av bentoniten på skikt av korrosionsprodukter, men uppdaterade data för bentonitens materialegenskaper tycks inte ha använts utan ersatts av data för betong, vilket gör slutsatserna svårtolkade.

När kapseln deponeras i Kärnbränsleförvaret kommer ytan att ha en film av kopparoxid, vilken sedan förväntas omvandlas till en kopparsulfidfilm när sulfid från bufferten (eller från grundvattnet via porvattnet i bufferten) nått fram till kapselytan. Att sulfideringsmekanismen snarare är av kemisk än av elektrokemisk karaktär när oxidfilmen huvudsakligen består av kuprit (Cu_2O) har visats tidigare (Smith et al. 2007). Även kopparoxidskikt bestående av Cu(II) -oxider sulfideras, och studier med röntgenspektroskopi har visat att reaktionen sker genom en komproportionering av Cu(II) och metallisk Cu(0) till Cu(I) som därefter reagerar med sulfid och bildar Cu_2S (Kristiansen et al. 2015). Resultaten stärker den tidigare slutsatsen att sulfideringen är kemisk, och det är därför pessimistiskt att i säkerhetsanalysen addera dessa korrosionsbidrag (vilket gjordes i SR-Site).

Mättad bentonit som källa (via mikrobiell sulfatreduktion) respektive sänka för sulfid studeras i experiment, se avsnitt 10.3.2. Resultaten angående sulfatreduktion visar att det finns en skarp gräns eller ett smalt intervall i svälltryck över vilket den mikrobiella aktiviteten helt försvinner. Hantering av bildning och tillgång på gasformig sulfid ($\text{H}_2\text{S(g)}$) under den omättade fasen beskrivs i avsnitt 10.1.5.

Litteratursammanställningen över lösligheten hos pyrit (FeS_2) har färdigställts (King 2013). Slutsatsen angående pyrit som källa till sulfid i bentonit var att upplösning av pyrit kan konsumera en andel av det syre som finns initialt genom oxidativ upplösning, men att det är osannolikt att pyrit löses upp under den långa anoxiska tidsperioden. Detta stöder att beräkningarna i SR-Site med upplösning av pyrit under hela förvarstiden är pessimistiska. Dock var bidraget till den totala korrosionen av sulfid litet.

När det gäller sulfidhalter i grundvatten har SKB:s studier fortsatt efter platsundersökningarna. Svårigheterna med att provta och analysera sulfid i representativa grundvatten från sprickor på stora djup har undersökts (Rosdahl et al. 2011, Drake et al. 2014, 2015). Studierna visar att mikrobiella processer i avmanschetterade borrhålssektioner kraftigt kan påverka de lokala sulfidhalterna när vattnet i sektionen är stagnant. SKB:s slutsats är dock att dataunderlaget (sulfidhalter) till säkerhetsanalysen inte behöver ändras med anledning av dessa forskningsresultat, eftersom sådana påverkade sulfidhalter sorterats bort. Nya mätningar i nya, eller gamla, borrhål kan naturligtvis ge nytt dataunderlag.

Sammanfattningsvis har resultaten i forskningsarbetet stärkt slutsatserna om att sulfidkorrosionen är masstransportbegränsad, att upplösning av pyrit ger ett försumbart bidrag till sulfidkorrosionen och att kompakterad bentonit förhindrar sulfidproduktion. Likaså har arbetet gett en ökad förståelse för vad som kan störa mätningar av sulfid i grundvatten. Det delområde där nya resultat påkallar ytterligare forskningsinsatser är frågan om vilka förutsättningarna är för att passiva filmer av kopparsulfid ska kunna bildas, och som därmed skulle kunna ge upphov till lokal korrosion.

Program

Sulfid är den viktigaste korrodanten för koppar i slutförvarsmiljö, eftersom den termodynamiska drivkraften för bildning av korrosionsprodukten kopparsulfid (Cu_2S) är så stark, och all sulfid som når kapseln kommer att reagera med koppar. I samarbete med Posiva utförs flera studier med fokus på sulfidfrågor.

För att stärka den vetenskapliga grunden för hanteringen av sulfidkorrosion i kommande säkerhetsanalyser behövs en bättre förståelse för de detaljerade mekanismerna i korrosionsprocessen. SKB kommer därför att fortsätta studierna av koppar i sulfidlösning, framför allt med elektrokemiska metoder. Det 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, galvanisk koppling och platsen för katodreaktionen), dels hur andra joner (klorid, sulfat, karbonat etc) eller bentonit påverkar korrosionsmekanismen.

Även arbetet med studier av sulfidering av kopparoxidfilmen kommer att fortsätta med en mindre insats. Som del av ett pågående doktorandarbete vid KTH kommer DFT-beräkningar (DFT, density functional theory) av reaktionsmekanismen för sulfidering av oxidfilmen att genomföras, med det huvudsakliga syftet att ytterligare förbättra SKB:s förståelse för sulfideringsprocessen.

För fortsatta studier av mikrobiell sulfatreduktion och sulfidhalter i bentonit, inklusive gasformig sulfid, se avsnitt 10.1.5, och 10.3.2. Den omättade perioden i bufferten beskrivs i avsnitt 10.1.2.

Interaktionerna mellan mikrober och olika material för att klargöra processerna i avmanschetterade sektioner i borrhål kommer att studeras. Metoder för provtagning och analys av lösta gaser i sprickor och i bergmatrisen kommer att utvecklas. Reduktion av Fe(III) samt frigörelse av Fe(II) från bergmatrisen är viktiga processer som kommer att studeras, eftersom sulfidlösligheten kan begränsas av Fe(II)-mineral.

För användning i kommande säkerhetsanalyser vidareutvecklas modeller för beräkningar av koppar-korrosion från sulfid inom samarbetet med Posiva. Ytterligare modeller av förvarets närområde som inkluderar sulfidtransport, och produktion och sänkor för sulfid, kommer att utvecklas parallellt.

8.1.2 Lokal korrosion

Lokal korrosion (även kallat gropfrätning) under oxiderande förhållanden är behandlat i SR-Site som ojämn allmänkorrosion (eng surface roughening) med ett maximalt extra korrosionsdjup, i stället för de tidigare använda gropfrättningsfaktorena. Bakgrunden till detta är iakttagelser från både storskaliga experiment och laboratoriestudier. Studier av förutsättningar för lokal korrosion i sulfidhaltiga vatten (reducerande förhållanden) tas upp i avsnitt 8.1.1 om sulfidkorrosion.

Nuläge

SSM efterfrågade som en komplettering till ansökan om Kärnbränsleförvaret en fördjupad analys av lokal korrosion, vilket SKB besvarat i en rapport (King och Lilja 2013). Rapporten innehåller en litteraturgenomgång av data, och en diskussion om grundvattensammansättningar och förutsättningarna

för att lokal korrosion ska uppstå. Slutsatsen var att de porvattensammansättningar som är aktuella i förvaret gynnar allmänkorrosion, och inte ger upphov till någon passivfilm. En sådan film är en förutsättning för att lokal korrosion ska uppstå. Arbetet har också publicerats i King och Lilja (2014).

Den litteraturbaserade studien av passivitet under förvarförhållanden visar att lokal korrosion inte bör ske i Kärnbränsleförvaret (King och Lilja 2013, 2014), men det finns andra resultat som inte lika tydligt utesluter att förhållanden som kan ge lokal korrosion möjligen kan uppstå under den omättade oxiderande perioden (Kosec et al. 2015). De fullskaliga kopparkapslar som återtagits från Prototypförvaret i Äspölaboratoriet uppvisar en ytmorfologi som skulle kunna tolkas som yttlig lokal korrosion (Taxén et al. 2012). Det bör i detta sammanhang noteras att mätningar av korrosionspotentialen i Prototypförvaret precis före återtagandet, samt spektroskopisk analys av korrosionsprodukter, visar att den kemiska närmiljön varit mer eller mindre oxiderande under hela exponeringstiden (Rosborg 2013a, b). För att ytterligare utvärdera kapselytorna från Prototypförvaret med avseende på lokal korrosion gjordes 240 observationer med SEM på olika delar av de återtagna kapslarna (Taxén 2013). Dessa analyser visar groppdjup på i medeltal 2–3 μm och största uppmätta groppdjup var 7 μm ; detta efter cirka 8 års exponering i Äspölaboratoriet. Hur ytans morfologi påverkats av exponeringen i försöket är inte möjligt att avgöra då kapselytornas initialtillstånd inte karakteriserats. Denna analys kommer dock att vara till nytta vid framtida analyser av kapslar från Prototypförvarets inre sektion.

En viss ytskrovighet återfinns på U-böjda prover från det återtagna MiniCan-försöket i Äspölaboratoriet (Aggarwal et al. 2015). En grövre topologi observerades i provernas böjda regioner än i de opåverkade, vilket är förväntat. Denna ytmorfologi kan dock anses rymmas inom begreppet ojämn allmänkorrosion (surface roughness) som diskuteras i King och Lilja (2013, 2014).

Program

För utvärdering av lokal korrosion är det viktigt med beskrivningen av det vatten som kapseln kommer i kontakt med. För korrosionsanalyserna har porvattnet ansetts vara grundvatten i jämvikt med bentonit. För att få en bättre bild av vilken vattenkemi koppar i bentonit exponeras för, har ett experiment startats vid University of Western Ontario i Kanada, med syfte att mäta potentialer på koppar i bentonit.

SKB kommer också ytterligare att se över möjligheten att få fram data för att bedöma lokal korrosion genom probabilistiska analyser.

För att bättre kunna karakterisera den observerade ytmorfologin hos de återtagna kapslarna från Prototypförvaret (Taxén 2013), avser SKB att låta undersöka ytan hos kapselkoppar som endast utsatts för den atmosfäriska korrosion som sker vid normal luftfuktighet men som inte exponerats i något korrosionsförsök. En sådan analys bör ge en rimlig bild av ytans topologiska initialtillstånd hos kapslarna i Prototypförvaret.

8.1.3 Kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten

SKB lämnade i mars 2015 en samlad redovisning om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten till SSM (Hedin et al. 2015). SKB har vidare lämnat information till SSM i brev i april 2016 (SKB 2016b) om utvecklingen av frågan efter den samlade redovisningen. Redovisningarna baseras på flera omfattande SKB-stödda studier. Slutsatsen är att det inte finns något vetenskapligt stöd för att det skulle finnas en korrosionsprocess för koppar i rent, syrgasfritt vatten, som fortgår i en omfattning som överskrider den som förutsågs av etablerade termodynamiska data.

Nuläge

I den samlade bedömningen som SKB lämnat (Hedin et al. 2015) och i brevet i april 2016 (SKB 2016b) återfinns referenser till merparten av de arbeten som SKB låtit bedriva inom frågan om koppars korrosion i rent, syrgasfritt vatten, och de upprepas inte här. Utöver dessa har ytterligare material publicerats i vetenskapliga artiklar och SKB-rapporter, främst från de experimentella och teoretiska studierna av Cu-O-H-systemet och från studierna av ytreaktioner mellan vatten och koppar respektive kopparoxid:

- Teoretiska studier av lösningsmedelseffekter på såväl ideala kopparytor som nanopartiklar av koppar har visat att den kvalitativa bilden från processen i gasfas kvarstår, vilket betyder att dissociation av vatten med efterföljande vätgasbildning inte sker i större omfattning i lösning än

i gasfas (Lousada et al. 2015, Halldin-Stenlid et al. 2014, 2016). Slutsatsen från dessa studier är därför, liksom tidigare (Hedin et al. 2015), att ytreaktivitet inte är tillräckligt för att förklara den vätgasutveckling som observerats i vissa experiment med koppar i syrgasfritt vatten.

- Avslutande dokumentation från arbetet med sökandet efter en ny stabil fas i Cu-O-H-systemet (Li et al. 2015, Soroka et al. 2016).

De två kompletterande PM som nämns i ovanstående brev (SKB 2016b) om ytterligare analyser av koppar i vattnet i några av provrören hos Micans (Blom och Pedersen 2016) respektive om urgasningsmätningar av kapselkoppar som exponerats för vatten vid 70 °C i omkring tre år hos Micans (Berastegui et al. 2016), har slutförts och skickats till SSM. SKB och forskargruppen vid Uppsala universitet arbetar vidare med vetenskapliga artiklar om de SKB-stödda studierna av kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Tidiga delar av arbetet vid Uppsala universitet har också publicerats i Boman et al. (2014).

En publikation som beskriver hur frågan om koppars korrosion i rent, syrgasfritt vatten hanterats i tillståndsprocessen med en referensgrupp har publicerats (Andersson 2013).

I brevet (SKB 2016b) beskrivs också den diskussion, initierad av SKB, som publicerats i tidskrifterna Corrosion Science och Journal of the Electrochemical Society med anledning av publicerade artiklar där. I korthet har SKB haft synpunkter på bland annat redovisningen av experimentella betingelser i försöken, slutsatser om korrosion och korrosionsmekanismer, användning av referenser som inte stöder de påståenden de sägs stöda, samt den bristande överensstämmelsen mellan modellberäkningar och termodynamiska data.

Program

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. De experiment som utgjort grunden för påståenden om motsatsen har i ett SKB-stött projekt upprepats under mer kontrollerade förhållanden utan att korrosion kunnat påvisas. En alternativ, enklare metod har utvecklats med stöd av SKB och inte heller med denna har korrosion påvisats. SKB-stödda teoretiska studier har inte lett till att några hittills okända stabila faser i Cu-O-H-systemet identifierats. SKB planerar därför inga ytterligare omfattande studier inom området. Några mindre, kompletterande utredningar förutses dock under Fud-perioden.

Ytterligare kvantkemiska och experimentella studier kommer att genomföras inom doktorandarbetet vid KTH för att bättre förstå reaktiviteten i gränsskiktet mellan koppar och vatten. Bland annat pågår studier av den vattenklyvande och vätgasbildande reaktionen på ytan av Cu₂O, vilket är en mer realistisk modell av ytan på ett kopparprov. Även inverkan av olika typer av defekter på Cu-ytan undersöks.

Metodiken med elektrokemiska studier (impedanspektroskopi, voltammetri etc) kommer att vidareutvecklas, framför allt med sikte på utvärdering av kinetiska data för koppar i vatten, men också för undersökningar av inverkan av klorid eller andra joner på korrosionsmekanismer.

8.1.4 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 säkerhetsanalysen SR-Site beräknades pessimistiskt ett totalt korrosionsdjup på cirka 14 µm till följd av denna korrosionsprocess.

Nuläge

Inverkan av gammastrålning på korrosion av koppar har studerats vidare i ett doktorandarbete på KTH (Björkbacka et al. 2013, Björkbacka 2015). Experiment har utförts med kopparkuber i rent vatten under kvävgasatmosfär, vid stråldosrater mellan cirka 0,1 och 1 kGy/h. Det bör påpekas att dessa stråldosrater är cirka 1 000 gånger högre än maximal stråldosrat utanpå kapseln i Kärnbränsleförvaret, men att exponeringstiderna i experimenten anpassats så att den totala dosen ändå är i samma storleksordning som i Kärnbränsleförvaret (Björkbacka 2015).

Ytorna och vattenlösningen har undersökts med olika spektroskopiska metoder. De inledande studierna visar på högre korrosion för bestrålade prov än för obestrålade, vilket är förväntat. Korrosionen visar sig både i form av bildning av Cu_2O och som lokala kaviteter med ett djup på någon 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.

I det kanadensiska kärnavfallsprogrammet genomförs korrosionsexperiment under bestrålning. I Ibrahim et al. (2015) användes en stråldos på 0,35 Gy/h, vilket är samma storleksordning som den initiala stråldosen på utsidan av KBS-3-kapseln vid deponering. Försöken utfördes i luft, vid 70–85 °C och med olika luftfuktighet, vilket kan representera förhållandena under mättnadsfasen. De bildade korrosionsprodukterna (ett dubbelskikt av Cu_2O och CuO) är desamma som vid korrosion i vattenlösning i kontakt med luft. Kondensation av vattenånga ger en lateral spridning av korrosionsprodukterna. Vid högre luftfuktighet (och efter lång tid vid lägre luftfuktighet) observerades dock lokala korrosionsangrepp (grunda gropar). Bestrålningen ledde till en snabbare initial täckning av ytan med korrosionsprodukter, men inte till ökad total korrosion. Experiment utfördes också vid 10 000 gånger högre stråldos (3 kGy/h), med ökad korrosion (filmtjocklek i storleksordningen $< 1 \mu\text{m}$) som resultat (Ibrahim 2015).

Experiment vid högre stråldoser kan vara värdefulla för att studera mekanismer, men direkt extrapolation till lägre doser under lång tid från enstaka experiment kan inte göras utan detaljerad kunskap om mekanismerna.

Program

För att bättre kunna ta ställning till hur oxidfilmer påverkar strålningsinducerad korrosion i grundvattenmiljön i Kärnbränsleförvaret kommer arbetet på KTH att fortsätta med en utredning av reaktionsmekanismen för denna korrosionsprocess. SKB kommer också att fortsatt följa arbetet i det kanadensiska programmet.

8.1.5 Spänningskorrosion

SKB lämnade en nulägesbeskrivning om spänningskorrosion i en komplettering till SSM i februari 2014 (SKB 2015c), och denna beskrivning och referenserna där, upprepas inte här.

För att spänningskorrosion ska uppstå krävs samtidigt ett känsligt material, dragspänningar och aggressiva joner (i fallet koppar, jonerna nitrit, ammonium eller acetat). 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 2008 då en japansk forskargrupp (Taniguchi och Kawasaki 2008) presenterade resultat som tydde på en sådan process. Senare studier har dock inte gett resultat i samma riktning.

Nuläge

SKB summerade i kompletteringen att en enstaka studie påvisat vad som tolkats som spänningskorrosion i sulfidhaltig, syrgasfri miljö, och då vid en sulfidhalt av 10^{-2} M, men att resultaten inte kunnat verifieras i två uppföljande SKB-studier. Vidare noterades att den högsta uppmätta sulfidhalten i Forsmark är $1,2 \times 10^{-4}$ M, det vill säga nästan två storleksordningar lägre än i det experiment där den ursprungliga observationen gjordes. Under den inledande oxiderande perioden saknas en av förutsättningarna för spänningskorrosion (de aggressiva jonerna). Slutsatsen i kompletteringen var därför att SKB fortsatt gör bedömningen att spänningskorrosion inte hotar kapslarnas integritet i ett KBS-3-förvar i Forsmark.

I det återtagna MiniCan-försöket från 2011 fanns ett antal prover för att utvärdera just spänningskorrosion, vilket även det beskrevs i kompletteringen (SKB 2015c). Dels fanns böjda kopparprover för att undersöka sprickinitiering, dels fanns förspräckta prover för att undersöka spricktillväxt. Proverna har studerats ytterligare metallografiskt med optisk mikroskopi och SEM (Aggarwal et al. 2015). Ingen sprickinitiering har kunnat observeras i något av de två böjda proverna (Aggarwal et al. 2015, Smart

et al. 2014). Inte heller har någon spricktillväxt skett i de två förspräckta proverna, vilka dock varit felaktigt installerade; ingen extern last fanns pålagd utan endast restspänningar i materialet efter kallbearbetning kan ha förekommit.

Program

Forskningsprogrammet för spänningskorrosion på koppar fortsätter med ytterligare insatser, inriktade på sulfidinhållande vatten, även om det enligt SKB:s mening saknas såväl en väldokumenterad mekanism som tydliga experimentella resultat för spänningskorrosion under reducerande förhållanden. En viktig komponent i analyserna är förutsättningarna för bildning av en passivfilm av kopparsulfid, se avsnitt 8.1.1.

SKB fortsätter arbetet vid Swerea Kimab för att om möjligt förklara skillnaderna i resultat från de olika experimentella studierna, och undersöker om skillnader i provstavsutformning kan vara en orsak. Det finns även identifierade skillnader i ytbehandling och tid i sulfidmiljön mellan de olika experimenten. Rapportering av resultat beräknas komma under 2016.

Hösten 2015 återtog ytterligare två försökspaket från MiniCan-försöket på Äspölaboratoriet. Analysarbetet pågår under 2016 och omfattar bland annat undersökning av spänningskorrosion i kapselmaterial, samt böjda och förspräckta prover av koppar, på liknande sätt som för den tidigare upptagna kapsel 3.

Även om SKB anser att kunskapsläget om mekanismer för spänningskorrosion i huvudsak är tillräckligt för analys av säkerhet efter förslutning, kommer insatser att göras för att beräkna konsekvenser av eventuell spänningskorrosion.

8.1.6 Verifiering av olika kopparmaterial för korrosionskänslighet

Det behöver säkerställas inför PSAR för Kärnbränsleförvaret att kopparmaterialet i alla delar av den färdiga, förslutna kapseln är tillräckligt korrosionsbeständiga.

Nuläge

Utvecklingen av elektrokemiska metoder för att undersöka skillnaden i korrosionsbenägenhet hos olika kopparmaterial (svetsat, kallbearbetat etc) som aviserades i Fud-program 2013 har fortsatt. En beskrivning av metoden och de första resultaten med en jämförelse av kopparmaterial med olika fosforhalt har publicerats (Taxén och Sparr 2014). Resultaten visar att de provade kopparkvaliteterna alla har lägre potential (är mer ädla) än en högren koppar. Detta har dock ingen betydelse för en kapsel som har samma sammansättning på kopparn överallt, och för vilken korrosionen begränsas av tillgång på korroderanter (syre och sulfid).

Program

Metoden kommer att användas, och eventuellt vidareutvecklas, för att studera även kallbearbetat material (pågående arbete som närmar sig avslut) och svetsat material.

8.2 Kopparkrypning

Krypning i koppar kan delas upp i flera delfrågor och delaktiviteter:

- Mekanistisk förståelse för fosforns inverkan för att kunna visa att koppars duktilitet vidmakthålls även i ett långtidsperspektiv, det vill säga även vid mycket låga töjningshastigheter.
- Krypprovning i laboratoriemiljö, med utvärdering av resultaten med avseende på erhållen duktilitet i provstavar samt spänningstillståndets inverkan på duktiliteten.
- Kvantifiering av maximal permanent deformation av kopparhöljet som kan erhållas i slutförvaret och vid vilket spänningstillstånd (grad av treaxlighet). Detta utgör underlag för formulering av krav på koppars duktilitet.

- Bedömning av kravuppfyllnad: Baserat på mekanisk provning och förståelse för fosfors långtidsegenskaper, bedöms om kopparn uppfyller de krav på duktilitet som behövs för att vidmakthålla kapselns täthet under 100 000 år.

SKB har summerat arbetet och kunskapsläget för kryp i koppar vid flera tillfällen, senast som ett brev till SSM till ansökan om Kärnbränsleförvaret i april 2016 (SKB 2016a).

Vad gäller kopparkrypningens betydelse för förvarets säkerhet efter förslutning är det också av stor vikt att utreda i vilken utsträckning lastfall som inte är deformationsstyrda verkligen kan förväntas förekomma i slutförvaret. Deformationsstyrda fall kan hanteras med elasto-plastiska modeller medan icke deformationsstyrda fall kräver en kryptmodell i hanteringen, se vidare redovisningen i sista stycket i programdelen av avsnitt 8.2.2.

8.2.1 Fosfors inverkan

Nuläge

Arbetet med att utreda fosfors inverkan på krypegenskaperna har fortsatt i huvudsak enligt den beskrivna planen i SKB (2014f).

Med DFT-beräkningar (DFT, density functional theory) har studier gjorts för att undersöka hur punktdefekter (vakanser och främmande ämnen) interagerar med större defekter (defekter i atomplanen, så kallade staplingsfel och korngränser). I Li och Korzhavyi (2015) visas att det är energimässigt mer gynnsamt för fosfor att sitta i en substitutionell position (en kopparatom har bytts mot en fosforatom) än interstitiellt (fosforatomen sitter mellan kopparatomerna). Energin för staplingsfel i koppar minskar när punktdefekter är närvarande, och effekten av fosfor är större än för vakanser, H, O och OH. Minskande staplingsfelsenergi medför en tendens till segring. Fortsatta studier (Li 2015) av föroreningar av 3p-element (magnesium, aluminium, kisel, fosfor och svavel) och deras inverkan på hur en korngräns hålls ihop, visar att föroreningarna generellt förbättrar korngränsernas hållfasthet med minskande elektronegativitet (det vill säga från svavel till magnesium). För fosfor spelar dock staplingsfelsenergin och fosfors tendens att sprida sig jämnt i korngränsen stor roll, och totalt sett visar beräkningarna att fosfor kommer att motverka bildning av kaviteter i korngränserna.

De termodynamiska beräkningarna av stabiliteten hos kopparoxider har verifierats genom experiment med oxidering av koppar med vattenånga. I samma arbete har förekomsten av fosforrika kopparoxider påvisats. Den preliminära slutsatsen i studien var att kopparfosfater är stabilare än oxider vid låga syrgastryck. I Cu-OFP (oxygen free phosphorus-containing copper) kommer därför syre att företrädesvis finnas i fosfater och inte i form av oxider.

I en studie vid Chalmers tekniska högskola (Thuvander 2015) på uppdrag av SSM undersöktes fördelningen av fosfor i koppar inuti kornen med APT (atomprobtomografi) och i korngränserna med TEM-EDS (Transmission Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy). Resultaten kunde inte påvisa någon omfattande segring av fosfor till korngränserna, eftersom APT-mätningarna visade på i stort sett samma halt fosfor inuti kornen som den totala koncentrationen, och ingen fosfor kunde detekteras i korngränserna med TEM-EDS.

Studier med TOF-SIMS (Time-of-Flight – Secondary Ion Mass Spectroscopy) har utförts, och de preliminära resultaten visar även här att ingen tydlig segring till korngränserna skett, eftersom ingen skillnad i fosforhalter kan uppmätas. Det kan dock inte uteslutas att små mängder fosfor (till exempel i monolagernivåer) ansamlas i eller nära korngränserna, vilket är svårt att detektera.

Modelleringsarbetet kring fosfors effekt på krypegenskaperna har fortsatt. Hypoteserna om skillnader i storlek på korngränsglidning med och utan fosfor har inte kunnat bekräftas. Däremot är den föreslagna mekanismen att fosfor påverkar bildningen av kaviteter fortfarande aktuell. Denna mekanism kan anses sannolik såtillvida att en högre spänning behövs för att kaviteter ska bildas om fosfor är närvarande, vilket i sin tur beror på en högre diffusion av fosfor i korngränserna i Cu-OFP än i Cu-OF (oxygen free copper).

Program

För att underbygga modellering av kryp, och särskilt den långa extrapolering som är nödvändig, är det centralt att förstå fosfors inverkan på krypegenskaperna i detalj. SKB kommer att fortsätta på samma sätt som tidigare uppgetts, med en kombination av studier med olika inriktning och olika skala, från atomskala till provstavsskala.

Beräkningarna på interaktioner mellan atomer och dislokationer och defekter (med DFT) inriktas i första hand mot att inkludera mer utsträckta defekter som korngränser, samt studier av diffusion. Olika beräkningstekniker kommer att användas för att undersöka stabiliteten i resultaten. De termodynamiska studierna tar sikte på att undersöka inverkan av andra spårämnen som finns i kopparn och i en första fas kartläggs stabiliteten hos faser bestående av fosfor och dessa ämnen.

Ytterligare experiment kommer att göras för att försöka hitta fosfor i koppars 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.

Det blir i stället mer indirekta metoder som kommer att användas för att förstå fosfors effekt på kopparmaterialet och då särskilt dess krypegenskaper, se avsnitt 8.2.2. Vidare planeras även krypprovning i viss omfattning, bland annat för att bättre uppskatta inverkan av olika föroreningselement och fosforhalter.

8.2.2 Deformation och brott

Nuläge

SKB har i Raiko et al. (2010) ställt upp preliminära krav på koppars duktilitet, vilket innebär att duktiliteten måste vara minst 160 procent töjning, vilket erhålls i en rund dragprovstav om brottytan är högst 20 procent av den ursprungliga tvärsnittsarean. Detta krav gäller såväl vid elastoplastisk dragprovning som vid krypprovning. Vidare anges att maximalt tillåten töjning är 80 procent i kopparhöljet. Hänsyn till fleraxligheten i spänningstillståndet tas alltså inte med explicit, men ingår implicit, eftersom kravuppfyllnaden härleddes ifrån runda dragprovstavar med eller utan kryp. Raiko et al. (2010) anger också att den maximala sanna plastiska töjningen uppgår till 20–30 procent som mest i kopparhöljet. Vidare anges att det initiala glapp som finns mellan kapselns delar (insats och kopparhölje) kommer att försvinna på grund av yttre övertryck. I Andersson-Östling och Sandström (2009) anges det i appendix vilken areareduktion ett stort antal provstavar erhållit, och typiskt är areareduktionen cirka 80–90 procent, vilket motsvarar cirka 160–230 procent töjning för OFP-koppar som är normalt ”as manufactured” eller svetsad med friktionsomröringssvetsning.

Därvid drogs slutsatsen att kopparhöljet kommer att förbli tätt med avseende på krypning under 100 000 år. Som delar i kompletteringar till ansökan om Kärnbränsleförvaret gjordes vidare utredningar med avseende på isostatiska lastfallet under 100 000 år (Hernelind 2015) respektive ojämna lastfall (Hernelind 2014). Den största sanna plastiska töjningen i kopparhöljet beräknades då till 40–60 procent. Spänningstillstånd och huvudspänningsriktningar angavs också. I Unosson (2014) angavs koppars brotttöjning som funktion av graden av treaxlighet vid elastoplastisk provning.

Efter kompletteringen till SSM till ansökan om Kärnbränsleförvaret i februari 2014 (Sandström 2014a) har några arbeten och resultat tillkommit, vilket beskrivs i texten nedan. SKB:s beskrivningar av krypduktiliteten i koppar med och utan fosfor har utvärderats på uppdrag av SSM (Pettersson 2012, 2016) och därvid kritiserats, framför allt att bristande förståelse för fosfors effekt försvårar möjligheten att extrapolera krypegenskaperna över långa tider. Såväl frågan om korngränsglidning som förekomsten av krysprickor har SKB nu kunnat besvara tydligare.

Fosfor har tidigare antagits minska korngränsglidningen och reducera kaviteetsbildningen i koppar, vilket därmed skulle utgöra förklaringen till den högre krypduktiliteten jämfört med koppar utan fosfor. Någon skillnad i korngränsglidning har dock inte kunnat påvisas, varken i den tidigare studien av Pettersson (2010) eller de nyligen publicerade SKB-studierna (Wu et al. 2015, Sandström et al. 2016). Det fortsatta modellarbetet bygger dock fortfarande på att det är en skillnad i bildningen av kaviteter i koppar med och utan fosfor. En ny modell utgår från att kaviteterna uppkommer på grund av att kedjor av dislokationer (uppstaplingar) bildas i korngränserna. På grund av den snabba diffusionen av fosfor i korngränserna krävs det en väsentligt högre spänning för att bilda kaviteter i koppar med fosfor än utan. Detta gör det möjligt att bättre förklara de uppmätta skillnaderna i krypduktilitet mellan materialtyperna (Sandström et al. 2016, Sandström 2016).

I en sammanställning av hur kallbearbetning och anvisningar påverkar krypbeteendet (Wu och Sandström 2015) noterades spricktillväxt vid 125 °C för CT-provstavar (CT, compact tension) med reducerat centralt tvärsnitt, så kallade side grooves. För provstavar utan side grooves noterades ingen signifikant sprickinitiering. Slutsatsen i denna studie var att hög grad av fleraxlighet och tempera-

turer på minst 125 °C krävs för att ge sprickinitiering. Tidigare provade CT-provstavar har därefter undersökts med svepelektronmikroskop för att se om någon spricktillväxt kunde påvisas. Preliminära resultat visar att spricktillväxt kunde konstateras i prover som utförts vid 175 °C, men med utseende typiskt för duktilt beteende. Inga tecken på intergranulära krypsprickor hittades.

I ett doktorandarbete vid Institutionen för materialteknik på KTH används dislokationsdynamik för att studera hur dislokationstätheten ändras vid pålastning. I Hosseinzadeh Delandar (2015) simuleras koppar i form av en enkristall, och resultaten visar att en inhomogen struktur uppstår vid plastisk deformation. Effekten ökar med töjningshastigheten.

Program

Som ett led både i att förstå fosforns roll på mikroskopisk nivå och till att bättre dokumentera skillnaderna i krypegenskaper planeras krypprovning av koppar utan fosfor (Cu-OF) att utföras. Detta innebär att mer jämförbara data erhålls än de äldre och rätt fåtaliga prover som finns i dag. Det betyder provning vid i första hand rumstemperatur och upp till 125 °C, men även högre temperatur kommer att övervägas. Nya kryppriggar med stegmotor kommer att användas, vilket gör att man slipper momenten med omlastning av lastarmen. Pålastningstöjning och kryptöjning tas båda med vid utvärderingen, och eventuell glödning eller kallbearbetning av materialet dokumenteras.

En mindre insats kommer att göras för att utvidga kryppmodellerna att inkludera även tertiärkryp, i tillägg till primär- och sekundärkryp som redan är omhändertaget. Eventuellt kommer någon krypprovning också att behövas för detta.

Doktorandarbetet med dislokationsdynamik vid KTH fortsätter med studier av krypdeformation, hur dislokationer kan samverka med andra defekter såsom lösta föroreningar, utfällningar, hålrum etc, samt hur deformationshärdning i makroskala kan kopplas till utvecklingen av mikrostruktur.

Vidare planeras fördjupad utvärdering av redan utförd provning med avseende på plastisk töjning samt spänningstillstånd i olika krypprovstavar med godtycklig geometri.

Parallellt med arbetet att utveckla kryppmodellen görs även ansträngningar för att ringa in de lastfall som kräver en kryppmodell. Lastfall som är deformationsstyrda kan lösas elastoplastiskt och kräver ingen kryppmodell. Det är därför mycket viktigt att korrekt beskriva de lastfall som är aktuella i slutförvaret. Skjuvlastfallet är förskjutningsstyrt, och därmed är det möjligt att använda konventionella elastoplastiska konstitutiva modeller för att beskriva koppars deformation för det fallet. Samma sak gäller för fallen som orsakas av ojämn svällning; lasten uppkommer på grund av svällningen, är förskjutningsstyrd och en övre gräns för kapseldeformation kan uppskattas. Det isostatiska lastfallet är kraftstyrt på grund av det yttre övertrycket på kapselytan. Lastens riktning är dock sådan att kopparhöljet avlastas mot insatsen och ett steady-state-förhållande uppstår på grund av det geometriska tvång som KBS-3-kapselns konstruktion medför. Utredningar har visat att detta läge består i princip oförändrat vid mycket stora yttre laster. Koppars deformeras så att ett likformigt spänningstillstånd uppstår, och därefter avstannar deformationen. Därmed har det för dessa fall ingenjörsmässigt bestämts hur mycket deformation och töjning som alls kan uppstå i kopparhöljet efter deponering. Ytterligare arbete kommer att genomföras för att identifiera om något lastfall måste ses som kraftstyrt med avseende på kopparhöljet. I så fall måste det fallet lösas med en konstitutiv beräkningsmodell som inkluderar kryp. Därefter kan kraven på kopparmaterialets duktilitet revideras och en förnyad bedömning av kravuppfyllnad göras.

8.3 Konstruktion

8.3.1 Designanalys

Nuläge

Kapselns konstruktion har verifierats motstå mekaniska laster i designanalysrapporten (Raiko et al. 2010) och krav har fastställts på kapselns mekaniska egenskaper och tillåten defektstorlek. Därtill har bedömning av kravuppfyllnad gjorts i produktionsrapporten (SKB 2010c). Inom ramen för kompletteringarna för kapselns mekaniska integritet har SKB utökat ansökan med experimentellt underlag, tekniska motiveringar och konsekvensanalys (SKB 2014g).

Kraven på kapselns mekaniska egenskaper och tillåten defektstorlek har formulerats deterministiskt baserat på konstruktionsförutsättningar, resultat från tillverkning och provning av kapselkomponenter, samt materialstandarder. För att värdera kapselns robusthet har SKB även genomfört probabilistiska analyser av såväl det isostatiska lastfallet som skjuvlastfallet.

De acceptabla defekternas storlek varierar i olika delar av insatsernas tvärsnitt, men för övrigt har kravbilderna med avseende på defekter och materialegenskaper varit enhetlig för insatsen. Trots att de mekaniska belastningarna varierar mellan delar av kapseln i slutförvaret har inte kraven på kapseln i någon stor utsträckning anpassats för detta. Dessutom resulterar tillverkningsprocesserna i såväl en systematisk som en stokastisk variation av egenskaper och defekter. För att anpassa kraven till förändringar i konstruktionsförutsättningar, variationen i mekaniska belastningar, och den systematiska variationen av egenskaperna inom komponenter, utvecklar SKB kravbilderna.

Preliminära resultat indikerar att kravet på brottförlängning i segjärnet kan mildras. 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 till vilken konfidens som kraven ska uppfyllas samt hur detta ska verifieras i produktion.

Program

SKB kommer att uppdatera designanalysrapporten (Raiko et al. 2010) till PSAR så att den omfattande information som tagits fram för att besvara kompletteringarna inarbetas och sammanställs överskådligt. Dessutom görs förnyade verifierande analyser och skadetålighetsanalyser av såväl det isostatiska lastfallet som skjuvlastfallet där de nya konstruktionsförutsättningarna rörande isostatisk last samt buffertens egenskaper beaktas. Eftersom tillverkningsprocessen för kopparkapseln uppdateras till att inkludera glödning uppdateras tillåtna hanteringslasterna för kopparkapseln där materialdata för mjukglödgad koppar och maximalt tillåten hanteringstemperatur ansätts.

Arbetet att uppdatera Raiko et al. (2010) har också haft som målsättning att genom mer detaljerade analyser om möjligt mildra kravbilderna med avseende på materialegenskaper och tillåtna defektstorlekar samt även förtydliga framställningen av de angivna kraven. Särskild vikt har lagts på att motivera varför delar av kapselns ingående delar inte behöver inspekteras.

Skjuvlastfallet är i flera avseenden dimensionerande för kraven på kapseln. Därför ägnas skjuvlastfallet särskild uppmärksamhet för att erhålla så välanpassade krav på kapseln som möjligt. Bland annat beaktas lägre bentonitstyvhet och defekternas djup/längdförhållande. Känslighetsanalyser av vad konsekvensen blir för kapselns integritet om mycket stora defekter i insatsen ändå skulle uppträda genomförs också.

Vidare utreds genom noggrannare analyser om det är möjligt att mildra kraven på plastisk töjning och sträckgräns i insatsen. Det övergripande målet är att inte ställa högre krav än nödvändigt på insatsen, vilket resulterar i olika krav med avseende på defektstorlekar både i insatsernas tvärsnitt och i axiell led. Genom känslighetsanalyser undersöks och motiveras varför vissa delar av insatsen såsom bottenplattan, toppen och mellan kanalrören kan exkluderas från inspektion. Som exempel visas i figur 8-2 ett beräkningsfall där en kapsel med mycket stora defekter endast marginellt påverkas av skjuvlastfallet. SKB utreder om krav på plastisk töjning kan mildras i ett begränsat område i centrum på insatserna, på grund av de låga elastiska töjningarna.

För det isostatiska lastfallet beaktas kombinationen av de lägsta tillverkningskraven med avseende på sträckgräns, kantavstånd och tillåtna defekter för BWR- och PWR-insatserna, liksom axiella sprickliknande defekter vid kanalrörshörnet och inverkan av restspänningar.

Arbete görs med avseende på att mildra tillåtna defektstorlekar över insatsens tvärsnitt liksom krav på inspektion i allmänhet. Detta görs särskilt för sprickliknande defekter, med antagande av djup/längd-förhållande baserat på analys av verkliga defekter i demonstrationsserien (I53–I57), med utbredning i tangentiell och radiell led som utgår ifrån de yttre kanalrörshörnen. Utöver detta analyseras konsekvensen av skjuvning av en kapsel vars insats antas ha mycket stora sprickor mellan kanalrören initialt. Kravställning på ingående ståldetaljer inklusive stållocket görs, liksom utredning av möjligheten att tillämpa ASME-normen (av American Society of Mechanical Engineers) för insatsen. Vidare utreds om krav avseende plastisk töjning i insatsen och övriga materialkrav på

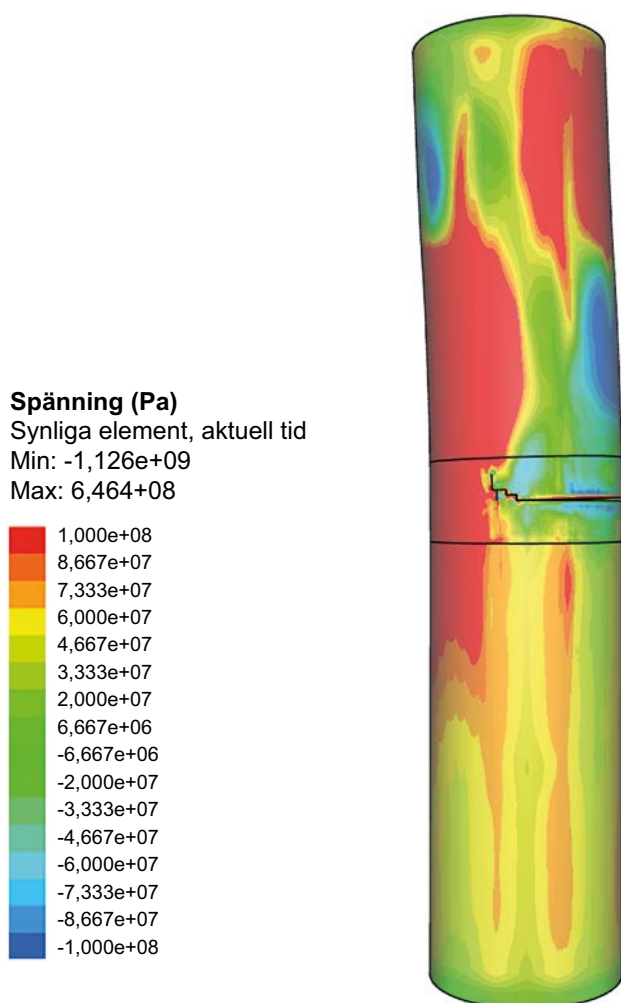
insatsen kan mildras. Särskild vikt läggs vid att bättre underbygga den konstitutiva modelleringen av segjärn, även vid mycket stora deformationer och materialbrott. Därtill genomförs ett program för att ytterligare motivera användandet av brottseghet som erhålls vid 2 mm stabil spricktillväxt i en provstav liksom för att undersöka hur brottseghet och duktilitet påverkas av förkomprimering av segjärnet. Tillåten hanteringslast för insatsen utreds också.

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 kryp, se avsnitt 8.2. De olika lastfallen värderas med avseende på om dessa är deformationsstyrda eller kraftstyrda för kopparhöljet. Dessutom betraktas inverkan av excentriskt placerad insats. Därefter kan kraven på kopparmaterialets duktilitet revideras och en förnyad bedömning av kravuppfyllnad göras.

Tillåtna hanteringslast utreds liksom tillåten storlek på hanteringsdefekter i kopparhöljet.

8.3.2 Vätets roll i koppar

Kapselkoppar har ett väteinnehåll av cirka 0,5 vikt-ppm. Förståelsen för hur väte lagras i materialet och hur det frigörs, till exempel vid uppvärmning behöver förbättras, för att tolka experiment om korrosion i syrgasfritt vatten och för att kunna utvärdera om och i så fall hur vätet påverkar material-egenskaperna i kopparn.



Figur 8-2. Områden med kompressiv spänning (positiva värden röda, gula och gröna områden) respektive områden med dragspänning (negativa värden gröna och blåa områden) i en insats som från början hade mycket stora defekter innan kapseln utsattes för skjuvlastfallet. Sprickutbredningen avstannar då sprickspetsen når det kompressiva området som uppstår i insatsen på grund av den armerande funktion kanalrören har (Unosson 2016).

Nuläge

I komplettering till SSM i september 2014 (SKB 2015c, fråga 9) lämnade SKB ett redovisande underlag om väte i koppar. Som underlag lämnades ett PM (Sandström 2014b), som redovisar SKB:s studier av väteladdning av koppar och vätes inverkan på materialegenskaperna. Beskrivningar och referenser i dessa redovisningar upprepas inte här.

I ett arbete (Ganchenkova et al. 2014) inom det finska nationella KYT-programmet har DFT-beräkningar använts för att studera hur väte och andra föroreningar påverkar bildning av små kluster av vakanser i koppar. Resultaten visar att väte stabiliserar bildningen av annars ogynnsamma divakanser och gynnar kärnbildning av kluster av vakanser. I sådana kluster kommer väte att i första hand sitta på ytan av klustret och förhindrar att klustret kollapsar. Om klustret blir tillräckligt stort kan vätgasmolekyler bildas, vilket dock inte är drivkraften för att bilda större porer. Slutsatserna från arbetet ger ytterligare förståelse för drivkrafterna för inverkan av väte på kopparmaterialet, men motsäger inte iakttagelser som gjorts vid väteladdning (eller försök till) av koppar.

Väteinnehåll i koppar som utsatts för gammastrålning i vattenlösning har studerats med TDS (thermal desorption spectroscopy) av Lousada et al. (2016). Stråldoser på upp till 69 kGy har använts, vilket är i samma storleksordning som kapselns ytteryta kommer att erhålla i Kärnbränsleförvaret. Den använda dosraten (0,135 Gy/s) är dock cirka 1000 gånger större än i förvaret. Väteinnehållet efter bestrålning anges som upp till 0,4 vikt-ppm efter korrigering för blankprov som legat i vatten samma tid, men inte bestrålats. Bakgrundshalten anges dock inte explicit. Författarna sammanfattar att upptaget av väte troligen beror på flera faktorer, där den viktigaste är gammaradiolys av vattnet närmast kapseln, men också av bildningen av defekter i kopparn liksom förändringar i de ytligaste lagren av kopparatomer. Med så få detaljer om betingelserna i experimentet, liksom att enbart tunna folier studerats, kan inte SKB på ett meningsfullt sätt dra några slutsatser av betydelsen av dessa resultat för kopparkapseln i Kärnbränsleförvaret.

Program

De tidigare startade studierna med krypprovning under samtidig väteladdning (katodisk elektrolytladdning) beräknas slutföras under 2016.

Hittillsvarande studier med väteladdning av koppar har visat att det krävs förhållanden som är mycket mer extrema (hög strålning, elektrolytisk laddning etc) än i Kärnbränsleförvaret för att få in väte i koppar, och därmed eventuellt påverka materialegenskaperna. Förnyade insatser kommer dock att göras för att undersöka om och i så fall hur väte, bildat genom korrosionsprocesser eller radiolys, skulle kunna påverka de mekaniska egenskaperna generellt och krypegenskaperna i synnerhet.

För att minska risken för väteförspredning bedrivs arbete med att minska förekomsten av oxidpartiklar i svetsen, se avsnitt 8.4.3.

8.3.3 Krav på maximal kopparhalt i segjärn

Gamma- och neutronstrålning kan inverka på segjärnets materialegenskaper. Om kopparpartiklar fälls ut kan det leda till försämrade mekaniska egenskaper hos materialet. Omfattningen av denna process behöver studeras så att väl underbyggda krav kan ställas på maximalt tillåten kopparhalt i järnmaterialet till PSAR för Kärnbränsleförvaret. Tidigare har också frågan väckts om så kallade LBP (late-blooming phases) kan bildas vid bestrålningen i förvaret.

Nuläge

I en komplettering till SSM i september 2014 (SKB 2015c, fråga 10) lämnade SKB en redovisning om hur bestrålning förväntas inverka på segjärnsinsatsens materialegenskaper. Beskrivningar och referenser i den redovisningen upprepas inte här.

I en experimentell studie vid avdelningen för Reaktor fysik på KTH (i samarbetet med Shimane university, Japan) har segjärnsprover bestrålats med elektronstrålning för att bestämma tröskelenergin för när klustring av koppar (sammanklumpning av kopparatomer som kan ge partiklar) kan uppkomma. För utvärdering av effekterna i Kärnbränsleförvaret kommer en uppdaterad analys

av strålnivåerna i segjärnet (Toijer 2014) att användas. Denna visar på att de tidigare använda modellerna överskattade gammastrålningens effekter. De preliminära resultaten från studien vid avdelningen för Reaktor fysik vid KTH visar sammantaget på ytterst liten inverkan av strålningen på det provade segjärnet från insatser från SKB.

En förstudie för att undersöka om LBP kan uppträda i segjärnet är under slutförande, där termodynamiska beräkningar av fasdiagram (Calphad, CALculations of PHase Diagrams) används tillsammans med kvantmekaniska beräkningar för analys av interaktioner mellan lösta atomer och vakanser i koppargittret. De preliminära slutsatserna är att utfällning av LBP är termodynamiskt möjligt för ”G-phase” (en fas rik på nickel, mangan och kisel), M_2P - och M_3P -fosfider (faser där M står för krom, järn, eller nickel, och P står för fosfor) och en sulfidfas betecknad MnS. Att faserna är termodynamiskt stabila betyder dock inte nödvändigtvis att de kommer att falla ut.

Program

För att säkerställa att kraven på maximal halt på koppar är ändamålsenliga planerar SKB fortsatt arbete för att studera utfällning av kopparpartiklar och efterföljande försprödning av segjärnet. Även eventuell inverkan av strålning på kanälrören av stål kommer att beaktas.

De preliminära och kvalitativa slutsatserna om LBP planeras följas upp av fortsatta beräkningar, med användning av ab initio- och Calphad-beräkningar i kombination, för att bättre kunna bedöma sannolikheten att man får utfällning i segjärnet i kapseln. Eventuellt kan också verifierande experiment behövas.

8.4 Tillverkning

Produktion av kapselkomponenter sker mot definierade tillverkningskrav. Tillverkningskraven är formulerade så att de acceptabla värdena på designparametrarna som anges för kapselns referensutförning uppfylls. Det betyder att tillverkningskraven är minst lika skarpa som i referensutförningen, men i många fall skarpare. Referensutförningen gäller oberoende av vald produktionsmetod. Tillverkningskraven kan däremot variera för att säkerställa låg restriktion för att provad och kontrollerad designparameter inte ska avvika från de angivna acceptabla värdena någonstans i komponenten.

I avsnittet presenteras nuläge och program för tillverkning av de olika kapselkomponenterna, förslutningssvetsen samt deponeringen.

8.4.1 Kopparkomponenter

Tillverkning av kopparkomponenter kan delas upp i extrusion av rör, dornpressning av rör och smidning av lock och botten. Gemensamt för tillverkningen är att den ska leverera produkter som med hög tillförlitlighet uppfyller de ställda kraven avseende materialegenskaper, dimensioner och defekter.

Nuläge

SKB har i produktionsrapporten (SKB 2010c) och tillhörande underlagsrapporter redovisat utfallet av demonstrationsserien av extruderade rör samt smidda kopparlock med avseende på uppfyllnad av geometriska dimensioner och materialegenskaper. I komplettering av ansökan (SKB 2014h) har SKB vidare redovisat utfallet av den kemiska sammansättningen i rörgöt samt möjligheten att styra duktiliteten i smidda kopparlock genom att värmebehandla dessa efter smidning. Vidare har möjliga defekter i kopparkomponenterna analyserats och klassificerats. Acceptanskriterier för defekter med hjälp av FE-simuleringar (FE, finita element) av extrusions- respektive smidningsprocesserna har tagits fram.

Program

För kopparkomponenterna planerar SKB att vidare utreda kravet på medelkornstorlek i kopparkomponenterna vilket kan medföra att ett tilläggskrav rörande ljuddämpning kan behöva definieras för att ultraljudprovningens tillförlitlighet ska kunna säkerställas. SKB har för avsikt att utreda och

förtydliga acceptanskrav med avseende på materialsammansättning (exempelvis maximal syrehalt i kopparkopparhöljet) och komplettera och motivera kravbilderna för defekter i kopparkomponenterna (Jonsson och Rydén 2014). SKB planerar att validera de FE-beräkningar som ligger till grund för de framräknade tillåtna defekterna med lämpliga praktiska experiment. SKB planerar att utreda och förbättra strategin för hur kvalitetssäkring av fosforhalten och övriga specifikationer av den kemiska sammansättningen i kopparkomponenterna ska ske, liksom erhållande av jämnare kornstorlek. SKB har även för avsikt att utveckla smidesprocessen av lock och botten för att minska spridningen i duktilitet och kornstorlek i färdig produkt samt minimera risken för smidesveck.

Därtill överväger SKB att utreda och om möjligt besluta om att välja dornpressning som en referensmetod för tillverkning av kopparrör med integrerad botten. SKB och Posiva har under en längre tid gemensamt genomfört utveckling av dornpressningsprocessen. Det är nu möjligt att erhålla kopparmaterial som uppfyller tillverkningskravet minst 40 procents brottförlängning respektive referensutförningskravet på medelkornstorlek max 800 µm men inte alltid tillverkningskravet max 360 µm medelkornstorlek. Medelkornstorleken bedöms enligt ASTM E112 som är en amerikansk standard för kornstorleksbedömning. Mer arbete återstår för att utveckla processen och verifiera att jämn kornstorlek kan erhållas 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 kvalificering av koppartillverkningen kan genomföras, även med avseende på dornpressning.

8.4.2 Kapselns insats

För att kapseln ska garantera strålsäkerheten under transport, deponering och slutlig förvaring 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

SSM har i granskningen av Fud-program 2013 uttryckt att SKB behöver utvärdera betydelsen av slumpmässigheten i gjutprocesserna och dess inverkan på de mekaniska egenskaperna samt att SKB bör utveckla PWR-insatserna till motsvarande nivå som för BWR-insatserna (SSM 2014a, s 92). SKB har observerat att de mekaniska egenskaperna varierar mellan och inom segjärnsinsatser vilket kan kopplas till materialets mikrostruktur och eventuella defekter som porer och oxidiska inneslutningar. Orsaken kan vara segjärnets grafitfördelning och fenomen som metallens stelning och gasers varierande löslighet under stelning. SKB har utvecklat en konstitutiv modell för spänningstillståndets inverkan på segjärnets beteende under deformation med hänsyn till grafiten (Dahlberg et al. 2014). SKB har genomfört en designanalys för BWR som presenteras i Raiko et al. (2010) där beräkningsförutsättningarna sammanfattas. De krav på BWR-insatsen som anges i tabell 8-1 i Raiko et al. (2010) är härledda utifrån denna designanalys. I avsnitt 3.3.2 finns det en utförlig härledning av kravet på brottförlängning. För PWR har motsvarande analyser gjorts i Dillström et al. (2014, bilaga 6). I Dillström (2014, bilaga 7) sammanfattas kraven som ställs på segjärnets mekaniska egenskaper med avseende på referensutförningen av kapseln.

Kraven på referensutförningen har således härletts utifrån de genomförda skadetålighetsanalyserna för BWR- och PWR-insatserna. De materialegenskaper som kravställs är följande (SKB 2014h):

- sträckgräns
- brottgräns
- brottförlängning
- brottseghet.

SKB har i SKB (2010c) med tillhörande underlag redovisat utfallet av demonstrationsserien av BWR (I53–I57) med avseende på materialegenskaper och geometriska dimensioner. Inom ramen för det arbete som bedrivits för att svara på kompletteringarna till ansökan har det även tagits fram en dataanalys (Shipsha 2013) för utfallet med avseende på mekanisk provning av de tre senast tillverkade PWR-insatserna IP23–IP25, liksom ett förtydligande av vilka tillverkningskraven är på segjärnets materialegenskaper, samt en värdering av hur kvalitetssäkring av dessa egenskaper ska ske.

SKB lät gjuta en BWR-insats i maj 2015 med målet att införa de processförbättringar som lanserats under utvecklingen av PWR-insatser under åren 2008–2012, samt att därefter kartlägga variationer i materialegenskaper inom insatsen. För att understödja den statistiska analysen ökades antal dragprov i höjddled och i radiell led jämfört med tidigare utförda utvärderingar. I figur 8-3 syns att flera av proverna kan anses vara duplikat beroende på symmetri vid stelning.

Enskilda värden och medelvärden för brottförlängning redovisas i tabell 8-1. Uppställningen visar på systematiska variationer mellan prover i höjddled vilket redan var känt, men också systematiska variationer mellan provpositionerna i radiell led. Skillnaden mellan prover uttagna i randen och centrum är signifikant. I centrum kan deformationen förväntas vara lägre vid en belastning av kapseln, och därför utreds om även kraven på brottförlängning kan mildras i centrum.

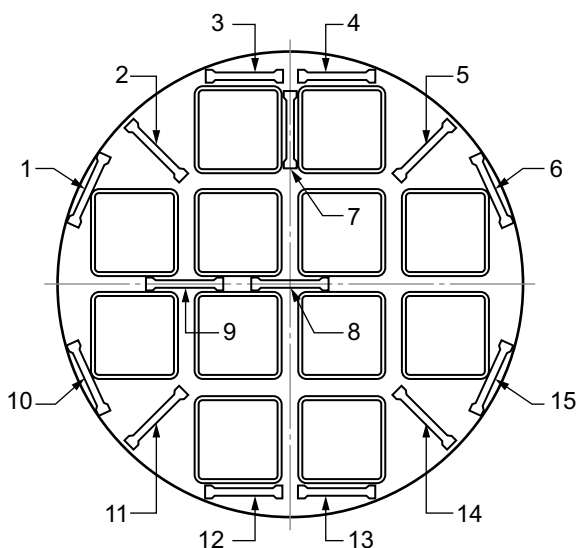
Tabell 8-1. Brottförlängningsvärden för BWR-insats som göts i maj 2015.

Höjd	1	6	10	15	2	5	11	14	3	4	12	13	Medel
Botten	23,2	22,4	22,0	22,7	20,5	20,9	19,7	20,7	22,8	21,3	20,9	22,9	21,7
25 %	22,5	22,7	23,7	17,5	19,5	20,8	20,4	20,0	21,8	21,1	21,8	11,4	20,3
Mitten	18,9	18,5	22,8	14,7	19,8	17,3	20,2	18,8	22,4	16,3	14,0	13,8	18,1
75 %	13,0	12,0	13,8	15,3	14,1	16,4	19,4	19,2	11,0	8,2	9,4	10,6	13,5
Toppen	16,6	12,2	16,8	14,0	17,5	14,5	14,3	15,2	10,4	8,8	12,8	9,0	13,5
Medel	18,3				18,5				15,5				17,4

Program

Kravuppfyllnad kommer att uppskattas (Odeh och Owen 1980, tabell 7) genom att jämföra medelvärde, krav och standardavvikelse med tabellerade värden för andel mätningar inom ett ensidigt konfidensintervall. En variansanalys av de mekaniska värdena kommer att utföras.

SKB kommer att vidareutveckla tillverkningstekniken och förtydliga tillverkningskraven på insatsens ståldetaljer. För segjärnet utreds hur mikrostrukturen med avseende på perlithalt, nodulstorlek etc ska omfattas av tillverkningskrav. SKB avser att arbeta vidare med att utforma tillverkningskraven samt vidareutveckla SKB:s strategi för att verifiera tillverkningskraven för insatsernas initialtillstånd. SKB planerar att uppdatera kravbilden för oförstörande provning av insatsen (Källbom et al. 2014) och koppla defektbilden tydligare till de slutligt valda tillverkningsmetoderna. För att kunna förfina gjutprocessen och minska variationerna i mekaniska egenskaper har SKB initierat uppdragsforskning vid avdelningen för Metallernas Gjutning på KTH för att förklara hur mikrostrukturen och defektfördelningen påverkas av kemisk sammansättning och konvektion under gjutning.



Figur 8-3. Provuttag i insatsens tvärsnitt.

Särskilt studeras konvektionen vid stig- respektive fallgjutning i relation till ympningsproceduren. SKB fortsätter forskningen på KTH:s institution för hållfasthetslära kring grafitens inverkan på segjärnets egenskaper och beteende och vidareutvecklar konstitutiva modeller för segjärnet. Dessa modeller ska kunna användas för att simulera mekanisk belastning av segjärnsinsatsen med FE-program som Abaqus. SKB har även för avsikt att utreda hur kvalificering av insatstillverkningen kan genomföras.

8.4.3 Svetsning

Friktionsomrörningssvetsning (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.

FSW sammanfogar materialet i fast tillstånd vilket skiljer processen från klassisk smältsvetsning. Genom att låta en tapp rotera i materialet skapas friktionsvärme. Den ökande temperaturen gör materialet mjukare så att det, om temperaturen är tillräckligt hög, börjar röra sig med tappen. När tappens sedan förs fram längs foglinjen skapas en homogen fog. FSW skapar en fog med materialegenskaper jämförbara med grundmaterialet (SKB 2010c).

Nuläge

Efter Fud-program 2013 har utvecklingsarbetet fokuserat på dels industrialisering och automatisering av svetsprocessen, dels undersökning av oxidstråk i svetsgodset. Arbetet genomförs sedan 2014 tillsammans med Posiva.

Arbetet med oxidstråk har under perioden syftat till att beskriva och förklara uppkomsten av oxidpartiklar i svetsen. Studier och modellering av koppars oxidationskinetik har utförts (Björck och Elger 2013). Dessa modeller har applicerats på svetsprocessen för ökad förståelse samt för beräkning av maximala syrehaltsnivåer i gasskyddet (Björck 2015). Ett examensarbete (Pehkonen 2014) utmynnade i förslag till en ny design av gasskyddet från erfarenheterna av de gasskydd som presenterades för SSM 2014 (SKB 2014h).

När det gäller automatiseringen har den så kallade kaskadregulatorn (som ändrar svetsverktygets rotationshastighet) förbättrats så att verktygstemperaturen runt hela foglinjen endast varierar med ± 5 °C. Denna regulator har även utvecklats så att den ska fungera även om verktygstempersignalen försvinner.

Sedan Fud-program 2013 har foglinjeböjningens utsträckning i radiell led utvärderats med hänsyn till de variabler som kan påverka: tappens längd, svetsdjup och tappens relativa höjdläge mot foglinjen. Resultaten visar att med en tapplängd på 51 mm och centrerat höjdläge (tolerans 2 mm) kan foglinjeböjningen begränsas till under 2 mm.

För att reducera oxidstråken i det svetsade godset har ett nytt gasskydd på Kapsellaboratoriets svets byggts enligt Pehkonen (2014). Detta ger ett komplett gasskydd runt hela foglinjen under hela svetssekvensen. Utvärderingen av gasskyddet gjordes genom tre fullvarvssvetsar. Den första svetsen hade skyddsgas, argon, på utsidan av foglinjen, den andra hade skyddsgas, kvävgas, även på insidan. Den tredje svetsen hade samma konfiguration som den andra men med 2 atomprocent vätgas inblandat i skyddsgaserna. Resultatet utvärderades genom att mäta syrehalten i svetsen, utföra värmebehandling i vätgasatmosfär enligt ASTM B577 samt metallografisk undersökning. Utvärderingen visade att den högsta syrehalten var under 3 vikt-ppm i alla svetsar vilket är under specifikationen för basmaterialet på 5 vikt-ppm. Värmebehandlingen i vätgasatmosfär jämfördes enligt skala från ASTM F68. Alla svetsar befanns ha en nivå 1/C, vilket är den lägsta nivån. Ingen av de tre svetsarna uppvisade tecken på väteförspredning. En rapport med ovanstående resultat publiceras under 2016. Denna rapport diskuterar och underbygger rengöringsmetoden av fogytorna.

För att ytterligare minska foglinjeböjningen har sedan Fud-program 2013 ytterligare en regulator utvecklats och driftsatts, en så kallad djupregulator som ändrar kraften som svetsverktyget trycker mot kapseln för att styra svetsdjupet. Djupregulatorn har även som syfte att minimera så kallad skäggbildning som kan störa processen, till exempel vid överlappssekvensen.

Preliminära resultat visar att svetsdjupet kan kontrolleras väl med nuvarande inställningar. Ytterliggare prov måste dock genomföras för att undersöka hur till exempel olika tillverkningsmetoder av lock och rör påverkar svetsdjupet och/eller djupregulatorns inställningar.

Program

SKB och Posiva kommer att fortsätta fördjupa kunskapen om svetsprocessens stabilitet generellt genom systematiska studier med avseende på störningar i process och inkommande komponenter såsom till exempel tillverkningstoleranser mellan lock och rör samt när fogytorna inte är helt i kontakt med varandra.

8.4.4 Kontroll och provning

Nuläge

SKB har tagit fram en samlad kravbild, inklusive acceptanskriterier för kapseln och dess komponenter. SSM har efterfrågat inverkan på provningsmetodik av egenskaper och variationer hos defekter för att SKB ska kunna säkerställa att kapselns komponenter blir provningsbara (SSM 2014b).

Inom ramen för SKB:s komplettering av ansökan i tillståndsprövningen har SKB rapporterat nuvarande status avseende oförstörande provning av kapselns komponenter och svetsar. Rapporteringen omfattar en samlad redovisning (Ronneteg och Grybäck 2015) av en framtagna preliminär kravbild för oförstörande provning tillsammans med beskrivning av den provningsteknik som utvecklats med därtill kopplade analyser i form av såväl simuleringar som tillförlitlighetsstudier. Resultat redovisas även från initiala analyser av provbarhet för kapselkomponenterna med ultraljud. Dessutom omfattar redovisningen ett förslag på med vilken inriktning som kvalificeringsprocessen för oförstörande provning av kapseln kan drivas (Ronneteg och Grybäck 2014).

Som följd av att tillförlitligheten för ultraljudsprovning av insatsens centrala delar har ifrågasatts i SSM:s preliminära granskningsrapport från 2015 (SSM 2015), har en studie med syfte att applicera röntgenteknik för dessa områden initierats. Preliminära resultat av denna studie visar goda möjligheter att erhålla tillräcklig tillförlitlighet för provning av dessa områden, framför allt med tanke på att acceptanskraven för dessa områden troligen kan mildras, se avsnitt 8.3.

Program

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 som bas att använda befintlig föreskrift SSMFS 2008:13 vilken gäller för mekanisk utrustning i kärnkraftverk. Även andra guidelines och normer (IAEA osv) kan användas för att ge principer och strategier inom delområden där inte SSMFS 2008:13 anses fullt ut tillämplig 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 kvalitetssäkringen.

SKB avser att arbeta vidare med att utarbeta detaljerade acceptanskriterier för oförstörande provning genom fortsatta analyser av möjliga och troliga defekter samt koppla dessa till de beräkningar som görs med avseende på hantering av kapseln vid tillverkning och deponering samt kapselns långsiktiga säkerhet. 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 ultraljudsteknik för provning av insatsens volym samt utvärdering av alternativa tekniker för ytprovning av insatsen. Som komplement till den utvecklade provningstekniken utvärderas även möjligheten att applicera röntgenteknik för provning av insatsens centrala delar. Utöver detta har arbete initierats med inriktning på utveckling av virvelströmsteknik för ytprovning av kopparkomponenterna.

Som en följd av att röntgen har visat sig vara nödvändig för att säkerställa tillförlitlig provning av FSW-svetsar, utvärderas om alternativa detektorkoncept kan ge en ökad detekteringsförmåga.



Figur 8-4. Ultraljudsteknik är en av flera tekniker för oförstörande provning.

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 koppargöt. Baserat på denna översyn kommer eventuell teknikutveckling att initieras.

För att underbygga utvecklad teknik för oförstörande provning bedrivs fortsatta studier av möjliga variationer (avseende material, defekter och geometri) 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 ultraljudssimulering 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 dessa krav att initieras.

I inkapslingsanläggningen kommer svetsfogens kvalitet att kontrolleras med ultraljudsprovning och röntgen, men eftersom oxider inte kan detekteras med dessa metoder behöver FSW-svetsprocessen kvalificeras och det kommer att formuleras kriterier på maximal tillåten syrehalt i gasskyddet.

9 Cementbaserade material

I SFR förekommer cementbaserade material i stor utsträckning i avfallsmatriser, tekniska barriärer och konstruktioner. I det koncept för SFL som nu säkerhetsvärderas ingår också stora mängder cementbaserade material, likaså kommer Kärnbränsleförvaret att innehålla låg-pH-betong i pluggar, injektering och bergförstärkning.

I kapitel 5 redovisades kortfattat SKB:s planerade utvecklingsprogram kopplat till utformning av förvarskonstruktioner, materialutveckling samt produktionsmetoder för uppförande och förslutning. Vidare gavs 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 (avsnitt 9.1) medan programmet för utformning, material och produktionsmetod redovisas separat för de tre förvarerna, SFR (avsnitt 9.2), SFL (avsnitt 9.3) samt Kärnbränsleförvaret (avsnitt 9.4).

9.1 Cementmaterial – 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.

9.1.1 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 föregående Fud-period arbetat för att fördjupa processförståelsen rörande degradering av betong under förvarsbetingelser, både med hjälp av modellering och genom experimentella studier.

För SR-PSU har modeller utvecklats med förfinad geometrisk representation av förvarsdelar och tekniska barriärer. Dessa har använts för att beräkna grundvattenflöden genom SFR (Abarca et al. 2013) och till detta kopplad betongdegradering (Höglund 2014). Påverkan av sprickor i barriärerna har också utvärderats. Arbetet ledde till att betongbarriärers hydrauliska egenskaper, kemiska egenskaper samt egenskaper för masstransport kunde utvärderas som funktion av tid.

Ett utvecklingsarbete har genomförts för att ta fram ett beräkningsverktyg som förbättrar förutsättningarna för simulering av kopplade processer (Nardi et al. 2014). Detta är relevant för modellering av interaktion mellan betong och grundvatten, betong och avfall samt betong och andra material.

I syfte att öka förståelsen för hur cementbaserade material påverkas av interaktioner med grundvatten och i grundvattnet lösta ämnen under mycket lång tid deltar SKB i projektet Longterm Cement Studies, LCS. Projektet drivs av Nagra i samarbete med ett flertal internationella organisationer och omfattar såväl genomförandet av nya experiment som ett omfattande modelleringsarbete av tidigare genomförda studier och experiment. Genom kombinationen av experiment och modelleringsarbete kan en ökad förståelse för de aktuella processerna och deras hastigheter erhållas och modelleringsverktygen förbättras.

SKB har under åren 2010–2015 finansierat ett doktorandprojekt på Chalmers tekniska högskola. Huvudsyftet med projektet har varit att på experimentell väg studera de kemiska, fysikaliska och mekaniska egenskaperna hos artificiellt åldrade cementmaterial. Inom projektet utvecklades först

en elektrokemisk lakningsmetod med vars hjälp prover av åldrad betong, relevanta för de tidsskalor som är aktuella för analys av säkerhet efter förslutning, kunde tillverkas på en överkomlig tidsrymd (Babaahmadi 2015). Provernans egenskaper studerades sedan med ett stort antal olika metoder med fokus på kemisk sammansättning, materialstruktur samt mekaniska och fysikaliska egenskaper.

Program

SKB planerar att utveckla sitt program för studier av interaktioner mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser. Fokus kommer att ligga på modellering av kopplade processer. Metoder och beräkningsverktyg utvecklade under föregående Fud-period kommer nu att tillämpas.

Egenskaperna hos betongåterfyllningen i bergssalen för hårdkomponenter i SFL efter förslutning, kommer att utvärderas genom ett antal modelleringsaktiviteter. En första fas fokuserar på hydrokemisk modellering av betonglakning orsakad av inkommande grundvatten. I en andra fas planeras modellutveckling i syfte att även inkludera mekaniska degraderingsprocesser. Syftet är att beskriva betongens fysikaliska och kemiska egenskaper över tid för vidare analys av säkerhet efter förslutning i säkerhetsvärderingen för SFL.

Modelleringsstudier har även inletts för att öka förståelsen för sambandet mellan tidsskalan för accelererade lakningsexperiment (Babaahmadi 2015) och den naturliga lakningsprocessen under förvarsbetingelser. Arbetet syftar vidare till att korrelera modellerade förändringar i betongens mikrostruktur, orsakade av lakningsprocesser, till makroskopiska egenskaper hos åldrade betongprover, vilka exempelvis beskriver materialets hållfasthet.

9.1.2 Modellering av gastransport

Den gas som bildas vid korrosion av metaller och mikrobiell aktivitet 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

Med förenklade modeller för metallkorrosion och gastransport har en analys av hur gasproduktion kan påverka den strukturella integriteten i betongbarriärerna genomförts (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).

Program

Nya analyser av hur gasflöde genom det kringgjutna avfallet i SFR påverkar barriärerna kommer att genomföras. Gastransporten genom betongkonstruktionen i förvardsdelen 2BMA kommer att modelleras med en tvåfasflödesmodell. Utveckling av tekniska lösningar för gastransport genom betongbarriärer i SFR hanteras inom relevant teknikutvecklingsprogram, se avsnitt 9.2.3.

Inom ramen för säkerhetsvärderingen för SFL har modelleringsstudier startats för att öka processförståelse avseende transport av gas genom system av betong och granit. I ett första skede omfattas modelleringen av tvåfasflöde genom barriärerna i bergssalen för hårdkomponenter.

I säkerhetsvärderingen för SFL kommer vidare forskningsbehov rörande uttransport av gas från SFL att identifieras. Där kommer programmet att beskrivas.

9.1.3 Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall

Organiskt material som bryts ned i en cementmatris kan påverka egenskaperna hos de cementbaserade materialen. Detta kan avspeglas i en förändring av porvattnets sammansättning men även i förändringar i sammansättningen av cementmineralerna. Utöver detta kan de organiska nedbrytningsprodukterna påverka betongens förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider, se avsnitt 6.6.

Nuläge

Inom experimentet Concrete and Clay vilket drivs av SKB i Äspölaboratoriet sedan 2010 (Mårtensson 2015) studeras bland annat hur nedbrytningsprodukter från olika typer av material representativa för låg- och medelaktivt avfall interagerar med cementmineralerna och hur detta påverkar betongen. Ett av experimentets huvudmål är att kvalitativt skapa en förståelse för hur nedbrytningsprodukter sprids i en cementmatris och i vilken omfattning nya mineral bildas vid dessa processer.

Under 2014 återtog prover innefattande stålbehållare med grundvatten från förvarsdjup, organiskt material representativt för låg- och medelaktivt avfall samt lite krossad cementpasta (Wold 2014). Analysen av proverna visade att nedbrytningen av organiskt avfall varit mycket begränsad och inga eller endast mycket låga halter av nedbrytningsprodukter gick att detektera.

Program

SKB planerar att återta och analysera ytterligare prover från experimentet Concrete and Clay under denna Fud-period. Detta för att studera nedbrytning av organiskt material och nedbrytningsprodukternas interaktion med cementmatrisen. I första hand kommer prover liknande de som analyserades av Wold (2014) att återtas, se figur 9-1 vänster bild. Om nedbrytningsprodukter kan identifieras kommer även betongcylindrar med material representativt för låg- och medelaktivt avfall att återtas för analys, se figur 9-1 höger bild. En första undersökning av stålbehållare med organiskt material planeras under slutet av 2016.

9.1.4 Påverkan från korrosion av metalliskt avfall

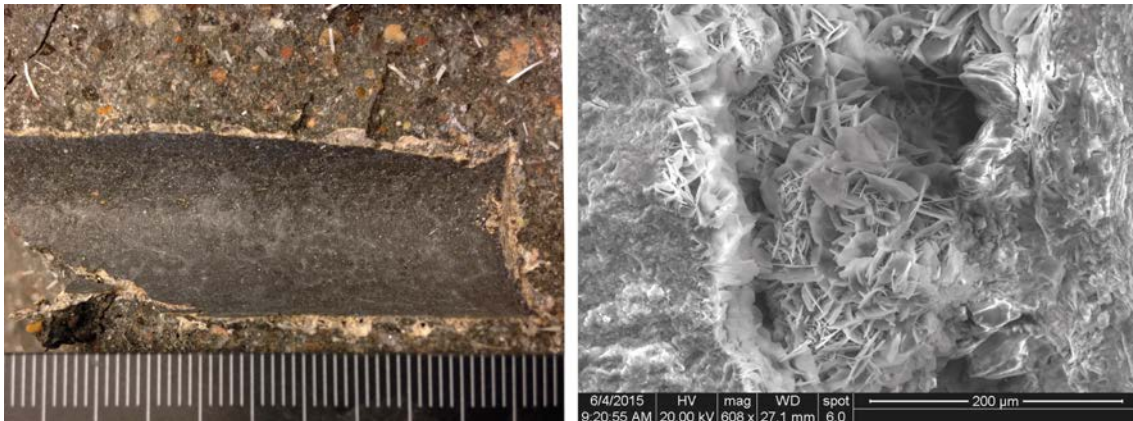
Då metalliskt material korroderar i närvaro av cement kan korrosionsprodukterna reagera med cementmineralerna och därigenom förändra egenskaperna hos de cementbaserade materialen. Som exempel kan här nämnas aluminiums förmåga att ingå i cementgelen (CSH-gelen) och bilda calcium-aluminium-silikat-hydrat (CASH) (L'Hôpital et al. 2015). Utöver detta kan även det mekaniska tryck som uppstår om voluminösa korrosionsprodukter ansamlas på eller kring metallytorna medföra sprickbildning i matrisen.

Nuläge

Inom experimentet Concrete and Clay som nämndes i avsnitt 9.1.3 genomförs även studier av korrosion av metalliska material i ett cementmaterial samt hur korrosionsprodukterna interagerar med cementmatrisen. Under 2015 har en provkropp (figur 9-2 höger bild) innehållande metalliska materialprover representativa för låg- och medelaktiva avfallsmaterial återtagits och analyserats (Kalinowski 2015).



Figur 9-1. Stålbehållare innehållande materialprover, grundvatten från Äspölaboratoriet och krossad cement (vänster bild) samt en betongcylinder med materialprover (höger bild).



Figur 9-2. Aluminiumstav inbäddad i betong med en tydlig vit omvandlingszon i gränsytan (vänster bild) samt en por i gränsytan vilken delvis fyllts med sekundära mineral (Kalinowski 2015).

Studien visade att korrosionsprodukter från järn, stål, aluminium och zink under de fem år som proverna varit deponerade i borrhål i Äspölaboratoriet haft en mycket begränsad spridning i cementmatrisen. För aluminium och zink kunde förhöjda halter detekteras upp till i genomsnitt 300 μm respektive 1 200 μm från gränsytan och en skorpa av korrosionsprodukter var även synligt för ögat, se figur 9-2 vänster bild. Inga förhöjda halter kunde däremot detekteras runt stålproverna. För aluminium noterades även porer i gränsytan mellan metallprov och cementmatris. Med stor sannolikhet har dessa bildats vid tillverkningen av proverna då vätgas utvecklats genom en reaktion mellan den ännu blöta betongen och aluminiumprovet. Vid analysen visade sig dessa porer vara delvis fyllda med sekundära mineral, figur 9-2 höger bild. Röntgendiffraktion (XRD) visade på förekomst av huvudsakligen metallhydroxider och för aluminiumprovet även kalciumaluminiumsilikater. För vidare läsning kring korrosionshastigheter för aluminium och zink, se avsnitt 6.7.

Program

Inom experimentet Concrete and Clay avser SKB att omkring 2020, alltså fem år efter ovanstående beskrivet återtag, återta och analysera ytterligare en provkropp av betong med metalliskt material liknande det som diskuteras ovan. Genom denna analys erhålls en andra punkt på linjen över hur korrosionsprodukter sprids i cementmatrisen under långa tidsperioder vilket kan ge en bättre förståelse för denna process. Se även avsnitt 6.7.

9.1.5 Bentonitens inverkan på cementbaserade material

I den befintliga silon i SFR och den planerade 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.

Inverkan av lakvatten från cementbaserade material på egenskaperna hos bentoniten i Kärnbränsleförvaret har studerats tidigare och vidare studier planeras, se avsnitt 10.3.4.

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 experimentet 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, se figur 9-3. En övervägande andel av cementproverna innehöll även pulver av olika metaller och metallsalter, representativa för låg- och medelaktivt avfall, men även prover utan sådana material användes (Mårtensson 2015).



Figur 9-3. Installation av ett paket med 30 bentonitblock. Varje block innehåller även fyra mindre materialprover.

Under 2015 har SKB även inlett arbete inom 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 studeras. Projektet inom vilket ett 20-tal olika forskningsinstitut och ett tiotal olika avfallsorganisationer är aktiva kommer att pågå fram till 2019.

Program

Det första återtagat av experimentet, vilket inriktas på studier av interaktioner mellan cementbaserade material och bentonit inom Concrete and Clay, kommer att ske tidigast runt år 2019. Fokus kommer vara analys av jontransport och mineralomvandlingar i gränssytorna mellan cement och bentonit samt spridning av nedbrytningsprodukter från de material som blandats in i de små provkropparna. Prover planeras sedan att återtas och analyseras med jämna mellanrum och projektet förväntas avslutas tidigast år 2025 med återtag och analys av de sista proverna.

9.1.6 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

Degerhamn anläggningcement. 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.

I takt med att användningen av olika tillsatsmaterial ökar både vid tillverkning av cement och vid blandning av betong, ökar också behovet av att förbättra förståelsen av hur den förändrade sammansättningen påverkar de cementbaserade materialens långtidsegenskaper.

Program

Under denna Fud-period planerar SKB att påbörja modelleringsstudier 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.

9.1.7 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 har SKB låtit 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 (figur 9-4) 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 färskbetongen. 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.

Inom det av SKB finansierade doktorandprojektet på Chalmers tekniska högskola genomfördes även vissa preliminära och ej fullständiga studier av frysningsegenskaper hos betong som lakats för att efterlikna åldrad betong. Studien visade att mängden frysbart vatten var högre i det lakade materialet än i referensmaterialet. Vidare visade studien att inverkan av lakning var kraftigare för kapillärporerna än för gelporerna (Babaahmadi 2015).

Program

SKB planerar att under 2016 genomföra en riktad studie av frysningsegenskaperna hos betong som lakats till olika kalcium-kisel-förhållanden med den av Babaahmadi (2015) utvecklade metoden. Genom att jämföra provernas porositet med den porositet som uppskattats i de modelleringsarbeten som SKB genomfört genom åren, se exempelvis Höglund (2014), kan en uppfattning av provernas artificiella ålder erhållas och en koppling till SKB:s förväntade klimatutveckling göras.



Figur 9-4. Experimentuppställning använd av Pålbrink och Rydman (2013). Den kraftiga stålbehållaren innesluter en vattenmättad grusbädd i vilken en betongcylinder har placerats. Stålcylindern motsvarar här urberget medan grusbädd och betongcylinder motsvarar återfyllnadsmaterial samt betongkonstruktion i IBMA. Notera cylinderlocket med genomföringar för sladdar från temperaturgivare monterade på provet.

9.1.8 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 förväntas betongkonstruktionerna att utsättas för laster under perioden efter förslutning orsakade av till exempel gasproduktion, svällande avfall eller fasta korrosionsprodukter på avfallsbehållarna som trycker på kringgjutningsbruket. För att uppskatta betongkonstruktionernas integritet under drifttiden, behöver risken för sprickor analyseras och beräknas.

Nuläge

SKB har tidigare studerat betongstruktureernas hållfasthet i förvaret. Silons ytterväggar har visat sig vara tåliga för såväl inre som yttre laster (von Schenck och Bultmark 2014).

Program

I syfte att öka förståelsen för hur förändringar i betongen påverkar betongkonstruktionerna under uppförandet och drift kommer SKB att genomföra sprickriskberäkningar samt undersöka gränser för sprickbildning och spricktillväxt i betongkonstruktioner. Analyserna ger möjlighet att jämföra beräknade gränslastfall med andra laster som kan uppkomma till följd av händelser som till exempel bergutfall eller gastryck inifrån.

9.2 Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR

I detta avsnitt redovisas SKB:s program för utformning av betongkonstruktioner, materialutveckling och produktionsmetod för SFR.

9.2.1 Bergssal för medelaktivt avfall

Avfallet i 2BMA kommer att kringgjutas med ett cementbaserat bruk. Syftet med denna kringgjutning är bland annat att stabilisera avfallet och skapa ett stöd för betongkonstruktionerna i samband med återfyllnad och återmättnad av förvarsdelen. Utöver detta begränsar kringgjutningen vattenflödet genom avfallsdomänen och bidrar till att ett högt pH kan upprätthållas under lång tid samtidigt som det tillåter transport av de gaser som kan bildas genom nedbrytning av avfallet i förvarsdelen.

Betongkonstruktionerna i 2BMA kommer enligt referensutformningen i ansökan om utbyggnaden av SFR att utgöras av fristående kassuner, se figur 9-5. Dessa uppförs av oarmerad betong genom hängformsgjutning. Med detta som utgångspunkt har ett program för utformning av material och teknik för uppförande formulerats. Som en del i vidareutvecklingen och detaljeringen av referensutformningen planeras ingående konstruktionsanalyser, lastberäkningar samt verifierande tester att genomföras, se även avsnitt 9.1.8.

Nuläge

Under 2014 och 2015 utvecklades ett kringgjutningsbruk för 2BMA. Som utgångspunkt användes den kravbild som i dag gäller för kringgjutningsbruket till silon med det tillägget att organiska tillsatsmedel, exempelvis cellulosa, inte får användas. Utvecklingsarbetet visade att det var möjligt att tillverka ett stabilt cementbaserat bruk som uppfyllde ställda krav på egenskaper, genom att använda en bentonitlur som stabiliseringsmedel (Lagerlund 2015b).

Under 2015 har en plan för vidareutveckling och detaljering av betongkonstruktionerna till 2BMA arbetats fram. Planen omfattas av en stegvis verifiering och validering, där material, konstruktion och produktionsmetod behandlas.

Sedan början av 2015 drivs ett program för utveckling av en konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA. Utgångspunkten vid utformningen av betongen är att ballasten ska utgöras av 100 procent krossat material, vilket tillverkas av utsprängda bergmassor från utbyggnaden av SFR, samt att ett minimum av tillsatsmedel ska användas. Som underlag till utvecklingsarbetet har SKB låtit undersöka sammansättning och egenskaper hos bergmassor från utsprängningen av den nuvarande anläggningen (Lagerblad et al. 2015). Med utgångspunkt i denna undersökning har lämpliga bergtäkter med likartade material i närområdet identifierats. Dessa används nu i utvecklingen av konstruktionsbetongen till 2BMA. Arbetet bedrivs i dagsläget med målsättningen att identifiera ett betongrecept som uppfyller de formella kraven på arbetbarhet och hållfasthet. Utöver detta läggs stor vikt vid att receptet är stabilt mot förändringar i tillgänglighet av och egenskaper hos betongens komponenter som kan förväntas över den tidsperiod då kassunerna kommer att uppföras.

Under 2015 påbörjades utredningar och planering inför demonstrationstester av den tekniska barriären som beskrivits i ansökan för utbyggnaden av SFR. Detta är ett steg i verifiering och validering av betongkonstruktionen och produktionsmetod för 2BMA. Utredningarna visar att demonstrationstester bör utföras och att lämplig plats för gjutningar är Äspölaboratoriet.

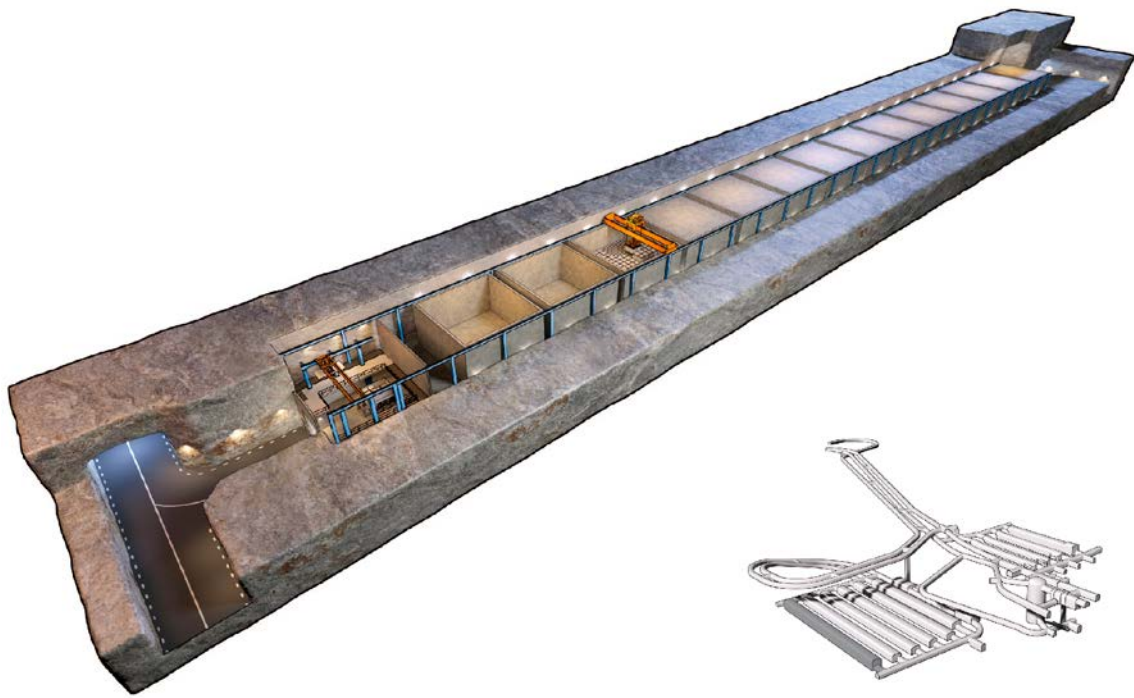
Program

SKB avser att återuppta utvecklingsarbetet av ett cementbaserat kringgjutningsbruk till 2BMA med fokus på optimering av brukets egenskaper vid uppskalning.

Programmet för den vidare materialutvecklingen av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA omfattar under de kommande åren följande steg:

- Fortsatt utveckling av material i betonglaboratorium.
- Verifierande uppskalningsförsök på en betongstation.
- Provgjutning av komponenter i en bergrumsanläggning (Äspölaboratoriet).

De två första stegen planeras delvis att genomföras parallellt för att möjliggöra snabb återkoppling ifall resultaten vid uppskalningsförsök på betongstationen betydligt skulle avvika från de som erhöles vid utvecklingen i betonglaboratoriet.



Figur 9-5. 2BMA – bergssal för medelaktivt avfall i utbyggd del av SFR.

När väl ett slutligt recept utformats och verifierats på en betongstation genomförs provgjutning av ett antal komponenter med dimensioner representativa för de fullstora kassunerna i syfte att verifiera framtaget recept. Vid gjutningen instrumenteras dessa komponenter på ett sådant sätt att det blir möjligt att följa upp förändring av dimension, temperatur och spänningstillstånd.

Möjligheten att tillverka försvarskonstruktionerna i 2BMA i flera steg/gjutetapper genom att använda fogband mellan de olika delarna ska också undersökas. Utöver detta ska även effekterna av grundläggningens egenskaper på förekomst av sprickor i betongkonstruktionen studeras.

Provgjutning av komponenter är i dagsläget planerat till slutet av 2016 men tidpunkten är beroende av framdriften i materialutvecklingsprogrammet.

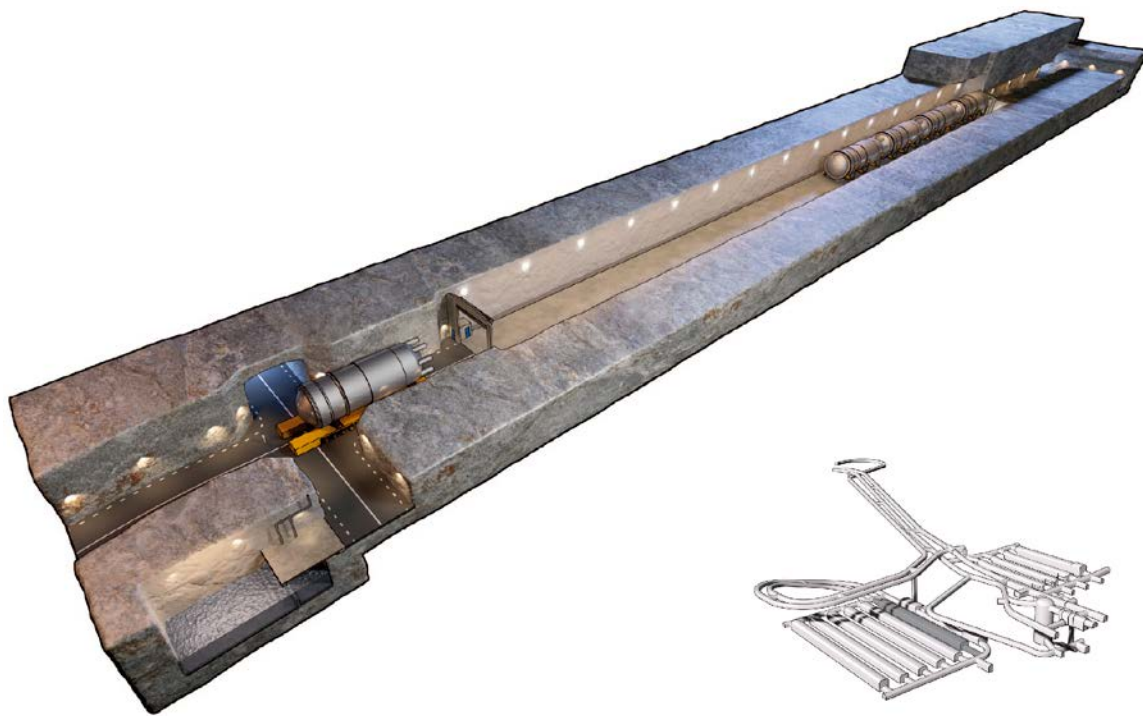
SKB:s program för vidare arbete med utvecklingen av betongkonstruktionerna och produktionsmetoden för 2BMA omfattar under de kommande åren följande aktiviteter:

- 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.

Resultaten från utveckling av betongkonstruktion för 2BMA ger en fördjupad kunskap kring betongkassuner och barriärsystem i 2BMA och bedöms finnas tillgängliga inför detaljprojekteringen av utbyggnaden av SFR.

9.2.2 Bergssal för reaktortankar

I bergssalen för reaktortankar, BRT, kommer nio stycken hela BWR-reaktortankar att placeras, se figur 9-6. I samband med förslutning kommer reaktortankarna att kringgjutras med ett cementbaserat material som utgör barriär efter förslutning. Motivet till detta är bland annat att skapa en passiv miljö vilken begränsar korrosionen på utsidan av reaktortanken. Utöver detta bidrar kringgjutningen med sorptionskapacitet för radionuklider i cementmatrisen.



Figur 9-6. BRT – bergssal för reaktortankar i utbyggd del av SFR.

Innan reaktortankarna kringgjuts kommer dessa att helt eller delvis fyllas med ett cementbaserat material, här benämnt igjutning. Detta görs dels för att binda eventuell lös kontamination, dels för att bidra till sorption av radionuklider. Utöver detta skapar igjutningen även en passiverande miljö i reaktortanken och reducerar därmed korrosions hastigheten i tankens inre. Slutligen förhindrar en igjutning att reaktortanken flyter upp vid den efterföljande kringggjutningen samt förhindrar en eventuell framtida kollaps av tanken.

Nuläge

I SKB:s förslutningsplan för SFR (Luterkort et al. 2014) beskrivs kringggjutningen av reaktortankarna översiktligt. Enligt den kommer reaktortankarna att omges av en kvarsittande gjutform bestående av betong varefter utrymmet mellan denna och reaktortanken fylls med ett kringggjutningsmaterial. Förslutningsplanen inkluderar inte någon detaljerad plan för hur igjutningen ska genomföras eller någon beskrivning av vilka typer av material som ska användas.

Program

SKB avser att genomföra ett forsknings- och utredningsprogram för utveckling av material och produktionsmetod för igjutning av reaktortankarna vilket omfattar följande tre huvudområden:

- Utredda och klargöra hur reaktortankarna ska förberedas för att igjutning ska kunna genomföras på ett säkert sätt utan risk för personskador eller dosexponering.
- Utredda och klarlägga kravbilden för igjutning vad gäller materialegenskaper, hur detta kopplar till val av metod samt hur stor del av reaktortanken som måste fyllas för att eftersökt funktion ska erhållas.
- Utveckling av material och produktionsmetod för igjutning.

SKB avser även att genomföra ett forsknings- och utredningsprogram för utveckling av material och produktionsmetod för kringggjutning av reaktortankarna vilket omfattar följande tre huvudområden:

- Utredda och klarlägga kravbilden för kringggjutning vad gäller val av materialegenskaper och metod.

- Produktionsmetod för uppförande. Arbetet syftar till att utveckla metod för kringgjutning som uppfyller kravbilderna samt att genomförandet sker på ett säkert sätt utan risk för personskador eller dosexponering.
- Utveckling av material och produktionsmetod för kringgjutning.

Resultat från dessa utredningar bedöms behöva finnas tillgängliga senast i samband med den uppdaterade säkerhetsredovisningen inför provdrift av SFR-utbyggnaden.

9.2.3 System för gastransport

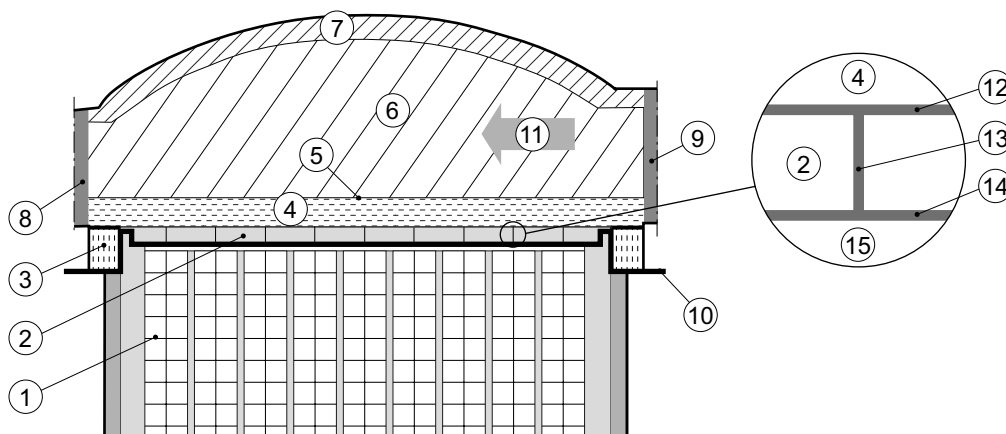
Under de långa tidsperioderna som omfattas av en säkerhetsanalys kommer avfall, avfallsbehållare och eventuell armering att brytas ner med förväntad gasbildning som följd. För att underlätta för gasen att transporteras ut ur de olika förvarsdelarna behövs ett system för gastransport. En teknisk utformning för ett sådant system har föreslagits för silon men ännu ej testats och saknas helt för 1BMA och 2BMA.

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, se figur 9-7 (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). Höglund och Bengtsson (1991) visar att sannolikheten för utfällning av sekundära mineral i de sandfyllda rören är mycket låg och att deras funktion inte skulle vara hotad under de första 5 000 åren efter förslutning. Några senare studier rörande deras funktion i ett längre tidsperspektiv har inte genomförts.

Förslutningsplanen för SFR (Luterkort et al. 2014) inkluderar inte någon detaljerad teknisk lösning för hur systemen för gastransport i 1BMA och 2BMA ska utformas eller vilka typer av material som ska användas.



Figur 9-7. Återfyllnadsmaterial i silotoppen. 1) Kringgjutet avfall. 2) Armerad betong, en meter. 3) Packad fyllning av bentonitblandning 30/70 bentonit/sand. 4) Packad fyllning av bentonitblandning 10/90 bentonit/sand, 1,5 meter. 5) Ormerad betongplatta. 6) Packad fyllning av friktionsmaterial. 7) Cementstabiliserad sand. 8) Mothållande vägg av betong. 9) Mothållande vägg av betong. 10) Gräns mellan arbeten som tillhör kringgjutning och återfyllning. 11) Arbetsriktning för återfyllning med material. 12) Sandlager, 100 millimeter. 13) Gasavledningsrör med diameter 0,1 meter. 14) Sandlager 50 millimeter. 15) Kringgjutningsbruk (permeabelt). (Luterkort et al. 2014.)

Program

SKB kommer att uppdatera analysen av den långsiktiga funktionen hos det tänkta systemet för gastransport i silon. Utgångspunkt för dessa utredningar är de nu aktuella gasbildningshastigheterna från nedbrytning av organiskt avfall och korrosion av metalliskt material som förekommer i silon samt aktuell kunskap rörande mineralomvandlingar i systemets komponenter.

Programmet för analysen av systemets långsiktiga funktion, vilket ännu i sin helhet inte är utformat, behöver omfatta analyser av de i nuvarande förslutningsplan (Luterkort et al. 2014) antagna systemen, men även alternativa system för gastransport kan behöva beaktas.

Under denna Fud-period kommer utvecklingsarbete att genomföras för utformning av ett system för gastransport i 1BMA och 2BMA. Som underlag till detta utvecklingsarbete behöver beräkningar av gas-/vattenflödet genom konstruktionen som funktion av mängden avfall och gasbildande processer genomföras, se vidare i avsnitt 9.1.2.

Ett analyserat system för gastransport i 1BMA och 2BMA bedöms behöva finnas tillgängligt senast i samband med den uppdaterade säkerhetsredovisningen inför uppförandet av SFR-utbyggnaden.

9.3 Utformning av betongkonstruktioner och material till SFL

9.3.1 Bergssal för hårdkomponenter

I bergssalen för hårdkomponenter, BHK, baseras förvarsdelen säkerhet efter förslutning på att avfallet på alla sidor omges av ett tjockt lager av betong, se avsnitt 2.1.2. För att säkerställa säkerheten efter förslutning under hela den tidsperiod som omfattas av en säkerhetsanalys måste material och metod för installation av material väljas med omsorg.

Nuläge

SKB bedriver i nuläget en utredning rörande val av material och metod för grundläggning av betongkonstruktion och återfyllnad av BHK. Ett antal olika metoder ställs här mot varandra och relevanta aspekter kopplade till säkerhet efter förslutning, teknisk genomförbarhet och kostnader belyses.

SKB har i dagsläget inte något utvecklingsarbete av betong till betongkonstruktionen i BHK. Bedömningen är att den betong som för närvarande utvecklas till kassunerna till 2BMA ska kunna utnyttjas även i BHK. SKB avvaktar därför med ett enskilt utvecklingsprogram till dess att utvecklingsprojektet för 2BMA har utvärderats.

Program

SKB avser att under perioden för SFL:s säkerhetsvärdering färdigställa utredningen kring val av material och metod för grundläggning av betongkonstruktion och återfyllning av bergssal med betong.

Utöver detta planerar SKB även att under denna Fud-period inleda en analys rörande vilken inverkan återfyllningsmaterialets egenskaper har på vattenflöden och radionuklidtransport i BHK. Resultaten från denna utredning kommer att ligga till grund för en värdering av huruvida tidigare utvecklade cementbaserade material kan uppfylla kraven för BHK.

Först när slutsatserna från dessa utredningar noga värderats planerar SKB att – om behov visas föreligga – formulera ett program för experimentell utveckling av material och teknik för grundläggning av betongkonstruktionen och återfyllning av BHK med ett cementbaserat material.

9.3.2 Kringgjutning av avfallsbehållare

I samband med förslutning av de båda bergssalarna i SFL kommer avfallet 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 samt att begränsa advektivt flöde av vatten kring avfallsbehållarna.

Nuläge

SKB har under 2012–2014 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

I samband med säkerhetsvärderingen för SFL planerar SKB att utvärdera tidigare utvecklingsarbeten för kringgjutningsbruk till förvarsdelarna i SFR. Syftet är att klarlägga om kravbilderna på kringgjutningsbruket för BHA och BHK kan uppfyllas av något av de befintliga bruken.

9.4 Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret

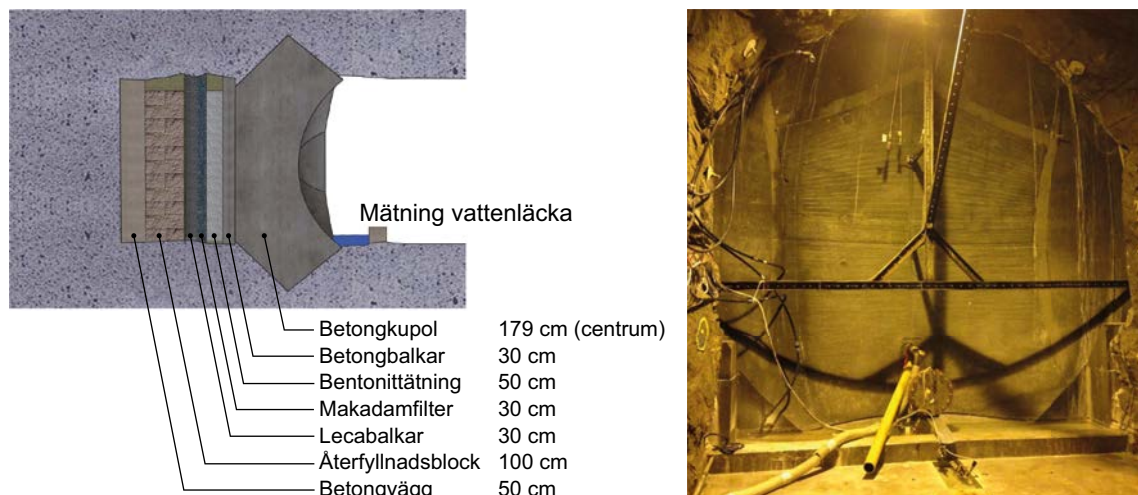
9.4.1 Plugg till deponeringstunnlar

Nuläge

Utvecklingen och verifikationen av pluggar för förslutning av deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret har genomförts med analytiska och numeriska beräkningar, laboratorieexperiment, skalförsök samt genom ett fullskaligt test av pluggsystemet (Domplu-experimentet) på 450 meters djup i Äspölaboratoriet (Grahm et al. 2015).

Viktiga slutsatser från fullskalförsökets uppförandefas var att det var möjligt att uppföra pluggsystemet på ett ändamålsenligt sätt samt att det var möjligt att utforma en oarmerad betongkupol av låg-pH-betongreceptet B200 som uppfyller funktionskraven. En schematisk bild av testet och ett foto på den installerade pluggen visas i figur 9-8.

I slutet av september 2014 var det uppmätta läckaget förbi pluggen 44 ml/min (motsvarande 2,6 liter per timme). Läckaget minskade exponentiellt efter att det uppstod och har nu, efter två år, minskat till 18 ml/min. Försöket visar också att det vattentryck som verkar på betongkupolen successivt sjunker trots att vattentrycket på uppströmssidan om bentonittätningen är konstant. Detta faktum visar tillsammans med givardata för relativ fuktighet och totaltryck att bentonittätningen blir mer och mer homogeniserad och successivt blir mer vattentät.



Figur 9-8. Schematisk sektion samt foto av den installerade pluggen.

Program

Den plugg som installerats i Äspölaboratoriet kommer efter avslutad övervakningsperiod på tre år att brytas och funktionen utvärderas. I samband med brytningen kommer gränssnitten mellan berg, betong och bentonit att undersökas. Då ska även materialprovtagning och inmätningar av pluggsystemets komponenter utföras för att verifiera beräkningsmodeller och mätdata. Resultaten från utvärderingen kommer att ligga till grund för fortsatta utvecklingsinsatser.

Byggnadstekniskt var det svårt att tvinga den oarmerade betongkupolen att helt släppa från berget i samband med nedkylning inför kontaktinjektering. Detta orsakades dels av att vidhäftningen mellan låg-pH-betongen och den släta bergytan var mycket god, dels av att betongens egen krympning var lägre än förväntat. Ytterligare beräkningar och tester kan behövas i detaljkonstruktionsskedet för att verifiera dessa förlopp.

Fortsatta studier bedrivs även i syfte att utvidga dagens recept för låg-pH-betong till koncept där målet är att frånga krav på att en specifikt namngiven produkt ska användas och i stället ange tydliga krav på de grundläggande egenskaperna på ingående produkter. Detta kommer att medföra att färre provningar och verifieringar behövs när tillsatssämnen etc tas bort från marknaden eller när en specificerad cementsort inte längre finns att tillgå. Arbete bedrivs även för framtagning och leverans av den kravbild som ställs på layouten av en betongstation, baserat på kraven från tillverkning av låg-pH-material samt förvaring och beredning av dess beståndsdelar. Slutligen bedrivs även ett arbete med fokus på att utveckla industriellt anpassade metoder för tillverkning och kontroll av cementbaserade låg-pH-material.

9.4.2 Låg-pH-cementmaterial för injektering och bergförstärkning

Nuläge

Dagens konstruktionsförutsättningar och krav på Kärnbränsleförvaret förutsätter användning av låg-pH-cementmaterial vid injektering och bergförstärkning. 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.

Genom att utvidga recepten för låg-pH-cementmaterial kan materialen göras mer robusta inför framtida förändringar i tillgänglighet. Detta görs nu på ett sådant sätt att i stället för ett specifikt recept med angivna produktnamn, anges koncept med tydliga krav för de grundläggande egenskaperna hos ingående komponenter. Detta innebär vidare att behovet av tester och verifieringar minskas betydligt när ingående komponenter som utgått från marknaden ersätts med likartade produkter.

Program

Under denna Fud-period ska en uppdatering göras av recepten för låg-pH-injekteringsbruk för bergtätning, låg-pH-material för sprutbetong och ingjutningsbruk för bergbultar, vilka är robusta gentemot förändringar i tillgänglighet av ingående komponenter. Utöver detta utvecklas en produktionsanpassad process för användning av låg-pH-material för konstruktion och drift av Kärnbränsleförvaret i Forsmark. Dessutom ska underlag för kontrollmetoder och underhållsbehov under driftperioden tas fram.

10 Buffert, återfyllning och förslutning

Huvudsyftet med lerbarriärerna, det vill säga buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret, silofyllningen i SFR och lerbarriären i bergssalen för historiskt avfall i SFL (BHA), 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 är en av de tekniska barriärerna i Kärnbränsleförvaret och utgörs av det material som installeras i borrhål och i alla bergutrymmen utom deponeringstunnlarna. I Kärnbränsleförvaret ska förslutning och pluggar upprätthålla flerbarriärprincipen genom att hindra att det bildas konduktiva vattenvägar mellan förvarsområdet och markytan samt hindra att återfyllningen expanderar ut ur deponeringstunnlarna. Förslutningen ska också hålla förslutningen i de bergutrymmen som ligger intill och nedanför på plats. I den övre delen av ramp och schakt ska förslutningen avsevärt försvåra oavsiktligt intrång i förvaret. Den installerade förslutningens hydrauliska konduktivitet är den egenskap som har störst betydelse för dess barriärfunktion.

10.1 Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad

För att mer utförligt kunna förstå och beskriva bentonitmaterialets utveckling fram till mättnad krävs insatser kring kanalbildningserosion, svällning, homogenisering av block, pelletter och hålrum, ångcirkulation samt kring mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden.

10.1.1 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, flödes hastigheten genom bufferten och buffertens erosionshastighet.

Nuläge

Resultaten från tidigare studier har avrapporterats i Börgesson et al. (2015a). 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.

Studierna har bara behandlat processer som sker under en period fram till dess att vattenflödet har stagnerat och fullt vattentryck utbildats mot pluggen. Följande processer i bentoniten har studerats:

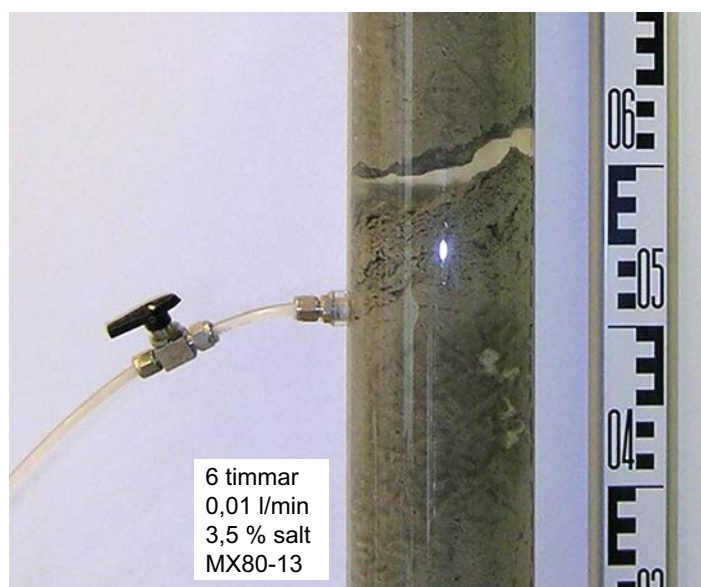
- Erosion.
- Kanalbildning.
- Vattenflöde i pelletsfyllda spalter.
- Förmåga att stoppa kanalbildning.
- Vattenabsorption av bentonitblock.

- Bildning av vatten- eller gelfyllda fickor i pelletsspalter.
- Utflöde av bentonitgel.
- Självtätning av sprickor med erosionsvatten.
- Buffertuppsvällning innan återfyllning.
- Självläkning av erosionskanaler.

Analyserna har lett till ett antal preliminära slutsatser angående eventuella skador som kan åsamkas bufferten och återfyllningen:

- Erosionen följer det empiriska uttryck som användes i säkerhetsanalysen SR-Site.
- Kanalbildning och åtföljande erosion uppstår och upprätthålls tills vattentrycksgradienten ligger över pluggen istället för återfyllningen och flödes hastigheten ut från återfyllningen genom pluggen är lägre än 10^{-4} l/min. Värdet på denna flödes hastighet är ett resultat av processtudierna som visar att flödeskanalerna självläker och kanalbildningen och erosionen upphör vid lägre flödes hastigheter.
- Självtätning av sprickor i pluggen eller berget kan inte förväntas inträffa under alla omständigheter vilket innebär att den inte kan tillgodoses då säkerheten efter förslutning analyseras. Detta är ett pessimistiskt antagande som baseras på att det inte har kunnat visas att denna funktion alltid är verksam.
- Erosionskanaler med begränsad radiell utsträckning (1–2 cm) kommer att självläka i sådan omfattning att de inte har ett avgörande inflytande på de hydrauliska egenskaperna hos bentoniten när stagnanta vattentrycksförhållanden uppnåts.
- Vatten- eller gelfyllda fickor kan bildas vid låga inflödes hastigheter (Se figur 10-1).

Kanalbildning i silon i SFR har analyserats i Börgesson et al. (2015b). Om allt inflöde till silon pessimistiskt antas komma från en punkt och erosionsmodellen från SR-Site används så blir massförlusten från erosion 5–500 kg. Det stora spannet beror på att det inte går att säga om det blir en horisontell eller vertikal kanal. Med antagandet att hela massförlusten sker lokalt blir det resulterande svälltrycket i inflödespunkten lågt, men den största delen av bentoniten i silon är dock helt opåverkad. Slutsatsen är då att kanalbildning och erosion inte är ett problem i silon.



Figur 10-1. Exempel på bildning av en ficka i ett försök med en pelletstub från projekt Åskar (Börgesson et al. 2015a).

Program

Det finns ett behov av att förstå och kunna modellera vattentransport i pelletsfyllningar, dels för att kunna beskriva vattenupptaget korrekt, dels för att planera de åtgärder som behövs för vattenhantering under installation av återfyllningen i tunnarna i Kärnbränsleförvaret. I dag saknas modeller som kan användas i simuleringar av sådan vattentransport i det stora spann av vatteninflöden som förväntas i en slutförvarsanläggning. En uppsättning försök där olika inflödes hastigheter och temperaturgradienter appliceras kommer att genomföras. Dessa försök ska användas både för att testa befintliga modeller, utveckla nya och verifiera dessa nya modeller.

Det finns preliminära observationer som visar att kanalbildning i bufferten kan begränsas eller till och med stoppas med en fläns i väggen på deponeringshålet. SKB avser att genomföra ytterligare studier för att se om problemet kan begränsas med relativt enkla medel.

10.1.2 Vattenupptag i bufferten

När buffertblocken och pelletsfyllningen installerats i ett deponeringshål i Kärnbränsleförvaret kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Under mättnadsfasen kommer bufferten att utbilda ett svälltryck som påverkar berget, kapseln och återfyllningen mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bufferten är en komplicerad process, som bland annat är beroende av temperatur, densitet, montmorillonit halt och vattenkvot i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är den relativa fuktigheten i bufferten, som kan ses som ett kapillärt undertryck i buffertens porer vilket leder till att vatten tas upp från berget. De hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet avgör mättnadsförloppets utveckling. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad mellan kapseln och berget inom ett fåtal år.

Nuläge

SKB har vidareutvecklat beskrivningen av återmättnadsprocessen i buffert i berget i Forsmark, som ett svar på SSM:s krav på kompletteringar av tillståndsansökan för Kärnbränsleförvaret (SKB 2013c). De huvudsakliga frågor som behandlades var:

- Konceptuell modellosäkerhet i samband med beräkningar av återmättnad och homogenisering.
- Analys och diskussion av möjliga fördelningar av återmättnadstider för bufferten med tanke på lokala hydrogeologiska betingelser på förvarsdjup i Forsmark.
- Säkerhetsbetydelse av mättnadsgrad och eventuell inverkan av heterogena förhållanden inom bufferten.
- Termisk påverkan på bentonitens mekaniska och hydrauliska materialegenskaper.
- Möjligheten att med justering av vattenmättnadsgrad eller artificiell tillförsel av vatten påverka/ förkorta återmättnadsförloppet.

I underlaget till SR-Site (Åkesson et al. 2010) ansattes 10^{-13} m/s som en ”typisk” konduktivitet i bergmatrisen. Med detta värde skulle, enligt figur 10-2, 65 procent av deponeringshålen i Forsmark mättas på ~2 000 år och den största delen av de övriga i intervallet 300–2 000 år. Endast en liten andel mättas snabbare än 100 år.

Vattenupptaget i den yttre sektionen i Prototypförvaret i Äspölaboratoriet har modellerats inom ramen för det internationella samarbetet för jämförelse av beräkningsverktyg (Task Force EBS). Den av SKB finansierade modelleringen finns redovisad i Svemar et al. (2016). Huvudsyftena med modelleringen var:

- Att förutsäga det hydrauliska tillståndet i den yttre sektionen i Prototypförvaret vid öppnandet och återtagget.
- Att beskriva THM-processerna (termo-hydro-mekaniska processer) under driften av Prototypförvaret.

Sekundära mål var:

- Att öka kunskapen om modellering av bevätning av buffert och återfyllning via berget.
- Att öka kunskapen om betydelsen av olika typer av vattentransport, lokal eller fördelad, för bevätningen.
- Att validera modeller och finita element-lösare.
- Att öka kunskapen om THM-processer i systemet.

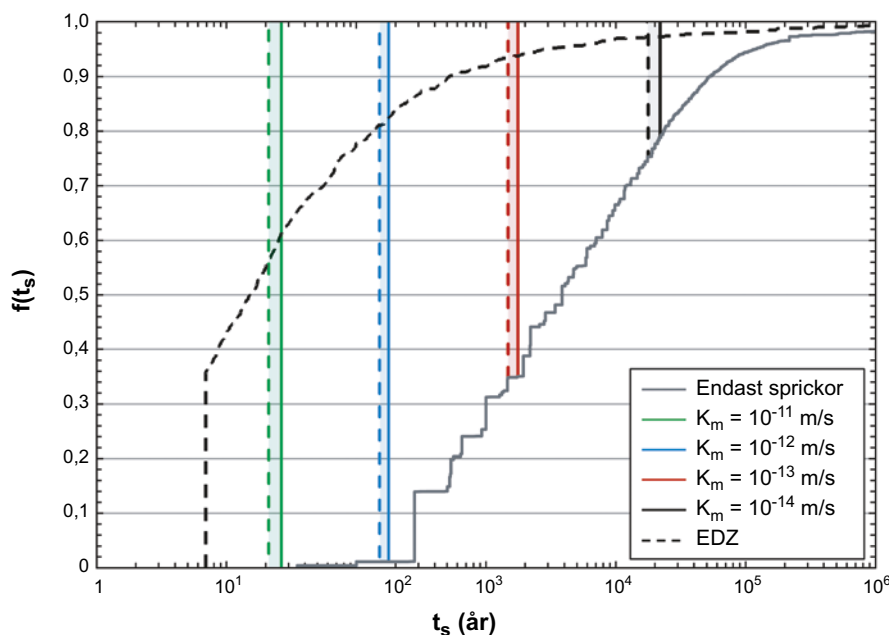
Figur 10-3 visar ett exempel på resultat från modelleringen för ett fall med antagande om höga lokala flöden och lågt flöde i bergmatrisen och olika initialvillkor i bufferten. Resultaten från återtagat visade att buffertringarna var helt vattenmättade och bara bufferten direkt under och ovanpå kapseln var delvis omättad. Detta visar att kombinationen av antaganden om en initialt homogeniserad buffert tillsammans med ett lågt matrisflöde är fel. Däremot gav båda fallen med en ”installerad buffert”, det vill säga en representation med block, ringar, pelletar och spalter samt båda fallen med högt flöde i bergmatrisen, en bra representation av den slutliga vattenmättnaden. Detta visar att det är nödvändigt att verifiera både modeller och antaganden om initialtillstånd mot relevanta försök.

Vattenupptaget i silon i SFR har modellerats (Börgesson et al. 2015b) för att uppskatta tiden från förslutningen till full vattenmättnad i siloförvaret, beskriva mättnadsprocessen i systemet och studera hur variationer i systemets representation ändrar mättnadsprocessen.

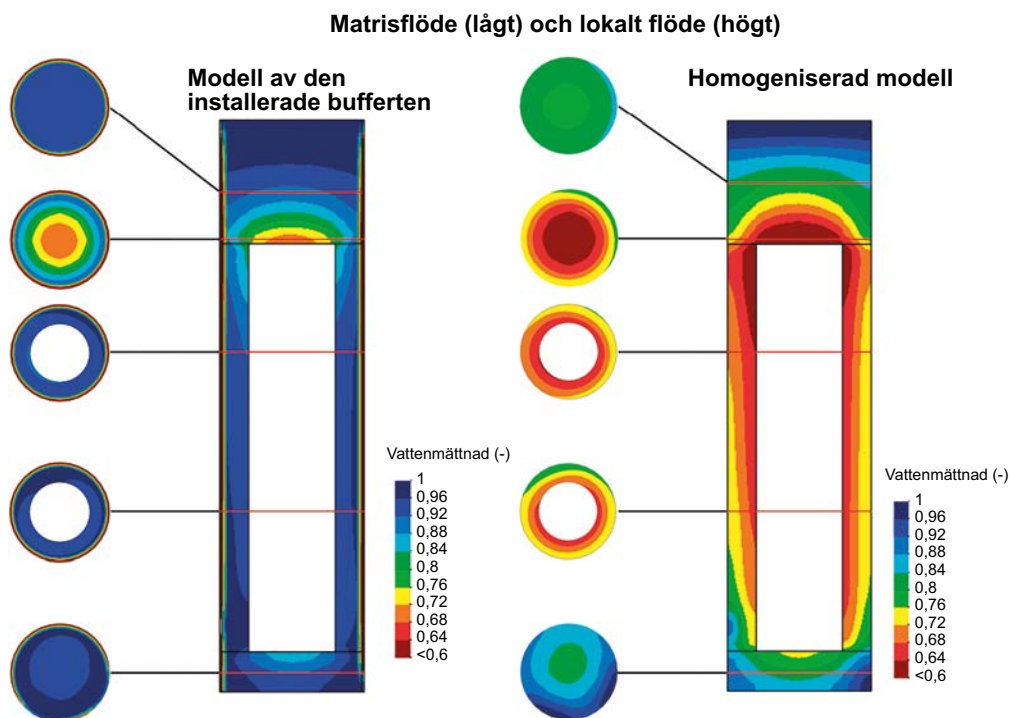
För basfallet beräknades siloförvaret vara helt mättat i intervallet mellan 13 och 53 år. Den största osäkerheten i den uppskattade tiden kommer från hur berget representeras med avseende på både att använda odränerade/dränerade eller torra förhållanden. Egenskaperna hos siloinnehållet samt toppfyllningen hade också signifikant effekt på det totala mättnadsintervallet. Slutsatsen är därför att bentoniten i silon kommer att mättnas relativt snabbt när dräneringen stängs av.

Program

Arbetet med att verifiera och uppdatera modellerna för buffertens vattenmättnad fortsätter. Huvuddelen av detta arbete sker inom ramen för Task Force EBS. En viktig frågeställning är att kunna hantera ett 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.



Figur 10-2. Den heldragna grå linjen visar kumulativ fördelning av vattenmättnadstider för bufferten i Forsmark med förutsättningen att bergmatrisen är tät. De färgade linjerna visar det intervall då alla deponeringshål är fullt mättade för olika antaganden om hydraulisk konduktivitet i bergmatrisen. Den streckade linjen visar fördelningen av vattenmättnadstid för ett fall med en helt hypotetisk mycket konduktiv EDZ i deponeringstunneln (SKB 2013c).



Figur 10-3. Slutlig vattenmättnad i modellerna med lågt matrisflöde och høga lokala flöden. Bufferten långt ifrån helt mättad, i synnerhet i den homogeniserade modellen. Vidare var mättnaden starkt icke-axissymmetrisk, på grund av att inflödet var så lokalt (Svemar et al. 2016).

Figur 10-2 och SKB (2013c) visar att den intakta bergmatrisens hydrauliska konduktivitet har avgörande betydelse för buffertens vattenmättnadstid i ett förvar i Forsmark. Osäkerheter i data och eventuell variabilitet i berget kommer att ha stor påverkan på fördelningen av vattenmättnadstider. Det är därför nödvändigt att ta fram statistiskt underlag för bergmatrisens hydrauliska konduktivitet. Under detaljundersökningsskedet kommer därför ett tillräckligt dataunderlag för bergmatrisens hydrauliska konduktivitet att samlas in genom att utföra laboriemätningar på prov från borrhålskärnor. Vidare kommer möjligheten att utföra olika typer av in situ-tester att utvärderas.

Vattentillgången och vattentillförseln har betydelse för hur bentonitblock och pelletar homogeniseras. Detta avgör sluttilståndet både för buffert och återfyllning i Kärnbränsleförvaret och för bentonitbarriären i BHA i SFL. Detta är därför en viktig parameter i studierna av homogenisering, vilket beskrivs i avsnitt 10.1.3.

De långa tiderna för återmättnad för buffert och återfyllning förväntas inte ha någon större påverkan på barriärernas funktion efter mättnad. Det kan däremot bli viktigt att förstå hur den kemiska miljön påverkas under den omättade perioden. Avsikten är att påbörja dessa studier i laboriemiljö, med en liknande utrustning som den som används för ångcirkulation (se avsnitt 10.1.4). Detta kan eventuellt kombineras med geokemisk modellering av gasfasens sammansättning.

10.1.3 Svällning, homogenisering och självläkning

I bufferten och återfyllningen i Kärnbränsleförvaret, som är inhomogena vid inplaceringen, 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 (pelletar 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 pelletar i återfyllningen ställer framför allt krav på homogeniseringsförmågan dels mellan blocken och pelletsfyllningen, dels för läkningen av erosionskanaler, men även svälltrycken och kompressionsegenskaperna är viktiga för till exempel buffertuppsvällning och påverkan på pluggen. Återfyllningens förmåga att förhindra buffertuppsvällning diskuteras i avsnitt 10.4.2.

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.

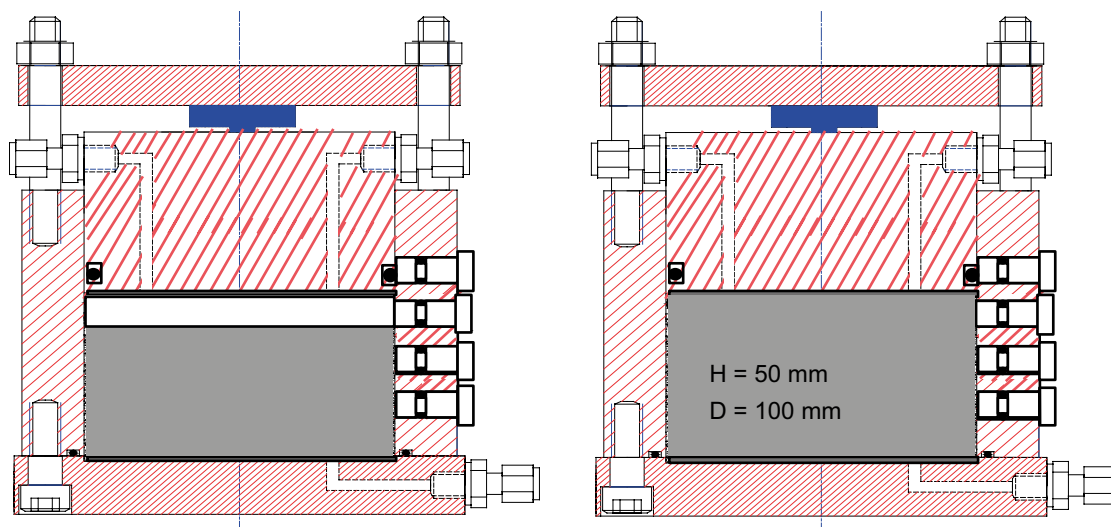
Nuläge

SKB driver ett laboratorieprogram för att studera svällning och homogenisering. Huvudsyftet med programmet är att tillhandahålla resultat som kan användas för modellering av några väldefinierade prestandatester för att förbättra modellerna eller för att bestämma mekaniska parametrar för den termo-hydro-mekaniska modelleringen av buffertens uppförande. Resultaten från försöken avrapporteras fortlöpande (Dueck et al. 2014). Försöksserierna innefattar radiell och axiell svällning, axiell svällning i långa rör och självläkningstester. Ett exempel på resultat från ett svällningstest finns i figur 10-4 och figur 10-5. I det försöket placerades ett 40 millimeter högt bentonitprov i en testcell som var 50 millimeter hög. Vatten tillfördes och bentoniten kunde svälla uppåt i axiell riktning. Figur 10-5 visar axiellt svälltryck, samt radiellt svälltryck på olika höjder från botten av provet. Trycket stiger snabbt i nedre delen av provet (röd och blå), men sjunker sedan när bentoniten börjar expandera. I övre delen är det till att börja med ett vattenfyllt tomrum och således inget svälltryck, men när bentoniten expanderar ökar trycket. Tryckjämvikt nås dock inte under försökstiden och troligtvis inte heller i ett längre tidsperspektiv. Detta exempel visar att inhomogena barriärer måste hanteras både i utformning och i analys av säkerhet efter förslutning. Förhoppningen är dock att det kommer att gå att visa att den givna utformningen ger så begränsade kvarstående inhomogeniteter att antagandet om en helt homogen barriär kan försvaras.

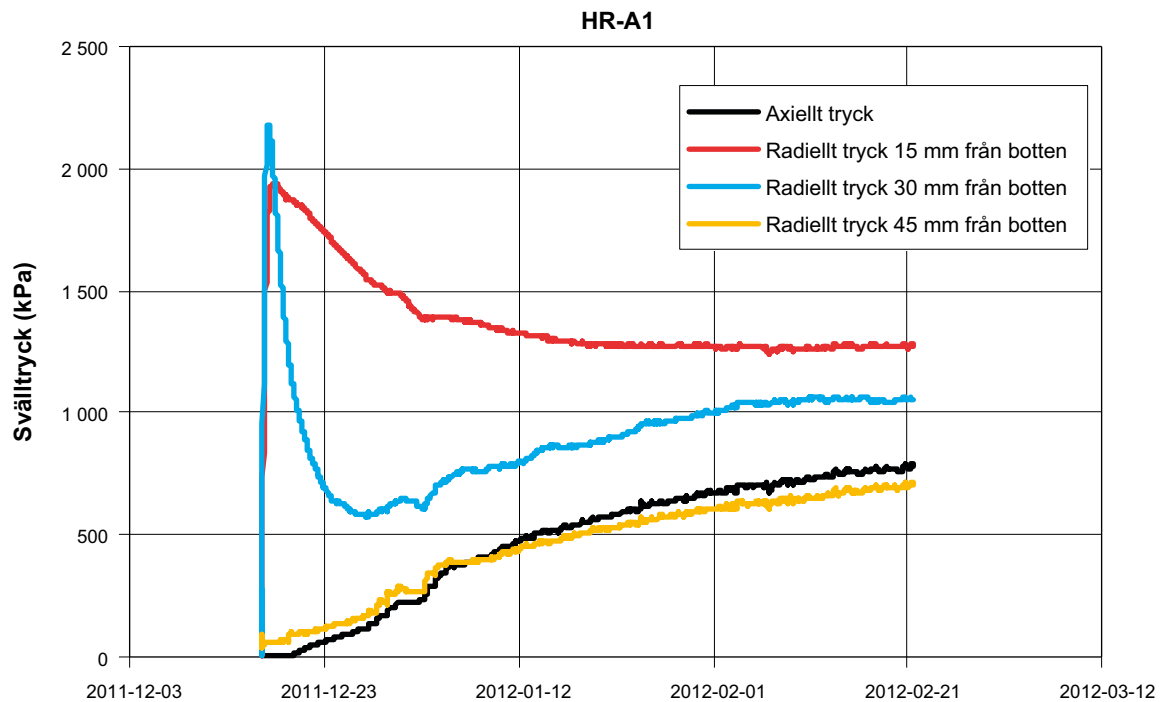
Modellering av en del av försöken pågår inom Task Force EBS. Resultaten visar att det finns svårigheter i att modellera expansion av bentonit. Det finns brister både i den fundamentala förståelsen och i de numeriska lösningarna.

Program

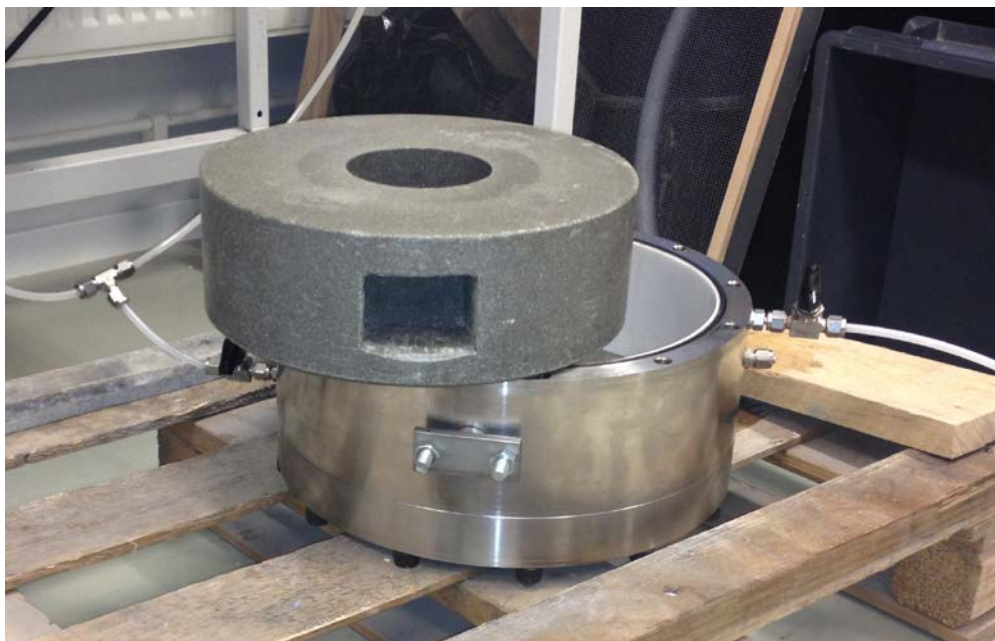
Programmet med laboriestudier kommer att fortsätta för att belysa svällning och homogenisering vid långsam vattentillförsel. Modelleringen i Task Force EBS kommer också att fortsätta. Där är ett av syftena att modellera självläkning i ett testfall där en bit bentonit har sågats bort från ett block (figur 10-6). Det har visat sig att detta fall är svårt att hantera, framför allt numeriskt, och fortsatt arbete behövs.



Figur 10-4. Försöksuppställning som används för axiella svälltester (HR-A). Vatten tillförs endast från ett filter placerat ovanför provet (Dueck et al. 2014).



Figur 10-5. Tidsutvecklingen av svälltrycket från prov HR-A1. I det här testet var den ursprungliga bentoniten 40 mm hög med en torrdensitet på 1666 kg/m³ och svällde ut till 50 mm (Dueck et al. 2014)



Figur 10-6. Utsågat hål i sidan av ett bentonitblock. Detta experiment används som modelleringsuppgift i Task Force EBS.

Frågan om hur den installerade bentonitbarriären homogeniseras är gemensam för alla avfallsprogram där bentonit används i buffert, återfyllning eller pluggar. I samtliga fall installeras block och/eller pelletar tillsammans med, för installationen nödvändiga, tomrum. För att barriären ska få de egenskaper som eftersträvas krävs att homogeniseringen är tillräckligt effektiv. För att visa detta behövs både en grundläggande förståelse samt prediktiva modeller för processen. Det finns därför ett initiativ till ett nytt EU-projekt som ska fokusera på homogenisering av bentonit (Beacon). Förhoppningen är att projektet kan starta under 2017.

10.1.4 Ångcirkulation

Frågor har uppstått om huruvida vatten från bergsprickor kan förångas mot kapseln och transporteras ut i återfyllningen och genom denna process orsaka saltanrikning mot kapseln, som, om den är omfattande, möjligtvis skulle kunna orsaka korrosion, (bastueffekten, se figur 10-7). SKB:s uppfattning är att detta inte kan inträffa i någon omfattning som är skadlig för kapseln eller bentoniten, i och med att vatten inte förväntas transporteras ut från deponeringshålet, och ett försöksprogram för att verifiera detta pågår.

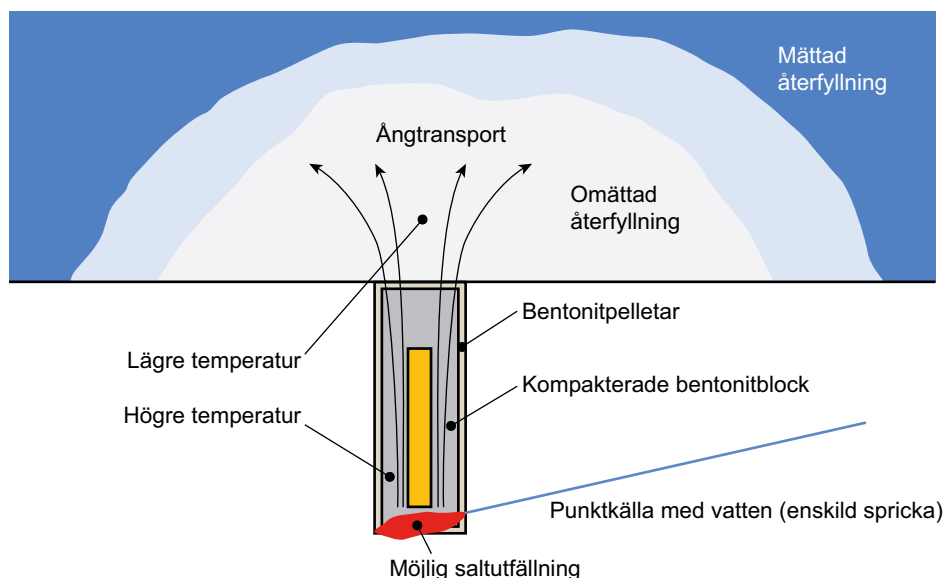
Nuläge

En uppsättning tester har utförts där transport av vattenånga i en spalt mellan bentonitblock och en värmare (i form av ett kopparrör) har studerats (figur 10-8). Syftet med dessa tester är att bättre förstå hur vattenånga interagerar med omättade kompakterade bentonitblock. En förståelse för sådana processer är central för att kunna utvärdera bastueffekten. Syftet är att visa att bildad ånga stannar i deponeringshålet och inte transporteras ut, vilket skulle kunna medföra en anrikning av salt vid kapseln.

Resultaten visar att vattenånga kan transporteras relativt obehindrat i spalten mellan värmare och bentonitblock i de fall där det översta blocket (locket) inte var på plats. Detta trots att blocken hade relativt låg initial vattenhalt och en stor affinitet för att ta upp vatten. Denna observation stämmer dock överens med resultat från liknande försök där man använt pelletter istället för bentonitblock (Birgersson och Goudarzi 2016).

Försöken visar också att bentonitblocken tar upp vatten genom lokal kondensation och inte direkt från ångfasen. När det översta blocket (locket) är på plats kondenserar vatten, mer eller mindre, slumpmässigt på olika ställen i försöket. Dessa kondensationszoner fungerar sedan som sänka och fortsätter att ta upp mer vatten. En konsekvens av bildandet av kondensationszoner är att bentonitblocken får en tendens att spricka (figur 10-9).

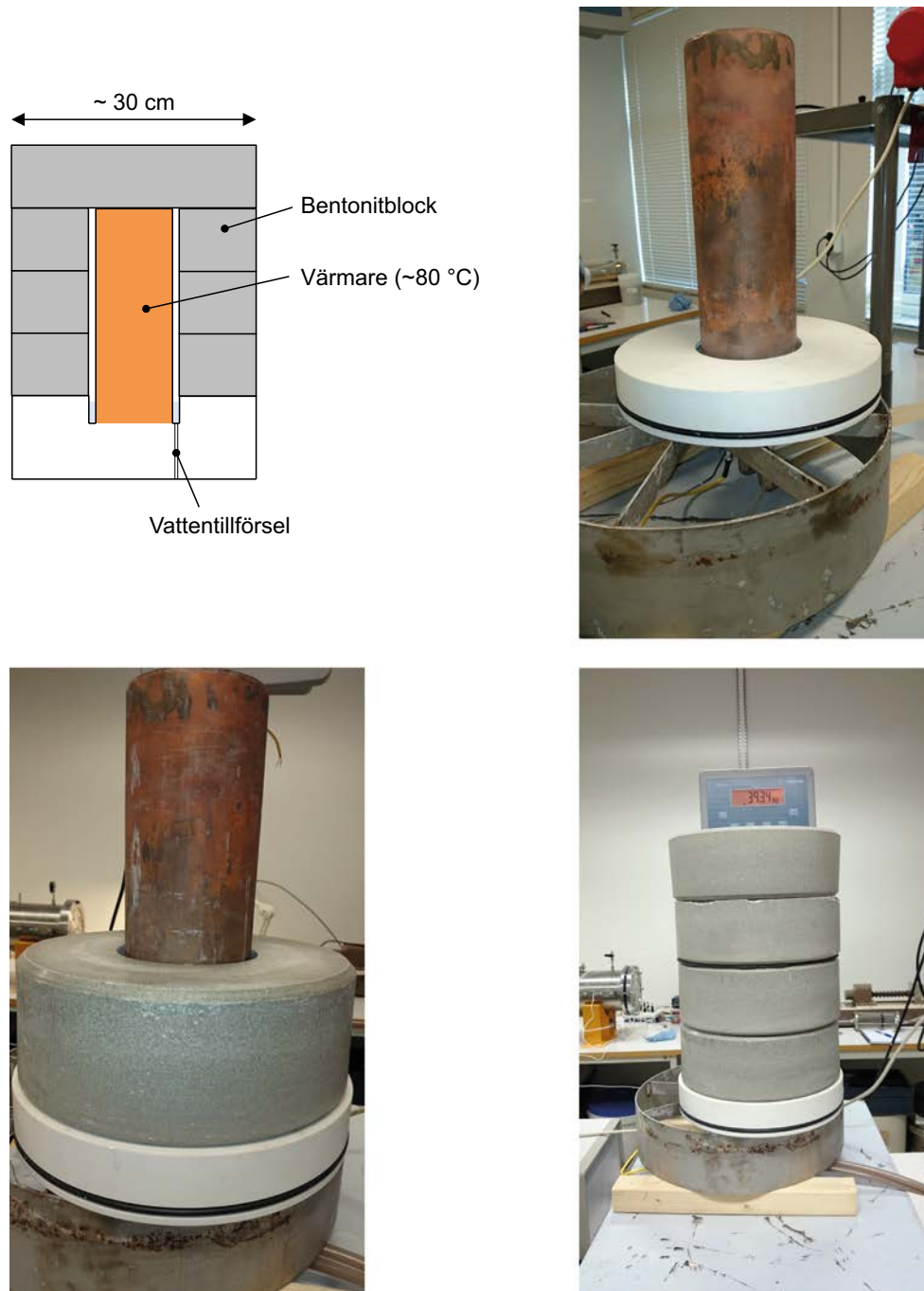
Testerna med översta blocket (locket) på plats visar att lokal kondensation effektivt hindrar vattenånga från att transporteras ut ur buffertsystemet. Detta antyder att ångtransport ut ur deponeringshålet och in i återfyllningen inte kommer att förekomma.



Figur 10-7. Schematisk figur av den så kallade bastueffekten där salt anrikas runt kapseln när ånga transporteras ut ur deponeringshålet (Birgersson och Goudarzi 2016).

Program

Resultaten som presenteras i Birgersson och Goudarzi (2016), visar att lokala kondensationszoner kommer att förhindra att ånga transporteras ut från ett deponeringshål. Resultaten visar också att ånga kan transporteras snabbt i spalter, vilket i sin tur gör att det i det här läget inte går att utesluta begränsade saltanrikningar på kapseln. Programmet med ”bastuförsök” kommer därför att fortsätta och fokus kommer att ligga på att studera saltanrikning samt att utreda vad konsekvenserna blir när vatten tillförs genom ett bottenblock av bentonit, i stället för ett rör, vilket var fallet i de tidigare försöken.



Figur 10-8. Uppe till vänster: Schematisk bild av försöksuppställningen. Uppe till höger: Värmaren (kopparrör) och bottenplattan. Nere till vänster: En bentonitring monterad. Nere till höger: Tre bentonitringar och det massiva övre blocket monterade. Hela uppställningen är placerad på en våg (Birgersson och Goudarzi 2016).



Figur 10-9. Exempel på ett block med en begynnande kondensationszon och de sprickor som denna har orsakat.

10.1.5 Mikrobiell sulfidbildning

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 kapselkorrodanter 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 korrodanter som finns tillgängliga i gasfas i tunnlar och deponeringshål. Mängden syre kan enkelt uppskattas med tillgänglig tomvolym. Även om det är inte är troligt, så går det inte att helt utesluta att svavelväte skulle kunna bildas genom upplösning av sulfidmineral eller mikrobiell sulfatreduktion i den omättade bufferten och återfyllningen. I 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 tunnlar. 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 grundvattnet 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 1 viktprocent organiskt kol. Detta krav är oberoende av formen av det organiska kolet.

Nuläge

Under senaste forskningsperioden utfördes en serie försök för att undersöka om det finns ett ”vattenmättnadsfönster” i bufferten där mikrobiell aktivitet skulle vara mer gynnad än i de omättade blocken eller den mättade bufferten. Tyvärr visade det sig att den experimentella tekniken var otillräcklig och inga slutsatser kunde dras från försöken. Frågan om ett vattenmättnadsfönster är dock inte så kritisk eftersom den förutsätter att sulfat och näringsämnen tillförs bufferten, och är vattenmättnaden långsam så kommer tillförseln också att vara det.

För att få en uppfattning om vilka halter av organiskt material som kan förekomma i olika bentoniter och i vilken form det organiska materialet är, har SKB skickat prover till ett kommersiellt laboratorium för analys. En sammanfattning av resultaten finns presenterade i tabell 10-1. Mätningarna visar att de flesta av de studerade materialen innehåller mycket låga halter organiskt material. På grund av de låga halterna är det mycket svårt att avgöra vilken typ av organiskt material det rör sig om. Det verkar dock som om typen beror på bentonitens ursprung och ålder. De detaljerade analyserna antyder att det organiska materialet i Asha-lera till stor del består av brunkol från trä, medan ursprunget i lerorna Ibeco och GMZ kan vara alger och nedbrutna alger.

Tabell 10-1. Totalt organiskt kol och vitrinit reflektans hos fem olika bentonitprover

Material	Totalt organiskt kol (LECO) (vikt-%)	Vitrinit reflektans Medelvärde (% Ro)
Mx-80 (USA)	0,13	Inga korn kunde mätas
Asha (Indien)	0,06	0,65
Ibeco Deponit Ca-N (Grekland)	0,04	0,54
GMZ (Kina)	0,04	0,52
Calcigel (Tyskland)	0,05	Inga korn kunde mätas

Program

I arbetet med konstruktionsförutsättningarna har det blivit uppenbart att det måste finnas ett krav på den mängd/halt svavelväte som genereras av den installerade återfyllningen för att minimera risken för kapselkorrosion från gasformigt svavelväte under den omättade perioden. För att visa att detta krav kan uppfyllas kommer mätningar av svavelväte i jämvikt med bentonit att genomföras.

SKB avser att skicka ytterligare bentonitprover för analys av det organiska innehållet.

10.2 Bentonitmaterialets egenskaper i mättat tillstånd

Lerbarriärernas huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln i Kärnbränsleförvaret, att begränsa vattenflödet 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 ska inte signifikant försämra övriga barriärers funktion.

De viktiga egenskaperna är då hydraulisk konduktivitet, svälltryck och skjuvhållfasthet. Tidigare har SKB försökt relatera dessa egenskaper till bentonitmaterialets torrdensitet och montmorillonithalt. Det har visat sig att detta är en bra relation för ett givet bentonitmaterial, men att det inte stämmer helt och hållet i en jämförelse mellan olika material. Det finns andra parametrar hos bentonit som också påverkar de hydromekaniska egenskaperna. Den nya strategin är därför att ta fram unika samband mellan hydraulisk konduktivitet, svälltryck och skjuvhållfasthet som funktion av torrdensitet för alla bentonitmaterial som är möjliga att använda vid slutförvaring.

Hydraulisk konduktivitet och svälltryck är de viktigaste egenskaperna hos lerbarriärerna i samtliga förvar. Skjuvhållfastheten är däremot framför allt av betydelse för bufferten i Kärnbränsleförvaret.

10.2.1 Materialsammansättning

Nuläge

Ett materiallaboratorium har satts upp för avancerad analys av bentonitmaterial på Äspö. Ett av dess syften är att genom att analysera prover från de stora bentonitleveranser som beställs av SKB:s olika projekt, lära sig mer om metoderna och om hur kvaliteten på leveranserna varierar. För att få

så representativa data som möjligt behövs en förbättrad provtagningsmetodik jämfört med vad som använts tidigare. En sådan metod som testats är provtagningspjut och en av slutsatserna är att spjutets diameter samt bentonitgranulernas storlek har stor betydelse för provtagningen rent praktiskt. Pulver röntgendiffraktion (XRD), röntgenfluorescensspektroskopi (XRF) och katjonutbyteskapacitet (CEC) har visat sig vara värdefulla metoder för att studera bentonitlerans variation i sammansättning med avseende på kristallina faser, elementär sammansättning och montmorillonithalt. Inom försöket Alternativa buffertmaterial (ABM) analyseras ett stort antal bentoniter av ett antal olika internationella team vilket fungerar som en typ av benchmarktest för respektive laboratorium.

Program

Fortsatt arbete kommer att utföras för att förbättra kunskaperna kring provtagning, analys och hur väl de indirekta materialparametrar som undersöks kopplar till de mer svåranalyserade kritiska egenskaperna som svälltryck och hydraulisk konduktivitet.

10.2.2 Svälltryck och hydraulisk konduktivitet

Nuläge

I det materiallaboratorium som byggts på Äspö (se avsnitt 10.2.1) har nio mätceller installerats (figur 10-10) för att med stor kapacitet kunna mäta svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Målet är att ytterligare förbättra kunskaperna kring olika bentonitmaterial och hur de kan variera inom samma leverans eller mellan olika leveranser. Mätningarna tar lång tid och är relativt komplexa, varför kvalitetskontrollen måste kompletteras med andra metoder, som förutom att de är snabbare också ligger närmare de som i dag används av bentonitleverantörerna. I metoden som tagits fram mäts hur svälltrycket varierar med densiteten. Mätningar görs med både avjonat vatten och med 1 molar kalciumkloridlösning för att se maximal respektive minimal svällning av leran. Parallella mätningar görs i Finland i samarbete med Posiva för att säkerställa metodens reproducerbarhet och för att få mer statistik om hur materialen varierar.

Prov har tagits på bentoniten i silon i SFR och de hydromekaniska egenskaperna har studerats (Johannesson et al. 2015). Ett exempel på resultat är mätningar av svälltryck som finns redovisade i figur 10-11. Generellt visade studien att silomaterialet liknar MX80 i de flesta avseenden. Svälltrycket är något lägre och den hydrauliska konduktiviteten är något högre för samma torrdensitet, men effekten av jonbytet till kalcium är också mindre, vilket är en fördel i silomiljön.

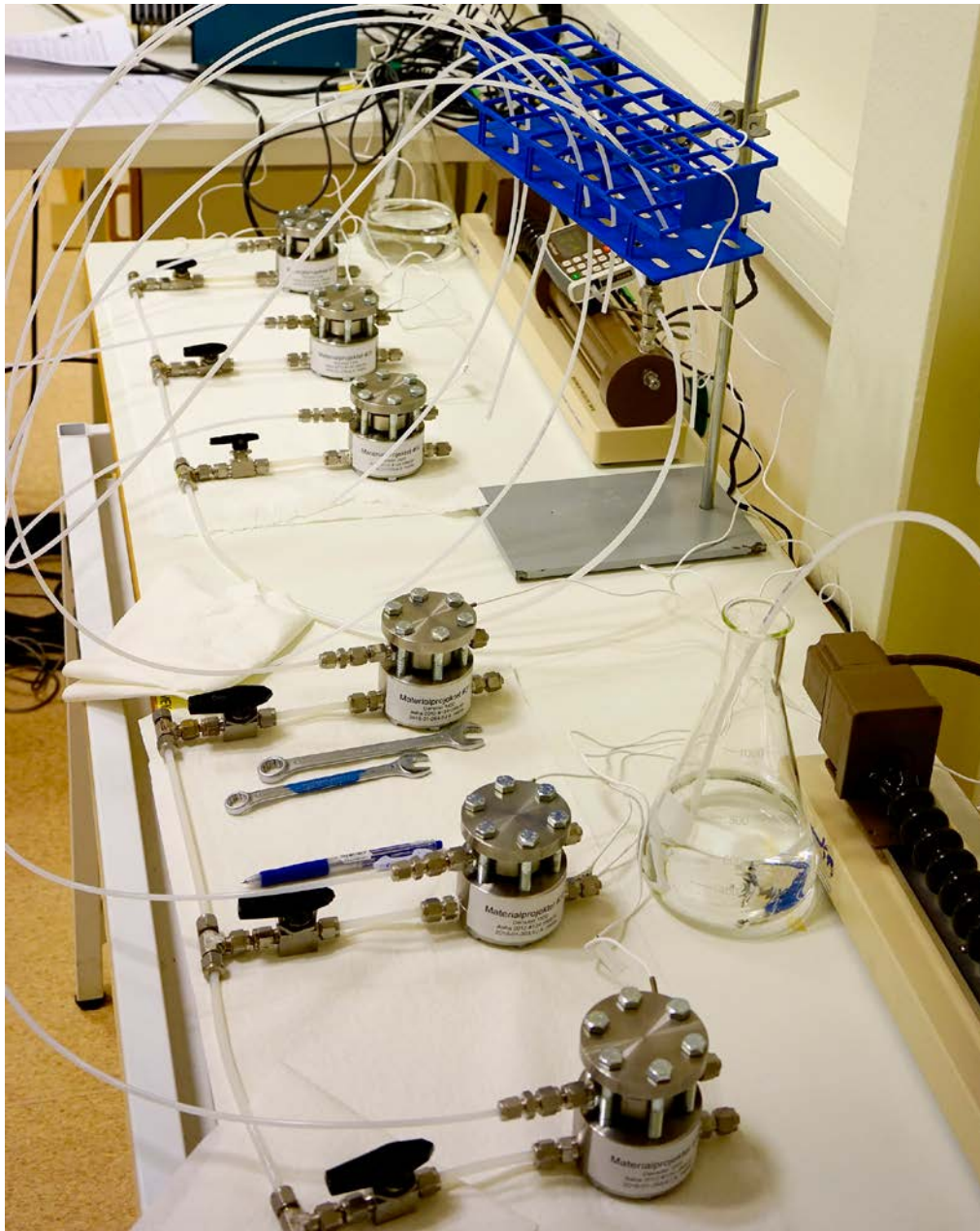
Program

Fortsatta mätningar planeras för att förbättra kunskaperna om mätmetoden, hur olika bentoniters egenskaper varierar och hur de varierar inom en och samma leverans. Svälltryck och hydraulisk konduktivitet mäts integrerat i ett och samma test. Det finns indikationer på att pålagda yttre vattentryck i vissa fall kan öka svälltrycket något, detta ska utredas ytterligare.

10.2.3 Skjuvhållfasthet

Nuläge

Bentonitens skjuvhållfasthet är 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 genomförts tyder på att det också finns andra parametrar som påverkar. Eftersom SKB har definierat ett tekniskt utformningskrav för skjuvhållfasthet är det nödvändigt att testa alla aktuella buffertmaterial. Utveckling och testning av en standardtestmetod pågår. Huvudprincipen är att mäta den exakta tryckhållfastheten vid en given deformationshastighet och för en torrdensitet som motsvarar svälltrycket 10 MPa för materialet i fråga. Mätningarna görs både för materialet som det är vid leverans samt ett helt kalciumjonbytt material.

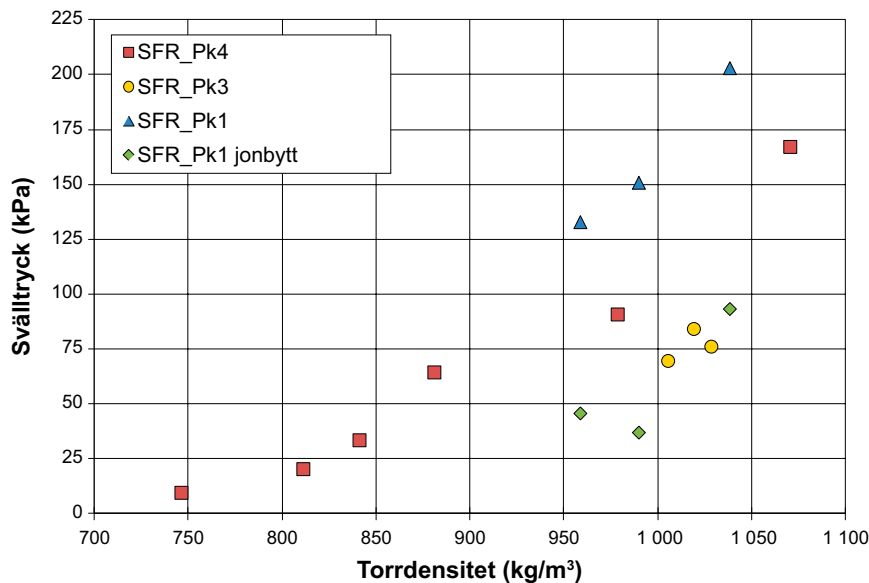


Figur 10-10. Mätning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet i materiellaboratoriet på Äspö.

Program

Det begränsade dataunderlag som finns tillgängligt tyder på att det är större skillnad i hållfasthet mellan olika material än vad som tidigare förväntats. Detta innebär att hållfastheten kommer att bli en viktig parameter vid valet av buffertmaterial. Den allmänna synen från 1990-talet och framåt har varit att ett jonbyte till kalcium ökar hållfastheten. De senaste mätningarna tyder på att detta kanske inte är fallet utan att det är hur jonbytet sker som påverkar hållfastheten, inte själva jonbytet.

Dessa faktorer gör att det kommer att behövas ytterligare mätningar av hållfastheten, dels för att få ytterligare förståelse för processen, dels för att få mer data. Det är också viktigt att utröna hur prepareringen av proven påverkar resultaten.



Figur 10-11. Svälltryck som funktion av torrdensitet hos bentonitmaterialet i silon i SFR. De röda punkterna är mätta med typiskt vatten från SFR (salthalt 0,61 procent), de blå är mätta i avjonat vatten och de gröna är mätta efter fullständigt kalciumjonbyte i en 0,1 molar kalciumkloridlösning (Johannesson et al. 2015).

10.3 Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad

När bentoniten har nått vattenmättnad och de önskade egenskaperna har uppnåtts är det viktigt att dessa egenskaper behålls under den tid som förvaret i fråga väntas fungera.

För ökad förståelse av bentonitmaterialets utveckling efter mättnad krävs insatser framför allt kring buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion samt kring mikrobiell sulfidbildning och sulfidtransport i buffert och återfyllning. Insatser krävs också kring långsiktig stabilitet med hänsyn tagen till temperatur, järninnehåll och cement (SFL). Mindre insatser krävs kring växelverkan bentonit/koppar samt för gastransport. Försök behöver genomföras för att verifiera adekvat hantering av diffusion i bentonit samt av överföring av vattenlösta ämnen mellan bentonit och grundvatten, i analysen av säkerhet efter förslutning.

10.3.1 Buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion

Upptaget av vatten och den resulterande svällningen av bentonitbufferten i Kärnbränsleförvaret förhindras av deponeringshålets väggar och därigenom utvecklas ett svälltryck i bentoniten. Om sprickor skär deponeringshålet 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.

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.

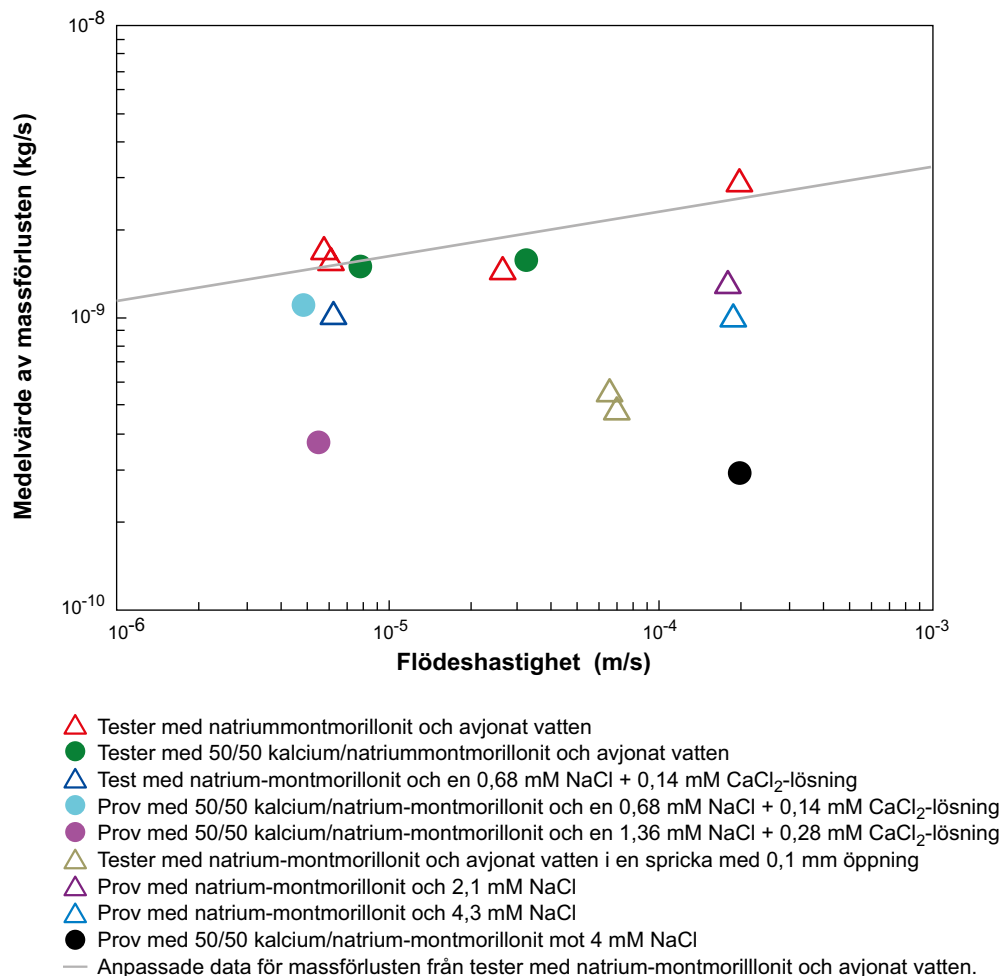
Nuläge

Den huvudsakliga delen av forskningen och teknikutvecklingen kring bentoniterosion den senaste perioden (2012–2016) har genomförts inom EU-projektet Belbar.

För erosionsprocessen studerades specifikt

1. mekanismer för kolloidfrigörelse
2. rollen av tvåvärda katjoner (lerans sammansättning)
3. effekten av blandade monovalenta/divalenta system (grundvattenkemi)
4. beroendet mellan grundvattenhastigheten och erosionshastigheten
5. effekten av sprickgeometri på massförlust av lera
6. maximal förlusthastighet av lera.

Sammansättningen av både leran och grundvattnet är avgörande för erosionsprocessen. Erosion kan bara förekomma i grundvatten med en sammansättning som ligger under en viss jonstyrka. De högsta uppmätta erosionshastigheterna uppkommer alltid i system med ren natrium-montmorillonit och avjonat vatten. Erosionshastigheten sjunker med ökande jonstyrka. Ren kalcium-montmorillonit eroderar inte, men det behövs inte mycket natrium i systemet för att erosionen ska starta. Naturlig Febex-bentonit till exempel, eroderar trots att den bara innehåller ~25 procent natrium i jonbytesposition. I horisontella sprickor sker erosionen genom dispersiv frigörelse av partiklar från den utsvällda fronten, medan den i lutande sprickor i huvudsak sker genom strukturell kollaps och sedimentation. I de experiment som genomförts har materialförlusten varit avsevärt högre i lutande sprickor än i vertikala sprickor. Flöde hastigheten i sprickorna verkar vara av underordnad betydelse för erosionen, i synnerhet i jämförelse med de geokemiska förhållandena (figur 10-12). I väldigt utspädda system (avjonat vatten) finns det en korrelation mellan flöde och erosion, men med stigande jonstyrka blir den mycket otydlig. I vertikala sprickor finns ingen korrelation mellan massförlust och flöde.



Figur 10-12. Experimentellt observerade massförluster i en horisontell artificiell spricka med 1 mm öppning uttryckt som funktion av strömningshastigheten. Linjen motsvarar anpassade data för massförlusten från tester med natrium-montmorillonit och avjonat vatten.

I SR-Site modellerades utträngning och erosion av bentonit i en spricka som skär ett deponeringshål med ett analytiskt uttryck baserat på resultat från en dynamisk expansionsmodell. I detta arbete identifierades även att sofistikerade finita elementmetoder inte kunde lösa detaljerna i en mycket skarp front i kantregionen av den expanderande gelen. En två-region-modell, som undviker vissa problem i det tidigare arbetet har utvecklats och testats. Modellen delar den expanderande leran i en spricka i två regioner: en region där leran beter sig som en Binghamvätska som inte kan flyta men kan expandera genom de repulsiva krafterna mellan bentonitpartiklarna, och en kantregion som omger den förra, där den gel/sol som bildas, kan flyta och föra bort de bentonitpartiklar som diffunderar in i denna region. Denna två-region-modell ger resultat som är mer exakta än de som tidigare gavs av den helt kopplade dynamiska expansionsmodellen tack vare en mycket högre upplösning i den region där erosionsförlusten inträffar.

Räkneexempel visar att det finns två stora skillnader mellan de tidigare resultaten och de som erhållits genom den nya två-region-modellen. Den senare förutspår betydligt mindre förlust av bentonit till det strömmande vattnet. Detta i sin tur får bentoniten att expandera mycket längre ut i sprickan eftersom en mindre mängd förloras till vattnet. Förlusten av bentonit från deponeringshålet beräknas dock som summan av den expanderade och den eroderande mängden. Det går inte att göra en direkt jämförelse av massförlusten mellan den gamla och den nya modellen, eftersom den förstnämnda enbart beräknade den eroderade mängden. För vattenhastigheter på 10^{-6} m/s och högre är dock den beräknade förlusten ungefär en faktor två högre med den nya modellen, medan lägre hastigheter ger en större skillnad. Denna nya modell hanterar i dagsläget inte effekterna av gravitation eller påverkan från andra mineral än bentonit.

Det finns i dag ingen kvantitativ modell som kan hantera massförlust orsakad av gravitation eftersom det inte har varit möjligt att kvantifiera några av de viktigaste kopplade mekanismerna i syfte att utforma en prediktiv modell för förlust av bentonit. I stället för att modellera transporthastigheten av de frigjorda bentonitagglomeraten i sprickorna, har en övre gräns av förlusten av bentonit härletts, baserat på att förlusten från bufferten inte kan vara större än den mängd som kan transporteras bort i sprickorna. Bentonitförlust från ett deponeringshål på grund av att bentonitagglomerat dras av tyngdkraften begränsas således av graden av agglomerattransport i sprickorna.

Program

En observation från Belbar är att uppmätt erosion i försök i olika laboratorier kan variera avsevärt även om de experimentella förutsättningarna har varit relativt lika. Orsakerna till detta är oklara och har inte utvärderats inom ramen för projektet. Ett viktigt arbete med att analysera, utvärdera och tolka det omfattande experimentella datamaterial som finns tillgängligt återstår därför och kommer att behöva genomföras under den närmaste perioden. Utan entydigt tolkade experimentella data är det svårt att verifiera de modeller som ska användas i kommande analyser av säkerhet efter förslutning.

Experiment med massförlust i artificiella vertikala sprickor genomfördes inom Belbar och visade att förlusten på grund av gravitation var större än tidigare förväntat. I en vertikal eller lutande spricka sker massförlusten i huvudsak inte som en frigörelse av kolloider, utan snarare som en sedimentation till följd av minskad draghållfasthet hos den expanderande gelen. Dataunderlaget från försök i lutande sprickor är fortfarande för begränsat för att några slutsatser ska kunna dras om betydelsen av processen för säkerheten efter förslutning. Det kommer därför att bli nödvändigt med ett relativt omfattande försöksprogram.

Modellen som användes för buffertförlust i SR-Site kommer att vidareutvecklas. Den vidareutveckling som beskrivs under nuläge kommer att läggas in i en kvantitativ modell som kan användas i analyser av säkerhet efter förslutning. Den nya två-region-modellen kommer också att behöva testas mot de experimentella data som tagits fram inom Belbar. Vidare kommer den enkla, gränssättande modellen för effekten av gravitation/sedimentation att behöva testas mot de nya data som tas fram inom det experimentella programmet.

En ytterligare effekt som inte har studerats är erosion i en situation när massförlusten varit så stor att advektiva förhållanden råder i deponeringshålet. Detta kan beskrivas med en given koncentration av kolloider och den modell som används inom radionuklidtransport för överföring av lösta ämnen från ett deponeringshål till grundvattnet i en omgivande, flödande spricka. Det finns dock inga experimentella data som stöder denna hantering. Det kommer därför att bli aktuellt med något enklare experiment.

Avsikten är att genomföra hela programmet för buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion i samarbete med Posiva.

10.3.2 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 relevanta för SFR och SFL.

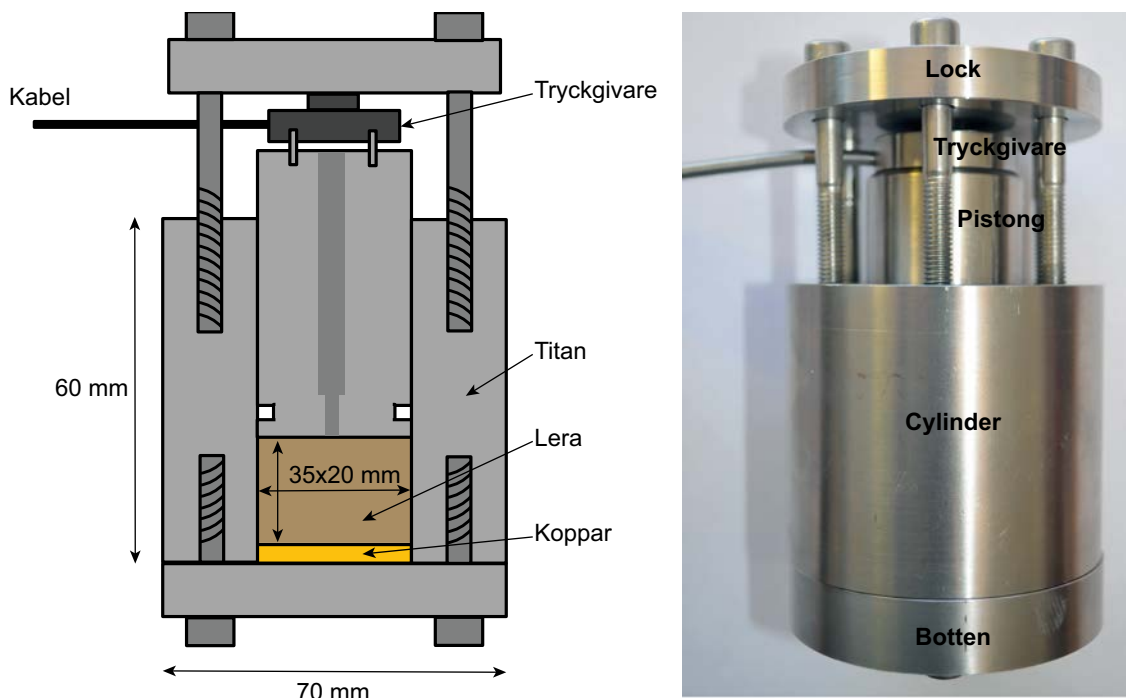
Nuläge

Bentonit-/vattenblandningar med olika viktprocent bentonitlera (w/w) har analyserats med avseende på löst sulfid. Den våtkemiska metod som har använts för kvantifiering av sulfid är en SKB-metod (SKB MD 452.011 Sulfid) som bygger på svensk standard SIS 028115 (SIS 1976).

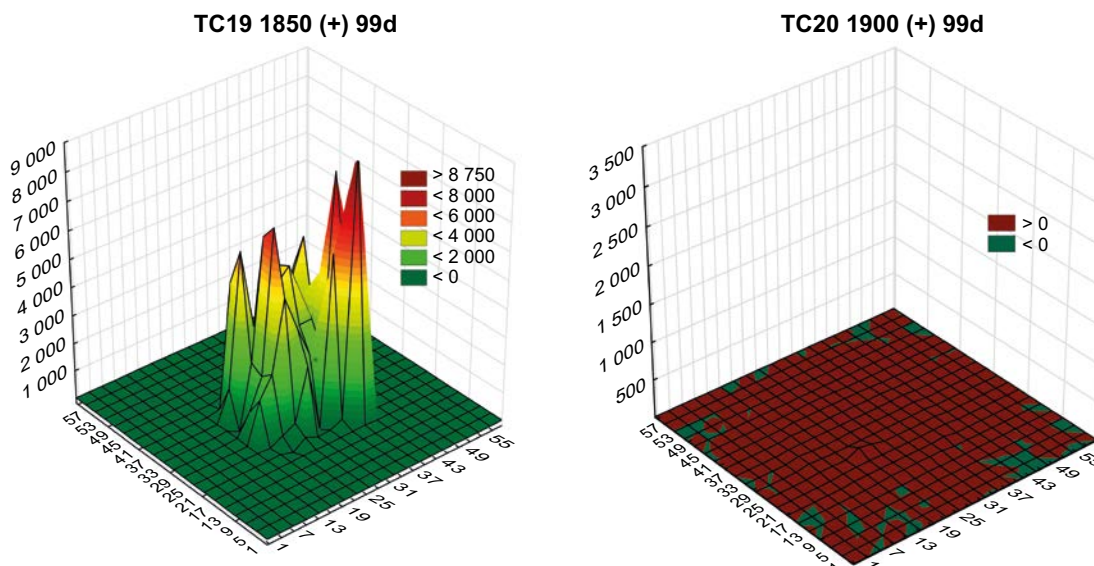
I inledande försök fick 1, 5 och 10 viktprocent opreparerad Ibeco-bentonit (Ibeco-RWC-BF 2011) jämvikta med kokat och avgasat kranvatten samt vatten från Äspölaboratoriet i winklerflaskor under fem dygn. Efter separering av vätskefas till nya flaskor och konservering med natriumhydroxid och zinkacetat, utfördes analys med ovan nämnd metod. Den uppmätta koncentrationen sulfid låg under SKB-metodens detektionsgräns (0,006 mg/l).

För att undersöka svälltryckets påverkan på aktiviteten av sulfatreducerande bakterier har en speciell testutrustning utvecklats (figur 10-13). Principen med utrustningen är att ett bentonitprov laddas med en bakteriecocktail, pressas till en given densitet och förmättas med vatten. Provet flyttas sedan till testcellen där det förses med ett kopparbleck på undersidan och en lösning med sulfat, med tillsatt radioaktivt svavel på översidan där också ett näringsämne injiceras. Efter en given tid kan aktiviteten av mikrobiellt bildad sulfid mätas på kopparblecket.

Figur 10-14 visar uppmätt aktivitet på kopparblecket i ett test med Calcigel-bentonit med mättad densitet av 1 850 respektive 1 900 kg/m³ (motsvarar torrdensitet på ~1 310 respektive ~1 380 kg/m³). De uppmätta svälltrycken för de två proven var ~400 respektive ~750 kPa. Resultaten visar att den mikrobiella aktiviteten försvinner över en mättad densitet någonstans i intervallet 1 850–1 900 kg/m³.



Figur 10-13. Vänster: Ett schematiskt tvärsnitt av en testcell. Höger: En sammansatt testcell. Från Bengtsson et al. (2015).



Figur 10-14. Uppmätt aktivitet i två prover med Calcigel med mättad densitet av 1 850 respektive 1 900 kg/m³.

Program

Då alla observationer tyder på att bentoniten absorberar eller omvandlar vattenlösta sulfider kommer inga nya försök genomföras i syfte att mäta jämviktskoncentrationen av sulfid mot bentonit utan tillsatta sulfider. Nya försök kommer göras för att kvantifiera upptagning- och omvandlingsförmågan hos olika bentoniter, samt vidare utreda mekanismen för hur detta sker.

Resultaten från studierna av begränsning av mikrobiell aktivitet i kompakterad bentonit tyder på att det finns en klar gräns över vilken ingen aktivitet förekommer. För ett givet material kan denna gräns uttryckas i torrdensitet. Detta är till stor hjälp både för definitionen av en säkerhetsfunktion och för ett tekniskt utformningskrav. De data som finns tillgängliga i dag tyder dock på att det inte är bara densitet och/eller svälltryck som styr den mikrobiella aktiviteten utan att typen av lera också kan spela stor roll. Detta visar att förståelsen i nuläget är ofullständig för de parametrar som styr processen och av det skälet behöver alla krav vara materialspecifika. Planen är därför att fortsätta försöken med nya material, dels för att försöka ta reda på vad det är som avgör den mikrobiella aktiviteten, dels för att bedöma vilka material som är mer, eller mindre, lämpade som buffertmaterial, men också som återfyllningsmaterial. De här resultaten har stor betydelse för framtida utformning av buffert och återfyllning samt analyser av säkerhet efter förslutning. Hittills har försöken gjorts vid ett enda laboratorium varför SKB även planerar en oberoende verifiering av resultaten.

10.3.3 Självläkning 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 självläker. Programmet för detta beskrivs i avsnitt 10.1.3.

10.3.4 Långsiktig stabilitet av bentonit

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.

Nuläge

Prototypförvaret är ett fältförsök i Äspölaboratoriet i full skala som simulerar samverkan mellan kapsel, buffert och återfyllning i ett slutförvar. Försöket omfattar sex deponeringshåll fördelat på en inre sektion (fyra håll) och en yttre (två håll). Mellan 2010 och 2011 bröts den yttre sektionen efter åtta år av värmning vid cirka 100 °C på kapselytan (Svemar et al. 2016). Kemiska undersökningar av bentoniten från de två deponeringshållen gav inga indikationer på omvandling av montmorillonit-mineralet. Hydromekaniska undersökningar visade inte på några större skillnader i svälltryck mellan den ursprungliga leran och den återtagna. Trimmade (utsågade) prover hade något lägre hydraulisk konduktivitet jämfört med ursprungsleran, speciellt vid höga densiteter, men det fanns ingen koppling till lerans placering (temperatur) i försöket. Leran från försöket var något sprödare jämfört med referensleran. Mängden magnesiumoxid ökade något mot värmaren, vilken fas denna var bunden i kunde inte bestämmas. Mössbauerspektroskopi och röntgenabsorptionsspektroskopi (XANES) visade på en höjning av järn(II)/järn(III)-kvoten i bentoniten samtidigt som kemidata visade på en opåverkad total nivå av järn. Det är sedan tidigare välkänt att järn(III) i montmorillonit kan reduceras till järn(II) under vissa förhållanden, dock är reduktionsmedlet i Prototypförsöket ännu ej identifierat. Artefakter från den elektriska värmaren kan dock inte uteslutas.

I ABM-försöket, som är ett fältförsök i mindre skala i Äspölaboratoriet, installerades tre försökspaket under 2006 och ytterligare tre under 2012. Det första försöket bröts 2009 och det andra 2013. ABM-försöken är komplexa då de inkluderar ett stort antal olika bentoniter i samma försök samt en korroderande järnvärmare, vilket gör att analysarbetet blir omfattande med avseende på jonbytesreaktioner, utfällningar av salter, omvandlingar/nybildningar, redoxreaktioner och bildning av korrosionsprodukter. I det andra ABM-försöket (ABM2) har i vissa prover en ökning av magnesiumoxid kunnat kopplas till en nybildning av vad som verkar vara en trioktaedrisk smektit, sannolikt ferrosaponit (Svensson 2015). Den nybildade smektiten fanns i små mängder i den innersta millimetern från den korroderande järnvärmaren och det går inte i nuläget att säga om det är en omvandlingsprodukt av montmorillonit eller om mineralet bildats genom omvandling av andra faser som exempelvis vulkaniskt glas, utbytbar magnesium från montmorilloniten och järn från den korroderande värmaren. Saponit och ferrosaponit är liksom montmorillonit också svällande lermineral men förväntas ha något annorlunda egenskaper. Indikationer på trioktaedriska faser observerades även i det första ABM-paketet och i TBT-försöket (TBT, Temperature buffer test) (Svensson och Hansen 2013). Bildningen av trioktaedriska faser verkar vara kopplad till järnkorrosionen då bildning av trioktaedrisk smektit inte observerats i försök med koppar.

I naturen finns mikrober som i en del av sin ämnesomsättning kan reducera järn(III), så kallade järnreducerande bakterier (IRB). Dessa har studerats vid brytningen av den yttre sektionen av Prototypförvaret, där de sporadiskt har iakttagits, speciellt nära kontakten mot berget (Svemar et al. 2016). Det finns indikationer på att dessa mikrober i vissa fall kan reducera det strukturella järnet i montmorillonit och därmed också öka sannolikheten för illitisering (Kim et al. 2004).

Program

För att studera montmorillonitomvandling som funktion av temperatur kommer prover från ABM2 att studeras vidare och ett omfattande sammanställningsarbete kommer att genomföras av redan utförda analyser av detta försök.

Det pågående LOT-försöket (LOT, Long Term test of bentonite) vid Äspölaboratoriet syftar till att identifiera och kvantifiera mineralogiska förändringar i bentoniten som följd av exponering för en förvaringsliknande miljö. Dessutom undersöks relaterade processer i bentoniten som rör kopparkorrosion, diffusion av katjoner, samt överlevnad och aktivitet hos bakterier. Avsikten är att ta upp och undersöka ett ytterligare bentonitpaket från LOT under denna Fud-period.

I BHA i SFL är interaktionen mellan högt pH och bentonit en viktig process. Det finns data som visar att upplösningshastigheten av montmorillonit vid höga pH-värden är starkt temperaturberoende (Rozalen et al. 2009). Med tanke på att temperaturen i SFL under långa tider kan förväntas ligga någonstans i intervallet 0–15 °C, är det viktigt att förstå hur interaktionen fungerar vid dessa temperaturer. Detta kommer även att kunna tillämpas på silobentoniten i SFR. Batchförsök med icke-kompakterad bentonit och mycket vatten har påbörjats på Äspölaboratoriet för att undersöka omvandlingsreaktioner. System som undersökts är alkaliska miljöer för att imitera cement-bentonit-

interaktion, samt försök med tillsatta järnreducerande mikrober för att studera om dessa kan påverka bentoniten i ett odlingsmedium. I det alkaliska systemet har reaktionen mellan löst natriumhydroxid och bentonit studerats vid 8, 25 och 80 °C. Syftet är att på sikt verifiera temperaturberoendet på omvandlingsreaktionen som tidigare studerats av till exempel Rozalen et al. (2009), och att utvidga så att även lågtemperaturdata kommer med. Preliminära resultat stödjer modellen som säger att temperaturen har en mycket stor påverkan på omvandlingshastigheten av montmorillonit. De första försöken med tillsatta järnreducerande mikrober har preliminärt inte kunnat visa på några förändringar av montmorilloniten eller någon annan kristallin fas i bentoniten. SKB arbetar också med att ta fram en kvantitativ beräkningsmodell där hänsyn kan tas till dessa data.

Försök med bentonit i odlingsmedium och tillsatta järnreducerande mikrober har påbörjats. Preliminära resultat har inte kunnat visa på några förändringar av montmorilloniten, men dessa studier kommer att fortsätta om än i liten omfattning. I ett första steg studeras om mikroberna på något sätt kan omvandla montmorilloniten till ett annat mineral, och om så är fallet undersöks om de kan göra detta även vid högre densitet och/eller utan extra näring.

10.4 Utformning av barriärer

Det underlag som redovisades i ansökan 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 deponeringstunnlar. Utifrån uppdaterade konstruktionsförutsättningar behöver utformningarna för buffert och återfyllning ses över.

En förstudie rörande SFL-anläggningens utformning har genomförts och indikerar att det krävs riktade utvecklingsinsatser avseende tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarskonstruktioner i bergssalarna.

10.4.1 Buffert i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

De uppdaterade konstruktionsförutsättningarna innebär att utformningen av bufferten i Kärnbränsleförvaret och verifieringen av att kraven uppfylls behöver uppdateras. Hur installationsmetoden för buffert och återfyllning utformas påverkar också densiteten för den installerade bufferten och därmed kravuppfyllnaden för svälltryck, hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet. Buffertmaterialet är ett naturmaterial och dess egenskaper varierar inom och mellan olika fyndigheter. Processen för att kunna handla upp och byta material och anpassa utformningen av bufferten behöver beskrivas. Detta arbete pågår inför framtagandet av PSAR.

I Johannesson et al. (2014) rapporterades ett laboratorieförsök där tidiga THM-processer i bufferten studerades. Figur 10-15 illustrerar den volym som testet utformades för att simulera. I testet utsattes två bufferttringar för den termiska gradient som förväntas under installationsfasen i Kärnbränsleförvaret och buffertskyddets funktion simulerades. Under testet bildades sprickor i blocken och vatten kondenserade och samlades i botten av försöket. Blocken var stabila och inget utfall av buffertblockbitar kunde observeras. I figur 10-15 visas en bild från brytningen av försöket. Slutsatsen från testet var att installationsmetoden inte var så robust som tidigare antagits och installationsmetoden behöver vidareutvecklas.

I Eriksson (2016) studerades alternativa installationsmetoder för bufferten. En sådan metod innebär att bufferten installeras under kontrollerad relativ fuktighet och temperatur i spalten mellan buffert och berg. En annan metod innebär att blocken beläggs med olika ämnen för att skydda dem mot hög relativ fuktighet i omgivande luft. Rekommendationen i rapporten var att inte fortsätta utvecklingsarbetet med dessa alternativ då de inte bedömdes ha tillräcklig potential.

Baserat på den kunskap om de tidiga THM-processerna, som byggdes upp under det genomförda arbetet, identifierades två installationsmetoder som har goda förutsättningar att utvecklas till en robust helhetslösning:

- I relativt torra deponeringshål installeras buffertblock och pelletar samtidigt. Det låga vatteninflöde som kommer från berget fram till att bufferten får stöd av återfyllningen absorberas av bufferten. Detta leder till en viss hävning av buffertstapeln men denna är acceptabel.
- För deponeringshål med något högre vatteninflöde används ett vidareutvecklat buffertskydd. Den senare installationsmetoden är behäftad med praktiska nackdelar som vattenpumpar med mera men förväntas endast behövas för en liten andel av deponeringshålen i Forsmark.

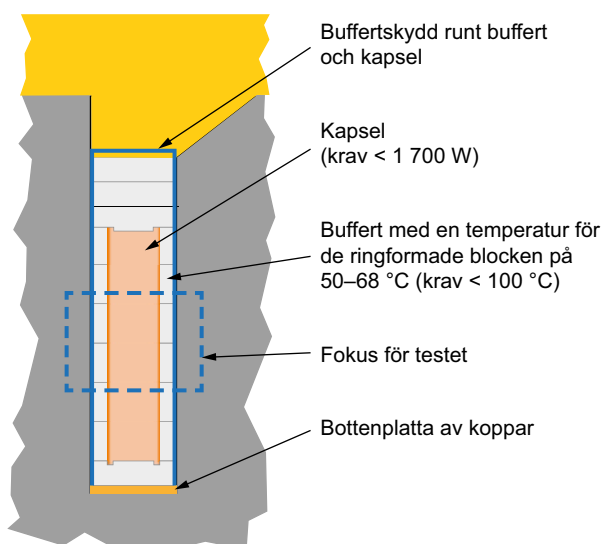
Dessa installationsmetoder utvecklas för närvarande av SKB.

Program

Som beskrivs under nuläge så pågår arbetet med att uppdatera utformningen och krav på installationsmetoder för bufferten. Detta inkluderar två fullskaliga installationstester vid Äspölaboratoriet. Enligt nuvarande installationssekvens kan tiden från det att bufferten är installerad till det att återfyllningen är på plats över bufferten vara upp till 3 månader. Bufferten expanderar under denna tidsperiod på grund av tidiga THM-processer i bufferten. Storleken på denna expansion, hävning, behöver vara känd för att bättre kunna bestämma densiteten och utformningen av bufferten. Hävningen varierar för de två installationsmetoderna samt för olika nivåer av vatteninflöden. Som en del av att bygga upp denna förståelse och korrekt kunna förutsäga hävningen utvecklas modeller av buffertens tidiga THM-utveckling. Dessa modeller kommer att verifieras genom att jämföra modellernas resultat med resultat från försök i olika skalor. Resultaten kommer att användas för att definiera för vilka typer av vatteninflöden (storlek och fördelning) som samtidig installation av buffertblock och pelletar kan användas.

För att uppdatera utformningen och verifiera kravuppfyllelse behövs underlag gällande sambandet mellan densitet och svälltryck, hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet vilket beskrivs i avsnitt 10.2.2 och 10.2.3.

För att utforma bufferten så att kraven uppfylls behövs även kunskap om hur densitet på block och pelletar varierar, hur noggrant de kan placeras i deponeringshålet samt hur geometrin på deponeringshålen förväntas variera. Kunskap om mätsäkerhet för alla mätmetoder som används i hela kedjan för kvalitetskontroll behövs också. Inför PSAR kommer variationer och osäkerheter att bestämmas eller uppskattas och en avvägd utformning av bufferten att tas fram. Därefter sker fortsatt optimering av bufferten för att åstadkomma en så robust och kostnadseffektiv installationsprocess som möjligt.



Figur 10-15. Volym som testet av tidiga THM-processer utformades för att simulera (vänster), samt foto från brytningen av försöket (höger).

10.4.2 Återfyllning i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Baserat på de tekniska utformningskrav som användes i ansökan så har utformningen av återfyllningen i Kärnbränsleförvaret vidareutvecklats och detaljerats (Arvidsson et al. 2015). För närvarande pågår en utvärdering om denna utformning uppfyller de uppdaterade krav som föreslagits. På samma sätt som för bufferten så innebär detta att utvärdera resultat från laborietester där sambandet mellan densitet och svälltryck samt hydraulisk konduktivitet bestäms. Beräkningar för hur återfyllningen begränsar buffertens uppåtriktade svällning beskrivs i Börgesson och Hernelind (2014a). Det är fallet med en omättad återfyllning och en svällande buffert som ger störst uppsvällning. Det fallet kommer därför att vara styrande för utformningskravet för återfyllningen. Modelleringen visar att det är styvheten hos pelletarna och pelletsfyllningarnas dimensioner som har störst betydelse för uppsvällningen så länge som återfyllningsblocken är intakta.

Inom ramen för vidareutvecklingen av återfyllningen har ett fullskaligt installationsförsök genomförts vid Äspölaboratoriet. I samband med detta testades återfyllningens förmåga att motverka buffertens uppåtriktade svällning. Den uppåtriktade svällningen simulerades med servostyrda domkrafter varefter kraft och deformationer mättes. Dessa resultat används för att förbättra modelleringen av återfyllningens deformation vid buffertens uppåtriktade svällning.

Program

Modellerna för hur återfyllningen motverkar buffertens uppåtriktade svällning kommer att uppdateras baserat på resultat från tester i laboratorie- och fullskala. Modellerna kommer sedan att användas för att visa att kraven på buffertens svälltryck och hydrauliska konduktivitet uppfylls. Modellerna kommer också att användas för att uppdatera utformningen av återfyllningen. Specifikationer för block och pelletar som garanterar att övergripande krav uppfylls, kommer att utredas och definieras. Detta avser främst geometri och styvhet hos pelletsfyllningarna samt tryck/skjuvhållfasthet hos återfyllningsblocken.

För att visa att återfyllningen uppfyller de uppdaterade tekniska utformningskraven så kommer resultat från laboriebestämmningar av hydraulisk konduktivitet och svälltryck att användas. Det finns ett behov av att göra tillräckligt med mätningar för att skapa ett tillförlitligt statistiskt underlag för att beskriva sambandet mellan densitet och svälltryck samt hydraulisk konduktivitet för potentiella återfyllningsmaterial. Ett grundläggande underlag kommer att tas fram för PSAR. Detta kommer sedan att kompletteras med ytterligare data under denna Fud-period.

Baserat på det successivt förbättrade underlaget kommer utformningen att optimeras för att åstadkomma en så robust och kostnadseffektiv utformning som möjligt.

10.4.3 Utformning av lerbarriärer i SFL

Nuläge

En förstudie rörande SFL-anläggningens utformning har genomförts. Förstudien indikerar att utvecklingen av tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarskonstruktioner i bergssalarna kräver riktade insatser, specifika för SFL. Även metoder för återfyllnad och material för återfyllningen av förvarsutrymmena bedöms kräva specifika utvecklingsinsatser. Återfyllnadslösningar för deponeeringstunnlar utvecklade för Kärnbränsleförvaret utgör grund för utvecklingen, men anpassningar till SFL-specifika förutsättningar, som exempelvis driftkonstruktionernas utformning, behöver göras.

Program

Under perioden pågår inventering av olika metoder för återfyllnad av bergssalen för historiskt avfall i SFL med bentonit. Studierna innefattar bland annat värdering av olika tekniska lösningar med avseende på volymer, teknisk genomförbarhet, förväntat resultat (exempelvis påverkan på svälltryck) och effekter av relevanta processer. Dessa inledande studier syftar till att utgöra underlag för nästa steg i teknikutvecklingen, vilken planeras att påbörjas efter att säkerhetsvärderingens resultat har presenterats.

10.5 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 kontroll på hela kedjan från brytning av bentonit till färdig installation av buffert och återfyllning. Arbete pågår för att kartlägga hela processen från materialanskaffning till färdig installation i syfte att beskriva respektive processteg samt de kvalitetskontroller som behöver göras för att slutligen kunna säkerställa de installerade barriärernas kvalitet (kravuppfyllnad). I detta avsnitt ges mer utförliga beskrivningar av följande områden:

- Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial.
- Tillverkning av buffertkomponenter.
- Tillverkning av återfyllningskomponenter.

10.5.1 Materialförsörjning och kvalitetssäkring av bentonitmaterial

Nuläge

SKB har inom ramen för teknikutvecklingsprojekt för buffert och återfyllning arbetat med processkartläggningar, bentonit och leverantörsstrategi samt preliminära kvalitetsplaner.

I samband med det storskaliga installationstest av återfyllning som genomförts vid Äspölaboratoriet har ett antal potentiella återfyllningsmaterial karakteriserats liksom en större mängd bentonit från Ashapura som användes i testet.

Undersökningarna på återfyllningsmaterialen kan delas upp i tre delar (Sandén et al. 2014):

- 1. Mottagningskontroll:** Tester har utförts på ett stort antal prover som har tagits från de olika storsäckar som materialet levererades i. Testerna omfattade bland annat bestämning av vatteninnehåll, svällindex och CEC. Kontrollen av Asha 2012 innefattade även bestämning av flytgräns och kornstorleksfördelning.
- 2. Hydromekaniska tester:** Dessa tester innefattade bestämning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet, hållfasthet hos kompakterade prover, kompressibilitet hos vattenmättad återfyllning samt en undersökning av hur kompakterade lerprover påverkas vid exponering för hög relativ fuktighet.
- 3. Kemiska och mineralogiska undersökningar:** Denna del innefattade XRD-analys, bestämning av utbytbara katjoner samt kemisk analys av materialen.

Resultaten från undersökningarna visade att ett av kandidatmaterialen inte uppfyllde kraven på hydraulisk konduktivitet (Ieran Ibeco 2011) och att övriga material inte uppfyllde de krav som ställdes på granulstorleksfördelning för upphandlingen (Iera från Ashapura).

För buffert genomfördes liknande karakterisering av materialet som en del av KBS-3H Multi Purpose Test (Johannesson 2014).

Program

Utgående från de uppdaterade konstruktionsförutsättningarna för buffert och återfyllning blir kravet på installerad densitet materialberoende. Det är inte rimligt att anta att endast ett material kommer att användas under Kärnbränsleförvarets driftperiod. Därmed behövs en process för att utifrån konstruktionsförutsättningarna och materialets egenskaper anpassa buffertens eller återfyllningens utformning till aktuellt material. Utgående från krav och konstruktionsförutsättningar, utformning för buffert och återfyllning samt en övergripande material- och leverantörsstrategi kommer en preliminär kvalitetsplan att tas fram. Denna kommer förutom processkartläggning att inkludera provtagningsstrategi och provtagningsprogram med de metoder som SKB avser att använda för kvalitetskontroll. Det finns ett behov av att göra tillräckligt med mätningar för att skapa ett tillförlitligt statistiskt underlag för att beskriva sambandet mellan densitet och svälltryck samt hydraulisk konduktivitet för potentiella återfyllnings- och buffertmaterial. Ett grundläggande underlag kommer att tas fram inför PSAR. Detta kommer sedan att kompletteras ytterligare under Fud-perioden.

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 anpassa provtagningsplaner och kvalitetsplaner. I detta arbete kommer en god förståelse för materialleverantörernas kvalitetssystem att vara viktiga. Planer för hur implementering i slutförvarnanläggningen 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. Beslutet kommer att fattas på praktiska och ekonomiska grunder.

10.5.2 Tillverkning av buffertkomponenter

Nuläge

Sedan Fud-program 2013 har cirka 100 block tillverkats med enaxlig pressteknik för olika försök, se figur 10-16. Resultatet av tillverkning och bearbetning av 43 block beskrivs i Johannesson (2014). En begränsning hos befintliga pressar är att blockhöjden inte kan vara mer än 500 millimeter, i gällande referensutformning är buffertblocken 800 millimeter höga. En materialmodell för blockpressning har utvecklats och de ingående parametrarna har kalibrerats och verifierats gentemot verkliga blockpressningar. Genomförd modellering tyder på att även block med höjden 800 millimeter kan tillverkas med tillräcklig kvalitet (Börgesson och Hernelind 2014b).

Tekniken för att kompaktera block med enaxlig pressning har vidareutvecklats och en ny typ av form med ett delbart foder har utformats och testats i liten skala. Smörjmedlets inverkan vid pressning har studerats och det är troligt att block kan pressas utan smörjmedel. Den nya utformningen av formen tillsammans med avskaffande av smörjmedel skulle innebära stora fördelar på grund av att helt cylindriska block skulle kunna produceras. Bearbetning av blocken skulle därigenom nästan helt kunna undvikas.

En beskrivning av produktionsprocessen för buffertkomponenter har tagits fram och redovisas i Eriksson (2014). Denna processbeskrivning är baserad på hittills utförda försök och tester.

Program

Pressning av ett fullskaleblock utan smörjmedel har utförts och ska utvärderas. Om kvaliteten hos det tillverkade blocket är acceptabel är nästa steg i utvecklingen att utforma och testa en form i fullskala.



Figur 10-16. Enaxlig press för tillverkning av buffertblock.

Hittills har all buffertblockpressning skett med materialet MX-80. SKB avser även att visa att blockpressning är möjlig med andra material och kommer därför att pressa buffertblock med olika material under de kommande åren.

Även om enaxlig pressning är den metod som SKB hittills fokuserat på följer SKB även Posivas utvecklingsarbete avseende isostatisk pressteknik. Arbete har utförts för att jämföra kvaliteten på tillverkade block med de båda metoderna. Enaxlig och isostatisk pressning kommer att utvärderas gemensamt med Posiva.

10.5.3 Tillverkning av återfyllningskomponenter

Nuläge

Till det storskaliga installationsförsöket med återfyllning som utförts i Äspölaboratoriet tillverkades 400 ton bentonitblock med dimensionerna $500 \times 571 \times 400$ millimeter. Dessa block tillverkades hos Höganäs Bjuf AB. För att hantera dessa tunga block krävdes vissa förändringar i produktionslinan. Dessa förändringar i syfte att möjliggöra rationell hantering av många stora bentonitblock gör att tillverkningen kan liknas vid den industriella tillverkning som kan förväntas i framtiden. Tillverkningen genererade 1 820 acceptabla block medan 110 block fick kasseras på grund av att de inte uppfyllde geometrikraven.

Blockpressen och tillhörande utrustning fungerade som avsett och inga problem orsakade av utrustningen noterades. Däremot uppstod en del problem relaterat till bentonitmaterialet då materialet innehöll en del stenar som fastnade i formfyllningsutrustningen och orsakade överhettning av utrustning och produktionsstörningar. Bentonitmaterialet köptes in i ”bigbags” och det var en del variationer i granulstorlek mellan säckarna vilket resulterade i stora variationer i blockhöjden. Eftersom det var viktigt att hålla blockdimensioner inom acceptansintervallet för att kunna utföra installationstestet beslutades att prioritera blockhöjden. Som en följd av detta fick blocken lägre densiteter än förväntat.

Tester har visat att materialegenskaper är viktiga för att uppnå block med hög hållfasthet och jämna sprickfria ytor. De egenskaper som är viktiga är vattenkvot, granulstorleksfördelning och mineralogisk sammansättning.

För ytterligare beskrivning av utförda tester, resultat och slutsatser hänvisas till Arvidsson et al. (2015).

SKB har köpt in en pelletspress till Äspölaboratoriet där extruderade pelletar kan tillverkas till olika tester, se figur 10-17. Utrustningen kan producera 700–800 kg/timme med en bulkdensitet på $1\,000\text{--}1\,050\text{ kg/m}^3$. Erfarenheter från denna pelletstillverkning kommer att utgöra ett viktigt underlag för kommande projektering av produktionsbyggnaden i Forsmark.



Figur 10-17. Pelletspress vid Äspölaboratoriet.

Program

SKB anser att teknik och metod för att tillverka återfyllningsblock och -pelletar finns och att det är verifierat att tillgänglig standardutrustning fungerar för detta ändamål. Fortsatta insatser kommer att inriktas på materialparametrar relevanta för blockpressning. Detta för att öka förståelsen för hur olika parametrar inverkar på blockens kvalitet och för att förbättra kravspecifikationer på materialet inför blockpressning.

Vissa insatser behövs även avseende styrning och kontroll av processen, framför allt hur kontroll av vattenkvot vid blandning ska utföras för att ge direkt återkoppling om vattenkvoten hos bentonitmaterialiet är inom accepterat intervall för block- respektive pelletstillverkning.

Blockpressning och pelletstillverkning kommer att behövas för olika tester vid Äspölaboratoriet. Data och erfarenheter kommer att samlas in vid dessa tillfällen för att ytterligare öka kunskap och förståelsen för processen, men också för att utöka det statistiska underlaget.

10.6 Deponering och installation av buffert och återfyllning

Strategin för utrustningar/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, se figur 10-18. Att använda moduler har flera fördelar som till exempel:

- Snabbare felavhjälpning.
- Lättare att upprätthålla servicekompetens.
- Enklare reservdelshållning.
- Lägre utvecklingskostnader.

Från figur 10-18 kan utläsas att transportutrustning, bufferthanteringsutrustning samt återfyllningsutrustning alla bygger på ett universalchassi, vilken 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.

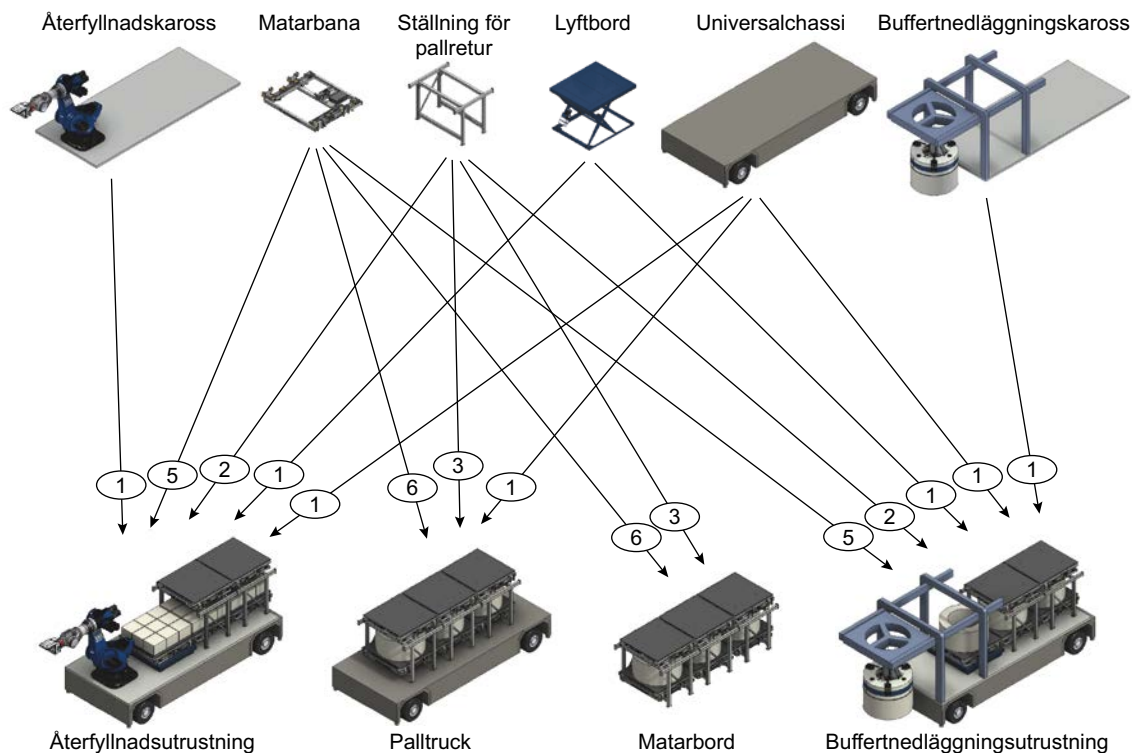
Respektive utrustning testas först separat för att därefter testas integrerat med andra utrustningar och system. Fullskaliga integrationstester där deponering av kapsel, installation av buffert, återfyllning och plugg kommer att utföras vid Äspölaboratoriet eller annan lämplig plats. Syftet är att verifiera att SKB:s sekvens för deponering och återfyllning fungerar som avsett innan detaljerad utformning görs av de specialutrustningar som behöver finnas i Kärnbränsleförvaret.

10.6.1 Deponering i Kärnbränsleförvaret

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 repeternoggrannhet 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.



Figur 10-18. Strategi för modularisering.

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.

För att kunna övervaka och kontrollera processerna utvecklades och hanterades följande funktioner i demonstrationssystemet:

- Trådlöst kommunikationsgränssnitt.
- Areakontroll (arbetsområde för maskin utan förare).
- Gränssnitt mot produktionskontroll (systemet kan ta emot produktionsorder och skapa en körorder för en maskin).
- Ruttkontroll inklusive ruttdata (positioner för deponeringshåll och andra objekt).
- Trafikkontroll.
- Datalagring.
- Operatörsgränssnitt.
- Larmhantering.

Under 2015 slutfördes provning av detta demonstrationssystem med hjälp av prototypmaskinen för deponering, Magne. De provningar som tidigare utförts med deponeringsmaskinen vid Äspö-laboratoriet visar att de uppställda kraven på tillförlitlighet, tillgänglighet och repeterbarhet vid automatiserad drift är möjliga att uppfylla. Tyngdpunkterna vid dessa tester lades därför på att utreda om det går att säkert starta och stoppa en process över ett trådlöst nätverk. Resultatet av provningskampanjerna visar att tekniken är tillämpbar och går att implementera även på en deponeringsmaskin som framförs i ett helautomatiserat läge utan förare som assisterar färden.

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 den kommande perioden kommer även vidareutveckling ske av deponeringsmaskinens mekaniska komponenter såsom greppverktyg, vinsch och strålskärmskub.

Behov av ytterligare teknikutveckling för återtag av kapslar, buffert och del av återfyllning ska tydliggöras och påbörjas under Fud-perioden.

10.6.2 Buffert

Nuläge

Krav på installationssekvens och installation av buffertkomponenter behöver uppdateras och tydliggöras. En viktig fråga som beskrevs i avsnitt 10.4.1 är till exempel vilka processer som sker i bufferten och vilken hänsyn som måste tas till dessa under den tid bufferten placeras i deponeringshålet och tills återfyllningen installeras över deponeringshålet.

Prototyp för buffertlyftverktyg har funnits och testats sedan en tid tillbaka. Sedan Fud-program 2013 har prototyputrustning för att installera pelletar i deponeringshål tagits fram och testats vid Äspölaboratoriet.

Program

Som redan nämnts i avsnitt 10.4.1 har två installationsmetoder identifierats beroende på situationen i deponeringshålen. Detta medför två olika installationssekvenser och olika krav på installationen av buffert.

Buffertskydd behöver vidareutvecklas för fallet med ”våta” deponeringshål.

För att verifiera att installation av buffert fungerar som avsett och genererar en utformning inom acceptabla intervall behöver tester genomföras i fullskala vid underjordsförhållanden.

10.6.3 Återfyllning

Nuläge

Utrustning för installation av återfyllning har utvecklats och testats och testerna avslutades med det tidigare nämnda installationstestet i Äspölaboratoriet, se figur 10-19. 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 pelletar så att installerad densitet blir tillräcklig för att återfyllningen ska uppfylla sina krav (Arvidsson et al. 2015). För att få en automatiserad process som uppfyller kraven på installationstid behövs dock fortsatt utveckling.

En viktig fråga vid återfyllningsinstallation är kunskapen om vattenfördelningen i berget och information om storleken av vatteninflödet till deponeringstunneln, som fås från detaljundersökningarna, se avsnitt 11.1.1. Beroende på inflödets placering och storlek kan problem erhållas med instabilitet i installerad blockstapel samt erosion av återfyllningsmaterial. Det finns tre strategier för att hantera vatteninflöde:

1. Stoppa inflödande vatten.
2. Dränera inflödande vatten.
3. Lagring av inflödande vatten.

Arbete har utförts för att identifiera lämpliga metoder för vattenhantering under installationskedet. Dessa beskrivs i Sandén och Börgesson (2014).



Figur 10-19. Blockinstallation på 450 meters djup vid Äspölaboratoriet.

Program

Fortsatt utveckling kommer att ske för att säkerställa att installationen kan ske med den kapacitet och noggrannhet som krävs. Utrustning för pelletsinstallation är under utveckling och kommer att testas och integreras med utrustning för blockinstallation.

Vad gäller vattenhantering vid återfyllningsinstallation kommer arbetet fortgå för att utveckla och testa lämpliga metoder. Potentiella metoder komma även att behöva testas i fullskala. Samarbete med Posiva pågår och kommer att fortsätta kring dessa frågor.

10.7 Borrhålsförslutning

10.7.1 Kärnbränsleförvaret

Det finns ett stort antal undersökningsborrhål i anslutning till det område där ovanjordsanläggningen för Kärnbränsleförvaret föreslås placeras samt i den berggeometri där underjordsanläggningen föreslås placeras. Ett antal av borrhålen behöver förslutas innan byggstart. Övriga undersökningsborrhål som i dag är öppna behöver förslutas under senare skeden av byggprocessen då de kan utnyttjas för övervakning under 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) eller transport av oönskade ämnen från markytan ner till förvaret.

Nuläge

SR-Sites utvärdering av referensutförningen 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 ökad spridning av radionuklider till markytan. Detta föranleder att SKB nu har ändrat kravet på borrhålsförslutningens täthet och ska se över den borrhålsförslutningsmetod som tidigare utvecklats.

Program

Baserat på den nya kravnivån har SKB initierat ett program för borrhålsförslutning som har till uppgift att utveckla och demonstrera en robust metod för borrhålsförslutning anpassad till kraven för Kärnbränsleförvaret genom att:

- Inventera befintliga borrhål samt ta fram en preliminär plan för hur respektive borrhål ska förslutas baserat på var zoner med låg respektive hög hydraulisk konduktivitet finns för de enskilda borrhålen.
- Ta fram metodbeskrivning för utförandet.
- Genomföra verifierande laboratorie- och fältförsök.
- Ta fram kvalitets- och kontrollprogram.

Baserat på resultatet av detta program kommer SKB vara förberedd att kunna försluta de första korta borrhålen i Forsmark som kräver förslutning innan byggstart. Utvecklingsaktiviteter kommer i så stor utsträckning som möjligt samordnas med borrhålsförslutning i SFR, se avsnitt 10.7.2.

10.7.2 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

I området, där utbyggnaden av SFR ska lokaliseras, finns ett antal borrhål som behöver förslutas inför byggskedet. Borrhålsförslutningen har betydelse på kort sikt under uppförandet men även på lång sikt efter förslutning av SFR. Förslutningen av borrhål ska ske med metod och teknik som är beprövad. SKB avser att genomföra fortsatta studier i att vidareutveckla metod och teknik för borrhålsförslutning baserat på tidigare teknikutvecklingsarbete.

Nuläge

Modellering och beräkningar har påvisat att tätheten hos förslutning av borrhål har en begränsad betydelse för grundvattenflödet i bergssalarna. Detta föranleder att konstruktionsstyrande förutsättningar har ändrats vilket påverkar teknik och metod för borrhålsförslutning. Motiv till att försluta de borrhål som ligger inom utbyggnadens område innan byggskede:

- Berget kommer att deformeras runt nya tunnlar och bergssalar vilket kan leda till att borrhålsgeometrier störs, vilket kan försvåra förslutning av borrhålsdelar.
- Berget kommer att injekteras för att minska vatteninflödet i samband med utbyggnaden. Det finns risk att injekteringsmedel tränger in i öppna borrhål vilket kan försvåra en senare tätning.
- Korsande av borrhål i samband med tunneldrivningen vilka står i kontakt med vattenförande sprickor kan försvåra drivning av tunnlar och anläggning av bergssalar.
- Sprängkraft kan fortplanta sig genom borrhålet och i värsta fall skjuta iväg foderrör som finns installerade i borrhålens övre del.

Efter avslutad drift kommer borrhål vid SFR att förslutas permanent.

Program

Teknikutvecklingsinsatser inom följande områden för borrhålsförslutning kommer att genomföras:

- Metod för borrhålsförslutning samt detaljerad utformning av ingående komponenter.
- Experimentella försök för ingående komponenter samt storskaligt fältförsök.

10.8 Förslutning

10.8.1 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 något mer detaljer avseende förslutningssekvens och förslutningspluggarnas funktion och storlek.

10.8.2 Förslutning av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SR-PSU samt efterföljande analyser har resulterat i uppdaterade krav på förslutningskomponenterna för SFR. Inom genomförd teknikutveckling identifierades behov av vidareutveckling för utformning och installation av förslutningen. Detaljprojektering av utbyggnaden av SFR samt bättre 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 sammanhållande förslutningsplan för SFR (Luterkort et al. 2014) med avseende på ingående förslutningskomponenter samt installation och sekvens. Förslutningen beskrivs på konceptuell nivå och inför PSAR kommer kunskapen kring material, konstruktion och installation att fördjupas.

Program

SKB planerar för en fortsatt teknikutveckling av betongpluggar för att åstadkomma en robust utformning som inte kräver omfattande bergarbeten. Ett alternativ som ska utredas är att använda betongpluggar som tar lasten i friktion mot bergväggen. Då den slutgiltiga layouten för utbyggnaden bestämts kan eventuellt en mer noggrann dimensionering av varje betongplugg behöva initieras.

SKB avser att utveckla konceptet för jorddammspluggen och övergångsmaterialet. Jorddammspluggens utveckling över tid behöver studeras och analyseras. Det är till stor del arbete med beräkningar, parameterstudier samt modellering som behöver genomföras.

En mer detaljerad analys av hur bentoniten i de täta sektionerna ska utformas och installeras behöver genomföras. Möjligheten att uppnå tillräckligt hög densitet i de hydrauliskt täta sektionerna med bentonitpelletar eller granulerad bentonit kommer att utredas.

11 Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvarsanläggningar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden över den tid som avfallet ska isoleras. För att detta ska uppnås behövs tillgång till metoder för att undersöka och karakterisera berget på en tillräckligt detaljerad nivå. Vidare behöver slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen utformas på ett sådant sätt att de långsiktigt stabila förhållandena inte äventyras, och för att kunna utvärdera säkerhet efter förslutning behövs även kunskap om processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaret. En stor del av de teknikutvecklings- och forskningsfrågor som berör berget och slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen är gemensamma för de tre olika förvaren.

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 utnyttjande av berget som barriär avseende Kärnbränsleförvaret är det främst placeringen av deponeringsområden och deponeringshål med hänsyn till bergets termiska, hydrogeologiska, mekaniska och kemiska egenskaper som är viktig.

I ansökan för Kärnbränsleförvaret ingår produktionsrapporten för berg (SKB 2010b) som referens. Inför PSAR, ska denna rapport uppdateras avseende den utveckling som har skett sedan ansökan skrevs. Produktionsrapporten redogör för den konstruktion som utgör referensutformning och vars säkerhet under drift respektive efter förslutning ska analyseras. Rapporten redogör även för aktuell utformning med hänsyn till de konstruktionsförutsättningar som påverkar förvarets förmåga att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen. Vidare beskrivs planerad produktion av bergutrymmena, kvalitetsstyrning och kontroll, samt förväntat utfall vilket ger nödvändig information för att kunna beskriva förvarets initialtillstånd.

En uppdatering av metoder för tunnelproduktion planeras och underlag till teknikbeslut behöver därför levereras av teknikutvecklingsprojekten. Behov av kvalitetsäkringsåtgärder under tillverkning, hantering och installation behöver ytterligare detaljeras genom att genomföra produkt- och processkartläggningar och ta fram preliminära kvalitetsplaner. Baserat på produkt- och processkartläggningarna kan behovet av kvalificeringar (se avsnitt 4.2.5) bedömas.

För analysen av säkerhet efter förslutning finns en rad frågor som kräver ytterligare insatser. Dessa frågor berör främst Kärnbränsleförvaret och SFL, och är till stor del gemensamma för de båda förvaren. Eftersom planerad byggnation av SFL ligger betydligt senare än för Kärnbränsleförvaret behöver dessa frågor i första hand lösas fram till SAR för Kärnbränsleförvaret, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart som viktiga avstämningspunkter.

11.1 Detaljundersökningar

Detaljundersökningar avser de undersökningar (inklusive övervakning) och modelleringar som utförs i samband med slutförvarsanläggningarnas uppförande och drift, och som steg för steg ger information om bergets egenskaper och underlag för bedömning av kravuppfyllelse. Detaljundersökningar genomförs integrerat med bergarbeten vid respektive anläggnings uppförande och, för Kärnbränsleförvaret, under den påföljande successiva utbyggnaden av deponeringsområden under driftskedet.

11.1.1 Metodik för detaljundersökningar

Sedan ramprogrammet för detaljundersökningar vid uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret (SKB 2010e) publicerades har arbetet med referensutförning av anläggningen i Forsmark fortsatt, liksom arbetet med uppdatering av konstruktionsförutsättningar avseende säkerhet efter förslutning. Vid utvecklingen av detaljundersökningsprogrammet ska metoder, instrument och modelleringsmetodik för att verifiera att ställda krav uppfylls, tas fram och beskrivas.

Detaljundersökningarna 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, kommer en viktig uppgift vara att anpassa anläggningen till rådande bergförhållanden så att de krav som är kopplade till förvarets kärntekniska säkerhet (konstruktionsförutsättningar) kommer att uppfyllas. Insamlade data och uppdaterade modeller om berggrunden ger dessutom det samlade underlaget till förnyade analyser av säkerhet efter förslutning. Detaljundersökningar ska även täcka det informationsbehov som behövs för miljökontroll.

Nuläge

Detaljundersökningsprogrammet uppdateras utifrån den teknikutveckling som SKB hittills har genomfört inom undersöknings- och bergbyggnadsteknik. I detta ligger bland annat erfarenheter från den utbyggnad av Äspölaboratoriet som gjordes 2012–2013 (Johansson et al. 2015c) och erfarenheter från Posivas undersökningar vid uppförandet av berganläggningen i Olkiluoto (Posiva 2012, McEwen et al. 2012). Detaljundersökningsprogrammet beskriver undersökningar och modellering med tillhörande kvalitetssäkring. Det är på en övergripande nivå och syftar till att ge en helhetsbild av de undersökningar som behövs under olika skeden av Kärnbränsleförvarets uppförande och drift.

Program

Inför PSAR och detaljprojekteringen kommer operativa undersökningsprogram att tas fram, där undersökningarna i samband med de olika skedena beskrivs mer detaljerat. Under denna Fud-period planeras vidareutveckling av metoder, verktyg och operativa program för detaljundersökningar med tillhörande modellering inför byggstart. Fokus för programmen ligger på Kärnbränsleförvaret men de utvecklade metoderna kommer även att användas inom utbyggnaden av SFR. Verktyg avser här instrument för mätningar, liksom datasystem inklusive beräkningsverktyg och programvara som används för visualisering och modellering, inklusive tillhörande metodik och strategi för dess tillämpning. Strategier och metodik för kontroll av krav på säkerheten efter förslutning (konstruktionsförutsättningar) såsom kontroll av skadezon, kvantifiering av tillåten förekomst av spjälkning, och hydrauliska kriterier för deponeringshål, kommer att utarbetas och provas. En praktisk tillämpning utgör också de in situ-försök för identifiering och karakterisering av kritiska strukturer som genomförts på Äspölaboratoriet, se avsnitt 11.1.2.

Utvecklingsinsatserna fokuseras på de verktyg som ska användas under uppförande av tillfarter och centralområde i Kärnbränsleförvaret, samt sådan utveckling för deponeringsområden som beräknas ta lång tid i anspråk och därför behöver påbörjas tidigt. Övrig utveckling för detaljundersökningar i deponeringsområden kommer huvudsakligen att fortsätta under senare delen av denna Fud-period.

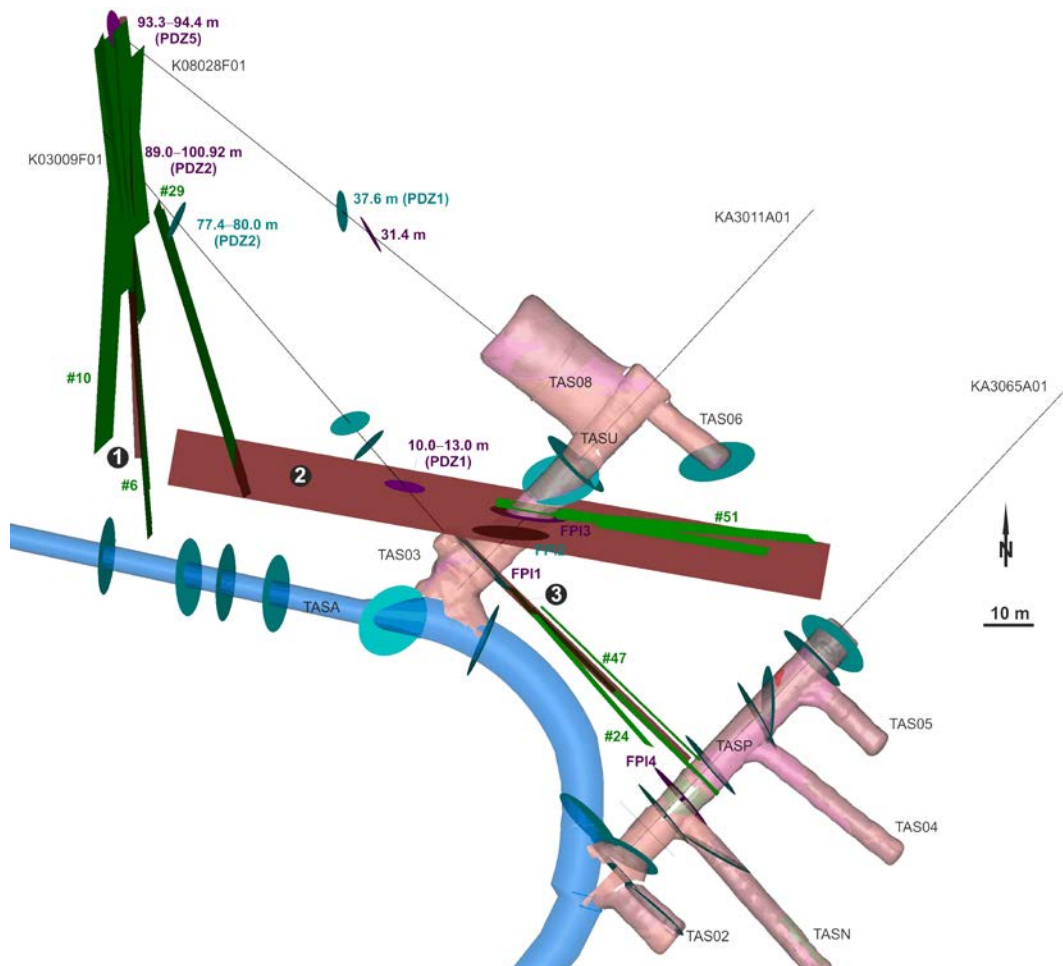
11.1.2 Kritiska strukturer

Begreppet kritiska strukturer och volymer innebär geologiska strukturer eller bergvolymer med egenskaper som kan ha negativ inverkan på ett KBS-3-förvars säkerhet efter förslutning. Kritiska strukturer/volymer indelas i tre klasser med hänsyn till deras påverkan på förvarsområdets layout (Munier och Mattila 2015). I klass 1 ingår strukturer/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 ingår strukturer/volymer med egenskaper som innebär att de kan accepteras mellan deponeringsområden men inte i en deponeringstunnel, och som därmed styr layout för förvarsområdet. I klass 3 ingår strukturer/volymer med egenskaper som innebär att de inte får genomskära deponeringshål, och som därmed styr val och acceptans av deponeringshålspositioner.

Metoder behöver vidareutvecklas, både för identifiering av kritiska strukturer av klass 3, och för att kunna välja positioner för deponeringshål med hydrauliskt lämpliga egenskaper. Det innebär bland annat att metodik för modellunderstödd acceptans av deponeringshål, på basis av hydrauliska tester i pilothål och verifierande tester i deponeringshål (se avsnitt 11.1.3), måste vara väl utprovade och fungerande inför detaljprojektering av deponeringsområden. Detta gäller även metoder för att mäta små vattenflöden till deponeringstunnlar och deponeringshål, liksom utvärderings- och modelleringsteknik.

Nuläge

Undersökningar för att identifiera och karakterisera kritiska strukturer har genomförts med syftet att prova, utvärdera och vidareutveckla undersöknings- och modelleringsmetoder, i två nära parallella tunnlar respektive två kärnborrhål i anslutning till nya underjordsdelar i Äspölaboratoriet. Arbetet som sammanställs i nuläget och kommer att publiceras inom kort, omfattade i ett första steg mätningar i tunnelsystemet med radar, seismik och resistivitetsmetoder. Dessa integrerades, tillsammans med utförda hydrauliska interferenstester i pilotborrhålen för tunnlar, med den etablerade strukturmodellen från den aktuella bergvolymen. Genomförd tunnelkartering gav data för sprickor eller sprickzoner som kan följas runt hela tunnelperiferin, och som definieras som full perimeter intersection, FPI. I en efterföljande testkampanj genomfördes motsvarande undersökningar i de två kärnborrhålen. Figur 11-1 visar möjlig utsträckning av tre potentiellt kritiska strukturer, baserat på tolkning av de genomförda mätningarna.



Figur 11-1. Toppvy över de nya underjordsdelarna av Äspölaboratoriet (TASP-TASU-TASA) som utöver närliggande borrhål (svarta linjer) visar möjlig utsträckning av tre potentiellt kritiska strukturer (röda plan, nummer 1–3 i fyllda cirklar) tillsammans med de seismiska reflektorerna (gröna, #6, #10, #24, #29, #47 och #51) och geologiska observationer (violettera diskar) som utgjort underlag för tolkningen. Även övriga sprickzoner som kan följas runt hela tunnelperiferin (större blå diskar i tunnlar; FPI) samt ett antal utvalda strukturer för möjlig detektion med tvärhåls-/tunnelgeofysik i de två borrhålen K03009F01 och K08028F01 (mindre blå diskar i borrhål, PDZ = möjlig sprickzon) har inkluderats som referens.

Program

Platsspecifika förhållanden styr hur metodiken för val och verifiering av deponeringspositioner kommer att tillämpas i Kärnbränsleförvaret. Fortsatt utveckling för att fastlägga metodik planeras därför i samband med de integrerade tester av bergutbyggnad och deponering som planeras i Äspölaboratoriet och i Forsmark samt i samarbete med Posiva i kommande utbyggnad av förvarsområdet i Olkiluoto. Vidare studier för identifiering och karakterisering av kritiska strukturer fokuseras på strukturernas storlek och på de underliggande egenskaperna, som kan utgöra indikatorer för storlek, samt strukturernas hydrauliska och mekaniska egenskaper, för att bättre kunna bestämma risken för faktisk rörelse i en given struktur i samband med ett jordskalv, se också avsnitt 11.11 och 11.12. Det långsiktiga målet är att bestämningen av kritiska strukturer i anslutning till deponeringspositioner i högre utsträckning ska kunna baseras på verkliga egenskaper och i mindre grad på FPI-kriteriet (Munier 2006).

11.1.3 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 behöver tas fram. Metodiken behöver ta fasta på en tidig och nära samtolkning och integration av geologisk och hydrogeologisk information för identifiering och beskrivning av kritiska strukturer, se avsnitt 11.1.2, och det hydrauliskt konnekterade spricknätverket. Det senare utgör den geometriska basen för fortsatt platsbeskrivande modellering i anläggningsdelskala (till exempel enskilt deponeringsområde) eller anläggningsskala (hela förvaret med dess tillfarter). Övriga ämnesområden; hydrogeokemi, bergmekanik, termiska egenskaper, transportegenskaper och ytsystem 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 geometriska modelleringen i form av enhålstolkningar och entunneltolkningar, vilka utgör grundläggande byggstenar i den fortsatta integrerade deterministiska modelleringen i 3D. Den senare kopplar mot den stokastiska beskrivningen av sprickor (DFN), se avsnitt 11.3, 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 en fastställd referensnivå utgör en viktig förutsättning för 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 för detaljundersökningar planeras ske under denna Fud-period. 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.

11.2 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 val av placering och hur man ska verifiera att kriterierna uppfyllts. En stor del av arbetet inom teknikutveckling för tunnelproduktion handlar om att identifiera känd och beprövad teknik samt material vilka används av branschen och även uppfyller kraven och konstruktionsförutsättningarna för Kärnbränsleförvaret.

11.2.1 Injektering

Tätning av bergutrymmen i Kärnbränsleförvaret möter större utmaningar än normala infrastrukturprojekt. För att inte injekteringen ska ge en negativ påverkan på berget som barriär finns striktare krav på vilka injekteringsmaterial som kan accepteras, hur injekteringsskärmen utformas samt att injekteringen utförs med begränsad och mycket kontrollerad spridning. Det höga grundvattentrycket kräver även annan injekteringsdesign för att kunna motverka erosion av injekteringsmedel, och för att förhindra hydraulisk vidgning av sprickor.

Nuläge

Observationsmetoden tillämpas som projekteringsmetod när förhållanden är osäkra eller när den geotekniska risken är stor. Under utbyggnaden av Äspölaboratoriet tillämpades observationsmetoden för att styra injekteringsarbetet och för att prova möjligheten att använda Äspölaboratoriets Hydro Monitoring System (HMS) som observationsobjekt, parallellt med observationsobjektet inflöden (Olofsson et al. 2014). Detta gav ett tillfälle att använda kvalificerad övervakning av grundvattentrycknivåer med ett system liknande det som finns i Forsmark.

Program

Erfarenheterna från tidigare genomförd injektering (Funehag och Emmelin 2011, Johansson et al. 2015a, Funehag 2016) analyseras och utvärderas och omsätts till uppdaterade metodbeskrivningar för injektering med låg-pH-material, anpassade för de olika typmiljöer som kan förväntas förekomma vid drivningen av bergutrymmen i Kärnbränsleförvaret. Arbetet omfattar även att ta fram strategi för kontroll och verifiering av injekteringsresultat.

11.2.2 Tunneldrivning för deponeringstunnlar

Nuläge

Med tanke 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 utreds för att åstadkomma ett planare tunnelgolv med mindre skadezon, genom exempelvis mekanisk brytning och vajersågning.

Studier har genomförts för att öka kunskapen om utbredning och egenskaper hos skadezonen (excavation damage zone, EDZ) runt en tunnel, och för att utveckla mätmetoder för att identifiera skadezonen (Ericsson et al. 2015). I dessa studier har uppföljning av EDZ gjorts i tunnlar genom geologisk karakterisering, mätning med högfrekvent markradar (GPR), och genom injektionstester i korta kärnborrhål i tunnelgolvet.

Program

Under Fud-perioden kommer produktionsanpassade metoder för säker och effektiv tunnelproduktion, anpassade till Forsmarks förhållanden, att vidareutvecklas. Metodbeskrivningar för drivning av deponeringstunnlar, som uppfyller krav på konturhållning, bland annat jämn sula och minimal skadezon kommer att tas fram.

Under perioden 2018–2020 planeras integrationstest för tunneldrivning. Integrationstestet omfattar att driva och undersöka en deponeringstunnel med föregående pilotborrning och borrhålsundersökningar, att borra och undersöka deponeringshål, att fastställa pluggläge och att ta ut berg för pluggen.

11.2.3 Borring av deponeringshål

Nuläge

SKB har följt Posivas utvecklingsarbete avseende deponeringshål, där Posiva har borrar tio vertikala experimentella hål i Onkalo, fördelade på två demonstrationstunnlar (Railo et al. 2015, 2016). Deponeringshålen borrades med en prototypmaskin av typen Rhino HSP500 som tillverkats för ändamålet. SKB har tidigare borrar ett 15-tal deponeringshål i Äspölaboratoriet med en annan maskin.

Program

Genomförd borring i Onkalo kommer att utvärderas, och metoden ska vidareutvecklas för att göra borringen av deponeringshål mer produktionseffektiv. Metoden kommer att testas och senare verifieras i samband med integrationstestet för tunneldrivning (se avsnitt 11.2.2).

11.3 Modellering av diskreta spricknätverk

Nuläge

Under föregående Fud-period har 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 mätas. 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 utgör en större determinism att modellerna förhoppningsvis även kan användas för att testa olika kriterier för att förkasta/acceptera deponeringshålspositioner. Metodiken för konditionering har testats med syntetiska data från förenklade platser. De inledande resultaten från testerna är lovande och har presenterats i Selroos et al. (2015).

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, samt effektivare tillämpning av DFN-modeller under produktion. Projektet har i en första fas uppdaterat källkoden från Fortran-77 till Python, och framtagit en första version av ett användargränssnitt (GUI). MoFrac har testats mot både artificiella data och data från Äspölaboratoriet.

I ett samarbetsprojekt mellan Itasca, Université de Rennes och SKB har en alternativ metod, UFM (nearly Universal Fracture Model), för generering av DFN-modeller tagits fram (Davy et al. 2010, 2013). 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, med en proportionalitetskonstant, C , mot sprickstorlek, l , upphöjt till en konstant, b , enligt: $\frac{dl}{dt} = Cl^b$.
- En hierarkisk bromsningsprocess i vilken stora sprickor bromsar eller hindrar 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 (se vidare under Program nedan).

Vidare pågår ett projekt om effekter av geometrisk osäkerhet i borrhålsdata. Inledande resultat visar på hur olika mätosäkerheter påverkar den totala osäkerheten om ett borrhåls geometri (Stigsson och Munier 2013, Stigsson 2016).

Program

Effekten av grundläggande antaganden inom gällande DFN-metodik kommer att studeras, och DFN-metodiken kommer att utvecklas med bland annat konditionering mot geometriska och hydrauliska data som erhålls då tunneldrivning och borrhånds deponeringshåll påbörjas. Även pilothåll för tunnlar och deponeringshåll förväntas ge värdefull information som kan användas vid konditionering. Under Fud-perioden kommer metodiken att testas på ytterligare syntetiska dataset samt på riktiga data från Äspölaboratoriet och/eller Onkalo. Denna del görs i samverkan med Posiva. Vidare planeras en utredning om huruvida konditionering kan ske även på data från spårämnesförsök samt på data från geofysiska mätningar (inklusive elektrisk resistivitet) utförda i pilothåll för deponeringshåll.

Under Fud-perioden planeras ett metodikdokument att tas fram som beskriver nästa generation av DFN-modeller (det vill säga konceptuella antaganden samt databehov). Här ingår även att omsätta den ovan nämnda metodiken för konditionering som tagits fram i SKB:s olika modelleringsverktyg. Inom ramen för framtagandet av metodikdokumentet 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, deformationszonernas hydrauliska egenskaper och möjligheten att applicera ett DFN-koncept för beskrivning av dessa zoner samt osäkerheter i sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet.

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 borrhåll (Stigsson och Munier 2013) och (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 deponeringshåll.

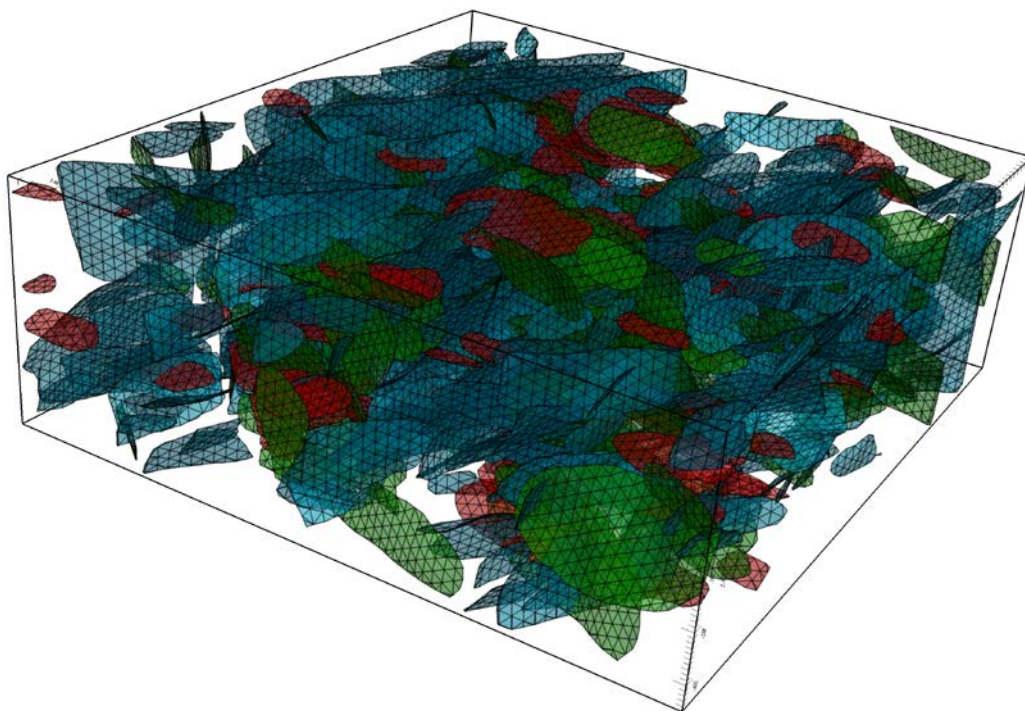
Vid användningen av DFN-modeller i SKB:s hydrogeologiska modellering antas sprickor vara planparallella. För att hantera detta i den efterföljande transportmodelleringen ansätts ibland skalningsfaktorer för att approximera effekten av den kanalbildning som uppstår på grund av intern aperturvariabilitet. 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 planeras med Posiva där beräkningsverktyget DFNworks (Hyman et al. 2015) ska användas för att belysa frågorna.

Två insatser planeras för att utöka förståelsen av alternativ DFN-konceptualisering. Den ena baseras på programvaran MoFrac medan den andra avser tillämpning och vidareutveckling av konceptet UFM där en alternativ metod för DFN-generering baserad på mekaniska principer används.

För nästa fas planeras en vidareutveckling av användargränssnittet i MoFrac och ytterligare tester med data ifrån Olkiluoto (Finland) och Glencore-gruvan (Sudbury, Kanada).

En svaghet i den hittills redovisade UFM-metodiken är de generaliseringar och förenklingar som initialt antagits för sprickbildningsprocessen. I synnerhet gäller detta initieringsprocessen som hittills antagits vara likformig i 3D, bromsningens processen som endast antagits bero på relativa sprickstorlekar, och tillväxtprocessen som hittills antagits vara isotrop, det vill säga oberoende av sprickriktning. Det innebär att korrelationer och anisotropier som vanligen observeras i berget, såsom klustring, skärningar och dominerande riktningar, ännu inte har adresserats.

SKB avser därför att förfina UFM-metodiken genom införande av alternativa initieringsprocesser, som i dagsläget är likformiga i rummet, och genom införande av korrelationer till sprickorienteringar och därmed indirekt till paleospänningsfält. Vidare kommer möjligheten att definiera en mätnadsgrad, 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.



Figur 11-2. Exempel på spricknätverk genererat med MoFrac.

SKB planerar även att utveckla DFN-modeller av UFM-typ för hydrogeologisk analys. Generiska resultat (Maillot 2015) visar att flödesegenskaper i en DFN-modell av UFM-typ har lägre effektiv permeabilitet men mer kanalbildning på nätverksskala än de typer av modeller som SKB hittills använt inom hydrogeologiska tillämpningar. Syftet med arbetet är att tillämpa UFM-konceptet på platsdata från Forsmark, och i grundvattenflödessimuleringar beräkna vissa av de storheter som tas fram inom säkerhetsanalytiska tillämpningar. Detta möjliggör en jämförelse mellan den typ av DFN-modell som användes i SR-Site och SR-PSU med en alternativt konceptuell modell.

11.4 Hydrokemi- och transportmodellering

Nuläge

SKB:s kapacitet för hydrokemisk 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 kapabilitet erhållits genom att skapa ett gränssnitt till modelleringsverktyget Pflotran som är konstruerat för HPC-maskiner. Detta kopplade modelleringsverktyg har fått beteckningen iDP (Molinero et al. 2016). 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 inverkan av lakvatten från cement.

Den modellerade grundvattensammansättningen kan i sin tur användas som indata till modellverktyg, till exempel 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). Traditionellt är K_d en konstant fördelningskoefficient som anger hur mycket av ett ämne som är sorberat respektive i lösning. Även inom den traditionella transportmodelleringen har utvecklingen gått framåt både vad det gäller modelleringsverktyg och metoder för att erhålla indata för transportmodellering. Inom ett doktorandprojekt har matematiska lösningar för diffusion in i stagnanta zoner kopplat till matrisdiffusion tagits fram (Mahmoudzadeh 2016). En doktorsavhandling har avlagts inom området kolloidegenskaper och med kopplingar till kolloidburen transport (Norrfors Knapp 2015).

SKB Task Force 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 studeras den hydrauliska interaktionen mellan berg och bentonit vid två nedskalade deponeringshål som är 30 centimeter i diameter. Återmättnadsprocessen är här en central del av frågeställningen (se till exempel Dessirier 2016). Dessutom har modelleringsuppgiften Task 9 startat. Den 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) som genomförs i Onkalo i Finland samt LTDE-SD (Nilsson et al. 2010) som utfördes i Äspölaboratoriet.

Program

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 inverkan av lakvatten från låg-pH-cement eller inträngning av glacialt vatten. Det planeras även valideringstester där bägge verktygen appliceras på lämpliga exempel av varierande svårighetsgrad.

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 det hydrogeokemiska beräkningsverktyget (DarcyTools/ConnectFlow) och transportmodellen (Marfa) kopplas samman på ett effektivare sätt.

När det gäller transport av lösta ämnen ska det göras insatser framför allt inom områdena matrisdiffusion och sorption, vad gäller konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar och vidareutveckling av modelleringsverktyg (till exempel Marfa). Insatser ska även göras kring advektiv transport, dispersion, elektromigration, gastransport, röntgenbaserad mikrotomografi och kolloidburen transport för att öka förståelsen av transportprocesser samt skapa indata till beräkningsverktygen. För att reducera osäkerheten i transportparametrar bör nya mätningar göras under relevanta samt väldefinierade förhållanden och på platsspecifikt material. Känslighetsstudier av transportparametrar ska även göras för att undersöka inverkan av bergets variabilitet, till exempel kalcitförekomst på spricktyper och dess inverkan på matrisdiffusion.

I en pågående modelleringsansats betraktas matrisdiffusion som advektiv transport i mikrospricknät. Denna modellering knyter an till experimentella resultat och använder data bland annat från röntgenbaserad mikrotomografi. Utvecklingen av Marfa, bland annat för att hantera ett dynamiskt K_d -koncept, ska fortsätta och knyta an till tillgängliga sorptionsdata. Experiment planeras för att erhålla bergets transportegenskaper i termer av effektiv diffusivitet och sorptionsdata på större bergbitar. För att kunna utföra dessa experiment under rimlig tid kommer SKB att använda metoder baserade på elektromigration. De elektriska metoderna ska vidareutvecklas och testas för att konfirmera mätresultaten både i lab- och fältskala. De kunskaper som erhålls inom elektromigration kan även användas för att studera inverkan av jord- och läckströmmar på transport av lösta ämnen samt korrosion. Metoderna kan även ge insikt i variabiliteten i porvattnets kemiska sammansättning, vilket i sin tur kan öka förståelsen av matrisdiffusion. Kunskapsläget inom modellering av gastransport, både då det gäller löst gas i grundvatten och som tvåfasflöde, bör förbättras inför framtida analyser av säkerhet efter förslutning. Inom det doktorandprojekt som rör utveckling av kanalnätverksmodellen Chan3D avses funktionaliteten radiell diffusion från kanaler in i bergmatrisen läggas till och inverkan av detta ska studeras.

Inom SKB Task Force grundvatten- och transportmodellering kommer Task 8 att rapporteras av modellörerna och utvärderas av en extern granskare. Modelleringen inom Task 9 kommer att fortsätta med modellering enligt beskrivning under Nuläge.

11.5 Koppling mellan ytnära och djupt grundvatten

För att förstå de hydrogeologiska processerna i berget måste en god förståelse även finnas av det ytnära grundvattensystemet. Traditionellt har olika modelleringsverktyg använts för det ytnära och mer djupliggande grundvattensystemet, men med utvecklad datorkraft och modelleringsmetodik kan det kopplade systemet bättre beskrivas.

Nuläge

I modelleringen av SFR inom säkerhetsanalysen SR-PSU (Öhman et al. 2014) inkluderades en beskrivning av det ytnära grundvattensystemet i en modell för det djupa grundvattnet på ett bättre sätt än vad som tidigare gjorts. Specifikt användes en dynamisk regolitmodell för lagergeometrier, det vill säga jordlagergeometrier som ändrades i tiden, med kalibrerade egenskaper. Vidare inkluderades även sjöars och vattendrags sträckning samt nivåer dynamiskt i tiden för de olika tidsstegen. För de olika tidsstegen gjordes en förprocessering av topografidata så att alla lokala lågpunkter togs bort och ersattes av deras motsvarande vattenfyllda nivåer så att en mer realistisk tryckbild uppnåddes. Det ythydrologiska systemet blev därmed totalt sett bättre representerat än i tidigare modeller.

Vidare kan noteras att även i MikeShe-modellen för det ytnära systemet som användes i modelleringen av SFR gjordes en mer omfattande analys av det djupa grundvattnet då bland annat transport från förvaret till ytan studerades (Werner et al. 2013).

Program

En strategi kommer att utvecklas för hur, och på vilken nivå, ythydrologiska processer kan inkorporeras i modellerna för det djupa grundvattnet. Fördelarna med att inkludera en bättre ythydrologisk förståelse är att modellerna får en mer realistisk beskrivning och egenskapstilldelning av de ytnära lagren, men främst att modellerna producerar mer realistiska transportvägar för lösta ämnen i dessa ytnära lager. Den utvecklade strategin baseras på en arbetsgång där ythydrologin och det ytnära grundvattensystemet först conceptualiseras, kalibreras och modelleras i ett specifikt beräkningsverktyg (modell) för ythydrologi, till exempel MikeShe, så att mätta data (tidsserier för tryck, avrinning med mera) kan reproduceras. Sedan implementeras conceptualiseringen av det ytnära systemet på relevant komplexitetsnivå i något av beräkningsverktygen för det djupa grundvattnet (DarcyTools eller ConnectFlow). Tester görs för att kontrollera att dessa modeller kan reproducera mätta data. En första test av denna strategi planeras i den pågående säkerhetsvärderingen av SFL.

Som konstaterats ovan så förväntas en bättre ythydrologisk beskrivning även ge en bättre förståelse av transport i det ytnära systemet då partikelspårning görs i flödesmodellerna. Partikelspårningen i grundvattenflödesmodellerna levererar utströmningspunkter till biosfärsmodellerna, medan radionuklidtransportmodellerna levererar nuklidflöden. Kopplingen mellan geosfärs- och biosfärsmodell (dosmodell) sker ofta (till exempel i SR-Site) genom att använda en omvandlingsfaktor som representerar både ett rumsligt och tidsmässigt maxvärde. Detta är därmed ett mycket pessimistiskt angreppssätt som förmodligen grovt överskattar doseffekterna. Vidare överskattas doseffekterna av att spridning och utspädning i geosfären negligeras i de modeller som traditionellt används i analyserna för säkerhet efter förslutning. Effekterna av dessa förenklingar, samt alternativa angreppssätt för modellering av desamma, kommer att undersökas ytterligare. I den pågående säkerhetsvärderingen av SFL kommer specifikt effekten av spridning och utspädning i geosfären att undersökas.

11.6 Utveckling av hydrogeologiska beräkningsverktyg

SKB använder i huvudsak beräkningsverktygen ConnectFlow, DarcyTools och MikeShe för hydrogeologisk modellering. För modellering av vattendrag och deras interaktion med grundvattnet används bland annat Mike11, ett endimensionellt verktyg för kanalströmning som har en direkt koppling till MikeShe.

Beräkningsverktygen används för olika ändamål men är även delvis överlappande. ConnectFlow och DarcyTools fokuserar på det djupa grundvattnet, men hanterar även det ytnära grundvattensystemet, medan MikeShe fokuserar på det ytnära grundvattensystemet och ythydrologin (med koppling till atmosfäriska processer), men hanterar även det djupa systemet på en förenklad nivå (se även avsnitt 11.5). Beräkningsverktygen är funktionella för sina respektive användningsområden, men alla behöver underhållas och vidareutvecklas för att bibehålla sin aktualitet.

Program

Inledningsvis noteras att den primära utveckling av hydrogeologiska modeller som krävs i kommande steg av SKB:s program kopplar till utveckling av DFN-metodik och beskrivs i avsnitt 11.3.

Övriga utvecklingsinsatser inom hydrogeologisk modellering (beskrivna i detta avsnitt) har något lägre prioritet och ska ses som insatser för att upprätthålla och utveckla beräkningsverktygens funktionalitet i linje med den vetenskapliga forskningens framsteg.

För ConnectFlow planeras främst insatser för att utveckla DFN-modulen. En insats går ut på att inkludera en funktionalitet så att sprickors apertur (och därmed transmissivitet) kan bero på det aktuella spänningsfältet. Om spänningarna beräknas enklast i ConnectFlow eller i ett fristående beräkningsverktyg behöver undersökas. I ett första steg planeras en enkel form av envägshydro-mekanisk koppling (det vill säga spänningar påverkar apertur/transmissivitet och därmed flödet).

DFN-modulen planeras även att utökas med en funktionalitet så att den inkluderar partikeltransport i densitetsdriven strömning, samt matrisdiffusion. Vidare ska möjligheten att implementera ett dynamiskt K_d -koncept direkt i ConnectFlow undersökas. Detta skulle innebära att extern programvara för dynamiskt beräknade K_d -värden (se avsnitt 11.4) inte behöver användas, utan att K_d -värden för sorption skulle beräknas direkt i grundvattenflödesmodellen baserat på lokala kemiska och mineralogiska förhållanden. Specifikt skulle den kemiska variationen i matrisen då kunna hanteras fullt ut; i förenklade koncept såsom det som implementerats i Marfa (se avsnitt 11.5 ovan) antas att en kemisk förändring i matrisen sker samtidigt som den sker i sprickan, det vill säga effekten av den kemiska gradienten i matrisen försummas.

DarcyTools har inte tidigare använts för en detaljerad analys av ett KBS-3-förvar, det vill säga beräkningsrutiner för samtliga kvantitativa storheter som går vidare till beräkningar av långsiktig säkerhet efter förslutning har inte tagits fram. Utveckling planeras för att på ett konsistent sätt räkna fram de storheter som krävs, samt även för att implementera funktionalitet för att ge stöd till olika geometriska och hydrauliska acceptanskriterier för val av deponeringshål som tas fram inom andra delar av SKB:s program (se avsnitt 11.1).

Den uppskalningsmetodik av spricknätverk till kontinuumegenskaper som i dag används i DarcyTools är behäftad med vissa begränsningar. Det gäller speciellt konnektivitetsegenskaper och riktningberoende som blir lidande om inte den numeriska upplösningen är tillräckligt hög. Utveckling planeras så att kontinuumrepresentationen på ett bättre sätt beskriver det underliggande spricknätverket med avseende på konnektivitet och riktning.

Det behöver också undersökas hur den metodik för konditionering (betingning) som tas fram inom utvecklingen av DFN (se avsnitt 11.3) 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 svårt. Två alternativa tillvägagångssätt är möjliga. Det ena är att konditionering sker i ett annat verktyg, och att det konditionerade spricknätverket sedan läses in i DarcyTools för vidare uppskalning. Det andra tillvägagångssättet baseras på att den geometriska informationen på enskild spricknivå sparas internt i DarcyTools så att den finns tillgänglig även efter uppskalning. Hur den iterativa konditioneringsprocessen, där ändringar av sprickors lägen krävs, i praktiken ska utföras återstår att lösa.

MikeShe har utvecklats så att hydrauliska egenskaper kan ändras som funktion av tiden för att efterlikna frysnings- och upptyningsprocesser i permafrostmiljöer (Johansson 2016), se även avsnitt 11.8. Denna funktionalitet för tidsvarierande egenskaper gör det möjligt att analysera hur förändrad markanvändning och tjälprocesser påverkar vattenflöden och transportprocesser. Dock bör denna funktionalitet förfinas för att förenkla tillskrivningen av parametrar.

Användningen av MikeShe för vattenbalansberäkningar för mindre avrinningsområden kommer att utvecklas så att den lokala geologin och mindre delområden kan analyseras konsistent med dos-analyserna som görs inom biosfärsanalysen.

11.7 Påverkan av islast på bergets flödes- och transportegenskaper

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 bottenmältande. Om isen är bottenfrusen representerar den en stor ”mekanisk” last som kan leda till komprimering av

bergets porsystem. Om isen är bottensmältande 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

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.

Program

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.

11.8 Effekt av frysning på bergets flödes- och transportegenskaper

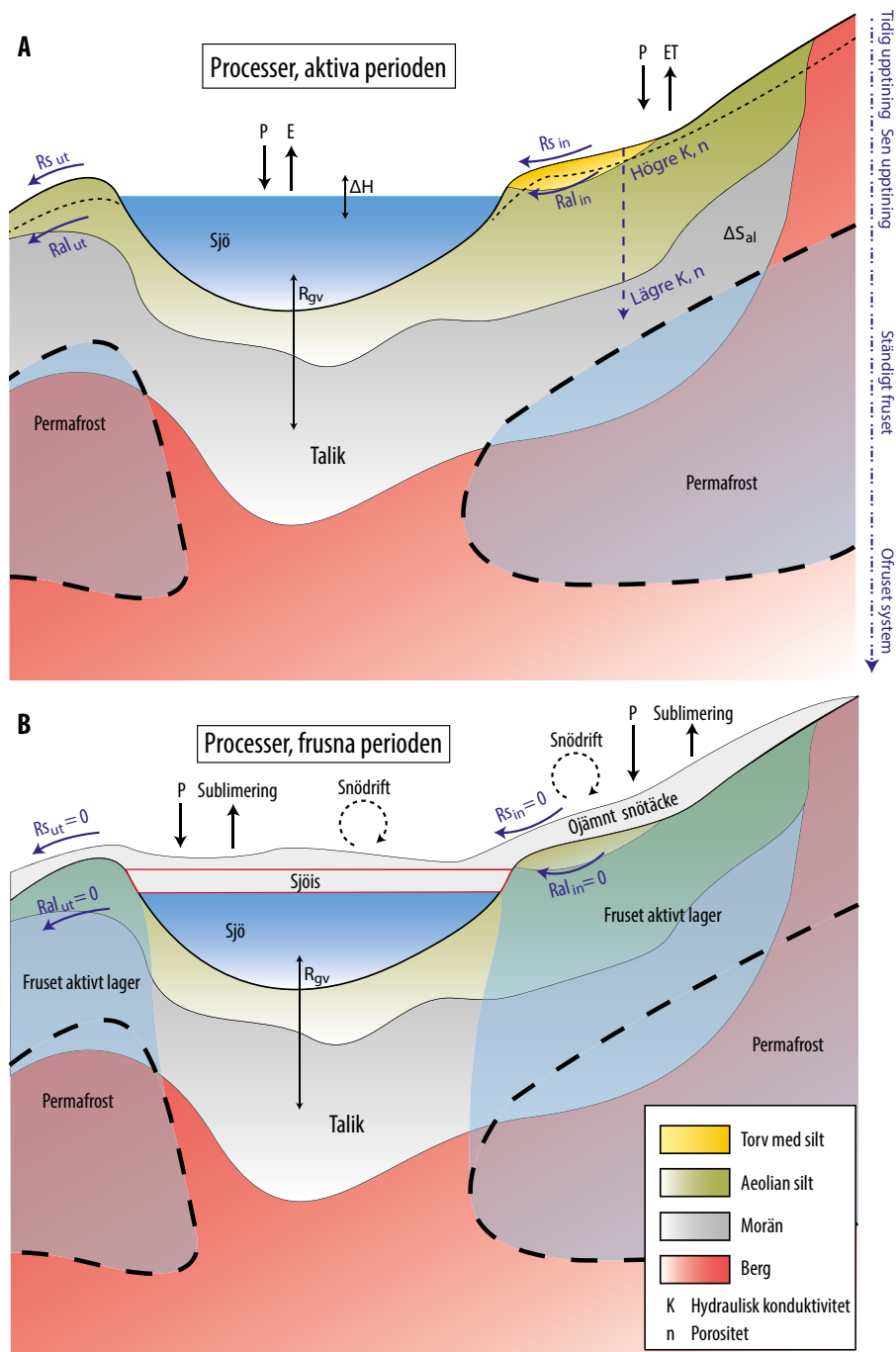
Större temperatursänkningar vid markytan kan orsaka att marken fryser och om frysningen varar mer än två år i sträck uppstår per definition permafrost. Permafrost i jord och berg leder till minskad permeabilitet och orsakar volymförändringar vilket i sin tur kan leda till nybildning, vidgning och/eller propagering av befintliga sprickor. Hur det hydrogeologiska systemet påverkas under olika stadier av permafrosttillväxt eller avsmältning är platsspecifikt och behöver analyseras i platsmodeller.

Nuläge

Det råder en begränsad förståelse kring hur frysning 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.

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 området 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. 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 GAP-projektet (se avsnitt 13.5).

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 11-3.



Figur 11-3. Konceptuell modell över hydrologin i det av SKB undersökta periglaciala avrinningsområdet på Grönland (Johansson et al. 2015b). 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.

Under 2015 och 2016 har sex vetenskapliga publikationer kommit ut inom ramen för GRASP (Johansson et al. 2015a, b, Johansson 2016, Rydberg et al. 2016, Petrone et al. 2016, Lindborg et al. 2016).

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-lokaliteten 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 GRASP ökar ju längre övervakningen pågår. Längre tidsserier ger ökad förståelse för den naturliga variationen och minskar osäkerheten i de modeller som byggts upp för det periglaciala systemet. Det etablerade övervakningsprogrammet på Grönland kommer därför att hållas i gång, i ett första steg de närmaste fyra åren.

Den ökade konceptuella kunskapen som uppnåtts som ett resultat av GRASP ska appliceras på Forsmark för att öka förståelsen för hur hydrologin kan komma att påverkas under framtida periglaciala förhållanden. Inom ramen för detta kommer modelleringsstudier för ytnära hydrologi i Forsmark att utföras, där nyvunnen kunskap från Grönland utnyttjas.

11.9 Hantering av glaciationscykel i hydrokemi- och transportmodellering

Nuläge

Pågående utveckling inom hydrogeologisk modellering möjliggör att geokemiska processer och transportprocesser (avsnitt 11.4) nu kan hanteras i hydrogeologiska modelleringsverktyg.

Hur det hydrogeologiska systemet påverkas under olika stadier av permafrosttillväxt eller avsmältning är plats-specifikt och behöver analyseras i platsmodeller. GAP (avsnitt 13.5) och GRASP (avsnitt 11.8) har lett fram till kunskap om hur hydrologiska processer i lokala avrinningsområden beter sig under permafrostförhållanden.

Program

Inom programmet kommer de vidareutvecklade modelleringsverktygen som kopplar hydrogeologiska och hydrogeokemiska processer, (DarcyTools–Pflotran samt ConnectFlow–PhreeqC, se avsnitt 11.4) att testas och användas för att studera inverkan av glacialt smältvatten på Kärnbränsleförvaret, till exempel genom att inkludera inträngning av syresatt grundvatten och de redoxreaktioner som kan uppstå. En ytterligare prioriterad insats är att använda de kopplade modelleringsverktygen för att analysera en glaciationscykel. Här inkluderas tempererade och glaciala klimatförhållanden samt förhållanden med permafrost för att studera om och hur dagens geokemiska och hydrogeologiska förhållande återuppstår efter en glaciation. Den nya kunskapen ska tillämpas till exempel inom plats-specifik och säkerhetsrelaterad modellering av Forsmark.

11.10 Effekt av frysning på bergets mekaniska egenskaper

Nuläge

Under de senaste 15 åren har SKB deltagit i forskningsprojektet Decovalex (Chan et al. 2005) och även bidragit med handledning inom ett pågående doktorandprogram tillsammans med Chalmers tekniska högskola. Projektet 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 modelleringskapabilitet rapporterats av Selvadurai et al. (2014). Dock finns fortfarande olösta frågor och osäkerheter som behöver åtgärdas för att hantera denna fråga inför kommande milstolpar, till exempel PSAR och SAR för Kärnbränsleförvaret respektive SFR.

Program

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 förvaren kommer att etableras.

11.11 Seismisk påverkan på säkerhet efter förslutning

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 medför en överdimensionering av slutförvarsanläggningen.

Metodiken för modellering av jordskalv har utvecklats under lång tid (Fälth och Hökmark 2006, Fälth et al. 2007, 2008), och har efter omfattande tester (Itasca 2013, Fälth 2014, Fälth et al. 2015) 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 utmana den antagna pessimismen i nuvarande angreppssätt. Ytterligare utvecklingsinsatser som indirekt berör skalvmodellering redovisas i avsnitt 11.12.

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.

11.11.1 Seismisk övervakning

Det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) har sedan starten av det automatiska systemet år 2000 registrerat, lokaliserat och beräknat fokalmekanismer för mer än 7 000 jordskalv (figur 11-4) med magnituder mellan cirka -2 och $5,3$. 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.

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.

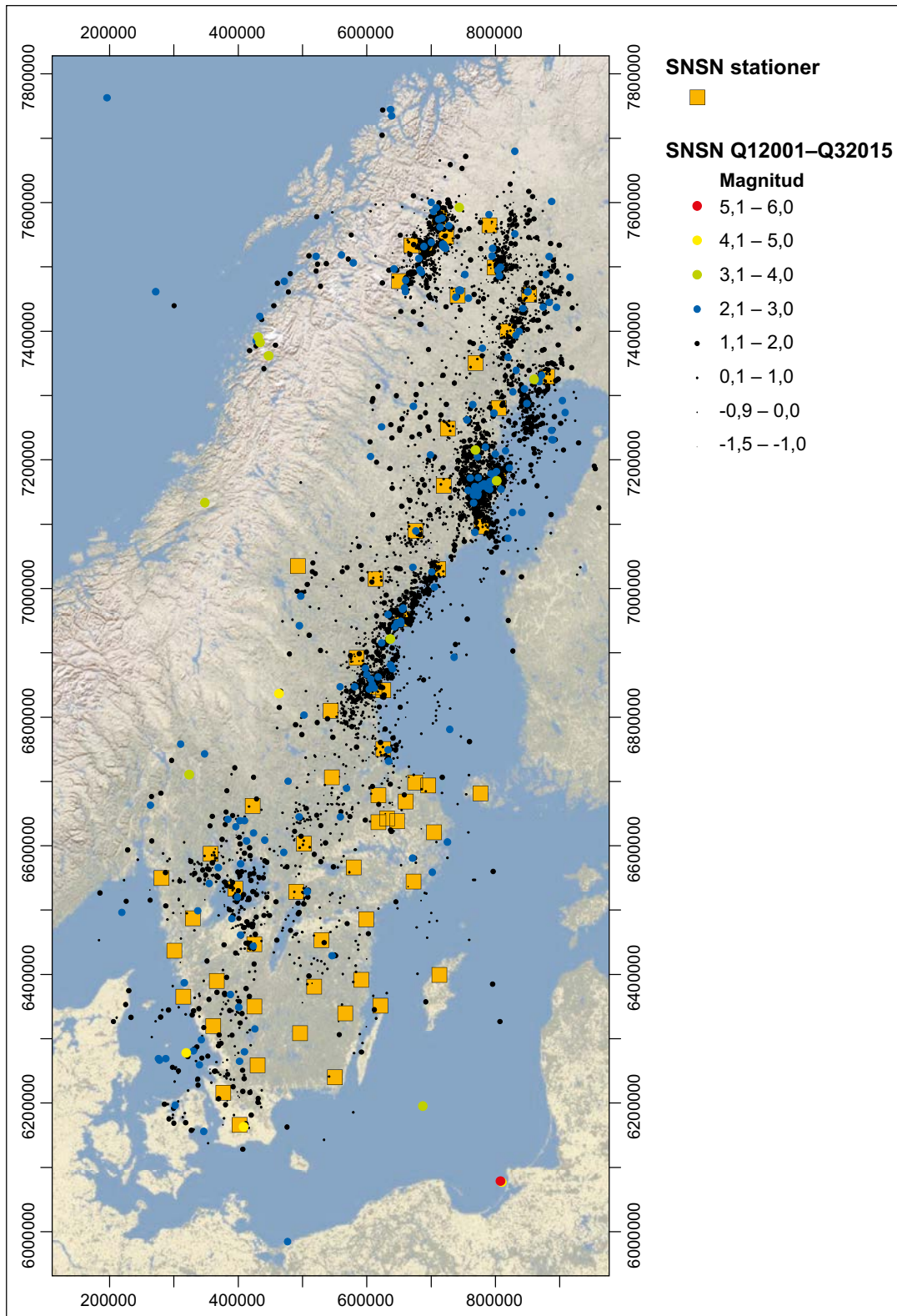
Program

En tomografisk analys (se exempelvis Tryggvason och Linde 2006), som ger en tredimensionell hastighetsmodell pågår. Resultatet kommer att användas för omlokaliseringar av jordskalven. Kopplat till detta pågår även en så kallad ”multi-event-analys” av jordskalvslokaliseringarna vilket avsevärt förbättrar precisionen på lägesbestämningarna och beräknade magnituder. Omlokaliseringarna kommer att utgöra underlag till nya beräkningar av fokalmekanismer och spänningsinversion vilket bland annat ska användas till att beräkna spänningsfält på stora djup.

11.11.2 Undersökningar av glacialt inducerade förkastningar

Nuläge

Burträsk är det mest seismiskt aktiva området i Sverige (figur 11-5c). Uppsala universitet har sedan några år tillbaka förtätat de seismiska stationerna i Burträskområdet för att få mer precisa data (Lund et al. 2015). Resultatet av förtätningen har varit mycket lyckosamt då det har kunnat visas att skalven klustrar 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 klustrar i detta plans förlängning och analyserna indikerar vidare (pågående arbete) att endast den övre skorpan, ner till cirka 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.

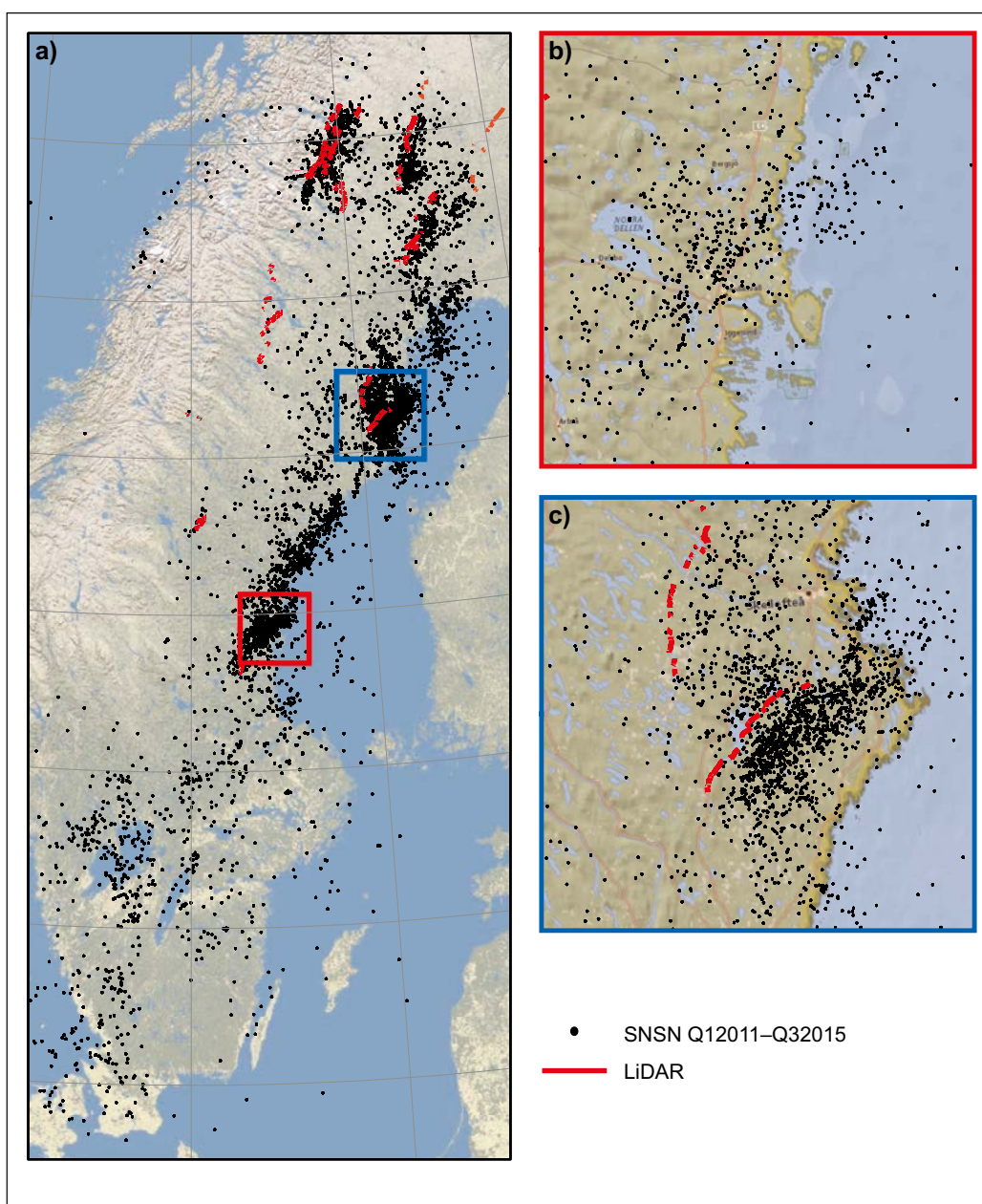


Figur 11-4. Jordskalv registrerade med svenska nationella seismiska nätet (SNSN 2015) under åren 2001–2015 (M_w – momentmagnitud). Data från SNSN (Bödvarsson 2012).

Ett system av möjliga, glacialt inducerade, förkastningar har identifierats i Lillsjöhögen, Jämtland, av Mikko et al. (2015). Området har genomgått översiktliga kvartärgeologiska undersökningar men befintlig information är otillräcklig för att kunna bekräfta eller avfärda lineamenten som glacialt inducerade förkastningar. Den seismiska aktiviteteten i området är låg till mycket låg, emellertid

indikerar de fåtal registreringarna av SNSN (2015) ett diffust stråk av skalv parallellt med systemet av lineament i ett annars lågseismiskt område. Detta indikerar att strukturerna kanske endast representerar en liten del av en långt större struktur, vilket bland annat påverkar beräkningar av framtida skalvmagnituder.

Registreringar av SNSN (2015) visar ett mycket distinkt, nordostligt strykande, kluster av skalv nordväst om Iggesund (figur 11-5 b). 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 närmre.



Figur 11-5. 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.

Program

För området nordväst om Iggesund (figur 11-5 b) planeras i första hand en förtätning av de seismiska stationerna i området med några temporära stationer för att öka precisionen i lokaliseringarna och därmed möjliggöra en identifiering av den struktur som i dagsläget är seismiskt aktiv. Vidare planeras en detaljerad omtolkning av den geologiska och geofysiska informationen som finns till hands. En mindre fältinsats (kartering) kan krävas för att bekräfta tolkningarna.

Även de övriga nyligen identifierade eller uppdaterade indikationerna av glacialt inducerade skalv (figur 11-6) kommer att undersökas närmare för att utröna huruvida de verkligen representerar paleoseismiska händelser eller ej. För dessa, i dagsläget mindre seismiskt aktiva strukturer, planerar SKB en regional, kompletterande analys, till de analyser som nyligen utförts av Smith et al. (2014) och Mikko et al. (2015). I ett första steg sammanställs SGU:s befintliga geofysiska data över nyckelområdena som tidigare identifierats av Mikko et al. (2015). Dessa data omfattar bland annat flygmätningar, främst magnetfält, VLF (very low frequency) och naturlig gammastrålning, samt markmätningar, främst magnetfält, tyngdkraft, radar, resistivitet och VLF. Viss bearbetning och om-modellering av data kan komma att krävas i syfte att analysera den specifika frågeställningen av glacialt inducerade förkastningar. Förutom möjligheten att grovt bestämma de potentiella förkastningarnas geometrier kan, i gynnsamma fall, även strukturernas kinematik adresseras. Modellering av regionala data kan identifiera kunskapsluckor och utgöra underlag för mer detaljerade studier.

För lokaler där mer detaljerade undersökningar erfordras avser SKB komplettera den regionala datamängden med punktundersökningar av nyckellokalerna. Förutom kvartärgeologiska undersökningar kommer lokalerna att undersökas med någon kombination av följande metoder: markburen RMT (magnetotelluric), ERT (electrical resistivity tomography), radar, magnetfält, täta tyngdkraftsmätningar kompletterat med ett antal temporära seismiska stationer.

11.11.3 Undersökning av möjlig tsunami

En framträdande erosionsdiskontinuitet i glaciolakustrin lera överlagrad av grovsand och grus längs Upplandskusten har beskrivits. Lagerbäck et al. (2005) föreslår en förklaringsmodell som innefattar starka, kustnära, havsströmmar under pågående regression av havsytan medan Mörner et al. (2000) förordar en förklaringsmodell innefattande en tsunami orsakad av ett närliggande, glacialt inducerat jordskalv.

Program

För att utreda vilken av de ovan nämnda förklaringsmodellerna som är troligast, och därmed fördjupa förståelsen av svensk paleoseismicitet, avser SKB i första hand undersöka diskontinuitetens och de överliggande lagrens stratigrafi och sedimentologi i ett flertal dikesgrävningar. Främst avser SKB utröna flödesriktningar och skjuvspänningsförhållanden då det grävsta materialet avsattes. I andra hand ska sjöar belägna över högsta kustlinjen undersökas med avsikt att söka bevis för tsunami-avlagringar. Arbetet omfattar främst analyser av sedimentkärnor från sjöbottnar. I görligaste mån ska kol-14-datering knyts till geologiska observationer.

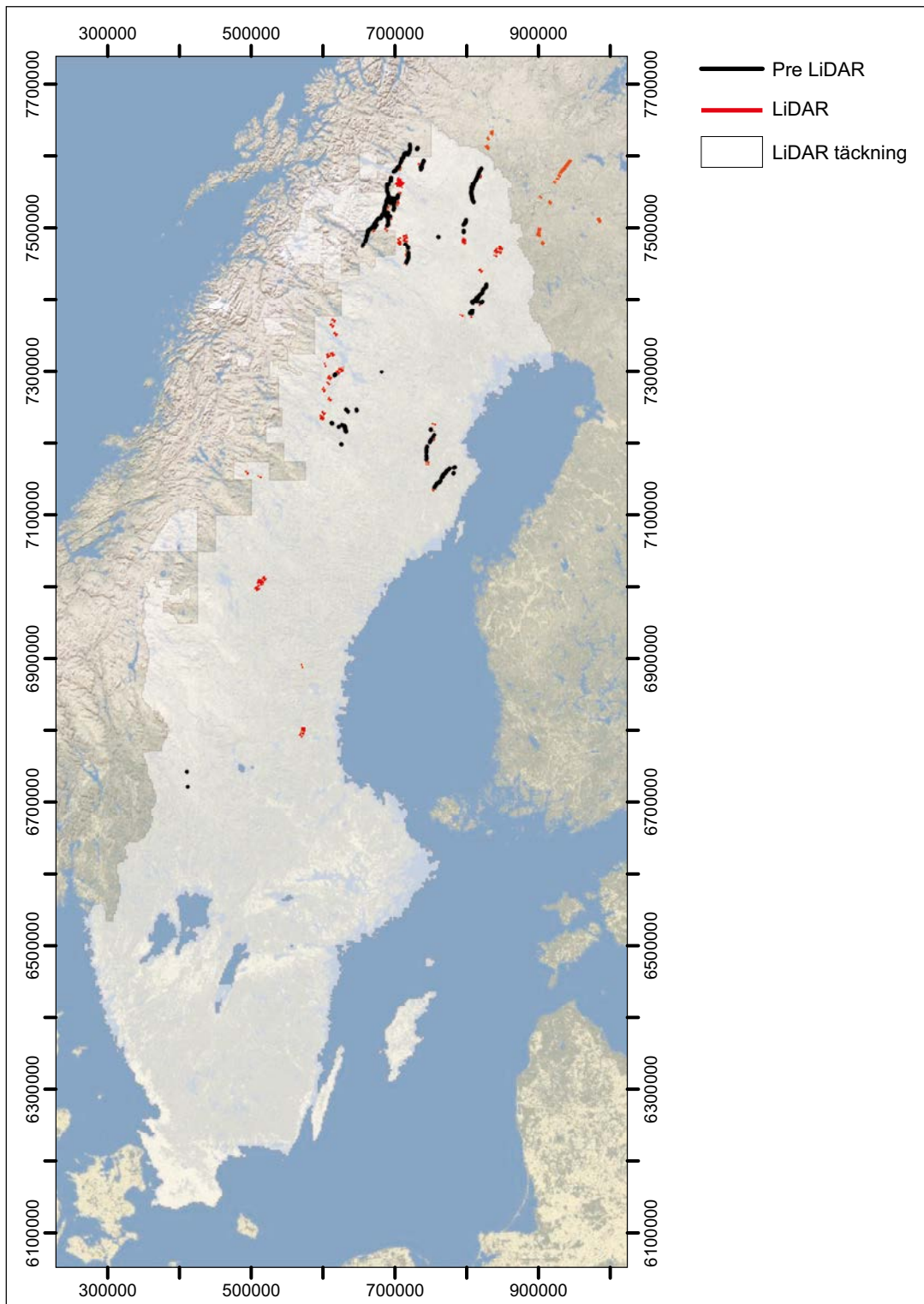
11.11.4 Modellering av seismisk påverkan på slutförvarsanläggningen

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). Utvecklingen har delvis skett i form av ett doktorandprogram med delresultat redovisade i Fälth (2015). 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).

Modellerna som hittills analyserats har avsiktligt baserats på vad som bedöms vara pessimistiska eller mycket pessimistiska förhållanden. 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. Exempelvis

kan ett mer realistiskt antagande om ett icke-plant sprickplan kraftigt reducera inducerad skjuvning vilket visats av Lönnqvist och Hökmark (2015). Å andra sidan kan variation av hållfastheten över förkastningsplanet medföra att vissa delar genomgår mer dramatiska brottförlopp, vilket resulterar i kraftigare seismiska vågor och i slutändan större inducerade förskjutningar.



Figur 11-6. Identifierade topografiska lineament som utgör möjliga, glaciellt inducerade, förkastningsbranter. Svarta linjer representerar äldre tolkningar baserade på främst flygbildstolkning medan de röda linjerna visar lineament identifierade genom nyligen utförda mätningar av Lantmäteriet (2015). De grå rutorna representerar täckningen (2015) av den högupplösta Lidar.

Program

Förutom variation av egenskaper över, i första hand, förkastningens och, i andra hand, målsprickornas ytor planeras följande utvecklingsinsatser när det gäller modellering:

- Förbättrad implementering av förkastningens kanter. I dagsläget modelleras kanterna på sprickzonen abrupt vilket medför orealistiska, lokala, stresskoncentrationer som resulterar i stora inducerade skjuvbelopp på de närmast belägna målsprickorna.
- Implementering av plastisk till semiplastisk deformation längs förkastningens plan. Detta kan styra brottpropageringsprocessen och då även inducerad skjuvning av målsprickorna. Idealt inkluderas en så kallad ”Damage zone” (Choi et al. 2016) i 3DEC eller kompletteras med separata studier med PFC3D. Hybridmodeller av FLAC3D och FPC3D kommer att övervägas efter systematisk utvärdering.
- Implementering av alternativa brottpropageringsalgoritmer (rupture algorithms). I dagsläget styrs brottet i 3DEC-modellerna genom en parametrisk minskning av hållfastheten tills brott uppstår. Det är numera standard i olika moderna beräkningsverktyg att låta brottet propagera spontant. Brottprocessen styrs då av zonens egenskaper och förspänning i högre grad än vad den gör med de algoritmer SKB hittills använt. Vanligt är att låta hållfastheten styras av en så kallad ”slip-weakening-lag” (SW) eller ”rate-and-state-lag” (RS). SKB avser att i första hand utveckla spontanbrott med SW då den är mindre komplex att implementera. I arbetet ingår att systematiskt utvärdera effekten av olika lägen av förkastningens hypocentrum, för att utesluta underskattning av inducerad skjuvning, samt systematiskt utreda effekten av skjuvhastigheten av förkastningen som i dagsläget standardmässigt antas vara 70 procent av skjuvvågshastigheten.
- Fördjupade analyser av samverkan mellan olika förkastningar (fault interaction), mer precist, hur ett skalv på en zon kan övergå till ett skalv på en annan zon och totalt ge större effekt på målsprickorna.
- Fördjupade analyser av effekten av förgreningar från förkastningar (splays).
- Mer fullständig propagering av osäkerheter. SKB har i dagsläget ett otillräckligt antal modelleringsfall för att täcka ett pessimistiskt utfallsrum. Exempelvis behövs större rumslig variabilitet i de ingående bergspänningarna (storlek, riktning), rumslig variabilitet i bergmassans egenskaper (till exempel sprickintensitet), rumslig variabilitet i skjuv- respektive bulkmoduler samt den temporala variabiliteten som följer av den termiska lastens avklingande. I detta arbete inkluderas beräkningsfall där hänsyn tas till alternativa islastutvecklingar i tillägg till de som gjorts för referensglaciationen. Som en del i detta arbete studeras även spänningarna på/runt förkastningen, framför allt hur spänningsvariationerna påverkar brottutbredning och spänningsomvandling runt förkastningen.
- Stick-slip. Målsprickorna har hittills antagits ha statiska Mohr-Coulomb hållfasthetsegenskaper (det vill säga oberoende av skjuvbelopp). SKB avser även modellera fall då målsprickorna tillåts förlora något av sin hållfasthet i samband med förskjutning (det vill säga modellera så kallad ”stick-slip behaviour”).
- ”Damage zone”. SKB avser modellera fall där målsprickan delvis ligger i damage zone eller tangerar källförkastningen både med statiska Mohr Coulomb-egenskaper och med målsprickor vars hållfasthet minskar parallellt med källförkastningens. Idealt skulle denna kunskap kunna nyttjas för att optimera förvaret genom att nyttja bergvolymen som med nuvarande layout upptas av respektavstånd.

11.12 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 karakterisering av bergmassans mekaniska egenskaper är mycket effektiva för utformning och konstruktion, men analys av säkerhet efter förslutning kräver en djupare och mer grundläggande förståelse och karakterisering av de kopplade THM-processer som påverkar bergmassans beteende.

De numeriska verktygen för att modellera en syntetisk bergmassa har kontinuerligt utvecklats och på senare år genomgått en mycket 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

Diskontinuum-metoder baserade på den diskreta elementmetoden (DEM) har i programvarorna UDEC (Itasca 2014a) och 3DEC (Itasca 2013) utvecklats för karakterisering av bergmassans mekaniska (M) och hydromekaniska (HM) egenskaper. Dessa verktyg har använts av SKB som komplement till den traditionella, empiriskt baserade, metodiken för beräkning av bergmassans mekaniska egenskaper (se exempelvis Olofsson och Fredriksson 2005, Glamheden et al. 2007).

Partikelbaserade verktyg av typen Particle Flow Codes (se exempelvis Itasca 2014b) 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 (problemets skala), detaljeringsgrad och komplexitet. Trots detta har SRM-modeller på ett avgörande sätt kunnat bidra till framtagandet av DFN-baserade, analytiska ekvationer som kan beskriva bergmassans egenskaper. En strategi i vilken analytiska och numeriska modeller används i kombination 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).

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 syftar till att förbättra kunskapen om hur en sprickas skjuvegenskaper kan skalas upp. Projektet kommer att redovisas under 2016. Effekten av storskalig undulation på sprickans skjuvmekaniska beteende studeras också som en del av doktorandstudier vid Chalmers tekniska högskola med stöd av SKB (Lönnqvist och Hökmark 2015). I ett annat doktorandprojekt som nyligen avslutats studerades effekterna av sprickgeometrin på hydromekaniska egenskaper hos kristallin berggrund (Thörn 2015).

I samband med höga normalspänningar minskar effekten av dilatation, men det finns fortfarande osäkerhet i hur mycket detta påverkar transmissiviteten. Ökning av normalspänningen från 2 till 4 MPa föreföll att undertrycka ökningen av transmissiviteten mycket effektivt i hydromekaniska skjuvtester utförda av Olsson (1998). Esaki et al. (1999), å andra sidan, observerade transmissivitetsökningar 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 upprepade 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 utveckla en ”state of the art”-metodik för beräkningar av bergmassans hydromekaniska egenskaper. Metodiken ska omfatta följande:

- Skaleffekt. Effektiva HM-egenskaper i olika skalor baserade på DFN (PFC, 3DEC, analytiskt förhållningssätt) behöver etableras för initialtillståndet.
- Egenskaper hos och regler för egenskapsansättning på DFN, som till exempel sprickors transmissivitet, behöver analyseras och utvecklas så att ett relevant initialtillstånd kan erhållas (se även avsnitt 11.3). Hur detta kan konceptualiseras i storskaliga modeller (till exempel DarcyTools, 3DEC) behöver utredas.
- Jämförelse mellan in situ- och/eller laborietester, och modellering används för att etablera konstitutiva samband för att beskriva hur de effektiva HM-egenskaperna varierar med spänningsfältet.

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, samt 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 flöde som effekt av skjuvning ska också genomföras.

Följande mekaniska parametrar av betydelse behöver fastställas eller uppskattas:

- 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 sprickrörelse, undulation, kontaktyta och mineralutfyllnad.

11.13 Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning

Nuläge

SSM ansåg att vissa konceptuella frågeställningar från granskningen av Fud-program 2007 inte i tillräcklig omfattning beaktats i Fud-program 2010 och 2013. SSM betonade speciellt frågeställningar om sprickbildning, sprickpropagering och sammanlänkning av existerande sprickor i närheten av deponeringshål. 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 så framhöll SSM att när det gäller bergmekanik och kopplade processer så bör SKB i modelleringen eftersträva att kvantifiera inverkan av realistiska sprickgeometrier på tillstånd och processer relevanta för säkerheten.

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 sprickrörelse 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 2013. 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 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 både små och stora skalor. För detta krävs ett program med begränsat antal laboratorieförsök.
- Transmissivitetsförändringar i bergmassan kring deponeringstunnlar och deponeringshål på grund av spänningsförändringar orsakade av seismisk, termisk och glacial last.
- Spjälkning i deponeringshål och -tunnlar som effekt av spänningsförändringar orsakade av seismisk, termisk och glacial last.

11.14 Bergspänningar i Forsmark

Nuläge

Bergspänningsmodellen för Forsmark innehåller stora osäkerheter, och det finns ett starkt 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).

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 (LVDT, 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, en detaljerad laserskannad modell av tunnelavsnittet där mätningen utförts samt elasticitetsmodul uppmätt på solida borrhåll från pilothålen 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 tidigare resultat från överborringsmätningar, samt tidigare resultat och spänningsmodell (Christiansson och Janson 2003).

Program

Under Fud-perioden planeras framtagande av en bergspänningsmodell i 3D baserad på aktuell geologisk strukturmodell (Stephens och Simeonov 2015). Denna bergspänningsmodell kommer att utgöra en bas för uppdaterade beräkningar av risken för spjälkning och stabilitet inom olika förvarsvolymer, samt ge randvillkor för övrig modellering av inducerade sprickrörelser (seismisk och termisk last). Planen är sedan att modellen ska uppdateras kontinuerligt i samklang med uppdateringar av den geologiska strukturmodellen och när nya bergspänningsdata (direkta och indirekta) finns tillgängliga. Det huvudsakliga syftet med modellen är att i hög upplösning (30–100 meters block) ta fram rumslig variabilitet av spänningsellipsoidens form och riktning.

12 Ytekosystem

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 miljöövervakning, bedömningar av eventuella miljöförändringar, och för analysen av säkerheten i både befintliga och planerade anläggningar. Dessutom bidrar programmet till ett långsiktigt bevarande av kompetens inom området, vilket är nödvändigt för SKB:s framtida arbete med säkerhetsanalyser för befintliga och planerade förvar. Som en viktig del i att säkerställa kvaliteten på arbetet ingår att presentera resultaten i vetenskapliga publikationer samt vid internationella möten. Dessutom underhålls modelleringsverktygen och databaserna kontinuerligt.

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. När det gäller ett utbyggt SFR kan granskningen ge upphov till frågor som måste lösas inför PSAR för SFR. För SFL finns flera frågor som måste lösas innan en ansökan kan lämnas in.

Det finns alltså ett antal frågor som kräver vidare insatser, antingen för att det har framkommit i myndigheternas kommentarer till granskningen av inlämnade ansökningar, eller för att SKB har bedömt att det krävs 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 hos vissa ämnen som potentiellt kan ge ett stort riskbidrag.

En översikt av SKB:s arbete inom ämnesområdet under senare år återfinns i ett specialnummer av *Ambio* (Kautsky et al. 2013). För den senast genomförda 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). Nedan redovisas kort de arbeten som ligger till grund för fortsatta studier, samt det planerade programmet för denna Fud-period. En komplett redovisning av producerade resultat återfinns i rapporteringen från de senaste säkerhetsanalyserna.

12.1 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 omgivande medium (vatten, jord eller sediment). Osäkerheterna för CR-värden är emellertid mycket stora, och därför har SKB arbetat långsiktigt med att utveckla alternativa metoder för att uppskatta radionuklidupptag i organismer (se till exempel Kumblad och Kautsky 2004, Konovalenko 2012). Vid granskningen av Fud-program 2013 uppmuntrade SSM detta arbete.

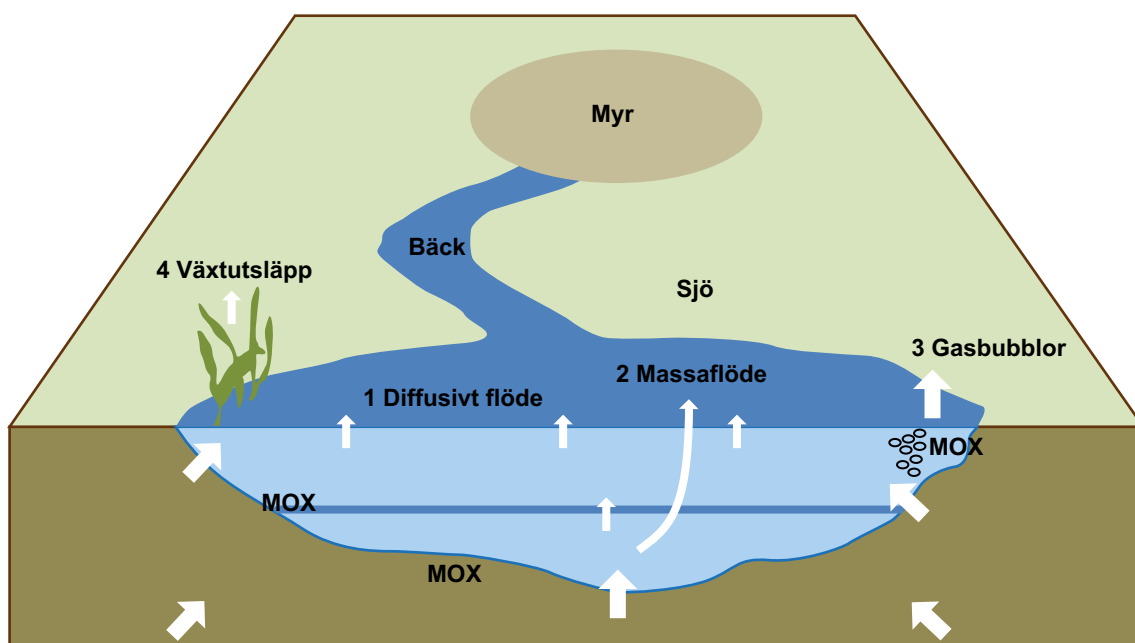
För de flesta större djur är upptaget av radionuklider främst kopplat till födointag, och därför har SKB:s arbete fokuserat på att beskriva näringskedjor. Initialt sker det huvudsakliga upptaget i näringskedjan i form av växtupptag, vilket är kopplat till upptag av vatten och närsalter. I SKB:s tidigare arbete har viktiga upptagsmekanismer för akvatiska och terrestra system beskrivits i ekosystemböckerna (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010). Underlaget till dessa beskrivningar baseras till stor del på platsundersökningarna, och ett arbete pågår för att utforma ett framtida övervakningsprogram som ska ge underlag till nödvändiga kompletteringar.

I en ny avhandling redovisas arbetet med att beskriva radionuklidupptag i akvatiska näringsvävar (Konovalenko 2014, Konovalenko et al. 2014, 2016). Avhandlingsarbetet omfattar emellertid inte rinnande vatten. Forskning indikerar att vissa radionuklider kan ackumuleras i botten på rinnande vatten (Lidman et al. 2011, 2012, 2016) och SKB utesluter inte att rinnande vatten i vissa framtids-scenarier kan ha större betydelse för radionuklidomsättning i ytekosystemen än vad som tidigare antagits.

Mekanismer för upptag av radionuklider i terrestra ekosystem har tidigare studerats med hjälp av Coup- och Tracey-modellerna (Gärdenäs et al. 2009). I en ny avhandling har Tracey-modellen vidareutvecklats. Bland annat har jordbruksväxters upptag av våtdeposition via bladen studerats och resultaten har inkluderats i modellen (Bengtsson 2013). Arbetet med att i de förenklade modeller som används i säkerhetsanalysen ta hänsyn till effekter av olika upptagsvägar, och av hur upptagna radionuklider allokeras i växten, kvarstår emellertid.

Vid arbetet med säkerhetsanalysen för SFR har faktorer som inlagring av organiskt kol, gastransport och upptag av koldioxid via rötter bedömts som viktiga för att beskriva omsättningen av kol-14. Biosfärsmodellen har uppdaterats i enlighet med detta, och en ny beskrivning för spridning i ytnära atmosfärsfärslager har implementerats (Saetre et al. 2013). I säkerhetsanalysen antas all kol-14 vara tillgänglig för fixering via fotosyntes (i form av koldioxid eller vätekarbonat). Att detta är ett rimligt antagande i omättade jordlager har nyligen visats experimentellt (Hoch et al. 2014), men kol-14 kan även tänkas nå biosfären i form av metan i syrgasfria miljöer.

SKB har initierat arbeten för att beskriva metanomsättning i naturliga ekosystem (Natchimuthu et al. 2015). Metan som når ytekosystem från berget kan oxideras av mikroorganismer och omvandlas då till biomassa eller koldioxid (figur 12-1). Metan som inte oxideras kan avges till atmosfären på olika sätt, såsom via bubbelflöde, diffusion genom vatten, eller transport via luftkanaler i vattenlevande växter. Metan som innehåller kol-14 från radioaktivt avfall kan alltså antingen nå atmosfären som metan eller koldioxid, eller också tas upp i näringsväven via metanoxiderande mikroorganismer eller via växtupptag av koldioxid som bildats genom metanoxidation.



Figur 12-1. Olika processer som påverkar utströmning och omvandling av metan i ytnära ekosystem. Metan kan avgå till atmosfären genom diffusion (1), vattentransport (2), gasbildning (3) eller växtutsläpp (4). Metan kan också omvandlas till organiskt material eller koldioxid av metanoxiderande mikrober (betecknade som MOX i figuren).

Transport och upptag av gas kan vara av betydelse också för vissa ämnen som kan sublimeras, till exempel jod och klor (Hardacre och Heal 2013), vilket också SSM påpekade vid granskningen av Fud-program 2013. Klor i naturen är inte inert (vilket ofta antas), utan kan övergå till organiska föreningar som har andra upptags- och upplagringsvägar än oorganiskt klor. Uppehållstiden för klor i terrestra system är förvånansvärt lång, och det finns ett antal olika pooler av klor som beter sig på helt olika sätt (Bastviken et al. 2013). Den nya bilden av kloromsättning i naturen som börjar framträda är baserad på studier i markmiljöer; motsvarande studier i akvatiska system saknas.

Den analys av doser till andra organismer än människa som gjordes i SR-Site har kompletterats av Jaeschke et al. (2013), och SSM har ställt sig positiva till det kompletterande arbetet. Metodiken har därefter använts i SR-PSU, och har där integrerats med transport- och ackumulationsberäkningarna. SSM har emellertid efterfrågat förklaringar till skillnader i resultaten för vissa nuklider mellan Erica- och Resard-verktygen (Stark 2015), och internationellt har behovet av att kunna extrapolera effekter av strålning från individnivå till populations- och ekosystemnivå uppmärksammats (Bradshaw et al. 2014, Bréchignac et al. 2016). SKB ser att modeller som beskriver upptag och ackumulation i näringsvävar och ekosystem ger en möjlighet till oberoende jämförelser med både Erica- och Resrad-verktygen. Den här typen av modeller ger även en möjlighet att skala upp beräknade doser till populations- och ekosystemnivå.

På senare tid har EU-nätverket Star redovisat flera olika metoder att uppskatta koncentrationsfaktorer (CR) som i högre utsträckning än tidigare är baserade på biologiska och ekologiska mekanismer (se sammanfattning i Beresford et al. (2016)). En del av dessa metoder är i förlängningen intressanta att använda tillsammans med SKB:s ekosystemmodeller i modelleringen av radionuklidtransport, för att därigenom minska osäkerheterna i radionuklidupptaget hos organismer.

Program

SKB kommer att fortsätta det långsiktiga arbetet som syftar till att ersätta eller komplettera vissa centrala koncentrationsfaktorer för organismer med mekanistiska modeller. För existerande modeller planeras en validering med fältdata (till exempel näringsämnen och andra stabila ämnen). Dessutom planeras en jämförelse av resultat från de CR-baserade metoder som använts hittills med resultat från allometrisk metod (Beresford et al. 2016), för att kunna dra slutsatser om osäkerheter i olika upptagsmodeller.

Som en fortsättning på arbetet med sjöekosystemmodellen kommer en modell för rinnande vatten att utvecklas. Trots att rinnande vatten på många sätt liknar sjöekosystemen, kan skillnader när det gäller hydrologin, förutsättningar för kemisk utfällning av olika ämnen (se avsnitt 12.4), 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 kopplingar mellan radionuklidupptag och vattentransport respektive primärproduktion.

Betydelsen av gastransport, till exempel av metan och koldioxid, för omsättningen av kol-14 i vatten, mark och atmosfär kommer att undersökas, tillsammans med upptagsprocesser av gas genom primärproduktion och mikrobiell metabolism. För att bedöma i vilken utsträckning metan från djupa marklager späds ut av ytligare producerad metan, och hur stor andel som oxideras respektive frigörs till atmosfären, kommer metanflödet i naturliga ekosystem att följas med nyutvecklade mätmetoder.

Det finns i dag kunskapsluckor när det gäller klors egenskaper i akvatiska miljöer (våtmarker, sjöar och rinnande vatten), trots att dessa miljöer är viktiga recipienter för potentiella utsläpp av klor-36. Det är möjligt att stora mängder klor kan bindas i organiskt material i ytsediment för att sedan tas upp i näringsväven med långa uppehållstider och ackumulation i organismer som följd. Alternativt styrs kloromsättningen i dessa system huvudsakligen av vattnets transporthastighet och omsättning. För att bättre kunna modellera transport och ackumulation av klor-36 i akvatiska miljöer planeras undersökningar som syftar till att länka nya mätningar av organiskt bundet klor (se avsnitt 12.4) till flödet av klor genom systemet och till biologisk produktion, för att därigenom kunna modellera klorets kretslopp. I modellerna kommer även volatiliseringsen av klor som beskrivs i avsnitt 12.4 att inkluderas.

12.2 Landskapets utseende och dynamik

Nuläge

En av de viktigaste faktorerna för att beräkna dosen vid ett utsläpp av radionuklider är landskapets utseende och dynamik. Beroende på vilken typ av ekosystem ett utsläpp sker till, vilka egenskaper ekosystemet har och vid vilken tidpunkt utsläppet sker, kan den beräknade dosen påverkas i flera storleksordningar.

Som ett underlag för säkerhetsanalyser i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har SKB tagit fram en historisk beskrivning som redogör för processer som styr landskapets utveckling på platserna fram till i dag (Söderbäck 2008). Den historiska beskrivningen har kopplats ihop med aktuell förståelse av hur landskapet ser ut och fungerar i dag (SKB 2008, 2009b), och tillsammans utgör detta grunden för att beskriva en sannolik utveckling av landskapet under olika antaganden om framtida klimat och strandlinjeutveckling.

Landskapsutvecklingen i Forsmark styrs främst av klimatvariation och strandlinjeförskjutning (se kapitel 13). 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 och Strömberg 2010). När ekosystemen avlöser varandra förändras de kemiska och fysikaliska egenskaperna hos mark och vatten, liksom artsammansättningen hos växter och djur.

I landskapets topografiska lågpunkter, till exempel i anslutning till sjöar, vattendrag och våtmarker, återfinns hydrologiska utströmningsområden för djupt grundvatten (se avsnitt 12.3). Förutsättningarna för transport och ackumulation av radionuklider i dessa områden bestäms dels av utströmningsområdets egenskaper och storlek, dels av topografin och egenskaper i det lokala och regionala avrinningsområdet. I många fall definierar även landskapets storskaliga utveckling under vilka tidsperioder som djupt grundvatten kan strömma upp till ytan på en viss plats.

Det finns alltså en naturlig samvariation mellan storlek och egenskaper hos de utströmningsområden som kan nås av utsläpp, vilken beror på var i landskapet objekten är lokaliserade. Ett objekts position är även kopplad till avrinningsområdets storlek och det påverkar under vilka tidsperioder som utsläpp till objektet är möjliga. Variationer i den lokala topografin, jordlagerföljd och ekosystemsuccession kan också förväntas skapa en heterogenitet inom ett utströmningsområde, vilket SSM påpekat i granskningarna av SR-Site och Fud-program 2013.

För att undersöka hur småskalig variation i topografi och jordlagertjocklek påverkar transport och ackumulation av radionuklider som når ett utströmningsområde har SKB påbörjat simuleringar med Comsol-verktyget (von Schenck et al. 2015, Silva et al. 2015). Studierna omfattar dels det viktigaste utströmningsområdet för SFR, och dels en markprofil i Krycklanområdet i Västerbotten. Eftersom det nyligen utvecklats verktyg som kopplar ihop vattenflöden med sorption och utfällning (till exempel via PhreeqC) i rumsligt distribuerade modeller, finns det goda förutsättningar att studera hur till exempel flödesvägar, lagermäktigheter och redoxzoner påverkar ackumulation, och hur löst organiskt material påverkar transporten av olika ämnen (se vidare avsnitt 12.4). I en större skala kopplar det till Marfa-modellen (se vidare avsnitt 11.4).

Det doktorandarbete i Krycklanområdet 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 inverkan på både förekomstformer och ackumulation av olika ämnen (Lidman et al. 2013, 2014, 2016, Köhler et al. 2014).

Våtmarkers bildning, storlek och transportegenskaper är viktiga variabler vid dosmodelleringen. En genomgång av SGU:s 80 år gamla torvarkiv från norra Uppland har använts för att visa förutsättningarna för ackumulation av torv och effekterna av uppodling av torvmarker i Forsmarksområdet (Sohlenius et al. 2013a). Vid sidan av torvförekomst påverkar även andra avlagringars mäktighet och egenskaper både grundvattnets rörelser och sorption av olika ämnen. Därför har SKB tagit fram en förbättrad jorddjupsmodell för Forsmarksområdet i samband med säkerhetsanalysen SR-PSU (Sohlenius et al. 2013b).



Figur 12-2. Det flacka landskapet i Forsmarksområdet med en mosaik av våtmarker och sjöar som avsnörts från havet under de senaste seklerna. Vattenområdena kommer med pågående landhöjning att inom en relativt snar framtid vara lämpliga som jordbruksmark och de är viktiga områden för en potentiell exponering av radionuklider från ett slutförvar.

För att förstå landskapets inverkan på grundvattenrörelser och ämnestransport under ett kallt klimat tillstånd har ett område på Grönland framför isranden studerats inom projektet GRASP (se kapitel 13). Bland annat har det hydrologiska samspelet mellan det aktiva lagret, sjö och talik studerats, liksom betydelsen av deposition av vindburet material för bildning av sjösediment och deras kemiska egenskaper (Johansson et al. 2015a, b, Rydberg et al. 2016). De nya kunskaperna från GRASP har ännu inte utnyttjats fullt ut för förståelsen av våra platser i Sverige.

SKB har deltagit aktivt i IAEA-projekten EmrasII och Modaria. En arbetsgrupp inom Modaria har arbetat för att åstadkomma en samsyn när det gäller beskrivning av den kommande klimatutvecklingen (Becker et al. 2014), och arbetsgruppen förväntas avrapportera sina resultat inom det närmaste året. Projektet är viktigt för att på en internationell nivå etablera en gemensam syn på klimatutvecklingen och hur den kan påverka ytnära ekosystem.

SKB har 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 och Strömgren 2010, 2013, Lindborg et al. 2013), men verktygen och metoderna som används behöver uppdateras inför kommande säkerhetsanalyser, både för att kunna möta framtida behov och för att säkra kompetens inom området. SKB är medvetna om problematiken med brist på transparens i dosberäkningar när dessa drivs av komplexa stödmodeller (Walke et al. 2015), vilket SSM har påpekat. Dock visar erfarenheterna från SR-PSU att det är svårt att förutse och förenkla förlopp som är beroende av landskapets utveckling innan dynamiken av utsläppet är känd. SKB avser därför att i första hand arbeta med förenklade modeller i anslutning till resultatolkningen (Kautsky et al. 2016).

Program

I samband med granskningen av SR-Site har landskapets spatiala heterogenitet och alternativa avgränsningar av biosfärsobjekt diskuterats, och SKB har efter granskningskommentarer lämnat in kompletteringar till SSM. Det finns fortfarande ett behov att allsidigt belysa betydelsen av olika

antaganden kring rumslig spridning av ett eventuellt utsläpp för beräknad dos till den mest exponerade gruppen. SKB planerar därför att fortsätta arbetet med Comsol-verktyget, vilket kommer att ge möjlighet att besvara eller illustrera flera frågor kring den rumsliga upplösningen. Arbetet kommer att kompletteras med känslighetsanalyser i Ecolego, där aktuella beskrivningar av våtmarkers utveckling och jordlagrens utbredning i Forsmark utnyttjas. SKB planerar även att belysa hur den tids- och rumsmässiga avgränsningen av de mest kontaminerade områdena påverkar exponering av andra organismer än människor.

Kunskaperna från GRASP och Krycklan kommer att tillämpas på Forsmarksområdet för att därigenom illustrera 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 Bioprota och inom ett eventuellt fortsatt IAEA-program, Modaria II.

12.3 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 här processerna i lösa avlagringar (till exempel sorption), men inte upptag av radionuklider i organismer (se avsnitt 12.1).

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 SR-PSU beskrivs hur den nuvarande kunskapen om transport- och ackumulationsprocesser omsatts i den senaste säkerhetsanalysen (Saetre et al. 2013). Modellering av ämnestransport i berg och i ytsystem genomförs huvudsakligen inom de olika säkerhetsanalyserna, men utvecklingen av lämpliga modeller och deras tillämpning i säkerhetsanalyser är helt beroende av resultat och slutsatser från en rad forsknings- och utvecklingsprojekt.

All hydrologisk och meteorologisk data som samlats in inom ramen för GRASP-projektet har publicerats i form av en dataartikel (Johansson et al. 2015a). Där redovisas bland annat tidsserier för meteorologi, marktemperatur, yt- och grundvattennivåer, samt ytvattenflöden i det undersökta området på Grönland, tillsammans med hydrauliska parametrar för mättat och omättat grundvattenflöde. Det hydrologiska datasetet utgör grunden för en modelleringsstudie (Johansson et al. 2015b), där konceptuell och numerisk modellering har utförts i syfte att beskriva hydrologiska flöden och processer inom det undersökta området, samt att kvantifiera avrinningsområdets vattenbalans.

I SSM:s granskning av SR-Site har man påpekat att graden av diskretisering i marklagermodellen som används vid transportberäkningar kan påverka fördelning av sönderfallsdöttrarna i förhållande till deras modernuklider. SKB har undersökt detta fenomen och har delvis kunnat reproducera granskarnas resultat genom att öka detaljeringsgraden i transportmodellen som användes i SR-Site. SKB:s beräkningar bekräftar att sönderfallet av till exempel radium-226 ger en omfördelning av radionuklider i markprofilen, och att det under vissa omständigheter kan tänkas påverka ämnens koncentrationer i miljön. Det krävs ytterligare studier för att bedöma i vilka situationer detta fenomen uppträder.

En rapport av Nyberg et al. (2011) indikerade att det skulle kunna finnas områden i Forsmark där gas strömmar upp ur bottensedimenten ("pockmarks"). I remissen av Fud-program 2013 ansåg SGU att sådana områden bör undersökas mera detaljerat. SKB kompletterade 2013 med en bottensubstratkartering av området mellan Norra Piren och Biotestsjön. Fältundersökningen inkluderade kartering med hjälp av sidoseende ekolod samt verifiering med videofilmning och dykning. Vid undersökningen observerades inga kratrar som kunde tolkas som något annat än naturliga sänkor i botten, vilket tyder på att inga pockmarks finns i området (Wallin et al. 2016).

Förutom att Comsol-verktyget ger möjlighet att förfinas tids- och rumsupplösning (se avsnitt 12.3) så utgör det också ett komplement till den modellering som gjorts med 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), samtidigt som man kan använda landskapet som en drivande faktor för vattenflöden. I ett pågående projekt studeras möjligheten att med Comsol beräkna K_d -värden som varierar över tid och rum för några väl kända element. De rums- och tidsupplösta K_d -värdena kan sedan användas i dosmodelleringen för att beräkna hur ackumuleringen av olika ämnen varierar i tid och rum, vilket kan ge förutsättningar för att minska osäkerheterna i dosberäkningarna.

På landskapsnivå har det visat sig möjligt att kvantitativt förutsäga vilken effekt våtmarker har på ytvattenkemin och därmed även på flödet av olika grundämnen genom landskapet (Lidman et al. 2014). Detta styrker relevansen av SKB:s konceptuella modell av landskapsutvecklingen som bygger på att identifiera successionen av olika landskapstyper i tid och rum. Våtmarker påverkar också vattenkemin och massflödena i landskapet genom att minska vittringen av mineraljordar, och de bidrar till att ämnen fastläggs i torven (Lidman et al. 2011) (se även avsnitt 12.4). Även vattendragens storlek kan påverka vattenkemin, då bidraget av djupt grundvatten ökar när man kommer nedströms i ett större avrinningsområde. Fenomenet, som påvisats med hjälp av signaturen av uranisotoper ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) och av syreisotoper ($\delta^{18}\text{O}$), kan förväntas påverka både utflödet av radionuklider till ytan och den vattenkemiska miljön (Lidman et al. 2016).

För att beräkna effekten av kvävespridning och kväveurlakning vid bygge och drift av förvaren i Forsmark, har de oceanografiska modellerna uppdaterats och tillämpats med den kunskap som platsundersökningarna och forskningen tagit fram (se sammanfattning i Aquilonius 2010). Resultaten från dessa studier, tillsammans med resultaten från det nyligen genomförda Predo-projektet (ett samarbetsprojekt för nya beräkningar av doser från driften av kärntekniska anläggningar, se Sundell-Bergman et al. 2015), kommer att ge värdefulla insikter om betydelsen av vattentransporten för spridning och omsättning av ämnen i havsområdet utanför Forsmark.

Program

När det gäller hydrologi och transport beskrivs flera projekt som även berör ytsystemen i kapitel 11. Under de närmaste åren kommer nyvunna kunskaper från GRASP-projektet om hydrologi och transport i ett kallare klimat att överföras till Forsmarksområdet.

En viktig fråga som SSM pekat på vid granskningen av SR-Site är hur man från en detaljerad hydrologisk modell skapar parametrar som beskriver hydrologiska flöden vilka sedan kan användas i säkerhetsanalysen för att beskriva ämnestransport med hjälp av en enkel boxmodell. Alternativ till dagens metod kommer att undersökas, med målsättningen att utveckla en metodik som beskriver transporten av vatten och lösta ämnen under längre tidsperioder och på ett rättvisande, enkelt och lättbegripligt sätt.

Fortsatta studier av Krycklanområdet förväntas ge värdefulla insikter kring processerna lakning, mobilisering och ackumulering av ämnen i ett landskapsperspektiv. Dessa processer kommer att detaljstuderas i Comsol-verktyget. Ett delmål är att med hjälp av kemiska och hydrologiska randvillkor modellera ackumulering, lakning och ämnestransport i ett tvärsnitt av ett avrinningsområde. En välbeskriven profil i Krycklanområdet kommer att användas för att utvärdera hur väl en rumsligt distribuerad modell kan återskapa kända laknings- och ackumulationsmönster. I förlängningen är avsikten att konstruera en mer generisk modell som kan tillämpas för att kvantifiera betydelsen av dessa processer i Forsmarks olika avrinningsområden.

En översyn av hanteringen av urans sönderfallskedja i modelleringen av ytekosystemen kommer att genomföras under den kommande perioden, vilket efterlysts av SSM. Översynen planeras bland annat att omfatta transport och exponering av radon, och syftar till att belysa betydelsen av olika transporthastigheter för den beräknade dosen.

12.4 Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos vissa potentiellt viktiga ämnen

Förutom att olika ämnen tas upp i olika organismer och näringskedjor (se avsnitt 12.1) och transporteras och ackumuleras i lösa avlagringar (se avsnitt 12.3), har ämnena också olika kemiska och radiologiska egenskaper som, i samverkan med den kemiska miljön de 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

För säkerhetsanalysen SR-PSU sammanställdes koncentrationsfaktorer (CR) och sorptionsdata (K_d) som användes i analysen av ytnära ekosystem i Forsmark (Tröjbom et al. 2013). Värdena baseras i första hand på mätningar från platsen och i andra hand på tillgängliga internationella data. Under åren 2009–2015 har SKB deltagit i de två IAEA-programmen EmrasII och Modaria. Inom dessa program har aggregerade CR- och K_d -värden sammanställts, och dessa kommer att publiceras i en kommande rapport. Det finns dock behov av att komplettera sammanställningen med ytterligare data för vissa ämnen som kan komma att bli viktiga för de olika slutförvararna och där det idag finns kunskapsluckor (till exempel beryllium, europium, radium, molybden, nickel, klor, gadolinium, av vilka flera kommer att finnas i det framtida avfallet från spallationsanläggningen, ESS, som för närvarande byggs i Lund). Underlaget kan delvis hämtas från befintliga platsundersökningsdata och simuleringar av CR eller K_d , men för vissa ämnen krävs även kompletterande mätningar.

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 karakteriseras med hjälp av pH, redox, och halter av huvudkomponenter (det vill säga dominerande an- och katjoner) och mängden löst organiskt material. Genom en rad olika processer, såsom landhöjning, vittring och ekosystemsuccession, kan den kemiska miljön på en plats förändras över tiden. I Forsmark förväntas till exempel kalcit och marina joner att urlakas med tiden, samtidigt som mängden organiskt material anrikas. Därmed förändras förutsättningarna för olika ämnens fastläggning och rörlighet i landskapet väsentligt jämfört med dagens förhållanden (Tröjbom och Grolander 2010, Sohlenius et al. 2013b). I flera studier har SKB undersökt hur olika faktorer i landskapet påverkar radionuklidens mobilitet.

I Forsmark har det observerats att en betydande andel av ytvattnet och det ytnära grundvattnet i platsundersökningsområdena befinner sig nära termodynamisk jämvikt med mineralet baryt ($BaSO_4$), vilket därmed kontrollerar mobiliteten för barium (Jaremalm et al. 2013). Samfällningen av radium med barium begränsar troligen mobiliteten för radium i dessa områden, och det kan förklara varför dessa två ämnen ibland uppvisar betydligt högre K_d -värden än jämförbara ämnen som kalcium och strontium i de platsspecifika K_d -mätningar som har utförts (Sheppard et al. 2011). Urlakningen av kalcit i området kommer troligen att förskjuta dessa jämvikter i framtiden, vilket betyder att andra K_d -värden kan behövas för att representera fastläggning av radium.

På landskapsnivå har det visat sig möjligt att, baserat på grundläggande kemiska egenskaper hos ämnena, kvantitativt förutsäga vilken effekt torvbildande våtmarker har på ytvattenkemin och flödet av olika grundämnen genom landskapet (Lidman et al. 2014). Förekomsten av våtmarker och andra organiska jordar är även 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 för många svårslösliga radionuklider, då de i vattenfas ofta förekommer bundna till antingen kolloidalt järn eller DOC. Utströmmande djupt grundvattnet har också en signifikant effekt på vattenmiljön (se avsnitt 12.3). Det djupa grundvattnet påverkar både pH och DOC-halten, och därmed också mobiliteten för många radionuklider (Lidman et al. 2016).

Program

Klorid, som tidigare har betraktats som den dominerande formen av klor i naturen, har visat sig vara reaktiv, och mängden organiskt klor är i många miljöer betydligt högre än mängden lättlöslig klorid (se avsnitt 12.1). SKB planerar därför en fördjupad utvärdering av klorets fördelningsmönster, med målsättningen att knyta observerade mönster 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 studier för att uppskatta omsättningen av organiskt klor i sediment och vatten, och för att beskriva de totala flödena av flyktiga organiska klorföreningar från olika miljöer.

Förutom att uppskatta upptags- och transportprocesser för metan och koldioxid (se avsnitt 13.1) kommer även mätningar att genomföras för att bestämma halter och mängd stabila isotoper hos dessa ämnen. Mätningarna kommer att kompletteras med nya metoder som mycket effektivare än tidigare kan kartlägga flöden av metan och koldioxid (bland annat med hjälp av sensornätverk och en hyperspektral kamera för metan).

SKB:s databas med kemidata från platsundersökningarna och från övervakningsprogrammet kommer att utvärderas för att tolka mönster när det gäller mobilitet och upptag av nickel, molybden, och gadolinium, vilka utgör potentiellt viktiga nuklider i SFR och SFL. Ett samarbetsprojekt planeras med Posiva för att göra en gemensam utvärdering av kemidata, där de två företagens omfattande databaser med riklig bakgrundsinformation kommer att samtolkas.

Ett program planeras med syfte att beskriva hur den markkemiska miljön i Forsmark kommer att förändras över tid, för att i förlängningen ge en bild av olika ämnens rörlighet och fastläggning i framtiden. Bland annat kommer effekterna av den gradvisa urlakningen av kalcit i markprofilen att undersökas vid sidan av andra faktorer som formar den kemiska miljön. Detta ligger i linje med SSM:s rekommendationer i granskningen av Fud-program 2013.

Ytterligare värdefulla data från Krycklanområdet ger möjlighet att studera urlakning och anrikning i en bäcknära zon. Järnkolloider (tillsammans med DOC) är viktiga för att transportera mer svår-lösliga radionuklider. De påverkar mobiliteten och biotillgängligheten och därmed upptag i biota. En studie hur man kan använda lantanider som spårämnen för lakning har påbörjats i Krycklan och kommer att fortsätta i Forsmarksområdet.

13 Klimat och klimatrelaterade processer

I avsnitt 5.10 beskrivs ett antal övergripande frågor inom SKB:s klimatarbete som kräver vidare insatser, antingen för att det har framkommit i myndigheternas kommentarer vid granskningen av inlämnade ansökningar eller för att SKB själv har bedömt att det krävs för att minska osäkerheter i pågående eller kommande säkerhetsanalyser. Dessa kvarstående frågor rör: i) ålder och långsiktig stabilitet hos berggrundsytan i Forsmark, inklusive glacial erosion och denudation, ii) klimatförändringar: SKB:s referensglaciation baserad på förra istidscykeln, iii) klimatförändringar: övergångar mellan olika klimattillstånd, iv) klimatförändringar: den första möjliga tidpunkten för kallt klimat, permafrost och inlandsistillväxt i Skandinavien, v) havsnivåvariationer i närtid och på lång sikt, isostasi och strandlinjeförskjutning, vi) validering av permafrostmodell, samt vii) komplettering och tillämpning av nyutvecklad beskrivning av inlandsisars hydrologi från GAP.

De flesta av dessa frågor rör alla tre slutförvaren, Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL. I detta kapitel beskrivs nuläge och planerade insatser inom de ovanstående områdena mer ingående.

13.1 Ålder och långsiktig stabilitet hos bergytan i Forsmark

Nuläge

Nuvarande kunskapsläge tyder på att omfattningen av den totala glaciala erosionen och denudationen i Forsmarksområdet, generellt sett, inte varit omfattande fram till i dag, och att den kommer att fortsätta vara begränsad även i framtiden (Olvmo 2010). En huvudanledning till denna slutsats är den mycket flacka topografin i området. GIS-studien i Olvmo (2010) genomfördes i en förhållandevis grov rumslig upplösning, vilket gör att resultaten inte nödvändigtvis är tillämpbara på detaljnivå. Därför finns kvarvarande frågor kring omfattningen av den glaciala erosionen och denudationen när man studerar området i Forsmark mer i detalj, samt kring vad som skulle kunna hända i framtiden med närliggande områden där kraftigare glacial erosion har dokumenterats (Olvmo 2010). En fråga som kopplar till detta är om det tidigare förekommit glacial tektonik inom Forsmarksområdet, där större sjök av den övre bankade delen av berggrunden (berggrund med ytliga mer eller mindre horisontella avlastningssprickor) har lyfts och förflyttats av inlandsis, samt om detta skulle kunna förekomma igen vid en framtida nedisning.

I kommentarerna till Fud-program 2013 skriver SSM bland annat: ”För att belägga nuvarande bedömning av frysning 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 framkom önskemål om att vidare undersöka och motivera SKB:s ståndpunkt att framtida denudation och glaciala erosion vid Forsmark kommer att vara begränsad.

Program

Mot bakgrund av punkterna ovan inleddes under 2015 en studie kring ålder och stabilitet hos berggrundsytan i Forsmarksområdet. Exempel på frågeställningar som ingår i studien är: i) har glacial tektonik förekommit vid Forsmark? ii) hur omfattande har denudationen (erosion+vittring) och den glaciala erosionen varit i Forsmark under nedisningsperioder, samt under hela perioden sedan subkambriska peneplanet bildades, när man studerar området i detalj? Baserat på detta, hur stor denudation/erosion väntar vi oss under de kommande 100 000 och 1 miljon åren vid och kring förvaren? iii) Hur snabbt kan det dokumenterade området med kraftigare glacial erosion som finns sydost om Forsmark växa mot platsen för Kärnbränsleförvaret?

Åldern på utvalda berggrundsytor i Forsmarksområdet kommer att bestämmas genom provtagning och efterföljande kosmogen datering, det vill säga med hjälp av kosmogena nuklider (beryllium-10, aluminium-26 och neon-21) i de översta meterna av berggrunden. Dateringarna ger information om hur länge berggrundsytorna varit exponerade för kosmogen strålning, det vill säga hur länge de legat

exponerade och utgjort del av markytan. Resultaten ger även en kvantifiering av storleksordningen på den glaciala erosion som skett i olika delar av landskapet. Metodiken är komplex och kräver noggranna förberedelser vad gäller val av provtagningsplatser, samt noggranna antaganden vid analysen av de uppmätta isotopkoncentrationerna. Resultaten kommer, tillsammans med övriga resultat från studien, att användas för analys av den långsiktiga stabiliteten hos berggrundsytan i Forsmark.

Kartering av glaciala landformer för identifiering av glaciala erosionsmönster i Forsmarksområdet kommer att genomföras, både genom fjärranalys och genom fältstudier. En geomorfologisk analys kommer att utföras av hur mycket markytan i olika delar av området har sänkts genom glacial erosion från den ursprungliga referensytan som här utgörs av det subkambriska peneplanet (figur 13-1).

Lateral tillväxthastighet hos område med kraftig glacial erosion kommer också att studeras. Sydost om Forsmark finns ett område med observerat kraftigare glacial erosion. Studien syftar till att uppskatta den potentiella laterala hastigheten hos glacial erosion i dessa glacialt bildade erosionsdalar, det vill säga hur snabbt detta område skulle kunna växa mot förvarsområdet i framtiden. Delstudien omfattar detaljkartering och analys av glaciala berggrundsformer och sediment, samt fjärranalys och fältkontroller.

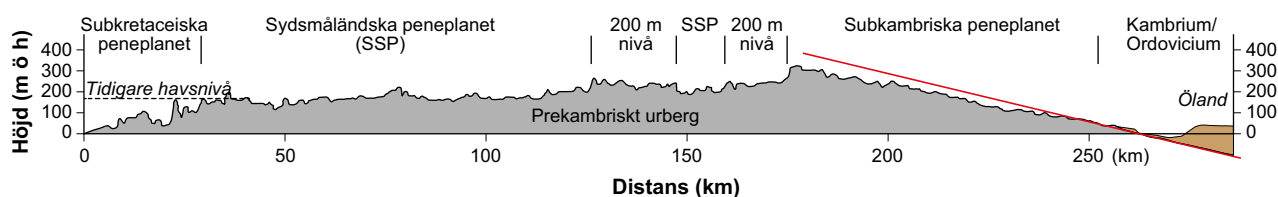
Resultaten från de ovan nämnda studierna förväntas ge en detaljerad bild av omfattningen av denudation, inklusive glacial erosion, som skett i Forsmarksområdet fram till i dag, och därmed även ge underlag för en utökad analys av den framtida denudationsutvecklingen vid platsen.

13.2 Klimatvariationer

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 klimatarkiv och av klimatmodeller.

13.2.1 Klimatet i SKB:s referensglaciation

SKB använder sig av en referensglaciation för att beskriva hur klimat, inlandsis, permafrost, havsnivå, och denudation kan te sig under en typisk glaciationscykel. I SKB:s säkerhetsanalyser analyseras effekten av referensglaciationen på hydrogeologi, geokemi, geosfär, landskapsutveckling, förvarsbarriärer och, i slutändan, 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 förhållandena under den senaste glaciala cykeln (Weichselglaciationen och interglacialen Holocen) upprepas för de kommande 100 000 åren.



Figur 13-1. Frågan om hur mycket det subkambriska peneplanet har sänkts är viktig inte bara för att uppskatta mängden glacial erosion utan också för att tolka inventariet av kosmogena isotoper i berggrunden i termer av erosionshastighet. Figuren visar en topografisk profil från Småland (modifierad från Lidmar-Bergström et al. 2013), med det subkambriska peneplanet markerat i rött. Den topografiska och geologiska situationen är liknande för Forsmark.

Nuläge

Under föregående Fud-period 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. 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. Under den föregående Fud-perioden har studierna vid Sokli resulterat i sju vetenskapliga artiklar, samt en doktorsavhandling vid Stockholms universitet (Shala 2014), enligt nedan:

- **Senaste glaciala-interglaciala cykeln:** En beskrivning och i viss mån omvärdering av den senaste glaciala-interglaciala cykeln baserat på långa klimatproxyarkiv från centrala och norra Europa (Helmens 2014).
- **Föregående interglacial Eem:** Observationer av snabba dynamiska klimatvariationer under förra interglacialen Eem, med kraftig nedkylning av klimatet mitt under värmeperiodens optimum (Helmens et al. 2015).
- **Nuvarande interglacial Holocen:** Rekonstruktion av Holocena klimatförhållanden i norra Skandinavien från lakustrina sediment (Shala 2014, Shala et al. 2014a, b), med samma metodik som tidigare använts i studien för perioderna Tidig Weichsel och Mitt-Weichsel. Resultaten har även visat på en oväntat tidig start av Holocena värmeoptimum i norra Europa (Väliranta et al. 2015).
- **Metodutveckling:** Studier har genomförts för metodutveckling vad gäller kvantitativa rekonstruktioner av paleoklimat från paleofossil i lakustrina sediment (Salonen et al. 2013, Engels et al. 2014).

Resultaten från studierna ovan har direkt använts i beskrivningarna och motiveringarna av klimat-scenarier för säkerhetsanalysarbetet, senast i säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR (SKB 2014b, 2015b, Kautsky et al. 2016). Studierna ger även ökad förståelse för SKB:s referensutveckling och metodik att hantera klimat i långa tidsperspektiv.

Program

Eftersom resultaten fram till nu visar att variabiliteten i klimat och miljö under den senaste glaciala cykeln varit betydligt större än man tidigare trott, kommer fortsatt kvantifiering av denna variabilitet att genomföras under denna Fud-period. Dessa paleoklimatologiska studier kommer även att sammanfattas och avslutas under perioden.

Det pågående doktorandprojektet som studerar klimatet under interglacialen Eem baserat på data från Sokli kommer att fullföljas enligt plan. Planerad tidpunkt för avslutande av doktorandprojektet är 2018.

SKB kommer även att fortsätta pågående studier av paleoklimat baserat på uppmätta temperaturer i borrhål i Forsmark och vid Vättern.

13.2.2 Klimatförändringar: övergångar mellan olika klimattillstånd

Nuläge

I Fud-program 2013 aviserades en planerad 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). Denna studie har nu pågått under tre år och har inkluderat ett doktorandarbete vid Stockholms universitet som avslutades under våren 2016. Studien använder sig av både geologiska arkiv och klimatmodellering för att ge fylligare information och exempel på hur klimatet kan te sig inom och vid övergångarna mellan de olika klimattillstånden.

Studien fokuserar på den senaste deglaciationen, med en period som spänner från fulla glaciala förhållanden, via ett varmare klimat, med kalla inslag till exempel under Yngre Dryas, till tempererade förhållanden under Holocen. Resultaten från de delar av studien som i huvudsak använder sig av proxydata från geologiska arkiv visar på mycket snabba och kraftiga förändringar i klimat vid starten av den kalla perioden Yngre Dryas, med distinkta temporala och rumsligt konsistenta mönster i klimat-

förändringarna (Muschitiello et al. 2015a, Muschitiello och Wohlfarth 2015). Studien presenterar även de första robusta bevisen på kopplingen mellan påverkan från kontinentalt smältvatten och snabba förändringar i atmosfärs-havscirkulationen i Nordatlanten (Muschitiello et al. 2015b, 2016).

Resultaten från de delar av studien som i huvudsak använder sig av proxydata från geologiska arkiv har kompletterats med simuleringar av klimatet under en varm period, Bölling (för cirka 13 000 år sedan), och en kall period, Yngre Dryas (för cirka 12 000 år sedan).

Program

Klimatsimuleringen av övergången från den varma Böllingperioden till den kallare perioden Yngre Dryas kommer att analyseras och jämföras med proxydata från geologiska arkiv under denna Fud-period. Under perioden planeras även en avrapportering av hela studien om övergångar mellan olika klimattillstånd, där resultaten från klimatmodelleringen och studierna av geologiska klimatarkiv vägs samman och sätts i relation till övrig ny litteratur inom området.

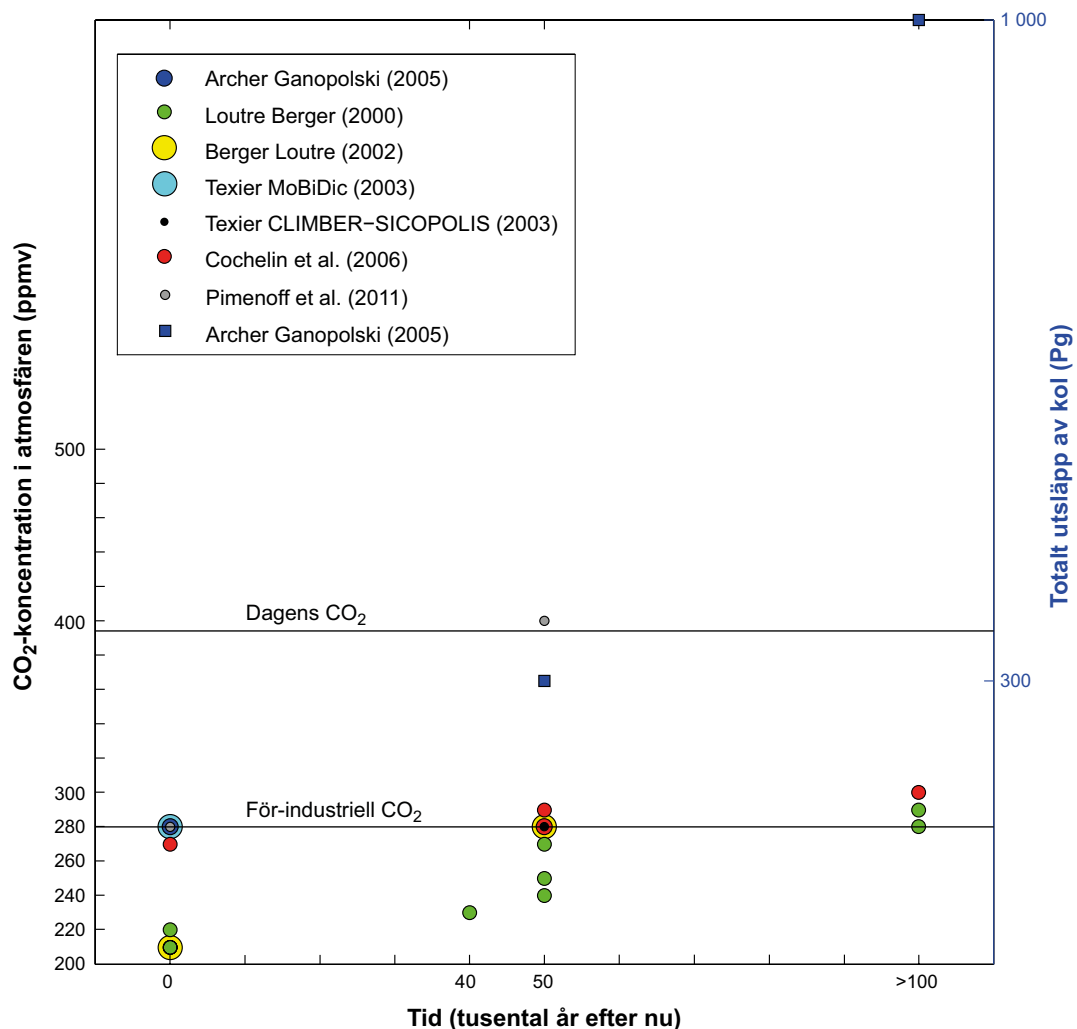
13.2.3 Första tidpunkt för framtida kallt klimat, permafrost och inlandsistillväxt

Nuläge

Tidpunkten för nästa glaciation och associerade perioder med kallt klimat är av stort intresse vid analysen av säkerhet efter förslutning för SKB:s slutförvar (SFR, SFL och Kärnbränsleförvaret). En sammanställning av kunskapsläget i denna fråga genomfördes därför under föregående Fud-period (Näslund och Brandefelt 2014). Resultaten från sju publicerade studier där klimatet simulerats för de kommande 100 000–200 000 åren bekräftar att det råder stor osäkerhet kring tidpunkten för nästa glaciation. Tidpunkten för kallare klimat och nedisning beror i dessa modeller dels på den kända framtida variationen i solinstrålning mot jorden, dels på antaganden om vilken halt av växthusgaser som kommer att råda i atmosfären under lång tid framöver. I modellstudierna som sammanställts sker glaciation under perioder med framtida låg solinstrålning på nordliga breddgrader, runt 0, 50 000 och 100 000 år efter nu (figur 13-2). Givet dagens höga halt av koldioxid i atmosfären (~400 ppm) är det enbart de två senare perioderna (50 000 och 100 000 år efter nu) som är relevanta, eftersom det är först då som koncentrationen av koldioxid i atmosfären skulle kunna ha sjunkit tillräckligt för att glaciation skulle kunna initieras. Dessa slutsatser stöds också av resultaten av en ny modelleringsstudie (Ganopolski et al. 2015), som föreslår att en ny glaciation inte skulle starta förrän om 50 000 år även utan mänsklig påverkan, samt att måttliga utsläpp av koldioxid kommer att förskjuta nästa glaciation så att den inte startar förrän om tidigast 100 000 år.

Vissa försök att studera omfattning och tidpunkt för kommande glaciationer i ännu längre tidsperspektiv, upp till en miljon år efter nu, har även gjorts (Huybrechts 2010). Denna tidsskala är relevant vid analys av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret och SFL. Resultaten visar att återkommande nedisningar är att vänta under denna långa tidsperiod, men osäkerheterna i resultaten är mycket stora.

Efter en kompletteringsbegäran från SSM har SKB under innevarande Fud-period genomfört en studie som rör simuleringar av maximalt tjocka inlandsisar över Forsmark. Frågan är av intresse för kopparkapslarnas integritet vid hög isostatisk last under glaciation. Studien innehåller klimat- och inlandsissimuleringar av en av de största nedisningar man känner till från geologisk information, den under Saaleglaciationen. Studien fokuserar på att undersöka osäkerheter i klimat- och inlandsissimuleringar för maxskedet av denna glaciation för 140 000 år sedan, bland annat genom en statistisk analys av en stor mängd univariata och multivariata känslighetssimuleringar. Den maximala istjockleken över Forsmark under denna glaciation har i dessa studier uppskattats till runt 3 500–4 000 meter (Colleoni et al. 2014, Quiquet et al. 2016). Delar av studien är även publicerade i Colleoni et al. (2016) och Wekerle et al. (2016). I SKB:s svar till SSM framförs, bland annat med hjälp av Huybrechts (2010), att en glaciation med en maximal istjocklek likande den som rekonstruerats över Forsmark för Saaleperioden av Colleoni et al. (2014) är osannolik under de kommande 100 000 åren, och eventuellt även för de kommande en miljon åren. Osäkerheten i bedömningen av en tänkbar tidpunkt för en framtida period med maximal istjocklek är dock fortfarande stor. Resultaten rörande maximal istjocklek används i SKB:s arbete med konstruktionsförutsättningarna avseende isostatisk last för kapslarna i Kärnbränsleförvaret.



Figur 13-2. Ungefärlig tidpunkt för nästa glaciation som funktion av koldioxidhalt i atmosfären (cirklar) eller totalt utsläpp av kol (fyrkanter) från de sju studier som ingick i sammanställningen av Näsland och Brandefelt (2014).

Som kommentar på Fud-program 2013 skriver SSM ”Med tanke på det begränsade förvarsdjupet för SFR bör frågor kopplade till frysnings av cement/betong betraktas som betydelsefulla för säkerhet efter förslutning. SSM anser att hittills redovisade resultat är tvetydiga, vilket bör föranleda ytterligare insatser.”

Inom säkerhetsanalysen SR-PSU genomfördes en detaljerad studie av den tidigaste förväntade tidpunkten för permafrosttillväxt i Forsmarksområdet (Brandefelt et al. 2013). En huvudfråga var när permafrost, och associerad frysnings av det relativt grunda förvaret SFR, tidigast skulle kunna förekomma i Forsmark i framtiden. Detta undersöktes genom modellering av framtida klimat, modellering av permafrost, samt med hjälp av paleoklimatologiska studier av hur klimatet varierat under utvalda delar av den senaste glaciationen Weichsel. Resultaten visar att man, vid pessimistiska antaganden om växthusgasernas koncentration i atmosfären, inte kan utesluta att permafrost skulle kunna bildas i Forsmark under nästkommande perioder med låg solinstrålning mot jorden, vilka inträffar omkring 17 000 och 54 000 år efter nu (Brandefelt et al. 2013, SKB 2014b). För den första av dessa perioder kan man dock utesluta att betongkonstruktionerna i SFR skulle frysa, även med mycket pessimistiska antaganden, medan detta inte går att utesluta för den senare perioden (SKB 2015b). Risken för att permafrost skulle kunna bildas i Forsmark tidigare än 17 000 år efter nu bedömdes som mycket liten. I SR-PSU användes resultaten ovan för att konstruera ett dedikerat klimatfall som beskriver tidigaste tänkbara framtida period med permafrost i Forsmark (*Klimatfallet Tidigt periglacialt klimat*).

Program

SKB har för avsikt att, tillsammans med Posiva, undersöka förutsättningarna för att genomföra en förbättrad modellanalys, jämfört med Huybrechts (2010), av omfattning och tidpunkter för glaciationer under de kommande en miljon åren. I Huybrechts (2010) påpekas att den studien innehåller mycket omfattande osäkerheter. De klimat- och inlandsismodeller som finns är under snabb utveckling, och har varit det under de senaste åren. Osäkerheterna i Huybrechts (2010) skulle kunna minskas genom simuleringar med nyare och förbättrade klimat- och inlandsismodeller, samt med en modifierad metodik. Detta förväntas ge mer tillförlitliga och användbara resultat i analysen av förvarsutveckling på tidskalan en miljon år (Kärnbränsleförvaret och SFL).

SKB kommer även att i säkerhetsanalysarbetet tillämpa kunskap som tas fram av det övriga forskarsamhället kring framtida klimatutveckling, med speciellt fokus på den första möjliga tidpunkten för kallt klimat, permafrost och inlandsistillväxt i Skandinavien.

13.3 Havsnivåvariationer, isostasi och strandlinjeförskjutning

Nuläge

Nuvarande kunskapsläge kring havsnivåvariationer av relevans för Forsmark finns beskrivna i Klimatrapporten för SR-PSU (SKB 2014b, avsnitt 3.3, 4.1.3 och 4.3.3), medan kunskapsläge för isostasi och strandlinjeförskjutning finns beskrivna i SKB (2014b, avsnitt 2.2). I denna rapport sammanställs data på tänkbara relativa havsnivåvariationer, inklusive osäkerheter, på tidsskalorna fram till år 2100, 10 000 år samt 100 000 år.

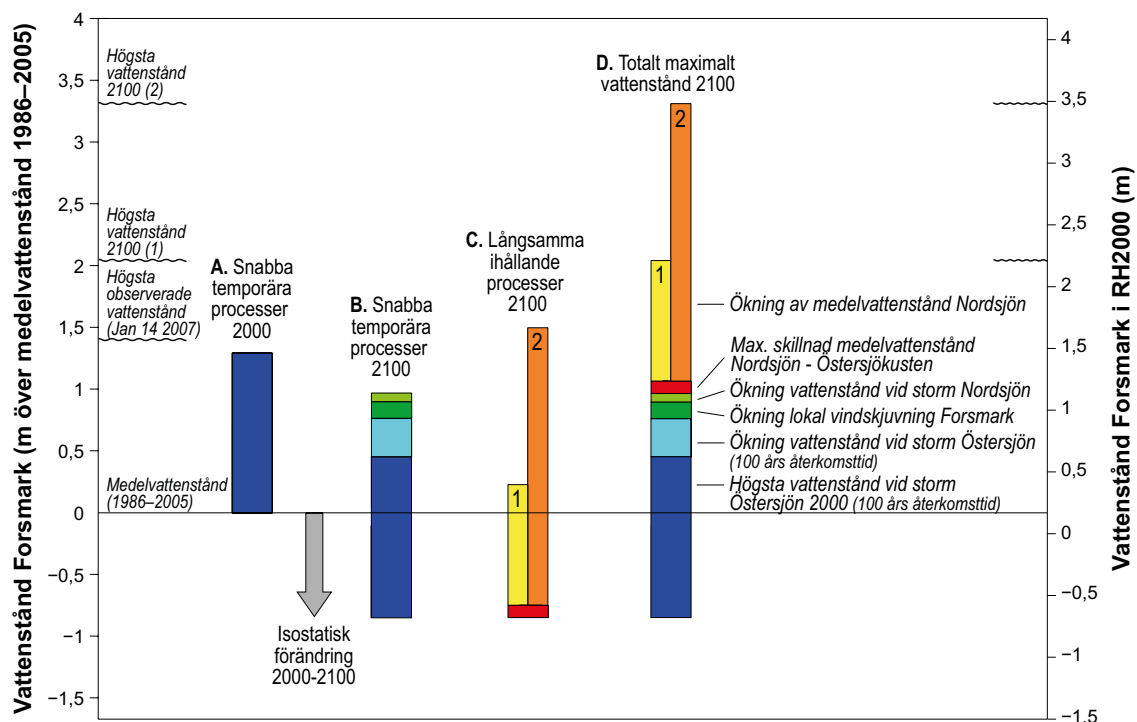
Den relativa havsnivån vid Forsmark, och dess variation över tiden, utgörs av nettoresultatet från isostatiska förändringar och eustatiska havsnivåvariationer. Den isostatiska upplyftningen i Forsmark är 8,4 mm/år, och denna kommer fram till år 2100 att kompensera för en ansevärd del av en eustatisk havsytehöjning.

Havsnivåvariationerna 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 (SKB 2014b). De förra utgörs av den globala havsytehöjningen (och dess olika komponenter isavsmältning och termisk expansion av havsvatten), och den senare av den tillfälliga havsytehöjning som sker vid till exempel kraftiga stormtillfällen. Figur 13-3 sammanfattar alla dessa för Forsmark för år 2000 och år 2100. Figuren sammanfattar data från olika källor, bland annat uppskattningar på global havsytehöjning gjorda av IPCC (2013) samt resultat som publicerats efter det. Figuren inkluderar ett kumulativt ”worst case”-scenario där maximala effekter på global-regional och lokal skala summerats. Det totala, pessimistiskt beräknade, högsta vattenståndet i Forsmark år 2100 i detta scenario är +3,3 meter under kraftiga stormtillfällen (figur 13-3). Efter stormtillfället skulle vattenståndet återgå till medelvattenståndet för år 2100.

I relation till konstruktionen och driften av förvaren i Forsmark är det av stor vikt att notera att den långsamma stadigvarande havsytehöjningen, den med störst osäkerhet, är observerbar över tid. Detta gör att man under kommande årtionden kommer att kunna se hur den utvecklas och har möjlighet att vidta ytterligare konstruktionsåtgärder om så behövs.

Forskningsområdet kring framtida havsnivåer befinner sig i en intensiv fas, och stora osäkerheter råder kring storleken på framtida havsnivåvariationer.

Vad gäller isostasi och inlandsislast har tre olika inlandsisrekonstruktioner, inklusive den som används i SKB:s referensglaciation, analyserats med hjälp av GIA-simuleringar (GIA, glacial isostatic adjustment) (Schmidt et al. 2014). Rekonstruktionerna jämförs direkt i termer av isvolym, utbredning och istjocklek samt i termer av den resulterande isostatiska respons som islasthistoriken i de tre rekonstruktionerna ger upphov till över Fennoskandia. Den modellerade isostatiska responsen jämförs sedan med uppmätta värden och distribution på dagens isostatiska upplyftning från GPS-observationer. Trots förhållandevis stora skillnader mellan vissa aspekter i rekonstruktionerna visar resultaten att alla tre modeller passar dagens hastigheter på upplyftning ungefär lika väl, dock med olika jordparametrar i GIA-modellen. Alla tre modellerna överskattar dock upplyftningshastigheten i sydvästra Fennoskandia. Det förekommer även större skillnader mellan simulerad och uppmätt upplyftningshastighet i Finland och nordligaste Sverige och Norge. Dessa resultat kan användas till att resonera kring den detaljerade realismen i befintliga inlandsisrekonstruktioner, samt för att förbättra framtida rekonstruktioner.



Figur 13-3. Uppskattad maximal relativ havsnivå i Forsmark år 2100. A: dagens högsta havsnivå orsakad av snabba temporära processer vid stormtillfällena. B: maximal havsnivå år 2100 orsakad av snabba temporära processer vid stormtillfällena, och dess komponenter; till del kompenserad för isostatisk upplyftning. C: havsnivåhöjning år 2100 orsakad av långsamma processer (ökning av medelhavsnivån). 1: Från processbaserade projektioner (IPCC 2013) och 2: Övriga metoder (Sriver et al. 2012). D: Total maximal havsytehöjning år 2100 med hänsyn tagen till snabba temporära processer och långsamma icke-temporära processer. Värdet C2, baserat på bland annat Sriver et al. 2012, utgör ett "worst-case"-fall från en uppskattning värden uppskattade från icke-processbaserade modeller och uppskattningar på isavsmältning. Notera att den isostatiska återhämtningen kompenserar för 0,84 meter av havsytehöjningen från år 2000 till 2100. Havsnivån redovisas i meter över dagens medelnivå (för perioden 1986–2005) och i höjdsystemet RH2000.

Program

En uppdatering av kunskapsläget kring havsnivåförändringar i närtid (fram till år 2100, se figur 13-3) kommer att göras. Detta behövs bland annat för bygg- och driftperioden för Kärnbränsleförvaret och driftperioden för SFR. Eventuellt kommer insatser att behövas med förnyade simuleringar av regionala/lokala oceanografiska förhållanden kring Forsmark, i samarbete med ämnesområdet Ytekosystem.

Dessutom planeras en uppdatering av information och kunskapsläge kring havsnivåförändringar i ett mångtusenårigt perspektiv, inklusive högsta nivå/längsta period med havstäckta förhållanden som kan orsakas av kraftig global uppvärmning. Detta påverkar bland annat landskapsutvecklingen och tidpunkten för möjligheten att borra brunnar i framtiden i Forsmarksområdet.

13.4 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. Även grundvattnets sammansättning kan påverkas genom saltutfrysning.

I Fud-program 2013 nämndes planer på 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), och som nu används i säkerhetsvärderingen för SFL. Denna validering påbörjades under föregående Fud-period.

Program

Den valideringen av permafrostmodellen som påbörjats kommer att fortsätta och avslutas under Fud-perioden. I arbetet ingår följande delar: i) verifiering av nuvarande och tidigare versioner av permafrostmodellen genom att tillämpa dem på studieområdet för GAP på västra Grönland (se avsnitt 13.5) där permafrostdjup och bergets temperatur till delar är kända, och ii) analys av återkopplingen mellan temperatur i mark/berg och basala istemperaturer hos inlandsisen, för att se hur denna återkoppling påverkar simulerade djup för permafrost och frusen mark.

Olika försvarskoncept, 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 försvarsdjup olika förutsättningar för frysning. Inom ramen för den planerade säkerhetsbedömningen för SFL kan insatser rörande koppling mellan potentiell frysning av försvarsstrukturer och val av försvarskoncept och försvarsplats därför komma att genomföras.

13.5 Nyutvecklad beskrivning av inlandsisars hydrologi från GAP

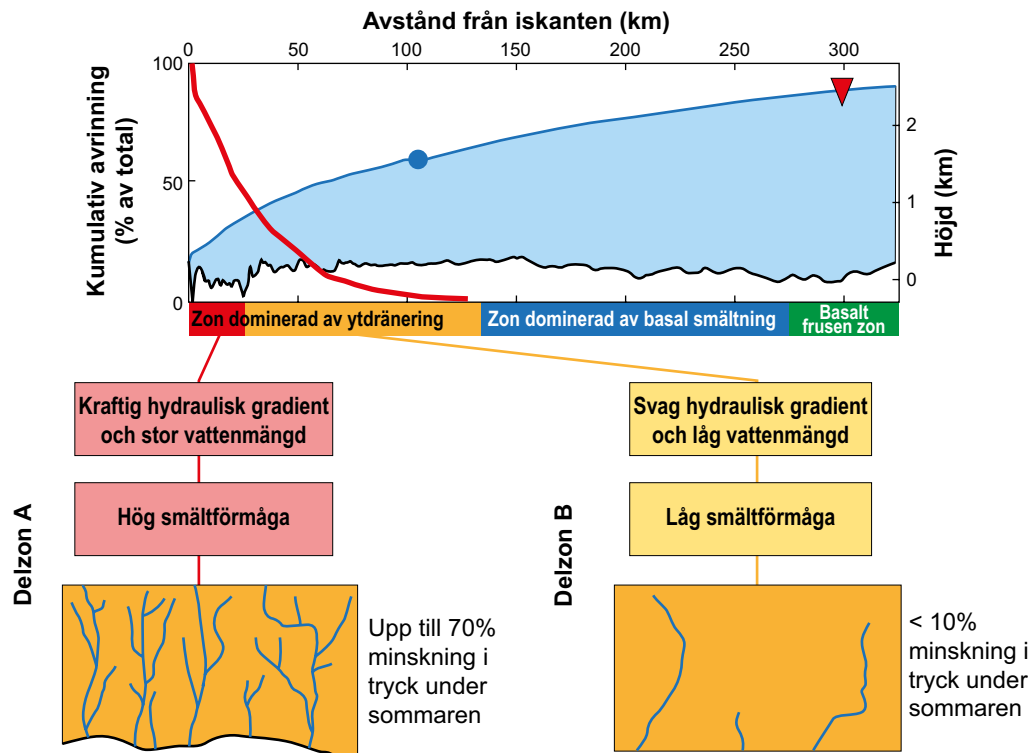
Nuläge

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. GAP har i nuläget producerat 43 vetenskapliga artiklar publicerade 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 (se avsnitt 1.3 i Claesson Liljedahl et al. 2016), samt ett stort antal symposiebidrag. Alla dessa referenser redovisas inte här, utan läsaren hänvisas till rapporterna ovan.

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 försvarssäkerhet, 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 13-4). Fältobservationer och modelleringsresultat tyder bland annat på att mer än 75 procent av den studerade delen av den grönländska inlandsisen har bottensmältande 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 13-4, 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 över tiden. Med hjälp av tryckinformation och termisk information från 23 borrhål som borrats genom inlandsisen har den konceptuella förståelsen av isens basala dräneringssystem reviderats, se 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.



Figur 13-4. 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 ytdränering i sig är indelad i två delar: i) delzon A och ii) delzon B. I delzon A (Transient conduit reach) domineras den basala hydrologin av att ett transient nätverk av dräneringstunnlar utvecklas under sommaren, upp till 15–20 km från iskanten. Trycket i tunnlarerna har under smältsäsongen en mycket kraftig dygnsvariation (30–105 procent av isövertrycket). Hydrologin i delzon B (Distributed reach) 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 (se avsnitt 5.1 i Claesson Liljedahl et al. 2016).

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.

Uppmätta helium-koncentrationer 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 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 bottenmältande 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 genombrotts-talik under den sjö vid vilken man borrar ett av bergborrhålen. Provtagning från detta borrhål har vidare resulterat i den första informationen om grundvattensammansättning samt hydrologiska data från en talik nära en inlandsis.

För mer detaljerad information kring resultaten ovan, se Claesson Liljedahl et al. (2016).

Program

I kommentarerna till Fud-program 2013 skriver SSM bland annat att: "SSM ser positivt på SKB:s Greenland Analogue Project (GAP) och ansträngningarna att förbättra den konceptuella förståelsen av hydrologi och hydrogeologi under glaciala förhållanden. SSM:s bedömning är att den studie som planeras för att överföra kunskapen till skandinaviska förhållanden är angelägen för kommande arbeten med säkerhetsanalyser för de planerade slutförvarsanläggningarna." Vidare skriver man: "SSM ser positivt på det arbete som pågår inom GAP och studien att överföra den glacialhydrologiska kunskapen erhållen från GAP till skandinaviska förhållanden så att den framtagna informationen blir relevant för säkerhetsanalyserna för de befintliga och planerade slutförvarsanläggningarna."

De stora fält- och modelleringsarbetena inom GAP är avslutade, men en viss nivå av övervakning kommer att fortgå under perioden 2016–2018. Övervakningen av det djupa borrhål som sträcker sig ner till förvarsdjup vid isranden, kommer att upprätthållas. Utöver detta kommer nätverket av väderstationer på inlandsisen att upprätthållas under åtminstone 2016–2017.

SKB kommer även att komplettera studierna i GAP genom en mindre, nu pågående, glacialhydrologisk studie (ICE) i samma undersökningsområde på Grönland. ICE initierades 2014 och kommer att slutföras under 2016. Följande studeras 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.
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.
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. Detta är viktig information då graden av berggrund som är täckt av vatten bestämmer storleken på inströmningsområdet för grundvatten.

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 härvid förbättras vid simulering av grundvattenflöde under nedisade perioder. Även övrig kunskap kring hydrologi, geokemi, 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/ythydrologi i periglaciala områden kommer att tillämpas vid analysen av säkerhet efter förslutning i Forsmark, speciellt inom ämnesområdena hydrogeologi och ytekosystem.

Del III

Avveckling av kärntekniska anläggningar

- 14 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar
- 15 Planering för avveckling inom Uniper
- 16 Planering för avveckling inom Vattenfall
- 17 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar
- 18 Beroende och flexibilitet
- 19 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

14 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar

I regeringsbeslutet om Fud-program 2013 angavs att reaktorinnehavarna, i samråd med SSM, ska vidareutveckla den planering som finns inför anläggningarnas avveckling. Detta gäller såväl planerade åtgärder för nedmontering och rivning, som strategier för forskning och utveckling. I beslutet angavs även att kommande Fud-program behöver beskriva tydligare hur uppgifter fördelas mellan kärnkraftsföretagen och SKB, och hur samordningen av dessa uppgifter sker.

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 uppbygget av ett generiskt avvecklingsprojekt i form av olika skeden och faser. Vidare redogörs för arbetsfördelningen mellan kärnkraftsföretagen och SKB gällande avveckling och för omhändertagandet 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.

14.1 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 godkänt 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 från kärntekniklagen och strålskyddslagen.

Figur 14-1 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 föreskrift.

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 14-1. 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 och gällande förordningar 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.

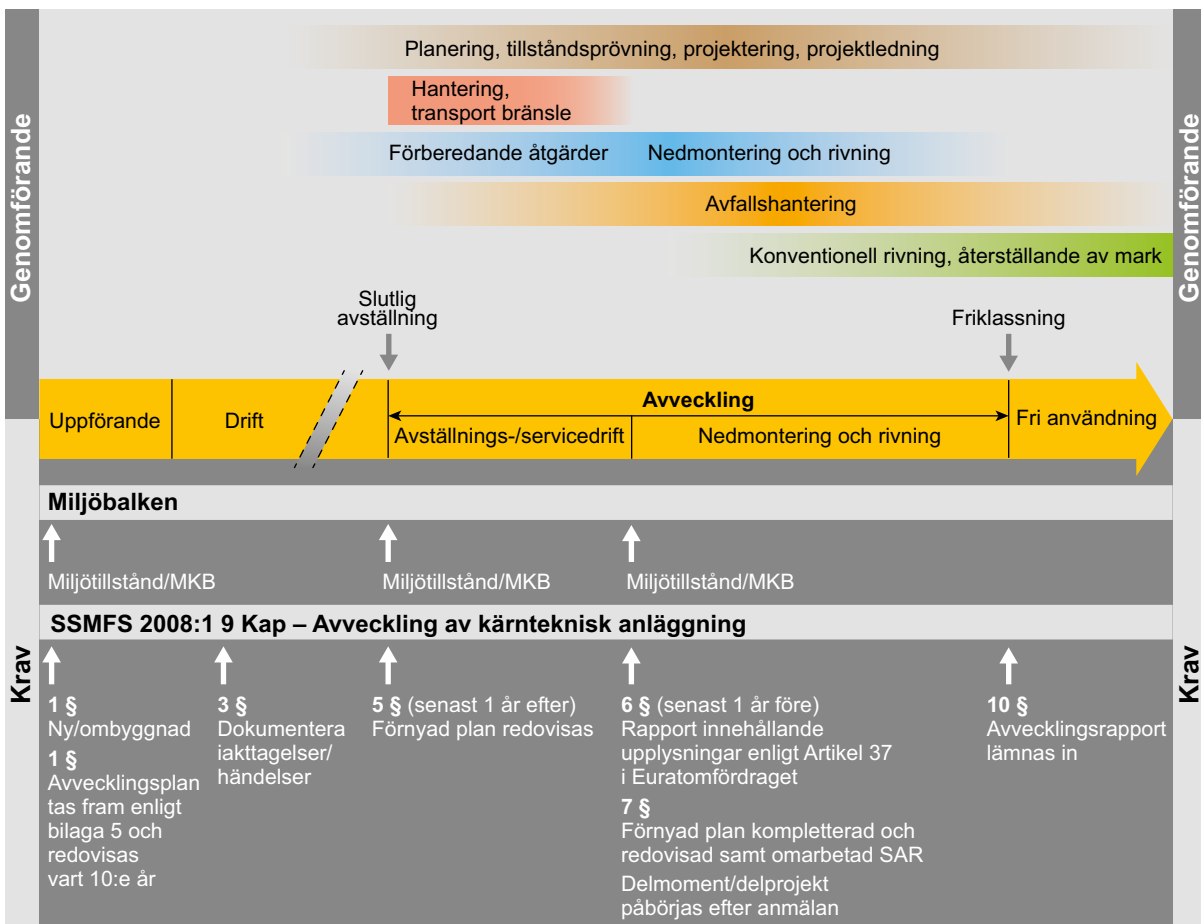
Avvecklingsplanen ska redovisas för SSM medan avfallsplan och säkerhetsredovisning (SAR) ska delges för formellt godkännande enligt SSMFS 2008:1. Vidare ska även underlag tas fram för information till Europeiska kommissionen i enlighet med Euratomfördragets Artikel 37. Den formella rapporten skickas 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.

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 Miljö- och energidepartementet, 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.



Figur 14-1. Översikt över de olika faserna för genomförandet av en reaktors avveckling samt SSM:s och miljöbalkens krav för avveckling under en kärnteknisk anläggningens livslängd.

14.2 Ansvar och arbetsfördelning

Tillståndshavaren för en kärnteknisk anläggning har ansvaret för avvecklingen enligt kärntekniklagen, strålskyddslagen, finansieringslagen och SSM:s föreskrifter. Tillståndshavaren ansvarar för anläggningarna enligt detta regelverk tills att friklassning har skett. För det radioaktiva avfallet sträcker sig ansvaret tills att det är friklassat eller tills att SSM har fattat beslut om förslutning av aktuellt slutförvar, och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt 10 § kärntekniklagen (SFS 1984:3).

För kärnkraftsreaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals är Barsebäck Kraft AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag respektive Ringhals AB tillståndshavare. 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. Föreliggande avsnitt beskriver arbetsformerna och fördelningen av arbetsuppgifter.

14.2.1 Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB

Tillståndshavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer. SKB har fått i uppdrag av kärnkraftsföretagen att delta i planeringen och genomförandet av kommande avveckling. SKB:s medverkan avser i huvudsak sammanställning av det utvecklingsbehov som identifierats av tillståndshavarna, samordning av generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall, och sammanställning av 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 för avfallet så att det uppfyller de acceptanskriterier som gäller i respektive förvar. Kärnkraftsföretagen tar fram typbeskrivningsspecifikationer som utgör underlag i typbeskrivningen. Vidare har SKB i uppdrag att gemensamt för kärnkraftsföretagen utveckla nya avfallsbehållare för rivningsavfallet, se kapitel 6.

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 2014b).

Framöver ansvarar respektive kärnkraftsföretag 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.

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 upprättar SKB vart tredje år en kostnadsberäkning i enlighet med finansieringslagen, se avsnitt 1.5. Inbetalda medel förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden.

Gällande kostnadsuppskattningar för kärnkraftsreaktorernas avveckling har SKB tidigare svarat för en mer omfattande uppgift då uppskattningar tagits fram gemensamt med kärnkraftsföretagen. Uppgifterna är numera fördelade så att kärnkraftsföretagen tar fram kostnadsuppskattningar för 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 som regeringen beslutar om.

Transportsystemet

SKB ansvarar för transport av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från kärnkraftverken till mellanlager och slutförvar. Transportsystemet består av fartyget m/s Sigrid, specialfordon och olika typer av transportbehållare. 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.

Övrigt radioaktivt avfall kan, i de fall detta anses motiverat, transporteras utanför SKB:s system. Detta kan exempelvis gälla större komponenter såsom hela reaktortankar.

14.2.2 Arbetsuppdelning inom koncernerna

För att effektivisera avvecklingsverksamheten inom respektive koncern sker samordning och samarbete även på koncernnivå. Även i detta fall är tillståndshavaren ytterst ansvarig, men har till exempel uppdragit delar av planeringen till en dedikerad koncerndel alternativt organisatorisk del inom bolaget. Kapitel 15–17 beskriver mer i detalj det avvecklingsarbete som pågår och planeras inom respektive koncern samt inom SKB.

14.3 Nationell och internationell 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 som rådgivande till SKB i arbetet med Fud-programmet och planrapporterna. Gruppen behandlar bland annat frågeställningar kring avvecklingen och dess planering.

För att ytterligare stödja linjechefer inom SKB och kärnkraftsföretagen rörande avveckling och avfallshantering har ett forum för ansvariga chefer etablerats där SKB är sammankallande. Detta ger möjligheten att fatta beslut inom deltagarnas mandat för att få framdrift i och prioritera bland det arbete som SKB och kärnkraftsföretagen bedriver.

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 bedrivs inom OECD/NEA i gruppen Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD) och inom IAEA i gruppen International Decommissioning Network (IDN).

Barsebäck Kraft AB, AB SVAFO och SKB 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). TAG träffas två gånger om året och utbyter erfarenheter kring olika avvecklingsprojekt i hela världen. Framöver är även detta forum av intresse för avvecklingsprojekten för Ringhals 1 och Ringhals 2 samt Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

15 Planering för avveckling inom Uniper

Uniper är en nybildad koncern där Barsebäck Kraft AB och OKG Aktiebolag ingår som dotterbolag. Framgent kommer Uniper, utifrån ett ägarperspektiv, hantera bland annat drift och avveckling av reaktorerna vid Barsebäck och Oskarshamn. För närvarande pågår en översyn av samverkansformer inom Uniper. Ambitionen är att koncernen ska tillvarata synergier mellan avvecklingsprojekten vid de två kärnkraftsanläggningarna. I nuläget, och under denna Fud-period, kommer huvuddelen av det avvecklingsrelaterade arbetet att genomföras inom Barsebäck Kraft AB och OKG Aktiebolag. Det pågående, och planerade arbetet, beskrivs i detalj under respektive anläggnings avsnitt nedan.

15.1 Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling

Barsebäck Kraft AB (BKAB) utför sedan 2006 servicedrift av reaktorerna Barsebäck 1 (B1) och Barsebäck 2 (B2). Avvecklingen av B1 och B2 genomförs som ett gemensamt projekt. Avvecklingen har grundats på strategin att utbyggnaden av SFR ska stå klar innan nedmontering och rivning påbörjas. Som följd av senareläggning av SFR:s utbyggnad har BKAB ändrat strategi till att mellanlagra det kommande rivningsavfallet på kärnkraftverket eller externt i väntan på att det kan transporteras till SFR. Slutmålet för avvecklingen av Barsebäckverket är att uppfylla de radiologiska kriterierna för friklassning av byggnader och mark så att det kärntekniska tillståndet kan upphöra för anläggningen. Hur detta ska genomföras beskrivs övergripande i avvecklingsplanen för Barsebäckverket (Berglund och Lorentz 2016). Nedan sammanfattas avvecklingsplanen och i figur 15-2 ges en översikt över tidsplanen för reaktorernas avveckling.

Övergripande planering

Under 2015 togs beslut om att segmentera reaktortankarnas interndelar och mellanlagra dessa i stältankar i en ny lagerbyggnad på anläggningen i avvaktan på borttransport. Lagerbyggnaden har uppförts så att segmenteringen kan påbörjas under hösten 2016. Segmenteringen beräknas vara avslutad 2019 och kommer generera cirka 80 stältankar.

Den aktuella strategin innebär att tillståndsprocessen för nedmontering och rivning kommer att påbörjas under 2016 med inriktning att nedmontering och rivning kan starta 2021.

BKAB har påbörjat framtagandet av ett radiologiskt kontrollprogram för friklassning av rivningsmaterial, byggnader och mark. Kontrollprogrammet kommer att kopplas till 3D-modellen över anläggningen som innehåller databaser från den utförda radiologiska kartläggningen.

Det underlag som BKAB hittills har tagit fram för avvecklingen ska sammanställas till ett uppdrag för förprojektering. En förutsättning är att beprövade tekniker och metoder ska tillämpas. Under förprojekteringen utförs en fördjupad analys, komplettering och utvärdering av hur avvecklingen planeras att genomföras. Exempel på innehåll i förprojekterings slutrapport är delmoment, principlösningar, upphandlingsformer, ekonomiska kalkyler, säkerhets- och riskanalyser, miljöaspekter, avfallsplaner, utbildning av entreprenörer, dosbudget samt tidsplaner.

Resultatet från förprojekteringen leder i sin tur till att Barsebäckverkets ägare kan fatta beslut om att starta en projektering av nedmontering och rivning av anläggningen. Med den nya strategin kan förprojekteringen påbörjas under 2017 och projekteringen under 2018. Det gör att förberedelser som etablering av produktionslinjer för hantering av avfallsflöden, hjälpsystem (ventilation, el etc) mellanlager och övrig infrastruktur kan vara klara, så att nedmonteringen och rivning kan påbörjas 2021.

Nedmontering och rivning kommer att utföras i specifika delmoment som till exempel uttag av hel reaktortank, systemrivning av reaktorbyggnad, systemrivning av turbinbyggnad, rivning av biologiska skärmen etc. Delmomenten kan utföras parallellt eller sekventiellt och det optimala genomförandet kommer att fastställas under projekteringen. Efter nedmonteringen utförs dekontaminering och friklassningsmätning av byggnaderna. Preliminär tidsplan för nedmontering, dekontaminering och friklassning av byggnader är 2021 till 2025.

Efter friklassning av byggnader påbörjas den konventionella byggnadsrivningen till en meter under marknivå. Rivningsmassorna används till att fylla kulvertar och övriga hålrum i anläggningens konstruktion. När marken är iordningställd kommer friklassningsmätningar att utföras för att verifiera att det radiologiska kriteriet är uppfyllt. Preliminär tidsplan för detta är 2027 till 2028.

Om SFR inte är driftklart under perioden kommer mellanlagret att kvarstå som kärnteknisk anläggning och rivas/friklassas när avfallskollina är borttransporterade.

Avfallshantering

De totala avfallsmängderna, aktivt som icke aktivt, har uppskattats genom en inventering med syfte att identifiera volymer och massor. Nedmontering, rivning, avfallshantering, transport och mellanlagring ska genomföras som en industriell process med tydliga produktionslinjer. För att undvika stopp i avfallsflödet dimensioneras aktiviteter som friklassningsmätning och emballering i containrar efter det högsta kalkylerade flödet. Buffertlagring införs vid behov för att underlätta logistiken.

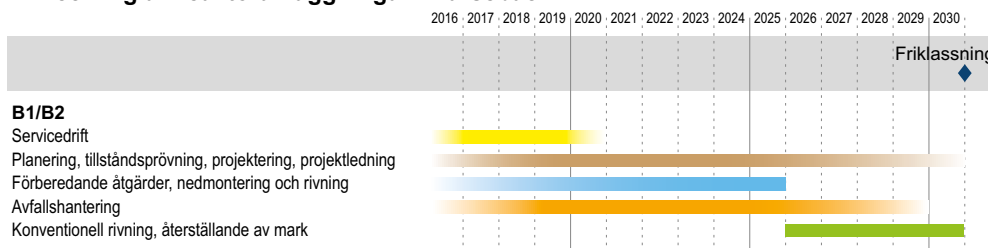
För att undvika kontamination av friklassningsbart avfall bör detta nedmonteras inledningsvis om flödesvägarna inte går att separera med det radioaktiva avfallet.

Låga stråldoser prioriteras och det innebär att radioaktivt avfall rivs och transporteras bort i större enheter exempelvis hela reaktortankar. Friklassning genomförs då en nytta kan påvisas utan att orimliga resurser åtgår. Konceptet kan leda till något större volymer radioaktivt avfall men detta kan uppvägas av mindre stråldoser till personalen, kortare tidsplan och att mindre sekundäravfall genereras.



Figur 15-1. *Vy över Barsebäcks kärnkraftverk med de två BWR-reaktorerna B1 (närmast i bild) och B2.*

Avveckling av reaktorläggningar i Barsebäck



Figur 15-2. Principiell översikt av Barsebäck Kraft AB:s tidsplan för avveckling.

Något markförvar för mycket lågaktivt avfall kommer inte att etableras vid Barsebäckverket med beaktande av att marken ska friklassas i sin helhet.

Det radioaktiva rivningsavfallet mellanlagras och transporteras därefter till SFR, när den utbyggda delen av slutförvaret är i drift. Transporterna från mellanlager till SFR beräknas genomföras under cirka två år och består av hela reaktortankar, ISO-containrar, kokiller och ståltankar.

Radioaktivt avfall som kan friklassas består i huvudsak av metall från turbinanläggningen som kan skickas för smältning och betongkonstruktioner som återanvänds på plats som fyllnadsmaterial då marken iordningställs.

15.2 OKG Aktiebolags planering för avveckling

OKG Aktiebolag (OKG) planerar för slutlig avställning av Oskarshamn 1 (O1) i samband med revisionen sommaren 2017. Oskarshamn 2 (O2) som de senaste åren genomgått ett omfattande moderniseringsprogram kommer inte att återstartas. En slutlig avställning är planerad då nödvändig miljödom har erhållits. Oskarshamn 3 (O3) planeras att drivas fram till 2045. Därefter planeras nedmontering och rivning inledas under avställningsdriften. För en översikt av tidsplanen för avvecklingen av reaktorerna, se figur 15-4.

Avvecklingen av OKG:s anläggningar omfattar de åtgärder som vidtas efter slutlig avställning i syfte att avlägsna radioaktiva ämnen i mark och byggnader till sådana nivåer att en friklassning av anläggningsplatsen är möjlig. Den slutliga målsättningen är att skyldigheterna från kärntekniklagen och strålskyddslagen ska kunna upphöra.

Avvecklingen av OKG:s anläggningar ska ske säkert, effektivt och miljömässigt hållbart. För att uppnå detta har OKG tagit fram ett strategiskt underlag som omfattar OKG:s samtliga anläggningar inom förläggingsplatsen. I underlaget redogörs för de övergripande strategiska mål och riktlinjer som ligger till grund för framtida avveckling. Gemensamma kopplingar till andra tillståndshavare i anslutning till förläggingsplatsen beskrivs också översiktligt.

Övergripande planering

Baserat på den övergripande strategin har OKG upprättat avvecklingsplaner, en för O1 och O2 (Johannesson och Rannemalm 2016a), en för O3 (Johannesson och Rannemalm 2016b) och en för de gemensamma anläggningarna, Block 0 (Johannesson och Rannemalm 2016c). Den gemensamma avvecklingsplanen för O1 och O2 baseras på att anläggningarna är fysiskt sammankopplade och att de kommer att avvecklas samtidigt eller i nära anslutning till varandra. I samband med avvecklingen av O1 och O2 kommer vissa gemensamma anläggningar att påverkas, exempelvis planeras i dagsläget den gemensamma avfallsbyggnaden avvecklas i samband med O1 och O2:s nedmontering och rivning. Delar av det radioaktiva avfall som uppkommer därefter, exempelvis visst driftavfall från O3, behöver således tas omhand på annat sätt. I avvecklingsplanerna beskrivs hur OKG ska nå de mål som satts upp och hur avvecklingen ska genomföras för respektive anläggning.

Under 2015 inleddes projekt Decommissioning Preparation Project (DPP). Projektets uppgift var att planera och implementera en ny avdelning som ansvarar för avvecklingsverksamheten på OKG. Projektet skulle även ta fram de underlag och genomföra de förberedelser som krävs för att O1 och O2 ska kunna övergå till avställningsdrift, följt av servicedrift och därefter nedmontering och rivning. Den nya avdelningen med ansvar för avvecklingsverksamheten etablerades under augusti 2016 och överlämning av projekt DDP pågår under hösten 2016.

Avställningsdriften för O1 bedöms till cirka 1,5 år respektive cirka 6 månader för O2. O2:s korta avställningsdrift beror på att anläggningen inte varit i drift sedan 2013 och att transport av använt kärnbränsle till Clab påbörjades under första halvåret 2016. För både O1 och O2 bedöms att servicedrift kommer att krävas för en realistisk tidsplan avseende tillståndsprovningen för nedmontering och rivning. Servicedriftens längd bedöms uppgå till 6 månader för O1 respektive 1,5 år för O2. OKG kommer dock att sträva efter att genom god planering minimera eller eliminera tiden för servicedrift. Utifrån detta planeras för en gemensam nedmontering och rivning av O1 och O2 med tidigast start i mitten av 2019.

Under avställningsdrift och servicedrift kommer åtgärder vidtas för att minska mängden aktivitet, och därmed reducera den radiologiska risken i respektive anläggning. Exempel på sådana åtgärder är borttransport av använt kärnbränsle, segmentering och borttransport av reaktortankarnas interndelar samt dekontaminering av primära reaktorsystem. Detta innebär att viss partiell nedmontering och rivning kan komma att startas snarast efter slutlig avställning.

Nedmonteringen och rivningen av OKG:s anläggningar kommer att delas in i ett antal delmoment som tillsammans med dess ingående delar beskrivs i respektive anläggnings avvecklingsplan. OKG kommer att ta del av nationella och internationella erfarenheter i sitt fortsatta planeringsarbete och vid detaljprojekteringen. OKG har också under åren i drift samlat in värdefull kunskap med betydelse för avvecklingen. I samband med genomförda effekthöjningsprojekt har OKG utvecklat och verifierat ett arbetssätt för omhändertagande av stora komponenter. Exempelvis har interndelar från reaktorer kapats, emballerats och transporterats till OKG:s berggrum för avfall (BFA) för mellanlagring. Dessutom har stora komponenter, såsom turbinen på O3, demonterats, emballerats, transporterats, smälts och friklassats. Logistik och planering av hela avfallsflödet har verifierats.



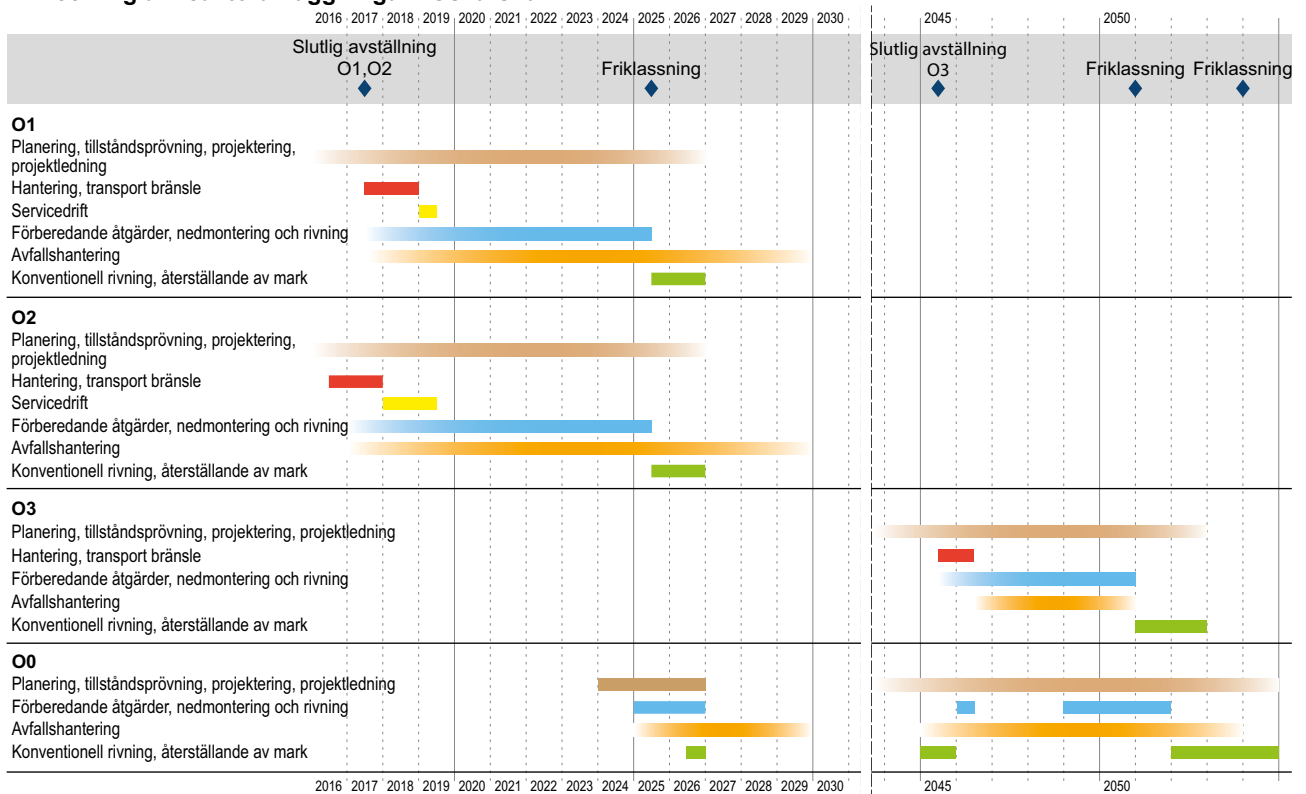
Figur 15-3. *Vy över OKG:s kärnkraftverk med de tre BWR-reaktorerna O1, O2 och O3 från vänster till höger i bild.*

Avfallshantering

Avfallet som uppkommer i samband med avvecklingen är av samma typ som det som uppkommer under driften, med den väsentliga skillnaden att avfallsvolymerorna kommer vara avsevärt större under avvecklingen. Det innebär att kapaciteten för avfallshantering behövs utökas men att beprövade tekniker och metoder kan användas. De större avfallsmängderna under avvecklingen, avseende radioaktivt och konventionellt avfall, ställer högre krav på en fungerande avfallslogistik. OKG kommer i avfallshantering att eftersträva redundans i hanterings- och avbördningsalternativ för att minska risken för störningar.

Då avvecklingen av O1 och O2 planeras att genomföras innan utbyggnaden av SFR är i drift behöver OKG i det fortsatta planeringsarbetet utreda behovet av eventuella mellanlager för det radioaktiva avfall som uppkommer. Detta gäller exempelvis för hanteringen av reaktortankarna där OKG i dagsläget planerar för att de ska omhändertas hela utan interndelar.

Avveckling av reaktoranläggningar i Oskarshamn



Figur 15-4. Principiell översikt av OKG:s tidsplan för avveckling (O0 är gemensamma anläggningar som redovisas separat).

16 Planering för avveckling inom Vattenfall

Inom Vattenfall planeras att organisatoriskt separera avveckling från drift. Detta genomförs för att säkerställa verksamhetsfokus då de tidiga avvecklingsprojekten sker på anläggningar med fortsatt elproduktion, och för att koncentrera koncernens avvecklingskompetens till en samlad organisatorisk enhet. Enheten ska se till att säkerheten står i fokus och att planeringen sker effektivt med tydliga prioriteringar inom och mellan avvecklingsprojekten.

Inriktningen är att en ny tillståndshavare, enbart fokuserad på avveckling, ska ta över ansvaret för de slutligt avställda reaktorerna så snart det använda kärnbränslet lämnat anläggningarna.

2015 skapades en linjefunktion inom Vattenfall AB, Business Unit Nuclear Decommissioning (BU-ND), för att koordinera, samordna och driva avvecklingsfrågor inom koncernen. Efter avslutad avställningsdrift planeras drifttillståndet överföras till ett bolag inom BU-ND.

Analys och planering inför operativa avvecklingsåtgärder genomförs av BU-ND på uppdrag av, och i nära samverkan med, tillståndshavaren. Tillståndshavaren ser till att det finns kompetens rörande kännedom om anläggningen och dess historik i avvecklingsprojektet samt ansvarar för att ge projekten tydliga och realistiska ekonomiska och tekniska förutsättningar. Tillståndshavaren ser även till att slutlig avställning sker på ett optimalt vis samt att bränslet transporteras bort och separering sker av eventuella anläggningar eller system som ska lämnas kvar på platsen. BU-ND verkar, parallellt med analys- och planeringsarbete, för koncerngemensam optimering mellan avvecklingsprojekt och sörjer för strategisk avvecklingsspecifik kompetens samt strategiskt utvecklingsstöd åt avvecklingsprojekten.

16.1 Vattenfalls avvecklingsplanering

I föreliggande avsnitt beskrivs Vattenfalls avvecklingsplanering på en övergripande nivå. Planerna gäller för all kärnteknisk avveckling som bedrivs inom koncernen och kan därmed tillämpas på såväl Ågestareaktorn som reaktorerna i Forsmark och Ringhals. SKB:s avvecklingsplanering särredovisas i ett eget kapitel, kapitel 17, då avvecklingen av SKB:s anläggningar planeras att ske vid en långt senare tidpunkt.

För att tydliggöra de strategiska ställningstagandena har avsnittet delats in i två delområden: projektgenomförande respektive avfallshantering.

Projektgenomförande

För att minimera krav- och riskbilden under genomförande av avvecklingsprojekten ska förutsättningar och omfattning vara väl definierade på förhand. Tiden för nedmontering och rivning ska hållas så kort som möjlig med en sammanhållen genomförandefas vilken påbörjas utan onödigt dröjsmål efter slutlig avställning. Detta innebär att servicedrift ska minimeras samt att nedmontering och rivning pågår tills anläggningens beslutade sluttillstånd uppnåtts.

Under avställningsdriften planeras förutom bränsletransporter, avställning av system och omhändertagande av driftavfall samt förberedande aktiviteter inför nedmontering och rivning att genomföras. Dessa förberedande aktiviteter, exempelvis dekontaminering av primärsystem och segmentering av interdelar från BWR-reaktorer med långlivat aktivitetsinnehåll, syftar till att göra efterföljande arbete så säkert och effektivt som möjligt. Detta görs 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 kritisk linje. Det planeras även för omhändertagande av vissa icke radioaktiva eller lågaktiva system såsom turbin- och generatorsystem för att optimera avfallshanteringen inför det att nedmontering och rivning påbörjas i stor skala.

Avvecklingsprojektets organisation kommer att ha som uppgift att planera och verkställa projektet där kontrakterade entreprenörer används som huvudsaklig arbetskraft under genomförandefasen. I och med detta kommer projektorganisationen att kunna hållas liten och effektiv.

Genomförandet under nedmonteringen och rivningen kommer att delas upp i ett lämpligt antal avgränsade etapper/delprojekt. 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 ett sammantaget ALARA- och BAT-perspektiv för att minimera dos och maximera effektivitet.

Reaktortankarna från Vattenfalls anläggningar kommer enligt nuvarande plan att tas ut och deponeras i slutförvaren utan segmentering. Utlyft av hela reaktortankar har aldrig tidigare utförts i Sverige, men internationellt finns erfarenhet som kommer att detaljstuderas inom ramen för de första avvecklingsprojekten. Nationellt finns dock erfarenhet av att hantera andra stora komponenter, exempelvis ånggeneratorer. Hantering och slutförvaring av hela reaktortankar förväntas minimera dos till personal, tid för hantering samt påverkan på miljö.

För att demontera radioaktiva system används i första hand mekaniska metoder som minimerar kontaminationsspridning såsom sågning och klippning. För icke radioaktiva system kan det däremot, beroende på arbetsmoment, komma att användas termiska metoder som användning av skär- och plasmabrännare.

Sluttillståndet för avvecklingen är friklassad industritomt. Sluttillstånd för respektive avvecklingsprojekt kan dock vara friklassningsbar industritomt där byggnader och infrastruktur av nytta för fortsatt verksamhet lämnas medan övriga installationer rivs. Friklassningen kan ske i 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.

Avfallshantering

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, bland annat genom anpassning av befintliga avfallshanteringsbyggnader 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 att sortera det direkt vid uppkomst. Bearbetning av radioaktivt avfall ska minimeras och i möjligaste mån genomföras i anslutning till avfallens 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.

Även det konventionella avfallet som uppstår under avvecklingen utgör en utmaning då det delvis, beroende på sitt ursprung, kan behöva verifieras med avseende på aktivitetsinnehåll innan det kan transporteras bort för återvinning eller utnyttjas på platsen som fyllnadsmaterial. 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 konventionella rivningsmassor som uppstår till följd av systemdemontering etableras ett friklassningsförfarande i linje med befintlig friklassningshandbok.

Avfallshanteringen inklusive lager och slutförvar ska optimeras ur ett sammanhållet drift- och avvecklingsperspektiv på koncernnivå. Detta gör att utökning av befintliga markförvar på Ringhals respektive Forsmark planeras för att deponera både drift- och rivningsavfall, när detta är mer fördelaktigt än att deponera avfallet i SFR eller nyttja andra bortskaffningsalternativ. Utökning av kapacitet för att ta hand om avfallet ska ske där det bäst lämpar sig ur ett koncernperspektiv.

Projektets framdrift ska till rimlig nivå göras oberoende av avfallsbehandling-, avfallstransport- och slutförvarskapaciteter. För transport ska projekten primärt nyttja SKB:s transportsystem, men är inte exklusivt bundet till detsamma. Koordinering av framför allt bränsletransporter ska ske på koncernnivå med målet att minimera påverkan på avvecklingsprojekten.

16.2 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 innefattar förlägningsplatsen även gemensamma byggnader och faciliteter för avfallshantering, kontor, verkstäder, förråd, tillfartsvägar med mera, och upptar totalt 2,5 kvadratkilometer, se figur 16-1.

Reaktorerna R1 och R2 byggdes under 1970-talet och placerades inom ett gemensamt driftområde. Under 1980-talet byggdes R3 och R4, vilka förlades till ett driftområde som ursprungligen var skilt från R1 och R2 men som senare länkades ihop med desamma via en tranportväg. 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 buffertlagring 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 (Bergman et al. 2016a) och en för R3 och R4 (Bergman et al. 2016b). Dessa avvecklingsplaner bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras i avsnitt 16.1. Ringhals AB (RAB) planerar för drift av reaktorerna R1 och R2 till inplanerad revisionsavställning 2020 respektive 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 befintliga planeringsförutsättningar om drift till 2041 respektive 2043. Avställningsdriften bedöms i dagsläget ta cirka 16 månader för R1 och cirka 22 månader för R2, då kylbehov och kapacitet för bränsletransport beaktats.



Figur 16-1. 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 radioaktivt avfall.

I december 2015 inleddes avvecklingsprojektet för R1 och R2, projekt TYKO, med syfte att nedmontera och riva anläggningarna. Fokus i närtid är att analysera 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 tillståndsprövning, rivningsmetodik, organisation och avfallshantering. I avsnitt 19.2 beskrivs de aktiviteter som ska analyseras eller genomföras under de olika projektfaserna.

I samband med avställningsbeslutet för R1 och R2 startades även projekt STURE på Ringhals. Syftet med projektet är att förbereda avvecklingen av R1 och R2 på ett säkert och effektivt sätt samtidigt som driften av R3 och R4 kan fortgå enligt planerad verksamhet. Projektet ska bland annat planera för och genomföra fysisk separering av blockparet som ska drivas vidare från det som ska avvecklas, ombesörja bränslebortförsel från sista härdarna samt dränera system och forsla bort driftavfall. Projektet kommer också att genomföra systemdekontaminering efter slutlig avställning och övriga förberedande aktiviteter som behövs inför avvecklingen så som att förbereda infrastruktur och öka avfallshanteringskapaciteten. Ett nära samarbete sker mellan projekt STURE och projekt TYKO inför och under genomförandet av nedmonterings- och rivningsaktiviteter.

I figur 16-2 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Ringhals kärnkraftverk.

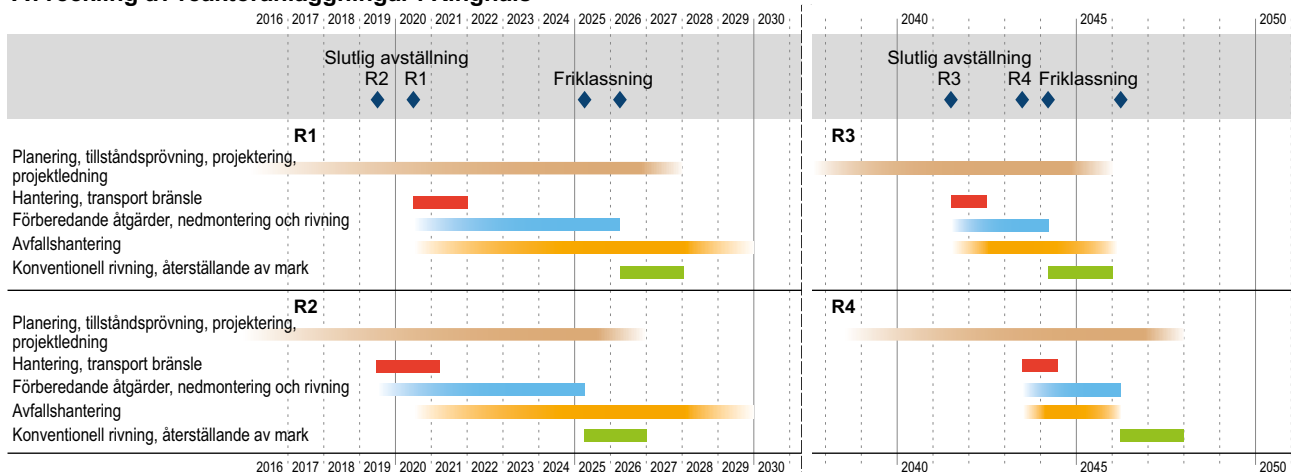
Avfallshantering

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 avfall 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.

Reaktortanken från R1 kan på grund av sitt aktivitetsinnehåll deponeras i SFR först efter att de mest neutronaktiverade interndelarna har tagits ur, segmenterats och paketerats för mellanlagring inför framtida deponering i SFL. Interndelar såsom fuktavskiljare och ångseparator planeras att deponeras tillsammans med reaktortanken i SFR.

Reaktortankarna hos R2, R3 och R4 behöver till följd av sin kraftigare aktivering deponeras i SFL vilket innebär att samtliga interndelar planeras lämnas kvar i reaktortanken då tank och interndelar har samma slutförvarsdestination. Mellanlagring av reaktortankarna sker på Ringhals till dess att SFR är utbyggt respektive SFL tas i drift.

Avveckling av reaktorläggningar i Ringhals



Figur 16-2. Principiell översikt av Ringhals tidsplan för avveckling.

16.3 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 16-3. 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 block 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.

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.

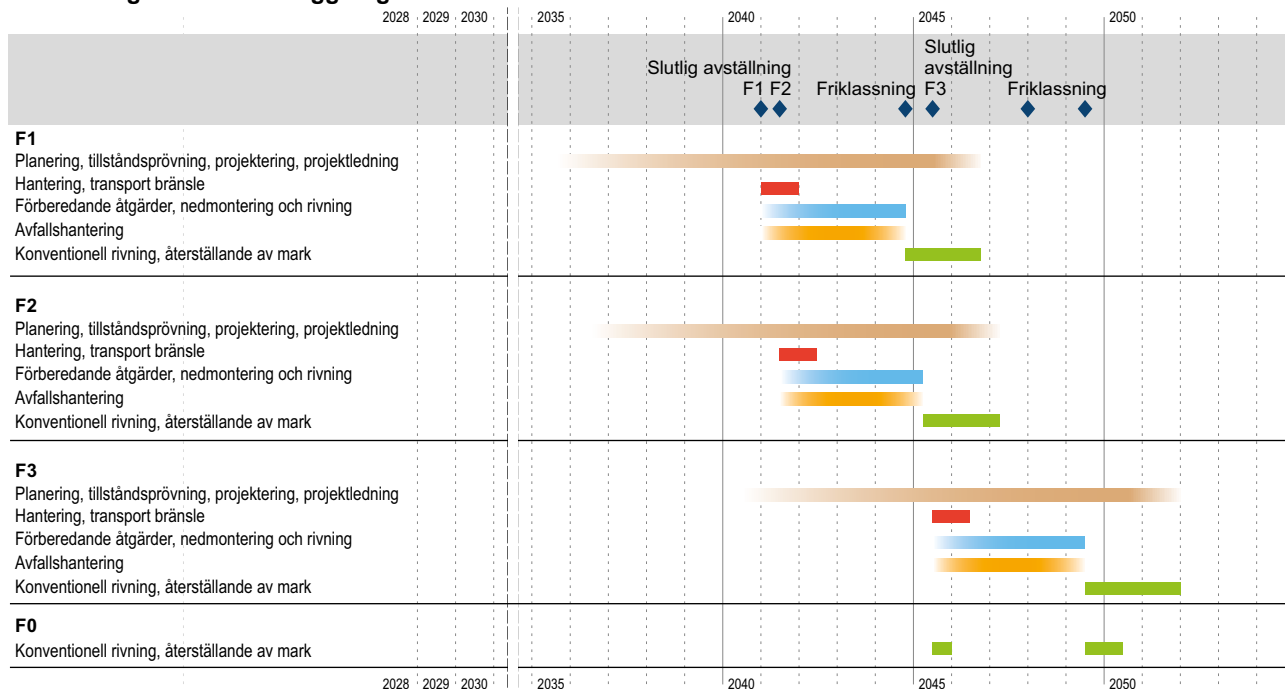
Avvecklingen av F1, F2 och F3 återges i avvecklingsplanen (Runermark 2016) och bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras i avsnitt 16.1. F1 och F2 förväntas komma att nedmonteras och rivras på ett sätt som maximerar synergivinster och minimerar behovet av anläggningsseparation alternativt 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 nedmonteras. I figur 16-4 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.



Figur 16-3. Forsmarks kraftstation med de tre BWR-reaktorerna F1, F2 och F3 från vänster till höger i bild.

Avveckling av reaktorläggningar i Forsmark



Figur 16-4. Principiell översikt av FKA:s tidsplan för avveckling (F0 är gemensamma anläggningar som redovisas separat).

16.4 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. 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, se figur 16-5.

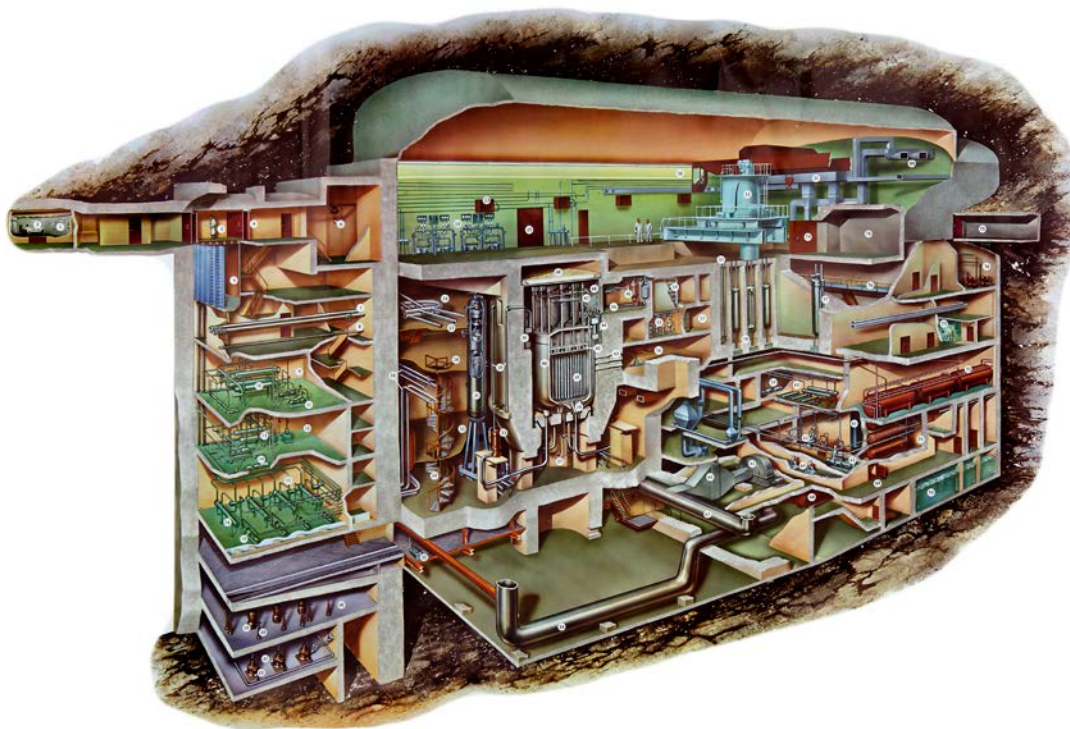
Ågesta kärnkraftverk befinner sig sedan 1974 i servicedrift vilket innebär att anläggningen är avstängd men att vissa drift- och övervakningsfunktioner upprätthålls. AB SVAFO och tillståndshavaren Vattenfall äger 50 procent av anläggningen vardera. AB SVAFO bedriver servicedriften på uppdrag av Vattenfall.

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 bil, med ett eventuellt undantag för reaktortanken som initialt också måste transporteras med bil 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.

Övergripande planering

Miljötillståndet för den pågående servicedriften av Ågestareaktorn löper ut 2020. Inriktningen är att kunna inleda nedmontering och rivning senast i samband med att detta tillstånd löper ut. För att uppfylla den övergripande tidsplanen togs ett projektstartsbeslut för Ågesta avvecklingsprojekt i november 2015. Avvecklingen av Ågestareaktorn återges ytterligare i dess avvecklingsplan (Bohl Kullberg 2013).

För att kunna inleda nedmontering och rivning senast då nuvarande miljötillstånd för servicedrift löper ut krävs att nödvändiga tillstånd och godkännanden enligt miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen finns på plats. Nuvarande bedömning är att den kritiska linjen för projektet går genom miljöprövningsprocessen. En målsättning är därför att påbörja framtagning av de ansökningshandlingar som



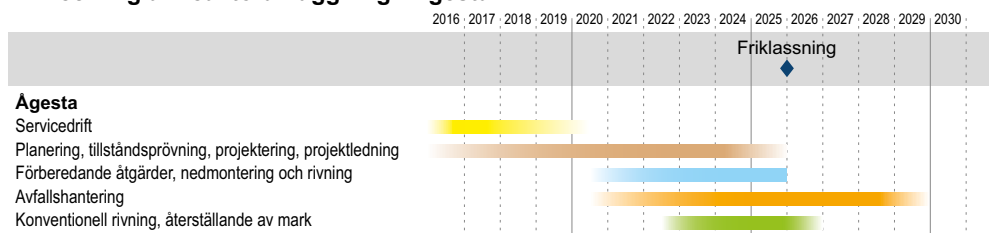
Figur 16-5. Sprängskiss över Ågestaanläggningen.

krävs för ansökan om miljötillstånd, miljökonsekvensbeskrivning och samrådsprocess så snart erforderligt underlag finns framtaget. I avsnitt 19.2 beskrivs de aktiviteter som ska analyseras eller genomföras under de olika projektfaserna. Figur 16-6 återger tidsplanen för den planerade avvecklingen av Ågestareaktorn.

Eftersom Ågestareaktorn är en äldre anläggning som varit avstängd länge och har ägar- och ansvarsförhållanden som ändrats över tid, råder speciella förutsättningar i meningen att anläggnings- och driftdokumentationen är geografiskt spridd på flera olika arkiv inom och utom Vattenfallkoncernen. Dessutom är dokumentationen gammal och bristfällig. För att ge avvecklingsprojektet så goda förutsättningar som möjligt, och därmed minska risken för framtida tekniska svårigheter, har följande åtgärder vidtagits:

- Ett projekt är initierat för att samla all relevant dokumentation hos AB SVAFO och för att digitalisera valda delar av dokumentationen.
- En anläggningsbeskrivning tas fram som ger underlag inför bland annat definiering av projektets omfattning och avgränsningar.
- Baserat på befintliga ritningar görs en 3D-modellering av valda delar av anläggningen. Delar som inte modelleras dokumenteras med fototeknik för att ha ett komplett underlag för planering av nedmontering och rivning.
- En radiologisk kartläggning påbörjas vilken kommer att omfatta såväl beräkning av inducerad aktivitet i och runt reaktortanken som mätning av kontamination i övriga delar av anläggningen.

Avveckling av reaktorläggning i Ågesta



Figur 16-6. 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. Detta gör att allt avfall som väntas uppstå under avvecklingen av Ågestaanläggningen har en känd slutdestination.

Den befintliga avvecklingsplanen utgår från segmentering av reaktortanken på plats i anläggningen. Bedömningen i dag är dock att det finns fördelar med att undvika denna segmentering, vilket gör att alternativ hantering behöver utredas närmare, exempelvis:

- Demontering, transport, mellanlagring och deponering av hel reaktortank.
- Demontering, transport, mellanlagring och deponering av delad reaktortank (tank och lock separat).
- Demontering av reaktortank på plats och transport, mellanlagring och deponering i delar.

17 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar

17.1 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 (Calderon 2014a). 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 skulle avvecklingen av Clink kunna inledas omkring 2070 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 planerar SKB att se över och uppdatera avvecklingsplanen för Clab. Uppdatering sker för att harmonisera med föreskrifterna från SSM samt att följa den gemensamma strukturen för en avvecklingsplan (Calderon 2014b).

17.2 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. Nuvarande planer avser 50–60 års drift av kärnkraftverken och ytterligare några år för Clink. Rivningen av SFR skulle därmed kunna inledas i mitten av 2070-talet.

17.3 Slutförvaret för långlivat avfall

Ingen avvecklingsplan finns ännu framtagen för SFL, eftersom utformningen av detta slutförvar befinner sig på konceptstadiet. Avvecklingen kommer att inledas i samband med förslutning av förvaret vilket sker i mitten av 2050-talet, se avsnitt 3.3.4.

17.4 Kärnbränsleförvaret

En avvecklingsplan för Kärnbränsleförvaret finns framtagna och ingår i ansökningarna enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet (Hallberg och Tiberg 2010).

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 10.8.1.

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 i enlighet med gällande bestämmelser. Därefter genomförs en markundersökning som ligger till grund för efterbehandling av området.

18 Beroenden och flexibilitet

För att kunna genomföra avveckling i enlighet med befintliga planer krävs att förutsättningar etableras och att en viss flexibilitet för extern påverkan finns inom projekten. Under ett avvecklingsprojekt finns risk för att projektets fortsatta verksamhet påverkas av externa faktorer i form av tillstånd och myndighetsbeslut som till stor del ligger utanför projektets kontroll. De främsta av dessa externa beroenden uppstår i samband med

- slutlig avställning
- avställningsdriftens slut
- uppstart av delprojekt/delmoment
- friklassning av anläggning.

För att passera dessa milstolpar ställs krav på väl utarbetade processer och goda myndighetsrelationer men även konsekvensanalys och utarbetande av en plan över de insatser som kan genomföras inom projektet för att skapa flexibilitet i planeringen.

Gränssytor uppstår även inom kärnkraftsindustrin till följd av projektens beroenden gentemot annan industriintern verksamhet. Dessa beroenden kan i större grad hanteras genom god planering, men kan om de förbises skapa stora utmaningar för ett pågående projekt att hantera. De industriinterna gränssytorna och beroendena uppstår dels i skärningen mellan drift och avveckling, dels mellan avveckling och SKB:s system för transport, mellanlagring och slutförvaring. De uppstår även till följd av den stora omfattning av parallell avvecklingsverksamhet som planeras för inom kärnkraftsindustrin. De främsta interna beroendena består i

- separation av anläggningar
- möjlighet till förberedelser internt på anläggningen
- bränsletransport
- mellanlagringskapacitet för bränsle i Clab
- reaktortankshantering
- hantering av långlivat avfall
- friklassning och hantering av mycket lågaktivt avfall
- kritiska resurser och funktioner nationellt.

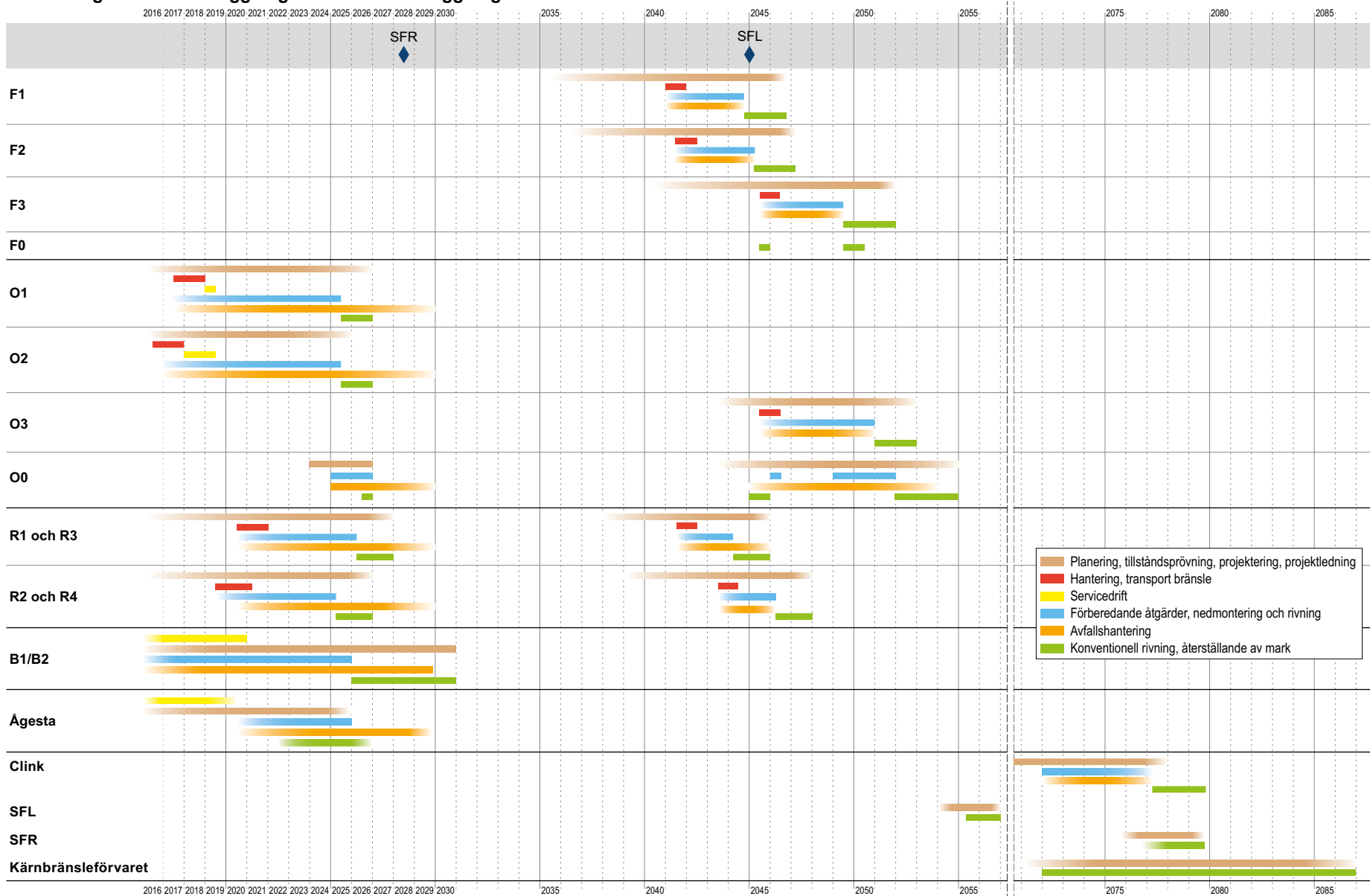
Föreliggande kapitel redogör för hur beroenden ser ut, och hur flexibilitet skapas, i gränssnitt mellan de olika avvecklingsprojekten, mellan avvecklingsprojekten och SKB, och mellan avvecklingsprojekten och externa aktörer. I avsnitt 18.1 redogörs först för en sammantagen bild över industrins avvecklingsverksamheter med fokus på att ge en bild av systemets gränssytor, därefter presenteras de huvudsakliga beroendena tillsammans med en konsekvensbeskrivning och de åtgärder som vidtagits/planeras för att skapa flexibilitet.

18.1 Avvecklingsaktiviteter under denna Fud-period

Tidsplanen för kärnkraftsföretagens och SKB:s planerade avveckling av sina respektive anläggningar har på en övergripande nivå sammanställts i figur 18-1. Fud-perioden domineras av arbete vid reaktorerna Barsebäck 1 och 2, Oskarshamn 1 och 2, Ringhals 1 och 2 samt Ågestareaktorn.

Perioden omfattar åtgärder som är förknippade med bränslehantering vid de reaktorer som ställs av i förtid. Denna hantering ställer krav på att SKB:s transportsystem och Clab har kapacitet att transportera och mellanlagra det använda bränslet från sluthärdarna enligt plan. Vidare kommer åtgärder att vidtas för att skapa en effektiv och säker avveckling. Detta innefattar bland annat förberedelser inför, och i vissa fall genomförande av, segmentering av interndelar, ansökan om erforderliga tillstånd inför avställning samt säkerställande att allt avfall kan hanteras under avvecklingsprojekten.

Avveckling av reaktorläggningar och SKB:s anläggningar



Figur 18-1. Principiell översikt av kärnkraftsföretagens och SKB:s tidsplaner för avveckling (F0 och O0 är gemensamma anläggningar på förläggningsplatserna som redovisas separat).

Avfallshanteringen kräver i sin tur bland annat att typbeskrivningar utarbetas och godkänns för rivningsavfallet, att hantering och tekniker för omhändertagande av större komponenter finns utvecklade, och att de avfallsbehållare som är önskvärda ur ett avvecklingsperspektiv är utvecklade och licensierade. Vidare behöver det finnas bortskaffningsalternativ för det radioaktiva material som inte kommer slutförvaras av SKB, såsom exempelvis tillstånd för deponi av mycket lågaktivt rivningsavfall i lokala markförvar.

Till följd av att avvecklingen av de första reaktorerna genomförs innan mottagningskapacitet finns inom slutförvarssystemet, det vill säga innan SFR återöppnas efter utbyggnaden och innan SFL har byggts, måste det radioaktiva avfallet mellanlagras inför deponering (se förhållande mellan milstolpar och avvecklingsprojekt i figur 18-1). 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 planeras upphöra vid Barsebäck efter avvecklingsprojektets slut, finns alltså ett beroende av att kunna bli av med det radioaktiva avfallet för att möjliggöra friklassning av anläggningen. Detta gör 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.

Vad gäller hanteringen av det långlivade avfallet kommer en stor del av detta avfall att uppstå innan den planerade driftsättningen av SFL. Eftersom avfallet inte kan slutkonditioneras innan kravbildens slutligen är fastlagd för SFL, vilket bland annat kräver att platsen för förvaret är känd, behöver det långlivade avfallet placeras i avfallsbehållare utan slutlig konditionering till dess att slutkonditionering blir möjlig. Enligt gällande tidsplan bedöms att slutkonditioneringen tidigast kan inledas i samband med att SKB erhåller tillstånd att uppföra SFL, vilket planeras till mitten/slutet av 2030-talet, se figur 3-5.

18.2 Flexibilitet kring externa beroenden

Nedan presenteras huvudsakliga externa beroenden som uppstår under ett avvecklingsprojekt tillsammans med en beskrivning av hur dessa hanteras för att skapa flexibilitet och de konsekvenslindrande åtgärder som kan vidtas.

18.2.1 Slutlig avställning

Tidpunkten för slutlig avställning utgör en viktig planeringsförutsättning för ett avvecklingsprojekt. Samtliga avvecklingsprojekt kommer att vara beroende av en välkänd tidpunkt för slutlig avställning. Känsligheten för ett tidigareläggande är som störst för de första reaktorerna som ska avvecklas då det saknas erfarenhet av storskaliga avvecklingsprojekt inom kärnkraftsindustrin och hos berörda myndigheter.

Avvecklingsprojekten utgår i nuvarande plan från cirka fem års förberedande planering och projektering innan slutlig avställning för att säkerställa att bland annat tillstånd finns på plats, projektorganisationen har tid att etableras, projektets genomförande har analyserats och avtal med entreprenörer upprättats. Detta gör att förändringar som leder till ett tidigareläggande av slutlig avställning till en tidpunkt efter den närmaste femårsperioden, planeringstekniskt inte påverkar avvecklingen.

Ett tidigareläggande av avställningen till en tidsperiod inom fem år från tillkännagivandet kommer däremot att påverka avvecklingsprojektets genomförande, där påverkansgraden är kopplad till hur stor inskränkning av utrymmet för planering och projektering som uppstår. Under 2015 tidigarelades tidpunkten för slutlig avställning för ett flertal av kärnkraftsreaktorerna till en tidpunkt som i varierande grad infaller inom fem år.

I samtliga fall medförde tidigareläggandet att tiden för förberedelser förkortades. Ur perspektivet externa beroenden har detta ställt krav på en accelererad planering med fokus på att utarbeta underlagsdokumentation för miljöprövning, då miljöprövningsprocessen hamnat på kritisk linje eftersom en reaktor inte får slutligt ställas av utan att ett nytt miljötillstånd utfärdats. Det ska dock nämnas att implikationen av detta främst är att de aktiviteter som planeras till avställningsdriften inte kan påbörjas förrän tillståndet erhållits. Reaktorn kommer att tas ur drift det datum som planeras även om detta sker inom ramarna för det befintliga drifttillståndet.

Då miljö tillståndet inför avställningsdrift till stora delar väntas likna det tidigare tillståndet under drift planeras en ändringsansökan att lämnas in med en anpassad miljökonsekvensbeskrivning. Tillståndprocessen för denna typ av miljöprövning bedöms kräva något halvår för framtagande av ansökningshandlingar och i ett idealfall ytterligare knappt ett år för prövning i Mark- och miljödomstolen. Det finns alltid en risk för överklagande vilket gör att ett avvecklingsprojekt måste anta att tiden från framtagande av ansökningsunderlag till en godkänd miljöprövning kan bli så lång som fyra år. Under tiden från slutlig avställning till dess att ett tillstånd erhållits kommer avvecklingsförberedande arbete på anläggningen inte att kunna genomföras i den mån som planeras för i dagsläget. Följden av detta blir en förlängning av projektet.

Ur ett vidare perspektiv kommer nästföljande fas i avvecklingsprojektet, som definieras av avställningsdriftens slut, se avsnitt 18.2.2, inte per automatik att påverkas i paritet med en eventuell försening i miljöprövningen för slutlig avställning. Det beror på att nästföljande fas främst kopplas mot att anläggningen är fri från kärnämne (använt kärnbränsle). Förutsättningarna för detta styrs i hög grad av kyltiden för sluthärden och beror därmed främst på tidpunkten för när reaktorn tas ur drift, inte när miljö tillståndet för avställningsdrift erhålls.

Ytterligare implikationer av en tidigare lagd avställning ur aspekten interna beroenden diskuteras under avsnitt 18.3.1.

18.2.2 Avställningsdriftens slut

Kravbilderna som ska uppfyllas efter avslutad avställningsdrift är beroende av om den planerade verksamheten utgörs av servicedrift eller om nedmontering och rivning påbörjas.

I det fall avställningsdriftens slut innebär servicedrift behöver säkerhetsredovisningen enbart beskriva servicedriften. Om avställningsdriftens slut däremot innebär att nedmontering och rivning påbörjas behövs en mer omfattande omarbetning av säkerhetsredovisningen samt ett nytt tillstånd enligt miljöbalken.

Om tidpunkten för att avsluta avställningsdriften försenas, innebär detta att anläggningens kravnivå ligger kvar på en förhöjd nivå i förhållande till anläggningens reella status förutsatt att bränslet har transporterats bort. Det innebär att arbete och bemanning vid anläggningen i praktiken alltjämt behöver anpassas för ett kärnkraftverk med bränsle på plats. Följden blir att arbeten försåras och den omotiverade kravbilderna ger en ökad kostnad.

Då omfattningen för servicedrift är lägre än avställningsdrift finns en möjlighet att begränsa den ekonomiska risken för ett avvecklingsprojekt i det fall ett tillstånd för nedmontering och rivning försenas. Detta kan då ske genom att försätta anläggningen i servicedrift i väntan på att nedmontering och rivning kan starta.

18.2.3 Uppstart av delprojekt/delmoment

För att få påbörja nedmonteringsaktiviteter i anläggningen krävs att avvecklingsplanen kompletterats och redovisats för SSM samt att en rapport enligt Euratomfördragets Artikel 37 har inlämnats. Den senare ska vara myndigheten tillhanda senast ett år innan nedmonteringsaktiviteterna påbörjas. Vidare krävs att säkerhetsredovisningen är omarbetad och godkänd för att täcka det arbete som ska bedrivas och att en säkerhetsgranskad delprojekt-/delmomentsanmälan har skickats till SSM. Slutligen krävs en granskad och godkänd avfallsplan för det avfall som genereras under delprojektet. Om endera av dessa krav inte uppfylls försenas uppstarten av delprojektet/delmomentet.

En försening i uppstarten av ett delprojekt/delmoment medför en direkt påverkan på avvecklingsprojektets framdrift. Beroende på hur innehållet i delprojektet/delmomentet som försenas påverkar övrig verksamhet på anläggningen blir konsekvensen större eller mindre. En försening av ett delprojekt som genomförs tidigt innebär sannolikt en direkt förlängning av den totala tiden för avvecklingen i motsvarande grad, vilket kommer att fördyra projektet och leda till utmaningar i samband med kontraktering av leverantörer med mera. För de senare delprojekten/delmomenten förväntas mer tid finnas tillgänglig för att utarbeta underlag och gå igenom granskningsprocesser, dessutom väntas effektiviserade arbetsmetoder och utarbetande av praxis internt, såväl som externt, successivt förenkla hanteringen allteftersom projekten fortskrider.

Flexibiliteten i samband med uppstart av det första delprojektet är begränsad. Delprojektets omfattning kan i viss mån anpassas efter tidstillgången för att öka sannolikheten att förarbeten och granskning sker enligt plan men i övrigt är en effektiv och förutsägbar hantering av tillståndsansökningarna avgörande för projektets framgång. Flexibilitet i senare skeden kan skapas genom att parallellt genomföra flera delprojekt och genom att låta delprojekt överlappa tidsmässigt för att begränsa risken för stillestånd i projektet.

18.2.4 Friklassning av anläggning

För att slutligt kunna erhålla ett friklassningsbeslut, det vill säga ett beslut om att anläggningen inte längre ska beröras av lagkrav i strålskyddslagen och kärntekniklagen, krävs att material, lokaler, byggnader och mark har kontrollerats gällande förekomsten av radioaktiva ämnen och att de uppmätta halterna understiger fastställda friklassningsnivåer i enlighet med SSMFS 2011:2. Vidare krävs att en avvecklingsrapport över genomförandet av avvecklingen, med beskrivningar av gjorda erfarenheter och anläggningens sluttillstånd, sammanställts och lämnats in till SSM.

Försening i tidpunkten för friklassad anläggning medför att konventionella rivningsaktiviteter vid anläggningen tillsvidare måste genomföras under samma kravbild som när anläggningen var kärnteknisk, vilket kommer att leda till extra kostnader för projektet. Ökad flexibilitet kring friklassningstidpunkten kan skapas genom att anläggningen successivt friklassas allteftersom material, lokaler, byggnader och mark har påvisats vara fria från kontamination, varvid mätkraven inför det slutliga friklassningsbeslutet kan begränsas. Vidare kommer ett tidigt utarbetande av metoder och förväntningar i samråd med SSM att minska riskerna för förseningar i samband med den slutliga friklassningen.

18.3 Flexibilitet kring interna beroenden

Nedan presenteras interna beroenden som kan utgöra osäkerheter för ett avvecklingsprojekt tillsammans med en beskrivning av hur dessa hanteras och de konsekvenslindrande åtgärder som kan vidtas.

18.3.1 Anläggningsseparation inför avveckling

För att möjliggöra samtidig anläggningsdrift och avveckling vid en förläggingsplats krävs att verksamheterna kan fortgå parallellt med så få beroenden sinsemellan som möjligt. Till följd av att de äldsta reaktorerna vid respektive förläggingsplats både är de som avvecklas först och de som en gång i tiden utgjort grundstommen vid etableringen av verksamheten finns ofta ett flertal kopplingar mellan de yngre reaktorerna och de äldsta. Vissa av dessa kopplingar, exempelvis styrning av ställverk, drift av avfallsanläggning och in-/utlopp för förläggingsplatsens mediaförsörjning, måste frigöras genom separationsinsatser för att de yngre reaktorerna ska kunna fortsätta sin kraftproduktion.

Anläggningsseparation utförs ur ett driftperspektiv och är därmed inte i egentlig mening en del av avvecklingen, men eftersom säkerhet och tillgänglighet hos driftsatta reaktorer har prioritet skapas ett beroende mellan avvecklingen och en genomförd anläggningsseparation. Det är därför av stor vikt att beroenden mellan anläggningar identifieras i ett tidigt skede och att anpassningar genomförs för att kunna påbörja nedmonteringen av de slutligt avställda reaktorblocken så snart tillstånden medger detta.

En tidigarelagd slutlig avställning innebär kortare tid för att separera anläggningarna inför avvecklingen, vilket riskerar att placera anläggningsseparationen på tidskritisk linje om insatser inte prioriteras. Dessbättre är antalet kopplingar mellan reaktorblocken relativt begränsade, vilket gör anläggningsseparationen hanterbar inom tiden mellan beslut om slutlig avställning och påbörjande av nedmonteringsaktiviteter. Däremot är kopplingar mellan reaktorer i ett blockpar desto fler. För att öka flexibiliteten i avvecklingen är det fördelaktigt att avveckling av reaktorer i blockpar sker sammanhållet i tid. På så vis minimeras behovet av en komplex separationsinsats och genomförandet av nedmonteringsaktiviteter vid en reaktor i nära anslutning till ett driftsatt block.

18.3.2 Förberedande åtgärder

Under avställningsdrift och en eventuell servicedrift planeras förberedande åtgärder i anläggningen för att öka säkerheten och generellt förenkla nedmontering och rivning. Dessa åtgärder består exempelvis i att dekontaminera primärsystem och att segmentera och mellanlagra reaktorns interndelar och äldre härdskrot som finns kvar sedan anläggningsdriften. Åtgärden att ta hand om interndelar har sedan tidigare bedrivits på samtliga kärnkraftverk under drift och ses som en beprövad teknik.

Möjligheterna att bedriva förberedande arbete under avvecklingens tidiga faser begränsas av det miljötillstånd som finns för verksamheten. I det fall arbetet bedöms syfta till nedmontering och rivning kan ytterligare krav tillkomma beroende på vad som görs i anläggningen, exempelvis en anmälan enligt Euratomfördragets Artikel 37.

Genom att utnyttja kyltiden för bränslet och eventuellt tillkommande ställtider som krävs för att få tillstånd för nedmontering och rivning, till att förbereda anläggningen för avveckling skapas en ökad flexibilitet för de första delprojekten/delmomenten som genomförs under nedmonterings- och rivningsfasen. Om aktivitetsnivån i anläggningens olika system kan sänkas blir den generella dosnivån lägre vilket både minskar dosen till personalen och sänker bakgrundsnivån för aktivitetsmätningar. Det senare möjliggör ett mer tillförlitligt karakteriseringsarbete i anläggningen, något som i sin tur förbättrar precisionen i planeringen av nedmonteringsaktiviteterna. I det fall ytor kan frigöras genom att exempelvis avlägsna icke-kontaminerade komponenter, såsom generatorer eller turbinsträngar i PWR, ökar möjligheten för effektiv logistik under nedmonteringsfasen vilket möjliggör snabbare framdrift i avvecklingsprojektet.

Genom att ta omhand interndelar i ett tidigt skede ges möjlighet att reaktorbasängar kan tömmas tidigare, eftersom segmenteringen sker under vatten. Därmed kan reningssystem för basängar stängas av vilket resulterar i att mindre radioaktivt avfall uppstår i form av jonbytarmassor. Detta möjliggör också att karakteriseringsarbeten relaterade till reaktorbasängar kan starta tidigare vilket minskar fortsatta risker för avvecklingsprojektet.

En ytterligare aspekt till att genomföra de förberedande åtgärderna i anslutning till avställning är att det finns goda förutsättningar för att behövlig kompetens och erfarenheter från driftperioden finns att tillgå.

I det fall förberedande åtgärder inte kan genomföras under avställnings- och/eller servicedrift kommer avvecklingsprojektet att förlängas och inte kunna genomföras lika effektivt. Därutöver riskeras onödig dos till personal i väntan på att nedmontering och rivning inleds samt att mer radioaktivt avfall kommer uppstå i och med att system behöver vara i drift under en längre period.

18.3.3 Bränsletransport

Den huvudsakliga förutsättningen för att kunna avsluta avställningsdriften är att det använda bränslet har transporterats från anläggningen. Transport av bränsle kräver dels att bränslet har klingat av till en resteffekt som värmemässigt tillåter transport i bränsletransportbehållarna, dels att transportbehållare och fartyg (m/s Sigrid) finns tillgängliga. Kyltiden för bränslet beror på utbränningen vilken i sin tur bland annat beror på antalet bränslecykler. Vissa bränsleelement kan transporteras tidigare men stora delar av bränsletransporterna kan inte påbörjas förrän 9–12 månader efter slutlig avställning. Med befintliga bränsletransportbehållare tar det mellan tre och fem månader att tömma en härd förutsatt att m/s Sigrid går skytteltrafik. Detta ger en förväntad avställningstid mellan 12 och 24 månader, där variationer kommer att uppstå bland annat beroende på reaktortyp, sluthärdens storlek, och förläggningens platsens lokalisering. Vid en planerad slutlig avställning är det även möjligt att designa sluthärden för att minimera den nödvändiga kyltiden och längden för avställningsdrift.

Reaktorer i Barsebäck och Ågesta har sedan tidigare avslutat sin avställningsdrift och är ej beroende av bränsletransporter. För O1 och O2 förväntas bränsletransporten inte utgöra något kritiskt moment med behov av åtgärder för att skapa flexibilitet, då tömningen av sluthärdarna sker i närtid med befintliga transportbehållare. För R1 och R2 skapar däremot de tidsbegränsade certifikaten för de befintliga bränsletransportbehållarna ett åtgärdsbehov då bränsletransporter från dessa anläggningar kommer att ske efter 2020 när certifikaten löpt ut. Två huvudsakliga möjligheter finns; förnyat certifikat i Frankrike för de gamla behållarna med validering i Sverige (görs av SSM), alternativt anpassa anläggningarna för hantering av de nya transportbehållarna, se avsnitt 3.4.5.

Den förordade lösningen är att söka tillstånd och dispens för att tömma sluthärdarna via de befintliga bränsletransportbehållarna för att undvika anläggningsändringar och beroenden mellan avveckling och leverans av nya transportbehållare. SKB planerar för att kunna genomföra transporter enligt denna lösning och har påbörjat en modifiering av befintliga transportbehållare för att möjliggöra en förlängning av certifikatet.

I det fall en omcertifiering eller validering av befintliga behållare inte är möjlig, kvarstår möjligheten att modifiera anläggningarna. Denna modifiering beräknas kunna genomföras under den tid som bränslet behöver för att kylas. En sådan modifiering kan därmed beslutas om fram till tidpunkten för slutlig avställning utan att påverka tiden för avvecklingen. I det fall bränslet, oavsett anledning, skulle lämna anläggningen väsentligen senare än planerat kan en förlängd avställningsdrift till viss del utnyttjas konstruktivt under förutsättning att förlängningen är känd med viss framförhållning. Avvecklingsförberedande åtgärder kan i detta fall genomföras på anläggningen vilket gör att konsekvenserna av förlängningen kan lindras.

Övriga reaktorer, med 60 års planerad drifttid, förväntas inte komma att påverkas på samma sätt då bränslehanteringen i dessa block redan under drift kommer att anpassas för det nya systemet som dessutom väntas vara fullt utbyggt och välbeprövat innan avvecklingen påbörjas.

18.3.4 Mellanlagringskapacitet i Clab

Tömningen av sluthärdarna är även beroende av mottagningskapacitet för bränsle vid Clab, se avsnitt 3.4.3. Tillståndet för Clab omfattar i dag mellanlagring av 8 000 ton bränsle, vilket enligt dagens prognoser beräknas uppnås cirka 2023, det vill säga i nära anslutning till utlastningen av sluthärdarna från R1 och R2. Under våren 2015 ansökte SKB om tillstånd att få utöka maximalt inventarium vid Clab till 11 000 ton. Avvecklingen av framförallt R1 och R2 kan bli beroende av att detta tillstånd erhålls i tid om kvarvarande plats i Clab, i det fall en utökning inte är möjlig, prioriteras för bränsle från driftsatta reaktorer, vilket skulle omöjliggöra tömning av sluthärdarna. Ett ytterligare krav som behöver tas hänsyn till vid planeringen av mottagningskapaciteten vid Clab är begränsningar i mängden bränsle som tas emot per år enligt anläggningens säkerhetsredovisning.

Arbetsbelastningen kommer att vara hög vid Clab i början av 2020-talet då många aktiviteter på anläggningen planeras att utföras samtidigt. Inlastningen av bränsle måste därför planeras nogsamt av SKB och kärnkraftsföretagen så att transporter och mottagning säkerställs. I det fall ett längre stopp i bränslemottagningen uppstår, kommer de anläggningar, som slutligt ställts av men ännu inte tömts på bränsle, att få en förlängd avställningsdrift. I likhet med diskussionen ovan kommer detta att leda till förseningar i avvecklingsprojektet.

Under 2040-talet, då de yngre reaktorerna avvecklas, antas Clab inte komma att utgöra någon begränsning. Detta beror på att bränsle kommer att börja kapslas in och transporteras till Kärnbränsleförvaret och därmed frigörs utrymme i bassängerna. Därmed kommer utrymme i bassängerna med god marginal att vara frigjort inför avvecklingarna.

18.3.5 Hantering av reaktortankar

Den enda nu kända nya avfallstyp som uppstår under avvecklingen är reaktortankar. I nuläget planeras att deponera hela reaktortankar från såväl BWR- som PWR-reaktorer. Detta kräver byggnation av en ny deponeringstunnel och ett bergrum för reaktortankar i SFR, se avsnitt 3.3.3, samt motsvarande anpassningar i SFL. För de första avvecklingsprojekten krävs därutöver mellanlagringsmöjlighet i väntan på att utbyggnaden av SFR och SFL tas i drift. Direktdeponering förväntas vara såväl dosbesparande som kostnadseffektivt för avvecklingsprojekten.

Skulle det visa sig att det finns svårigheter i att deponera hela reaktortankar, eller att det av annan anledning inte är önskvärt, kommer avvecklingsprojekten och SKB att behöva planera för ett alternativt omhändertagande. Det huvudsakliga alternativet är segmentering direkt på anläggningen följt av paketering i avfallsbehållare. Följden av segmenteringsalternativet bedöms i nuläget till att avvecklingsprojekten förlängs och att hanteringen riskerar medföra högre dos till personalen.

18.3.6 Hantering av långlivat avfall

En stor del av det långlivade avfallet från kärnkraftverken kommer att uppstå innan den planerade driftsättningen av SFL. Långlivat avfall kan inte slutkonditioneras innan slutgiltiga kravbilderna för SFL fastlagts vilket väntas kunna ske som tidigast i samband med att tillstånd om att uppföra SFL erhålls i mitten/slutet av 2030-talet. Detta innebär att de delar av avvecklingen som inbegriper genomförande av slutligt omhändertagande av det långlivade avfallet inte kommer att kunna genomföras inom ramen för de tidiga avvecklingsprojekten.

För att ändå kunna hantera det långlivade avfall som uppstår under avvecklingen så fullständigt som möjligt behöver tillräckliga planeringsförutsättningar fastläggas. Den pågående planeringen av SFL, se avsnitt 3.3.4, avser att ge tillräckliga förutsättningar för verkens avvecklingsplanering och kommer möjliggöra viss konditionering av det långlivade avfallet under avvecklingsprojekten. Mellanlagring kommer att behöva ske i avfallsbehållare utan slutkonditionering/solidifiering.

Slutkonditionering kan så småningom 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 att krävas. I flera fall kan detta lösas lokalt på anläggningen, men ett behov av en central mellanlagringsmöjlighet finns uttalat från bland annat Barsebäck. I ansökan om utbyggnaden av SFR ingår möjligheten att utnyttja de bergum som ska användas till slutförvaring av rivningsmassor från de yngre kärnkraftverken till att mellanlagra långlivat avfall från de tidiga avvecklingarna. Alternativa lösningar att mellanlagra avfall hos andra tillståndshavare utvärderas också.

18.3.7 Friklassning och hantering av mycket lågaktivt avfall

Hantering- 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 rutter för avfallet för att säkerställa fullgod och effektiv hantering. Utöver detta har internationella erfarenheter visat på att det ofta uppstår större mängder mycket lågaktivt avfall och material som behöver friklassas än beräknat, vilket ställer än högre krav på flexibilitet i hanteringen.

Exempel på bortskaffningsalternativ som är önskvärda för att skapa tillräcklig flexibilitet är: möjlighet till deponering i eget markförvar eller kontrollerad extern deponi, möjlighet att förbränna material för energiåtervinning med kontrollerad hantering av askrester, möjlighet att friklassa och återföra olika metallströmmar till samhället.

Såväl markdeponering som mer regelbunden villkorad friklassning utgör hanteringsvägar för rivningsavfall vilka ännu inte finns etablerade. Detta förutsätter en tät dialog med berörda myndigheter och övriga intressenter.

18.3.8 Resursplanering för kritiska resurser och funktioner nationellt

Det planerade genomförandet av ett flertal avvecklingsprojekt under denna Fud-period 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 koncernerna 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 entreprenörsfirmor initierats. De huvudsakliga aktiviteterna under avvecklingen vilka bedöms kräva specifika resurser är att segmentera interndelar, hantera hela reaktortankar samt nedmontera och riva biologisk skärm. Utöver dessa mer kärntekniskt avancerade avvecklingsspecifika kompetenserna kommer ett stort antal rivningsentreprenörer och strålskyddare att krävas.

För att skapa så goda förutsättningar som möjligt att erhålla nödvändiga tillstånd enligt planerna behöver lämpliga gemensamma processer utarbetas. Detta innebär att det krävs en större samordning mellan kärnkraftsföretagen i dessa frågor och att tillståndshavarna ger SSM, länsstyrelser och kommuner ett enhetligt bemötande. Det är även av vikt att avvecklingsprojekten har en tät dialog med myndigheter. I det fall översynen av kompetensbehov och kompetenstillgång utmynnar i en slutsats att projekten inte kommer att kunna genomföras enligt gällande planering, kommer åtgärder för att minska resurskonflikterna att vidtas. Detta kan till exempel innebära att arbete inom projekten sprids över längre tidsperioder eller att hela projekt/delprojekt/delmoment bordläggs till förmån för framdrift inom andra mer prioriterade verksamheter.

19 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

De avvecklingsspecifika aktiviteterna som beskrivs i föreliggande Fud-program, syftar till att bedriva utvecklingsverksamhet och vidta åtgärder som behövs för att säkert kunna avveckla de kärntekniska anläggningarna. I och med att utmaningarna inom avfallshanteringen under avvecklingen till en övervägande del är desamma som mötts under driftfasen, handlar de avvecklingsspecifika aktiviteterna till stor del om att identifiera skillnader från driften samt att på ett säkert sätt hantera de stora volymer avfall som uppstår under nedmonteringen.

I detta kapitel redovisas slutsatser från utfört utvecklingsarbete under föregående Fud-period på en övergripande nivå tillsammans med en redogörelse av vilken betydelse slutsatserna får för den vidare planeringen. Vidare presenteras det kvarvarande utvecklingsarbete som är identifierat inom avvecklingsområdet, vilket krävs för att uppnå den planering som anges i kapitel 15–17. Detta avser såväl specifika åtgärder för respektive kärnkraftsföretag som gemensamma behov.

19.1 Nuläge

Nedan presenteras den avvecklingsrelaterade utvecklingsverksamhet som pågått under den senaste Fud-perioden.

19.1.1 Industrigemensamt utvecklingsarbete

Det genomförda industrigemensamma utvecklingsarbetet presenteras nedan vilket i stor utsträckning har bedrivits av SKB gemensamt med kärnkraftsföretagen. Vissa delar beskrivs mer i detalj i del II, se hänvisningar.

Hantering av reaktortankar och stora komponenter

Flera arbeten har bedrivits för att jämföra och belysa omhändertagande av stora komponenter, så som hela reaktortankar, så att hela kedjan från nedmontering och rivning till deponering sker på ett optimalt sätt. Detta beskrivs ytterligare i avsnitt 6.4.

Mellanlager

Ett större behov av mellanlagring av kortlivat radioaktivt avfall har uppstått i och med att nedmontering och rivning planeras att starta tidigare än SFR har möjlighet att ta emot avfallet. En annan orsak är också att det befintliga SFR inte räcker till för allt driftavfall som uppstår. SKB har belyst huruvida mellanlagring med fördel sker lokalt för respektive kärnkraftverk eller om centrala lösningar är att föredra. Slutsatsen är att det är mer fördelaktigt att respektive kärnkraftverk mellanlagrar sitt avfall lokalt i stället för att detta sker centralt i SKB:s regi. Behovet av och möjligheterna till mellanlagring beskrivs ytterligare i avsnitt 3.3.3.

Markförvar

Inom området markförvar och omhändertagande av mycket lågaktivt avfall har arbete utförts vilket beskrivs i avsnitt 3.3.3. Bland annat har SKB utrett om det prognostiserade rivningsavfallet till det utbyggda SFR skulle kunna tas omhand på något annat sätt, exempelvis i markförvar. Resultat visar att SFR är det rekommenderade alternativet.

Friklassning

Friklassning har stor betydelse för hur avvecklingen planeras och genomförs vilket har varit drivande till att SKB tillsammans med kärnkraftsföretagen och övriga tillståndshavare tagit fram en handbok för friklassning vid nedmontering och rivning (Berglund et al. 2016). Detta arbete har även delgetts SSM och kommer ligga till grund för kärnkraftsföretagens vidare planering för friklassning inom avveckling.

Avfallsbehållare

Arbete har bedrivits för att utveckla avfallsbehållare och tillhörande transportbehållare för att möjliggöra en optimal hantering av avfallet under nedmontering och rivning. Detta arbete beskrivs i avsnitt 6.5.

Struktur avvecklingsplan

SKB har tillsammans med kärnkraftsföretagen tagit fram en gemensam struktur för redovisning av avvecklingsplaner (Calderon 2014b). Syftet är att stödja tillståndshavarna i framtagandet av avvecklingsplaner enligt kraven i SSMFS 2008:1. Denna struktur ligger till grund för de avvecklingsplaner som uppdateras under perioden av respektive tillståndshavare och visar på en samsyn och enhetlig redovisning samt tolkning av krav. Detta underlättar även för SSM att utöva sitt arbete som tillsynsmyndighet.

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. Några av de avvecklingsaspekter som OECD/NEA har arbetat med under perioden är radiologisk kartläggning och karakterisering, kunskap och erfarenheter kring återställning av kärntekniska anläggningar samt omhändertagande av mark och grundvatten som har kontaminerats. Ett annat fokusområde har varit förberedelser inför avveckling som sker under drift och efter avställning för att uppnå optimala projekt.

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.

Pilotstudie inom Energiforsk

En pilotstudie, Nuclear Decommissioning – A feasibility study of potential R&D initiatives for Energiforsk's nuclear programme, har genomförts med syfte att kartlägga kärnkraftsindustrins och dess huvudintressenters önskemål gällande förberedande utveckling inför att ett kärnkraftverk nedmonteras och rivs (Fors 2015). Fokus låg på att identifiera och definiera det arbete som lämpar sig för Energiforsks kärnkraftsprogram.

De tre områdena Energiforsk rekommenderas att utveckla är: Lärdomar och erfarenheter, logistik, samt konventionell avfallshantering. Till följd av bland annat den organisatoriska omställningen inom Vattenfall i och med skapandet av BU-ND och till följd av de tidigarelagda avvecklingsprojekten för R1 och R2 har fortsatt arbete inom ramen för Energiforsk pausats tills vidare. Pilotstudiens resultat ger dock en värdefull grund till projektplaneringen tack vare att den konkretiserat delar av det arbete som kommer att behöva genomföras.

19.1.2 Utvecklingsarbete inom Uniper

Barsebäck Kraft AB

BKAB har genom erfarenhetsutbyte tagit fram en övergripande plan för avvecklingen. Faserna i planen bygger på att det radioaktiva avfallet avlägsnas från anläggningen med tågordningen högaktivt till lågaktivt, det vill säga bränsle, sonder, styrstavar, interndelar och till slut lågaktivt avfall. I kombination med en systemdekontaminering av primärsystemen har det resulterat i huvudsak lågaktivt avfall under själva nedmonteringen och rivningen. Inriktningen ger lägre dos och mindre radiologiska risker för personalen.

Följande studier/uppdrag har genomförts: Rivning och demontering av hel reaktortank, segmentering av reaktortank och interndelar, aktivitetsinventarium vid rivning av Barsebäck 1 och 2, kartläggning och kategorisering av anläggning och omgivning avseende radioaktiv kontamination, omhändertagande av stora komponenter, dekontaminering av byggnadsstrukturer, rivning av samtliga byggnader, rivnings- och avfallslogistik samt 3D-modell över anläggningen.

OKG Aktiebolag

Under 2014 genomfördes projekt ProAct för att förbereda de tillstånd som krävs enligt miljöbalken och kärntekniklagen för att på ett planerat och kostnadseffektivt sätt försätta Oskarshamn 1 i servicedrift.

Projektet omfattade följande delområden:

- Miljökonsekvensbeskrivning (MKB).
- Säkerhetsredovisning (SAR/STF).
- Avvecklingsplan.
- Separation O1/O2 (tekniska åtgärder).
- Kompetens, bemanning, organisation och kommunikation (åtgärder i organisation och verksamhet).

Med anledning av beslutet att stänga Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 i förtid startades under 2015 projektet Decommissioning Preparation Project, DPP. Projektets syfte var att skapa förutsättningar för implementering av en ny avdelning för avvecklingsverksamheten på OKG, samt anpassa lednings-systemet för denna. Projektets uppgift var även att identifiera och arbeta med kritiska aktiviteter kopplade till avvecklingen av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2, där arbete måste ske omgående för att inte försena kommande aktiviteter. Den nya avdelningen med ansvar för avvecklingen implementerades under augusti 2016 och överlämning av projekt DPP:s uppgifter fortgår under hösten 2016.

19.1.3 Utvecklingsarbete inom Vattenfall

Principer för organisation och styrning av avvecklingsprojekt

Som ett led i att utveckla Vattenfalls avvecklingsverksamhet initierades ett projekt för att utarbeta en övergripande strategi över hur Vattenfallkoncernens svenska avvecklingsprojekt skulle styras och organiseras. Projektet, som gick under namnet Principer för organisation och styrning av avvecklingsprojekt inom Vattenfall, identifierade, baserat på nationella och internationella erfarenheter, två grundläggande principer för framgångsrik kärnkraftsavveckling:

1. Separera avveckling från drift organisatoriskt på koncernnivå.
2. Samla kompetensen på koncernnivå inom en ny avvecklingsorganisation.

Rekommendationen från projektet blev därför att Vattenfalls organisatoriska upplägg kring avveckling skulle inriktas mot det som inom projektet benämndes ”Fall 1”: Avvecklingsorganisation som tillståndshavare. Ett inriktningsbeslut fattades under senhösten 2014. Den nya inriktningen ligger sedan dess till grund för såväl uppbyggnad av den nya organisationsdelen BU-ND som för befintlig avvecklingsplanering.

Projekt AVANS

Projekt AVANS (Avvecklingsplanering inom Vattenfalls kärnkraftsverksamhet i Sverige) startades under våren 2015 för att ta fram en verksamhetsplan för en organisation att utföra avvecklingar av de äldsta reaktorerna inom Vattenfall och etablera en plattform för framtida avvecklingar. Syftet var att skapa goda förutsättningar för avvecklingsorganisationens fortsatta verksamhet och minimera risken för fördringar av avvecklingskostnaderna.

Projekt AVANS har fokuserat på övergripande strategiska aspekter av avveckling, och på att identifiera kritiska frågor som måste lösas för att möjliggöra en säker, optimerad och effektiv avveckling. Projektets arbete har delats upp i ett antal delprojekt för att hantera områden såsom tillstånd, organisation och avfallshantering. Delprojektens slutsatser bidrog till en samlad bedömning kring kritiska aspekter

som behöver beaktas och omhändertas i den fortsatta avvecklingsplaneringen för Vattenfalls kärnkrafts-anläggningar. Utfallet från AVANS-projektet är bland annat det planerade koncept för avvecklings-genomförande som presenteras i avsnitt 16.1 och som i dag ligger till grund för all avvecklingsplanering inom koncernen.

Avvecklingsplanering i 4D

Ett projekt om avvecklingsplanering i 4D har genomförts med syfte att undersöka möjligheterna att använda planering i program med 3D-modeller där visualisering av dos och arbetsmoment är möjlig med simulering över tid. Resultaten visar på en stor potential för denna typ av planering, men att marknaden inte är mogen utan kräver vidare teknikutveckling. Eftersom de första avvecklingsprojekten inom Vattenfall sker i närtid finns inte tid för denna utveckling i dagsläget utan bör tas fram på sikt. För närliggande projekt i tiden bör nuvarande utbud och kunskapsläge gällande 3D och 4D tillämpas.

Ringhals 50-grupp

I samband med slutförandet av Ringhals rivningsstudie (Hansson et al. 2013) initierades en tvär-funktionell arbetsgrupp kallad Ringhals 50-grupp, med representanter från bland annat ledning, HR, ekonomi, teknik, drift och kommunikation på Ringhals. Då avvecklingen ännu låg mer än tio år framåt i tiden täckte de befintliga verksamhetsplanerna inte in avvecklingsaspekter vilket riskerade att leda till suboptimerade insatser i verksamheten. Syftet med arbetsgruppen var därför att förbereda organisationen på den kommande avvecklingen. Arbetet var proaktivt och ämnade till att på bred front börja beakta avvecklingen inom samtliga verksamheter.

Resultatet av arbetet i 50-gruppen var bland annat en personalplan, en grov skiss över hur kopplingar och beroenden mellan blockparen ser ut samt internkommunikation kring avvecklingsplanen och rivningsstudien. I samband med tidigareläggandet av avvecklingen för Ringhals 1 och Ringhals 2 upphörde gruppen att verka då arbetsuppgifterna övergick till projekt STURE.

Projekt STURE

I samband med avställningsbeslutet för Ringhals 1 och 2 startades projekt STURE (Säker och Trygg Utfasning av Reaktor 1 och 2). Projektet 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. Frånsett fysiska separeringsåtgärder driver STURE även den tillståndsprocess som krävs för att kunna ställa av Ringhals 1 och Ringhals 2. Därutöver omfattar projektet även organisatoriska och ekonomiska aspekter av avvecklingsbeslutet. Projektet pågår och kommer att vara hemvisten för all avvecklings-planering vid Ringhals under denna Fud-period.

19.2 Program

Nedan presenteras kommande aktiviteter med fokus på arbete under den närmaste sexårsperioden. Avsnittet har delats upp på industrigemensam utveckling under avsnitten 19.2.1 till 19.2.2, och concernintern utveckling under avsnitten 19.2.3 till 19.2.4.

19.2.1 Industrigemensamt utvecklingsarbete kring avfall och slutförvaring

Kärnkraftsavvecklingens påverkan på slutförvarssystemets utformning beskrivs nedan med fokus på det arbete som krävs för att möjliggöra avveckling i linje med befintliga planer.

Mellanlagring av långlivat avfall

För att kunna friklassa Barsebäcksverket efter genomförd avveckling finns ett intresse av att undvika långtidslagring av radioaktivt avfall på anläggningen. När SFR tagits i drift efter utbyggnaden planeras för möjligheten att mellanlagra långlivat avfall därtill dess att SFL öppnas. Behovet av att mellanlagra långlivat avfall i SFR uppkommer därmed som en direkt följd av att anläggningar avvecklas. Utvecklingsarbetet som krävs för att möjliggöra mellanlagringen utgör en del av utbyggnaden av SFR, se avsnitt 3.3.4.

Konditionering av långlivat avfall

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, se avsnitt 6.3.

Hantering av reaktortankar och stora komponenter

Ett unikt avfallskolli som kommer att uppstå under avvecklingen av anläggningarna är reaktortankar. I både BWR- och PWR-fallet planeras för närvarande för direktdeponering av tankarna som eget kolli. Frågeställningar kring BWR-reaktortankar hanteras inom ramen för utbyggnaden av SFR, där befintliga ansökningshandlingar inkluderar heltanksdeponering, se avsnitt 6.4. En jämförande analys mellan olika hanteringsalternativ för PWR-reaktortankar genomförs gemensamt av SKB och Vattenfall, se avsnitt 6.4.

En del av frågeställningen kring deponering av hela reaktortankar är huruvida det kommer att vara möjligt och önskvärt att samdeponera interndelar på plats i tanken. Frågeställningen kommer att utredas av SKB och tillståndshavarna.

Att kunna hantera visst radioaktivt avfall som större komponenter vid ett avvecklingsprojekt kan innebära fördelar ur ett dos- och kostnadsperspektiv. Detta kräver dock att hela hanteringskedjan för komponenterna anpassas för detta. I analogi med hanteringen av hela reaktortankar ovan finns ett intresse i att undersöka möjligheterna för direktdeponering av andra större komponenter. Programmet för detta redovisas under avsnitt 6.4.

Utveckling av betongkonstruktioner och material till SFL

Det framtida SFL kommer att slutförvara två skilda typer av långlivat material: för det första aktiverade metallkomponenter från kärnkraftverken; och för det andra historiskt avfall kontaminerat med långlivat material. Den första avfallstypen uppstår till viss del redan under driften av anläggningarna vid exempelvis utbyte av BWR-styrstavar och hårdnåra interndelar i reaktorerna, men majoriteten av avfallet kommer att uppstå då anläggningarna avvecklas. Den del av SFL som byggs för att slutförvara aktiverade hårdkomponenter från kärnkraftverken är därmed tydligt associerad till avvecklingen. Förvarsdelen kommer enligt nuvarande koncept att utgöras av ett bergrum där betong utgör den huvudsakliga barriären. Konceptet och förvaret kommer att utvecklas vidare inom ramen för det arbete som beskrivs i se avsnitt 9.3.

Metodutveckling för svärmätbara nuklider

Såväl vidareutvecklingen av beräkningsmodellen för de svärmätbara nukliderna molybden-93, teknetium-99, jod-129 och cesium-135 som frågeställningen kring relativ ackumulation av långlivade nuklider på systemytor med aktivitetsuppbyggnad under långa tidsperioder, kommer att ha implikationer för avvecklingsplaneringen, se avsnitt 6.1.2. Metodutvecklingen för svärmätbara nuklider kommer därmed att bevakas ur ett avvecklingsperspektiv.

Mycket lågaktivt avfall

Hantering av mycket lågaktivt avfall utgör en utmaning under avvecklingen. Avfallsströmmen är skiftande i sin karaktär och olika insatser kommer att krävas för att optimera hantering och slutdestination. En viktig del utgörs av att säkra bortskaffningen av avfallet, där deponering i SFR utgör en möjlighet. Utvecklingsarbetet som krävs för att möjliggöra slutförvaringen utgör en del av utbyggnaden av SFR (se avsnitt 3.3.3).

Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

Två- och/eller fyrkokill kan erbjuda effektiv hantering och flexibilitet för konditionering av rivningsavfall genom att större avfall kan packas i dem. Arbetet med att realisera dessa genom att ta fram tillverkningsunderlag och fortsatt utreda dess förutsättningar fortsätter i regi av SKB, se avsnitt 6.5.2.

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 6.5.3

Om nya avfallsbehållare utvecklas kommer även motsvarande transportbehållare att behöva utvecklas. För två- och fyrkokill inkluderas arbetet med att ta fram en anpassad avfallstransportbehållare, se avsnitt 6.5.3.

Lcke-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. Ett projekt med målsättningen att omhänderta allt skadat bränsle vid anläggningarna har startat och kommer att avslutas under Fud-perioden, se avsnitt 7.1.

19.2.2 Övrig industrigemensam utveckling

Nedan presenteras det industrigemensamma utvecklingsarbete som behövs inför avvecklingarna, men som inte är direkt förknippat med SKB:s transport- och slutförvarssystem. Arbetet kan komma att koordineras av SKB, men är inte uteslutande bundet att göra så i det fall kärnkraftsföretagen föredrar en annan samarbetsform.

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. Arbeta med att utveckla en mer harmoniserad tillståndsprocess kommer att bedrivas under denna Fud-period.

IT-stöd för avfallsdokumentation

Under hela livscykeln för en kärnteknisk anläggning är det av vikt, och kravställt, att inneha ett register över avfallet som uppkommit på anläggningen. I kommande planering och projektering behöver registreringen ses över gällande radioaktivt avfall som uppstår under nedmontering och rivning. Det behöver säkerställas hur avfallsdata förs över från tillståndshavarna till SKB och de slutförvar där deponering sker samt vilka system som ska ge stöd för detta. Arbetet är industrigemensamt men kommer att koordineras av SKB.

19.2.3 Utvecklingsbehov inom Uniper

Barsebäck Kraft AB

Pågående studier/uppdrag handlar om att fastställa kravbilderna för rivning.

Planerade studier är rivningsförberedelser avseende servicesystem vid rivning samt dekontaminering av rör och tankar i avfallsanläggningen.

OKG Aktiebolag

Med anledning av den tidigare lagda avvecklingen av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 pågår ett intensivt planeringsarbete på OKG, detta gäller även planeringen av OKG:s utvecklingsarbete kopplat till avveckling. Arbetet går till stora delar ut på att identifiera det utredningsbehov som föreligger för avvecklingen samt klarställa sekvensen för dessa utredningar. Detta görs baserat på nationella och internationella erfarenheter samt OKG:s egna erfarenheter från driftperioden.

OKG har i sin övergripande avvecklingsstrategi bland annat identifierat följande områden där behov av utredningar och analys föreligger:

- Avfallsstrategi.
- Nedmonterings- och rivningsstrategi.
- Organisations- och kompetensstrategi.
- Anläggnings- och produktionsstrategi.
- Radiologisk strategi.
- Affärs- och inköpsstrategi.

Inom vissa områden har utredningsarbetet redan påbörjats, det pågår exempelvis strategiska utredningar avseende avfallshantering samt nedmonterings- och rivningssekvenser. I det kommande arbetet planeras även för vidare utredningar inom till exempel avfalls- och rivningslogistik samt radiologisk kartläggning och kategorisering av anläggningarna.

19.2.4 Utvecklingsbehov inom Vattenfall

En stor del av utvecklingsarbetet inom Vattenfallkoncernen kommer att genomföras som en del av projektarbetet för avvecklingen av Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågesta. Inom de kommande tre åren kommer arbetet inom analysfas, planeringsfas och merparten av etableringsfas att genomföras för dessa projekt. Detta innebär mer specifikt att ta fram och analysera underlag och projektförutsättningar för att utveckla koncept, sekvens och detaljerad tidsplan för nedmontering och rivning samt transport och avfallshantering med erforderlig dokumentation och tillstånd.

Under den efterföljande treårsperioden kommer projekten att gå in i nedmonterings- och rivningsfasen. Nedan beskrivs mer specifikt vilka områden som ska utredas vidare gällande själva genomförandet av nedmontering och rivning samt avfallshantering.

Förutom det mer rutinmässiga projektarbetet kommer under de kommande åren även mer övergripande frågor utredas inom Vattenfall, dessa beskrivs under rubriken Optimerad avveckling i slutet av avsnittet.

Avvecklingskoncept och genomförande

Vid utarbetande av en sekvens för nedmonterings- och rivningsaktiviteter finns flera tänkbara tillvägagångssätt att utvärdera. Antingen kan de mest radioaktiva delarna demonteras först för att så snabbt som möjligt få ner stråldoserna i anläggningen eller så kan de minst kontaminerade delarna demonteras först. Fördelen är då att minska risken för korskontamination och dessutom underlättas arbetet med de mer radioaktiva delarna genom att utrymme frigörs. Ett annat exempel är valet huruvida anläggningsdelar ska demonteras ur ett tillgänglighetsperspektiv för att förenkla logistik (utifrån och in) eller om system ska demonteras nerifrån och upp för att minimera fallrisker. Även val av tekniker såsom när mekaniska eller termiska metoder lämpar sig bäst behöver analyseras. Vilka alternativ som är mest fördelaktiga avses utredas ur dos- och skyddssynpunkt samt vad som är mest optimalt för minimering av projektrisker och avfallsgenerering.

En grundläggande ingångsparameter för planeringen och genomförandet av avvecklingen är att via kartläggning och karakterisering skaffa sig nödvändig kännedom om förekomsten av radioaktiva ämnen i anläggningen. Under Fud-perioden kommer kartläggnings- och karakteriseringsarbetet utredas så att detta genomförs på ett optimalt vis utifrån ställda krav och hur avvecklingen planeras.

Avfallshantering

Alternativa tillvägagångssätt kring avfallshantering vilka behöver utredas är exempelvis huruvida avfallet redan vid källan bör kapas för att passa i avfallskollin, eller om anläggningen ska nedmonteras i så stora segment som möjligt för att maximera framdriften i nedmonteringen varefter avfallskonditionering sker på en central plats. En optimering av avvecklingsprojektet med avseende på avfallsets konditioneringsmöjligheter, logistikoptimering och dosbelastning kommer att genomföras.

Vid dimensionering av avfallshanteringen behöver även förhållandet mellan installerad processkapacitet och etablerad buffert- och lagringskapacitet utvärderas. Denna optimering, som kommer att genomföras under Fud-perioden, kommer att bli en avvägning mellan en avfallsorienterad avvecklingsprocess, vilken riskerar att påverka nedmonteringsaktiviteterna, och en nedmonteringsorienterad process, där avfallshanteringen riskerar att bli en begränsning.

Hantering av avfall som kontaminationsmässigt befinner sig i gränslandet mellan mycket lågaktivt avfall och friklassningsbart utgör en utmaning då insatserna för att bevisa tillhörigheten till endera av kategorierna riskerar att bli mycket omfattande till följd av den låga kontaminationsnivån. För att optimera avfallshanteringen kommer Vattenfall att utreda när olika alternativ som villkorad friklassning, återvinning eller deponering är fördelaktig ur miljö-, dosbelastnings- och ekonomisk synvinkel.

Optimerad avveckling

Inom BU-ND planeras arbete pågå under denna Fud-period för att organisera, styra och optimera Vattenfallkoncernens avvecklingsverksamhet. I huvudsak kommer arbetet att fokuseras till följande områden:

- **Organisation och styrning:** Som en fortsättning på de projekt som genomförts inom Vattenfall under 2014 och 2015 gällande organisation och styrning, se avsnitt 19.1.3, kommer ytterligare arbete att bedrivas för att ta fram en modell för avvecklingsprojektens organisatoriska upplägg.
- **Interna kompetenser och numerärer:** Som ett led i att tillse 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. Planen ska identifiera eventuella gap och aktiviteter som behöver initieras för att överbygga eventuella gap. Arbetet är påbörjat och kommer att fortgå under denna Fud-period.
- **Leverantörsmarknad:** För att stimulera en mogen leverantörsmarknad med tillräckliga resurser och kapaciteter för att kunna genomföra det praktiska nedmonterings- och rivningsarbete som planeras bli utlagt på entreprenad, kommer en plan över stimuleringsinsatser att tas fram och realiseras under denna Fud-period.
- **Inköpskoncept:** Till följd av avvecklingsprojektens stora beroende av effektiv upphandling kommer en strategi för upphandlingar att utarbetas. Strategin kommer att omsättas till en plan i vilken bland annat möjligheterna med, och potential hos, en central funktion för inköp, utvärdering och erfarenhetsuppbyggnad gällande entreprenörer kommer att utvärderas.
- **Kostnadskalkyl:** Med målsättningen att utarbeta en projektorienterad kostnadskalkyl som lämpar sig som underlag inför, och uppföljning av, avvecklingsprojekt och dess ingående moment har ett utvecklingsarbete inom området initierats och kommer vidareutvecklas under kommande Fud-perioder.

Del IV

Övriga frågor

- 20 Bevarande av information och kunskap genom generationer
- 21 Deponering i djupa borrhål

20 Bevarande av information och kunskap genom generationer

I sitt dagliga arbete och fram till förslutningen av slutförvaren, förvaltar och bevarar SKB dokument, data och information på lång sikt i enlighet med krav från SSM och riksarkivet. I dessa krav innebär lång sikt, längre än 25 år. När SKB:s verksamhet upphör ska arkiven, ordnade och förtecknade, överlämnas till Riks- eller landsarkiv enligt SSM:s föreskrift.

SKB har även arbetat med frågeställningar kring arkivering och informationsbevarande på lång sikt, flera generationer framåt, i många år. I samråden inför ansökningarna för inkapslingsanläggningen och slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle togs återkommande frågor upp om bevarande av informationen och kunskapen om Kärnbränsleförvaret och vem som har ansvaret för det efter förslutningen. I remissförfarandet av ansökan om KBS-3-systemet enligt miljöbalken, har det också framkommit 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 Kärnbränsleförvaret ska förslutas, 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 så långt in i framtiden.

Det strukturerade arbetssätt som SKB bedriver i dag vad gäller förvaltning och bevarande av dokument, data och information är en värdefull plattform för den framtida bedömningen och valet av vilken information som behöver bevaras. SKB menar att den enda meningsfulla handlingsplanen är att ha ett arbetssätt som syftar till att hålla frågan levande, utveckla arbetet och sprida kunskapen om behovet. En förutsättning för att lyckas är ett intresse och engagemang från flera samhällssektorer.

20.1 Genomfört arbete

SKB har haft ett flerårigt samarbete med Linnéuniversitet, som studerat områdena:

- Den mänskliga utvecklingen och långsiktig framtid.
- Historiskt medvetande och lärande om framtiden.
- Föreställningen om framtiden inom kulturarvssektorn och hantering av radioaktivt avfall.

Denna del av samarbetet avslutades 2015 och det huvudsakliga resultatet är att genom att delta i konferenser och publicera artiklar, har frågan hur man kan bevara informationen och kunskapen om ett slutförvar för radioaktivt avfall blivit introducerad för sektorer i samhället som sysslar med bevarandefrågor (Holtorf 2013, Holtorf och Högberg 2013, 2014, 2015a, b). Erfarenheterna från arbetet visar bland annat att de institutioner som arbetar med att bevara föremål och kultur för ”framtidens” oftast inte har någon bild av hur framtiden kan se ut och vad den kan ha intresse av. Det är viktigt att skapa ett levande arv som även fortsatt kommer anses värdefullt att bevara.

Vidare har en forskare vid Centrum för teologi och religionsvetenskap på Lunds universitet på SKB:s uppdrag publicerat två artiklar kring svårigheterna med att överföra information om det farliga kärnavfallet i skrift (Wikander 2015a, b). Där pekas bland annat på att en avgörande faktor för om språk kan förstås är hur många skrifter som finns bevarade och hur de ser ut. Språk som har ett släktskap med andra är lättare att tolka än isolerade språk. Historien visar dessutom att risken för att bli missförstådd är betydande. Wikander målar upp ett scenario där en extremt avancerad framtid underskattar oss och tror att vi var primitiva grottmänniskor som aldrig kan ha behärskat kärnkraftstekniken. För att sätta sig in i problematiken menar han att vi måste försöka föreställa oss vad människor i framtiden kommer att tänka om oss – och vårt språk.

20.2 Pågående och kommande arbete

SKB deltar i de internationella projekten Records, Knowledge and Memory across Generations och Assembling Alternative Futures for Heritage, vilka presenteras i avsnitt 20.2.1 respektive 20.2.2. Dessutom har SKB ett samarbete med sin franska motsvarighet, Andra, om informationsbevarande. Andra har ett omfattande program för de närmaste åren, som bland annat handlar om arkeologi i landskapet, institutionella organisationers kontinuitet och konsekvenserna av sociala haverier (krig, naturkatastrofer etc).

20.2.1 Records, Knowledge and Memory across Generations

Sedan 2011 deltar SKB i OECD/NEA:s arbetsgrupp för frågor om hur man kan bevara information och kunskap om slutförvar för radioaktivt avfall genom generationer (Records, Knowledge and Memory across Generations, RK&M). Fas I avslutades 2014 med en internationell konferens i Verdun där det bland annat kunde konstateras att det finns ett stort intresse för frågan även utanför den delen av samhället som direkt arbetar med hanteringen av radioaktivt avfall. Det presenterades många förslag och tankar kring bevarande av information och kunskap under lång tid. Konferensen var indelad i tre delar efter vilket tidsperspektiv man lägger på frågan; kort sikt (medan slutförvaret är i drift), medellång sikt (den period efter förslutning som samhället kan antas utöva någon form av övervakning) eller lång sikt (för Kärnbränsleförvaret flera tusen år). Det är samma tidsperspektiv som används i OECD/NEA:s arbetsgrupp.

Arbetet i fas II pågår och beräknas att avslutas i april 2018. Målet är att presentera en form av ”verktygs-låda” och en internationell samsyn på förslag på vilka ”verktyg” man kan använda för att efter bästa förmåga bevara dokument, information och kunskap om slutförvar med radioaktivt avfall med de olika tidsperspektiven. 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 central fråga är vilken typ av data och information som bör sparas med de olika tidsperspektiven. SKB är engagerat i ett praktiskt försök att ta fram en gemensam struktur för en kort aggregerad beskrivning, cirka 40 sidor – Key Information File av ett slutförvar. Målgruppen är framtida lekmän. Beskrivningen ska till exempel innehålla lokaliseringen av slutförvaret, innehållet, dess egenskaper och en sammanfattning av analysen av säkerheten efter förslutning. Den ska också ge en beskrivning av radioaktivitet och kärnkraftverk och i vilket sammanhang de använts. Frankrike, USA och Sverige ska presentera konkreta dokument som beskriver det franska markförlagda slutförvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall (Centre de stockage de la Manche) som stängdes 1994, det svenska Kärnbränsleförvaret respektive det amerikanska WIPP. Underlaget för beskrivningen av Kärnbränsleförvaret utgörs av ansökningarna enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen.

SKB deltar också i ett annat OECD/NEA-projekt, Radioactive Waste Repository Metadata Management (RepMet), som syftar till att ta fram en gemensam syn på vilka metadata som bör sparas.

20.2.2 Assembling Alternative Futures for Heritage

Assembling Alternative Futures for Heritage (AAFH) – Sammanföra alternativa framtider som kulturarv är ett tvärvetenskapligt forskningsprogram som syftar till att utveckla ett brett, internationellt och sektorsövergripande ramverk för att förstå ”arv” i sin mest expansiva mening. AAFH är ett samarbete mellan University College London, University of Exeter, University of York och Linnéuniversitetet i Kalmar. Programmet startade våren 2015 och är beräknat att pågå i fyra år. SKB är inbjudet att delta som en följd av det samarbete vi tidigare haft med Linnéuniversitetet.

Även om arv kan tyckas vara strikt definierat, är det möjligt att hävda att alla samhällsfunktioner som i praktiken arbetar med frågor kring framtiden eller frågor som involverar det förflutna, kan anses ägna sig åt någon form av kulturarv. Forskningsprogrammets inriktning är att övergripande utforska olika praxis för arv, både med ett kritiskt och ett jämförande perspektiv, för att förbättra den akademiska förståelsen för de sociala, kulturella, materiella, ekologiska, politiska och ideologiska sammanhang i vilket ”arv” förmedlas. På så sätt syftar programmet till att underlätta en mer demokratisk och informerande dialog om kulturarv, mellan olika samhällsfunktioner och företag och

deras målgrupper samt att bidra till utvecklingen av ny politik som främjar mer innovativa, gemensamma, motståndskraftiga och hållbara strategier för att bevara kulturarvet. Arbetet kommer att involvera akademiker inom olika discipliner inom konst, humaniora, samhällsvetenskap och naturvetenskap, bland annat antropologi, arkeologi, miljövetenskap, kulturgeografi, historia, kreativ konst och ekologiska humaniora.

Forskningsprogrammet är indelat i fyra teman:

- Förberedelse inför osäkra framtider.
- Förvaltning i gränslandet mellan natur och kultur.
- Förvaltning av överflöd.
- Bevarande av mångfalden.

SKB kommer som industripartner framför allt att vara engagerat i temat Förberedelse inför en osäker framtid tillsammans med One Earth – New Horizons Message project. New Horizons är en obemannad rymdsond som NASA sändt iväg mot Pluto för att fotografera och samla information. Resan startade i januari 2006 och sonden nådde Pluto i juli 2015. Efter att uppdraget är fullgjort och all insamlad information är skickad till NASA är det meningen att ett budskap från jorden ska läggas på datorerna. Rymdsonden kommer att fortsätta sin färd genom rymden i evighet, eller tills någon/något hittar den.

Beröringspunkten med meddelandet på New Horizons är att det finns samma osäkerhet vad gäller format och innehåll i ett budskap till en okänd mottagare. Hur gör man budskapet hållbart och begripligt?

Den första workshopen för forskningsprogrammet hölls i Sverige i mars 2016 och tog bland annat upp följande frågeställningar:

- Hur bidrar namngivningen av platser (arkiv, museer, djurparker, botaniska trädgårdar, ”platser”, landskap, slutförvar för radioaktivt avfall, med mera) till det sätt på vilket de förstås och värderas?
- Hur kan de olika arkitektoniska och tekniska formerna inom de olika områden forskningsprogrammet omfattar, påverka varandra?
- Vilka olika former finns tillgängliga för bevarande ex-situ och hur relaterar dessa till de olika metoder och processer som genomförs inom dem?
- Vilka olika konsekvenser blir det vid bevarande ex-situ respektive in-situ?

SKB:s deltagande var ett första tillfälle att få direkt kontakt med personer, som på ett eller annat sätt har som profession att arbeta med bevarande av föremål och kunskap samt ta del av deras erfarenheter och kunskap ställt i relation till frågan om hur man kan bevara information och kunskap om ett slutförvar för radioaktivt avfall.

21 Deponering i djupa borrhål

Vid deponering i djupa borrhål är den viktigaste säkerhetsfunktionen den isolering och fördröjning av radioaktiva ämnen som berget erbjuder, vilket i stor utsträckning bygger på att grundvattnet antas vara stagnant på stora djup. En viktig anledning till de stagnanta förhållandena är att grundvattnet har hög salthalt, och därmed också hög densitet, vilket ger en stabil skiktning som motverkar omblandning med det lättare sötvattnet som ligger ovanför.

Deponeringen i djupa borrhål har några potentiella fördelar. Deponeringen sker på stort djup, vilket innebär långt avstånd och troligen även lågt grundvattenflöde upp till markytan för radionuklider som sprids från närområdet till vattnet i berget. Detta kan i sin tur innebära långa transporttider till biosfären såvida inte snabba transportvägar skapats via deponeringshålet eller via zoner i berget kombinerat med drivkrafter på grund av till exempel gasutveckling.

Sannolikheten för oavsiktligt intrång är också lägre vid deponering i djupa borrhål på grund av det större djupet, vilket leder till lägre risk för att man i framtiden till exempel oavsiktligt borrar sig in i deponeringsområdet. Vidare blir avfallet/bränslet svårare att återta i illvilligt syfte på grund av det stora djupet.

Det stora djupet medför dock även nackdelar såsom svårigheter med att karakterisera omgivande berg, ökad risk för missöden vid deponeringen och återtag i vällovligt syfte.

21.1 Nuläge

21.1.1 Genomföra deponering

Konceptet deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål innebär typiskt att stålkapslar med använt kärnbränsle (1 PWR- alternativt 2 BWR-element per kapsel) placeras i borrhål på 3–5 kilometers djup. Detta förutsätter en borrhålsdiameter av åtminstone 44,5 cm på förvarsdjup. Cirka 80 deponeringshål av denna typ skulle krävas för att rymma det använda bränslet från de svenska kärnkraftverken förutsatt att 400 kapslar placeras i varje hål. Med tanke på värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet bör borrhålen förläggas med cirka 100 meters inbördes avstånd (Marsic och Grundfelt 2013). Den övre delen av borrhålen försluts. Konceptet beskrivs utförligare i SKB (2014i) och baseras bland annat på arbeten som utförts av Sandia National Laboratories, ett av USA:s energidepartements laboratorier, under 2009 och 2011 (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2011).

En möjlig principutförande av en anläggning för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål med 80 borrhål visas i figur 21-1.

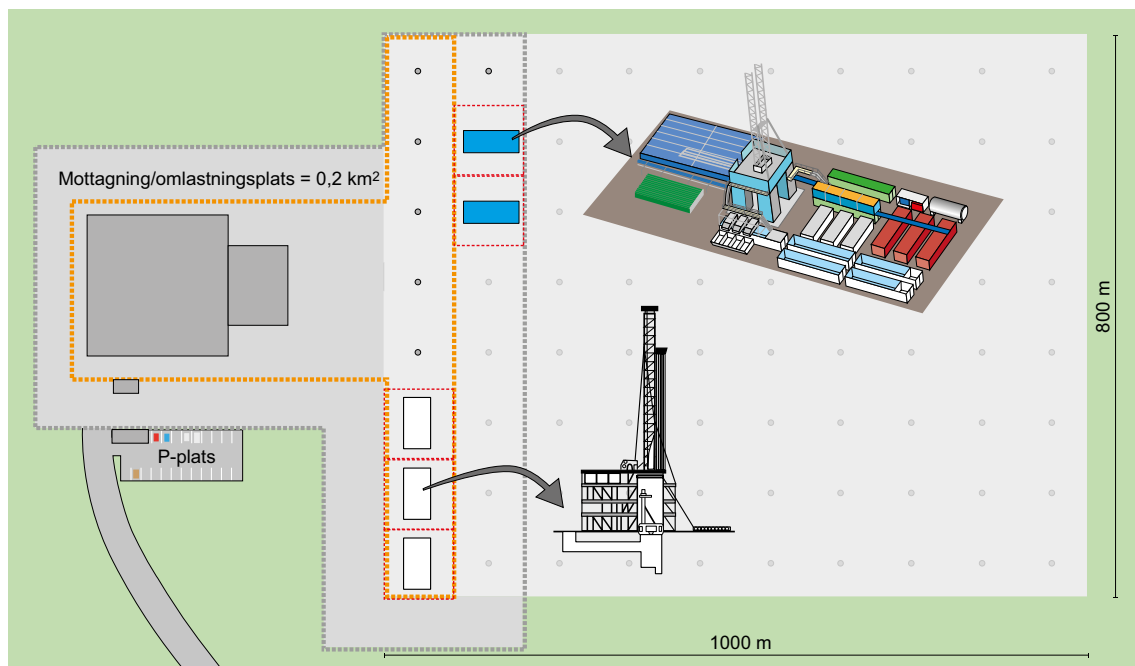
Vid deponering i djupa borrhål kan missöden inträffa med konsekvenser som blir svåra att åtgärda. Exempelvis kan en kapsel fastna i hålet och gå sönder innan den har nått deponeringsdjup. En otät kapsel skulle kunna fastna i ett läge med strömmande grundvatten, utan att vara omgiven av en skyddande buffert med risk för kontaminering av borrhålsvätska och verktyg som används för att återställa situationen (Grundfelt 2013). Sannolikheten för en olycka med aktivitetsutsläpp i samband med deponering av 400 kapslar i ett borrhål har beräknats till mellan 1×10^{-4} och 7×10^{-3} beroende på deponeringsteknik (Hardin et al. 2016).

21.1.2 Förvarets utveckling efter förslutning

I figur 21-2 visas schematiskt aktivitetsutsläpp från ett KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål. Tidpunkten som illustreras skulle kunna vara i slutet av den nuvarande interglaciala tempererade perioden eller slutet av nästa nedisning.

Resultaten från SR-Site visar att kapslarna i KBS-3-förvaret kan förväntas vara täta under mycket lång tid (SKB 2011b). I figuren har därför ingen aktivitetsutsläpp lagts in runt KBS-3-förvaret.

■ Borrplats = 30 x 80 m □ Deponeringsplats = 30 x 80 m ▤ 100 x 100 m Bevakat område -.-.- Skyddat område



Figur 21-1. Möjlig principutformning av en anläggning för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål. Notera att anläggningslayout och övrig utformning endast utgör förenklade illustrationer.

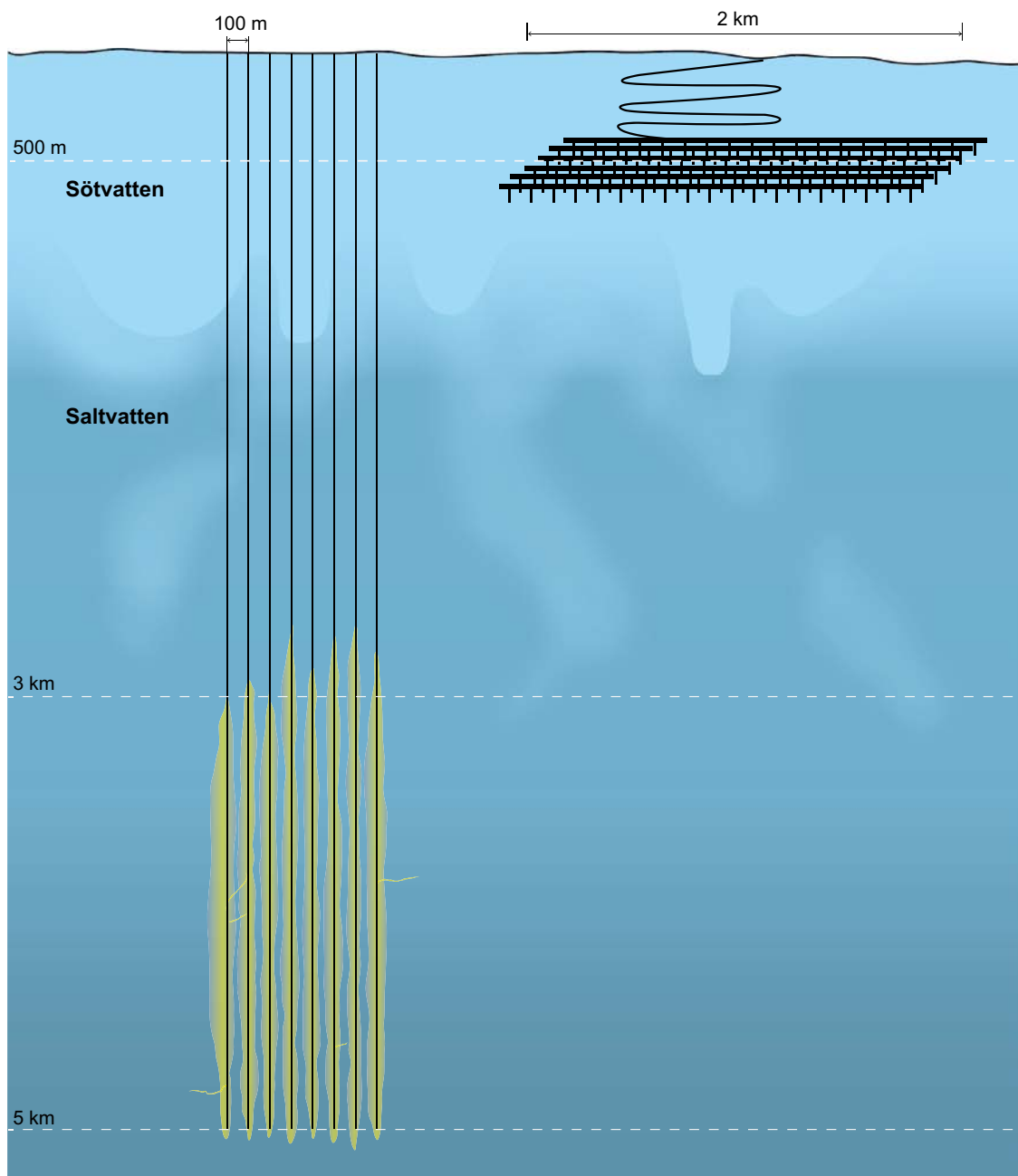
Vid deponering i djupa borrhål har en kapsel av stål antagits. Andra kapselmaterier har beaktats, men den aggressiva miljön i deponeringszonen med förväntade temperaturer på 80–100 °C och salthalter på 50–100 g/l medför att även livslängden på mer korrosionsbeständiga kapselmaterier begränsas kraftigt (SKB 2014i).

Direkt efter deponering i ett djupt borrhål förväntas stålkapslarna börja korrodera. Detta har två konsekvenser; dels förtunnas godset i kapslarna och dels fås vätgas som en reaktionsprodukt. Godsförtunnningen leder så småningom till att de understa kapslarna i en kapselsträng förväntas förlora så mycket av sin hållfasthet att de ger vika. I detta läge kommer sannolikt även de bränsleelement som finns inne i den trasiga kapseln att deformeras varvid man riskerar att urankutsar friläggas, vilket ger upphov till att borrhålet och dess omgivning kontamineras med radionuklider. Temperaturstegringen liksom gasbildningen ger båda drivkrafter för uppåtriktad strömning i området runt hålet vilket kan leda till uppåtriktad transport av radionuklider. Omfattningen av detta har inte analyserats för förhållanden som är relevanta för Sverige, men illustreras schematiskt i figur 21-2. I studier utförda i USA, med de förhållanden som gäller där, har mycket låga doser beräknats (Lee et al. 2012). Dessa tar dock inte hänsyn till de drivkrafter som kan fås från gasbildningen.

Korrosion av kapslarna kan leda till att bränslets geometri förändras genom att kutsar lämnar bränslestavarna och faller neråt i hålet. Detta skulle kunna leda till att kriticitet uppstår. Det är emellertid svårt att i dagsläget bedöma hur sannolik en sådan utveckling skulle vara och vilka konsekvenser detta skulle resultera i.

21.1.3 Arbete utfört sedan Fud 2013

I den komplettering av ansökan för Kärnbränsleförvaret om tillstånd enligt miljöbalken som lämnades till Mark- och miljödomstolen i september 2014, ingick tre dokument som behandlar deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål (SKB 2014i, j, Thegerström 2014). Rapporten (SKB 2014i) är en uppdatering av den rapport där slutförvaring av använt kärnbränsle med KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål jämförs avseende ett antal centrala frågeställningar såsom deponering och förslutning, kärnteknisk säkerhet vid hantering av inkapslat använt kärnbränsle och långsiktig säkerhet för ett förslutet förvar. En övergripande slutsats från SKB (2014i) är att det i dag, liksom tidigare, inte finns något som pekar på att en övergång till en planering för deponering i djupa borrhål skulle leda till en säkrare slutförvaring av det använda kärnbränslet än vad KBS-3-metoden ger.



Figur 21-2. Schematisk framtida aktivitetsspridningssituation (gulmarkerat) för ett KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål. Tidpunkten som illustreras skulle kunna vara i slutet av den nuvarande interglaciala tempererade perioden eller slutet av nästa nedisning. Vid den tidpunkten förväntas ingen aktivitetsspridning från KBS-3-förvaret.

För att hålla sig ajour med utvecklingen avseende djupa borrhål har SKB deltagit i konferenser och workshoppar, bland annat i den workshop som US Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) arrangerade i Washington i oktober 2015, med tema "International Technical Workshop on Deep Borehole Disposal of Radioactive Waste" (NWTRB 2015, 2016).

Energidepartementet i USA (US DOE) har anslagit medel för att genomföra ett demonstrationsborrhål ned till cirka 5 000 meters djup, samt arbeta med metodutveckling under perioden 2015–2019. Syftet med NWTRB:s workshop var att genomlysas US DOE:s forsknings- och utvecklingsprogram för djupa borrhål. Det är ännu inte bestämt var demonstrationshålet ska borraras.

Vid workshoppen framkom att US DOE inte överväger deponering i djupa borrhål för kommersiellt använt kärnbränsle, utan att det är ett antal andra avfallstyper som eventuellt skulle kunna bli aktuella (NWTRB 2015, s 268). NWTRB konstaterar att även om det är möjligt att deponera vissa typer av avfall i djupa borrhål finns det fortfarande behov av ett byggt geologiskt förvar. NWTRB konstaterar också att US DOE uttrycker att alla avfallstyper som utreds för deponering i djupa borrhål även kan deponeras i ett byggt geologiskt förvar (NWTRB 2016).

Deponering i djupa borrhål utgjorde temat för en session vid konferensen Waste Management 2016 i Phoenix, Arizona. Bidragen till denna session kom i huvudsak från Sandia National Laboratories och University of Sheffield. Föredragen från Sandia berörde riskanalyser av deponeringsförfarandet (Freeze et al. 2016, Hardin et al. 2016) inom ramen för förberedelserna inför det ovan nämnda testprogrammet medan bidragen från Sheffield (Gibb 2016, Travis och Gibb 2016) beskrev forskning om metoder att förbättra inneslutningen av det deponerade avfallet och försluta djupa borrhål. Ett av bidragen till sessionen baserades på SKB:s arbete inom området (Grundfelt et al. 2016) och beskrev mekanismer för potentiell spridning av radionuklider från ett borrhålsförvar.

I juni 2016 deltog SKB i konferensen ”International Meeting on Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste”, som arrangerades av University of Sheffield. Där framkom inget nytt beträffande möjligheterna att deponera använt kärnbränsle i djupa borrhål.

21.2 Bedömning och fortsatt arbete

21.2.1 SKB:s bedömning

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. Ett KBS-3-förvar kan, till skillnad mot djupa borrhål, uppföras, drivas och förslutas på ett i alla led kontrollerat och verifierbart sätt. För ett förvar enligt konceptet djupa borrhål finns dessutom stora osäkerheter om förvarets utveckling efter förslutning. Vidare kan konstateras att det inte finns något land som förordar deponering i djupa borrhål som förstahandsalternativ för att ta hand om använt kärnbränsle.

21.2.2 Fortsatt arbete

SKB avser ändå att även fortsättningsvis bevaka utvecklingen inom ämnesområdena borrhållning av och deponering i djupa borrhål. Motiv saknas däremot för att genomföra något eget forskningsprogram inom området. Resurserna koncentreras i stället på att realisera ett slutförvar enligt KBS-3-metoden.

SKB följer utvecklingen inom Swedish Deep Drilling Program (SDDP 2016) och tar därigenom del av eventuella resultat som är relevanta för konceptet djupa borrhål.

SKB har noterat att intresset för deponering i djupa borrhål har ökat på senare tid i USA och med att US DOE avsatt medel för borrhållning av ett demonstrationsborrhål ned till cirka 5 000 meters djup. SKB avser att följa dessa borrhållningar, men konstaterar samtidigt att de geologiska förutsättningarna är olika i USA och i Sverige.

SKB har vidare för avsikt att även fortsättningsvis bevaka och i relevanta sammanhang delta i internationella forum avseende djupa borrhål.

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, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013. Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aggarwal S, Addepalli V, Smart N, 2015. Further metallographic analysis of MiniCan SCC test specimens. SKB R-15-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson E (red), 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson K, 2013. Copper corrosion in nuclear waste disposal. A Swedish case study on stakeholder insight. Bulletin of Science, Technology & Society 33, 85–95.

Andersson L, Karnland O, Hedström M, 2014. Swelling pressure of ion-exchange resins at SFR – Experimental results. SKBdoc 1450664 ver 1.0. 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.

Anunti Å, Larsson H, Edelborg M, 2013. Decommissioning study of Forsmark NPP. SKB R-13-03, 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.

Arnold B W, Brady P V, Bauer S J, Herrick C, Pye S, Finger J, 2011. Reference design and operations for deep borehole disposal of high level radioactive waste. SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Aronsson P-O, 2016a. C-14 accumulated in ion exchange resins in Swedish nuclear power plants Part 2: Historical accumulations up to and including 2014 and predicted future accumulations from 2015 onwards. SKBdoc 1527801 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aronsson P-O, 2016b. C-14 i jonbyttarmassor från svenska kärnkraftverk: sammanfattning av historiska och framtida upptag. SKBdoc 1527802 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aronsson P-O, Lillfors-Pintér C, Henning Å, 2016. C-14 accumulated in ion exchange resins in Swedish nuclear power plants Part 1: Results from analyses and calculation of accumulation. SKBdoc 1527800 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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. Scientific Technical Report STR 05/05, GeoForschungsZentrum, Potsdam, Tyskland.

Backers T, Stephansson O, 2012. ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness. Rock Mechanics and Rock Engineering 45, 1011–1022.

Barreiro Fidalgo A, Sundin S, Jonsson M, 2014. Effect of bentonite on radiation induced dissolution of UO₂ in an aqueous system. Journal of Nuclear Materials 447, 73–76.

Barreiro Fidalgo A, Dahlgren B, Brinck T, Jonsson M, 2016. Surface reactions of H₂O₂, H₂, and O₂ in aqueous systems containing ZrO₂. The Journal of Physical Chemistry C 120, 1609–1614.

- Bastviken D, Svensson T, Sandén P, Kylin H, 2013.** Chlorine cycling and fates of ^{36}Cl in terrestrial environments. SKB TR-13-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Becker J K, Lindborg T, Thorne M C, 2014.** Influence of climate on landscape characteristics in safety assessments of repositories for radioactive wastes. *Journal of Environmental Radioactivity* 138, 192–204.
- 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 S B, 2013.** Interception and storage of wet deposited radionuclides in crops: field experiments and modelling. Doktorsavh. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Berastegui P, Hahlin M, Ottosson M, Boman M, 2016.** Memo: Analyses on N3 and N8 samples from Micans. SKBdoc 1538718 ver 1.0, 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, Lorentz H, 2016.** Avvecklingsplan för Barsebäcksverket. 1884576 / 8, Barsebäck Kraft AB.
- 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.
- Bergman E, Fors P, Knutsson A, 2016a.** Avvecklingsplan för Ringhals 1 och 2, 1848196 / 7.0, Ringhals AB.
- Bergman E, Fors P, Knutsson A, 2016b.** Avvecklingsplan för Ringhals 3 och 4, 2337675 / 2.0, Ringhals AB.
- Birgersson M, Goudarzi R, 2016.** Vapor transport and sealing capacity of buffer slots (“sauna” effects). SKB TR-15-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Björck M, 2015.** Estimation of oxide growth on joint surfaces during FSW. SKBdoc 1402837 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Björck M, Elger R, 2013.** Oxidation kinetics of copper at reduced oxygen partial pressures. SKBdoc 1410172 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Björkbacka Å, 2015.** Radiation induced corrosion of copper. Doktorsavh. Skolan för Kemivetenskap, KTH.
- Björkbacka Å, Hosseinpour S, Johnson M, Leygraf C, Jonsson M, 2013.** Radiation induced corrosion of copper for spent nuclear fuel storage. *Radiation Physics and Chemistry* 92, 80–86.
- Björkbacka Å, Yang M, Gasparri C, Leygraf C, Jonsson M, 2015.** Kinetics and mechanisms of reactions between H₂O₂ and copper and copper oxides. *Dalton Transactions* 44, 16045–16051.
- Blom A, Pedersen K, 2016.** Analyser av kopparhalter i vatten. Microbial Analytics Sweden AB. SKBdoc 1523054 ver 1.0, 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.
- Bohl Kullberg E, 2013.** Avvecklingsplan för Ågestaanläggningen. N-13-008, Vattenfall AB.
- Boman M, Berger R, Andersson Y, Hahlin M, Björefors F, Gustafsson T, Ottosson M, 2014.** Corrosion of copper in water free from molecular oxygen. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 49, 431–434.
- Bradshaw C, Kapustka L, Barnthouse L, Brown J, Ciffroy P, Forbes V, Geras’kin S, Kautsky U, Bréchnignac F, 2014.** Using an Ecosystem Approach to complement protection schemes based on organism-level endpoints. *Journal of Environmental Radioactivity* 136, 98–104.

- Brady P V, Arnold B W, Freeze G A, Swift P N, Bauer S J, Kanney J L, Recharad R P, Stein J S, 2009.** Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, New Mexico.
- 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.
- Brandt F, Curti E, Klinkenberg M, Rozov K, Bosbach D, 2015.** Replacement of barite by a (Ba,Ra)SO₄ solid solution at close-to-equilibrium conditions: a combined experimental and theoretical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 155, 1–15.
- Bréchignac F, Oughton D, Mays C, Barnthouse L, Beasley J C, Bonisoli-Alquati A, Bradshaw C, Brown J, Dray S, Geras'kin S, Glenn T, Higley K, Ishida K, Kapustka L, Kautsky U, Kuhne W, Lynch M, Mappes T, Martin T E, Mihok S, Møller A, Mothersill C, Mousseau T A, Otaki J M, Pryakhin E, Rhodes O E, Salbu B, Smith J, Strand P, Tsukada H, 2016.** Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems in order to improve protection of the environment against radiation: agreed statements from a Consensus Symposium. *Journal of Environmental Radioactivity* 158–159, 21–29.
- 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. doi: 10.1002/2015JG003131
- Bruno J, Spahiu K, 2014.** The long-term effect of hydrogen on the UO₂ spent fuel stability under anoxic conditions: findings from the Cigar Lake Natural Analogue study. *Applied Geochemistry* 49, 178–183.
- Brydsten L, Strömngren M, 2010.** A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Strömngren 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.
- Bödvarsson 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.
- Bödvarsson 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, 2014a.** Modelling of the mechanical interaction between the buffer and the backfill in a KBS-3V repository. Updated design of backfill and deposition hole. SKB R-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 2014b.** Modelling of bentonite block compaction. SKB P-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Sandén T, Dueck A, Andersson L, Jensen V, Nilsson U, Olsson S, Åkesson M, Kristensson O, Svensson U, 2015a.** Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes. EVA project. SKB TR-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Åkesson M, Kristensson O, Malmberg D, Birgersson M, Hernelind J, 2015b.** Modelling of critical H-M processes in the engineered barriers of SFR. SKB TR-14-27, 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, 2014a.** Avvecklingsplan för Clink. SKBdoc 1404607 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB. Tillgänglig: http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Slutf%C3%B6rvar/Komplettering%20150120/4Bilaga_C_Avvecklingsplan_f%C3%B6r_Clink.pdf
- Calderon M, 2014b.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar ”guideline”. SKBdoc 1416378 ver 1.0, 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, Shoosmith D W, 2012.** Copper corrosion in aqueous sulphide solutions under nuclear waste repository conditions. I Scientific basis for nuclear waste management XXXV: symposium held in Buenos Aires, Argentina, 2–7 October 2011. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1475), 465–470.
- Chen J, Qin Z, Shoosmith D W, 2014a.** Key parameters determining structure and properties of sulphide films formed on copper corroding in anoxic sulphide solutions. *Corrosion Engineering Science and Technology* 49, 415–419.
- Chen J, Qin Z, Wu L, Noel J J, Shoosmith D W, 2014b.** The influence of sulphide transport on the growth and properties of copper sulphide films during copper corrosion in anaerobic sulphide solutions. *Corrosion Science* 87, 233–238.
- Choi J-H, Edwards P, Ko K, Kim Y-S, 2016.** Definition and classification of fault damage zones: a review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews* 152, 70–87.
- 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.
- 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.
- 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, Myllykylä E, Bailey D J, Thornber S M, Qi J, Maldonado P, Stennett M C, Hamilton A, Hyatt N C, 2014.** Contribution of energetically reactive surface features to the dissolution of CeO_2 and ThO_2 analogues for spent nuclear fuel microstructures. *ACS Applied Materials & Interfaces* 6, 12279–12289.
- 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.
- Curti E, Puranen A, Grolimund D, Jädernas D, Sheptyakov D, Mesbah A, 2015.** Characterization of selenium in UO_2 spent nuclear fuel by micro X-ray absorption spectroscopy and its thermodynamic stability. *Environmental Science: Processes & Impacts* 17, 1760–1768.
- Dahlberg C, Öberg M, Faleskog J, 2014.** Continuum modeling of nodular cast iron using a porous plastic model with pressure-sensitive matrix – Experiments, model calibration & verification. SKBdoc 1414719 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Damjanac B, Fairhurst C, 2010.** Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 513–531.
- 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.
- 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.
- De la Gardie F, Calderon M, 2014.** Utredning av extern segmentering av reaktortank vid nedmontering och rivning av kärnkraftverk. SKBdoc 1432771 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dessirier B, 2016.** Numerical modeling of groundwater and air flow between compacted bentonite and fractured crystalline rock. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Dillström P, 2014.** Summary of important characteristic parameters for the BWR- and PWR-insert, based on performed strength and damage tolerance analyses. Report 50017500-1, rev 4, Inspecta Technology AB. SKBdoc 1288292 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dillström P, Bolinder T, Bonnaud E, 2014.** Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material. Report 50010510-1, rev 8, Inspecta Technology AB. SKBdoc 1288288 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Drake H, Hallbeck L, Pedersen K, Rosdahl A, Tullborg E-L, Wallin B, Sandberg B, Blomfeldt T, 2014.** Investigation of sulphide production in core-drilled boreholes in Äspö Hard Rock Laboratory. Boreholes KA3110A, KA3385A and KA3105A. SKB TR-13-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Drake H, Tullborg E-L, Whitehouse M, Sandberg B, Blomfeldt T, Åström M E, 2015.** Extreme fractionation and micro-scale variation of sulphur isotopes during bacterial sulphate reduction in deep groundwater systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 161, 1–18.
- Dueck A, Goudarzi R, Börgesson L, 2014.** Buffer homogenisation, status report 2. SKB TR-14-25, 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.
- Edelborg M, 2013.** Jämförelse mellan alternativen hel respektive segmenterad reaktortank. SKBdoc 1335231 ver 1.0, 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.
- 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.
- 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.
- Engels S, Self A E, Luoto T P, Brooks S J, Helmens K F, 2014.** A comparison of three Eurasian chironomid–climate calibration datasets on a W–E continentality gradient and the implications for quantitative temperature reconstructions. *Journal of Paleolimnology* 51, 529–547.
- Ericsson L O, Thörn J, Christiansson R, Lehtimäki T, Ittner H, Hansson K, Butron C, Sigurdsson O, Kinnbom P, 2015.** A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory SKB R-14-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson D, Bultmark F, Andersson H, 2015.** Gasevakuering genom betongbarriär i 2BMA. SKBdoc 1409731 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2014.** Basic engineering of buffer production system. SKB P-14-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2016.** Investigation of alternatives to the buffer protection. SKB P-16-07, 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.

- Evins L Z, Juhola P, Vähänen M, 2014.** REDUPP. Final report. Posiva Working Report 2014-12, Posiva Oy, Finland.
- Favalli A, Vo D, Grogan B, Jansson P, Liljenfeldt H, Mozin V, Schwabach P, Sjöland A, Tobin S J, Trelue H, Vaccaro S, 2016.** Determining initial enrichment, burnup, and cooling time of pressurized-water-reactor spent fuel assemblies by analyzing passive gamma spectra measured at the Clab interim-fuel storage facility in Sweden. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 820, 102–111.
- Fenton C H, Adams J, Halchuk S, 2006.** Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical & Geological Engineering* 24, 579–592.
- Fors P, 2015.** Nuclear decommissioning – A feasibility study of potential R&D initiatives for Energiforsk’s nuclear programme. RAPPORT 2015:131, Energiforsk AB.
- Freeze G, Brady P, Hardin E, MacKinnon R, Sevougian D, Stein E, Hadgu T, 2016.** Safety considerations for deep borehole disposal of Cs/Sr capsules. *Proceeding of Waste Management*, Phoenix, Arizona, 6–10 March 2016. Paper 16294.
- Funehag J, 2016.** Efterinjekteringen 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, 2014.** Simulating earthquake rupture and off-fault fracture response. Licentiatavh. 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. *Proceedings of 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. *Proceedings of 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium*, San Fransisco, 29 June – 2 July 2008.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, Mai P M, Roberts R, Munier R, 2015.** 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.
- Ganchenkova M G, Yagodzinsky Y N, Borodin V A, Hänninen H, 2014.** Effects of hydrogen and impurities on void nucleation in copper: simulation point of view. *Philosophical Magazine* 94, 3522–3548.
- Ganopolski A, Winkelmann R, Schellhuber H J, 2015.** Critical insolation–CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200–203.
- 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.

- Gibb F, 2016.** Deep borehole disposal: options, issues and challenges. Proceeding of Waste Management, Phoenix, Arizona, 6–10 March 2016. Paper 16250.
- 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.
- Grahm 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, Duro L, Spahiu K, Kulik D, Brandt F, 2014.** Slow processes in close-to-equilibrium conditions for radionuclides in water/solid systems of relevance to nuclear waste management. SKIN Final synthesis report. Deliverable 5.5. European Commission. Tillgänglig: <http://web.emn.fr/x-subatech/skin/images/7/7b/FinalSynthesis.pdf>
- Grolander S, 2013.** Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grundfelt B, 2013.** Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. SKB P-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grundfelt B, Birgersson L, Setzman E, 2016.** Views on long-term safety of deep borehole disposal. Proceeding of Waste Management, Phoenix, Arizona, 6–10 March 2016. Paper 16657.
- Guo X, Szenknect S, Mesbah A, Labs S, Clavier N, Poinssot C, Ushakov S V, Curtius H, Bosbach D, Ewing R C, Burns P C, Dacheux N, Navrotsky A, 2015.** Thermodynamics of formation of coffinite, $USiO_4$. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 6551–6555.
- Gärdenäs A, Eckersten H, Reinert 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.
- Haglund J, Egeltun P, 2014.** Utredning av hantering av reaktortank – Tids- och kostnadsuppskattning. SKBdoc 1410596 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakala M, Siren T, Kemppainen K, Christiansson R, Martin D, 2013.** In-situ stress measurements with the new LVDT-cell – method description and verification. Posiva 2012-43, Posiva Oy, Finland.
- 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.
- 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.
- Hallberg B, Tiberg L, 2010.** Preliminär plan för avveckling – slutförvar för använt kärnbränsle. SKB P-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Halldin Stenlid J, Johansson A J, Brinck T, 2014.** Searching for the thermodynamic limit – a DFT study of the step-wise water oxidation of the bipyramidal Cu_7 cluster. *Physical Chemistry Chemical Physics* 16, 2452–2464.

- Hallidin Stenlid J, Johansson A J, Kloo L, Brinck T, 2016.** Aqueous solvation and surface oxidation of the Cu₂ nanoparticle: insights from theoretical modeling. *The Journal of Physical Chemistry C* 120, 1977–1988.
- Hansson T, Norberg T, Knutsson A, Fors P, Sandebert C, 2013.** Ringhals Site Study 2013 – An assessment of the decommissioning cost for the Ringhals site. SKB R-13-05, 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.
- Hardin E, Jenni K, Clark A, Cochran J, Finger J, Sevougian S D, 2016.** Deep borehole disposal waste emplacement mode cost-risk study. *Proceeding of Waste Management*, Phoenix, Arizona, 6–10 March 2016. Paper 16346.
- Harper J, Hubbard A, Ruskeeniemi T, Claesson Liljedahl L, Kontula A, Bougamont M, Brown J, Dirkson A, Dow C, Doyle S, Drake H, Engström J, Fitzpatrick A, Follin S, Frape S, Graly J, Hansson K, Harrington J, Henkemans E, Hirschorn S, Hobbs M, 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.
- 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.
- Hedin A, Lilja C, Johansson J, Puigdomenech I, 2015.** Samlad redovisning om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. SKBdoc 1473304 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2014.** The Last Interglacial-Glacial cycle (MIS 5–2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. *Quaternary Science Reviews* 86, 115–143.
- Helmens K F, Salonen J S, Pliikk A, Engels S, Väliiranta M, Kylander M, Brendryen J, Renssen H, 2015.** Major cooling intersecting peak Eemian Interglacial warmth in northern Europe. *Quaternary Science Reviews* 122, 293–299.
- Hernelind J, 2014.** Analysis of canister with unfavourable pressure load. SKBdoc 1419643 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hernelind J, 2015.** Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads. SKBdoc 1399768 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Herschend B, 2014.** Long-lived intermediate level waste from Swedish nuclear power plants. Reference inventory. SKB R-13-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hoch A R, Lever D A, Shaw G, 2014.** Uptake of carbon-14 in the biosphere: summary report. AMEC/004041/008 Issue 2, AMEC, Storbritannien.
- Holtorf C, 2013.** A comment on knowledge recovery: 'How we today can make things easier for historians/archaeologists of the future. I Gordon-Smith H, Schröder J, Pescatore C (red). *The preservation of records, knowledge and memory (RK&M) across generations: improving our understanding: RK&M workshop proceedings*, 12–13 September 2012, Issy-les-Moulineaux, France, Paris: Nuclear Energy Agency, OECD, 48–50. Tillgänglig: <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/rwm-r2013-3.pdf>
- Holtorf C, Högberg A, 2013.** Heritage futures and the future of heritage. I Bergerbrant S, Sabatini S (red), *Counterpoint: essays in archaeology and heritage studies in honour of professor Kristian Kristiansen*. Oxford: Archaeopress, 739–746.
- Holtorf C, Högberg A, 2014.** Communicating with future generations: what are the benefits of preserving for future generations? *Nuclear power and beyond. European Journal of Post-Classical Archaeologies* 4, 315–330.
- Holtorf C, Högberg A, 2015a.** Contemporary heritage and the future. In Waterton E, Watson S (red). *The Palgrave handbook of contemporary heritage research*. New York: Palgrave Macmillan, 509–523.

- Holtorf C, Högberg A, 2015b.** Archaeology and the future. Managing nuclear waste as living heritage. Radioactive waste management and constructing memory for future generations. Proceedings of the International Conference and Debate 1517 September 2014, Verdun, France. Paris: OECD Nuclear Energy Agency (NEA), 97–101.
- Hora S, Jensen M, 2005.** Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Rapport 2005:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Hosseinzadeh Delandar A, 2015.** Numerical modeling of plasticity in FCC crystalline materials using discrete dislocation dynamics. Licentiatavh. KTH.
- Huybrechts P, 2010.** Vulnerability of an underground radioactive waste repository in northern Belgium to glaciotectionic and glaciofluvial activity during the next 1 million year. Report 10/01, Departement Geografie VUB.
- Hyman J D, Karra S, Makedonska N, Gable G 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.
- Höglund L O, 2001.** Project SAFE. Modelling the long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository, Svensk Kärnbränslehantering AB. 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.
- Ibrahim B, 2015.** The corrosion behaviour of Cu in irradiated and non-irradiated humid air. Examensarbete. The University of Western Ontario, Kanada.
- Ibrahim B, Zagidulin D, Smith J M, Ramamurthy S, Wren J C, Shoesmith D W, 2015.** Radiolytic corrosion of Cu nuclear waste containers. I Proceedings of the 17th International Conference on Environmental Degradation in Nuclear Power Systems – Water Reactors, Ottawa, 9–13 August 2015.
- IPCC, 2013.** Climate change 2013: The physical science basis: summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Tillgänglig: <http://www.ipcc.ch>
- Itasca, 2013.** 3DEC – 3 Dimensional Distinct Element Code, User’s manual, Version 5.0. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.
- Itasca, 2014a.** UDEC – Universal Distinct Element Code, Version 6.0. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc.
- Itasca, 2014b.** PFCSuite – Particle Flow Code, Version 5.0. 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.
- Jaremalm M, Köhler S, Lidman F, 2013.** Precipitation of barite in the biosphere and its consequences for the mobility of Ra in Forsmark and Simpevarp. SKB TR-13-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johannesson E, Rannemalm T, 2016a.** Oskarshamn 1 och 2 inklusive 0AVF – Avvecklingsplan. 2016-03988 utgåva 1, OKG AB.
- Johannesson E, Rannemalm T, 2016b.** Oskarshamn 3 – Avvecklingsplan. 2016-09146 utgåva 2, OKG AB.

- Johannesson E, Rannemalm T, 2016c.** Block 0 – Avvecklingsplan. 2016-09147 utgåva 1, OKG AB.
- Johannesson L-E, 2014.** KBS-3H. Manufacturing of buffer and filling components for the Multi Purpose Test. SKB P-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johannesson L-E, Kristensson O, Åkesson M, Eriksson P, Hedin M, 2014.** Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation. SKB P-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB
- Johannesson L-E, Dueck A, Andersson L, Jensen V, 2015.** Investigations of hydraulic and mechanical processes of the barriers embedding the silo in SFR. Laboratory tests. SKB TR-15-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson C, 2015.** Samlat ställningstagande rörande återtag av avfallstyp S.14 samt kompensatoriska åtgärder. SKBdoc 1489807 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson E, 2016.** The influence of climate and permafrost on catchment hydrology. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Johansson E, Berglund S, Lindborg T, Petrone J, van As D, Gustafsson L-G, Näslund J-O, Laudon H, 2015a.** Hydrological and meteorological investigations in a periglacial lake catchment near Kangerlussuaq, west Greenland – presentation of a new multi-parameter data set. *Earth System Science Data* 7, 93–108.
- Johansson E, Gustafsson L-G, Berglund S, Lindborg T, Selroos J-O, Claesson Liljedahl L, Destouni G, 2015b.** 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 E, Stenberg L, Olofsson I, Karlzén R, 2015c.** Utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2011–2012. Karakterisering, projektering och tunneldrivning. SKB R-13-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, Rydén H, 2014.** Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns rör, lock och botten. SKBdoc 1414374 ver 1.0, 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.
- Juhlin C, Lund B, 2011.** Reflection seismic studies over the end-glacial Burträsk fault, Skellefteå, Sweden. *Solid Earth* 2, 9–16.
- Kalinowski M, 2015.** Betongcylinder I-1B med ingjutna metallprover. CBI Uppdragsrapport, CBI Betonginstitutet. SKBdoc 1495415 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kautsky U, Lindborg T, Valentin J (red), 2013.** Humans and ecosystems over the coming millennia: overview of 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, Lindgren M, Källström K, 2014.** Assessment of complexing agent concentrations in SFR. SKB R-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kienzler B, Lemmens K, 2015.** First-nuclides: results on radionuclide release from used fuel. I Proceedings of the 15th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2015), Charleston, SC, 12–16 April 2015, 646–652.
- Kim J, Dong H, Seabaugh J, Newell S W, Eberl D D, 2004.** Role of microbes in the smectite to illite reaction. *Science* 303, 830–832.
- King F, 2013.** A review of the properties of pyrite and the implications for corrosion of the copper canister. SKB TR-13-19, 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, Chen J, Martino T, Partovi-Nia R, Qin Z, Shoesmith D W, Lilja C, 2014.** Sulphide mass-transport limited corrosion. SKBdoc 1422182 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Klinkenberg M, Brandt F, Breuer U, Bosbach D, 2014.** Uptake of Ra during the recrystallization of barite: a microscopic and time of flight-secondary ion mass spectrometry study. Environmental Science & Technology 48, 6620–6627.
- Konovalenko L, 2012.** Element transport in marine coastal ecosystems – modelling general and element-specific mechanisms. Licentiatavh. Stockholms universitet.
- Konovalenko L, 2014.** Element transport in aquatic ecosystems: modelling general and element-specific mechanisms. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Konovalenko L, Bradshaw C, Kumblad L, Kautsky U, 2014.** Radionuclide transfer in marine coastal ecosystems, a modelling study using metabolic processes and site data. Journal of Environmental Radioactivity 133, 48–59.
- Konovalenko L, Bradshaw C, Andersson E, Lindquist D, Kautsky U, 2016.** Evaluation of factors influencing accumulation of stable Sr and Cs in lake and coastal fish. Journal of Environmental Radioactivity 160, 64–79.
- Kosec T, Kranjc A, Rosborg B, Legat A, 2015.** Post examination of copper ER sensors exposed to bentonite. Journal of Nuclear Materials 459, 306–312.
- Kristiansen P T, Massel F, Werme L, Lilja C, Duda L-C, 2015.** Sulfidation of single-phase oxide on copper and as powder studied using soft X-ray spectroscopy. Journal of The Electrochemical Society 162, C785–C791.
- 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.
- Källbom R, Jonsson M, Rydén H, 2014.** Kravbild för oförstörande provning av segjärnsinsats. SKBdoc 1414760 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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, 2015.** Lämplighet för krossberg från Forsmark och SFR att användas som betongballast. SKB P-16-13, 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, 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.
- Lantmäteriet, 2015.** Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. Version 2.2. Gävle: Lantmäteriet. Tillgänglig: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/produktbeskrivningar/hojd2_plus.pdf
- Larsson H, Anunti Å, Edelborg M, 2013.** Decommissioning study of Oskarshamn NPP. SKB R-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lee J H, Arnold B W, Swift P N, Hadgu T, Freeze G, Wang Y, 2012.** A prototype performance assessment model for generic deep borehole repository for high-level nuclear waste. I Proceedings of WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, 26 February – 1 March 2012. Tillgänglig: <http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12132.pdf>
- L'Hôpital E, Lothenbach B, Le Saout G, Kulik D, Scrivener K, 2015.** Incorporation of aluminium in calcium-silicate-hydrates. *Cement and Concrete Research* 75, 91–103.
- Li Y, 2015.** *Ab initio* based modeling of defects and disorder in industrial materials. Doktorsavh. KTH.
- Li Y, Korzhavyi P A, 2015.** Interactions of point defects with stacking faults in oxygen-free phosphorus-containing copper, *Journal of Nuclear Materials* 462, 160–164.
- Li Y, Lousada C M, Soroka I L, Korzhavyi P A, 2015.** Bond network topology and antiferroelectric order in cupric CuOH. *Inorganic Chemistry* 54, 8969–8977.
- Lidman F, Mörth C-M, Björkvald L, Laudon H, 2011.** Selenium dynamics in boreal streams: the role of wetlands and changing groundwater tables. *Environmental Science & Technology* 45, 2677–2683.
- Lidman F, Mörth C-M, Laudon H, 2012.** Landscape control of uranium and thorium in boreal streams – spatiotemporal variability and the role of wetlands. *Biogeosciences* 9, 4773–4785.
- Lidman F, Ramebäck H, Bengtsson Å, Laudon H, 2013.** Distribution and transport of radionuclides in a boreal mire – assessing past, present and future accumulation of uranium, thorium and radium. *Journal of Environmental Radioactivity* 121, 87–97.
- Lidman F, Köhler S J, Mörth C-M, Laudon H, 2014.** Metal transport in the boreal landscape – the role of wetlands and the affinity for organic matter. *Environmental Science & Technology* 48, 3783–3790.
- 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.
- Lidmar-Bergström K, Bonow J M, Japsen P, 2013.** Stratigraphic Landscape Analysis and geomorphological paradigms: Scandinavia as an example of Phanerozoic uplift and subsidence. *Global and Planetary Change* 100, 153–171.
- 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, 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, Tröjlbom M, Berglund S, Johansson E, Löfgren A, Saetre P, Nordén S, Sohlenius G, Andersson E, Petrone J, Borgiel M, Kautsky U, Laudon H, 2016.** Biogeochemical data from terrestrial and aquatic ecosystems in a periglacial catchment, West Greenland. *Earth System Science Data Discussions*. doi:10.1594/PANGAEA.860961
- Lousada C M, Trummer M, Jonsson M, 2013a.** Reactivity of H_2O_2 towards different UO_2 -based materials: the relative impact of radiolysis products revisited. *Journal of Nuclear Materials* 434, 434–439.

- Lousada C M, Yang M, Nilsson K, Jonsson M, 2013b.** Catalytic decomposition of hydrogen peroxide on transition metal and lanthanide oxides. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 379, 178–184.
- Lousada C M, Johansson A J, Korzhavyi P A, 2015.** Thermodynamics of H₂O splitting and H₂ formation at the Cu(110)–water interface. *The Journal of Physical Chemistry C* 119, 14102–14113.
- Lousada C M, Soroka I L, Yagodzhinskyy 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. doi:10.1038/srep2434
- Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, Buhcheva D, Tryggvason A, Berglund K, Juhlin C, Munier R, 2015.** The Burträsk end-glacial fault: Sweden's most seismically active fault system. *Proceedings of EGU General Assembly, Vienna*, 12–17 April 2015.
- 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.
- Luterkort D, Gylling B, Johansson R, 2012.** Closure of the 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, Wimeliuss H, Pettersson A, Aghili B, 2014.** SFR förslutningsplan. SKBdoc 1358612 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren A (red), 2010.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Hökmark H, 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)*, Montreal, 10–13 May 2015. Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum and ISRM.
- Macdonald D D, Sharifi-Asl S, Engelhardt G R, 2014.** Issues in the corrosion of copper in a Swedish high level nuclear waste repository. Phase III. Role of sulphide ion in anodic and cathodic processes – research report. Technical Note 201:57, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Mahmoudzadeh B, 2016.** Solute transport through fractured rocks: the influence of geological heterogeneities and stagnant water zones. Doktorsavh. KTH.
- Maillot J, 2016.** Comportement mécanique et hydraulique des réseaux de fractures complexes (multiéchelles) à partir de simulations numériques et de modèles théoriques. Doktorsavh. Université de Rennes 1.
- Maldonado P, Godinho J R A, Evins L Z, Oppeneer P M, 2013.** Ab initio prediction of surface stability of fluorite materials and experimental verification. *The Journal of Physical Chemistry C* 117, 6639–6650.
- Maldonado P, Evins L Z, Oppeneer P M, 2014.** Ab initio atomistic thermodynamics of water reacting with uranium dioxide surfaces. *The Journal of Physical Chemistry C* 118, 8491–8500.
- 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.
- Marsic N, Grundfelt B, 2013.** Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. SKB P-13-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Martino T, Partovi-Nia R, Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2014.** Mechanisms of film growth on copper in aqueous solutions containing sulphide and chloride under voltammetric conditions. *Electrochimica Acta* 127, 439–447.
- 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.
- McEwen T (red), Aro S, Kosunen P, Mattila J, Pere T, Käpyaho A, Hellä P, 2012.** Rock suitability classification – RSC 2012. Posiva 2012-24, Posiva Oy, Finland.
- Mikko H, Smith C A, Lund B, Ask M V S, Munier R, 2015.** LiDAR-derived inventory of post-glacial fault scarps in Sweden. *GFF* 137, 334–338.
- 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. In *Proceedings of ISRM International Symposium – EUROCK 2005*, Brno, 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, Trincheri P, Ebrahimi H, de Vries L, Luna M, Svensson U, Lichtner P, 2016.** 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.
- Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE. Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, 2006.** Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes. SKB R-06-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Mattila J, 2015.** MEMO on Terminology. POS-021685, ver 1.0 Posiva Oy, Finland.
- Muschitiello F, Wohlfarth B, 2015.** Time-transgressive environmental shifts across Northern Europe at the onset of the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews* 109, 49–56.
- Muschitiello F, Andersson A, Wohlfarth B, Smittenberg R H, 2015a.** The C₂₀ highly branched isoprenoid biomarker – A new diatom-sourced proxy for summer trophic conditions? *Organic Chemistry* 81, 27–33.
- Muschitiello F, Pausata F S R, Watson J E, Smittenberg R H, Salih A A M, Brooks S J, Whitehouse N J, Karlatou-Charalampopoulou A, Wohlfarth B, 2015b.** Fennoscandian freshwater control on Greenland hydroclimate shifts at the onset of the Younger Dryas. *Nature Communications* 6. doi:10.1038/ncomms9939
- Muschitiello F, Lea J M, Greenwood S L, Nick F M, Brunnberg 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.
- Myllykylä E, Lavonen T, Stennett M, Corkhill C, Ollila K, Hyatt N, 2015.** Solution composition and particle size effects on the dissolution and solubility of a ThO₂ microstructural analogue for UO₂ matrix of nuclear fuel. *Radiochimica Acta* 103, 565–576.
- Mårtensson P, 2015.** Äspö Hard Rock Laboratory. Concrete and Clay. Installation report. SKB P-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mörner N-A, Tröfthen P E, Sjöberg R, Grant D, Dawson S, Bronge C, Kvamsdal O, Sidén A, 2000.** Deglacial paleoseismicity in Sweden: the 9663 BP Iggesund event. *Quaternary Science Reviews* 19, 1461–1468.

- 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*. doi:10.1002/lno.10222
- 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.
- Norrfors Knapp K, 2015.** Stability and sorption capacity of montmorillonite colloids: investigation of size fractional differences and effects of γ -irradiation. Doktorsavh. KTH.
- NWTRB, 2015.** United States Nuclear Waste Technical Review Board. Transcript of the International Technical Workshop on Deep Borehole Disposal of Radioactive Waste —Wednesday October 21, 2015. Tillgänglig: <http://www.nwtrb.gov/meetings/2015/oct/15oct21.pdf>
- NWTRB, 2016.** Technical evaluation of U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program, January 2016. Tillgänglig: <http://www.nwtrb.gov/reports/DBD.pdf>
- Nyberg J, Elhammer A, Sohlenius G, Kjellin B, Nordgren P, 2011.** Results from marine geological investigations outside Forsmark. SKB P-11-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Näslund J O, Brandefelt J, 2014.** Timing of future glacial inception. I Haeberli W, Whiteman C (red). *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. Amsterdam: Elsevier, 347–353.
- Ochs M, Colàs E, Grivé M, Olmeda J, Campos I, Jordi B, 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.
- Odeh R E, Owen D B, 1980.** Tables for normal tolerance limits, sampling plans, and screening. New York: Marcel Dekker.
- Ollila K, Myllykylä E, Tanhua-Tyrkkö M, Lavonen T, 2013.** Dissolution rate of alpha-doped UO₂ in natural groundwater. *Journal of Nuclear Materials* 442, 320–325.
- Olofsgård M, Baczynska M, 2016.** Miljöpåverkan från hantering av BWR-reaktortankar – en LCA analys. Projekt-ID 60654442, ÄF. SKBdoc 1524819 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Olofsson I, Christiansson R, Holmberg M, Carlsson A, Martin D, 2014.** Application of the Observational Method in the Äspö Expansion project. SKB R-13-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olsson R, 1998.** Mechanical and hydromechanical behaviour of hard rock joints: a laboratory study. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- 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.
- Pehkonen H, 2014.** Design av gasskydd för friktionsomrörningssvetsningsmaskin. Examensarbete. Linköpings universitet.
- Pettersson K, 2010.** A study of grain boundary sliding in copper with and without an addition of phosphorus. *Journal of Nuclear Materials* 405, 131–137.
- Pettersson K, 2012.** A review of the creep ductility of copper for nuclear waste canister application. SSM report 2012:13, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Pettersson K, 2016.** An updated review of the creep ductility of copper including the effect of phosphorus, SSM report 2016:02, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Pettersson S, 2013.** Feasibility study of waste containers and handling equipment for SFL. SKB R-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Petrone J, Sohlenius G, Johansson E, Lindborg T, Näslund J-O, Strömberg M, 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 Discussions*. doi:10.5194/essd-2016-19
- Posiva, 2012.** Olkiluoto site description 2011. Posiva Report 2011-2, 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.
- Puranen A, Granfors M, Ekeröth E, Spahiu K, 2016.** Lessons learned from leaching of dry milled high burnup UO₂ fuel under H₂ atmosphere. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIX*. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Ännu ej publicerad.)
- 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.
- Quiquet A, Colleoni F, Masina S, 2016.** Long-term safety of a planned repository for spent nuclear fuel in Forsmark, Sweden and Olkiluoto, Finland – Phase 2: impact of ice sheet dynamics, climate forcing and multi-variate sensitivity analyses on the maximum ice thickness. SKB TR-16-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010.** Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Railo A (red) Laitinen I (red), Mustonen S, Kosunen 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.
- Razdan M, Trummer M, Zagidulin D, Jonsson M, Shoesmith D W, 2014.** Electrochemical and surface characterization of uranium dioxide containing rare-earth oxide (Y₂O₃) and metal (Pd) particles. *Electrochimica Acta* 130, 29–39.
- Ronneteg U, Grybäck T, 2014.** Kvalificering av oförstörande provning. SKBdoc 1414464 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ronneteg U, Grybäck T, 2015.** Non-destructive testing of canister components and welds. SKBdoc 1434744 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosborg B, 2013a.** Recorded corrosion rates on copper electrodes in the Prototype Repository at the Äspö HRL. SKB R-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosborg B, 2013b.** Post-test examination of a copper electrode from deposition hole 5 in the Prototype Repository. SKB R-13-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosdahl A, Pedersen K, Hallbeck L, Wallin B, 2011.** Investigation of sulphide in core drilled boreholes KLX06, KAS03 and KAS09 at Laxemar and Äspö. Chemical-, microbiological- and dissolved gas data from groundwater in four borehole sections. SKB P-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Roth O, 2015.** A study of instant release fractions and matrix dissolution rate of two fuel samples irradiated in Olkiluoto 1. Posiva Working Report 2015-19, Posiva Oy, Finland.
- Roth O, Low J, Granfors M, Spahiu K, 2013.** Effects of matrix composition on instant release fractions from high burn-up nuclear fuel. I Scientific basis for nuclear waste management XXXVI. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1518)
- Roth O, Low J, Spahiu K, 2014.** Effects of matrix composition and sample preparation on instant release fractions from high burnup nuclear fuel. I Scientific basis for nuclear waste management XXXVII. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1665). doi:10.1557/opl.2014.653

- Roth O, Granfors M, Puranen A, Spahiu K, 2015.** Release of ^{108}Ag from irradiated PWR control rod absorbers under deep repository. I Gin S, Jubin R, Matyáš J, Vance E (red). Scientific basis for nuclear waste management XXXVIII. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1744). doi:10.1557/opl.2015.372
- Rozalen M, Huertas F J, Brady P V, 2009.** Experimental study of the effect of pH and temperature on the kinetics of montmorillonite dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 3752–3766.
- Runermark C-G, 2016.** Forsmarks aavvecklingsplan. F-0011130 Rev 0, Forsmarks Kraftgrupp.
- 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 pyroglacial landscape of western Greenland. *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 S J, Helmens K F, Seppä H, Birks H J B, 2013.** Pollen-based palaeoclimate reconstructions over long glacial-interglacial timescales: methodological tests based on the Holocene and MIS 5d-c deposits of Sokli, northern Finland. *Journal of Quaternary Science* 28, 271–282.
- Sandén T, Börgesson L, 2014.** System design of backfill. Methods of water handling. SKB R-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandén T, Olsson S, Andersson L, Dueck A, Jensen V, Hansen E, Johnsson A, 2014.** Investigation of backfill candidate materials. SKB R-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, 2014a.** The role of phosphorus for mechanical properties in copper. SKBdoc 1417069 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, 2014b.** The role of hydrogen in copper. SKBdoc 1420051 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, 2016.** Influence of phosphorus on the tensile stress strain curves in copper. *Journal of Nuclear Materials* 470, 290–296.
- Sandström R, Wu R, Hagström J, 2016.** Grain boundary sliding in copper and its relation to cavity formation during creep. *Materials Science and Engineering: A* 651, 259–268.
- Schmidt P, Lund B, Näslund J-O, Fastook J, 2014.** Comparing a thermo-mechanical Weichselian Ice Sheet reconstruction to reconstructions based on the sea level equation: aspects of ice configurations and glacial isostatic adjustment. *Solid Earth* 5, 371–388.
- SDDP, 2016.** SDDP - The Swedish Scientific Drilling Program. Tillgänglig: <http://www.ssdp.se/>
- Selroos J-O, Appleyard P, Bym T, Follin S, Hartley L, Joyce S, Munier R, 2015.** The stochastic-deterministic transition in discrete fracture network models and its implementation in a safety assessment application by means of conditional simulation. H53I-02, AGU Fall meeting, 14–18 December 2015, San Francisco.
- 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.
- Shala S, 2014.** Palaeoenvironmental changes in the northern Boreal zone of Finland based on lake sediment analyses: local versus regional drivers. Doktorsavh. Institutionen för Naturgeografi, Stockholms universitet.
- Shala S, Helmens K F, Luoto T P, Väiliranta M, Weckström J, Salonen J S, Kuhry P, 2014a.** Evaluating environmental drivers of Holocene changes in water chemistry and aquatic biota composition at Lake Loitsana, NE Finland. *Journal of Paleolimnology* 52, 311–329.

- Shala S, Helmens K F, Jansson K N, Kylander M E, Risberg J, Löwemark L, 2014b.** Palaeoenvironmental record of glacial lake evolution during the early Holocene at Sokli, NE Finland. *Boreas* 43, 362–376.
- Sheppard S, Sohlenius G, Omberg L-G, Borgiel M, Grolander S, Nordén S, 2011.** Solid/liquid partition coefficients (K_d) and plant/soil concentration ratios (CR) for selected soils, tills and sediments at Forsmark. SKB R-11-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Shipsha A, 2013.** Statistical data analysis of cast iron properties for PWR-inserts from tension, compression and fracture toughness testing. Report 50017490-1, rev 2, Inspecta Technology AB. SKBdoc 1414800 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Silva O, Abarca E, Molinero J, Kautsky U, 2015.** An equivalent K_d -based radionuclide transport model implemented in COMSOL Multiphysics® Software. I Proceedings of Comsol Conference 2015, Grenoble, 14–16 October 2015.
- SIS, 1976.** SIS 28115: Vattenundersökningar – Bestämning av sulfidkoncentration hos renvatten och icke förorenat naturvatten. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- 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, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010c.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010d.** Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010e.** Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. SKB R-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010f.** Triumf NG Next Generation, ver 1.0.3.0. 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.** Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande lång återmättnadsfas. SKBdoc 1385067 ver 3.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a.** Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014c.** F-PSAR SFR – Allmän del 1 kapitel 3 – Konstruktionsregler. SKBdoc 1220377 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2014d.** Model summary report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e.** Preliminär typbeskrivning för hela BWR reaktortankar exklusive interdelar. SKBdoc 1262709 ver 3.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014f.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande fosfors inverkan på koppars krytegenskaper. SKBdoc 1457514 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014g.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kapselns mekaniska integritet. SKBdoc 1371849 ver 3.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014h.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande tillverkningsaspekter för ingående delar i kapseln. SKBdoc 1371851 ver 4.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014i.** 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, 2014j.** 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, 2015c.** Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln. SKBdoc 1398013 ver 4.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2016a.** Lägesrapport om SKB:s pågående och planerade arbeten kring utveckling av kapseln. SKBdoc 1540089 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2016b.** Ytterligare information om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. SKBdoc 1540185 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2016c.** Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2015. SKB TR-16-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smart N R, Rance A P, Reddy B, Hallbeck L, Pedersen K, Johansson A J, 2014.** In situ evaluation of model copper-cast iron canisters for spent nuclear fuel: a case of microbiologically influenced corrosion (MIC). *Corrosion Engineering, Science and Technology* 49, 548–553.
- Smith C A, Sundh M, Mikko H, 2014.** Surficial geology indicates early Holocene faulting and seismicity, central Sweden. *International Journal of Earth Sciences* 103, 1711–1724.
- Smith J M, Wren J C, Odziemkowski M, Shoesmith D W, 2007.** The electrochemical response of preoxidized copper in aqueous sulfide solutions. *Journal of The Electrochemical Society* 154, C431–C438.
- SNSN, 2015.** Svenska Nationella Seismiska Nätet. Uppsala Universitet, Institutionen för Geovetenskaper. Tillgänglig: <http://www.snsn.se/>
- Sohlenius G, Schonung K, Baumgartner A, 2013a.** Development, carbon balance and agricultural use of peatlands – overview and examples from Uppland Sweden. SKB TR-13-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sohlenius G, Strömgren M, Hartz F, 2013b.** Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soroka I L, Tarakina N V, Jonsson M, 2016.** Cuprous hydroxide: synthesis, structure and physical properties. SKB TR-16-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Srivastava R M, 2002.** Probabilistic discrete fracture network models for the Whiteshell Research Area. Ontario Power Generation Report 06819-REP-01200-10071-R00, Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Kanada.

- Sliver R L, Urban N M, Olson R, Keller K, 2012.** Towards a physically plausible upper bound of sea-level rise projections. *Climatic Change* 115, 893–902.
- SSM, 2014a.** Granskning och utvärdering av SKB:s redovisning av Fud-program 2013. Rapport 2014:12, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2014b.** Minnesanteckningar från avstämningsmöte mellan SSM och SKB angående kontroll och provning av kapseln. SSM2011-1137-63, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2015.** Långsiktig säkerhet. Preliminär rapport. Dokument 13-3523, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2016.** Fud-utredning. Promemoria SSM2015-1136-2, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Stark K, 2015.** Parallel assessment of effects on non-human biota using RESRAD-BIOTA. Technical Note 2015:45, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- 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. Rock Mechanics and Rock Engineering.* doi:10.1007/s00603-016-1038-5
- 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.
- Sundell-Bergman S, Avilia R, Grusell E, Häggkvist K, deWith G, Maderich V, 2015.** PREDO – PREDiction of DOses from normal releases of radionuclides to the environment. QP.50000-107745633, Vattenfall, Stockholm.
- Sundin S, Dahlgren B, Roth O, Jonsson M, 2013.** H₂O₂ and radiation induced dissolution of UO₂ and SIMFUEL in HCO₃⁻ deficient aqueous solution. *Journal of Nuclear Materials* 443, 291–297.
- Svensson D, 2015.** The bentonite barrier: swelling properties, redox chemistry and mineral evolution. Doktorsavh. Lunds universitet.
- Svensson D, Hansen S, 2013.** Redox chemistry in two iron-bentonite field experiments at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden: an XRD and Fe K-edge XANES study. *Clays and Clay Minerals* 61, 566–579.
- 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.
- 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.
- 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 behavior 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.
- Taxén C, 2013.** Ytprofiler på kopparkapslar från deponeringshål 5 och 6 i försöksserien Prototyp. SKB P-13-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Sparr M, 2014.** Corrosion properties of copper materials. SKB R-14-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Lundholm M, Persson D, Jakobsson D, Sedlakova M, Randelius M, Karlsson O, Rydgren P, 2012.** Analyser av koppar från prototypkapsel 5 och 6. SKB P-12-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Thegerström C, 2014.** SKB:s jämförande bedömningar av andra studerade metoder än den valda metoden, KBS-3. SKBdoc 1440497 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thorsell P-E, 2013.** Studier av frysningssegenskaper hos betong från 1 BMA. SKB P-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thuvander M, 2015.** Investigation of the distribution of phosphorus in copper. Report 2015:11, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Thörn J, 2015.** The impact of fracture geometry on the hydromechanical behaviour of crystalline rock. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Toijer E, 2014.** Assessment of primary damage and copper precipitation in cast iron in repository conditions. Examensarbete KTH.
- Travis K, Gibb F, 2016.** Cleaning-up Hanford: a deep borehole concept for the Cs/Sr capsules. Proceeding of Waste Management, Phoenix, Arizona, 6–10 March 2016. Paper 16249.
- 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.
- 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, 2010.** Chemical conditions in present and future ecosystems in Forsmark – implications for selected radionuclides in the safety assessment SR-Site. SKB R-10-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tröjbom M, Grolander S, Raguz 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.
- Unosson M, 2014.** A constitutive model for texture dependent deformation hardening and pressure dependent initiation of ductile failure in metallic materials. SKBdoc 1393179 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Unosson M, 2016.** Numerical simulation of earthquake-induced rock shear through a deposition hole – crack initiation and propagation in an insert with pre-existing intertubular and edge crack planes. SKBdoc 1474363 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 Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M (red). *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.
- 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. I Scientific basis for nuclear waste management XXXVII. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1744). doi:10.1557/opl.2015.372
- Väliranta M, Salonen J S, Heikkilä M, Amon L, Birks H H, Helmens K F, Klimaschewski A, Kuhry P, Kultti S, Poska A, Shala S, Veski S, Birks H H, 2015.** Plant macrofossil evidence for an early onset of the Holocene summer thermal maximum in northernmost Europe. *Nature Communications* 6. doi:10.1038/ncomms7809
- 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.
- Wallin A, Qvarfordt S, Borgiel M, 2016.** Bottensubstratkartering i undersökningsområde 157_2 norr om SFR, Forsmark. SKB P-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Wekerle C, Colleoni F, Näslund J O, Brandefelt J, Masina S, 2016.** Numerical reconstructions of the penultimate glacial maximum Northern Hemisphere ice sheets: sensitivity to climate forcing and model parameters. *Journal of Glaciology*, doi:10.1017/jog.2016.45
- Werner K, Sassner M, Johansson E, 2013.** Hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark – synthesis for the SR-PSU project. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wikander O, 2015a.** Don't push this button: Phoenician sarcophagi, atomic priesthoods and nuclear waste. *Vetenskapsocietetens årtidsskrift 2015*, 109–124.
- Wikander O, 2015b.** Language, nuclear waste and society: the preservation of knowledge over vast periods of time and its relevance for linguistics. *Lychnos 2015*, 7–25.
- Winkler S R, Eigl R, Forstner O, Martschini M, Steier P, Sterba J H, Golser R, 2015.** Using the nuclear activation AMS method for determining chlorine in solids at ppb-levels and below. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 361*, 649–653.
- Wold S, 2014.** Are colloids released from different materials in SFR to the saturating groundwater? School of chemical science and engineering, KTH. SKBdoc 1466123 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wu R, Sandström R, 2015.** Influence of cold work and notches on creep failure of Cu-OFP. SKB R-15-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wu R, Sandström R, Hagström J, 2015.** Grain boundary sliding in phosphorus alloyed oxygen-free copper under creep. SKB R-15-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Zanonato P L, Di Bernardo P, Grenthe I, 2014.** A calorimetric study of the hydrolysis and peroxide complex formation of the uranyl(VI) ion. *Dalton Transactions 43*, 2378–2383.
- Yang M, Jonsson M, 2014.** Evaluation of the O₂ and pH effects on probes for surface bound hydroxyl radicals. *The Journal of Physical Chemistry C 118*, 7971–7979.
- Yang M, Jonsson M, 2015.** Surface reactivity of hydroxyl radicals formed upon catalytic decomposition of H₂O₂ on ZrO₂. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 400*, 49–55.
- 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, Kristensson O, Börgesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010.** THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Öhman J, Follin S, Odén M, 2014.** SR-PSU Hydrogeological modelling. TD11 – Temperate climate conditions. SKB P-14-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Förkortningar

ABM	Alternativa buffertmaterial. Experiment i Äspölaboratoriet där möjliga buffertmaterial undersöks.
AKA-utredningen	Första versionen av KBS-3-förvaret – AKA Använt kärnbränsle och radioaktivt avfall som kom med sin slutrapport 1976.
ALARA	As low as reasonably achievable. Begränsning av stråldoser så långt detta rimligen kan åstadkommas med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhälleliga faktorer.
Apse	Äspö pillar stability experiment. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för studier av hur stor belastning berget tål.
Asha	Indisk bentonit från Kutch-regionen.
ASME	American Society of Mechanical Engineers. Ger ut standarder.
ASTM	Standarder inom olika tekniska fält utfärdade av ASTM International som är en amerikansk ideell standardiseringsorganisation med medlemmar från cirka 120 länder.
ATB	Avfallstransportbehållare.
ATB 1T	En ny behållare för transport av långlivat låg- och medelaktivt avfall i BFA-tankar.
AVANS	Projekt Avvecklingsplanering inom Vattenfalls kärnkraftsverksamhet i Sverige.
B1	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 1.
B2	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 2.
BA	Brännbara absorbatörer.
Belbar	Bentonite erosion: effects on the long term performance of the engineered barrier and radionuclide transport. EU-projekt.
BFA	Bergrum på Simpevarpshalvön för torr mellanlagring av driftavfall.
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.
BTF	Betongtankförvar i SFR, främst avsett för avvattnad jonbyttarmassa.
BRT	Bergssal för hela reaktortankar. Planeras i den utbyggda delen av SFR.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor. Reaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och reaktor 1 i Ringhals.
Caps	Counter pressure applied to prevent spalling. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet där möjligheterna att minska risken för bergutfall undersökts.
Cast	Carbon-14 Source Term. EU-projekt som behandlar frågeställningar kring kol-14 i radioaktivt avfall.
CEC	Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet.
Cebama	CEment BAsed Materials: properties, evolution and barrier functions. EU-projekt.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle.

CEMI	Centre of Excellence in Mining Innovations, Kanada.
Comsol	Beräkningsverktyg för modellering och simulering av komplexa fysikbaserade system. COMSOL Inc.
Coup-modellen	Modell för kopplad värme- och masstransport i systemet jord-plantor-atmosfär.
CR	Koncentrationsfaktorer.
CSH	Kalciumsilikahydrat.
DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverk.
DFT	Density functional theory. Täthetsfunktionalteori.
DOC	Dissolved organic carbon. Löst organiskt kol.
Domplu	Dome plug experiment. Fullskaletest i Äspölaboratoriet för att testa och demonstrera det kompletta pluggsystemet. Testet ingår i EU-samarbetsprojektet Dopas.
DPP	Decommissioning Preparation Project.
EDZ	Excavation damaged zone. Skadad zon. Det berg runt ett berguttag där irreversibla förändringar ägt rum.
EmrasII	Environmental Modelling for Radiation Safety. IAEA-projekt.
E.ON	E.ON Kärnkraft Sverige AB.
Erica	Environmental risk from ionising contaminants. Verktyg för att analysera biologiska effekter av joniserande strålning i livsmiljöer och ekosystem.
ESS	European Spallation Source, Lund.
F1	Kärnkraftsreaktor Forsmark 1.
F2	Kärnkraftsreaktor Forsmark 2.
F3	Kärnkraftsreaktor Forsmark 3.
FE	Finita element.
FKA	Forsmarks Kraftgrupp AB.
FPI	Full perimeter intersection.
F-PSAR	Förberedande preliminär säkerhetsredovisning.
FSW	Friction stir welding. Friktionsomrörningssvetsning.
GAP	Greenland Analogue Project. Projekt som SKB genomförde mellan 2008 och 2014 tillsammans med Posiva och NWMO. Syftet var att genom observationer vid en existerande inlandsis öka kunskapen kring hur grundvattenflöde och grundvattenkemi i kristallin berggrund påverkas av en inlandsis. Resultaten utnyttjas bland annat i analysen av säkerhet efter förslutning av Kärnbränsleförvaret.
GIA	Glacial isostatic adjustment.
GIS	Geographic information system. Geografiska informationssystem.
GRASP	Greenland analogue surface project. SKB-aktivitet med syfte dels att identifiera skillnader i långsiktiga förändringsprocesser i ytnära system mellan ett kallt och ett tempererat klimat, dels att undersöka hur de hydrologiska egenskaperna och ekosystemens egenskaper varierar beroende på klimatförhållanden.
Hidra	Human Intrusion in Disposal of RAdioactive waste. Nätverk inom IAEA som SKB deltar i.
Hint	Projekt för hantering av interndelar (Barsebäck).
HM	Hydromekaniska.
HPC	High performance computing. Högpresterande databehandling.
IAEA	Internationella atomenergiorganet.
IGD-TP	Implementing Geological Disposal – Technology Platform. Europeiskt samarbete kring slutförvarsfrågor.
ISA	Isosackarinsyra.

ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) vilka kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
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.
KTH	Kungliga tekniska högskolan.
KTL	Kärntekniklagen.
LOT	Long term test of buffer material. Experiment i Äspölaboratoriet med syftet 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.
Marfa	Transportmodell.
Matlab	Datorprogram och programspråk som främst används för matematiska och tekniska beräkningar, MathWorks.
MikeShe	Modellen för det ytnära systemet som användes i modelleringen av SFR.
Mind	Microbiology In Nuclear waste Disposal, EU-projekt.
MIRARCO	Mining Innovation Rehabilitation and Applied Research Corporation, Kanada.
MMD	Mark- och miljödomstolen.
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.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz.
NEA	Nuclear Energy Agency. En samarbetsorganisation för atomenergifrågor inom OECD.
NRC	United States Nuclear Regulatory Commission.
NWMO	Nuclear Waste Management Organization, Kanada.
O1	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 1.
O2	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 2.
O3	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 3.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OKG	OKG Aktiebolag.
Onkalo	Den berganläggning som Posiva uppför på Olkiluoto sedan 2004. Onkalo används för forskning och utveckling, men planeras också utgöra tillfarten till själva slutförvaret.
PhreeqC	Datorprogram för transport- och geokemimodellering.
Posiva	Posiva Oy, Finland.
PSAR	Preliminär säkerhetsredovisning.
PSU	Projekt SFR-utbyggnad.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor. Reaktorerna R2, R3, och R4 i Ringhals samt Ågestareaktorn.
R1	Kärnkraftsreaktor Ringhals 1.

R2	Kärnkraftsreaktor Ringhals 2.
R3	Kärnkraftsreaktor Ringhals 3.
R4	Kärnkraftsreaktor Ringhals 4.
RAB	Ringhals AB.
Redox	Redox är det kemiska fenomen vid vilket oxidationstalen hos atomer förändras.
RNR	Radionuclide retention experiment. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för att undersöka hur berget fördröjer och filtrerar radioaktiva ämnen.
SAR	Säkerhetsredovisning.
Scale	Beräkningsverktyg.
SEM	Scanning electron microscopy. Svepelektronmikroskop.
SFL	Slutförvaret för långlivat avfall.
SFR	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall.
SGU	Sveriges geologiska undersökning.
Sicada	Site characterization database system. Databassystem för att lagra och hantera data från de olika typer av geovetenskapliga undersökningar som SKB utför. Även data från de experiment som utförs vid Äspölaboratoriet lagras i databasen.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SNAB	Studsvik Nuclear AB.
SNSN	Svenska nationella seismiska nätet.
SRM	Synthetic rock mass. Syntetisk bergmassa.
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.
Suus	Säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen (Kärnbränsleförvaret).
SVAFO	AB SVAFO. Ägs av Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB.
Tass	Tunnel för försök i Äspölaboratoriet.
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.
THM	Termisk, hydraulisk, mekanisk.
Triumf NG	Triumf New Generation. Triumf NG är ett rapport- och prognosverktyg för beräkning och prognos av mängden kollin, material och radionuklider i SFR.
True	Tracer retention understanding experiments. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet. Spårämnesförsök i olika skalor för att se i vilken grad resultat som uppnåtts i en skala också är giltiga för en annan.
TURVA-2012	Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle i Olkiluoto, Finland, publicerad av Posiva 2012.
UFM	Nearly universal fracture model.
VLF	Mätning med lågfrekventa (very low frequency) radiovågor för till exempel lokalisering av sprickzoner i berg.
VNF	Vattenfall Nuclear Fuel.
XRD	X-ray diffraction. Röntgendiffraktion.

