

Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning, MKG

Underlag för kompletteringskrav rörande barriärproblematik

Docent Olle Grinder, PM Technology AB

Maj 2012

Synpunkter på SKB:s ansökan för slutförvar av kärnkraftsavfall och tillhörande säkerhetsanalys SR-Site

1. INTRODUKTION

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har i sin tillståndsansökan för slutförvar av utbränt kärnkraftsavfall föreslagit att detta skall deponeras på 500 meters djup vid Forsmark enligt det så kallade KBS-3 konceptet. Det är värt att notera att olika säkerhetsaspekter rörande slutförvaret tidigare undersökts endast experimentellt vid Äspö-laboratoriet i Oskarshamn och att förhållandena vid det nu föreslagna slutförvaret i Forsmark på en rad områden väsentligen skiljer sig från dessa vid Äspö-laboratoriet. Detta innebär att det föreligger beträffande deponering i Forsmark stor osäkerhet samt brist på data av fundamental betydelse för säkerhetsanalysen, exempelvis rörande tillströmningen av grundvatten till deponeringshålen för kapslarna med kärnkraftsavfall och tiden till att den bentonit som omger kapslarna uppnår vattenmättnad.

2. SKB:s ARBETSMETODIK

2.1 Matematiska modeller

SKB har valt en arbetsmetodik för utvärdering av olika säkerhetsaspekter för slutförvaret som i mycket hög grad bygger på matematisk simulering av olika förhållanden av betydelse för säkerheten. Matematiska modeller har utarbetats för exempelvis:

- vattenmättnad av bentoniten i deponeringshålen
- erosion av bentoniten
- olika korrosionsmekanismer för koppar

Dessa matematiska modeller bygger i hög utsträckning på olika antaganden rörande uppskattade mekanismer för masstransporter av föreliggande kemiska föreningar och joner i bentoniten och i grundvattnet. Därefter åsätts värden för olika jämviktsreaktioner och diffusionshastigheter. SKB har på detta sätt teoretiskt beräknat olika förhållanden av helt avgörande betydelse för säkerheten hos det kommande slutförvaret t.ex. korrosionshastigheter för koppar enligt några mekanismer och erosion av bentonit.

Det normala vid användning av matematiska modeller är att de data som använts i modellerna, de teoretiska förutsättningarna och de resultat som erhållits verifieras genom experiment under relevanta förhållanden. SKB har i några fall valt det omvända d.v.s. att när det föreligger en diskrepans mellan teoretiskt beräknad och experimentellt uppmätt korrosionshastighet för koppar har SKB valt att underkänna försöken. Om uppmätta värden visar sig avvika från de teoretiskt ansatta sätter man, enligt god vetenskaplig praxis, in de uppmätta värdena i modellen och gör om beräkningarna. SKB har för dessa fall dragit slutsatsen att försöken inte kunnat ha genomförts på ett korrekt sätt då för hög korrosionshastighet uppmätts experimentellt relativt teoretisk beräknad.

I projektet MiniCan har vidare SKB valt att exkludera hela försöksserier av samma skäl - den experimentellt uppmätta korrosionshastigheten för koppar var avsevärt högre än den teoretiskt beräknade, (Baldwin et al, SSM 2010:17) och (Smart et al, SKB TR-09-20). Exkluderingen av dessa försöksserier gjordes utan kommentarer i den senare rapporten, vilket definitivt inte är i enlighet med god vetenskaplig praxis.

SKB hade ännu inte maj 2012 avrapporterat eventuella resultat från korrosionsstudier i det s.k. Återtagningsförsöks-projektet i vilket en kopparkapsel i fullskala placerades i vattenmättad bentonit och uppvärmdes inifrån. Provet pågick under 5 år och kapseln och omgivande bentonit togs upp för undersökning i maj 2006 (SKB TR-07-10). I SKB TR-11-10 framgår det på sidan 5 att kapseln och omgivande bentonitbuffer hade analyserats under 2008-2009 och att analyserna var i det närmaste färdiga.

Det är utomordentligt viktigt att teoretiska beräkningar byggande på matematiska modeller verifieras experimentellt då resultaten från dessa beräkningar är direkt beroende av

- de ansatser och antagande som har gjorts vid utvecklingen av modellerna
- de data som därefter har använts vid beräkningarna

De finns således alltid en risk när man arbetar med teoretiska modeller att antaganden och data valts subjektivt, vilket skall korrigeras genom utförande av relevanta experimentella försök och med objektiv utvärdering av dessa.

2.2 God vetenskaplig praxis

I avsnitt 2.1. ovan har redovisats några exempel på att SKB har vid utarbetningen av säkerhetsanalysen avvikit från god vetenskaplig praxis, vilket minskar förtroendet för säkerhetsanalysen.

Det är mycket värdefullt om resultaten av matematisk modellering kan jämföras med motsvarande arbeten av oberoende kompetenta organisationer. Den japanska organisationen JNC, Japan Nuclear Cycle Development Institute (Ref. JNC TN1410 2000-03) har gjort teoretiska beräkningar, byggande på matematisk modellering, av korrosion av kopparkapslar i bentonit enligt KBS-3 konceptet. Beräkningarna gjordes för två fall, vid extrem och normalfall med avseende på sulfidhalt i grundvattnet och för 1 000 års exponering.

	Korrosionsangrepp efter 1 000 år	
	Allmän korrosion	Allmän korrosion + punktfrätning
Mycket hög sulfidhalt	9 – 13 mm	18 – 26 mm
Normal sulfidhalt	-	14 mm

Tabell 1. Teoretiska beräkningar av korrosionsangrepp på koppar i bentonit enligt Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC

Vid motsvarande analys utförd av SKB har det maximala korrosionsangreppet beräknats till 3 mm efter 1 000 000 år.

SKB har valt att endast referera till extremfallet med mycket hög sulfidhalt enligt de japanska beräkningarna (King et al, SKB TR-01-23, sida 135). SKB ansåg att detta var irrelevant och kunde försummas samt berörde inte alls normalfallet. Det japanska arbetet berörs inte heller i SR-Site. Detta agerande kan klart anses avvika från god vetenskaplig praxis då det är korrosionsangreppen i normalfallet som måste vara det mest intressanta.

I det japanska arbetet har hastigheten för sulfidkorrosion av koppar vid normalfallet beräknats till 14 $\mu\text{m}/\text{år}$ (inklusive punktfrätning). Den beräknade korrosionshastigheten i den japanska rapporten är sålunda 5 000 gånger högre än motsvarande hastighet framräknad av SKB.

Detta belyser tydligt osäkerheten hos teoretiska beräkningar utgående från matematiska modeller och hur viktigt att resultaten av dessa verifieras med experimentella resultat.

Under punkt 3.6 nedan framgår att de japanska beräknade korrosionshastigheterna väl överensstämmer med SKB:s egna experimentella resultat från t.ex. LOT – och MiniCan försöken samt även från andra undersökningar (King F. et al, 1992) och avsnitt 3.7. SKB:s metodik att endast selektivt presentera viktig information i en så viktig fråga som kopparkorrosion är definitivt inte i samklang med begreppet god vetenskaplig praxis.

SKB:s avrapportering av experimentella resultat från laboratorie-, pilot- och fullskaleförsök inom kopparkorrosionsområdet är ofta bristfällig, i vissa fall felaktig och i många fall med avsaknad av central information. SKB drar vidare slutsatser beträffande korrosionshastigheter och korrosionsmekanismer som saknar stöd i redovisade experimentella resultat, se vidare nedan under avsnitt 3.6 Korrosion med koppar placerad i vattenmättad bentonit.

2.3 Genomförande och utvärdering av experimentella försök

Kopparkapslarna har i KBS-konceptet en avgörande roll som barriär för spridning av det radioaktiva kärnkraftsavfallet. Kapslarna kommer att utsättas för korrosionsangrepp under hela förvaringstiden och förväntas vara så intakta efter 100 000 års exponering att de inte penetreras av omgivande grundvatten.

Kopparkapslarna kommer att utsättas under dessa 100 000 år för en mycket komplex korrosionsmiljö, innefattande ett flertal olika korrosionsmekanismer och mekanisk belastning. Det föreligger en komplicerad samverkan mellan olika korrosionsmekanismer samt även mellan mekanisk belastning och korrosionsangrepp, potentiellt resulterande i spänningskorrosion. Kopparn kommer även att utsättas för olika försprödningsmekanismer som väteförsprödning och sulfidförsprödning, vilka sannolikt samverkar.

Ur säkerhetssynpunkt är det helt avgörande att försök genomförs under relevanta förhållanden med kopparkapslar, helst i full storlek, inbäddade i mättad bentonit, där kapslarna utsätts för såväl korrosiv miljö som mekanisk belastning. Värden sådana försök ökar med ökande provningstid, vilket leder till förbättrad förståelse av:

- aktuella korrosionsmekanismer
- samverkan mellan kopparkapseln och omgivande vattenmättad bentonit
- bildning av korrosionsprodukter på kopparytorna
- utskiljning av kopparföreningar i bentoniten
- utskiljning av salter i bentoniten och på kopparytorna
- korrosionshastigheter
- masstransporter och transportmekanismer i bentoniten

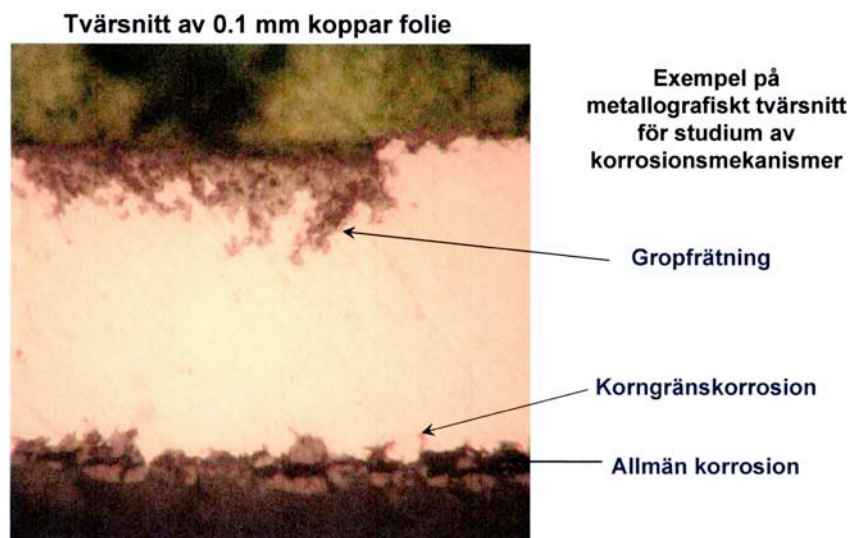
Denna information är central för bedömningen av relevansen hos aktuella matematiska modeller för utarbetning av säkerhetsanalysen.

SKB har arbetat med KBS-3 konceptet i över 30 år och borde därför kunna presentera experimentella försök under relevanta fullskaleförhållanden med en provningstid på åtminstone 25 år.

Det framgår av publicerade SKB-rapporter att längsta försökstid hitintills vid korrosionsprovning av prover, pilot- och fullskalekapslar är 6 år vid de så kallade LOT-försöken. Vid dessa försök undersöktes dock endast enstaka kopparplåtar inbäddade i vattenmättad bentonit. Detta skulle innebära att SKB inte genomfört korrosionsförsök under de första 15-20 åren av företagets verksamhet alternativt har SKB valt att inte avrapportera sådana försök.

Det anmärkningsvärda är att ännu har inte en enda fullskalekapsel av koppar undersökts med avseende på korrosion under relevanta förhållanden av SKB vid Äspö-laboratoriet. Det är även viktigt att betona att korrosionsmiljön, exponeringstider och korrosionsmekanismer skiljer sig avsevärt Äspö-laboratoriet och det tänkta slutförvaret i Forsmark.

Vid korrosionsprovning av metaller är det normalt och anses som god vetenskaplig praxis att studera eventuella korrosionsangrepp och korrosionsprodukter med hjälp av metallografiska undersökningar, se figur 1 som visar på olika korrosionsangrepp på en kopparplåt, vilken varit exponerad i destillerat och syrgasfritt vatten under 15 år (Hultquist 2009). Kopparplåten kapades, varefter den slipades och polerades varefter provet studerades i metallmikroskop. Det framgår av fotografiet att kopparn utsatts för allmän korrosion, punktfrätning (pitting) samt korngränskorrosion. Det är vidare mycket vanligt att de korroderade ytorna studeras i ljusoptiskt mikroskop och SEM (svepelektronmikroskop).



Figur 1. G. Hultquist, (2009)

Mycket viktig information erhålls från mikroskopiundersökningar t.ex. beträffande korrosionsprodukter, korrosionshastigheter samt mekanismer, förekomst av sprickbildning och punktfrätning hos den korroderande metallen. SKB har konsekvent valt att inte visa metallografiska undersökningar i tvärsnitt av korrosionsprovad koppar och endast i enstaka fall fotografier tagna i ljusoptiskt mikroskop eller svepelektronmikroskop.

Karland et al (SKB TR-09-29) har vid avrapportering av LOT projektet för Prov A2 valt att i rapporten och i bilagorna till denna (t.ex. Rosborg i appendix 3) inte presentera ett enda metallografiskt fotografi visande korrosionsangreppen i ett tvärsnitt av kopparn.

Detta är mycket förvånande, skiljer sig från god vetenskaplig praxis och förhindrar att externa personer själva kan bedöma om det föreligger korrosionsangrepp, punktfrätning eller sprickbildning hos kopparkapslar testade i t.ex. LOT eller MINICAN-försöken.

I stället beskrivs korrosionsangreppen (Hedin SKB TR-10-46 sida 107 och 108) ”det föreligger inte några punktangrepp (pitting) av kopparn dock fördjupningar på ytan”. Den bedömningen borde även läsarna av rapporterna få möjlighet att göra. Det kan dessutom ta lång tid att utveckla punktkorrosion.

2.4 Samverkan mellan olika mekanismer för korrosion och försprödning av kopparkapslarna

SKB har genomgående i säkerhetsanalysen utgått ifrån att olika korrosionsmekanismer inte kan samverka och därigenom förstärka det totala korrosionsangreppet. Enligt SKB:s analys kan det totala korrosionsangreppet på kopparkapslarna från olika mekanismer beräknas genom addition av angreppen från de enskilda mekanismerna. Detta resonemang är mycket diskutabelt och måste verifieras experimentellt genom långtidsförsök.

SKB gör vidare samma antagande beträffande olika försprödningsmekanismer som kan inträffa hos kopparkapslarna. Även i detta fall är detta antagande mycket tveksamt och måste verifieras.

3. BEHOV AV KOMPLETTERANDE INFORMATION OCH UNDERSÖKNINGAR

3.1 Hur lång är perioden till dess bentoniten är vattenmättad

Vattenmättnaden av bentoniten i deponeringshålen och ovanföriggande tunnlar tar sannolikt mycket lång tid, kanske flera tusentals år, i slutförvaret i Forsmark. Hur lång tid förväntas det ta innan bentoniten i de flesta av deponeringshålen och tunnarna är vattenmättad? Hur stora är grundvattenflödena till deponeringshålen? Det föreligger stora skillnader i vattenflöden mellan Laxemar, Oskarshamn och Forsmark. Den omfattande sprickbildningen i berget i Laxemar ger höga flöden av grundvatten, vilket medför att deponeringshålen blir vattenfyllda inom begränsad tid. Detta leder då till att den bentonit som omger kopparkapseln blir vattenmättad och sväller.

Enligt SKB är vattenflödet mycket begränsat i Forsmark: ”An additional analysis of inflow into individual deposition holes [...] using the same model as described above indicates that 99.9% of all deposition holes in the Forsmark repository will have an inflow smaller than 0.01 l/min when no grouting is applied” (SKB TR-06-09, sida 212).

Den bentonit som omger kopparkapslarna kommer att uppvärmas genom värmeöverföring från kapslarna under en mycket lång tid innan deponeringshålen är vattenfyllda. Hur kommer bentonitens material- och funktionsegenskaper påverkas på grund av denna uppvärmning? Den vattenmängd som strömmar till deponeringshålen har mycket stor betydelse för flera centrala aspekter exempelvis:

- korrosionsförhållandena; vilka korrosionsmekanismer som föreligger och korrosionshastigheterna för respektive mekanism. Det är sannolikt att koppar korroderar i Forsmark (men inte i Laxemar) genom t.ex. atmosfärisk korrosion, saltindunstning och gränsskiktsskorrosion
- utskiljning av salter från grundvattnet i bentoniten och på kopparytan
- temperaturdistributionen i deponeringshålet; värmeöverföring från bränslestavarna till kopparkapseln, från denna till bentoniten och slutligen till bergväggen. Uppkomst av luftspalter mellan kopparkapseln och bentoniten samt mellan bentoniten och bergväggen
- erosion av bentoniten och uppkomst av sprickor och kanaler i denna

Dessa frågor är centrala vid säkerhetsanalysen för Forsmarks-fallet. Det måste vara omöjligt att teoretiskt räkna fram förväntad korrosionshastighet för koppar om man inte känner till vilka korrosionsmekanismer som är aktuella. Det är därför av avgörande betydelse att SKB redogör för den förväntade vattenflödet i liter/minut till deponeringshålen och hur detta flöde tidsmässigt kommer att variera. Det är också betydelsefullt att mer kunskap tas fram hur vattenflödet kan variera mellan olika deponeringshål. Hänsyn måste då också tas vid den teoretiska analysen och de experimentella försöken till följande:

- vattenflödet vid en eller flera bergssprickor i anslutning till ett deponeringshål och för de fall det inte finns några sådana sprickor
- uppkomst av sprickor vid sprängning av gångarna i slutförvaret
- inflödet av vatten till deponeringshålen; kommer vattnet från botten eller sidorna av berget eller från ovanliggande deponeringstunnlar

3.2 Förångning av grundvatten

Grundvatten kommer att rinna från sprickor i omgivande berg och in i deponeringshålen från det att dessa har borrats upp. I varje deponeringshål placeras sedan en bottenplatta, en kopparkapsel och bentonit. Inströmmande vatten kommer efter en viss tid i kontakt med de varma kopparytorna och därvid förångas. Vad händer vid denna förångning och hur stor del av det förångade grundvattnet kommer att kondensera och var. Enligt SKB är varje deponeringshål ett hermetiskt slutet system och förångat grundvatten kan inte tränga ut i ovanförliggande deponeringstunnel och vattenmätta den bentonit som finns i tunneln. Vad finns det för experimentellt stöd för detta antagande?

3.3 Saltanrikning i bentoniten i deponeringshålen

Sena et al har presenterat en modell för vattenflödet från granitväggen i deponeringshålen mot kapslarna under den initiala perioden då det sker en vattenmättnad av bentoniten, se figur 2 nedan (SKB TR-10-59, sida 13). Anmärkningsvärt är att modellen inte beaktar att det finns en luftspalt mellan kopparkapseln och bentoniten.

Enligt modellen förångas vatten vid vattenfronten och vattenångan diffunderar genom en bentonitzon mot den varma kapseln dvs. mot värmeflödet där vattenångan kondenserar. Därefter sker en masstransport av vatten till vattenfronten. Sannolikt är det så att masstransporterna är tvärtom vad som beskrivs i figuren och att vattenångan diffunderar mot vattenfronten och att den där kondenserar. Effekten av dessa reaktioner är att salter lösta i vattnet transporteras mot kapslarna och skiljs ut i bentoniten när vattnet förångas.

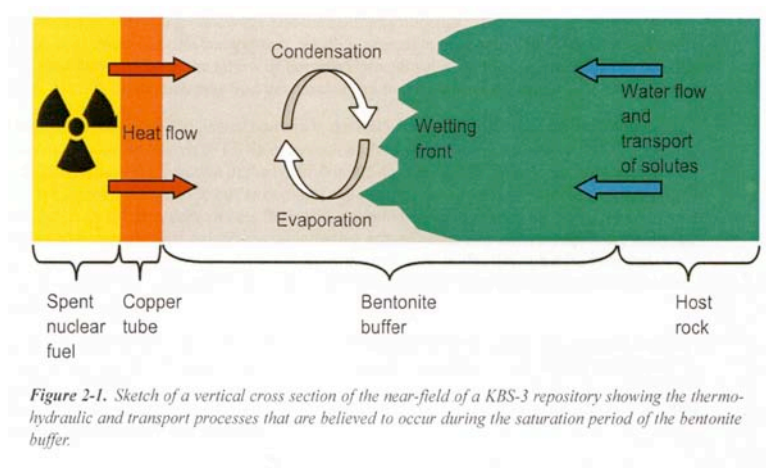
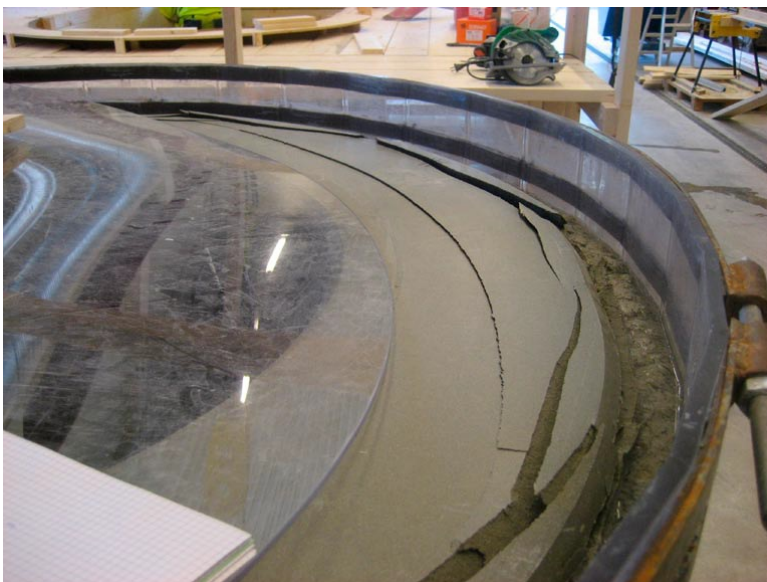


Figure 2-1. Sketch of a vertical cross section of the near-field of a KBS-3 repository showing the thermo-hydraulic and transport processes that are believed to occur during the saturation period of the bentonite buffer.

Figur 2. Sena et al, SKB TR-10-59, sida 13.

I en zon framför vattenfronten kommer det att ske en förångning och kondensation av vattenångan. En del av vattenångan kommer att strömma i luftspalten mellan kapseln och bentoniten samt genom sprickor bentoniten (se figur 3 nedan från Åberg, 2009 i SKB R-09-29) ut i deponeringstunnlarna ovanför deponeringshålen. SKB:s har framfört en helt orealistisk hypotes, som inte experimentellt kunnat verifieras, att alla deponeringshål är hermetiskt tillslutna under de 100 tals till 1000 tals år det tar att vattenmätta all bentonit i tunnlar och deponeringshål.



Figur 3. Large cracks in the ring after 48h (Åberg, 2009, SKB R-09-29)

Vid förångning av det inströmmande grundvattnet sker en utskiljning av de salter som finns i vattnet i bentoniten, i spalten mellan bentonit och kopparkapsel samt på kopparytorna. Förångningen av grundvatten kommer att leda till en saltanrikning i bentoniten i en zon närmast kapseln, i spalten mellan kapsel och bentonit samt på kapseln. Sena et al, 2010, (SKB TR-10-59) har inte beaktat att förångning av grundvatten kan leda till saltanrikning. Sena et al. 2010 hänvisar vidare till LOT försöket A2 (Karnland et al. SKB TR-09-29). Det senare är helt irrelevant då försöket LOT A2 genomfördes under en tid som är mycket kort i detta sammanhang – 6 år med artificiellt vattenmättad bentonit.

Hur kommer saltanrikningen i bentoniten dels totalt, på grund av att vattenånga lämnar systemet, och dels lokalt närmast kopparkapslarna påverka bentonitens material- och funktionsegenskaper?

3.4 Kopparkorrosion förorsakad av saltutskiljning på kopparytorna

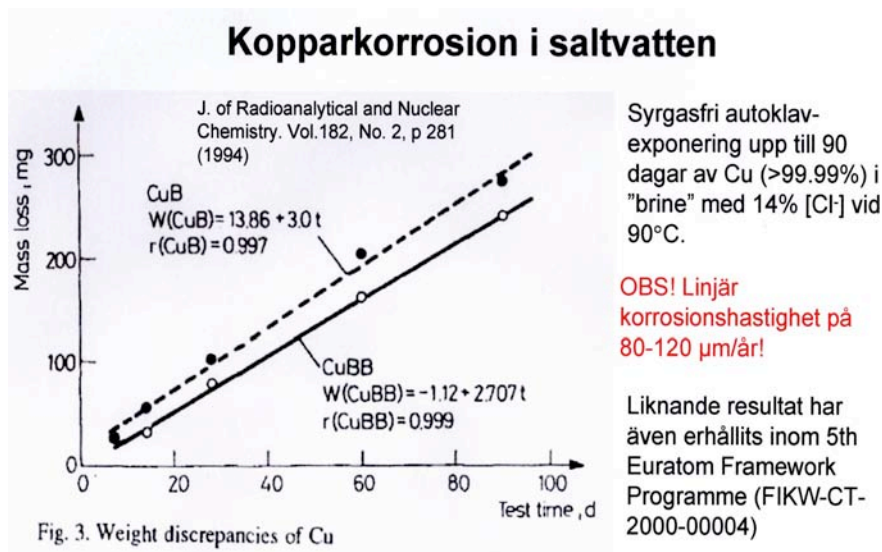
Förångning av grundvatten enligt 3.3 kommer också leda till utskiljning av hygroskopiska saltkristaller på kopparytorna. Dessa kommer då att helt eller delvis bli täckta med ett saltskikt. För det fall då ytorna endast är delvis täckta föreligger en risk att det uppstår lokala galvaniska element. Korrosion är normalt hög då varma metaller belagda med salt exponeras i en miljö med hög fuktighet.

SKB har valt att utesluta denna korrosionsmekanism i säkerhetsanalysen och anger att korrosion förorsakad av saltutskiljningar inte kan förekomma. Ett av skälen till detta ställningstagande är att SKB inte funnit några saltutskiljningar på kopparytorna vid t.ex. LOT-försöken.

Detta är dock helt enligt förväntan då dessa försök gjordes med vattenmättad bentonit, under relativt kort tid och god tillgång på vatten. Saltutskiljning kommer att med största sannolikhet erhållas i bentoniten och på kopparytorna under den initiala perioden av några 1000 år då bentoniten inte är vattenmättad.

3.5 Kopparkorrosion förorsakad av förhöjd salthalt i deponeringshålen

Förångning av det grundvatten som rinner in i deponeringshålen leder direkt till en anrikning av salter i det vatten som finns i hålen t.ex. klorid-, sulfid- och sulfatjoner. Även om endast en mycket begränsad del av inkommande vatten förångas och lämnar deponeringshålen leder detta till en ökning av salthalten hos vattnet. Förhöjda kloridjoner ger starka korrosionsangrepp på kopparkapslarna, se figur 4 nedan.



King och Litke (1987) har mätt upp lika höga korrosionshastigheter, 110 µm/år i syrgasfritt saltvatten med 3.4% [Cl⁻] vid 150°C.

Figur 4. Szakalos P. (2009)

SKB har valt att bygga SR-Site på antagandet att varje deponeringshål är hermetiskt tillslutet tills hålen är vattenfyllda efter upp till flera tusen år. SKB hävdar vidare då deponeringshålen är tillslutna kan det inte ske något luftläckage till dessa eller att vattenånga lämnar hålen och t.ex. kondenserar i deponeringstunnlarna. SKB har ännu inte styrkt detta antagande med hjälp av experiment.

3.6 Korrosionsförsök med koppar placerad i vattenmättad bentonit

SKB har under senare år funnit experimentellt att koppar korroderat i LOT- och MiniCan-projekten med en hastighet av 1-20 µm/år. Detta är en hastighet som är 10 000 till 100 000 ggr högre än vad som teoretiskt räknats fram utgående från att det hastighetsbestämmande steget är sulfidkorrosion, se SKB TR-10-66 sida 45.

Karnland et al (SKB TR-09-29) anger i sammanfattningen sida 4 "att uppmätt korrosionshastighet av metallisk koppar överensstämmer med resultat från tidigare försök samt med modellberäkningar." Rosborg uppskattar vidare i appendix 3, samma rapport att korrosionshastigheten var mindre än 0.5 µm/år då temperaturen var 30°C, sida 145.

Både Karnland et al och Rosborg måste vara väl medvetna om att denna information är direkt felaktig och missledande. Det framgår av rapporten SKB TR-09-29 att koppar löser sig i vattnet och kopparjonerna diffunderar in i bentoniten där kopparn utskiljs, till viss del som kopparsulfid. Förhöjda kopparhalter uppmättes i bentoniten på ett avstånd av upp till 20 mm från kopparröret där detta var som varmest. Rosborg konstaterade också att koppar, från plåtproverna, hade penetrerat bentoniten till ett djup av 500 µm vinkelrätt från kopparytan. Rosborg bestämde även halten koppar i bentoniten och som funktion av avståndet från kopparytan, se figur 5.

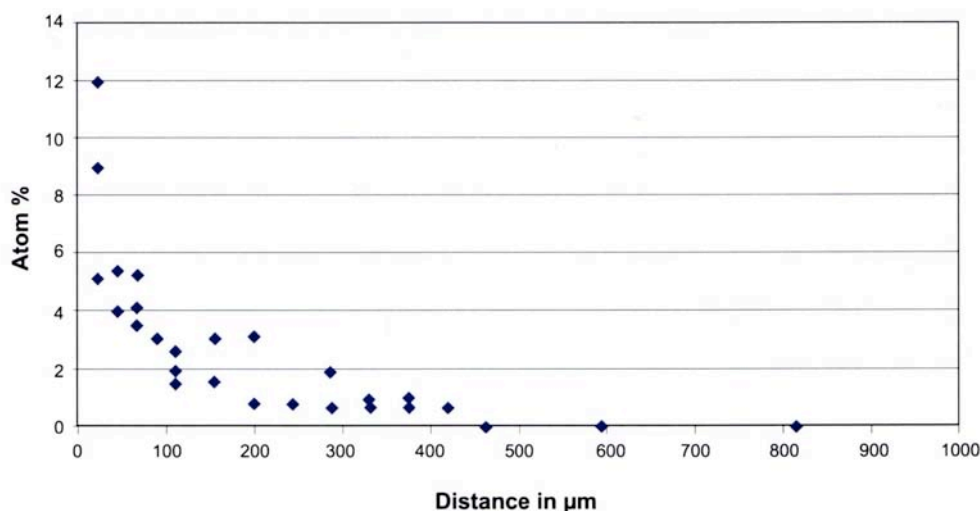


Figure A3-3. Copper profile in bentonite next to copper coupon A230H.

Figur 5. Karnland et al (SKB TR-09-29), utskiljning av koppar i bentoniten

Karnland et al och Rosborg är väl medvetna om korrosionsmekanismen enligt vilken koppar korroderar genom upplösning i vattnet och sedan utskiljning i bentoniten. Trots detta har dessa författare inte tagit hänsyn till denna mekanism vid beräkning av koppars korrosionshastighet utan anger denna som mindre än 0.5 µm/år. En överslagsberäkning utgående från kopparhalterna i bentoniten, se figur 6 nedan, ger en faktisk korrosionshastighet på 10 – 20 µm/år.

Det måste vara uppenbart även för Karnland et al och Rosborg att korrosionshastigheten måste ha varit mycket högre än 0.5 µm/år för att så höga halter av koppar i bentoniten skall kunna erhållas som framgår av figur 5. Se vidare nedan under avsnitt 3.7.

SKB hävdar nu att LOT- och MiniCan-försöken av olika skäl (syreinelutning, syreläckage) ägde rum under aeroba förhållanden d.v.s. i syrehaltigt vatten. Från MiniCan-försöken framgår dock klart av resultaten från elektrodpotentialmätningarna och direkta syrehaltsmätningar av vattnet att förhållandena var anoxiska – vattnet var syrefritt (Smart et al. SKB TR-09-20).

I MiniCan försöken uppmättes elektrokemiskt *samtidigt* korrosionshastighet och elektropotential i ett flertal försöksserier för kopparkapslar placerade i vattenmättad bentonit och under syrefria förhållanden. Resultaten visade då att kopparkapslarna korroderade med några µm/år och under anoxiska förhållanden. Då mätningarna av korrosionshastighet och elektropotential gjordes samtidigt kan resultaten endast tolkas som *koppars korrosionshastighet då metallen är placerad i vattenmättad bentonit och under anoxiska förhållanden*. SKB:s förklaring är då felaktig d.v.s. att korrosionen förorsakats av inläckande syre eller från det syre som fanns i bentoniten vid provstarten.

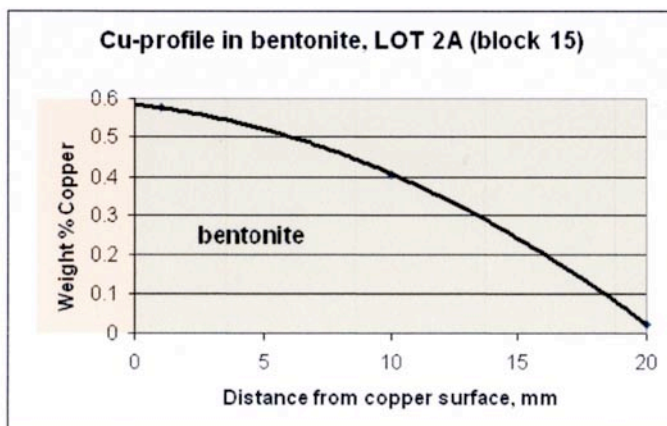
King et al 2010 (SKB TR-10-67) väljer att inte nämna resultaten från MiniCan-försöken i avsnittet 5.2.6 In situ experiments.

SKB har angivit i sin säkerhetsanalys och i ett flertal rapporter att syret löst i vattnet i deponeringshålen kommer att konsumeras på mycket kort tid, i storleksordningen 5 dagar till några veckor, när väl bentoniten är vattenmättad (Hedin, SKB TR-10-46, sida 103 och 106). Samtidigt hävdar SKB att orsaken till den höga korrosionshastigheten hos koppar vid vissa långtidsförsök t.ex. LOT och MiniCan-försöken berodde på förekomst av löst syre. Vad är orsaken till denna diskrepans och vad finns det för experimentellt stöd för att syre varit närvarande?

3.7 Korrosion genom upplösning av koppar i grundvattnet och utskiljning i bentoniten

I flera korrosionsförsök med koppar placerad i vattenmättad bentonit har SKB med flera uppmätt höga halter av koppar i bentoniten i en zon av några centimeter från kapselytorna efter endast några års exponering. Mängden koppar utskiljd i bentoniten kan omräknas till en korrosionshastighet av 10 – 20 $\mu\text{m}/\text{år}$ över en 6 års period i t.ex. LOT 2 försöket, vilket är en mycket hög korrosionshastighet se figur 6. Denna korrosionsmekanism har beaktats endast i begränsad grad av SKB och finns till exempel inte med i sammanställningen över korrosionsmekanismer som påverkar livslängden hos kopparkapslar, (SKB TR-10-66 sida 45 och figur 6-1, Hedin, SKB TR-10-46, SR-Site del II sida 428, figur 10-88 och SKB TR-11-01).

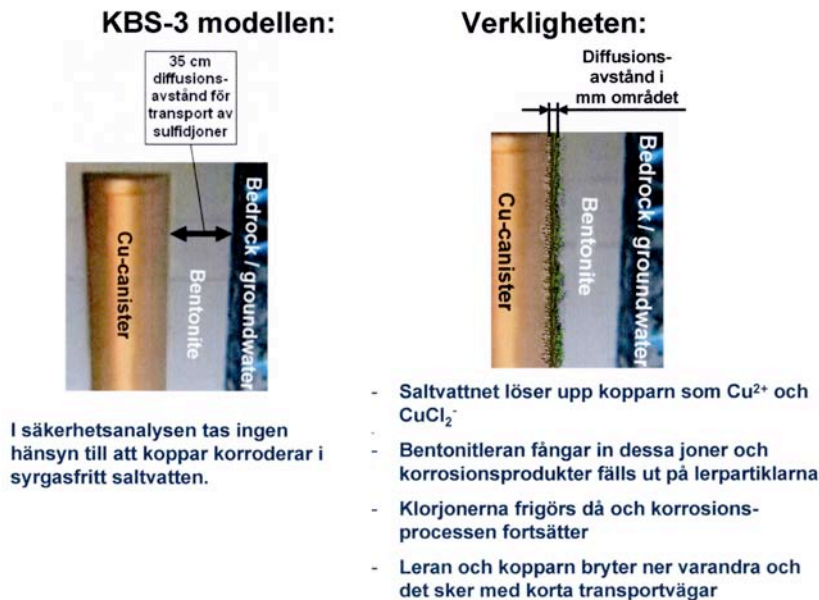
Äspö, Lot A2, BGR-studien



Figur 6. Szakalos P. (2009)

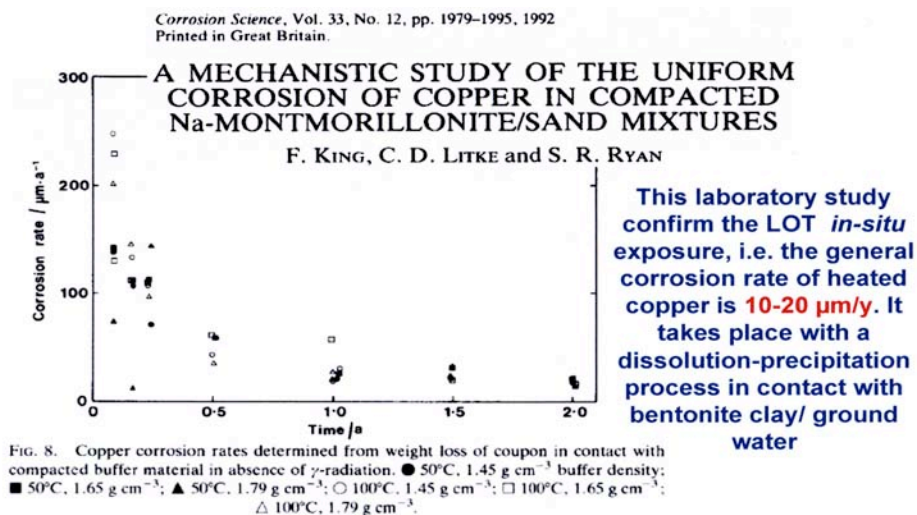
Av figur 7 framgår att koppar löser sig i grundvattnet, kopparjonerna diffunderar in i omgivande bentonit och slutligen binds/skiljs ut i bentoniten. Kemisk analys av bentoniten visade på höga halter koppar i den bentonitzon som låg närmast kopparn. Tjockleken på denna zon var ett par cm. Korrosionshastigheten kan utgående från mängden upplösta och utfällda korrosionsprodukter av koppar uppskattas till 10-20 $\mu\text{m}/\text{år}$. Motsvarande analyser av indiffunderat koppar har sannolikt även gjorts i Prototypförvars-försöket.

SKB bör teoretiskt och experimentellt studera denna korrosionsmekanism som sannolikt kan vara av avgörande betydelse för slutförvaret. De resultat som SKB hitintills publicerat visar att bentoniten påskyndar nedbrytningen av kopparn samt att kopparutskiljningen i bentoniten kan påverka dess funktionsegenskaper.



Figur 7. Szakalos P. (2009)

Motsvarande resultat har även publicerats av King et al (1992). Se figur 8 nedan. Även i denna undersökning uppmättes korrosionshastigheter av ca $20 \mu\text{m}/\text{år}$ efter 2 års exponering. Det är förvånande att SKB inte tar med denna korrosionsmekanism i sin säkerhetsanalys.



On page 1991, it was concluded that " O_2 -transport was not rate-limiting" and that the corrosion took place with a dissolution-precipitation process; "Precipitation of copper inevitably occurred in all of the tests, with usually more than half of the total copper corroded being in the form of precipitate rather than being sorbed on the clay".

Figur 8. Szakalos P. (2009)

3.9 Korrosion av koppars på grund av strålning (radiolys)

Efter att bentoniten blivit vattenmättad kommer strålning från kapseln medföra radiolys av vattnet och bildning av oxidanter samt hydrogen. Det kommer sannolikt också att ske under den initiala perioden från det att kapslar placerats i deponeringshålen till att vattenmättad har uppnåtts.

King et al (SKB TR-10-67) och Hedin (se sida 110, SKB TR-10-46) hävdar följande:

"The experiments were performed in aerated and de-aerated solutions and the corrosion rates were about a factor of four lower in the presence of radiation. /King and Litke 1987/ attributed this to the more protective nature of the surface film formed in irradiated solutions. Available information shows that there is no evidence for enhanced corrosion rates caused by gamma radiation. On the contrary, at least for dose rates in the range of 10–100 Gy/h, the experimental data seem to indicate a lower corrosion rate in the presence of radiation /King et al. 2010/."

SKB har därför valt att teoretiskt uppskatta det maximala korrosionsangreppet på kopparkapslarna på grund av radiolys av vatten till ungefär 10 µm på 1 000 000 år.

Den bedömningen bör jämföras med *experimentella resultat* från en nyligen genomförd undersökning av Björkbacka et al (2012) se fotografier nedan, figur 9. Av rapporten och fotografierna framgår att *"gamma radiation causes significant corrosion of metallic copper in anoxic aqueous solution"*. Vidare konstaterades att strålningen resulterade i att en avsevärt högre halt av koppar löstes i vattenlösningen jämfört med referensprovet. De strålningsdoser som användes av Björkbacka et al var inom samma område 10 – 100 Gy/h som i tidigare försök utförda av King et al.

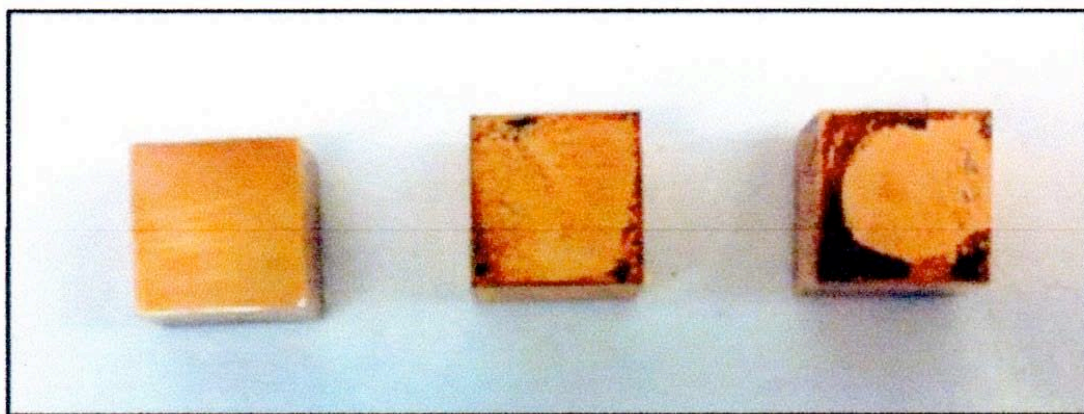


Figure 1. Photography of an experimental set of copper cubes. The cube to the left in the photography is the non-irradiated reference sample. The cube in the middle has received a total dose of 62 kGy while the cube to the right has received a total dose of 129 kGy. The irradiated copper cubes are more corroded than their reference sample.

Figur 9. Björkbacka et al (2012)

Detta visar att SKB:s och King's bedömning av betydelsen av denna korrosionsmekanism sannolikt är helt felaktig. Det behövs mycket mer experimentella resultat beträffande korrosion av koppar på grund av strålning dvs. radiolys av vatten samt av den fuktiga gasblandning (vattenånga, kvävgas mm.) som finns i deponeringshålen och i spalten mellan bentonit och kopparkapsel.

3.10 Svavelförspredning

Ari-Lahti et al. från VTT, Finland har i en nyligen presenterad rapport (Int. Conf. Brugges, Belgium, 2010) konstaterat följande (Ari-Lahti et al. 2010, sida 4):

”Based on the results it is clear that sulphur can diffuse into the Cu OFP material when it is exposed at room temperature to saline groundwater with 100 to 200 mg/l sulphide. Indications were found that the in-diffusion preferentially occurs through grain boundaries. Individual grain boundaries were found to contain above 20 a% sulphur. Based on SEM/EDS studies of the surfaces the extent of diffusion depth of sulphide into Cu OFP was more than one millimetre per week”.

De resultat som Arilahti et al. redovisar är helt nytt, mycket viltigt och beskriver en ny försprödningsmekanism för koppar dvs. **svavelförsprödning**, se figur 10. Författarna av rapporten har funnit att:

- masstransporten av svavel från det sulfidhaltiga grundvattnet till kopparn går med hög hastighet vid en halt av 100 – 200 mg sulfid per liter grundvatten
- indiffusionen av svavel i koppar går mycket snabbt redan vid rumstemperatur och med en hastighet av över 1 mm/vecka
- svavlet bildar kopparsulfidutskiljningar i koppars korngränser
- kopparsulfidutskiljningarna verkar försprödande

Det är av central betydelse att SKB nu noggrant följer detta arbete, vilket också behöver kompletteras med omfattande mekanisk provning av provstavar med indiffunderat svavel i koppars korngränser.

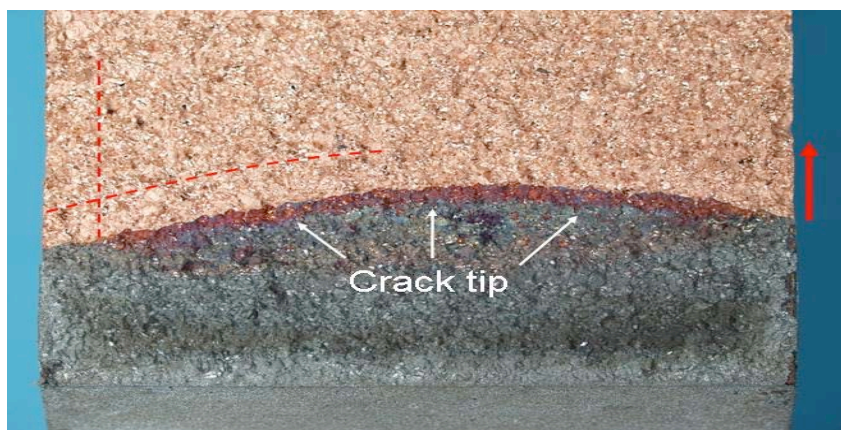


Figure 5. Surface of Cu OFP specimen after a three week exposure to groundwater with 100 mg/l sulphide. The dashed red lines indicate lines along which local area SEM/EDS analyses were made with roughly one millimetre distance.

Figur 10. Arilahti et al. 2010

3.11 Väteförsprödning och vätesjuka

SKB har under senaste åren initierat viss forskning rörande väteupptagning av ren koppar, (Martinsson et al. 2008). Författarna anger att väte kan frigöras genom att gjutjärnsinsatsen inuti kopparkapseln utsätts för korrosion. Detta kan ske genom att kopparkapseln går sönder varvid vatten reagerar med gjutjärnet samt genom reaktion mellan det restvatten som finns kvar inuti kapseln och gjutjärnet.

Martinsson et al (2008) nämner inte att väte kan överföras till kopparn genom korrosion av denna och läckströmmar trots att dessa mekanismer är av mycket större betydelse för slutförvaret.

Förekomst av väte i koppar kan generera ”vätesjuka” och väteförsprödning. Vid vätesjuka reagerar vätet med inneslutningar av kopparoxider i kopparn, varvid oxiderna reduceras till metalliskt koppar under bildning av vattenånga. Denna skiljs ut i korngränser, på ytorna av inneslutningar och i sprickor, vilket resulterar i att kopparn försprödas.

Vätet kan också introduceras elektrokemiskt i form av atomärt väte och i höga halter. Detta ger väteförsprödning av kopparn på samma sätt som för höghållfasta stål och utan bildning av vattenånga. Detta har beskrivits av Nakahara et al (1988).

Koppar som använts i kopparkapslarna har mycket låg syrehalt, varvid risken för vätesjuka är mycket låg. Dock har svetsfogarna från friction stir welding höga halter av oxider och dessa ligger i stråk, vilket är särskilt ogynnsamt. Det är viktigt att utreda risken för vätesjuka i själva svetsfogarna.

Martinsson et al (2008) har genomfört olika försök med att införa väte i koppar termiskt och elektrokemiskt. Två olika kopparmaterial användes vid försöken – kopparfolier och cylindriska prover af OFP-koppar. Inga analyser rapporterades för de två materialen. Mycket höga halter kunde introduceras elektrokemiskt i två prover av kopparfolien (62 ppm och 248 ppm), vilket i detta sammanhang är mycket intressant.

Mycket låg halter erhöles dock när stavarna av OFP skulle laddas elektrokemiskt med koppar uppgående till mindre än 3.5 ppm. Orsaken till skillnaderna är sannolikt problem med den experimentella tekniken och inte eventuella skillnader mellan kopparlegeringarna som författarna anger.

Speciellt viktigt för slutförvaret är risken för väteförsprödning för elektrokemisk uppladdning av kopparn med atomärt väte. Det är av vikt att SKB utför försök för att utvärdera denna risk och på ett sådant sätt att försöken är relevanta för det kommande slutförvaret i Forsmark.

Eventuell risk för väteförsprödning måste fastställas experimentellt. Detta innebär att hållfasthetsprovningsen måste genomföras i en vattenlösning under statisk långtidsbelastning och med samtidig uppladdning av väteatomer i kopparn med en elektrokemisk metod. Den kemiska sammansättningen hos vattenlösningen bör motsvara den sammansättning som föreligger i Forsmark med hänsyn tagen till förhöjningen av salthalten pga. förångning av vatten under avsnitt 3.5. Martinsson et al (2008) föreslår att utvärdering av risken för väteförsprödning skall göras genom krypprovning i luft. Denna metod är självfallet inte relevant i detta sammanhang.

3.12 Krypduktilitet

Prof. Kjell Pettersson har på uppdrag av SSM gjort en utvärdering av SKB:s forskningsinsatser rörande krypduktilitet hos fosforlegerad koppar (SSM diarienummer 2011-2024).

Följande slutsatser presenteras i denna rapport;

”SKB has presented insufficient evidence to justify their position that the OFP copper has an adequate creep ductility during long term storage. Their large body of experiments only serves to prove that the creep ductility is sufficient for much shorter time spans than the intended storage times. There is a clear need for a credible theory of creep brittleness of OFP copper which will permit extrapolations to long term storage. The theory presented by SKB does not in its present state permit credible extrapolations. Alternatively SKB needs to find an

explanation to the effect of phosphorus on the creep ductility and that it ensures the absence of creep brittleness in OFP copper.”

Det är viktigt att denna fråga utreds ytterligare.

3.13 Allmänt kopparförsprödning

Se punkt 3.09 – 3.12. Koppar kapslarna kommer att utsättas för flera olika försprödningsmekanismer. SKB har valt i säkerhetsanalysen att beakta ett par av dessa separat. Det är av central betydelse att SKB kan presentera experimentella resultat som visar risken för sprödbrott när dessa mekanismer samverkar. Analysen bör även inkludera kombination av spänningskorrosion och försprödning.

3.14 Friktionsvetsning

Savolainen et al (2008) har visat att det bildas stora mängder kopparoxider vid friktionssvetsning av lock och botten till kapselns cylindriska del. Det är välkänt att höga halter av kopparoxider i metallisk koppar befrämjar uppkomst av vätesjuka. Hur har SKB studerat risken för vätesjuka av de friktionssvetsade partierna? Har detta beaktats i SR-Site?

3.15 Läckströmmar

Det är välkänt att det uppkommer kraftiga jordströmmar/läckströmmar från de kraftledningskablar som finns i Forsmark. Två högspännings likströmsledningar går mellan Forsmark och Rauma i Finland. Ledningarna benämns Fenno-Skan 1 och Fenno-Skan 2. Fenno-Skan 1 installerades för många år sedan (1989) och är monopolär. Fenno-Skan 2 är nyinstallerad och bipolär.

Hedin uppger på sidan 121 i SKB TR-10-46 att:

”As a result of the HVDC cable located 30 km north of Forsmark site (the Fenno-Scan cable), man-made earth currents are a potential source of enhanced corrosion. Indications of such corrosion have been seen on stainless steel logging equipment used in the Forsmark site investigation / Nissen et al. 2005/.”

Hedin kallar sålunda de klara bevis som föreligger för korrosion förorsakade av läckströmmar endast för *indikationer*. Se nedanstående två bilder från Nissen et al SKB P-05-265.

Författarna av den senare rapporten anger att detta rör sig om kraftiga korrosionsangrepp, både punktfrätning (figur 11) och spaltkorrosion (figur 12), hos det rostfria stålet SS2343 (så kallat syrafast rostfritt stål) och att dessa angrepp förorsakats av läckströmmar i berget från den monopolära högspänningskabeln mellan Sverige och Finland. Utrustningen var avsedd för kemisk analys av grundvattnet i Forsmark och var placerat i ett borrhål med längden 360 meter.

Hedin anger vidare, se ovan, att avståndet mellan HVDC kabeln och anläggning i Forsmark är 30 km. Detta är felaktig information, då avståndet mellan högspänningskabeln och det tänkta slutförvaret är endast 2 km.



Figure 2-3. Pitting corrosion on the outside of the chemical analysing equipment.

Punktfrätning på rostfritt, syrafast stål SS2343 efter 10 dagars exponering i ett borrhål. Forsmark.



Figure 2-9. Details with crevice corrosion inside the chemical analysing equipment.

Spaltkorrosion på rostfritt, syrafast stål SS2343 efter 10 dagars exponering i ett borrhål. Forsmark

Figur 11 och 12. SKB P-05-265

Det är vidare mycket anmärkningsvärt att Hedin (SKB TR-10-46) ej heller nämner i att dessa korrosionsangrepp uppstod efter mycket kort tids (10 dagars) exponering. Man har inte heller informerat om att motsvarande korrosionsangrepp förorsakat av läckströmmar också erhållits i ett borrhål i Laxemar, Oskarshamn på ett djup av 970 meter.

En litteratursökning har gjorts av de rapporter som publicerats av SKB för att få mer information om korrosionsproblemen i bergrunden i Laxemar på grund av läckströmmar. Det verkar som att denna mycket viktiga information inte avrapporterats, åtminstone inte i SKB publika rapporter. Det är därför möjligt att de korrosionsproblem som konstaterats i Laxemar och uppstått genom läckströmmar i berget endast finns publikt omnämnt i Appendix 3 till SKB P-05-265.

I denna rapport rekommenderas vidare direkta korrosionsförsök för att klargöra problematiken med korrosion av kopparkapslar genom läckströmmar. SKB har dock inte gjort några experimentella försök för att klargöra problematiken rörande kopparkorrosion och läckströmmar. I stället för man på sidorna 121-126 i TR-10-46 ett teoretiskt resonemang med slutsatsen att kopparkapslarna inte kan korrodera på grund av läckströmmar. SKB har inte verifierat hypotesen med experimentella resultat.

Vidare anger Hedin på sida 125 i TR-10-46:

"Further, it is only HCDC cables operated in monopolar mode that can cause currents through the earth. The cables could be operated in bipolar mode, with a separate cable to lead the current back."

Denna information är direkt felaktig, vilseledande och skiljer sig från vad Fingrid OYJ anger om samma kraftöverföring från Sverige. Fingrid OYJ äger stamnätet i Finland och alla betydande utlandsförbindelser. Företaget anger i informationsmaterialet Powering Finland beträffande korrosion förorsakad av läckströmmar att *"Bipolar operation reduces corrosion to about one fifth of the present level"*.

Vidare anges i SKB rapporten TR-10-46 att läckström korrosion inte kan uppstå i anoxisk miljö (sidan 126). Detta påstående skall jämföras med vad som anförs i SKB rapporten P-05-265 på sidan 43 angående konstaterad spaltkorrosion av rostfri utrustning i borrhålet KLX03A:

This type of corrosion was unexpected in the oxygen-free environment at 970 m."

Hur har dessa angrepp avrapporterats? Hur kommer SKB i framtiden utvärdera risken för kopparkorrosion förorsakat av läckströmmar?

3.17 Spänningskorrosion

Taniguchi et al har funnit att ren koppar är känslig för spänningskorrosion i anaerobt, syntetiskt havsvatten innehållande sulfidjoner från natriumsulfid. Författarna uppskattar att tröskelvärde för initiering ligger inom området 0 005-0.01M natriumsulfid vid 80 °C. Halter överstigande tröskelvärde genererar enligt Taniguchi et al spänningskorrosion.

SKB avfärdar möjligheterna till spänningskorrosion av kopparkapslarna utgående från att detta tröskelvärde är högre än det av SKB beräknade halten i vattnet i deponeringshålen. SKB har då inte tagit hänsyn till att salthalten kan öka mycket kraftigt i vattnet genom förångning, se ovan under avsnitt 3.2 och 3.3.

King et al anger på sida 134 i SKB TR-10-67 att:

"In addition to there being a low probability of SCC during the initial warm, aerobic period, there is no evidence to suggest that cracking can be sustained during the long-term anaerobic phase in the absence of oxidants or due to the presence of sulphide."

Detta resonemang är märkligt. King utesluter risken spänningskorrosion då det, enligt honom, inte föreligger några bevis på att det kan förekomma denna korrosionsmekanism under de förhållanden som råder i slutförvaret. Det omvända borde vara logiskt d.v.s. att det föreligger bevis på att inte spänningskorrosion kan uppstå under aktuella förhållanden.

King et al bekräftar dock att det kan ske spänningskorrosion om det sker en anrikning av till exempel sulfidjoner i deponeringshålen genom förångning av vatten.

4. SLUTSATSER

SKB:s arbetsmetodik kan ifrågasättas då den i vissa fall uppvisar avsaknad av god vetenskaplig praxis samt allvarliga brister vid genomförande och utvärdering av experimentella försök. Inom ett flertal mycket viktiga områden saknas resultat från kritiska försök under relevanta förhållanden

Det föreligger ett mycket stort behov av kompletterande information och undersökningar rörande:

- hur lång är perioden till dess att bentoniten är vattenmättad
- vad händer vid förångning av grundvatten
- saltanrikning i bentoniten i deponeringshålen
- saltanrikning på kopparytorna

SKB har inte eller endast bristfälligt beaktat följande mekanismer vid korrosion av koppar förorsakad av:

- hygroskopiska saltutskiljningar på kopparytorna
- förhöjd salthalt i deponeringshålen
- upplösning av koppar i grundvattnet och utskiljning i bentoniten
- radiolys
- läckströmmar

SKB vidare försummat att beakta atmosfärisk korrosion under perioden då bentoniten inte är vattenmättad samt samverkan mellan olika korrosionsmekanismer.

SKB har inte eller endast mycket bristfälligt beaktat följande försprödningsmekanismer för koppar:

- svavelförsprödning
- bristande krypduktilitet
- väteförsprödning och vätesjuka
- spänningskorrosion

SKB har vidare inte tagit hänsyn till potentiell samverkan mellan olika försprödningsmekanismer.

REFERENSER

Ari-Lahti E., Lehtikuusi T., Olin M., Saario T. & Varis P.; Evidence for internal diffusion of sulphide from groundwater into grain boundaries ahead of a crack tip in a CuOFP copper. 4th international workshop on long-term prediction of corrosion damage in nuclear waste systems. Brugges, Belgium, June 28 – July 2, 2010.

Baldwin T.D. & Hicks T.W.; Quality Assurance Review of SKB:s Copper Corrosion Experiments. SSM Research 2010:17.

Björkbacka Å., Hosseipour S., Leygraf C. & Jonsson M.; Radiation Induced Corrosion of Copper in Anoxic Aqueous Solution. *Electrochemical and Solid-State Letters* Vol. 15:5 C5-C7 (2012).

European Commission: 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME 1998-2002, COBECOMA, final report (2003). B. Kursten, L. Werme et al.

FINGRID OYJ; Powering Finland. www.fingrid.fi

Hedin A.; Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-46.

Hsu C.-N. & Liang T.-J.: Corrosion reactions of copper and Ti-grade 2 in MCC simulated brine. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol.182:2, (1994) pp. 281-290.

Hultquist G.; Presentation vid Kärnavfallsrådets seminarium om kopparkorrosion 16 november 2009.

JNC TN1410 2000-003. Japan Nuclear Development Institute; H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology. April 2000.

Karnland O, Olsson S, Dueck A, Birgersson M, Nilsson U, Hernan-Hakansson T, Pedersen K, Nilsson S, Eriksen T-E, Rosborg B.; Long-term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project – Final report on the A2 test parcel. SKB TR-09-29.

King F., & Litke C. D.; The corrosion of copper in synthetic groundwater at 150°C. Part I. The results of short term electrochemical tests. Technical Record TR-428, Atomic Energy of Canada Ltd. 1987.

King F., Litke C.D. & Ryan S.R.; A mechanistic study of the uniform corrosion of copper in compacted Na-montmorillonite/sand mixtures. *Corrosion Science* Vol. 33:12 (1992) pp. 1979-1995.

King, F., Ahonen L., Taxén C., Vuorinen U. & Werme L.; Copper Corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-01-23.

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. SKB TR-10-67.

Martinsson Å. & Wu R.; Hydrogen charging of oxygen-free copper. KIMAB-2008-131

Nakahara S. & Okinaka Y.; The Hydrogen Effect in Copper. Materials Science and Engineering A, Vol. 101 (1988) pp. 227-230.

Nissen J., Gustafsson J., Sandström R., Wallin L. & Taxén C.; Forsmark site investigation: Some corrosion observations and electrical measurements at drill sites DS4, DS7 and DS8. SKB P-05-265.

Pettersson K.; A review of the creep ductility of copper for nuclear waste canister application. SSM diarienummer 2011-2024.

Savolainen K., Saukkonen T., Mononen J. & Hänninen H.; Entrapped Oxide Particles in Friction Stir Welds of Copper. 7th Int. Symposium on Friction Stir Welding. Awaji Island, Japan 20-22 May, 2008.

Sena C., Salas J. & Arcos D.; Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site. SKB TR-10-59.

SKB TR-06-09. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation - Main Report of the SR-Can project, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-07-10. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2006.

SKB TR-10-66 Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site, Svensk Kärnbränslehantering AB, December 2010.

SKB TR-11-01. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Vol 1-3, Svensk Kärnbränslehantering AB March 2011.

SKB TR-11-10. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2010.

Smart N.R. & Rance A.P.; Miniature canister corrosion experiment – results of operations to May 2008. SKB TR-09-20.

Szakalos P. Presentation vid Kärnavfallsrådets seminarium om kopparkorrosion 16 november 2009.

Taniguchi N. & Kawasaki M.; Influence of sulfide concentration on the corrosion behavior of pure copper in synthetic seawater. J. of Nuclear Materials Vol. 379 (2008) 154-161.

Åberg A.; Effects of water inflow on the buffer – an experimental study. SKB R-09-29.