



Regeringskansliet, Miljödepartementet

103 33 STOCKHOLM

m.registrator@regeringskansliet.se

Kopia till:

lina.osterberg@regeringskansliet.se

anna.sanell@regeringskansliet.se

### Remissvar

Datum: 2021-10-15

Er referens: M2018/00217, M2018/00221

Diarienum: SSM2021-6205

Dokumentnr: SSM2021-6205-2

Handläggare: Henrik Öberg

Telefon: 08-799 40 91

## Ärenden om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt lagen om kärnteknisk verksamhet till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har granskat de båda bifogade studierna som avser kopparkapselns båda konstruktionsmaterial koppar och segjärn, och har värderat deras relevans för Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB) ansökan att uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark. Studierna avser i grunden aspekter kring kopparkapselns skyddsförmåga som har beaktats och som tidigare har granskats av SSM. SSM:s bedömning är att ingen av de båda nämnda vetenskapliga studierna innehåller fakta som innebär skäl till att ändra SSM:s sedan tidigare redovisade bedömningar kring SKB:s förutsättningar att uppfylla myndighetens föreskriftskrav.

SSM har genomfört en granskning av SKB:s analys och rapportering i samband med de nyligen avslutade LOT-etapperna A3 och S2. SSM konstaterade i granskningen att de senast erhållna resultaten är i linje med den information som varit känt sedan tidigare faser av LOT, vilken beaktades och bedömdes inom ramen för myndighetens beredning av SKB:s tillståndsansökan, och med den konventionella förståelsen för kopparkorrosionsprocesser. Denna slutsats ger följaktligen inget skäl för ytterligare LOT-redovisning.

### Sammanfattande svar på regeringens frågor

Regeringen önskar få svar på om SSM anser att artikeln om kopparkorrosion som bilagts remissen och den forskning som artikeln hänvisar till innehåller information som är ny och som kan vara av betydelse för regeringens beslut i ärendena.

- Experimentet i studien avser sulfidkorrosion av koppar som har varit väl känd sedan koppar föreslogs som inkapslingsmaterial. Ett betydande antal studier har genomförts under liknande förhållanden som de i studien och de effekter som observeras har följaktligen skett även i dessa. Effekterna finns således beaktade i



SKB:s underlag till tillståndsansökan, vilket har bedömts utförligt inom ramen för SSM:s beredning.

- SSM delar inte författarnas egen bedömning att resultaten från studien tydligt visar att spänningskorrosionsrisk föreligger för en kopparkapsel inplacerad i ett slutförvar. Spänningskorrosion i sulfidmiljö är en lokal korrosionsform som generellt fordrar att en passiverande film bildas på metallytan som följd av att betydande sulfidhalter vid kopparytan föreligger, i kombination med förekomst av dragspänningar i metallen. Förekomst av passiverande förhållanden diskuteras inte i artikeln och proverna som studeras är inte belastade. Resultaten från studien bedöms därför inte tillföra någon ny information om spänningskorrosionsrisk i förhållande till befintliga studier i vilka spänningskorrosion av koppar har studerats explicit.
- Rörande studiens betydelse för beslut om tillstånd för ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark anser SSM att den inte medför några skäl till att ändra sedan tidigare redovisade bedömningar kring SKB:s förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav.

Regeringen önskar svar på frågan om det finns information från LOT-försöken vid Äspö-laboratoriet som SSM anser bör redovisas och utvecklas och som har betydelse för bedömningen avseende kapselns hållbarhet.

- SSM har i närtid publicerat en granskningsrapport om LOT-försöken i vilken det konstateras att de senast erhållna resultaten är i linje med den information som varit känt sedan tidigare faser av LOT och med den konventionella förståelsen för kopparkorrosionsprocesser. Denna slutsats ger följaktligen inget skäl för ytterligare redovisning avseende de nyligen avslutade LOT-försöken. I SSM:s granskningsrapport redovisas även hur myndigheten har beaktat synpunkter från andra aktörer som yttrat sig till SSM om försökens betydelse.

Regeringen önskar också få svar på om den finska forskning som nyligen publicerats om gjutjärnets egenskaper påverkar bedömningarna i fråga om det finns kvarstående osäkerheter om gjutjärnets egenskaper som kan inverka på kopparkapselns förmåga att innesluta kärnavfallet på lång sikt. Om det kan anses kvarstå sådana osäkerheter om segjärnets egenskaper, önskar regeringen vidare få svar på om osäkerheterna bedöms vara försumbara, små eller betydande.

- Studien analyserar statisk deformationsåldring av segjärn vilket är en process som medför en försprödning av materialet efter plastisk deformation och som är mer påtaglig vid förhöjda temperaturer. För att processen ska kunna vara relevant för risken för kapselbrott behöver alltså segjärnsinsatsen först genomgå en plastisk deformation som följd av ett relevant lastfall som uppkommer efter slutförvarets förslutning.
- De huvudsakliga lastfall som beaktas i säkerhetsanalysen för kärnbränsleförvaret avser dels isostatisk pålastning av kapseln som följd av buffertsvällning, grundvattentrycket på förvarsdjup och den förhöjda isostatiska lasten som följd av en eventuell inlandsis, dels skjuvlaster som härrör från rörelser längs sprickor i berggrunden som skär ett deponeringshål. En viktig distinktion mellan de två fallen är att samtliga kapslar i slutförvaret blir exponerade för det föregående, men endast en liten andel skulle kunna bli det i det senare då det avser kapslar i deponeringshålspositioner som antas korsas av spröda strukturer i berget vilka inte har upptäckts i samband med kartering av deponeringshålets och deponeringstunnlarnas väggar.
- Kopparkapseln har utformats på ett sådant sätt att förväntade isostatiska laster efter förslutning inte ska kunna leda till deformation av insatsen, vilket visats både



teoretiskt och med praktiska försök. Statisk deformationsåldring bedöms därför inte vara relevant för detta fall. För skjuvlastfallet krävs att två stora jordskalv orsakar två på varandra följande större skjuvrörelser i ett och samma deponeringshål (det första skalvet orsakar en plastisk deformation och det andra potentiellt ett kapselbrott). Även detta fall har beaktats i SKB:s säkerhetsanalys och har bedömts att ha mycket låg sannolikhet att inträffa under hela analysperioden på 1 miljon år.

- SKB:s redovisning kring deformationsåldring av insatsen beaktades och bedömdes inom ramen för SSM:s beredning av SKB:s ansökan och studiens resultat tillför ingen information som omprövar myndighetens bedömningar om processens betydelse avseende kopparkapselns inneslutningsförmåga på lång sikt.

Regeringens övergripande syfte med remissen är att få svar på frågan om det finns kvarstående osäkerheter rörande gjutjärnets egenskaper och kopparkapselns förmåga att innesluta kärnavfallet på lång sikt.

SSM konstaterar:

- att myndighetens föreskrifter innehåller krav på att slutförvar ska bestå av ett flerbarriärssystem, där systemets långsiktiga skyddsförmåga och tålighet mot händelser som kan ske efter förslutning ska upprätthållas genom flerfaldiga barriärfunktioner. SSM ställer också krav på att systemet ska utformas för att upprätthålla långsiktigt skydd för människors hälsa och miljön, genom att bland annat ställa upp ett riskkriterium som innebär att nivåerna på eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen från ett slutförvar maximalt får uppgå till vad som motsvarar ungefär en hundra del av den naturliga bakgrundsstrålningen på platsen. Myndigheten finner det inte rimligt att ställa krav på att osäkerhet ska elimineras. Osäkerheter ska enligt SSM:s krav identifieras, beskrivas och analyseras, och ska hanteras i säkerhetsanalysen genom tillämpning av lämpliga metoder, exempelvis konservativa antaganden, och därefter, beroende på resultaten, genom åtgärder relaterade till förvarets konstruktion.
- att ett kommande slutförvar ska utformas för att minimera betydelsen av kvarvarande osäkerheter, och att osäkerheter har identifierats och värderats inom ramen för SSM:s granskning av SKB:s säkerhetsanalys med syftet att förstå och beakta deras betydelse för att uppnå de högt ställda kraven, som kort redogörs för ovan, på ett slutförvars skyddsförmåga.
- att om kvarstående osäkerheter skulle vara diskvalificerande skulle SSM:s bedömning vara att ansökan inte har förutsättningar att uppfylla myndighetens föreskriftskrav.
- att det inte är möjligt att ta ställning till SKB:s ansökan enbart genom att beakta en av systemets komponenter, i det här fallet kapseln, eller en enskild process som kan påverka denna komponent, utan att beakta processens eventuella omfattning i slutförvarsmiljön.
- att SSM:s slutsats från myndighetens beredning och granskning av SKB:s tillståndsansökan är att det valda slutförvarskonceptet med lokalisering i Forsmark har förutsättningar att uppfylla myndighetens krav med avseende på långsiktig strålsäkerhet efter förvarets slutliga förslutning
- att det vid en viss tidpunkt, oavsett vilken, inte är möjligt att helt utesluta att ny information kan komma fram vid en senare tidpunkt. SSM anser dock att de kvarvarande osäkerheterna är mycket små i förhållande till slutförvarets samlade skyddsförmåga.

Utförligare svar på regeringens frågor finns redovisade nedan.

## Bakgrund

SSM har ombetts av regeringen att yttra sig i en remiss rörande Ärenden om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt lagen om kärnteknisk verksamhet till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall. Remissen innefattar ett antal frågor mot bakgrund av två nyligen genomförda studier:

- Zhang F, Örnek C, Liu M, Müller T, Lienert U, Ratia-Hanby V, Carpén L, Isotahdon E, Pan J, 2021. Corrosion-induced microstructure degradation of copper in sulfide-containing simulated anoxic groundwater studied by synchrotron high-energy X-ray diffraction and ab-initio density functional theory calculation, *Corrosion Science* 184, 109390.
- Björklund V, 2021. The effects of static strain aging on the mechanical performance of nodular cast iron, Master's Thesis, Aalto University.

Vidare ställer regeringen en fråga rörande de nyligen av SKB:s avslutade LOT-försöken vid Äspö-laboratoriet.

## SSM:s svar på frågan om artikeln i *Corrosion Science*

Regeringen önskar få svar på om SSM anser att artikeln om kopparkorrosion, Zhang m.fl. 2021, och den forskning som artikeln hänvisar till innehåller information som är ny och som kan vara av betydelse för regeringens beslut i ärendena.

I studien av Zhang m.fl. 2021 har OFP-koppar, vilket är det kopparmaterial som SKB avser att använda för kopparhöljet, som under 53 dagar exponerats för sulfidhaltigt vatten analyserats med en metod som kallas röntgendiffraktion. Författarnas huvudsakliga slutsats är att exponering av koppar för simulerat grundvatten medför ytrekonstruktion av koppar samt att de distorsioner nära kopparytan som observeras i experimentet endast kan förklaras av väteintrång i koppargittret. Författarna menar vidare att de utförda experimenten visar på en risk för väteinducerad spänningskorrosion för kopparkapslar i ett slutförvar.

SSM konstaterar inledningsvis att studien är intressant, särskilt i den mån den ger exempel på hur röntgendiffraktion kan användas för att ge ett grundvetenskapligt perspektiv på hur kopparmaterialets atomstruktur påverkas som följd av exponering i sulfidhaltigt vatten. Experimenten avser sulfidkorrosion av koppar som har varit väl känd sedan koppar föreslogs som inkapslingsmaterial och som är grundläggande för SKB:s analys av kapselns integritet ur korrosionshänseende [1, 2]. Det är således inte frågan om den hypotetiska processen korrosion i rent syrgasfritt vatten som har debatterats under senare år och som av vissa aktörer bland annat har postulerats som en betydelsefull process i samband med LOT-försöken (se avsnittet nedan). Ett betydande antal studier kring sulfidkorrosion, både i SKB:s regi men även av andra, har genomförts under liknande betingelser och vanligen med längre exponeringstid än för den aktuella studien, dels med syftet att förstå grundläggande mekanismer, dels för att analysera dess betydelse i slutförvarsmiljö (t.ex. [3-9]). Rörande författarnas tolkning att de observerade distorsionerna har skett som följd av väteinträngning i materialet konstaterar SSM att resultaten i studien inte ger entydiga belägg för detta eftersom vätehalten inte studeras explicit. Men oavsett ursprung till distorsionerna nära kopparytan noterar SSM att den återopade effekten följaktligen skulle ha ägt rum i andra korrosionsexperiment som har utförts med koppar i sulfidhaltiga lösningar (t.ex. [3, 6]), och som har beaktats av SKB i sitt program, även om de korroderade kopparprovernans atomstruktur inte har studerats med samma höga upplösning i dessa försök som i Zhang m.fl. 2021. Slutsatserna från det sammantagna kunskapsläget kring sulfidkorrosion av koppar inklusive frågeställningar



kring spänningskorrosionsrisk, och eventuell påverkan av väteladdning på processen, finns alltså beaktat i SKB:s säkerhetsanalys och i SKB:s komplettering kring kapselintegritet, liksom i SSM:s bedömningar av dessa redovisningar.

SSM delar inte författarnas egen bedömning att resultaten från studien tydligt visar att spänningskorrosionsrisk föreligger för en kopparkapsel inplacerad i ett slutförvar. Spänningskorrosion är en lokal korrosionsform som innefattar en samverkan mellan kemiska och mekaniska förhållanden. Generellt fordras att en passiverande film, en slags skyddande film av korrosionsprodukter som hämmar fortsatt oxidation av metallen, bildas på metallytan som följd av att betydande sulfidhalter vid kopparytan föreligger, i kombination med förekomst av dragspänningar i metallen. Huruvida passiverande förhållanden råder i försöket i studien av Zhang m.fl. 2021 diskuteras inte av författarna. Eftersom dragspänningar är helt avgörande för spänningskorrosionsrisk behöver en relevant försöksutförning inkludera pålagda mekaniska laster. Experimenten i studien är dock utförda på olastade kopparprover. SSM bedömer därför att resultaten från studien inte tillför någon ny information om spänningskorrosionsrisk i förhållande till befintliga studier i vilka spänningskorrosion av koppar har studerats explicit.

Ytterligare synpunkter rörande studiens betydelse har lämnats i en skrivelse till Miljödepartementet (daterat 26 mars 2021). Tillgång till sulfid är avgörande för den postulerade processen, och skrivelsens författare påtalar att mikrobiell aktivitet och saltindunstning ("saunaeffekten") kommer att medföra lokalt förhöjda sulfidhalter i anslutning till kopparkapslarna vilket anses kunna medföra sprickbildning där kapslarna är utsatta för mekaniska spänningar.

I den naturliga slutförvarsmiljön vid Forsmark har sulfidkoncentrationer med något undantag konstaterats falla inom intervallet  $10^{-5}$  M eller lägre [10], medan experimentella sulfidkorrosionsstudier har genomförts vid betydligt högre koncentrationer (vanligen  $10^{-3}$  M) i syfte att erhålla mätbara effekter. Samtidigt bör det påpekas att uppmätta sulfidhalter i opåverkat grundvatten i sig inte ger ett representativt mått på långsiktig tillgänglighet av sulfid i ett slutförvar. Detta eftersom betydande korrosion inte bara förutsätter förekomst av sulfid i grundvatten utan också att sulfid kontinuerligt kan tillföras kopparytan under en längre tidsperiod som en följd av transportprocesser i berget. Den mycket begränsade förekomsten av vattenförande sprickor vid Forsmark, liksom även buffertens transport-begränsande egenskaper, har betydelse i detta sammanhang.

Ökad risk för olika typer av allmän och lokal sulfidkorrosion, inklusive spänningskorrosion, som följd av reaktion med sulfid och eventuell ytterligare tillförsel av gasformig sulfid som bildats genom mikrobiell aktivitet i återfyllnadsmaterialet under perioden då bufferten ännu inte fullt ut återmättats, är en fråga som SSM särskilt har fokuserat på under myndighetens granskning av SKB:s ansökan. Denna fas har en särskild betydelse för bedömning av spänningskorrosionsrisk eftersom den isostatiska pålastningen av kapseln, som sker i samband med att bufferten återmättas, medför initiala dragspänningar nära förslutningssvetsen i höljet. SSM bedömer dock att nödvändiga åtgärder för att begränsa mikrobiell aktivitet är genomförbara. Av särskild betydelse är att begränsningar med avseende på den kemiska sammansättningen av buffert- och återfyllnadsmaterial definieras och beaktas, samt att densiteten för installerade buffert- och återfyllnadsblock är tillräckligt hög. Kopparkapslarnas geometri och tillverknings-toleranser har en betydelse för uppkomsten av dragspänningar, vilket behöver beaktas i samband med kapseltillverkning. SSM:s detaljerade bedömningar av spänningskorrosionsrisk, som förutom SKB:s studier även har baserats på forskning som SSM själv har finansierat (t.ex. [11, 12]), framgår av SSM:s granskning av SKB:s komplettering avseende kapselintegritet (avsnitt 7 i [13]).





Rörande saunaeffekten kan processen i någon mening anses förekomma i ett slutförvar vilket bland annat visas genom att tunna skikt av främst kalcit och gips har bildats på varma exponerade kopparytor i olika typer av försök [14, 15]. SSM:s externa experter framförde i samband med myndighetens granskning av SKB:s komplettering avseende kapselintegritet slutsatsen att stora mängder vattenånga kommer att ledas bort från deponeringshålen under lång tid med uppkoncentrering av sulfid, och ansamling av stora mängder salt som följd [16]. SSM bedömer dock att det inte finns någon rimlig grund för denna slutsats, vilket framgår av SSM:s granskning av kompletteringen (avsnitt 4 i [13]). SSM:s sammanfattande slutsats i den granskningen var att saunaeffekten har marginell betydelse i ett KBS-3-bränsleförvar vid Forsmark och ingen ytterligare information har tillkommit som omprövar den bedömningen.

Rörande studiens betydelse för beslut om tillstånd för ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark anser SSM den inte medför några skäl till att ändra sedan tidigare redovisade bedömningar kring SKB:s förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav.

## SSM:s svar på frågan om LOT-försöken

Regeringen önskar svar på frågan om det finns information från LOT-försöken vid Äspö-laboratoriet som SSM anser bör redovisas och utvecklas och som har betydelse för bedömningen avseende kapselns hållbarhet.

SSM har i närtid publicerat en granskningsrapport om LOT-försöken [17], i vilken det konstateras att de senast erhållna resultaten är i linje med den information som varit känt sedan tidigare faser av LOT, och med den konventionella förståelsen för kopparkorrosionsprocesser. Denna slutsats ger följaktligen inget skäl för ytterligare LOT-redovisning.

## SSM:s kommentar till andra aktörers synpunkter på frågan om LOT-försökens betydelse

I en skrivelse till SSM daterad 2021-10-05 (SSM2021-6452-1) framför Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG) synpunkter på LOT-försökens betydelse. Skrivelsen vidareutvecklar synpunkter, som tidigare även riktats till regeringen, om att de mest korroderade kopparytorna från försöket måste detaljgranskas. MKG anser att om detta görs kommer det att visa att koppar inte är ett lämpligt kapselmateriale för kärnbränsleförvaret.

SSM har sedan lång tid tillbaka varit medveten om MKG:s fokus på LOT-försöken (avsnitt 3.1 i [18]). LOT-försöken är enligt SSM:s uppfattning betydelsefulla och utgör ett viktigt fältförsök för att verifiera kunskapen kring främst bentonitprocesser, i viss mån med avseende på kopparkorrosion, men även för mer allmänna frågor som kompetens kring fältmätningar och kvalitetssäkring av resultat (avsnitt 4.10.8 i [19]). SSM har dock inte själv haft några förväntningar kring att försöken skulle kunna bidra med avgörande kunskap om kopparkorrosionsprocesser, och följaktligen inte heller kunna svara på sådana allmänna frågor som huruvida koppar utgör ett lämpligt kapselmateriale. En anledning till detta är att korrosionsprocesser under inledande oxiderande betingelser representerar en, för de i slutförvarssammanhang mycket långa tidsperioderna, förhållandevis kort period som sker direkt efter slutlig förslutning av en deponeringstunnel och, som en följd av kopparkorrosionsprocesser, inte kan ha en avgörande betydelse för kapselns långsiktiga integritet. För att förstå detaljer kring långsiktiga kopparkorrosionsprocesser i slutförvarsmiljö är den typen av försök där koppar reagerar med tillförd sulfid, som diskuteras översiktligt i avsnittet ovan, mer relevant för den långsiktigt ihållande fasen av



reducerande betingelser som följer efter att oxidanter som syre och koppar(II) helt har förbrukats, och därmed inte kan orsaka ytterligare korrosion.

Förståelse för kopparkorrosion är inte begränsad till empiri utan är även baserad på ett termodynamiskt ramverk innefattande kunskap om termodynamiska egenskaper för kända och relevanta kopparföreningar. Detta ramverk måste betraktas som grundläggande och sedan länge väletablerat [20]. Om man beaktar denna termodynamiska kunskap tillsammans med förståelsen för det planerade slutförvarets geokemiska utveckling framgår två huvudsakliga korrosionsformer; korrosion under den inledande oxiderande perioden (med kvarvarande syre och även i viss mån koppar(II) som bildas under perioden) samt korrosion med sulfid vilken sker under den efterföljande, långsiktigt ihållande perioden med reducerande kemiska förhållanden. Kopparkorrosion med sulfid är den korrosionsform som har störst betydelse för dimensionering av höljets tjocklek. Information från LOT-försöken avser främst korrosionsprocesser som sker under den inledande oxiderande fasen.

Förutom de båda ovan nämnda korrosionsformerna har ytterligare en korrosionsprocess av vissa aktörer föreslagits som betydande i sammanhanget. Den hypotetiska processen, som postulerades för mer än trettio år sedan [21], brukar benämnas korrosion i rent syrgasfritt vatten (dvs. koppar reagerar med vattenmolekyler under bildning av väte). Processen innefattar, enligt publicerade arbeten i den vetenskapliga litteraturen, bildning av en hittills ännu ej identifierad, isolerad och karakteriserad korrosionsprodukt ( $H_xCuO_y(s)$ ,  $CuOH(s)$ ; [22, 23]). MKG har tillsammans med forskargruppen vid KTH, som ligger bakom studierna kring den hypotesen, under lång tid förespråkat korrosionsformen och hävdar dess avgörande betydelse i slutförvarssammanhang (t.ex. [24]). Mot bakgrund av de omfattande undersökningar som genomförts under senare år kring denna hypotes, både i Sverige (t.ex. [25, 26]) och i andra länder såsom Finland och Kanada där koppar också planeras som inkapslingsmaterial [27, 28], anser SSM att det inte finns några belegg för betydelsen av denna korrosionsform och inte heller någon rimlig förklaring till varför traditionell termodynamik inte är tillämplig. Rapporteringen från LOT-försöken visar inte heller på något annat än förväntade korrosionsprodukter som förutom vissa antydningar till sulfidbildning är konsekventa med att korrosion har ägt rum under oxiderande förhållanden under försöken (kuprit, koppar i jonbytespositioner i leran, paratakamit etc. [29, 30]).

MKG anför i sin skrivelse att det finns frågetecken kring vilken korrosionsform som har ägt rum på de varmaste delarna av kopparrören och att det därför är angeläget att särskilt undersöka dessa. Det är i princip alltid möjligt att ta flera prover och SSM instämmer med MKG att viss ytterligare information kring de korroderade ytornas egenskaper och morfologi hade kunnat erhållas genom analys av flera rörsektioner, men det är svårt att se något skäl till varför den typen av information skulle vara avgörande på det sätt som MKG föreslår. Om en särskild hittills okänd form av korrosion hade förekommit under försöket, varför skulle den ha förekommit på vissa delar av kopparröret men inte på andra? Skillnaderna i temperatur mellan de rörsektioner som MKG har uttryckt intresse för och de som har analyserats begränsas till ett antal tiotal grader Celsius [31]. Det bör också noteras att SKB:s rapportering av analyser i samband med upptaget av LOT S2 och A3 vida överstiger vad som gjorts i samband med upptag av de tidigare avslutade LOT-faserna (jämför korrosionsdelen i [29] och [30]).

MKG lyfter också fram behovet av ytterligare analyser av korrosionens omfattning för de mest korroderade delarna av kopparrören i LOT-försöken. SSM konstaterar inledningsvis att skillnader med avseende på korrosionens omfattning i försöken inte på något sätt är överraskande. De förklaras först och främst av temperaturskillnaden som långsiktigt upprätthållits på kopparrören beroende på de elektriska värmarnas placering. En högre



reaktionshastighet vid högre temperatur ger upphov till koncentrationsskillnader med avseende på tillgängligt syre i försöksuppställningen. Därmed skapas en drivkraft för transport av syre från kalla till varma delar av försöken. Syrets tillgänglighet i olika medier med olika transportegenskaper varierar också, såsom i kvarvarande spalter, i kompakterade bentonitblock samt i sand.

Korrosionens omfattning i försöken har bestämts genom gravimetriska mätningar av korrosionskupper (medelkorrosionsdjup på kupperna uppgår efter en tjuugoårsperiod till cirka 1 µm), och för kopparrören även indirekt genom att mäta kopparhalten i bentonitlera. För kalla delar av kopparrören motsvarar ackumulerad korrosion ett korrosionsdjup på 1 µm, och för de varmaste delarna 10-15 µm. Dessa skillnader kan förklaras genom beaktande av lokala miljöbetingelser, främst temperatur. SSM anser att den tillgängliga informationen utgör ett rimligt underlag för att bedöma korrosionens omfattning, inte bara för korrosionskupperna utan även för olika delar av kopparrören. Detta innefattar således även de kopparytor som exponerats för de högsta temperaturerna. Det bör också noteras att de korrosionsdjup som har kunnat bestämmas med störst noggrannhet avser korrosionskupperna, och att de har befunnits i den för slutförvarets långsiktiga utveckling mest representativa miljön (i kompakterad bentonit utan förekommande spalter).

För en djupare diskussion av de specifika frågeställningar som MKG har tagit upp hänvisas till avsnitt 9.2.5 i SSM:s granskningsrapport avseende SKB:s LOT-försök A3 och S2 [17].

## SSM:s svar på frågorna om studien om statisk deformationsåldring av segjärn

Regeringen önskar också få svar på om den finska forskning som nyligen publicerats (Björklund, V, 2021) om gjutjärnets egenskaper påverkar bedömningarna i fråga om det finns kvarstående osäkerheter om gjutjärnets egenskaper som kan inverka på kopparkapselns förmåga att innesluta kärnavfallet på lång sikt. Om det kan anses kvarstå sådana osäkerheter om segjärnets egenskaper, önskar regeringen vidare få svar på om osäkerheterna bedöms vara försumbara, små eller betydande.

I det finska examensarbetet (Björklund, V, 2021) har statisk deformationsåldring av segjärn studerats i syfte att undersöka huruvida segjärnets materialegenskaper försämras till följd av processen. Materialet är detsamma som det som avses användas för segjärnsinsatsen i SKB:s program. I studien har provstavar av segjärn förbelastats genom dragprovning i rumstemperatur i varierad omfattning (1%, 2% och 3% töjning) varpå proverna åldrades vid olika temperaturer (rumstemperatur, 100 °C, 200 °C, 300 °C och 400 °C) under varierad tid. Efter nedkylning under kort tid till rumstemperatur genomfördes dragprovning av de förbelastade och åldrade provstavarna för att analysera de mekaniska egenskaperna. Några prover förbereddes också för optisk analys av hur materialet deformeras med hjälp av den optiska metoden DIC (*"Digital Image Correlation"*). Studien visar att de åldrade proverna erhåller en ökad markerad sträckgräns som tydligt skiljer sig från det icke-åldrade referensprovet. Författaren bedömer i rapportens avslutande del att de erhållna experimentella resultaten inte ger några skäl att tro att deformationsåldring är en avgörande fråga mot bakgrund av en diskussion om det huvudsakliga lastfallet som omfattas av en möjlig deformation av insatsen i slutförvarsmiljö, det vill säga i samband med stora jordskalv.

SSM noterar inledningsvis att examensarbetet är väl genomfört. Studien analyserar statisk deformationsåldring av segjärn vilket är en process som medför en försprödning av materialet efter plastisk deformation och som är mer påtaglig vid förhöjda temperaturer.





För att processen ska kunna vara relevant för risken för kapselbrott behöver alltså segjärnsinsatsen först genomgå en plastisk deformation som följd av ett relevant lastfall som uppkommer efter slutförvarets förslutning. Detta är något som även SKB pekade på i sin komplettering av tillståndsansökan avseende bland annat deformationsåldring av segjärn [32]. Processen studeras även inom ramen för SKB:s forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram (Fud) (avsnitt 9.4.2 i [33]).

Avgörande för analysen av segjärnsinsatsens lastbärande förmåga är hur dimensionerade lastfall har definierats och motiverats i säkerhetsanalysen. Dessa avser dels isostatiska laster (jämnt fördelade laster runt kopparkapselns yta), dels skjuvlaster som härrör från rörelser längs sprickor i berggrunden som skär ett deponeringshål. Det första fallet uppkommer som en följd av buffertens svälltryck, grundvattentrycket på förvarsdjup, samt förhöjd isostatisk last under en glaciation, och det andra skulle kunna uppstå till följd av stora jordskalv. En viktig distinktion mellan de två fallen är att samtliga kapslar i slutförvaret blir exponerade för det föregående, men endast en liten andel skulle kunna bli det i det senare (kapslar i deponeringshålspositioner som antas korsas av spröda strukturer i berget vilka inte har upptäckts i samband med kartering av deponeringshålens och deponeringstunnlarnas väggar). Ytterligare en skillnad mellan de två lastfallen är att medan en glaciation under den senaste 100 000-årsperioden bevisligen har inträffat i Forsmark, har inga jordskalv påvisats inträffat i Forsmarkområdet från samma tid. I detta sammanhang kan det även vara värt att notera att nuvarande förståelse av klimatutvecklingen de kommande 100 000 åren tyder på att den antropogena påverkan på klimatet leder till att pågående interglacial sannolikt kommer att pågå under flera tiotusentals år framöver och möjligen upp till 100 000 år (del III, avsnitt 3.2.2 i [34]).

Deformationsåldring är mindre relevant i samband med det isostatiska lastfallet eftersom insatsen är dimensionerad att med stor säkerhetsmarginal motstå de laster som förväntas uppstå till följd av buffertsvällning, av grundvattentrycket på förvarsdjup samt av förhöjd isostatisk last under en glaciation. Det är endast vid extremt höga omgivningstryck över 100 MPa som insatsen riskerar att falla som en följd av plastisk deformation, vilket bör jämföras med konstruktionstrycket på 45 MPa som kapseln alltså är dimensionerad för [35, 36]. En sådan last motsvarar en istjocklek över slutförvaret som är betydligt högre än förväntade framtida istjocklekar och är den maximala isostatiska last som beaktas i säkerhetsanalysen. Risk för att insatsen får försämrade materialegenskaper bedöms således vara mycket liten som en följd av det dimensionerande isostatiska lastfallet (avsnitt 4.11 och 5.9 i [19]).

Andra typer av berg rörelser förutom de som orsakas av stora jordskalv förväntas inte heller orsaka en plastisk deformation av insatsen mot bakgrund av den omgivande bentonitbuffertens kapacitet att deformeras och ta upp rörelser i berget. Bergguttaget och värmen från det deponerade bränslet kommer att påverka bergspänningsförhållandena vilket potentiellt kan orsaka sprickrörelser. Huruvida sprickrörelser sker är tillika beroende av sprickornas orientering, storlek och skjuvhållfasthet, det vill säga alla sprickor är inte att betrakta som potentiellt instabila. Vidare är det värt att beakta att bergmassans stabilitet kontinuerligt kommer att, fram till förslutning av anläggningen, mätas och analyseras vilket kommer att utgöra en god grund för bedömningen av i vilken utsträckning sprickrörelser efter förslutning kan förmodas förekomma. Ytterligare en aspekt att väga in är att återfyllnaden efter återmätningen ger ett visst mottryck mot eventuella berg rörelser. SSM:s bedömer således att denna typ av processer som orsakar småskaliga och/eller långsamma bergmekaniska effekter som termiskt inducerade skalv, aseismisk kryp och spjälkning inte har en relevans i säkerhetsanalysen med avseende på deformation av insatsen, vilket även framgår av SSM:s granskningsrapport (avsnitt 4.4. i [19]).

För de fåtalet kapslar i kritiska deponeringshålspositioner, det vill säga deponeringshål som skärs av en relativt stor spricka och som inte har upptäckts under karteringen, som i samband med att ett stort jordskalv skulle kunna bli påverkade av betydande bergrörelser över en viss nivå, sker däremot deformation av såväl hölje och insats, och för denna typ av lastfall har processen i studien således en relevans.

Beträffande regeringens fråga om huruvida osäkerheter om segjärnets egenskaper kan bedömas vara försumbara, små eller betydande är ett sammanhang för frågan osäkerheter mot bakgrund av de processer och experimentella studier som den återopade finska studien har fokuserat på, det vill säga statisk deformationsåldring. Det konkreta lastfall som beskrivs i rapporten med två stora jordskalv som orsakar två på varandra följande större skjuvrörelser i ett och samma deponeringshål (det första skalvet orsakar en plastisk deformation och det andra potentiellt ett kapselbrott) är i sig mycket osannolikt, vilket författaren själv påpekar. Det kan, förutom den låga sannolikheten för att fallet överhuvudtaget inträffar, för det första konstateras att en mycket liten andel av kapselpositionerna skulle kunna påverkas, och för det andra att de förhöjda temperaturer vid vilka försöken har genomförts inte skulle vara representativa med en sannolik tidpunkt för ett stort jordskalv och i synnerhet inte för ett andra stort jordskalv. SKB:s säkerhetsanalys beaktar visserligen effekten av två på varandra följande skalv, men med en längre tidsperiod mellan förekomsten för dessa eftersom de bergspänningar som avtar vid det första skalvet åter skulle behöva byggas upp (avsnitt 10.4.5 i [37]).

Ett annat sammanhang för frågan kopplar till SSM:s egen granskning och som avser hur SSM skattar osäkerheter kring insatsens lokala egenskaper till följd av tillverkningsprocesser. SSM har tidigare bedömt att SKB behöver ta fram en kontrollordning för tillverkningen av segjärnsinsatsen så att materialegenskaper och frånvaro av otillåtna defekter kan verifieras (avsnitt 3.4 i [19]). För att denna form av osäkerhet inte bara ska ha en ekonomisk betydelse (på grund av en hög kassationsfrekvens), utan även en strålsäkerhetsbetydelse fodras dock att segjärnsinsatser med defekta och/eller på annat sätt otillåtna egenskaper används vid deponering av använt kärnbränsle. Vad som kan anses vara oacceptabla egenskaper exempelvis med avseende på defekters storlek och orientering har visats genom hållfasthets- och skadetålighetsanalyser för samtliga för kapselns dimensionering och utformning relevanta och gränssättande lastfall. Även om lokala variationer av materialegenskaper för tillverkade segjärnsinsatser behöver fortsatt uppmärksamhet, är SSM:s sammanfattande bedömning att frågan vid tidpunkten för drift av ett slutförvar bör vara av mindre betydelse. Med denna bedömning förutsätter SSM ett fortsatt utvecklingsarbete av SKB, detta med avseende på vidareutveckling av oförstörande provningsmetoder och genomförande av ett kontrollprogram för tillverkning av insatser i industriell skala.

Ytterligare en synpunkt som översiktligt diskuteras i examensarbetet rör eventuella synergieffekter mellan väteförspredning till följd av korrosion av segjärn, och deformationsåldring. Givet att kopplingen mellan dessa processer inte explicit har studerats utesluter inte SSM att frågan kan behöva belysas ytterligare i SKB:s fortsatta program, men SSM betraktar det som osannolikt att det skulle kunna vara betydelsefull fråga för slutförvarets skyddsförmåga. Väteförspredning skulle kunna vara en fråga av betydelse för kapselhållfasthet efter att kopparhöljets täthet har gått förlorad. För tiden innan dess bör dock korrosion eller väteförspredning av insatsen vara minimal och därmed betydelselös för insatsens hållfasthetsegenskaper. En förutsättning för att säkerställa detta är att bränslet torkas innan det inplaceras i en kapsel. I synnerhet för en liten andel av bränslet som är skadat kan det visa sig vara svårt att utesluta att en viss mängd resterande vatten blir kvar även efter torkningen. Därav kravställningen i säkerhetsanalysen att inte mer än 600 g kvarvarande vatten i bränslet får inneslutas i insatsen i samband med förslutning [38, 39]. En sådan restmängd skulle dock förbrukas snabbt efter förslutning av

en kapsel (genom i första hand korrosion med segjärnet), medan den möjliga effekten av deformationsåldring sannolikt avser en helt annan tidsålder i slutförvarets utveckling, vilket diskuteras ovan. Det finns inte heller något som säger att det är de kapslar med mest kvarvarande vatten som hamnar i kritiska deponeringspositioner vad gäller jordskalvsrisk. Eftersom betydande deformation av insatsen i samband med ett större jordskalv avser en viss del av kapseln i anslutning till ett skjuvplan skulle också korrosion eller försprödning behöva ha angripit just detta område av insatsen för att synergismen eventuell ska kunna uppstå, vilket ytterligare reducerar sannolikheten för potentiell synergism.

Sammanfattningsvis konstaterar SSM att processen statisk deformationsåldring av segjärn beaktades och bedömdes inom ramen för SSM:s beredning av SKB:s ansökan. Betydelsen av den finska studiens resultat för myndighetens bedömningar rörande kopparkapselns inneslutningsförmåga på lång sikt anses vara ytterst liten.

## SSM:s avslutande kommentarer avseende regeringens inledande fråga om kvarstående osäkerheter

Regeringens övergripande syfte med remissen är att få svar på frågan om det finns kvarstående osäkerheter rörande gjutjärnets egenskaper och kopparkapselns förmåga att innesluta kärnavfallet på lång sikt. Enligt de krav som specificeras i SSM:s föreskrifter [40-42] och i internationella styrande dokument [43-45] finns dessutom inget krav på att alla former av osäkerheter ska elimineras, vilket även i teorin torde vara en omöjlighet. Däremot förutsätts att slutförvaret har utformats för att minimera betydelsen av kvarvarande osäkerheter (till exempel för att kunna uppfylla krav på bästa möjliga teknik), och att osäkerheter har identifierats och värderats inom ramen för en säkerhetsanalys med syftet att förstå och beakta deras betydelse för att uppnå högt ställda krav på ett slutförvars skyddsförmåga (till exempel SSM:s riskkriterium samt kravet på skydd av miljön). Om man i det aktuella sammanhanget med att det finns kvarstående osäkerheter avser allt för stora eller diskvalificerande osäkerheter hade förutsättningarna att uppfylla SSM:s föreskriftskrav behövt betraktas som oacceptabelt låga, alternativt omöjliga att bedöma.

Kapselns inneslutningsfunktion bidrar i hög utsträckning till det planerade slutförvarets skyddsförmåga och de frågor som regeringen omnämner är därmed betydelsefulla att belysa. Det är emellertid inte möjligt att ta ställning till SKB:s ansökan enbart genom att beakta en av systemets komponenter. Ett slutförvar ska enligt SSM:s föreskrifter bestå av flera barriärer, både tillverkade och naturliga, som tillsammans upprätthåller flerfaldiga säkerhetsfunktioner. I SKB:s ansökan utgörs barriärerna av berget vid den tilltänkta slutförvarsplatsen vid Forsmark, bentonitbufferten och kopparkapseln medan säkerhetsfunktionerna avser dels fullständig inneslutning av radioaktiva ämnen, dels fördröjning och radioaktivt sönderfall av eventuella utsläpp. Dessa barriärer och säkerhetsfunktioner ska tillsammans ge förutsättningar för att eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen inte överstiger nivåer motsvarande SSM:s riskkriterium, vilket motsvarar ungefär en hundradel av den naturliga bakgrundsstrålningen på platsen. I såväl Sverige som i internationella sammanhang har tillämpning av flerbarriärkoncept och användning av flera säkerhetsfunktioner varit en central utgångspunkt vid utveckling slutförvarskoncept, i synnerhet för använt kärnbränsle och högaktivt avfall [46, 47].

Kopparkapselns säkerhetsfunktioner innefattar krav på att motstå mekaniska laster från omgivningen genom segjärnsinsatsens lastbärande egenskaper, samt att kopparhöljet upprätthåller en tillräcklig korrosionsmån. Enligt säkerhetsanalysen SR-Site [37] går det dock inte, trots de konstruktionsåtgärder som vidtas för att undvika stora sprickor i närheten av deponeringshål, att helt utesluta förekomsten av kapselbrott på grund av skjuvrörelser i sprickplan som korsar kapselgeometrin som en följd av stora jordskalv i närheten av slutförvaret. Det går heller inte att utesluta kapselbrott som följd av korrosion



om de högsta uppmätta sulfidhalterna vid Forsmark skulle bli bestående under mycket lång tid i de deponeringshål som är exponerade för de största grundvattenflödena samtidigt som bufferten har eroderats efter att glaciala smältvatten nått förvarsdjup. Sannolikheten för båda dessa fall är dock mycket låg då risken endast avser ett fåtal deponeringshål med avvikande egenskaper. Demonstration av fullständig inneslutning utgör inte heller något krav för att påvisa långsiktig strålsäkerhet. Slutförvarets skyddsförmåga bedöms genom en sammanvägning mellan säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning.

SSM har som uppgift att bedöma tillförlitligheten i SKB:s redovisning av slutförvarssystemets skyddsförmåga utifrån myndighetens krav på slutförvarets strålsäkerhet. Detta innebär att betydelsen av enskilda processer, såsom exempelvis de som analyseras i de studier som remissen innefattar, bedöms utifrån de betingelser som påverkar processernas omfattning i slutförvarsmiljön. Det är ett kollektivt, tvärvetenskapligt granskningsarbete som har pågått under lång tid och som har fokuserats på bedömning av uppfyllelse av krav som alltså avser barriärsystemets sammantagna skyddsförmåga. Fördjupad vetenskaplig förståelse av enskilda processer är självklart viktig i detta sammanhang men de insikter som uppnås behöver återigen alltid utvärderas mot bakgrund av kunskap om och förståelse för slutförvarets förhållanden och långsiktiga utveckling. Att SSM i sin granskning och i sina bedömningar inte drar samma slutsatser som vissa remissinstanser eller externa experter har gjort innebär inte att den information som myndigheten har mottagit har bortsetts från eller ignorerats, utan enbart att SSM inte delar den tolkning som dessa instanser har gjort angående betydelsen av de vetenskapliga resultaten för slutförvarets sammantagna skyddsförmåga.

Sammanfattningsvis har SSM inom ramen för hanteringen av Miljödepartementets remiss granskat de båda bifogade studierna som avser kopparkapselns båda konstruktionsmaterial koppar och segjärn, och har värderat deras relevans för SKB:s ansökan att uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark. Studierna avser i grunden aspekter kring kopparkapselns skyddsförmåga som har beaktats och som tidigare har granskats av SSM. SSM:s bedömning är att ingen av de båda nämnda vetenskapliga studierna är av den karaktären att de medför några skäl till att ändra SSM:s sedan tidigare redovisade bedömningar kring SKB:s förutsättningar att uppfylla myndighetens föreskriftskrav. SSM anser sammanfattningsvis att de kvarvarande osäkerheterna är mycket små i förhållande till slutförvarets samlade skyddsförmåga.

---

I detta ärende har generaldirektören Nina Cromnier beslutat. Utredaren Henrik Öberg har varit föredragande. I den slutliga handläggningen har också avdelningscheferna Johan Friberg och Michael Knochenhauer, tf. enhetschefen Lisa Ranlöf, seniora rådgivaren Ansi Gerhardsson samt utredarna Bo Strömberg, Michael Egan, Elena Calota, Daniel Kjellin och Carl-Henrik Pettersson deltagit.

*Detta beslut expedieras utan underskrift.*

STRÅLSÄKERHETSMYNDIGHETEN

Nina Cromnier

Henrik Öberg

## Referenser

- [1] SKBF, 1983. *Kärnbränslecykelns slutsteg, Använt kärnbränsle – KBS-3, III Barriärer*. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- [2] SKB TR-92-26, 1992. *Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects*. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [3] Chen J, Qin T, Martino T, Guo M, Shoesmith D W, 2018. *Copper transport and sulphide sequestration during copper corrosion in anaerobic aqueous sulphide solutions*. Corrosion Science 131, 245-251.
- [4] 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.
- [5] Macdonald D D, Mao F, Dong C, Sharifi-Asl S, 2016. *Measurements of Parameter Values for Predicting Corrosion Phenomena on Copper in Swedish HLNW Repositories*. SSM Report 2016:30, Swedish Radiation Safety Authority.
- [6] Chen J, Qin Z, Martino T, Shoesmith D W, 2017. *Non-uniform film growth and micro/macrogalvanic corrosion of copper in aqueous sulphide solutions containing chloride*. Corrosion Science 114, 72–78.
- [7] Martino T, Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2017. *The kinetics of film growth and their influence on the susceptibility to pitting of copper in aqueous sulphide solutions*. Corrosion Engineering, Science and Technology 52, 61–64.
- [8] King F, Kolar M, Vähänen, M, Lilja C, 2011. *Modelling long-term corrosion behaviour of copper canisters in KBS-3 repository*. Corrosion Engineering, Science and Technology 46:2 217-222.
- [9] Kong D, Xu A, Dong C, Mao F, Xiao K, Li X, Macdonald D D, 2017. *Electrochemical investigation and ab initio computation of passive film properties on copper in anaerobic sulphide solutions*. Corrosion Science 116 34-43.
- [10] SKB TR-10-29, 2010. *SR-Site – sulphide content in the groundwater at Forsmark*. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [11] Becker R, Öijerholm J, 2017. *Slow strain rate testing of copper in sulfide rich chloride containing deoxygenated water at 90 °C*. SSM Report 2017:02. Strålsäkerhetsmyndigheten.
- [12] Becker R, Forsström A, Yagodzinskyy Y, Hänninen H, Heikkilä M, 2020. *Sulphide-induced stress corrosion cracking and hydrogen absorption in copper exposed to sulphide and chloride containing deoxygenated water at 90°C*. SSM Research 2020:01. Strålsäkerhetsmyndigheten.
- [13] Strålsäkerhetsmyndigheten, 2019. *SSM:s granskning av SKB:s komplettering till regeringen om kapselintegritet*. Granskningsrapport, dokumentnummer SSM2019-3168-9, Strålsäkerhetsmyndigheten, 2019-09-30.





[14] SKB TR-09-29, 2009. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel.* Svensk Kärnbränslehantering AB.

[15] SKB TR-13-21, 2013. *Prototyp Repository. Hydro-mechanical, chemical and mineralogical characterization of the buffer and tunnel backfill material from the outer section of the Prototype Repository.* Svensk Kärnbränslehantering AB.

[16] Szakálos P, Leygraf C (2019). *Review Assignment for the Swedish Radiation Safety Authority: Corrosion of Copper Canister*, In: SSM's external experts' reviews of SKB's report on supplementary information on canister integrity issues, del 2 i Technical Note 2019:22, Strålsäkerhetsmyndigheten

[17] Strålsäkerhetsmyndigheten, 2021. *Strålsäkerhetsmyndighetens granskning av SKB:s analys och rapportering av kopparkorrosionsresultat från försökspaketen A3 och S2 i LOT-projektet vid Äspölaboratoriet.* Granskningsrapport, dokumentnummer SSM2021-1539-1 Strålsäkerhetsmyndigheten, 2021-03-10.

[18] Baldwin T, Hicks T, 2010. SSM Research 2010:17. *Quality Assurance Review of SKB's Copper Corrosion Experiments.* Strålsäkerhetsmyndigheten.

[19] Strålsäkerhetsmyndigheten, 2018. *Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning. Beredning inför regeringens prövning. Slutförvaring av använt kärnbränsle.* SSM Rapport 2018:07, Strålsäkerhetsmyndigheten, 2018-01.

[20] McCafferty E, 2009. *Thermodynamics of Corrosion: Pourbaix diagrams., chapter 6*, In Introduction to Corrosion Science, Springer Science.

[21] Hultquist G, 1986. *Hydrogen evolution in corrosion of copper.* Corrosion Science 26, 173–176.

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

[23] Hultquist G, Graham M J, Szakálos P, Sproule G I, Rosengren A, Gråsjö L, 2011. *Hydrogen gas production during corrosion of copper by water.* Corrosion Science 53, 310-319.

[24] Kärnavfallsrådet, 2010. *Rapport 2009:4 Mechanisms of Copper Corrosion in Aqueous Environments.* Kärnavfallsrådet.

[25] Ottosson M, Boman M, Berastegui P, Andersson Y, Hahlin M, Korvela M, Berger R, 2017. *Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate.* Corrosion Science 122, 53-60.

[26] Hedin A, Johansson A J, Lilja C, Boman M, Berastegui P, Berger R, Ottosson M, 2018. *Corrosion of copper in pure O<sub>2</sub>-free water?* Corrosion Science 137, 1-12.

[27] Senior N A, Newman R C, Artymowicz D, Binns W J, Keech P G, Hall D S, 2019. *Communication – A method to measure extremely low corrosion rates of copper metal in anoxic aqueous media.* Journal of the Electrochemical Society 166, C3015–C3017.

[28] Ollila K, 2019. *Copper corrosion experiments in pure water under anoxic conditions.* Posiva Working Report 2018-19, Posiva Oy, Finland.



- [29] SKB TR-09-31, 2011. *Long term test of buffer material at the Äspö HRL, LOT project. Final report on the A0 test parcel.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [30] SKB TR-20-14, 2020. *Corrosion of copper after 20 years exposure in the bentonite field tests LOT S2 and A3.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [31] SKB TR-20-11, 2020. *Installation, monitoring, dismantling and initial analysis of material from LOT test parcel S2 and A3. Results from field tests.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [32] SKBdoc 1602640, Sarnet J, Holst L, 2017. *Åldring, deformationsåldring och blåsprödhet av segjärn.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [33] SKB, 2019. *Fud-program 2019. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [34] Strålsäkerhetsmyndigheten, 2019. SSM 2019:18. *Granskningsrapport – Utbyggnad och fortsatt drift av SFR.* Strålsäkerhetsmyndigheten, 2019-10.
- [35] SKB TR-05-17, 2005. *Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [36] SKB TR-05-18, 2005. *Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [37] SKB TR-11-01, 2011. *Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site.* Svensk Kärnbränslehantering AB, Uppdaterad december 2012.
- [38] SKB TR-10-46, 2010. *Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [39] SKBdoc 1419961, Johansson J, 2014. *Corrosion of the copper canister inside due to radiolysis of remaining water in the insert.* Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [40] SSMFS 2008:1. *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar.* Strålsäkerhetsmyndigheten.
- [41] SSMFS 2008:21. *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall.* Strålsäkerhetsmyndigheten.
- [42] SSMFS 2008:37. *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall.* Strålsäkerhetsmyndigheten.
- [43] IAEA, 2011. *Disposal of radioactive waste.* Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA Safety Standards Series SSR 5).
- [44] IAEA, 2012. *The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste.* Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA Safety Standards Series SSG 23).



[45] NEA, 2012. *Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste*. OECD/NEA, Paris, France. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

[46] ICRP, 2013. *Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste*. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3). International Commission on Radiological Protection.

[47] NEA, 2000. *Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories*. OECD/NEA, Paris, France. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.