

**Promemoria**

Datum: 2018-03-20

Diarienumr: SSM2011-1135

Dokumentnr: SSM2011-1135-25

Handläggare: Henrik Öberg, Bo Strömberg

Fastställd: Ansi Gerhardsson

Tematisk sammanställning av SSM:s beaktande av remissinstansernas synpunkter i kapselfrågor

Innehåll

Bakgrund.....	3
Korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten	4
Lunds Tekniska Högskola.....	5
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	5
Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan	8
Torbjörn Åkermark	9
Uppsala universitet	10
Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.....	11
Kungliga Tekniska Högskolan.....	12
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	13
Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan	14
Uppsala universitet	15
Spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion	17
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	18
Väteförsprödning	19
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	19
Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan	20
Joniserande strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning	22
European Committee on Radiation Risk (ECRR).....	22



Kungliga Tekniska Högskolan.....	23
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	24
Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan	24
Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga beständighet	25
Herbert Henkel.....	25
Kungliga Tekniska Högskolan.....	25
Länsstyrelsen i Uppsala län	26
Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.....	26
Opinionsgruppen för säker slutförvaring (OSS).....	32
Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan	32
Roland Pusch	34
Torbjörn Åkermark	34
Uppsala universitet	34
Östhammars kommun	35
Referenser	39

Bakgrund

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) lämnade den 23 januari 2018 yttrande till regeringen över Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB) ansökningar enligt kärntekniklagen om ett system för slutförvaring av det använda kärnbränslet. Mot bakgrund av den granskning som myndigheten genomfört sedan ansökan lämnades in i mars 2011 bedömer SSM att SKB har förutsättningar att kunna uppfylla kärntekniklagens krav på en strålsäker slutförvaring och tillstyrker att tillstånd ges enligt kärntekniklagen. SSM har också, utifrån sitt ansvarsområde, i ett remissyttrande till mark- och miljödomstolen i juni 2016 tillstyrkt att tillåtlighet ges enligt miljöbalkens krav.

Även mark- och miljödomstolen (MMD) lämnade sitt slutliga yttrande till regeringen den 23 januari, i frågan om tillstånd enligt miljöbalken till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall¹. Enligt domstolens yttrande är verksamheten tillätlig om SKB redovisar underlag som visar att slutförvarsanläggningen på lång sikt uppfyller miljöbalkens krav trots de osäkerheter som kvarstår om hur kapselns skyddsförmåga påverkas av:

1. korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten
2. gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion
3. spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion
4. väteförsprödning
5. joniserande strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning².

SSM har vid ett möte med Miljö- och energidepartementet den 16 februari ombetts göra en tematisk sammanställning av de remissynpunkter som lämnats till myndigheten med avseende på ovan angivna degraderingsprocesser samt hur myndigheten har beaktat dessa.

I syfte att ge en översikt av samtliga inkomna remissynpunkter som rör kapselns kemiska och mekaniska egenskaper redovisas i föreliggande PM även ”Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga beständighet”. Vidare har, i jämförelse med den ursprungliga remissammanställningen som lämnades till regeringen (SSM 2018:03), beskrivningen av de särskilt identifierade kapselfrågorna till del förtydligas och kompletterats, dock utan att på något betydelsefullt sätt ändra innebörden av SSM:s bedömningar.

Remissvar har inkommit till SSM under olika faser av granskningsarbetet. Den första remissomgången avsåg behovet av att komplettera SKB:s ansökan. SSM:s analys av dessa remissvar avsåg i första hand en bedömning av om de föreslagna kompletteringarna kunde anses berättigade mot bakgrund säkerhetsbetydelse samt omfattning och ändamålsenlighet för SKB:s ursprungliga redovisning. Den andra remissomgången avsåg bedömningar i sak. SSM:s analys av dessa remissvar är i första hand inriktade på om synpunkterna har en betydelse för SSM:s egna motsvarande bedömningar i sak och i så fall i vilken omfattning och på vilket sätt. Hur SSM har beaktat och bemött remissvaren skiljer sig följaktligen åt beroende på vilken remissomgång som avses. För att underlätta för läsaren att sätta myndighetens svar i rätt sammanhang framgår i det följande efter varje listad remisskommentar om den inkommit under remissomgång 1 eller 2.

¹ Mark- och miljödomstolens yttrande i mål M 1333-11

² Notera att kategorin i MMD:s yttrande benämndes ”radioaktiv strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning”. Strålning erhålls som följd av radioaktivt sönderfall och är i sig ej radioaktiv, varpå SSM har omformulerat namnet på kategorin.

Korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten

I detta avsnitt har samtliga remissynpunkter samlats som på något sätt kopplar till processen korrosion av koppar i rent syrgasfritt vatten. Det innefattar synpunkter som rör processens omdiskuterade omfattning, både i slutförvarsmiljö och annorstädes, liksom synpunkter som rör tolkningar av fältförsök där processen enligt remissinstansen(-erna) har ägt rum. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning utifrån remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes, liksom om kommentaren inkom under remissomgång 1 eller 2.

Processen och dess potentiella relevans för kapselns långsiktiga beständighet har granskats av SSM. Granskningsresultatet redovisas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4.

SSM:s bedömning om processen:

SSM bedömer sammanfattningsvis att korrosionsprocessen, oavsett om den sker i den omfattning som förutses av vedertagen termodynamisk data eller i en större omfattning som en grupp forskare vid KTH menar, har en liten betydelse för det planerade slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. Om processen äger rum i den mycket begränsade omfattning som förutsägs av vedertagen termodynamik bedöms det vara orimligt att den skulle kunna ha någon betydelse i slutförvarssammanhang. Om man däremot förutsätter att den föreslagna korrosionsprocessen äger rum i syrgasfritt vatten med en omfattning som vida överstiger vad som förutsägs av känd termodynamik krävs en utförligare bedömning kring hur stor påverkan på kapseln som kan förväntas i slutförvarsmiljön för olika förutsättningar och under olika tidsskalor (se nedan).

SSM konstaterar att vätgasbildning under olika experiment skiljer sig men att det även under KTH-forskargruppens experiment har varit frågan om små mängder och att korrosionsprocessen visats spontant avstanna vid förhållandevis låga partialtryck av vätgas (omkring 1 mbar; Szakalos m.fl., 2007, Hultquist m.fl., 2015). Grundvatten på förvarsdjup är kemiskt reducerande och innehåller redan en viss mängd vätgas som motverkar denna typ av korrosionsprocess, men de genomförda mätningarna vid Forsmark är inte tillräcklig omfattande eller entydiga för att detta ska utgöra en tillräcklig grund för att avfärda den postulerade korrosionsprocessen. SSM anser däremot att långsam materieöverföring i bufferten och berget mot bakgrund av dessa barriärers väl undersökta egenskaper kan beläggas med en hög grad av tilltro. Den begränsade materieöverföringen i kombination med en liten drivkraft för reaktionen talar för att den effektiva korrosionshastigheten i slutförvarsmiljö blir mycket långsam. Närvaron av korrosionsprodukter invid kapselytorna hämmar reaktionen under ett närmande av kemisk jämvikt. Korrosionen kan visserligen fortskrida under förhållanden nära kemisk jämvikt men styrs då av bortförsl av bildat väte vilket har benämnts kvasi-immunitet (SSM Report 2011:09).

Det allra mest pessimistiska fallet bedömer SSM vara då korrosionsprocessen antas förekomma i enlighet med KTH-forskargruppens experiment och får fortgå med en korrosionshastighet uppmätt för förhållandevis opåverkade kopparytor under förhållanden långt från kemisk jämvikt, vilket enligt (Hultquist m.fl., 2015) motsvarar 10-100 nm/år. Om reaktionen får fortgå utan att produkter från korrosionsprocessen, i det här fallet vätgas, leds bort från systemet så kommer den successivt att närma sig sitt kemiska jämviktsläge, vid vilket reaktionen avstannar. För att processen ska kunna fortgå fordras således att den vätgas som bildas genom korrosionsprocessen kan avlägsnas i snabbare takt från systemet, genom bortledning med grundvattnet och/eller en hypotetisk konsumtion genom mikrobiell aktivitet. Mot bakgrund av buffertens betydande materieöverföringsbegränsning förutsätter detta fall att bufferten har fallerat. En intakt buffert



innebär att endast diffusionsbegränsad transport till och från kapselytan är möjlig samt mycket begränsad mikrobiell aktivitet i kapselns närhet.

För att fallet ska realiseras krävs således att en händelsekedja fullbordas:

- (i) grundvattnets salthalt behöver först sjunka radikalt till dess att jonstyrkan från katjoner motsvarar 4 mM för att bufferterrosion ska kunna initieras
- (ii) erosionen av buffertmaterial påbörjas och fortskrider till dess att mikrobiell aktivitet möjliggörs och advektiva förhållanden uppstår,
- (iii) mikrobiella populationer etableras i eroderade deponeringshål med en kapacitet att konsumera även små mängder bildad vätgas, och
- (iv) korrosionen fortskrider med ovan nämnda korrosionshastigheter till dess att kopparhöljet fallerar.

SSM anser baserat på det ovan beskrivna fallet att korrosion i syrgasfritt vatten i fallet eroderade deponeringshål möjligen kan få betydelse för långsiktig säkerhet som inte förutsägs av SKB:s modellering i SR-Site (SKB TR-11-01). Med beaktande av tidsförloppet i den ovan beskrivna händelsekedjan gäller detta sannolikt endast för tider efter 100 000 år och i så fall endast i ett fåtal deponeringshål med högst grundvattenflöden i vilka bufferterrosion fortskridit under en längre tid.

Lunds Tekniska Högskola

Remisskommentar (SSM2011-3522-31, remissomgång 1):

LTH lyfter frågan om kopparinneslutningens beständighet, och konstaterar att det fortfarande råder oenighet i denna fråga.

SSM:s svar:

SSM delar remissinstansens synpunkt att det kring vissa frågor råder oenighet inom korrosionsfältet rörande kopparkapselns beständighet, varav diskussionen kring koppar-korrosion i syrgasfritt vatten har uppmärksamats mest. SSM har dokumenterat bedömningar kring dessa frågor i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07), Del II. Avsnitt 4.10 och 5.11 i rapporten belyser koppar-korrosion de första 1000 åren, respektive efter 1000 år. Avsnitt 5.11.4 behandlar kopparkorrosion i syrgasfritt vatten.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden redovisar ett underlag för när syrgasfrihet inträder i deponeringshålen, lerbuffertens och deponeringstunnlarnas olika delar.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att sådana underlag har tagits fram men att uppskattningarna är behäftade med osäkerheter främst kopplade till förutsättningar för snabb mikrobiell aktivitet och nedbrytning av organiskt material under olika förhållanden samt i viss utsträckning tillgången till vissa accessoriska mineral, såsom pyrit, med betydande kapacitet att förbruka syre. SKB:s grundläggande forskning om mikrobiella processer har i första hand inriktats



mot mikrobiell sulfatreduktion. SSM anser att detta är en korrekt prioritering eftersom dessa processer har en mer direkt betydelse för kapselns långsiktiga integritet. Längden av tidsperioden med oxiderande förhållanden är visserligen också betydelsefull för bedömning av vissa initiala korrosionsprocesser men denna osäkerhet är lättare att beakta med konservativa antaganden. SSM anser därför att det inte finns något omedelbart behov av ytterligare insatser inom detta område, men att monitorering av syreförbrukning bör genomföras under olika framtida försök för att förbättra kunskaperna inom detta område. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram underlag som visar huruvida koppar kan korrodera i en syrgasfri miljö, inklusive de processer som det för närvarande finns en vetenskaplig kontrovers kring.

SSM:s svar:

Myndigheten begärde i flera omgångar kompletteringar/förtydligande av SKB avseende ett flertal olika aspekter av kopparkorrosion, bland annat korrosion i syrgasfri miljö. SKB har under kompletteringsförfarandet redovisat resultat från ett antal egna försök (se exempelvis SKB TR-15-03, SKB TR-16-01). Efter kompletteringar har SSM bedömt underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Baserat på det nuvarande underlaget är det möjligt att dra rimligt välunderbyggda slutsatser kring korrosionsformens betydelse i en representativ slutförvarsmiljö. Granskningsrapporten strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4 beskriver utförligare SSM:s bedömning av kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Av de från SKB erhållna kompletteringarna kan nämnas SKBdoc 1339716, SKBdoc 1473304 och SKBdoc 1540185.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden genomför ett försök i Äspölaboratoriet som fokuserar på hur koppar i lera beter sig i en syrgasfri slutförvarsmiljö.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att försök av den typ som remissinstansen föreslår pågår och har genomförts vid Äspölaboratoriet (se exempelvis SKB:s försöksserie LOT, SKB TR-09-29). SKB har ansvaret för att utforma och utvärdera sin försöksverksamhet. SSM har som en del av kompletteringsförfarandet identifierat frågor som SKB ytterligare behöver belysa, men det tillhör inte det tillämpade granskningsförfarandet att exakt specificera hur dessa frågor ska besvaras. Det skulle innebära en form av detaljstyrning av SKB:s verksamhet som inte är förenlig med SSM:s roll i tillståndsprövningsprocessen. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.8.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Remissinstansen ifrågasätter giltigheten hos försök som har genomförts vid Ångströmlaboratoriet.

SSM:s svar:

SSM är medveten om att kritik har framförts mot i synnerhet de första försöksserierna vid Ångströmlaboratoriet avseende främst bakgrundshalter för vätgas samt läckage vid palladiummembranets infästning, men myndigheten bedömer att dessa frågor har adresserats i SKB:s kompletteringar till SSM (SKB TR-16-01).

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Remissinstansen hänvisar till korrosionshastigheter som för flertalet korrosionsmekanismer är flera tiopotenser högre än de som har beaktats av SKB och att korrosion



från reaktion med vattenmolekyler eller hydroxidjoner i vatten är av avgörande betydelse. Författarna hänvisar i första hand till granskningen utförd av Szakalos och Seetharaman för dessa typer av frågor (SSM Technical Note 2012:17).

SSM:s svar:

SSM konstaterar att slutsatserna är svåra att bedöma eftersom det inte tydligt framgår i något av dessa båda dokument (dvs. vare sig i remissvaret eller i SSM-rapporten skriven av Szakalos och Seetharaman, SSM Technical Note 2012:17) hur de väsentligt högre korrosionshastigheterna har tagits fram samt vilka faktorer i slutförvarsmiljön som har beaktats när dessa hastigheter har bestämts.

Remisskommentar (SSM2014-1683-50, remissomgång 2)

Föreningarna anser att det är visat att syrgasen som har funnits i experiment med koppar och lera har förbrukats inom någon månad och att den betydande kopparkorrosionen som har skett därför inte orsakats av innesluten syrgas. Föreningarna redovisar ny kunskap som visar på snabb förbrukning av syrgas och som innebär att korrosionen som pågår efter någon månad in i försöken visar att det finns kopparkorrosion i en syrgasfri miljö som inte ska finnas enligt sökandens teoretiska antaganden. Den nya kunskapen kommer från det så kallade FE-experimentet som har genomförts i Schweiz. Andra försök som kan ge kunskap om syrgasfri kopparkorrosion är FEBEX, MiniCan, LOT, finska försök från 80- och 90-talet och en rapport från Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Föreningarna anser det är viktigt att SSM klargör sin syn rörande hur snabbt slutförvaret blir syrgasfritt och vad detta betyder för tolkningen av kopparkorrosionsprocesserna som sker i olika försök.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB tagit fram visst underlag som uppskattar tiden det tar för syrgas att förbrukas i slutförvarsmiljön (SKB TR-10-46). SSM anser dock att SKB:s nuvarande underlag för tiden det tar för syrgas att förbrukas i slutförvarsmiljön är behäftade med stora osäkerheter främst kopplade till förutsättningar för snabb mikrobiell aktivitet och nedbrytning av organiskt material under olika förhållanden samt i viss utsträckning tillgången till vissa accessoriska mineral, såsom pyrit, med betydande kapacitet att förbruka syre. SKB:s grundläggande forskning om mikrobiella processer har i första hand inriktats mot mikrobiell sulfatreduktion snarare än förbrukning av initialt syre. SSM anser att detta är en korrekt prioritering eftersom dessa processer har en mera direkt betydelse för kapselns långsiktiga integritet. Längden av tidsperioden med oxiderande förhållanden är visserligen också betydelsefull för bedömning av vissa initiala korrosionsprocesser men denna osäkerhet är lättare att beakta med konservativa antaganden. SSM anser dock att det finns behov att genomföra mätningar av syreförbrukning i samband med etableringen av ett slutförvar.

Beträffande tolkningen av vissa korrosionsförsök som initialt sker i oxiderande miljö, så konstaterar SSM att syreförbrukningen beror på försöksutformning och de detaljerade omgivningsbetingelser som kan variera och som ofta inte är helt kända, liksom på sammansättningen hos de material som kan påverka syreförbrukningen, dvs. lermineral, koppar och bergmatris. SSM anser därför att det inte går att dra några generella slutsatser beträffande tiden som krävs för ett visst försök att bli syrefritt. För att bedöma omfattningen av kopparkorrosion i oxiderande miljö och för den aktuella typen av fältmässiga försök skulle det även krävas information om materieöverföring i och omkring försökmiljön och information om med vilken hastighet de tillgängliga kopparytorna reagerar med syre. Korrosionsprodukternas sammansättning kan dock ge ledtrådar kring betydelsen av olika typer av korrosionsprocesser. SSM diskuterar SKB:s fältförsök med fokus på kopparkorrosion i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.9.



Remisskommentar (SSM2014-1683-50, remissomgång 2):

SSM:s analys av korrosionsprocesser som påverkas av närvaron av oxider, t.ex. lokal korrosion och spänningskorrosion måste göras om eftersom det är fullt möjligt att det bildas hydroxider på kopparytan under en mycket lång tidsperiod om vatten reagerar med kopparytan.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att med beaktande av de förutsättningar som förväntas råda i slutförvarsmiljön så bedöms processen koppars reaktion med vattenmolekyler som av liten omfattning respektive liten betydelse för slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet även med beaktande av möjliga lokala korrosionsprocesser. Däremot har SSM särskilt identifierat lokal korrosion orsakad av gasformiga sulfider under omättade förhållanden som en potentiellt viktig process som behöver undersökas ytterligare. SSM:s mer detaljerade bedömning av processens hypotetiska betydelse med beaktande av olika betingelser i slutförvarets långsiktiga utveckling framgår i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4.

Remisskommentar (SSM2015-1683-50, remissomgång 2):

Om SSM hade gjort en fullgod analys av resultaten från försökspaketet LOT A2 anser föreningarna att myndigheten borde ha kommit fram till att det pågår kopparkorrosion i försöket som inte kommer från syrgas. Därmed borde SSM omvärdera sina bedömningar som finns i granskningsrapporten som långsiktig säkerhet av sökandens beskrivning i ansökan av hur koppar beter sig i slutförvarsmiljön. Föreningarna anser att SSM bör beakta rapporteringen av FEBEX experimentet (Wersin och Kober, 2017) och kräva en avrapportering av MiniCan försöket.

SSM:s svar:

SSM diskuterar SKB:s fältförsök i avsnitt 4.10.9 i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07). Angående resultaten från LOT A2 (SKB TR-09-29) och LOT i allmänhet anser SSM att de utgör ett bidrag till förståelsen för den initiala utvecklingen av de tekniska barriärerna i slutförvarsmiljön under både förväntade förhållanden och förhållanden aggressivare än förväntat, i termer av bland annat högre temperaturgradienter över bufferten. SSM:s övergripande bedömning är dock att det inte är möjligt att dra säkra slutsatser avseende den relativa betydelsen av olika korrosionsmekanismer eftersom försöken genomfördes under fältmässiga förhållanden utan detaljerad kontroll över randvillkor och omgivningsbetingelser. Av korrosionsprodukterna på kopparkupongerna i A2-försöket att döma anser SSM att det i anslutning till kupongerna med största sannolikhet funnits syrgas närvarande som haft stor betydelse för korrosionsförloppet. Myndigheten anser vidare, efter att ha tagit del av FEBEX-rapporten (Wersin och Kober, 2017), att resultaten från de försöken i stort överensstämmer med de huvudsakliga slutsatser som kan dras från LOT-försöken.

Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

SKB har inte tagit till sig att koppar reagerar spontant med vattenmolekyler, dvs. att koppar korroderar i rent syrgasfritt vatten

SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB har beaktat frågeställningen i den ursprungliga ansökan genom att presentera överslagsberäkningar av den tänkbara betydelsen av processen i slutförvarsmiljön med utgångspunkt av resultat från Szakalos m.fl. (2007). Dessutom har ytterligare information tillförts ansökan under kompletteringsfasen genom redovisning av resultat



från egna experimentella studier kring processen (t.ex. SKB TR-16-01). I en konferensartikel från 2017 redovisas ytterligare ett antal beräkningsfall (Hedin m.fl., 2017). De ursprungliga överslagsberäkningarna finns beskrivna i SKB TR-10-66 (avsnitt 5.4) och det framgår ur dessa att korrosionsformen är mindre betydelsefull än sulfidkorrosionen och SKB:s egna experiment ger inget stöd för en korrosionsform med annat än förväntad vätgasutveckling. Mer omfattande vätgasutveckling har observerats i andra experimentella studier. Någon känd eller hittills okänd korrosionsprodukt som från ett termodynamiskt perspektiv kan förklara denna mer omfattande vätgasutveckling har dock inte identifierats.

SSM anser att vätgasutveckling som följd av att koppar reagerar med rent, syrgasfritt vatten kan förväntas baserat på vedertagen termodynamik, men att omfattningen av reaktionen är mycket liten. SSM konstaterar att med beaktande av de förutsättningar som förväntas råda i slutförvarsmiljön så bedöms processen ha liten betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet. SSM:s mer detaljerade bedömning av processens hypotetiska betydelse med beaktande av olika betingelser i slutförvarets långsiktiga utveckling framgår i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4.

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

Remisskommentaren har framtagits av Per Claesson och Jinshan Pan.

Undertecknarna av del 2 i yttrandet (Per Claesson och Jinshan Pan) yrkar på att tillstånd för slutförvaringsbyggnation baserat på KBS-3 metoden ej ska ges. Korrosionshastigheten för koppar har inte kunnat visas vara tillräcklig låg för säker slutförvaring, i synnerhet mot beaktande av att koppar korroderar i rent syrgasfritt vatten.

SSM:s svar:

SSM anser att kopparkapselns integritet från korrosionssynpunkt har analyserats i rimlig omfattning för bedömningen av kopparkapselns lämplighet som barriär i ett slutförvar. Korrosionshastigheten i slutförvarsmiljön styrs av bl.a. tillgången på sulfid och organiskt material i slutförvarmiljön, materieöverföring i bufferten, materieöverföring mellan deponeringshål och berget, samt materieöverföring mellan deponeringshål och återfyllnaden i deponeringstunnlarna. Dessa frågor har undersökts under bland annat platsundersökningsfasen och finns redovisade i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01). SSM har också begärt ett antal kompletteringar från SKB beträffande bland annat överföring av gasformiga korroderande ämnen (t.ex. SKBdoc 1398013). Korrosionsbarriärens funktion under en viss tid, exempelvis 100 000 år, är delvis en dimensioneringsfråga med påverkbara faktorer som acceptanskriterier för deponeringshålen, tillgång till organiska ämnen i tillförda konstruktionsmaterial och kapselns tjocklek, men det är också delvis en fråga som kopplar till platsvalet. SSM redovisar sin detaljerade analys av dessa frågeställningar i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II (avsnitt 5.11.1, 5.11.2, 5.11.3, 5.11.5). Beträffande korrosion i rent syrgasfritt vatten anser SSM att processen i princip existerar med en associerad korrosionshastighet enligt vad vedertagen termodynamik förutsäger, men att tillgänglig information pekar på att processen har liten betydelse i slutförvarsmiljön (se mer utförliga resonemang i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4.

Torbjörn Åkermark

Remisskommentar (SSM2011-3522-11, remissomgång 1)

Koppar är olämpligt som kapselmaterial på grund av korrosion av koppar i syrgasfritt vatten samt att koppar inte är termodynamiskt stabilt.



SSM:s svar:

SSM bedömer att SKB:s materialval för tekniska barriärer dvs. koppar och bentonit är bästa möjliga teknik. SSM bedömer baserat på nu tillgänglig information att koppar-korrosion i syrgasfritt vatten med vätgasutveckling utöver den mängd som förutsågs av vedertagen termodynamik är mindre trolig men bör ändå beaktas som en alternativ konceptuell modell. För ett sådant fall skulle processen baserat på materieöverföringsberäkningar med beaktande av det föreslagna jämviktstrycket för vätgas på 1 mbar (Szakalos, m.fl. 2007) inte ha någon avgörande betydelse för kapselns långsiktiga integritet. SSM bedömer dock i sin granskning att kombinationen eroderade deponeringshålspositioner, korrosion i syrgasfritt vatten och mikrobiell konsumtion av bildad vätgas möjligen skulle kunna ha en större betydelse. Fallet avser dock ett fåtal kapslar och tider i storleksordningen 100 000 år. Korrosionsformen får därmed inte ens i detta pessimistiska fall någon avgörande betydelse för den långsiktiga strålsäkerheten eller för materialvalsfrågan. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.11.4.

Uppsala universitet

Remisskommentar (SSM2011-3833-23, remissomgång 1):

Remissinstansen anser att om korrosion i syrgasfri miljö under vätgasutveckling är möjlig måste detta utredas. Att forskare inte lyckas reproducera resultat från litteraturen är förvisso en bra indikation men vi måste förstå varför. Relevanta referenser bör inkluderas.

SSM:s svar:

SSM anser att ansökan med tillhörande underlag i form av underlagsrapporter, kompletteringar och förtydliganden avseende frågor som rör kopparkorrosion är tillräcklig för att kunna ta ställning till ansökan i detta steg i prövningsprocessen. Remissinstansen lyfter fram frågan om korrosion i syrgasfritt vatten och nämner att det saknas en diskussion i frågan. SSM har beaktat frågan i sin granskning men gör bedömningen att processen, oavsett om den sker med en omfattning som förutsågs av vedertagen termodynamisk data eller med en större omfattning (Szakalos, m.fl., 2007), har liten betydelse för den långsiktiga säkerheten eftersom processen oavsett sker i liten omfattning och händelsekedjor kopplade till denna process i slutförvarsmiljö beräknas ha låg sannolikhet. Kopparkorrosion diskuteras i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10 och 5.11. Frågan om korrosion i syrgasfritt vatten med vätgasutveckling diskuteras i avsnitt 5.11.4 i samma rapport.

Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion

I denna kategori samlas de remissynpunkter som rör gropkorrosion i sulfidmiljö. Även synpunkter som rör den så kallade saunaeffektens påverkan på kopparkapseln samlas under denna rubrik. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning enligt remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes, liksom om kommentaren inkom under remissomgång 1 eller 2.

Lokal korrosion i form av gropkorrosion under reducerande betingelser har granskats av SSM och sammanfattas nedan. SSM har även granskat motsvarande process under den inledande oxiderande fasen men bedömer att denna fas sannolikt är för kortvarig för att möjliggöra en betydelsefull påverkan på kapseln. Denna fas ingår inte heller bland mark- och miljödomstolens utpekade osäkerheter och den kommenteras därför inte ytterligare. Granskningsresultatet redovisas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.7. Saunaeffekten diskuteras i avsnitt 4.10.3 i samma rapport.

SSM:s bedömning om processen:

SSM anser att en betydelse av lokala korrosionsmekanismer i sulfidmiljö för den långsiktiga strålsäkerheten inte helt kan uteslutas baserat på SKB:s säkerhetsanalys och på det befintliga kunskapsunderlaget. Det behövs därför ytterligare insatser inom området i kommande steg av SKB:s program. SSM menar dock samtidigt att kopparhöljets tjocklek om 50 mm medför en betydande tålighet mot gropkorrosion, och att gropkorrosionsrisk vid behov kan begränsas med rimliga åtgärder (se nedan). Forskning som utförts inom ramen för SSM:s forskningsprogram visar att omgivningsbetingelser som gynnar gropkorrosion inkluderar höga temperaturer och höga kloridhalter (SSM Report 2016:30), vilka förväntas förekomma under en begränsad initial fas i slutförvarets långsiktiga utveckling. Enligt SSM:s bedömning är gropkorrosionsrisk även kopplad till den initiala fasen av andra skäl eftersom omättade förhållanden kan medföra snabbare gasformig tillförsel av sulfider än vad som annars är möjligt. Vartefter som deponeringshålen återmättas minskar denna risk. Avgörande för att processen överhuvudtaget ska komma till stånd är först bildandet av en passiverande sulfidfilm som sedan störs så att ett lokalt angrepp kan initieras vilket kräver betydande mängder sulfid. Små mängder sulfid bedöms inte kunna leda till gropkorrosion.

För bedömning av risk för både spänningskorrosion och gropkorrosionsangrepp är en avgörande fråga om förekomst av passiverande sulfidfilmer kan uteslutas för samtliga tänkbara förlopp i slutförvarsmiljön. Experimentella studier visar att passiverande sulfidfilmer kan bildas under vissa förutsättningar med höga sulfidhalter (Mao m.fl., 2014). SSM bedömer att förutsättningar för uppkomst av höga sulfidhalter i närheten av kapselytorna är förknippade med omättade förhållanden samt mikrobiell sulfatreduktion. Det bör noteras att det inte är de omättade förhållandena i sig som kan skapa förutsättningar för gropkorrosion (och spänningskorrosion) utan kombinationen omättade förhållanden och mikrobiell sulfatreduktion, då mikrobiell aktivitet efter buffertåtermättnad bedöms vara låg. SSM bedömer dock att det med rimliga åtgärder går att undvika omständigheter som möjliggör ackumulering av betydande mängd löst sulfid i anslutning till kopparytorna. Dessa omständigheter kan sannolikt uteslutas baserat på åtgärder som säkerställer att en för stor mikrobiell bildning av sulfid i återfyllnaden och bufferten under återmättnadsförloppet kan undvikas, exempelvis kravställning av mängder och förekomstformer av organiskt material i dessa material.

SSM anser att fortsatta experimentella undersökningar kopplade till risk för lokala korrosionsprocesser i sulfidmiljö behöver genomföras. SSM anser också att SKB har

hanterat dessa processer på ett ofullständigt sätt i SR-Site genom att processen inte har integrerats i scenarioanalysen för att utvärdera deras potentiella betydelse under olika förutsättningar utan enbart har hanterats genom processbeskrivningar och FEP-hantering. Som underlag för en utökad scenarioanalys behövs förutom utökad kunskap om korrosionsprocessen även mer detaljerade analyser av återmättnadsförloppet, liksom av förutsättningar för mikrobiell sulfatreduktion med beaktande av aktuell förvarsutformning och aktuella material för buffert och återfyllnad.

Beträffande saltanrikning i anslutning till kopparkapslarna under perioden då kapseltemperaturen är förhöjd så att det inkommande grundvattnet kan förångas och då det samtidigt föreligger omättade förhållanden (även kallad saunaeffekten) så att materiaöverföringen inte är diffusionsbegränsad anser SSM att den viktigaste frågan troligen avser omfattningen av en ackumulation av klorid invid kapselytan som ett resultat av inflöde av omgivande grundvatten med hög salthalt. I detta fall finns dock begränsande faktorer så som att i de deponeringshål som är förbundna med de mest vattenförande sprickorna och som är förknippade med det mest betydande inflödet av salt grundvatten har snabba återmättnadstider. Tiden för en betydande ackumulation är därför förhållandevis kort. För deponeringshål med mycket långa återmättnadstider finns å andra sidan längre tid för en möjlig ackumulation, men i dessa hål är dock inflödet av omgivande salt grundvatten mycket långsamt beroende på att dessa hål är omgivna av intakt berg utan vattenförande sprickor. Kapseltemperaturerna i dessa hål hinner då sjunka betydligt i tidsskalan av återmättnadsförloppet innan tillflöde av betydande mängder salt.

Kloridackumulation behöver beaktas vid definition av den korrosionskemiska miljön under den omättade fasen. Höga kloridhalter kan under vissa förhållanden medföra en ökad risk för gropkorrosion (SSM Report 2016:30). Omfattningen av en eventuell kloridackumulation påverkas av buffertens detaljutformning och variationen av lokala grundvattenflöden (se resonemang ovan) för de cirka 6000 deponeringshålen. Vartefter som återmättnad av deponeringshålen fortgår förväntas dock koncentrationsskillnader i vattenfasen att utjämnas som ett resultat av diffusion i bufferten. Klorid bildar starka komplex med löst koppar vilken ökar lösligheten av kopparfaser. Komplexbildningen kan destabilisera en passiverande ytfilm (SSM Report 2016:30), men också helt utarma en sådan film och konkurrera med processer som leder till dess uppkomst.

Kungliga Tekniska Högskolan

Remisskommentaren har framtagits av tekn.dr Peter Szakálos, yt- och korrosionsvetenskap, docent Olle Grinder, materialens processvetenskap samt professor Seshadri Seetharaman, materialens processvetenskap.

Remisskommentar (SSM2011-3522-27, remissomgång 1):

Remissinstansen lyfter fram tre korrosionsprocesser som de anser fordrar ytterligare kompletterande information från SKB. En av dessa processer är kopparkorrosion pga. anrikning av salter i deponeringshålen (saunaeffekten). De andra två (kopparkorrosion i gasfas och läckströmskorrosion) samlas under kategori: Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga beständighet.

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen att vissa kompletteringar och förtydliganden med avseende på bland annat kopparkorrosion pga. saltanrikning i deponeringshål erfordras. SKB:s svar på SSM:s kompletteringsbegäran återfinns i dokumentet SKBdoc 1398013. SSM instämmer med remissinstansen om att utfällning av fasta faser och ackumulation av lösta ämnen i närheten av kapselytan påverkar förutsättningar för korrosion (Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.6, 5.11.4). Omfattningen av denna ackumulationsprocess begränsas dock av



materieöverföring mellan berg och återfyllnad respektive för deponeringshål med olika hydrauliska egenskaper (del II avsnitt 4.19.3 i samma rapport).

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden redovisar ett underlag för hur förångning av vatten kommer att kunna ske efter deponering av kapslarna och hur det förångade vattnet sedan kondenserar.

SSM:s svar:

Risken med förångning av vatten är saltanrikning vid kapselytan. Myndigheten begärde kompletteringar/förtydligande avseende saltanrikning invid kapselytan (SKBdoc 1398014). Efter kompletteringar har SSM bedömt underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3 belyser lokal kopparkorrosion i oxiderande miljö. De av SKB erhållna kompletteringarna är SKBdoc 1398013 samt SKB TR-13-27. SKBdoc 1398014 avhandlar saltanrikning invid kapselytan i mer detalj och är en bilaga till SKBdoc 1398013.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden redovisar ett underlag för hur lerbuffertens och kopparkapselns yta påverkas av salter vid förångning av grundvatten.

SSM:s svar:

Myndigheten begärde kompletteringar/förtydligande avseende saltanrikning invid kapselytan (SKBdoc 1398014). Efter kompletteringar har SSM bedömt underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3 belyser lokal kopparkorrosion i oxiderande miljö. De av SKB erhållna kompletteringarna är SKBdoc 1398013 samt SKB TR-13-27. SKBdoc 1398014 avhandlar saltanrikning invid kapselytan i mer detalj och är en bilaga till SKBdoc 1398013.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden redovisar ett underlag för hur förhöjd salthalt i grundvatten orsakad av förångning kan ge korrosion av kopparytan.

SSM:s svar:

Myndigheten begärde kompletteringar/förtydligande avseende saltanrikning invid kapselytan (SKBdoc 1398014). Efter kompletteringar har SSM bedömt underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3 belyser lokal kopparkorrosion i oxiderande miljö. De av SKB erhållna kompletteringarna är SKBdoc 1398013 samt SKB TR-13-27. SKBdoc 1398014 avhandlar saltanrikning invid kapselytan i mer detalj och är en bilaga till SKBdoc 1398013.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Författaren anser att SKB inte har studerat saunaeffekten och därför inte har någon kännedom om de korrosionsförhållanden som råder i slutförvaret. I bilagan påpekas att SKB betraktar deponeringshålen som ett hermetiskt slutet system och att SKB uteslutit ångtransport till en ovanliggande återfylld deponeringstunnel.



SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB har beaktat och analyserat risk för och omfattning av materieöverföring mellan deponeringshål och deponeringstunnel med avseende på gasformig sulfid och ånga m.m. (t.ex. SKB TR-17-07, SKB TR-15-09). SSM instämmer dock med remissinstansen om att frågan är av relevans för bedömning av utvecklingen av den korrosionskemiska miljön i kapselns närhet, och att ytterligare analyser kommer krävas för att underbygga exempelvis acceptanskriterier för deponeringshål och deponeringstunnlar samt acceptanskriterier och detaljutformningen av buffert- och återfyllnadsmaterial.

Remisskommentar (SSM2014-1683-50, remissomgång 2):

Föreningarna vill framföra att det saknas tillräcklig information om hur saunaeffekten kan påverka korrosion av kopparkapseln.

SSM:s svar:

Se SSM:s svar till föregående remisskommentar.

Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan

Remisskommentaren har framtagits av Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

De snabbaste och därmed farligaste nedbrytningsmekanismerna för kapseln innefattar:

1. korrosion i gasfasmiljö vid förhöjda temperaturer,
2. korrosion pga. anrikning av salter i deponeringshålen,
3. korrosion förorsakad av läckströmmar,
4. försprödning pga. svavelupptag i kopparmetallen,
5. försprödning pga. av väteupptag i metallen,

Punkten 2 kommenteras nedan. Punkt 1, 3 och 4 samlas och bemöts under kategori: Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga beständighet. Punkt 5 bemöts under kategori: Väteförsprödning.

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen om att de ovanstående processerna inte definitivt har kunnat avfärdas men konstaterar samtidigt att detta inte utgör ett krav för analysen av slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga. Baserat på kopparkapselns dimensionering kan inverkan av korrosionsprocesser accepteras så länge kapseln upprätthåller erforderlig skyddsförmåga under tillräckligt lång tid. Remissvaret innehåller inte några specifikationer av under vilka förutsättningar som de omnämnda processerna skulle resultera i en oacceptabel påverkan på kapselns långsiktiga integritet respektive förvarets skyddsförmåga. Det finns inte heller några detaljerade kommentarer kring SKB:s motsvarande analyser och ej heller detaljer kring relaterade förhållanden i slutförvarsmiljön. SSM har därför svårt att bedöma giltigheten hos den övergripande slutsatsen att SKB:s säkerhetsanalys är behäftad med fundamentala brister. I den återopade referensen SSM 2012:17 finns relevant ytterligare information, men inte heller här finns ett spårbart underlag som motiverar de postulerade korrosionsskadorna på kopparkapslar med beaktande av tillgänglig information om förväntade slutförvarsförhållanden. Beträffande ackumulering av lösta ämnen i anslutning till kapselytorna som ett resultat av avdunstning samt dess koppling till gropkorrosionsrisk bedömer SSM följande:

2. SSM instämmer med remissinstansen om att utfällning av fasta faser och ackumulation av lösta ämnen i närheten av kapselytan kan förekomma och under vissa förutsättningar kan påverka kapselkorrosion (Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.6, 5.11.4). Tidsförlopp och påverkan på korrosionsförhållanden domineras av temperaturutveckling samt materieöverföring mellan respektive deponeringshål och omgivande berg och återfyllnad. SSM bedömer att omfattning av processen kan förutsägas och begränsas genom att beakta de hydrauliska egenskaperna för respektive deponeringshål, samt den detaljerade utformningen av buffert/återfyllnad (Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3).

Uppsala universitet

Remisskommentar (SSM2011-3522-15, remissomgång 1):

Uppsala universitet efterlyser ytterligare utredningar kring risker i samband med kopparkorrosion:

1. Korrosionsformerna betraktas var och en för sig. Det finns behov av undersökningar kring hur samtliga korrosionsprocesser samtidigt påverkar kapseln
2. Flera studier av allmän och lokal sulfidkorrosion är önskvärda eftersom det finns mindre data i förhållande till korrosion av koppar under oxiderande betingelser. Underlaget för bedömning av lokal korrosion i reducerande miljö är även litet.
3. Inverkan av mikrobiell sulfatreduktion respektive transport av korroderande ämnen i sprickor i bentoniten.
4. Korrosion av segjärnsinsatsen behöver studeras ytterligare.
5. Inverkan av användning av en offeranod för att skydda kopparkapseln

Hur påverkar bl. a. masstransport i buffert, mikrobiell aktivitet, etc. korrosion?

SSM:s svar:

Punkt 1. SSM delar i många avseenden remissinstansens synpunkter och då i synnerhet rörande behovet av att mera utförligt beakta en samverkan av olika korrosionsprocesser. SSM anser att SKB i eventuella kommande steg i programmet bör eftersträva ett mer integrerat arbetssätt i detta avseende även om detta sannolikt är förknippat med vissa praktiska problem vid genomförandet av experiment.

Punkt 2. SSM instämmer även med Uppsala Universitet om att kunskaper kring olika typer av sulfidkorrosion är mindre omfattande i jämförelse med det mycket väl undersökta området korrosion av koppar under oxiderande betingelser. SSM konstaterar ändå att ett betydande antal studier har genomförts under olika förhållanden och att dessa innefattar både allmän korrosion och risk för lokal sulfidkorrosion orsakad av en passiverande sulfidfilm. Underlaget bedöms därför vara tillräckligt för detta prövningssteg. SSM konstaterar att SKB också har genomfört ett långvarigt forskningsarbete kring förekomst och inverkan av sulfatreducerande mikrober både i bentonit och i berget, vilket har en direkt koppling till omfattningen och betydelsen av sulfidkorrosion i slutförvarsmiljö. Även om det finns vissa frågeställningar kring hur mycket näringsämnen och substrat som finns tillgängligt för att underhålla mikrobiell sulfatreduktion på lång sikt i bufferten och i slutförvarsmiljön i stort, anser SSM att underlaget är tillräckligt för detta prövningssteg för att kunna göra en bedömning av påverkan på kapselns beständighet. Risk för omfattande mikrobiell sulfatreduktion i buffert och återfyllnad skulle kunna föranleda krav på begränsning av mängden tillfört oxiderbart organiskt material.



Punkt 3. SSM konstaterar att sprickor i bentoniten under återmättnadsfasen inte förväntas leda vatten tack vare kapillärkrafter och bentonitens vattenhållande förmåga. En homogenisering av bentoniten sker vartefter som vattenmättnad uppnås och initiala sprickor förväntas självläka. Eventuella preferentiella transportvägar i bentonit på grund av erosionsprocesser har beaktats i SKB:s redovisning.

Punkt 4. Avseende korrosion av segjärnsinsatsen så har processen en betydelse för kapselns skyddsförmåga under en viss tid om mindre genomgående hål eller sprickor skulle förekomma i kopparhöljet. SSM konstaterar dock att säkerhetsbetydelsen är begränsad med tanke på att fallet avser situationer där kapselns isolering har brutits och att SKB i viss omfattning redan studerat denna fråga både experimentellt och teoretiskt. SSM anser dock att processen även bör beaktas med avseende på buffertens säkerhetsfunktion kopplad till fördröjning av uttransport av radionuklider och i termer av hur järn interagerar med buffertmaterial. Järn-buffertinteraktioner bör i synnerhet belysas med beaktande av betydelsen av en eventuell risk för tidiga brott av kopparhöljet samt tidig exponering och korrosion av segjärnsinsatsen.

Punkt 5. SSM anser att det mot bakgrund av befintlig kunskap kring kopparkorrosion inte finns något behov av användning av en offeranod. Detta är en möjlig konstruktionslösning men som åtgärd skulle den i sig skapa ett omfattande behov av ytterligare utredningar. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10 och 5.11.

Spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion

I denna kategori samlas de remissynpunkter som rör spänningskorrosion i sulfidmiljö. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning enligt remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes, liksom om kommentaren inkom under remissomgång 1 eller 2.

Lokal korrosion i form av spänningskorrosion under reducerande betingelser i sulfidmiljö har granskats av SSM. SSM har även granskat motsvarande process under den inledande oxiderande fasen men bedömer att denna fas sannolikt är för kortvarig för att möjliggöra en betydelsefull påverkan på kapseln. Denna fas ingår inte heller bland mark- och miljödomstolens utpekade osäkerheter och den kommenteras därför inte ytterligare. Granskningsresultatet redovisas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.7.

SSM:s bedömning om processen:

SSM anser att spänningskorrosion inte kan uteslutas som en mekanism som långsiktigt kan initiera sprickbildning av kopparkapseln när denna är exponerad i en sulfidmiljö med förhållandevis höga sulfidhalter. Spänningskorrosionsrisken bedöms dock begränsas av att höga sulfidhalter invid kapselytorna som medför risk för bildning av en passiverande sulfidfilm och konstaterad spänningskorrosionsrisk är mindre sannolika. Eftersom det krävs dragspänningar i kapselhöljet för att möjliggöra en sprickpropagering är den gradvisa pålastningen av kapseln i samband med buffertsvällning samt höljets långsamma krypdeformation även av stor betydelse. Slutförvarets utformning och miljö medför att kapselns främst erhåller tryckspänningar i slutförvaret vilket generellt talar emot spänningskorrosionsrisk. Små regioner med dragspänningar i kapselns hörnregioner kan dock bli bestående under förhållandevis lång tid. SSM anser att eftersom spänningskorrosionsrisk inte har kunnat uteslutas helt bör området prioriteras högt i SKB:s fortsatta program. Skulle ytterligare information som talar för spänningskorrosionsrisk framkomma bör slutförvarets detaljutformning justeras för att minimera förutsättningar för ackumulation av höga sulfidhalter och bestående dragspänningar i höljet.

Kopplingen till processens behov av en passiverande sulfidfilm för att kunna induceras medför att bakgrunden till SSM:s bedömning kring denna process delvis överensstämmer med motsvarande för gropkorrosionsrisken som beskrivs ovan. Förutsättningen för att en sådan film ska kunna bildas på kopparytorna kan kopplas till förekomsten av förhöjda halter av sulfid som bildats i buffert och återfyllnad under återmättnadsperioden då viss mikrobiell aktivitet i dessa material möjliggör produktion av sulfid genom mikrobiell sulfatreduktion. Den mikrobiella aktiviteten avstannar gradvis i takt med att bufferten svälltryck byggs upp och omständigheter som möjliggör ackumulation av betydande mängd löst sulfid i anslutning till kopparytorna är således kopplade till återmättnadsförloppet. För stor mikrobiell sulfidbildning och en potentiell förhöjd halt löst sulfid invid kopparytorna kan sannolikt uteslutas, om så bedöms nödvändigt, genom exempelvis kravställning av mängder och förekomstformer av organiskt material i buffert- och återfyllnadsmaterialen. I fallet spänningskorrosion tillkommer dock, utöver förutsättningen att en passiverande sulfidfilm har bildats på kopparhöljet, även att utsatta regioner av kopparhöljet endast avser de förhållandevis små områden i kopparhöljet i vilka dragspänningar förekommer under en viss period i slutförvarets långsiktiga utveckling och att placeringen av dessa områden måste sammanfalla med området där en passiverande sulfidfilm har bildats. Bakgrunden är att en passiverande sulfidfilm som påverkas av dragspänningar möjliggör en kanalisering av sulfidjoner som inte förbrukas av allmän korrosion till en sprickspets på ett sådant sätt som möjliggör sprickpropagering. SSM anser att SKB förutom ytterligare experimentella undersökningar av processen behöver genomföra en utförligare analys kring förutsättningar för spänningskorrosion i

slutförvarsmiljön samt mer explicit redovisa konsekvenser kopplat till att processen kommer till stånd med beaktande av inte bara kemiska betingelser och fall som innefattar höga sulfidhalter utan även lastsituationen i deponeringshåll med hela intervallet av återmättnadstider.

Beträffande en eventuell samverkan med den så kallade saunaeffekten och ackumulation av kloridjoner i kapselns närområde så visar experimentella resultat att höga kloridhalter ger upphov till mer porösa sulfidfilmer i jämförelse med låga kloridhalter (Chen m.fl., 2011), vilket snarare skulle minska risken för spänningskorrosion. Skulle en kompakt passiverande sulfidfilm dock redan ha bildats innan exponeringen för höga kloridhalter kan möjligen höga kloridhalter bidra till att destabilisera sulfidfilmen (SSM Report 2016:30) och således underlätta förutsättningar för lokal korrosion som gropkorrosion och spänningskorrosion.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram ett underlag för hur spänningskorrosion kan ske i koppar vid närvaro av svavel.

SSM:s svar:

SKB har kompletterat ansökan med underlag rörande spänningskorrosion i sulfidmiljö (SKBdoc 1398013). SSM har också genomfört egna experimentella undersökningar av frågan (SSM Report 2017:02). SSM konstaterar att spänningskorrosion inte helt kan uteslutas i slutförvarsmiljön vid höga sulfidhalter. Det bör dock med rimliga åtgärder gå att undvika omständigheter som möjliggör ackumulation av betydande mängd löst sulfid i anslutning till kopparytorna. Dessa omständigheter kan sannolikt uteslutas baserat på åtgärder som säkerställer att en för stor mikrobiell bildning av sulfid i återfyllnaden och bufferten kan undvikas, exempelvis kravställning av mängder och förekomstformer av organiskt material i dessa material. Vidare bör ytterligare studier av grundläggande mekanismer genomföras för att tydligare definiera omgivningsbetingelser vilka medför spänningskorrosionsrisk. SSM bedömer det befintliga underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. SKBdoc 1398013 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.4.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram underlag för vilka andra ämnen som skulle kunna orsaka spänningskorrosion.

SSM:s svar

SSM begärde komplettering rörande hur oxidanter från radiolys påverkar spänningskorrosion (SKBdoc 1398013). SKB har tidigare sammanställt information kring experimentella studier kring risk för spänningskorrosion av koppar orsakat av olika kemiska ämnen (SKB TR-10-67, tabell 6.1). SSM bedömer underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Se SKBdoc 1398013 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.4.

Väteförspredning

I denna kategori samlas de remissynpunkter som rör väteförspredning av kopparmaterial. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning enligt remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes, liksom om kommentaren inkom under remissomgång 1 eller 2.

Väteförspredning av kopparhöljet har granskats av SSM. Granskningsresultatet redovisas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.12.5.

SSM:s bedömning om processen:

SSM anser att i huvudsak två mekanismer är av relevans för vätes möjliga påverkan på kopparhöljets mekaniska egenskaper. Den första väteförspredningsmekanismen kan betecknas vätesjuka och uppkommer av att väte som tränger in i kopparmaterial reducerar lokalt förekommande kopparoxid och bildar vattenånga. Det bildade vattnet ansamlas på grund av dess låga mobilitet i koppargittret, typiskt vid korngränser, med förspredning av kopparmaterial som resultat. SSM kan konstatera att sammanhängande oxidlingor har påträffats efter FSW-svetsning vilket innebär att skadlig oxidreduktion från inträngande väte potentiellt skulle kunna äga rum. SSM bedömer dock att SKB kommit så pass långt i sin utveckling av FSW-metoden att det finns möjligheter att i kommande steg minimera förekomst av sammanhängande oxidstråk i svetsfogen främst genom användning av skyddsgasen argon under svetsningen. Nyligen rapporterade resultat från SKB och dess systerorganisation i Finland, Posiva, visar att man gjort stora framsteg i detta avseende (Posiva SKB Report 02). Den andra förspredningsprocessen är utskiljning av vätegasbubblor. SSM bedömer dock att utskiljning av vätegasbubblor framförallt är kopplad till artificiell elektrokemisk väteladdning av koppar där kopparmaterial exponeras för mer omfattande mängder väte än vad som kan betraktas som naturligt i slutförvarsmiljön. Även om utskiljning av vätegasbubblor kunnat observeras under vissa typer av experiment förekommer processen sannolikt inte under förhållanden i slutförvarsmiljö.

SSM anser att risken för väteinträngning utgör ett tungt vägande skäl för att minimera risk för oxidföreningar i kopparhöljet. Andra möjliga mekanismer för hur höljets mekaniska egenskaper påverkas av väteladdning har även identifierats och bör ytterligare belysas, dels genom studier av mekanismer för tillförsel och avgasning av väte för koppar i slutförvarsmiljön, dels genom mekanisk provning av väteladdad koppar. Resultat från denna typ av studier som delvis redan har genomförts behöver beaktas vid framtagning av uppdaterade dimensionerande hållfasthetsanalyser av kopparhöljets långsiktiga integritet.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram ett underlag för hur svavel och väte kan orsaka förspredning av koppar

SSM:s svar:

SSM begärde komplettering rörande bland annat väteförspredning och bedömer befintligt underlag som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. SKBdoc 1398013, SKBdoc 1399615 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.12 och i synnerhet 4.12.5.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram ett underlag för hur bildandet av kopparoxider vid friktionssvetsning kan påverka kapselns beständighet.

SSM:s svar:

SSM begärde komplettering rörande tillverkningsaspekter för ingående delar i kapseln och bedömer befintligt underlag som tillräckligt efter kompletteringar för att kunna ta ställning till ansökan. SKB har redovisat information om användning av skyddsgas i syfte att minimera förekomst av kopparoxider i svetsen (Posiva SKB report 02). SKBdoc 1371851 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 3.4.4.

Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan

Remisskommentaren har utarbetats av Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

De snabbaste och därmed farligaste nedbrytningsmekanismerna för kapseln innefattar:

1. korrosion i gasfasmiljö vid förhöjda temperaturer,
2. korrosion pga. anrikning av salter i deponeringshålen,
3. korrosion förorsakad av läckströmmar,
4. försprödning pga. svavelupptag i kopparmetallen,
5. försprödning pga. av väteupptag i metallen,

Nedan kommenteras punkten 5. Punkt 1, 3 och 4 samlas och kommenteras under kategori: Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga korrosionsbeständighet. Punkt 2 bemöts under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid respektive spänningskorrosion på grund av sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion och spänningskorrosion.

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen om att de ovanstående processerna inte definitivt har kunnat avfärdas men konstaterar samtidigt att detta inte utgör ett krav för analysen av slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga. Baserat på kopparkapselns utformning och dimensionering kan viss inverkan av försprödningsprocesser accepteras så länge kapseln upprätthåller erforderlig skyddsförmåga under tillräckligt lång tid. Remissvaret innehåller inte några specifikationer av under vilka förutsättningar som de omnämnda processerna skulle resultera i en oacceptabel påverkan på kapselns långsiktiga integritet respektive förvarets skyddsförmåga. Det finns inte heller några detaljerade kommentarer kring SKB:s motsvarande analyser och ej heller detaljer kring relaterade förhållanden i slutförvarsmiljön. SSM har därför svårt att bedöma giltigheten hos den övergripande slutsatsen att SKB:s säkerhetsanalys är behäftad med fundamentala brister. I den åberopade referensen SSM 2012:17 finns relevant ytterligare information, men inte heller här finns ett spårbart underlag som motiverar de postulerade korrosionsskadorna på kopparkapslar med beaktande av tillgänglig information om förväntade slutförvarsförhållanden. Beträffande den ovan angivna nedbrytningsmekanismen bedömer SSM följande:

5. SSM utesluter inte att väteupptag kan ha en viss påverkan på koppars krytegenskaper. SSM anser att den största risken för påverkan på koppars mekaniska egenskaper i första hand föreligger i väteets förmåga att reagera med oxidstråk som kan ha uppstått i gods och förslutningssvetsar men att detta kan hanteras genom det val av kopparmaterial som görs (OFF) liksom genom åtgärder för



att minimera oxiduppkomst i materialet, såsom tillämpning av skyddsgasen argon vid FSW-svetsning. Påverkan på koppars materialegenskaper från miljön diskuteras i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.12.5.

Joniserande strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförspredning.

I denna kategori samlas inkomna synpunkter som rör strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförspredning. För fullständighetens skull inkluderas samtliga remissynpunkter som rör strålningsinducerade kapseldegraderingsprocesser. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning enligt remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes, liksom om kommentaren inkom under remissomgång 1 eller 2.

SSM:s bedömning om strålningsinducerade degraderingsprocesser:

Generellt rörande strålningsinducerade degraderingsprocesser är att tiden med ett betydande gammastrålfält invid kapselns ytteryta är förhållandevis kort. Detta då kapselns tjocklek medför en betydande strålskärning liksom att halveringstiden för den i sammanhanget dominerande nukliden Cs-137 är 30 år, vilket medför en väldefinierad begränsning av den tidsperiod då strålningsinducerade processer har en betydelse.

Baserat på den begränsade tidsperioden med betydande gammastrålfält invid kapselytan anser SSM att allmän korrosion medför en liten ackumulerad produktion av radiolytiska oxidanter och en allt för begränsad reduktion av kopparkorrosions tjocklek för att ha någon väsentlig påverkan på kapselns skyddsförmåga.

Beträffande strålningsinducerad lokal korrosion av koppar kan SSM konstatera att nyligen publicerade resultat visar att ett gammastrålfält kan ge upphov till en ökning av den lokala korrosionshastigheten och gropkorrosion av koppar (Björkbacka, 2015). SSM anser att även om omfattningen av dessa korrosionsangrepp är liten så skulle exempelvis en passivering av oxidlagret under inverkan av strålfältet kunna ha betydelse för risken för lokala korrosionsangrepp under det fortsatta korrosionsförloppet. SSM anser dock att även om frågeställningar kring ojämna korrosionsangrepp i slutförvarsmiljön kvarstår så begränsas säkerhetsbetydelsen sannolikt av att tiden för bildning av radiolytiska oxidanter som är tillgänglig för kopparkorrosion är förhållandevis kort.

SSM konstaterar att det finns studier som visar på att väteinträngning i koppar kan ske i gammabestrålat vatten (Lousada m.fl., 2016) genom att väte från vattenradiolys tränger in i metallen. Detta observerades i laboratorium under förhållanden med höga strålfält men processen kan också förväntas i mindre omfattning i slutförvarsmiljö främst under tidiga faser av slutförvarets utveckling. Denna effekt kan behöva beaktas i analyser av kopparkorrosions tjocklek och långsiktiga deformation.

SSM anser att risken för att segjärn kan bli sprödare vid gammabestrålning är låg men att den inte helt kan uteslutas. SSM bedömer att fortsatta bestrålningsförsök av segjärn behöver göras med lägre accelerationsfaktorer samt att bestrålningsnivåer överstigande de som förväntas i slutförvarsanläggningen bör användas.

European Committee on Radiation Risk (ECRR)

Remisskommentar (SSM2011-3522-35, remissomgång 1):

ECRR anser att det saknas en diskussion av effekten av höga strålfält på:

1. den metalliska integriteten för mekaniska system och kapsel under 100 000 år.
2. vattenradiolys vid kapselytan och bildning av peroxid och andra oxiderande species som kan angripa kopparen.



3. lösligheten av koppar som är starkt laddat på grund fotoelektroninduktion från gammastrålning i vatten.
4. påverkan av redoxparet Fe/Cu på integriteten hos en kapsel som har skadats så att Fe/Cu-gränssnittet exponeras för elektrolyt med måttlig jonstyrka.

ECRRs ursprungliga remissynpunkter på engelska översattes till svenska av SSM. För fullständighetens skull återges de på originalspråket nedan:

1. the metallic integrity of the mechanical support systems and the canister over 100,000 years
2. the radiolysis of water at the surface of the canister and the production of peroxides and other oxidizing species that would attack copper
3. the solubility of copper which is highly charged due to photoelectron induction by gamma radiation in aqueous media
4. the effect of the electrochemical couple Fe/Cu on the integrity of a canister which has been damaged and has allowed moderate ionic strength electrolyte access to the Fe/Cu interface.”

SSM:s svar:

1. SSM bedömer att utvecklingen av SKB:s föreslagna kopparkapsel inklusive segjärnsinsatsen är tillräckligt långt gången för bedömningen att den är lämplig och har förutsättningar att uppfylla erforderliga krav. SSM konstaterar dock att representationen av kapselns egenskaper i säkerhetsanalyser behöver preciseras och uppdateras vart eftersom ny kunskap och ny information från tillverknings- och provningsarbetet tillkommer.
2. SSM konstaterar att en sådan påverkan som remissinstansen föreslår kommer att förekomma, men att effekten är liten tack vare kapselns strålskärning och tack vare att det betydande gammastrålfältet som förekommer i anslutning till vattenfasen är i perspektivet långsiktig säkerhet efter förslutning förhållandevis kortlivat.
3. SSM konstaterar att den påverkan gammastrålningen i första hand har på kopparmaterialet rent kemiskt är genom korrosion från vattenradiolysprodukter som reagerar med kopparmaterialet. Processen som beskrivs i denna fråga bedöms ha liten betydelse. Processen har heller inte rapporterats i nyligen publicerade studier av gammabestrålat kopparmaterial i kontakt med vatten (Lousada m.fl. 2016).
4. SSM konstaterar att galvanisk korrosion kan ha en betydelse för tiden mellan den då en mindre genomgående kapselskada har uppstått och den då kopparkapselns skyddsförmåga helt har gått förlorad. Frågan bedöms dock ha en liten säkerhetsbetydelse då den enbart är aktuell för tiden efter det att en genomgående kapselskada har uppstått.

Kungliga Tekniska Högskolan

Remisskommentaren har framtagits av professor Mats Jonsson vid skolan för kemivetenskap.

Remisskommentar (SSM2011-3522-27, remissomgång 1):

SR-Site behöver kompletteras med nyligen tillkommen information avseende strålningsinducerade processer som rör kapsel och buffert.



SSM:s svar:

SSM har begärt komplettering inom dessa områden (SKBdoc 1398013) och de studier som avses i remissvaret har beaktats i granskningen av SR-Site.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram kunskap om hur koppar korroderar i en strålmiljö.

SSM:s svar:

SSM begärde bland annat kompletteringar rörande strålningsinducerad korrosion på kopparhöljets insida (SKBdoc 1419961) och har efter det bedömt underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav även att det tas fram ett underlag som baserad på internationella erfarenheter av hur koppar beter sig i en strålmiljö.

SSM:s svar

SSM konstaterar att SKB har sammanställt resultat från både egen och internationell forskning i SKB TR-10-67. Vissa referenser har dessutom tillkommit under kompletteringsfasen. SSM bedömer att befintligt underlag efter erhållna kompletteringar inom området (SKBdoc 1398013) är tillräckligt för att ta ställning till ansökan. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.3.

Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan

Remisskommentaren har framtagits av Per Claesson och Jinshan Pan.

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

Frågan kring hur strålfältet kring kapseln påverkar kopparkorrosion har inte blivit tillräckligt utredd.

SSM:S svar:

SSM instämmer med remissinstansen att viss ytterligare forskning kring denna fråga är befogad. Tidsramen för en betydande påverkan är dock förhållandevis kort med beaktande av att gammastrålfältet avklingning kan kopplas till halveringstiden för den dominerande radionukliden cesium-137 på cirka 30 år. SSM konstaterar att experimentella data och bildning av radiolytiska oxidanter under dessa tidskalor visar på en liten påverkan på kopparhöljets tjocklek (Björkbacka, 2015). SSM utesluter dock inte helt att andra effekter kan ha en betydelse för kopparkapslarnas integritet så som att gammastrålfältet medför en passivering av oxidlager på kopparen, vilket i sin tur under en viss tid skulle kunna påverka förutsättningar för lokala korrosionsangrepp.

Övriga remissynpunkter som rör kopparkapseln och dess långsiktiga beständighet

I denna kategori samlas övriga synpunkter som på något sätt kopplar till kapsel-degradering som en följd av olika typer kemiska och mekaniska processer. Synpunkterna listas i alfabetisk ordning enligt remissinstansernas namn. Diarienumret för det inkomna remissvaret i vilket remisskommentaren står att läsa redovisas i kommentarsrubriken inom parentes.

Herbert Henkel

Remisskommentar (SSM2014-1683-33, remissomgång 2):

Inkapslingen bör istället göras med ett elektriskt isolerande material, till exempel keramer och de inkapslade volymerna bör vara avsevärt mindre. Detta för att minimera jordströmmars effekt på kopparkapslarna. Dessa strömmar är inte starka men den ackumulerade effekten under tusentals år kan bli avsevärd. Det föreslagna systemet är som skapt för korrosion.

SSM:s svar:

SSM har en annan ståndpunkt i sakfrågan än remissinstansen. Kapslar av keramiskt material undersöktes i tidiga faser av SKB:s program. Denna kapselvariant ansågs dock vara problematisk pga. materialets sprödhet och risken för långsam spricktillväxt från initiala defekter. SSM bedömer att det sammantaget inte finns skäl att betrakta kapslar av keramiskt material som ett uppenbart bättre alternativ än den nuvarande kapselutformningen. Gällande konsekvenserna av jordströmmar bedömer SSM att SKB tagit fram en godtagbar redovisning kring inverkan av läckströmskorrosion på kopparkapslarnas integritet. Granskningen av SKB:s beräkningar av SSM:s externa experter pekar på att de av SKB genomförda beräkningsscenarierna ger en realistisk beskrivning av situationen i Forsmark (SSM Technical Note 2016:05, SSM Technical Note 2016:16). Se även Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 8.3.

Kungliga Tekniska Högskolan

Remisskommentaren har framtagits av tekn.dr Peter Szakálos, yt- och korrosionsvetenskap, docent Olle Grinder, materialens processvetenskap samt professor Seshadri Seetharaman, materialens processvetenskap.

Remisskommentar (SSM2011-3522-27, remissomgång 1):

Remissinstansen lyfter fram tre korrosionsprocesser som de anser fordrar ytterligare kompletterande information från SKB. Dessa processer är kopparkorrosion pga. anrikning av salter i deponeringshålen (saunaeffekten), kopparkorrosion i gasfasmiljö, kopparkorrosion förorsakad av läckströmmar. Den första processen redovisades och bemöttes under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen att vissa kompletteringar och förtydliganden med avseende på korrosionsprocesser erfordras. SKB:s svar på SSM:s kompletteringsbegäran återfinns i dokumentet SKBdoc 1398013.

Kopparkorrosion i gasfas: SSM anser att SKB i kompletteringsförfarandet tillräckligt väl analyserat betydelsen av transport av gasformig vätesulfid i en omättad buffert (SKBdoc 1437441), vilket SSM har kommenterat i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slut-



förvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.5. SSM har även kommenterat innebörden av läckage av syrgas genom deponeringshålspluggen (SSM 2018:07 del II 4.10.2) samt innebörden av andra reaktiva gaser i slutförvarmiljön så som metan och vätgas (SSM 2018:07 del II avsnitt 4.6.4).

Läckströmskorrosion: SSM har inte samma ståndpunkt som remissinstansen rörande kopparkorrosion orsakad av läckströmmar då myndigheten anser att de av SKB beräknade små korrosionsangreppen kan motiveras av i synnerhet den korta exponeringstiden för denna process sett till hela tidsskalan för säkerhetsanalysen (SSM 2018:07 del II avsnitt 8.3.3).

Länsstyrelsen i Uppsala län

Remisskommentar (SSM2011-3522-25, remissomgång 1):

Länsstyrelsen efterfrågar en beskrivning av hur den eventuella förekomsten av både luft och vatten i luftspalten närmast kapseln, innan vattenmättnad har inträtt, påverkar funktionen hos kapseln respektive bufferten.

SSM:s svar:

SKB redogör för inverkan av kvarvarande luft i deponeringshålet och deponeringstunneln på buffertens egenskaper i SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.6. Den kvarvarande luften samt luften som tränger in till deponeringstunneln innan tunnelpluggen blir vattentät medför initialt oxiderande förhållanden i slutförvarsmiljön. Kvarvarande syre kan oxidera främst sulfidmineral, i första hand pyrit, i buffert och återfyllnad och kan förbrukas av mikrobiell aktivitet. Dessa processer bedöms ha en försumbar påverkan på buffertens och återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Förbrukning av syre i buffert och återfyllnad minskar omfattningen av korrosion av koppar med kvarvarande syre. Efter att kvarvarande syre i gasfasen har förbrukats kan kvarvarande kväve och andra i slutförvarsmiljön mindre reaktiva gaser bli bestående under den fortsatta återmättnadsfasen. Närvaron av även en icke-reaktiv gasfas kommer att påverka transportprocesser som grundvattenströmning och diffusion i buffert och återfyllnad.

Kvarvarande syre medför att oxiderande förhållanden upprätthålls under en viss tid i slutförvarsmiljön. Under oxiderande förhållanden förväntas ett antal olika korrosionsprocesser kunna ske. Omfattningen av dessa bedöms dock vara förhållandevis liten i och med att tidperioden under vilken oxiderande förhållande förväntas råda är kort sett till hela analysperioden. Denna fråga granskas och bedöms i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.7.1.

Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden genomför realistiska laboratorieförsök av hur koppar och lera beter sig i en simulerad slutförvarsmiljö.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB har genomfört ett antal försök av den typ som föreslås, även om krav på ytterligare försöksverksamhet i en representativ slutförvarsmiljö på förvarsdjup kan förväntas i samband med en kommande uppförandefas. Rent generellt har SKB ansvaret för att utforma och utvärdera sin försöksverksamhet. SSM har som en del av kompletteringsförfarandet och granskningen i stort identifierat frågor och informationsbehov för innevarande och kommande steg i prövningen. SSM bör dock inte specificera exakt hur dessa frågor ska besvaras eftersom detta skulle innebära en form av detalj-



styrning av SKB:s verksamhet som inte är förenlig med SSM:s roll i tillståndsprövningsprocessen. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.8 om kvalitetssäkring av korrosion av SKB:s korrosionsförsök och avsnitt 4.10.9 för bedömning av SKB:s fältförsök med fokus på kopparkorrosions.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar upp och analyserar försökspaketet LOT S2 i Äspö-laboratoriet.

SSM:s svar:

Rent generellt har SKB ansvaret för att utforma och utvärdera sin försöksverksamhet. SSM har som en del av kompletteringsförfarandet och granskningen i stort identifierat frågor och informationsbehov för innevarande och kommande steg i prövningen. SSM bör dock inte specificera exakt hur dessa frågor ska besvaras eftersom detta skulle innebära en form av detaljstyrning av SKB:s verksamhet som inte är förenlig med SSM:s roll i tillståndsprövningsprocessen. I denna konkreta fråga har SSM svårt att tro att resultat från analys av försökspaketet S2 skulle ge några avgörande resultat som inte redan är kända. Försökspaket som liknar S2 har redan tagits upp och har analyserats av både SKB och andra organisationer. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.8 och 4.10.9.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden ger en beskrivning av hur olika korrosionsprocesser och försprödningsprocesser kan påverka varandra och vilka kumulativa effekter som kan uppstå.

SSM:s svar:

SSM har begärt kompletteringar inom dessa områden och bedömer befintligt underlag som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. SSM konstaterar att korrosion av koppar under reducerande betingelser kan medföra tillförsel av väte i kopparmaterialet, vilket kan påverka höljets mekaniska egenskaper exempelvis genom reduktion av oxidslingor i svetsen. SKB:s redovisade åtgärder för att minimera dessa effekter bedöms vara lämpliga, men SSM anser även att vissa ytterligare utredningar behöver göras inom kommande steg. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.12 och 9.2. Se även SKB:s komplettering SKBdoc 1420051.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram underlag som beskriver krypduktiliteten för koppar i slutförvarsmiljön.

SSM:s svar:

SKB redovisar sitt ursprungliga experimentella program för krypprovning och bestämning av krypduktilitet i SKB TR-09-32. SSM har sedan erhållit utökad information från SKB rörande krypprocessen och krypduktilitet och bedömer underlaget som tillräckligt för att ta ställning till ansökan. SSM efterfrågar dock ytterligare redovisning i kommande steg. SKB R-15-14, SKBdoc 1399768, SKBdoc 1458607 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.12 och 9.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att det inom kompletteringsfasen görs utredningar av läckströmsförhållanden i berggrunden i Forsmark och hur läckströmmar kan påverka kopparkapslarna och därmed säkerheten av slutförvaret.



SSM:s svar:

SKB har på uppmaning av SSM tagit fram kompletteringar med anledning av läckströmsförhållanden (SKBdoc 1398013, SKB TR-14-15). SSM har med stöd av bl.a. två oberoende uppdrag till externa experter kunnat ta ställning i sakfrågan (SSM Technical Note 2016:05; SSM Technical Note 2016:16). SSM bedömer befintligt underlag som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Läckströmskorrosion diskuteras i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 8.3.3.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna ställer som kompletteringskrav att sökanden tar fram scenarier, med konsekvensanalyser, som beskriver vad som händer om en viss del av kopparkapslarna läcker inom 1 000-årsperspektivet.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB har redovisat restsценарier med tillhörande konsekvensberäkningar som involverar att samtliga kapslar initialt har förlorat sin inneslutningsförmåga (SKB TR-10-50, kapitel 6). Analys av hypotetiska kapselbrott i samband med isostatlastfallet visar konsekvenser av att en respektive samtliga kapslar förlorar sin integritet efter 10 000 och 100 000 år (SKB TR-11-01, avsnitt 13.7.1). SKB:s beräkningar har granskats och utvärderats delvis med egna beräkningar av SSM respektive SSM:s externa experter. SSM har reproducerat SKB:s beräkningar kopplade till restsценарier med hjälp av två modelleringsgrupper (SSM Technical Note 2014:33, SSM Technical Note 2014:55). SSM har också relativt nyligen tagit fram kompletterade fall som belyser effekter av att kapslar hypotetiskt fallerar i olika omfattning och i olika tidsintervall (SSM Technical Note 2017:15). SSM bedömer befintligt underlag som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del I kapitel 4 och 9.

Remisskommentar (SSM2011-3522-38, remissomgång 1):

Föreningarna anser att sökanden inte har visat att den valda så kallade KBS-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle kommer att fungera och anser att det är vetenskapligt uppenbart att koppar inte kommer att fungera som tänkt i slutförvarsmiljö. Föreningarna anser vidare att sökanden inte genomfört nödvändiga vetenskapliga experiment för att visa om de konstgjorda tekniska barriärerna med kopparkapslar och bentonitlera kommer att fungera som avsett.

SSM:s svar:

SSM anser att tillräcklig information har tagits fram för att motivera den föreslagna slutförvarslösningen med en kapsel med ett hölje av koppar som korrosionsbarriärer i kombination med användning av en bentonitbuffert och det aktuella platsvalet. Detta innebär dock inte att myndigheten drar slutsatsen att det saknas behov av ytterligare experiment i senare steg av prövningen. SSM avser att ställa krav på genomförandet av program för verifierande tester som ska genomföras under den tid ett slutförvar är under uppförande och drift. Ytterligare experimentella studier för väl avgränsade problemställningar kommer sannolikt att krävas såväl under uppförandefasen innan idrifttagning och under drift innan förslutning. Detta hade med all sannolikhet även gällt andra tänkbara slutförvarslösningar.

SSM bedömer sammanfattningsvis underlaget som tillräckligt för att kunna ta ställning till ansökan. Granskningsrapport systemövergripande frågor (SSM 2018:04) del I, avsnitt 2 och 3 samt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) Sammanvägd bedömning.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47, remissomgång 2):

Föreningarna anser att titan sannolikt hade varit ett bättre inkapslingsmaterial. Alternativt borde en kopparkapsel täckas med ett lager titan eller rostfritt stål för att skydda kopparn under den varma perioden. I andra länder undersöks andra kapselmaterial som korrosionsbeständigt stål eller en stålkapsel med ett utvändigt tunnare lager koppar.

SSM:s svar:

SSM utesluter inte att andra materialkombinationer än koppar och segjärn skulle kunna vara användbara för inkapsling av använt kärnbränsle men utvecklingen av en sådan kapsel skulle innebära behov av att genomföra ett forskningsprogram innan det ens skulle bli aktuellt att göra en preliminär bedömning av en sådan kapsel. Det krävs även en utvecklingsfas för att demonstrera lämplig teknik för att tillverka, försluta och prova sådana kapslar för att göra det troligt att erforderliga krav kan uppfyllas. Det behöver även visas att tillverkning och provning kan ske med industriella metoder i fullskala. SSM konstaterar att remissvaret inte motiverar val av titan som kapselmaterial. Myndigheten är dock medveten om att en kapsel av rostfritt stål hade varit enklare att tillverka med kommersiellt tillgänglig teknik i jämförelse med koppar. Den kemiska miljön i granitiskt berg innebär dock normalt sett att en sådan kapsel beräknas att även i ett normalfall ha en väsentligt kortare livslängd än kopparkapseln. För den sistnämnda kapseln, som för närvarande utvecklas i Kanada med en kombination av stål och koppar, har det yttre kopparlagret föreslagits vara 3 mm tjockt. Ett 3 mm tjockt hölje bedöms vara mindre robust från korrosionssynpunkt än ett 50 mm tjockt kopparhölje, även om en sådan kapsel kan ha andra fördelar. Granskningsrapport systemövergripande frågor (SSM 2018:04) del 1, avsnitt 3.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47, remissomgång 2):

Föreningarna anser att det finns vetenskapligt stöd för att slutförvarets konstgjorda tekniska barriärer med kopparkapslar och lerbuffert förmodligen kommer att haverera och släppa ut radioaktiva ämnen redan efter några århundraden, och med stor sannolikhet inom 1 000 år, eftersom:

1. det är uppenbart att koppar inte är ett bra kapselmaterial i slutförvarsmiljön, och
2. att bufferten av bentonitlera inte kommer att fungera som tänkt i det torra berget i Forsmark eftersom leran inte kommer att svälla på det sätt som tänkt och därmed inte kunna skydda kopparkapseln.

SSM:s svar:

SSM har svårt att bedöma vilket vetenskapligt underlag som MKG åberopar som stöd för att materialval för kapseln inte är bra. Beträffande kemisk påverkan från korrosion bedömer SSM att korrosion i rent syrgasfritt vatten inte på något avgörande sätt påverkar kapselns långsiktiga skyddsförmåga (se SSM:s bedömning av korrosion i rent syrgasfritt vatten, Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) avsnitt 5.11.4).

Beträffande mekanisk påverkan från bufferten bedömer SSM att kopparkapseln har utformats för att motstå såväl det omgivande grundvattentrycket som buffertens svälltryck. SSM bedömer baserat på bl.a. SKB:s designanalyser och skadetålighetsanalyser att den föreslagna kapselkonstruktionen har tillräcklig integritet i detta avseende (se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.9). SSM konstaterar att bergets egenskaper påverkar tidsförloppet för kapselns pålastning men dock inte det maximala svälltrycket eller det maximala hydrostatiska trycket. Lasterna på kapseln är lägre innan svälltryck och hydrostatiskt tryck har blivit fullt utvecklat.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47, remissomgång 2):

Föreningarna anser att ett trovärdigt scenario för strålningspåverkan på människa och miljö som ett resultat av:

1. kopparkapslarnas haveri,
2. bentonitlerbuffertens nedbrytning,
3. en snabb nedbrytning av bränslet,
4. och att spridning till ytan sker genom deponeringstunnlar, större sprickor, schakt och tunnlar till ytan,

kommer att innebära strålningsnivåer vid ytan med doser som överskrider bakgrundsstrålningen med upp till tusen gånger och som är upp till hundratusen gånger högre än SSM:s gränsvärden.

SSM:s svar:

SKB redovisar i SR-Site ett antal scenarier som beskriver effekter av den typ som MKG beskriver i remissvaret (SKB TR-11-01, avsnitt 13.7.3). Dessa scenarier har dock kategoriserats som restscenarier med syftet att belysa betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner (SSMFS 2008:21). SSM konstaterar att analys av snabb nedbrytning/degradering av barriärer och säkerhetsfunktioner kan ha ett stort värde för förståelsen av barriärernas funktioner och samverkan. I avsaknad av ett genomarbetat underlag som motiverar uppkomst av förhållanden i slutförvarsmiljön som kan ge en snabb degradering av slutförvarets säkerhetsfunktioner är de dock att betrakta som hypotetiska fall.

Restscenarier väljs och studeras oberoende av sannolikheter och SKB använder dem därför inte för att utvärdera slutförvarets skyddsförmåga utifrån riskkriteriet 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken (SSMFS 2008:37). SSM:s granskning av SKB:s val av scenarier hittas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 2.4.4. SSM:s externa experter har reproducerat de resultat som SKB kommer fram till vid analys av restscenarier. I Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 7.4.2 finns SSM:s reproduktion redovisad och i avsnitt 7.5.4 finns SSM:s bedömning.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Författaren anser att gränsskiktsskorrosion är en aggressiv korrosionsmekanism som kommer äga rum i en zon mellan gas- och vattenfas.

SSM:s svar:

Detta är en korrosionsprocess som inte har omnämnts i SKB:s säkerhetsanalys. SSM bedömer dock att tack vare bentonitbuffertens vattenhållande egenskaper och den fuktvandring som äger rum från regioner i bufferten med hög fukthalt till regioner med låg fukthalt, respektive från regioner med hög temperatur till regioner med lägre temperatur, kommer det med all sannolikhet inte finnas en stationär ”vattenyta” eller vattennivå i ett deponeringshål på det sätt som förespeglas i bilagan. Förutsättningar för denna korrosionsform anses därför inte föreligga i slutförvarmiljön.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Författaren anser att förekomst av vissa reaktiva gaser eller lösta ämnen kraftigt accelererar kopparkorrosion i fuktig gasatmosfär. I bilagan påpekas att även spårmängder av sulfid kraftigt kan accelerera kopparkorrosion i fuktig gasatmosfär.

SSM:s svar:

SKB har beskrivit dessa processer i sin säkerhetsanalys inklusive dess kompletteringar (t.ex. SKBdoc 1437441). SSM konstaterar att tillförd eller bildad sulfid förbrukas vid själva korrosionsprocessen och att en kvantitativ analys baserad på massbalanser bör



kunna gränssätta korrosionseffekten (SKB TR-10-46). En kompletterande analys kring betydelsen av sulfid tillförd från deponeringstunnlarna har också levererats av SKB till SSM som en del av kompletteringsförfarandet vid granskning av ansökan (SKBdoc 1437441). Analysen visar att korrosionsangreppen skulle kunna ha en betydelse, men med all sannolikhet inte i oacceptabel omfattning.

SKB har i sin kapselprocessrapport (SKB TR-10-46) redogjort för inverkan av salpetersyra som kan bildas pga. radiolys av kväve i spalten mellan kapsel och buffert under återmättnadsfasen. Effekten beräknas vara försumbar i förhållande till kapselns tjocklek och processer kan bara pågå under de första 100-talen år då det existerar ett betydande gammastrålfält utanför kapseln.

I remissvaret omnämns även betydelsen av metan. SSM har i sin granskning påtalat att naturligt förekommande metan löst i det omgivande grundvattnet kan användas som substrat av sulfatreducerande bakterier och därför medföra ytterligare korrosionsangrepp på kopparkapseln av bildad sulfid. SSM bedömer dock att effekten är liten pga. av de mycket låga metanhalterna i Forsmarks berggrund.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Remissinstansen diskuterar betydelsen av bergförhållanden vid Forsmarksplatsen och jämförelsen med förhållanden i Äspölaboratoriet med avseende på korrosionsfrågor.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att så som framgår av remisskommentarerna i denna bilaga har vare sig saunaeffekten eller korrosion av koppar studerats experimentellt i den verkliga slutförvarsmiljön i Forsmark. Genomförande av sådana fältstudier är dock för närvarande knappast möjligt eftersom det krävs ett tillstånd enligt kärntekniklagen för att påbörja konstruktion av de tillfartsvägar och slutförvarstunnlar som behövs för genomförandet av denna typ av experiment. SSM avser dock ställa krav på SKB med avseende på ett program för experimentella studier i slutförvarsmiljön. SSM håller därför med om att experiment liknande de som beskrivs i bilagan behöver genomföras i slutförvarsmiljön i samband med konstruktion och drift av slutförvaret.

SSM konstaterar vidare att lokala bergförhållanden skulle variera för samtliga tänkbara platser med granitisk berggrund i Sverige. Förhållandevis torra deponeringshål med lång återmättnadstid skulle därför sannolikt också förekomma vid ett slutförvar vid Laxemar. Och av detta skäl är frågeställningar kopplade till detta inte unika för Forsmarksplatsen.

Remisskommentar (SSM2014-1683-47 Bilaga 5, remissomgång 2):

Författaren poängterar avsaknad av tillgång till försöksdata i den faktiska slutförvarsmiljön som underlag för bedömning av korrosionsprocesser och uppskattning av kapsellivslängd. Författaren menar att SKB:s ansökan brister i detta hänseende.

SSM:s svar:

SSM vill påminna om att säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01) med bland annat analyser av betydelsen av olika korrosionsprocesser (SKB TR-10-66) har baserats på resultat från omfattande undersökningar i undersökningsborrhål med avseende på bland annat grundvattenflödesförhållanden och grundvattenkemiska förhållanden. I avsaknad av detaljerade referenser till SKB:s arbeten förefaller det oklart i vilken omfattning befintligt underlag i form av resultat från platsundersökningar samt resultat från relevanta modelleringsstudier har beaktats som underlag för författarens bedömningar kring betydelsen av olika korrosionsprocesser. SSM håller dock med författaren om att ytterligare undersökningar av slutförvarsmiljön är helt nödvändiga i samband med konstruktion av slutförvaret samt att ytterligare experimentella studier av kopparkorrosion kommer att erfordras. SSM håller också med om att SKB framledes bör använda sig av ett

mer integrerat angreppssätt för analysen av korrosionsprocessernas sammanlagda betydelse.

Opinionsgruppen för säker slutförvaring (OSS)

Remisskommentar (SSM2011-3522-29, remissomgång 1):

Med anledning av större osäkerheter kring de tekniska barriärernas långsiktiga funktion, efterfrågar OSS mer utvecklade biosfärsscenarioer som bygger på betydligt större och mer omfattande läckage från slutförvaret.

SSM:s svar:

Det är inte helt uppenbart för SSM vad OSS menar med ”utvecklade biosfärsscenarioer”. SSM tolkar det som att OSS menar radiologiska konsekvenser som bygger på betydligt fler fallerade kopparkapslar samt större och mer omfattande läckage från slutförvaret. SSM:s granskning och bedömning av dessa fall stöds av alternativ modellering och gränssättande beräkningsfall för att undersöka scenario-osäkerheter (radiologiska konsekvenser). Detta omfattar t.ex., kapselbrott på grund av allmänkorrosion med advektiva förhållanden i deponeringshålet (avsnitt 5.11.3.2 och avsnitt 7.4.4) samt skjувbrottsfallet (avsnitt 5.12.2 och 6.3.2). I kapitel 9 finns SSM:s bedömning av SKB:s scenarieanalyser. Alla avsnitt och kapitel hör till Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II.

Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf, Per Claesson och Jinshan Pan

Remisskommentaren har framtagits av Peter Szakálos, Anders Rosengren, Seshadri Seetharaman, Christofer Leygraf

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

De snabbaste och därmed farligaste nedbrytningsmekanismerna för kapseln innefattar:

1. korrosion i gasfasmiljö vid förhöjda temperaturer,
2. korrosion pga. anrikning av salter i deponeringshålen,
3. korrosion förorsakad av läckströmmar,
4. försprödning pga. svavelupptag i kopparmetallen,
5. försprödning pga. av väteupptag i metallen,

Punkt 1, 3 och 4 kommenteras nedan. Punkt 2 bemöts under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion. Punkt 5 bemöts under kategori: Väteförsprödning.

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen om att ovanstående processer inte definitivt har kunnat avfärdas men konstaterar samtidigt att detta inte utgör ett krav för analysen av slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga. Baserat på kopparhöljets dimensionering kan inverkan av korrosionsprocesser accepteras så länge kapseln upprätthåller erforderlig skyddsförmåga under tillräckligt lång tid. Remissvaret innehåller inte några specifikationer av under vilka förutsättningar som de omnämnda processerna skulle resultera i en oacceptabel påverkan på kapselns långsiktiga integritet respektive förvarets skyddsförmåga. Det finns inte heller några detaljerade kommentarer kring SKB:s motsvarande analyser och ej heller detaljer kring relaterade förhållanden i slutförvaringsmiljön. SSM har därför svårt att bedöma giltigheten hos den övergripande slutsatsen att SKB:s säkerhetsanalys är behäftad med fundamentala brister. I den återopade referensen SSM 2012:17 finns relevant ytterligare information, men inte heller här finns ett spårbart underlag som

motiverar de postulerade korrosionsskadorna på kopparkapslar med beaktande av tillgänglig information om förväntade slutförvarsförhållanden. Beträffande de ovan angivna nedbrytningsmekanismerna bedömer SSM följande:

1. SSM bedömer att SKB i kompletteringsförfarandet tillräckligt väl analyserat betydelsen av transport av gasformig vätesulfid i en omättad buffert (SKBdoc 1437441), vilket SSM har kommenterat i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10.5. SSM har även kommenterat innebörden av läckage av syrgas genom deponeringshålspluggen (del II avsnitt 4.10.2) samt innebörden av andra reaktiva gaser i slutförvarmiljön så som metan och vätgas (del II avsnitt 4.6.4). Dessa frågor bedöms vara mindre betydelsefulla.
2. Bemöts under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.
3. Beträffande läckströmskorrosion konstaterar SSM att det elektriska fältet ger en förhållandevis liten påverkan samt att tiden för denna korrosionsform bedöms vara liten i sammanhanget (Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 8.3.3).
4. SSM anser att en inträngning av sulfid i metallen har påvisats under vissa laboratorieförsök (Ari-Lahti m.fl. 2011), men att inträngningen av sulfid i slutförvarsmiljö med lägre halter sannolikt konkurreras ut av allmän korrosion av koppar (dvs. att sulfidjoner förbrukas invid metallytan innan inträngning sker i metallen). SSM anser dock att inträngning av sulfid i en växande spricka möjligen kan ske under vissa förutsättningar men att denna process kräver en samtidig mekanisk påverkan på kopparen och är att snarare betrakta som en form av spänningskorrosion (se SSM 2018:07, Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning del II avsnitt 4.10.7).
5. Bemöts under kategori: Väteförspridning.

Remisskommentar (SSM2016-268-4, remissomgång 2):

Med beaktande av de korrosionstekniska brister som KBS-3 metoden uppvisar i nuläget kan man uppskatta att majoriteten av kopparkapslarna kommer att kollapsa inom 1 000 år. En liknande synpunkt förs fram av Per Claesson och Jinshan Pan i samma remissyttrande, där kritik förs fram att korrosionshastigheten för koppar inte har kunnat visas vara tillräcklig låg för säker slutförvaring.

SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen att ett antal korrosionsprocesser inte definitivt har kunnat avfärdas av SKB (se ovan). Det är dock ett stort steg från denna slutsats till att göra bedömningen att en majoritet av alla kopparkapslarna kommer att kollapsa inom 1 000 år. Korrosionsformernas säkerhetsbetydelse behöver utöver deras principiella existens för koppar även övervägas i perspektivet av korrosionsbarriärens tjocklek, bufferten och bergets inverkan på materieöverföring, den grundvattenkemiska situationen, och i vissa fall belastningssituationer i slutförvarsmiljön, exempelvis för bedömningen av spänningskorrosion. Denna typ av överväganden finns inte utförligt beskrivna i remissvaret eller i de åberopade referenserna och SSM har därför svårt att bedöma slutsatsernas giltighet. Det framgår inte varför omnämnda korrosionstekniska brister innebär att en majoritet av alla kopparkapslarna kommer att kollapsa inom 1 000 år, som innefattar korrosionsprocessernas säkerhetsbetydelse med beaktande av förväntade och tänkbara omgivningsbetingelser och transportförhållanden i slutförvarsmiljön. SSM konstaterar att SKB:s modeller beskriver olika fall i slutförvarsmiljön för vilka materieöverföring styrs av en kombination av diffusion och advektion (SKB TR-10-66), och att SKB därför inte enbart beaktar sulfiddiffusionsmodeller.

Roland Pusch

Remisskommentar (SSM2016-268-1, remissomgång 2):

Kopparkorrosion kan inträffa pga. närhet till HVDC kabel – fältstudie fattas.

SSM:s svar:

SSM anser att SKB tagit fram en godtagbar redovisning kring inverkan av läckströmskorrosion på kopparkapslarnas integritet. Granskningen av SKB:s beräkningar av SSM:s externa experter pekar på att de av SKB genomförda beräkningsscenarierna ger en realistisk beskrivning av situationen i Forsmark (SSM Technical Note 2016:05, SSM Technical Note 2016:16). De små beräknade korrosionsangreppen motiveras av att det elektriska fältet ger en förhållandevis liten påverkan på korrosionshastigheten, av att hela kapselns övre eller nedre begränsningsyta korroderar samt att tiden för denna korrosion i sammanhanget bedöms vara mindre än 100 år och därmed kort i säkerhetsanalysens tidsskala. Se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 8.3.3. Se även SSM Technical Note 2016:05, SSM Technical Note 2016:16 för de på SSM:s begäran utförda beräkningarna.

Torbjörn Åkermark

Remisskommentar (SSM2011-3522-11, remissomgång 1):

Koppar som kapselmaterial uppfyller inte erforderliga konstruktionskriterier eftersom koppar inte är termodynamiskt stabilt och reagerar med syrgasfritt vatten, samt eftersom leran har en negativ påverkan på kapselns beständighet.

SSM:s svar:

SSM har inte formulerat specifika krav kopplade till inkapslingens korrosionsbeständighet. SSM instämmer dock med remissinstansen att korrosionsförhållanden och förväntade korrosionshastigheter har en stor betydelse för bedömningen av förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav. Korrosion i syrgasfritt vatten bedöms ha en liten betydelse i förhållande till kapselns tjocklek och i förhållande till andra förväntade korrosionsprocesser. SSM instämmer med remissinstansen att viss påverkan mellan kapsel och bufferten är förväntad. Myndigheten anser dock inte att denna omständighet utgör en grund för avslå ansökan.

Analys av förutsättningar för SKB att uppfylla SSM:s aktuella föreskriftskrav se Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del I. SSM:s granskning av korrosionsprocesser återfinns i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.10 och 5.11. SSM:s granskning av kemisk utveckling av bufferten finns i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.6.

Uppsala universitet

Remisskommentar (SSM2014-1683-28, remissomgång 2):

Korrosion i närvaro av sulfidjoner borde utredas i motsvarande grad som korrosion i närvaro av syre.

SSM:s svar:

SSM bedömer att synpunkten redan är bemött ovan i remissinstansens kommentar i SSM2011-3522-15 under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.



Remisskommentar (SSM2014-1683-28, remissomgång 2):

Kopparkorrosion orsakad av samtidig påverkan av flera typer av korrosion bör undersökas.

SSM:s svar:

SSM bedömer att synpunkten redan är bemött ovan i remissinstansens kommentar i SSM2011-3522-15 under kategori: Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.

Remisskommentar (SSM2014-1683-28, remissomgång 2):

Mer omfattande försök bör ske under slutförvarsliknande förhållanden, för att bl.a. förbättra extrapoleringen av korrosionsangrepp under mycket långa tidsrymder.

SSM:s svar:

SSM delar remissinstansens synpunkt. SSM är av uppfattningen att SKB behöver uppföra demonstrationstunnlar vid en slutförvarsanläggning. Dessa tunnlar behöver ha en rad olika syften som att demonstrera metoder för tunneldrivning i slutförvarsmiljö, metoder för att verifiera lämpliga bergegenskaper, demonstrera en fullskalig installation och deponeringssekvens, samt att genomföra olika typer av långtidstester med avseende på både bergets och de tekniska barriärernas utveckling och skyddsförmåga. SSM konstaterar att omfattning och utformning av demonstrationsaktiviteter på plats behöver utformas och granskas i kommande steg av SKB:s program. SSM delar remissinstansens åsikt gällande fördelarna med ett sådant tillvägagångssätt. Dessa åtgärder bedöms kunna öka allmänhetens tillit till förvarskonceptet. Den enda nackdelen är att ytterligare verksamhet kommer att genomföras i slutförvarsmiljön, vilket SSM dock bedömer vara hanterbart.

Östhammars kommun

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 1, remissomgång 1):

Östhammars kommun anser att ansökan ska kompletteras med en beskrivning av hur SKB hanterar de egna säkerhetsprinciperna som beskrivs i toppdokumentet, sid 7, punkt 2.1, kontra miljöbalkens krav på bästa tillgängliga teknik, t ex enbart naturligt förekommande tillverkningsmaterial av kapseln kontra legeringar med större motstånd mot korrosion.

SSM:s svar:

SSM har bedömt underlaget i ansökan som tillräckligt. Det finns andra material exempelvis legeringar som är tänkbara att använda som korrosionsbarriär, men det är med all sannolikhet mycket svårt att visa att dessa material är lika bra eller bättre än koppar utan ytterligare stora långsiktiga forsknings- och utvecklingsinsatser. SSM bedömer att SKB:s föreslagna kopparhölje har god tålighet i korrosionshänseende och är att betrakta som bästa möjliga teknik. Den betydande tjockleken på 50 mm bidrar till tålighet med avseende på ett spektrum av korrosionsprocesser. Granskningsrapport systemövergripande frågor (SSM 2018:04) del I avsnitt 3 och del III avsnitt 3.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 1, remissomgång 1):

Östhammars kommun önskar en beskrivning av vilka effekter och konsekvenser en tillväxt av mikroorganismer i den omättade bufferten kan innebära.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att viss mikrobiell aktivitet sannolikt är möjlig innan buffertens svälltryck har utvecklats. Omfattningen av mikrobiella effekter begränsas av tillgång på näringsämnen och långsam materietransport i en omättad buffert. Tillgång till organiskt material, näringsämnen, metan/vätgas etc. är nödvändigt för mikrobiell aktivitet. Grundvattnet i Forsmark på förvarsdjup innehåller generellt sett låga halter av reaktivt organiskt



material. Däremot finns i jämförelse med grundvattnet en relativt stor mängd av organiskt material i återfyllnaden. Enligt SSM:s bedömning betydelsefull process är mikrobiell sulfatreduktion som förutom sulfat kräver tillgång till ett substrat som kan donera de elektroner som behövs för reduktion av svavel i sulfat samt näringsämnen. Denna process generar sulfid och bidrar därför till kapselkorrosion. SSM:s granskning av SKB:s redovisning kring denna fråga beskrivs i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.8 och 4.10.5.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun anser att SSM bör bedöma följderna av förvarets tidsmässigt ojämna utveckling från initialtillstånd till idealtillstånd för olika kapselpositioner vad gäller korrosion av kopparkapseln, risker för cementering av buffert samt erosion av buffert och återfyllning.

SSM:s svar:

SSM förstår idealtillståndet som nämns av remissinstansen som full återmättnad och syrefria (kemiskt reducerande) förhållanden. SSM konstaterar att långa återmättnadstider innebär större osäkerheter i vissa avseenden exempelvis med avseende på vissa korrosionsprocesser som förutsätter närvaro av en gasfas. SSM bedömer att betydelsen av vissa frågor med bäring på långsiktig strålsäkerhet skulle vara enklare att bedöma med hjälp av ytterligare data och en utförligare analys av återmättnadsförloppet i jämförelse med den som presenteras i SKB:s ansökan. Det bör dock påpekas att SKB på uppmaning av SSM lämnat in kompletterande redovisning av frågan som har bidragit med en ökad förståelse av de faktorer och osäkerheter som påverkar analysen av återmättnadstider (SKBdoc 1385067 med tillhörande bilagor). I kommande steg erfordras dock, enligt SSM:s bedömning, en utförligare analys baserad på mer detaljerad information om det intakta bergets egenskaper vilket kommer kunna erhållas först i samband med byggande av slutförvaret.

Beträffande risken för cementering konstaterar SSM att SKB har beaktat den lägre termiska konduktiviteten för en omättad buffert i förhållande till en återmättad buffert i samband med den termiska dimensioneringen av förvaret. Avsikten med den termiska dimensioneringen som t.ex. innefattar att begränsa varje enskild kapsels värmeutveckling och att specificera minivstånd mellan deponeringshål respektive deponeringstunnlar, är att undvika skadligt höga temperaturer som bidrar till en risk för en betydande cementering. Se vidare Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.7.1.2.

Beträffande erosionsrisken avser särskilt utsatta deponeringshålspositioner de med korta återmättnadstider och förhållandevis höga grundvattenflöden. SSM anser att dessa frågor behöver fortsatt uppmärksamhet i kommande steg av SKB:s program, men att den grundläggande strategin med en selektiv deponeringshålsplacering där positioner med höga flöden elimineras är att betrakta som bästa möjliga teknik och är effektiv för att begränsa riskbidrag kopplade till erosionsrisk. Se vidare Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.8.2 samt avsnitt 4.9.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun noterar komplexiteten i de modelleringar som görs för att bedöma en framtida trolig utveckling av förhållandena i förvaret under den tempererade perioden. En viktig återstående osäkerhet avser ökningen av de sulfidkoncentrationer som uppmätts i det pågående övervakningsprogrammet. Det noteras även att på större djup än 600 m ökar koncentrationerna av löst sulfid. Östhammars kommun anser att SKB bör komplettera ansökan med hur avvikande sulfidhalter i deponeringshålen hanteras och vilken betydelse sulfidhalten har för bedömningen av deponeringshålen.



SSM:s svar:

SSM instämmer med remissinstansen att ytterligare utredningar kring förekomst av bland annat sulfid i grundvatten förväntas bli nödvändiga under en kommande konstruktionsfas för slutförvaret. SSM bedömer att dock att SKB i samband med platsundersökningsfasen har tagit fram ett betydande underlag för bedömning av sulfidhalter. De genomförda mätningarna samt tolkning av mätdata (SKB TR-10-39) bedöms vara av hög kvalitet. Eftersom korrosionsmodellering har sin utgångspunkt i ackumulerat transport av sulfider under lång tid behövs långvarig, betydande ökning av befintlig fördelning av sulfidhalter för att i väsentlig utsträckning förändra resultaten. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.6.3.2 och 5.5.4.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1)

Östhammars kommun efterfrågar en redogörelse för skillnaden i säkerhet vid lång och kort tid för mättad återfyllning. Östhammars kommun efterfrågar även efter en analys av hur osäkerheten med buffertens mättnad påverkar säkerheten.

SSM:s svar:

Med tanke på den naturliga variationen hos bergets lokala egenskaper är det oundvikligt att återmättnadsförloppet tar olika lång tid för olika kapselpositioner i berget. För deponeringshål med en snabb återmättnad finns frågeställningar kring risken för kanalbildningserosion som SKB delvis justerat under tillståndsprövningen (SKBdoc 1434717). För deponeringshål med långsam återmättnad finns frågor förknippade med förekomst av en gasfas samt frågor kopplade till långsam uppbyggnad av buffertens svälltryck. SKB har under kompletteringskedet lämnat in betydande ny information, dels om återmättnadsförloppet i sig (SKBdoc 1385067) exempelvis med avseende på konceptuella frågor kring modellering och fördelningen av återmättnadstider, dels om följdfrågor kopplade till lång återmättnad så som inverkan av transport av gasformig sulfid (SKBdoc 1437441) samt långsam krypdeformation av kopparhöljet (SKBdoc 1399768, SKBdoc 1417069). SSM bedömer att SKB:s redovisning är tillräckligt utförlig för det innevarande steget i prövningen. SSM håller dock med remissinstansen om att det på sikt behövs en utförligare analys av återmättnadsförloppet som bland annat baseras på mera information om det intakta bergets egenskaper. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.8, 4.9, 4.12, 4.10.5.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun efterfrågar en utvärdering av skjuvlast på kapseln om bentonitens mekaniska egenskaper förändras under betingelser som anges i kapitel 10.3.10 – 10.3.12.

SSM:s svar:

SSM bedömer att samtliga processer som redovisades i avsnitt 10.3.10 till 10.3.12 i SKB Huvudrapport SR-Site, förutom illitiserings och cementering inte kan förväntas ha någon nämnvärd negativ inverkan på buffertens funktion i samband med en skjuvrörelse vid jordskalv. SKB bedömer att illitiserings endast sker i en begränsad utsträckning i slutförvarsmiljön och processen förväntas inte på ett väsentligt sätt påverka buffertens säkerhetsfunktioner. Även cementering bedöms endast förekomma i en liten omfattning. SSM instämmer med SKB:s bedömningar om dessa processer. Preliminära beräkningar kring hur kapseln påverkas av en hypotetisk illitiserings och cementering i samband med en skjuvlast finns redovisade i SKB TR-06-43. En utförligare bedömning av dessa frågor återfinns i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 4.7.1.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun anser att SKB ska komplettera ansökan med hur bentoniten påverkas av koppars olika korrosionsprodukter.



SSM:s svar:

SSM instämmer med kommunen kring behov av ytterligare information om denna fråga och kompletterande information kring denna fråga har också begärts in under prövningens gång (SSM2011-2426-89). SKB:s svar på frågan dokumenteras i SKBdoc 1416862. SSM:s granskning och bedömning av frågan redovisas i Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 5.6.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun anser att ansökan måste kompletteras med en lättfattlig översikt över alla de korrosionsprocesser som kan komma att ske i förvaret, exempelvis sulfidkorrosion, korrosion i vatten som är fritt från löst syre, strålningsinducerad korrosion och mikrobiell korrosion.

SSM:s svar:

SSM konstaterar att SKB har tagit fram en förhållandevis kort och överskådlig beskrivning av beräkningsmodeller för analys av olika korrosionsprocessers omfattning i slutförvaret (SKB TR-10-66) samt även en litteratursammanställning av ett stort antal korrosionsstudier (SKB TR-10-67). Efter att också har erhållit kompletterande underlag för ett antal korrosionsprocesser (exempelvis SKBdoc 1398013) anser SSM att ansökans materialet är tillräckligt för detta steg i prövningsprocessen men myndigheten förväntar sig en utökad redovisning i kommande säkerhetsredovisningar. SSM håller med remissinstansen om att vissa korrosionstyper framgent bör hanteras på ett mera transparent och utförligt sätt i säkerhetsanalysrapporten och pekar i sin granskningsrapport på ytterligare behov av redovisning från SKB. Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del I kap 9.2.2.

Remisskommentar (SSM2011-3522-23 Bilaga 2, remissomgång 1):

Östhammars kommun ställer frågan om det är möjligt att föra över och tillämpa slutsatser av undersökningsresultat från Äspö-laboratoriet om exempelvis bergarbeten vid anläggningen av en slutförvarsanläggning i Forsmark, med tanke på bergens olika karaktär och egenskaper.

SSM:s svar:

SSM är medveten om att det föreligger skillnader mellan berggrunden i Forsmark och den vid Äspö-laboratoriet och den närliggande av SKB identifierade alternativa Laxemarplatsen, t.ex. med avseende på bergspänningssituationen och förekomsten av vattenförande sprickor. Detta har en betydelse för analysen av kapselns korrosionsprocesser. Frågeställningar som rör skillnader mellan platserna har belysts i analysen av den långsiktiga strålsäkerheten efter förslutning. Beträffande en kommande konstruktions- och driftsfas är det värt att påpeka att på båda platserna förekommer kristallina bergarter som relativt sett är gynnsamma för bergarbeten på slutförvarsdjup i jämförelse med exempelvis platser med sedimentära bergarter. SSM konstaterar att det gynnsamma utfallet av SKB:s utförda platsundersökningar vid Forsmark har varit avgörande för myndighetens ställningstagande till ansökan. SSM bedömer att SKB:s utförda platsundersökningar och modelleringar har gett en tillräckligt tillförlitlig bild av förhållandena vid Forsmark. Vid ett eventuellt uppförande kommer kunskapskraven successivt att behöva öka i takt med att undermarksarbetet fortskrider. SSM anser vidare att SKB behöver uppföra demonstrationstunnlar vid en slutförvarsanläggning för att öka kunskapen om de faktiska förhållandena i tilltänkta deponeringsområden på förvarsdjup och hur denna information kan påverka bedömningen av den långsiktiga säkerheten efter förslutningen. Se för övrigt Granskningsrapport strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM 2018:07) del II avsnitt 3.2.



Referenser

Ari-Lahti E., Lehtikuusi T., Olin M., Saario T., Varis P. 2011. Evidence for internal diffusion of sulphide from groundwater into grain boundaries ahead of crack tip in Cu OFP copper. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 134–137.

Björkbacka, Radiation induced corrosion of copper, doctoral thesis, KTH, Stockholm, 2015.

Chen J., Qin W., Shoesmith D.W. (2011) Long-term corrosion of copper in a dilute anaerobic sulphide solution, *Electrochimica Acta* 56, 7854-7861.

Hedin A., Johansson A. J., Lilja C., 2017. Copper Corrosion in Pure Water – Scientific and Post-Closure Safety Aspects, IHLRWM 2017, Charlotte, NC, April 9-13, 2017 559.

Hultquist M.J., Graham O., Kodra S., Moisa R., Liu U., Bexell J.L., Smialek., 2015. Corrosion of copper in distilled water without O₂ and the detection of produced hydrogen, *Corrosion Science*, Volume 95, June 2015, pp. 162-167.

Lousada C M., Soroka I L., Yagodzinskyy Y, Tarakina N V., Todoshchenko O., Hänninen H., Korzhavyi P A., Jonsson M., 2016. Gamma radiation induces hydrogen absorption by copper in water. *Nature Scientific Reports* 6, 24234.

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

Posiva SKB Report 02. 2017. Evaluation of a gas shield for friction stir welding of copper canisters. Posiva Oy. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1339716. Kompletterande information om kopparkorrosion. 2012. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-04-16 (SSM20111-2426-39).

SKBdoc 1371851, 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande tillverkningsaspekter för ingående delar i kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-12-09 (SSM2011-2426-120, SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-157, SSM2011-2426-167, SSM2011-2426-206).

SKBdoc 1385067. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande lång återmättnadsfas. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-01-02 (SSM2011-2426-122, SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1398013. Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-09-25 (SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-164, SSM2011-2426-179, SSM2011-2426-200).

SKBdoc 1398014. Influence of high chloride concentration on copper corrosion. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1399615. Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande krypdeformaiton för kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-174).

SKBdoc 1399768. Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads. Bilaga 10 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).



- SKBdoc 1416862, Selin P., 2013. Interaktion mellan kopparkorrosionsprodukter och bentonit. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-11-25 (SSM2011-2426-156).
- SKBdoc 1417069. The role of phosphorus for mechanical properties in copper. Bilaga 18 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).
- SKBdoc 1419961. Corrosion of the copper canister inside due to radiolysis of remaining water in the insert. 2014. Bilaga 4 till SKBdoc 1398013. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2013-11-27 (SSM2011-2426-164).
- SKBdoc 1420051. Sandström R. The role of hydrogen in copper. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-164).
- SKBdoc 1434717, Luterkort D., Sellin P., 2014. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättning "inflöde till deponeringshål mindre än 150 kubikmeter". Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-07-03 (SSM2011-2426-191).
- SKBdoc 1437441, Lilja C., Sellin P., Hedin A. 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-07-03 (SSM2011-2426-187).
- SKBdoc 1458607. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande krypprovning och modellering. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1137-78).
- SKBdoc 1473304. Samlad redovisning om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Bilaga 1 till SKBdoc 1462125. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2015-03-12 (SSM2011-2426-226).
- SKBdoc 1540185. Ytterligare information om kopparkorrosion i rent vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2016-04-11.
- SKB R-15-14. Wu Rui, Hagström J., Sandström R., Grain boundary sliding in phosphorus alloyed oxygen-free copper under creep. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-43. Börgesson L., Hernelind J., Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Influence shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage caused to the canister. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-09-29. Karnland O., Olsson S., Dueck A., Birgersson M., Nilsson U., Hernan-Håkansson T., Pedersen K., Nilsson S., Eriksen T., Rosborg B., Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-09-32. Andersson-Östling H. C. M., Sandström R., 2009, Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-39. Tullborg E-L., Smellie J., Nilsson A-C., Gimeno M. J., Auqué L.F., Bruchert V., Molinero J., SR-Site – sulphide content in the groundwater at Forsmark. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-46. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-10-47. 2010. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-50. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. Updated 2015-05. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-66. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. Updated 2012-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-67. King F., Lilja, C., Pedersen K., Pitkänen P., Vähänen M., An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. Updated 2011-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-11-01 (Art818), 2011. Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Uppdaterad 2012-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-13-27. King F., Lilja C., Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-14-15. Taxén C., Sandberg B., Lilja, C. Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-15-03. Johansson J., Blom A., Chukharkina A., Pedersen K., 2015. Study of H₂ gas emission in sealed compartments containing copper immersed in O₂-free water. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-15-09. Birgersson M., Goudarzi R., Vapor transport and sealing capacity of buffer slots ("sauna" effects). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-16-01. Ottosson M., Boman M., Berastegui P., Andersson Y., Hahlin M., Korvela M., Berger R., Copper in ultrapure water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-17-07. Birgersson M., Goudarzi R., Summary report on "sauna" effects. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SSM Report 2011:09. MacDonald D., Sharifi-Asl S., Is Copper Immune to Corrosion When in Contact With Water and Aqueous Solutions? Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2016:30. MacDonald D., Mao F., Dong C., Sharifi-Asl S., Measurement of Parameter Values for Predicting Corrosion Phenomena on Copper in Swedish HLNW Repositories. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2017:02. Becker R., Öijerholm J., Slow strain rate testing of copper in sulphide rich chloride containing deoxygenated water at 90°C. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2018:03. Remissammanställning. Beredning inför regeringens prövning: Slutförvaring av använt kärnbränsle.



SSM Report 2018:04. Systemövergripande frågor. Beredning inför regeringens prövning: Slutförvaring av använt kärnbränsle.

SSM Report 2018:07. Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning. Beredning inför regeringens prövning: Slutförvaring av använt kärnbränsle.

SSM Technical Note 2012:17. Szakálos P., Seetharaman S., 2012. Corrosion of copper canister. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:33. Mohanty S. and Pensado O., 2014. Reproduction of SKB:s Canister Failure Calculations - What-If and 'Residual' Scenario to Illustrate Barrier Functions. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:55. Penfold J., 2014. Further Reproduction of SKB's Calculation Cases and Independent Calculations of Additional "What If?" Cases. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2016:05. Pedersen L. B., 2016. Assessment of SKB TR-14-15 Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Technical Note 2016:16. Lundmark F., Hermansson M., Edvinsson J., 2016. Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters – Main Review Phase. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Technical Note 2017:15. Pensado O., Radionuclide release rates associated with bounding cases featuring relatively early canister failures in a spent fuel repository. Swedish Radiation Safety Authority.

Szakálos P., Hultquist G. and Wikmark G., 2007. Corrosion of Copper by Water. Electrochemical and Solid-State Letters, 10 (11) C63-C67.

Wersin P., Kober F., (eds). 2017. Arbeitsbericht NAB 16-16. FEBEX-DP. Metal Corrosion and Iron-Bentonite Interaction Studies.