

## SKB:s kommentarer till de remitterade studierna om kopparkorrosion och deformationsåldring

Texterna i denna bilaga publicerades på SKB:s webbplats [www.skb.se](http://www.skb.se) 2021-10-04.

### 1. SKB:s kommentarer till artikeln om kopparkorrosion

#### Nya experimentella och teoretiska resultat

I en artikel<sup>1</sup> i den vetenskapliga tidskriften Corrosion Science i mars 2021 rapporterar författarna om försök där 2 mm tjocka prov av kapselkoppar först oxiderats i luft vid 90 °C i en vecka och därefter i vissa fall exponerats i 8 veckor för ett vatten som liknar det i det planerade slutförvaret i Forsmark, men med en halt av sulfid (som kan korrodera koppar) som är nästan tio gånger högre än de högsta som uppmätts i grundvattnet vid Forsmark.

Efter exponeringarna har strukturen hos proverna analyserats med röntgendiffraktion, en metod som ger detaljerad information om atomstrukturen i t ex metaller. Man har då funnit att strukturen utvidgats något (upp till någon promille) ner till ett djup av cirka 0,1 mm under ytan, både för prov som bara oxiderats och för sådana som därefter exponerats för sulfid i vattenlösning. Påverkan är något större för de sulfidexponerade proverna. På större djup, från 0,1 mm och ner till mitten av provet (1 mm djup) ser man knappast någon påverkan alls för det prov som enbart oxiderats i luft, medan det som utsatts för sulfidkorrosion uppvisar tecken på att både ha expanderat och dragits samman, kontraherats. Nettoeffekten tycks vara att det provet i huvudsak har kontraherats mer än det expanderat på dessa djup, baserat på de data som redovisas i artikeln.

I studien har man också gjort teoretiska beräkningar av de reaktioner som förväntas då sulfid i vattnet angriper kopparytan. Vid reaktionen kan väteatomer frigöras och tänkas tränga in i och påverka kopparstrukturen. Motsvarande frigörelse av väte sker inte då koppar oxideras i luft, som i den första delen av experimentet.

SKB studerade artikeln redan när den publicerades i våras och bemötte den då även i media.

#### Indirekta slutsatser baserat på resultaten

Författarna drar slutsatsen att det måste vara väte som bildats vid sulfidexponeringen som trängt in i och påverkat kopparstrukturen. De ser både den observerade påverkan på atomstrukturen och de teoretiska beräkningarna som stöd för detta. Det finns flera invändningar mot den slutsatsen, till exempel:

- För djup ner till 0,1 mm tyder resultaten på expansion också i provet som bara utsatts för luft och där väte alltså inte är inblandat.

---

<sup>1</sup> Zhang m fl (2021); <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109390>

- Djupare än 0,1 mm har provet som utsatts för sulfidkorrosion huvudsakligen i medeltal kontraherats, baserat på de data som redovisas i artikeln, medan en väteinträngning borde ha orsakat en nettoexpansion. Detta resultat tycks tala emot en påverkan av väte.
- Slutsatsen från de kvantkemiska beräkningar som gjorts av väte på ytan och väte inuti materialet motsägs direkt av kvantkemiska beräkningar som gjorts av flera andra forskargrupper.<sup>2</sup> Dessa andra studier visar tydligt att det inte finns någon energetisk drivkraft för väte att röra sig från ytan och in i materialet. Orsaken till att man i den nya studien fått ett avvikande resultat är inte klarlagt men kan t ex tänkas bero på att författarna använt en kvantkemisk metod som inte är lämplig för ändamålet.
- Man har inte gjort några direkta observationer av väte i materialet utan bygger slutsatserna på indirekta resonemang.
- I en studie från 2021 av Forsström med flera<sup>3</sup> har bland annat prover av kapselkoppar utsatts för lika stark sulfidlösning som i den nu aktuella studien under 4 veckor vid 90 °C. Forsström m fl rapporterar korrosion i en omfattning som överstiger den som noterats<sup>4</sup> efter 8 veckor i rumstemperatur (dvs förhållandena i den aktuella studien). Då man mätte vätehalten i dessa prover sågs inga tecken på något signifikant upptag av väte och författarna skriver: ”An important finding is that significant hydrogen uptake did not occur in the unloaded coupon specimens...”.

Det är också noterbart att den uppvärmning till 90 °C under en vecka som samtliga prover utsatts för vid den inledande oxidationen kan ha påverkat strukturen. Det hade därför varit önskvärt att ha med ett prov som bara värmts, utan syretillträde, så att eventuell påverkan av uppvärmningen kunde särskiljas från påverkan som kan ha orsakats av bildningen av oxidskiktet. Detta hade givit en mer tillförlitlig belysning av möjliga orsaker till expansionen i skiktet ner till 0,1 mm djup, och även matrisvariationerna ner till 1 mm djup för det prov som endast har för-oxiderats.

### **Koppling till SCC och försprödning**

I artikeln diskuteras också varför väte som tränger in i koppar kan vara ett problem. Den diskussionen kretsar kring den omdiskuterade frågan om så kallad spänningskorrosion (stress corrosion cracking, SCC) orsakad av sulfidkorrosion under samtidig mekanisk påverkan (dragspänningar) på kopparmaterialet. Om SCC förekommer skulle det kunna orsaka sprickbildning i koppar. Ett antal artiklar citeras, men författarna har inte själva gjort några studier av detta. Relaterat till detta tar författarna också upp frågan om huruvida kopparmaterialet kan försprödas av väte som man menar kan tränga in i koppar vid sulfidkorrosion.

SCC har tidigare bedömts flera gånger inom ramen för den pågående tillståndsprovningen för slutförvaret. SKB:s senaste sammanställning i frågan gjordes som en del av den så kallade Kapselkompletteringen som lämnades till Miljödepartementet i april 2019. Där diskuteras de arbeten om SCC som författarna till den nu aktuella artikeln åberopar. Också några modernare studier ingår i SKB:s material. En av SKB:s viktigare slutsatser var att betingelserna i de flesta av de studier som hävdar observation av SCC inte kan uppkomma i slutförvaret, inte ens på riktigt

---

<sup>2</sup>Se till exempel Lousada och Korzhavyi (2020), och referenser däri; <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04459-z>

<sup>3</sup> Forsström m fl (2021); <https://doi.org/10.1002/maco.202011695>. (Resultaten finns även i SSM-rapport 2020:01.)

<sup>4</sup> Chen m fl (2017); <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.10.024>

lång sikt då analyser visar att bufferten som skyddar kopparkapseln kan ha förlorats i en liten andel av deponeringshålen. Också den nu aktuella studien har gjorts vid mer aggressiva förhållanden än vad som någonsin förväntas i slutförvaret. I Kapselkompletteringen påtalade SKB även att det finns andra tolkningar av resultaten än att de skulle tyda på begynnande SCC. Frågan om väteinträngning och försprödning analyserades även den inom Kapselkompletteringen. Också den processen förväntas ha en begränsad omfattning i förvarsmiljön, och inte kunna åstadkomma skada på kopparkapslarna.

Kapselkompletteringen, inklusive frågan om SCC och försprödning, bedömdes av SSM inom ramen för tillståndsprövningen 2019. SSM fann då att dessa frågor inte utgör något hinder för regeringens att bevilja tillstånd för slutförvaret.

Under förutsättning att observationerna i den aktuella studien är korrekta och verkligen relaterade till sulfidexponeringen, kan också följande sägas generellt: Oavsett vad som orsakat den observerade effekten bör en liknande effekt ha uppkommit i andra experiment med liknande sulfidexponeringar, av vilka många citeras i den aktuella studien. I så fall har effekten varit närvarande i de prover som utvärderats i dessa andra studier. De slutsatser som SKB då dragit kring till exempel SCC och försprödning vid sulfidexponering har därför gjorts på prover där den nu observerade effekten varit närvarande och därmed är effekten inkluderad i de slutsatser som redan dragits, t ex i Kapselkompletteringen. Därmed påverkas inte slutsatserna i grunden, men den nya studien kan kanske kasta ytterligare ljus kring detaljerna bakom dessa andra observationer.

### **SKB:s slutsatser**

Författarna till den nu aktuella artikeln hävdar att deras resultat förstärker argumenten kring att SCC kan förekomma, genom att påvisa tidiga förändringar i kopparmaterialet då det utsätts för sulfidkorrosion. Med tanke på i) de otydligheter som finns kring resultaten i artikeln, ii) det faktum att slutsatserna bygger på indirekta observationer och iii) att studien genomförts under förhållanden som är mer aggressiva än vad som någonsin förväntas i ett slutförvar, ser inte SKB att bilden av SCC förändras på något väsentligt sätt av denna studie. Därmed föranleder den inte heller någon förnyad analys av säkerheten efter förslutning.

Som redovisat i Kapselkompletteringen kommer SCC och andra frågor kopplade till sulfidkorrosion att utredas vidare inom ramen för SKB:s forskningsprogram, och här kan metoden med röntgendiffraktion som använts i den nya studien eventuellt vara användbar. SKB:s studier fortsätter i samarbete med bland annat Rise KIMAB (Sverige), VTT (Finland) och University of Western Ontario (Kanada). Ett av syftena är att ge underlag för mindre pessimistiska analyser av sulfidkorrosion och SCC. Sådana analyser kommer fortsatt att ingå i SKB:s säkerhetsredovisningar, i kommande moment i den stegvisa tillståndsprövningen enligt Kärntekniklagen.

## 2. SKB:s kommentar till masterarbete om deformationsåldring hos kapselns insats

### Deformationsåldring och dess hantering i SKB:s ansökan

Kapslarna i slutförvaret har en insats av järn. Insatsens funktion är att motstå de mekaniska laster kapslarna kan utsättas för i förvarsmiljön.

Insatsens material och utformning är valda för att med marginal ge tillräckliga prestanda i de lastsituationer som uppkommer i förvaret. I vissa extrema situationer kan järnet i kapseln (likom metaller i allmänhet) belastas så mycket att det får en bestående formförändring, en permanent deformation. Även efter en sådan händelse har kapseln en betydande förmåga att motstå mekaniska laster, men järnet kan påverkas av den permanenta deformationen. Fenomenet kallas statisk deformationsåldring. Vid statisk deformationsåldring förväntas materialet bli mer hållfast, så att det vid en eventuell ytterligare belastning krävs en ännu större kraft för att åstadkomma ytterligare en permanent deformation. Materialet blir dock samtidigt mindre segt, det vill säga det krävs inte längre lika stora deformationer för att det till slut ska brista.

Enligt den analys av säkerhet efter förslutning som ligger till grund för SKB:s ansökan kan bara stora jordskalv i förvarets närhet ge tillräckliga laster för att leda till permanenta deformationer på kapseln. Sådana händelser är extremt ovanliga eftersom i) stora jordskalv är mycket ovanliga i Sverige också i ett miljonårsperspektiv, ii) deponeringspositioner för kapslar väljs för att minimera påverkan av jordskalv och iii) insatsen dimensionerats för att stå emot de rörelser som ändå kan förekomma.

Betydelsen av statisk deformationsåldring hos kapslarna har utvärderats inom prövningen av SKB:s ansökan om ett slutförvar i Forsmark. Bland annat begärde SSM en komplettering om saken av SKB sommaren 2017. SKB fann i kompletteringen att deformationsåldring inte påverkar kapslarnas funktion i slutförvaret. SKB:s kompletterande material har legat till grund för såväl SSM:s som mark- och miljödomstolens bedömningar av ansökan och ingen av dessa instanser såg att frågan utgjorde hinder för regeringen att bevilja tillstånd för slutförvaret.

### Ny studie från Aaltouniversitetet

Nu har en ny studie i ämnet lagts fram i form av en masteruppsats från juli 2021 vid Aaltouniversitetet i Helsingfors.<sup>5</sup> Uppsatsen innehåller en genomgång av den föreslagna KBS-3-kapseln, allmän kunskap om deformation och åldring och resultat från en ny serie hållfasthetsförsök, med provmaterial från en kapselinsats. Prov gjordes vid flera temperaturer och man varierade också åldringstiden, dvs tiden mellan den första deformationen och den efterföljande mätningen av materialegenskaperna. Också storleken på den inledande deformationen varierades och var i samtliga fall betydligt större än vad de allra flesta kapslarna i slutförvaret kommer att utsättas för. Proverna belastades vid den efterföljande mätningen tills de gick av och brottyorna undersöktes i mikroskop.

Resultaten visar på en tydlig statisk deformationsåldring. Förbättringen av hållfastheten var något större än förväntat enligt tillgängliga litteratordata, särskilt vid temperaturer som är relevanta för slutförvaret. Försämringen i seghet (förmåga att deformeras utan att brista) var också något större än förväntat. Brottyorna visade att materialet fortfarande var segt, det vill säga det hade inte blivit sprött av åldringen. Den slumpmässiga variationen mellan prover som utsatts för samma försöksförhållanden är relativt låg.

---

<sup>5</sup> En masteruppsats är det avslutande arbetet för en masterexamen som omfattar 5 års studier vid universitet eller högskola.

SKB studerar frågan i enlighet med den plan som redovisas i Fud-program 2019. En liknande försöksserie som i den finländska studien har genomförts, men mätdata är ännu inte färdiganalyserade. Preliminärt kan dock sägas att resultaten påminner om de i den finländska studien. Förbättringen i hållfasthet är ungefär densamma, medan försämringen i seghet inte är lika stor som i den finländska studien.

### **SKB:s slutsatser**

I sammanfattning visar alltså både den finländska studien och SKB:s pågående arbete att statisk deformationsåldring efter stora belastningar kan inträffa i insatsmaterialet, också vid de begränsade temperaturer som förekommer i slutförvaret. Slutsatsen om betydelsen av fenomenet för slutförvaret som SKB tidigare redovisat till SSM kvarstår dock: Deformationsåldring är relevant i slutförvaret endast i situationer där en kapsel först utsatts för en last som ger en bestående deformation och sedan utsätts för ytterligare en sådan last. Deformationer av det slaget bedöms bara kunna förekomma vid kraftiga jordbävningar i förvarets närhet, och då endast på en kapsel som oavsiktligt placerats i ett olämpligt deponeringshål. Stora jordbävningar nära förvaret är mycket sällsynta också i ett miljonårsperspektiv och det skulle dessutom krävas att två sådana händelser påverkar samma kapsel för att deformationsåldring ska ha någon betydelse. Det är också värt att notera att en kapselinsats som åldrats efter deformation faktiskt har ett ökat motstånd mot ytterligare deformationer och också en betydande, om än minskad, förmåga att motstå ytterligare laster utan att brista.

SKB:s arbete kring deformationsåldring fortsätter enligt den plan som redovisades i Fud-program 2019.