



DokumentID
1718509, (1.0 Godkänt)
Reg nr

Sekretess
Öppen
Dokumenttyp
Promemoria (PM)

Sida
1(35)

Författare
2019-02-13 Allan Hedin
Christina Lilja
Johannes Johansson

Kvalitetssäkring
2019-04-02 Patrik Vidstrand (TS)
2019-04-02 Helene Åhsberg (TS)
2019-04-02 Jessica Palmqvist (Godkänd)

Komplettering om kapselintegritet

Utökad svensk sammanfattning av TR-19-15 – Supplementary information on canister integrity issues

Angående ansökan om tillstånd enligt miljöbalken till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall, M2018-00217/Me och

ansökningarna om tillstånd enligt kärntekniklagen till anläggningar för mellanlagring och slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall, M2018/00221/Ke

Innehåll

1	Inledning.....	3
2	Förvarsmiljön.....	3
3	Saunaeffekten.....	7
4	Korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten.....	9
5	Gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.....	14
6	Spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion.....	18
7	Väteförsprödning.....	21
8	Radioaktiv strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning.....	25
9	Konsekvenser för säkerhet efter förslutning.....	29
10	Sammanfattning och slutsatser.....	33

1 Inledning

Mark- och miljödomstolen vid Nacka tingsrätt (MMD) har i sitt yttrande till regeringen 2018-01-23 om tillåtlighet enligt miljöbalken för ett slutförvar av KBS-3-typ i Forsmark, efterfrågat ytterligare underlag om följande fem frågor beträffande kopparkapselns integritet:

- a) korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten
- b) gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion
- c) spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion
- d) väteförsprödning
- e) radioaktiv strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning.

SKB har i säkerhetsanalysen som ligger till grund för ansökan 2011, den så kallade SR-Site-analysen,¹ studerat och beaktat samtliga dessa fenomen. Ytterligare underlag har ingivits till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), som kompletteringar inom myndighetens prövning av ansökan enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (KTL).

I detta dokument presenteras resultat om förståelsen av de fem frågorna och slutsatser kring frågornas betydelse för säkerheten efter förslutning hos ett KBS-3-förvar i Forsmark. Dokumentet är en sammanfattning av en detaljerad teknisk redovisning av frågorna,² skriven på engelska för i första hand experter inom området, kompletterad med relevanta citat ur MMD:s yttrande kring kapselfrågorna. Tonvikten ligger på nytt material som tillkommit efter huvudförhandlingen i mark- och miljödomstolen hösten 2017 och efter SSM:s granskning av säkerhetsanalysen SR-Site med kompletteringar. I den tekniska redovisningen finns fullständiga hänvisningar till alla åberopade tidigare och nya studier, totalt närmare 200 stycken. Av praktiska skäl ges i detta dokument endast referenser till de väsentligaste nyttillkomna studierna sedan huvudförhandlingen i MMD.

Innan de fem kapselfrågorna behandlas ges i avsnitt 2 en beskrivning av förvarsmiljön, och i avsnitt 3 hanteras den så kallade saunaeffekten. De fem kapselfrågorna behandlas i avsnitten 4 till 8. I avsnitten 3 till 8 är MMD:s bedömningar för respektive process inlagda som oavkortade citat från MMD:s yttrande (sid 323–332 i yttrandet). Konsekvenser för säkerhet efter förslutning analyseras i avsnitt 9 och slutsatser ges i avsnitt 10.

Det övergripande resultatet av genomförda kompletterande studier och analyser är, att den viktigaste slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site är oförändrad: Ett slutförvar som byggs enligt KBS-3-metoden i Forsmark är långsiktigt säkert och uppfyller SSM:s krav på säkerhet efter förslutning.

2 Förvarsmiljön

För att kunna utvärdera kapselns integritet är det nödvändigt att beakta vilka kemiska och andra förhållanden som kommer att råda i det slutförvar av KBS-3-typ som SKB ansökt om att uppföra i

¹ Bilaga SR-Site i ansökan om tillstånd enligt miljöbalken. Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-site.

Svensk Kärnbränslehantering AB, mars 2011. [Tillgänglig via: <http://www.skb.se/projekt-for-framtiden/karnbransleforvaret/vara-ansokningar/ansokningshandlingarna/ansokan-enligt-miljobalken/>]

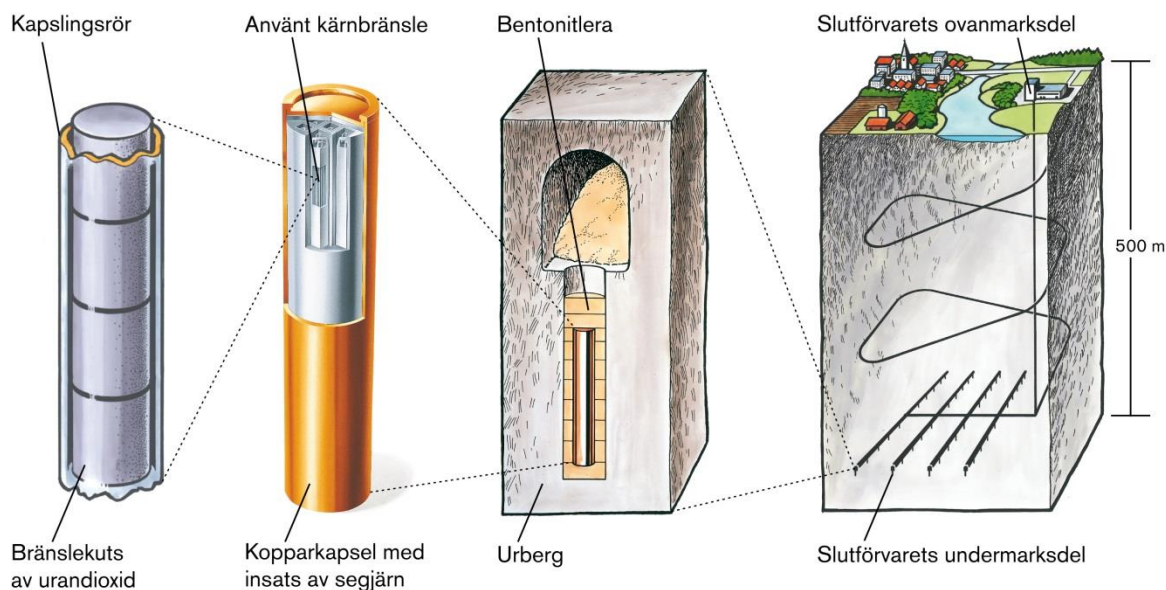
² SKB, 2019. Supplementary information on canister integrity issues, SKB TR-19-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

Forsmark. Dessa förhållanden kan sedan relateras till de förhållanden som gällt vid olika laborieförsök där koppar studerats. Många försök på kopparmaterial har gjorts vid laborieförhållanden som är betydligt mer aggressiva än förvaringsmiljön. I detta avsnitt ges därför en kort redovisning av hur SKB beskrivit förhållandena i förvaret i ansökan, kompletterat med resultat av ett antal nya studier.

KBS-3-förvaret i Forsmark

Syftet med KBS-3-förvaret är att isolera kärnavfallet från människa och miljö under mycket långa tidsrymder. I metoden används kopparkapslar med en segjärnsinsats för att innesluta det använda kärnbränslet. Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera och deponeras på ett djup av ungefär 500 meter i grundvattenmättat granitiskt berg, se Figur 2-1.



Figur 2-1. KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle.

Den valda förvaringsplatsen i Forsmark ligger i norra Uppland i Östhammars kommun. Forsmarksområdet består av kristallin berggrund som tillhör den Fennoskandiska skölden och bildades för cirka 1,9 miljarder år sedan. Platsen är undersökt med olika metoder, inklusive ett tiotal närmare 1000 meter djupa kärnborrhål. Utvärderingen av data från platsundersökningen visar sammanfattningsvis att de viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna hos förvaringsplatsen är:

- En låg frekvens av vattenförande sprickor på förvaringsdjup.
- För barriärerna gynnsamma och stabila eller bara långsamt föränderliga geokemiska förhållanden på förvaringsdjup.

Dessutom möjliggör den relativt höga värmeledningsförmågan vid platsen att bergvolymen kan utnyttjas effektivt. De bergmekaniska förhållandena och andra egenskaper, som är betydelsefulla för att förvaret ska kunna uppföras på ett säkert och effektivt sätt, är också goda. Dessa egenskaper har varit avgörande för platsvalet.

Förvaringsmiljön och dess förändring under förvarets utveckling

De kemiska förhållandena på förvaringsdjup är gynnsamma för kopparkapslarnas integritet. På lång sikt kan endast svavelföreningen sulfid i grundvattnet orsaka korrosion av betydelse. Halterna av sulfid i Forsmark är låga, men inte försumbara vad gäller korrosion på mycket lång sikt.

Förekomst och tillförsel av sulfid under olika skeden av förvarets utveckling inverkar direkt på förutsättningarna för gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid och spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, två av de frågor där domstolen efterfrågat mer information. Innebörden i dessa korrosionsbegrepp förklaras närmare i avsnitten 5 respektive 6. En central del av säkerhetsanalysen SR-Site ägnas åt hur bland annat de kemiska förhållandena i och omkring förvarets barriärer utvecklas och förändras med tiden. För att förstå hur den kemiska miljön förändras behövs även kunskap om temperaturutveckling och vattenflöden.

Resteffekten i det använda kärnbränslet gör att kapselns ytemperatur inledningsvis stiger till en maximal temperatur av cirka 95 °C, omkring 10 år efter deponering. Temperaturen avtar sedan till cirka 40 °C efter 1000 år och till 20 °C efter 10 000 år. Efter 100 000 år har temperaturen sjunkit till det omgivande bergets, omkring 11 °C vid dagens tempererade klimat.

När bufferten av bentonitlera installeras i ett deponeringshål har den av praktiska skäl en begränsad vattenhalt. På sikt kommer grundvattnet att vattenmätta bufferten helt. På grund av den låga frekvensen av vattenförande sprickor på förvarsnivå i Forsmark kommer tiden för denna vattenmättnad att variera betydligt mellan olika deponeringshål. I hål som är förbundna med vattenförande sprickor kan vattenmättnaden fullbordas inom några tiotal år, medan det för positioner utan vattenförande sprickor kan ta 1000 år eller mer. Detta innebär att det kan råda omättade förhållanden vid kapselytan och i den omgivande bufferten under relativt lång tid och att det krävs god kännedom om förhållandena under den omättade fasen för att utvärdera förvarets säkerhet, se vidare nedan.

En annan viktig aspekt av buffertutvecklingen gäller bufferterosion under perioder då bufferten kan exponeras för grundvatten med mycket låg salthalt. Baserat på omfattande utvärderingar i avsnitt 12.2 i säkerhetsanalysen SR-Site drogs slutsatsen att i en liten andel av de totalt 6000 deponeringshålen kan detta fenomen uppträda i en sådan omfattning att kapselytan kommer i direkt kontakt med grundvattnet och därigenom blir mer mottaglig för korrosion av speciellt sulfid. Antalet drabbade deponeringshål varierar mellan några tiotal och något hundratal beroende på hur pessimistiskt analysen genomförs. För dessa deponeringshål kommer det att ta från tiotusentals till hundratusentals år att nå en sådan situation.

Kompletterande studier om förhållandena under mättnadsfasen

Det är principiellt positivt att kapselytan kan omges av omättad bentonitlera under relativt lång tid, eftersom sulfid löst i grundvattnet då inte kan stå i direktkontakt med kapseln. Det är dock viktigt att förstå den kemiska miljön kring kapseln under mättnadsfasen för att till exempel säkerställa att sulfid inte når kapseln på annat sätt, det vill säga i gasform. Därför har ett antal kompletterande studier kring omättade förhållanden genomförts.

En tänkbar källa till sulfid skulle kunna vara omvandling av sulfat, som finns både i grundvattnet och i bentonitmaterialet, till sulfid via sulfatreducerande bakterier (SRB). Bakterierna kräver tillgång till vatten, men när bentoniten är vattenmättad är den för tät för att dessa bakterier ska kunna vara aktiva. I en nyligen genomförd studie³ har man undersökt om SRB kan vara aktiva i fuktig men inte vattenmättad bentonitlera, det vill säga i ett stadium som leran genomgår på dess väg till vattenmättnad i slutförvaret. Resultaten från studien ger ytterligare stöd för utgångspunkten i bland annat säkerhetsanalysen SR-Site, nämligen att mikrobiologisk omvandling av sulfat till sulfid inträffar när mikroberna har tillgång till fritt (flytande) vatten och näringsämnen som tillsatts i mycket högre halter än vad som finns naturligt i bentonit och grundvatten. Ingen sulfidproduktion detekterades när mikroberna var begränsade till en relativ fuktighet av 75–100 % men utan

³ Svensson D, Kalinowski B E, Turner S, Dopson M, 2019. Activity of sulfate reducing bacteria in bentonite as a function of water availability. SKBdoc 1708461 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

förekomst av fritt vatten. En annan ny studie⁴ indikerar att den syrgas som förekommer initialt i såväl experiment som i förvaret förbrukas genom att korrodera kapseln, vilket SKB också utgår från i säkerhetsanalysen. Beräkningar i säkerhetsanalysen SR-Site visar att kvarvarande syrgas leder till mindre än en millimeter korrosion.

En annan viktig fråga är hur sulfid kan transporteras genom buffert och tunnelåterfyllning för att till slut nå kapseln. För vattenmättad lera har detta studerats utförligt, medan omättad lera hanterats mer pessimistiskt och överslagsmässigt i SKB:s tidigare säkerhetsredovisningar. Kompletterande studier har därför genomförts för omättad lera.⁵ Utredningen visar att transport av gasformiga ämnen (t ex sulfid) i den omättade leran går betydligt långsammare än vad SKB pessimistiskt antagit i tidigare redovisningar.

Sammanfattning av relevanta förvarsförhållanden

Berget i Forsmark är fattigt på vattenförande sprickor på förvarsdjup. De flesta deponeringshål i ett förvar i Forsmark kommer inte att stå i kontakt med någon vattenförande spricka.

Lerbufferten som omger kapslarna och tunnelåterfyllningen av lera är bara delvis vattenmättade vid deponeringen. Det kan ta allt mellan tiotals år till flera tusen år att nå full vattenmättnad av bentonitleran i buffert och tunnelåterfyllning, beroende på om ett deponeringshål står i kontakt med en vattenförande spricka eller inte. Efter denna mättnadsfas kommer vattenmättade förhållanden att råda.

För uppemot ett hundratal deponeringshål av de 6000 kan bufferten på lång sikt förloras genom erosion i så stor utsträckning att kapseln kommer i direkt kontakt med grundvattnet.

Sulfid är generellt den viktigaste korrosiva komponenten i granitiska grundvatten i Sverige. I Forsmark, som på många andra platser, är sulfidhalterna låga men inte försumbara vad gäller korrosion på lång sikt.

Under mättnadsfasen skulle sulfid i princip kunna bildas genom mikrobiell aktivitet i buffert och tunnelåterfyllning. Nya studier bekräftar att detta inte kan ske förrän bufferten nått en mycket hög mättnadsgrad. Dessutom är den låga tillgången på näringsämnen för mikrober en starkt begränsande faktor för deras aktivitet i omättad lera. Vattenmättad lera är dock för tät för att mikrober ska kunna vara aktiva.

Nya studier visar att transport av gasformiga ämnen, till exempel sulfid, i omättad lera är betydligt långsammare än vad som tidigare antagits i säkerhetsredovisningen SR-Site.

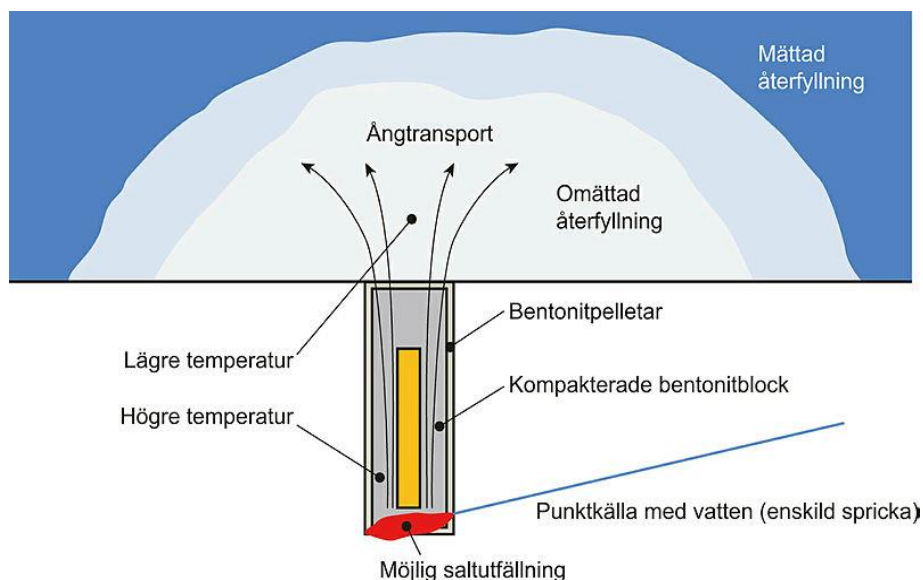
⁴ **Birgersson M, Goudarzi R, 2018.** Investigations of gas evolution in an unsaturated KBS-3 repository. SKB TR-18-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

⁵ **Eriksson P, Hedin A, 2019.** Modelling of sulphide fluxes in unsaturated buffer and backfill for a KBS-3 repository. SKBdoc 1696975 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

3 Saunaeffekten

Vad gäller frågan?

Saunaeffekten (ibland kallad bastueffekten) innebär att salthaltigt vatten förångas i en varm punkt i ett system och att det då bildas saltavlagringar där. I slutförvaret skulle kapseln kunna vara en sådan förångningspunkt och de ämnen, bland annat sulfid, som i så fall skulle ansamlas skulle kunna bidra till korrosion, se Figur 3-1. En tänkbar förekomst av denna effekt togs upp under granskningen av SKB:s ansökan, varvid SKB lämnade kompletteringar till i första hand SSM. Frågan togs även upp under huvudförhandlingen i mark- och miljödomstolen.



Figur 3-1. Schematisk illustration av "saunaeffekten".

Omfattande saltanrikning är möjlig om en stor del av vattnet som kommer in i ett deponeringshåll kan förångas och lämna bufferten som ånga. Om ångan kondenserar i bentoniten i deponeringshålet kommer endast en begränsad del att lämna som ånga och den möjliga saltanrikningen kommer följaktligen att vara begränsad. Kondensationen gör också att bufferten ovanför kapseln vattenmättas. Ångas förmåga att röra sig genom bentoniten minskar med bentonitens vattenmättnad och upphör helt vid full vattenmättnad. Flödet av ånga upphör därmed och den möjliga saltanrikningen kommer också av detta skäl att bli begränsad.

SKB har under senare år studerat frågan både experimentellt i laboratoriemiljö och med modellberäkningar. Det går också att dra slutsatser från fältförsök, även om dessa inte har varit särskilt avsedda för att studera just saunaeffekten. En nyligen genomförd studie fördjupar detaljkunskapen om hur vattenånga tas upp av omättad lera och var den kondenserar.

MMD:s bedömning av frågan

SKB:s slutsats är att det vatten som förångats efter att det trängt in i deponeringshålet kondenserar i bentoniten nära den varma kapseln, så att bentoniten sväller och förhindrar ytterligare ångflöde ut i deponeringstunneln. Mark- och miljödomstolen anser att det inte finns fullt stöd för denna slutsats. SKB:s rapporter från försök indikerar att det kan ske en viss ångtransport. Resultaten tyder på att ånga inte absorberas så lätt i torr bentonit utan att den i stället kondenserar lokalt och leder till sprickbildning, vilket inte är gynnsamt för att hindra ångtransport. Inte heller SKB:s slutsats att tillförda saltmängder blir små och inte hamnar som avlagringar på kapseln synes vara tillräckligt väl underbyggd. Däremot finns det stöd för SKB:s bedömning att ökade kloridhalter till följd av saunaeffekten inte kommer att medföra risk för

Komplettering om kapselintegritet

gropkorrosion, eftersom det sannolikt inte bildas någon passiverande film. Mark- och miljödomstolen har ovan bedömt att mycket talar för att passiverande oxidskikt inte kommer att bildas under oxiderande betingelser. Domstolen delar vidare SSM:s bedömning att saunaeffekten begränsas av antingen kort mättnadstid för bufferten eller låga flöden vid längre mättnadstid. Sammantaget finns det en liten risk att saunaeffekten leder till gropkorrosion med kapselbrott som följd inom 1 000 år. Den bedömningen grundas framför allt på att det inte föreligger gynnsamma kemiska förutsättningar för passivering. Det behövs dock, som SSM angett, ytterligare underlag om transport av ånga i bufferten och integrering av analys av kemiska betingelser med analysen av buffertens och återfyllnadens termiska och hydrauliska utveckling. Mark- och miljödomstolen bedömer att det finns en liten osäkerhet avseende saunaeffektens inverkan på gropkorrosion och spänningskorrosion.

Laboratorieförsök

En första uppsättning tester, som rapporterades 2013, visade att en väsentlig mängd ånga kan strömma genom en bädd av relativt torra bentonitpellets utan att absorberas. Däremot hindras ångtransporten när ångan kondenserar. Under 2017 genomfördes ytterligare test där en inre kopparvärmare omgavs av bentonitblock (ringar) och sedan täcktes av ett massivt bentonitblock, se Figur 3-2. Uppställningen speglar förvarsutformningen i så måtto att den innehåller de viktigaste komponenterna vad gäller saunaeffekten. Den övergripande slutsatsen från dessa tester är att kondensation kommer att ske snabbt i block såväl som i pellets. Därför förväntas inte vattenånga i närheten av kapseln lämna deponeringshålet.



Figur 3-2. Fotografier från försöksuppställningen där en kopparvärmare innesluts av fyra bentonitringar och sedan täcks av ett massivt bentonitblock.

Ytterligare försöksstudier⁶ med ångtransport i bentonit genomfördes under senare delen av 2018 för att få bättre förståelse för de processer som reglerar fuktfördelningen i delvis mättade bentonitblock och pellets. Resultaten av studien har ökat förståelsen för denna transport och motsäger inte SKB:s tidigare slutsatser om saunaeffekten.

⁶ Åkesson M, Börgesson L, Sandén T, Goudarzi R, 2019. Vapor transport in bentonite. Laboratory investigations and theoretical study. SKBdoc 1712120 ver 1.0 Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

Modellberäkningar

Som komplement till försöken har även olika modellberäkningar genomförts. Bland annat har ett fall där en enskild vattenförande spricka skär ett deponeringshål analyserats. När temperaturen i det område där vatten kommer in är förhöjd kan vattnet förångas, vilket i sin tur kan leda till ackumulering av salt. Förångningen i sig leder dock inte till att salt ackumuleras i någon större utsträckning. För att salt ska kunna ackumuleras i någon signifikant grad, krävs det att huvuddelen av det inkommande vattnet förångas och sedan transporteras bort utan att vattenmätta bentoniten. Beräkningarna visar att möjliga förångningseffekter som längst kan vara aktiva under de första åren efter förslutning, vilket ger försumbar saltanrikning.

Fältförsök

SKB har även studerat resultaten från olika fältförsök, som inte från början genomförts för att studera saunaeffekten, men där bentonit har hettats upp med elektriska värmare under flera år. Det gäller prototypförvaret och LOT-försöken vid SKB:s Åspölaboratorium och FEBEX-försöket som utförts i en underjordsanläggning i Grimsel i Schweiz. När försöken sedan har brutits och analyserats har det även studerats om det finns några indikationer på saltanrikningar. Inga av dessa försök uppvisar indikationer på någon saunaeffekt.

Slutsatser

Genomförda arbeten visar att saltanrikning orsakad av inströmmande vatten till ett deponeringshål blir försumbar i ett KBS-3-förvar. Det finns flera anledningar till detta:

- För att betydande mängder salt ska kunna ackumuleras måste huvuddelen av det tillförda vattnet omvandlas till ånga, i stället för att fortsätta flöda i flytande form. Så som ett KBS-3-förvar är utformat kan detta inte inträffa annat än under mycket korta tidsperioder, vilket verifieras av modellberäkningar.
- Experimentella resultat visar att den begränsade mängd ånga som bildas tas upp genom kondensation varigenom systemet tätas och vidare ångtransport förhindras.
- Inga relevanta tecken på saltackumulering har observerats i fältförsök.

Sammanfattningsvis är slutsatsen således att saunaeffekten kommer att vara försumbar i ett KBS-3-förvar i Forsmark. Konsekvenserna av denna process beaktas därför inte i de ytterligare analyserna i denna rapport.

4 Korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten

Vad gäller frågan?

Vatten i kontakt med atmosfären innehåller löst syrgas. Om koppar läggs i sådant vatten angräps den av syrgasmolekylerna – kopparn korroderar. Grundvattnet på förvarsdjup är däremot fritt från syrgas och då säger sedan lång tid etablerad vetenskap att den korrosion som orsakas av själva vattenmolekylerna är oerhört liten och troligtvis inte ens mätbar. Detta är en viktig grund för att koppar valts som kapselmaterial i KBS-3-metoden.

Sedan 2007 har en grupp forskare vid KTH framfört en annan uppfattning om omfattningen av kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten. Enligt dessa forskare är omfattningen omkring en miljon gånger större än vad etablerad vetenskap säger. Till stöd för detta åberopas egna experiment som skulle visa att koppar i rent, syrgasfritt vatten ger upphov till utveckling av vätgas. Denna skulle frigöras vid en för vetenskapen tidigare okänd reaktion mellan koppar och vattenmolekyler (som ju

Komplettering om kapselintegritet

består av syreatomer och väteatomer). En tidigare okänd förening av koppar, väte och syre skulle bildas vid reaktionen.

Frågan går egentligen tillbaka till 1980-talet då en av dessa KTH-forskare, baserat på ett annat experiment, hävdade något liknande om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten. Försöket motsades något år senare av experiment utförda av andra forskare vid KTH och i Schweiz, och frågan ansågs därmed allmänt vara utagerad.

Frågan väcktes alltså på nytt i slutet av 2000-talet och SKB startade då en rad aktiviteter för att utreda saken närmare.

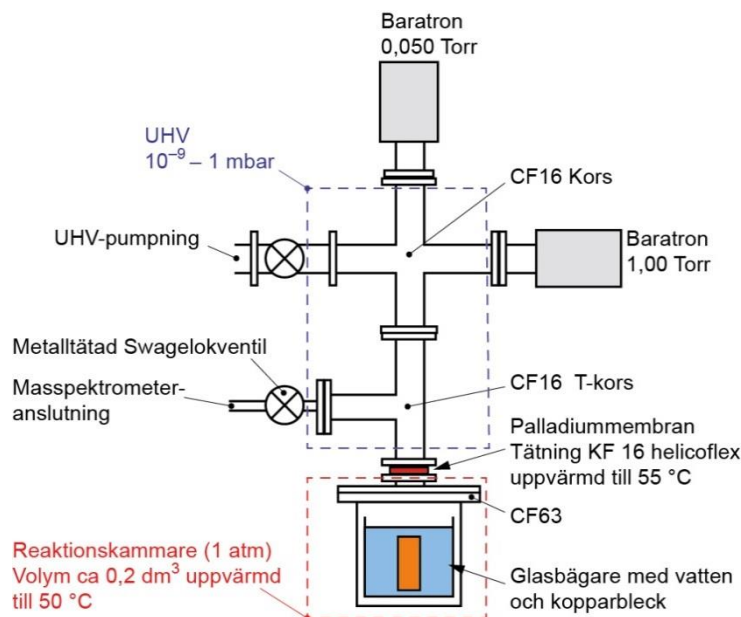
MMD:s bedömning av frågan

Frågan om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten är en av de mest omdiskuterade frågorna i målet. SKB har utfört ett flertal försök. Försök har även utförts av bl.a. forskare på KTH och Uppsala universitet. Parterna har gjort olika tolkningar av försöken och olika bedömningar av hur mycket denna korrosionsform kan bidra till att kapseln degraderas. SKB, Peter Szakálos m.fl. och andra motparter har vid bedömningarna, som mark- och miljödomstolen uppfattar det, utgått från resultat av försök som utförts i vattenfas, dvs. förhållanden som inte motsvarar när bufferten är intakt i slutförvarsmiljön. Domstolen konstaterar att det finns olika uppfattningar i vetenskapliga frågor som har betydelse för riskbedömningen enligt miljöbalken. Domstolen tar inte ställning till vilken teori eller tolkning som är mest trovärdig. Vid riskbedömningen kan dock inte bortses från att korrosionshastigheten kan vara betydligt högre än vad SKB bedömt, vilket kan vara avgörande för kapselns långsiktiga skyddsförmåga. SKB behöver därför redovisa ytterligare underlag i frågan. Sammantaget finns det en betydande osäkerhet avseende allmän korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten.

Försök vid Uppsala universitet

SKB har låtit genomföra två större experimentella studier för att utreda frågan om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten.

Det ena är i princip en upprepning av KTH-forskarnas experiment, fast under mer kontrollerade förhållanden. Försöket genomfördes vid Uppsala universitet och Figur 4-1 visar försöksuppställningen som användes. Förenklat består uppställningen av en övre och en nedre kammare där koppar exponeras för rent, syrgasfritt vatten i den nedre och där man mäter förekomsten av vätgas i den övre. Kamrarna skiljs åt genom ett tunt membran av palladium, en metall som är genomsläpplig för väte, men som förhindrar alla andra gaser att transporteras mellan kamrarna. För att eliminera tänkbara felkällor i experimentet ställdes mycket höga krav på bland annat kopparkvaliteten, renheten hos kopparytan, vattenkvaliteten och den gas-atmosfär som försöket genomfördes i. Noggranna mätningar utan koppar närvarande gjordes dessutom för att bestämma den vätgasutveckling som apparaturen själv ger upphov till. Resultatet med koppar visade att ingen vätgasutveckling utöver de låga bakgrunds nivåer som apparaturen själv orsakar kunde uppmätas. Forskargruppen vid Uppsala universitet letade också noga efter korrosionsprodukter, det vill säga kemiska kopparföreningar som skulle ha bildats om det förekom en reaktion mellan koppar och vatten. Man undersökte med känsliga metoder ytan av kopparprovet, vattnet som kopparn exponerats för och ytorna hos glasbehållaren som inrymt kopparn och vattnet. Ingenstans hittade man halter av koppar som var i närheten av vad som förväntats enligt KTH-forskarnas slutsatser.



Figur 4-1. Uppställningen som användes vid Uppsalaexperimentet. De övre och nedre kamrarna är inramade av streckade rektanglar.

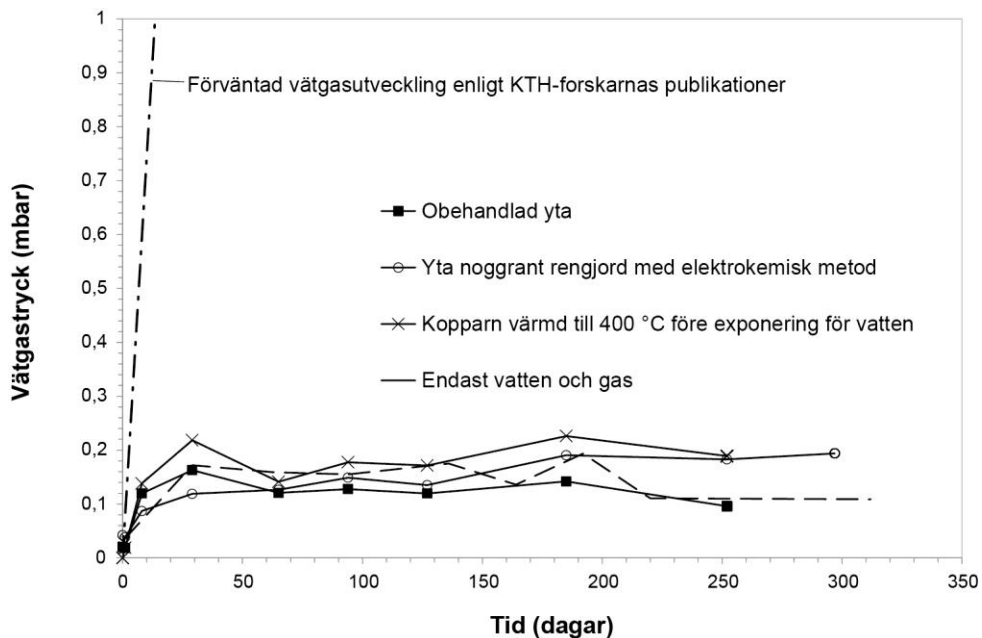
Försök hos Micans i Göteborg

Den andra experimentella studien bestod i att exponera par av $1 \times 10 \text{ cm}^2$ kopparprover i form av antingen 2 millimeter tjocka bleck eller 0,1 millimeter tjocka folier för rent, syrgasfritt vatten i förslutna provrör, se Figur 4-2. Ovanför vattenytan finns en gasficka som till en början är fylld av ren kvävgas och där gassammansättningen sedan mäts med jämna mellanrum för att undersöka om någon vätgas bildats. Också i detta försök ställde man höga krav på renhet och gjorde noggranna bestämningar av bakgrundshalter av vätgas. Försöksmetoden utvecklades hos Microbial Analytics Sweden AB (Micans) i Göteborg och där genomfördes också mätningarna med den utvecklade metoden.

Ett av resultaten visas i Figur 4-3. Den visar det uppmätta vätgastrycket över tid för tre stycken 0,1 millimeter kopparfolier av precis den kopparkvalitet och från den leverantör som KTH-forskarna använt i sitt långtidsförsök. Proverna skiljer sig åt genom hur de behandlats innan exponeringen för vatten – ett har rengjorts mycket noga, ett annat har värmts till 400 °C och ett är helt obehandlat. Som framgår av figuren ger alla ett vätgastryck mellan 0,1 och 0,2 millibar. I figuren visas också en streckad tryckkurva från ett provrör som inte innehåller koppars utan bara vatten och kvävgas, och som synes beter den sig snarlikt proverna med koppars. Slutsatsen blev därför att ingen vätgasutveckling över den låga bakgrundsnivån i försöket utvecklades när koppars fanns i provrören. I figuren finns också en punktstreckad linje som stiger snabbt. Den visar det tryck som skulle förväntas enligt KTH-forskarnas slutsatser. De använde alltså samma kopparkvalitet och deras prov var enligt deras vetenskapliga publikationer helt obehandlat innan exponeringen för vatten.



Figur 4-2. Förslutna provrör med koppar i rent, syrgasfritt vatten. Den 6 cm³ stora gasfickan överst i provrören provtas regelbundet. Två av rören innehåller endast vatten och gas. Bilden togs då kopparn exponerats för rent, syrgasfritt vatten vid 70 °C i 27 månader.



Figur 4-3. Vätgasutveckling från kopparfolier med olika behandlingar före exponering för rent, syrgasfritt vatten. Den punktstreckade linjen som stiger snabbt visar den förväntade vätgasutvecklingen enligt KTH-forskarnas publikationer.

Av alla de kopparkvaliteter som undersöktes fanns en som gav vätgasutveckling: Då 2 millimeter tjocka bleck av SKB:s kapselkoppar studerades fick man en vätgasutveckling som var markant högre än bakgrunden. Dock ser man denna utveckling oavsett om proverna ligger nedsänkta i vatten eller om de ligger i ett provrör som endast innehåller kvävgas. Den uppenbara slutsatsen är att vätet i detta fall kommer från själva kopparmaterialet och inte från någon reaktion mellan koppar och vatten. Ungefär 0,05 promille av atomerna i kapselmaterialet är väte och en betydande andel av detta avgavs om kopparn värms till cirka 400 °C i vakuum under en timme. Efter en sådan värmebehandling observeras ingen vätgasutveckling i provrörsförsöken oavsett om kopparn exponeras för vatten eller inte. Det kan inte uteslutas att också övriga kopparkvaliteter i försöken avgav en liten mängd vätgas. Dock var dessa prov bara en tjugonedel så tjocka som kapselkoppar, vilket skulle ha gett en i motsvarande grad mindre total väteavgivning vid samma

Komplettering om kapselintegritet

väteinnehåll. Detta är för litet för att vara mätbart i försöket. SKB har nu också genomfört beräkningar av hur kapselkoppar avger väte, vilket ytterligare stärker tolkningen av experimenten med SKB:s kapselkoppar.⁷

Nyligen publicerade⁸ försök i Finland med den metod som utvecklats av Micans bekräftar resultaten ovan.

Sökande efter okända kopparföreningar

SKB har också låtit undersöka om det skulle kunna existera någon hittills okänd kemisk förening mellan koppar, syre och väte med egenskaper i överensstämmelse med KTH-forskarnas tolkning av sina experiment. Frågan studerades både experimentellt och teoretiskt av andra forskare vid KTH under flera år med resultatet att ingen stabil, hittills okänd förening hittades. Resultaten är publicerade i den vetenskapliga litteraturen.

Övrigt

SKB har både i den vetenskapliga litteraturen och i direkta kontakter påtalat brister i redovisningarna i KTH-forskarnas publikationer. Dessa påpekanden har i allmänhet bara besvarats kort och i allmänna ordalag, så det föreligger fortfarande flera oklarheter kring hur experimenten egentligen genomförts.

SKB har nyligen publicerat en sammanfattande vetenskaplig artikel⁹ om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten, där också forskargruppen vid Uppsala universitet är medförfattare eftersom en del av deras resultat publiceras för första gången i artikeln. I artikeln redogörs för Uppsalagruppens försök att upprepa KTH-forskarnas resultat, för provrörsförsöken hos Micans och för sökandet efter okända kopparföreningar. Där diskuteras också brister och oklarheter i KTH-forskarnas publikationer. Även andra försök inom området diskuteras, bland annat ett kort försök att efterlikna KTH-forskarnas experiment vid Studsvik.

Slutligen har SKB publicerat beräkningar som visar att även om KTH-forskarna skulle ha haft rätt i sina påståenden, så skulle omfattningen av den anförda korrosionsprocessen, baserat på KTH-forskarnas egna data, bara vara cirka en millimeter på en miljon år med de temperaturer som kommer att råda i förvarsmiljön. En miljon år är den tidsperiod som säkerhetsanalysen för ett slutförvar behöver omfatta enligt SSM:s föreskrifter.

Slutsatser

De experiment som en forskargrupp vid KTH använt som stöd för att hävda att koppar i rent vatten korroderar betydligt mer än vad etablerad vetenskap förutsäger har upprepats under mer kontrollerade förhållanden. Då observeras varken den signal (vätgasutveckling) som forskarna tolkat som kopparkorrosion, eller kopparföreningar som skulle ha bildats om korrosion förekommit. Alternativa metoder att studera det påstådda korrosionsfenomenet har inte heller givit resultat som kan tolkas som korrosion.

Grundligt såväl experimentellt som teoretiskt sökande efter hypotetiska hittills okända föreningar mellan koppar, syre och väte (som skulle kunna förklara ett tidigare okänt korrosionsfenomen) har inte lett till att någon sådan hittats.

⁷ Hedén A, 2019. Scoping calculations of hydrogen degassing from Cu-OFP. SKBdoc 1716281 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

⁸ Ollila K. Copper corrosion experiments in pure water under anoxic conditions, Posiva WR 2018-19.

⁹ Hedén A, Johansson A J, Lilja C, Boman M, Berastegui P, Berger R, Ottosson M, 2018. Corrosion of copper in pure O₂-free water? Corrosion Science 137, 1–12.

Komplettering om kapselintegritet

Även om KTH-forskarna skulle ha rätt skulle omfattningen i slutförvaret bara bli ett korrosionsdjup av cirka en millimeter på en miljon år, vilket inte skulle påverka kapselns inneslutande förmåga eller den långsiktiga säkerheten.

Samtliga dessa resultat finns nu publicerade i den vetenskapliga litteraturen. Också brister i försök som hävdas ge resultat som står i strid med etablerad vetenskap påtalas i de vetenskapliga publikationerna.

Det är SKB:s tydliga slutsats att det inte finns något vetenskapligt stöd för att hävda att koppar korroderar i rent, syrgasfritt vatten på något annat sätt än vad etablerad vetenskap säger, vilket är omätbart litet.

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

Vad gäller frågan?

Gropkorrosion är en form av lokal korrosion som innebär att korrosionen är lokaliserad till vissa punkter och därför ger djupare angrepp än om den sker mer jämnt över en större yta. För att lokal korrosion ska uppstå krävs i allmänhet att det skikt av ämnen (korrosionsprodukter) som bildas vid korrosionen har en skyddande (passiverande) effekt mot metallytans fortsatta korrosion. På de platser på ytan där det uppstår defekter eller ”hål” i detta skyddande skikt löser metallen upp sig och gropar uppkommer i metallytan. Lokal korrosion kan förekomma i olika former, med djupa gropar men också grunda gropar som inte växer på djupet förekommer.

MMD:s bedömning av frågan

SKB:s utredning visar att risken för gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid generellt är liten vid de sulfid- och kloridhalter som kan förekomma i slutförvarsmiljön. SSM har dock identifierat två fall där sulfidkoncentrationen skulle kunna bli så hög att passiverande sulfidfilmer kan bildas och medföra risk för gropkorrosion. Det ena fallet är förhöjda halter på grund av mikrobiell sulfatreduktion innan fullt svälltryck har utvecklats. Det andra fallet är diffusion av gasformig sulfid, som bildats i återfyllnaden, till omättade deponeringshål. Även Peter Szakálos m.fl. har pekat på dessa risker. Utredningen visar att det finns en risk för gropkorrosion. Mark- och miljödomstolen instämmer i SSM:s bedömning att ytterligare underlag behövs om variabilitet och osäkerhet för sulfid- och kloridhalter i de två fall som nämnts ovan samt konsekvenserna om passiverande sulfidfilm bildas. Domstolen bedömer nedan att det finns en betydande osäkerhet avseende hur spänningskorrosion kan påverka kapselns skyddsförmåga. Förutsättningarna för att gropkorrosion och spänningskorrosion ska uppkomma i slutförvarsmiljön är likartade när det gäller kemiska förhållanden och risken för att det bildas passiverande skikt. Gropkorrosion är vidare en process som, om den väl uppkommer, kan fortgå under lång tid i slutförvarsmiljön. Den kan dessutom gå förhållandevis snabbt. Sammantaget finns det en betydande osäkerhet avseende gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid. Vid den bedömningen beaktas att tiden innan fullt svälltryck utvecklats är relativt begränsad, dvs. tiden då det finns en ökad risk för mikrobiell sulfatreduktion och diffusion av gasformig sulfid.

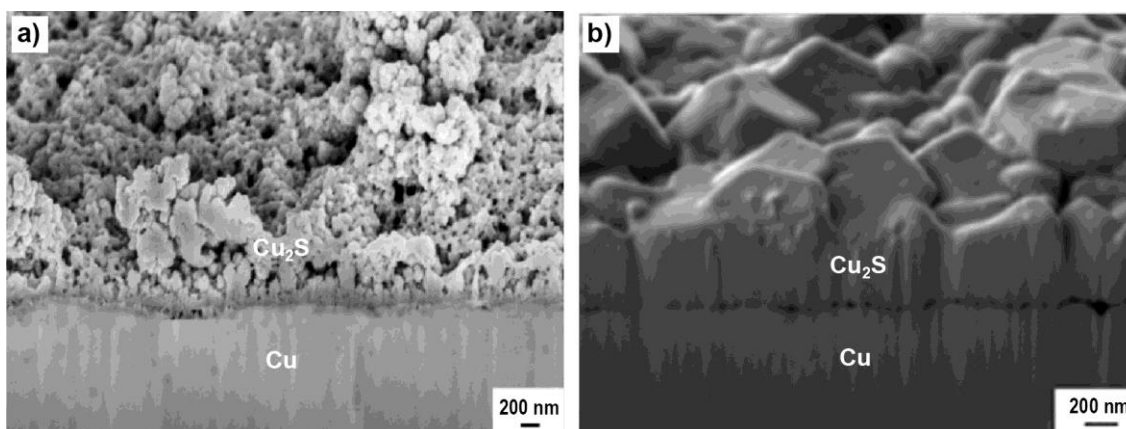
I MMD:s yttrande framfördes också att ytterligare underlag behövs kring saunaeffektens inverkan på gropkorrosion.

Tidigare och nya undersökningar

Inledningsvis konstateras att i avsnitt 3 bedöms saunaeffekten vara försumbar i ett KBS-3-förvar i Forsmark. Saunaeffektens inverkan på groppkorrosion diskuteras därför inte vidare här.

Korrosion av koppar i sulfidlösning har SKB låtit studera i många år, framförallt genom arbete vid University of Western Ontario i Kanada. Kapselkoppar har exponerats för sulfidlösningar med olika koncentration. Genom att studera korrosionsprodukternas egenskaper och hur de växer till, kan man förstå korrosionsmekanismerna och vad som styr de kemiska reaktionerna. Det har visat sig att flödet av sulfid in mot kopparytan har avgörande betydelse. Om sulfidkoncentrationen är låg blir sulfidflödet lågt och en porös film av korrosionsprodukter (kopparsulfid, Cu_2S) bildas, se Figur 5-1.a. Om sulfidkoncentrationen är hög blir sulfidflödet högre och en mer kompakt film kan då bildas, se Figur 5-1.b.

För att groppkorrosion i traditionell mening (engelska; pitting) ska uppstå, krävs att filmen av korrosionsprodukter uppvisar passivitet, det vill säga att den bildade filmen förhindrar fortsatt korrosion. Filmen måste vara kompakt, men den måste också ha speciella elektriska egenskaper. Sådana filmer har kunnat framställas i experiment där man lägger på en elektrisk spänning på kopparprovet och på konstgjord väg ökar sulfidflödet genom att rotera provet, men inte vid vanlig exponering av koppar, utan pålagd spänning. Det finns andra publicerade studier som menar att passivitet iaktagits, men de slutsatserna kan ifrågasättas. Detta eftersom de elektriska egenskaperna hos filmen inte har undersökts tillräckligt nog, och i flera fall dras slutsatserna efter att resultaten har tolkats med en modell (den så kallade Point Defect Model) som är giltig bara för passiva filmer, vilket alltså innebär en form av cirkelresonemang.



Figur 5-1. Tvärsnitt av en kopparyta som exponerats för sulfidlösning, a) porös film efter 4000 timmar bildad i sulfidkoncentrationen 5×10^{-5} mol/L, b) kompakt film efter 1691 timmar bildad i sulfidkoncentrationen 5×10^{-4} mol/L. Bilderna är tagna med svepelektronmikroskop.

För att bättre förstå om groppar uppstår vid korrosion av koppar i sulfidlösning har SKB genomfört tre nya studier, där koppar exponerats för sulfidlösning,¹⁰ samt för sulfidgas och för en lösning med sulfatreducerande bakterier (SRB)¹¹. Som ett inledande steg studerades också olika metoder för att ta bort korrosionsprodukterna utan att skada ytan eller skapa nya groppar.

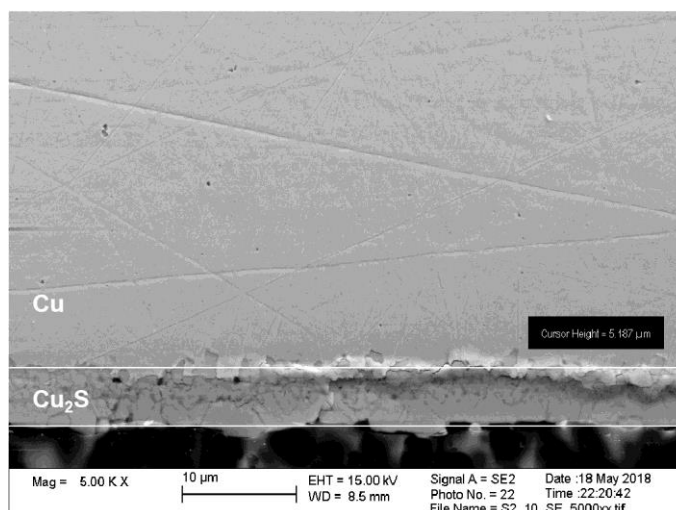
¹⁰ Chen J, Guo M, Martino T, Ramamurthy S, Noël J J, Shoesmith D, Lilja C, Johansson A J, 2019. The distribution of corrosion damage to copper surfaces exposed to aqueous sulphide solutions. SKBdoc 1706406, ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

¹¹ Gordon A, Johansson J, Pahverk H, Börjesson E, Sjögren L, 2018. Corrosion morphology of copper in anoxic sulphide environments. SKB TR-18-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

Vid tillräckligt höga sulfidkoncentrationer observerades gropar som skulle kunna tolkas som mikrogalvanisk korrosion, vilket är en mild form av lokal korrosion och som troligen uppstått på grund av varierande tjocklek hos filmen. Sulfidkoncentrationen som krävdes för detta var något högre än de allra högsta som förväntas i grundvattnet i Forsmark. De djupaste groparna var cirka 0,006 millimeter, vilket var nästan 20 gånger djupare än den genomsnittliga korrosionen över ytan.

Koppar som exponerats för sulfid i gasfas, vid en hög och en låg koncentration, uppvisade bara en ojämnt korroderad yta, se Figur 5-2, och som förväntat med mer korrosion vid högre sulfidkoncentration och längre exponeringstid.



Figur 5-2. Tvärsnitt av en kopparyta efter 30 dagars exponering i 1 % sulfidgas (den högre koncentrationen) vid 75 % relativ luftfuktighet och temperaturen 85 °C.

I försöken med sulfatreducerande bakterier har koppar exponerats för en lösning innehållande sådana bakterier och där lösningen antingen var näringsrik (högre halter av sulfat och organiskt kol) eller näringsfattig (halter av sulfat och organiskt kol som förekommer i grundvatten på försvarsdjup). Referensprover med näringslösning men utan bakterier, och även med sulfid tillsatt, fanns också med. Resultatet visade att på kopparproverna som exponerats för den näringsrika lösningen fanns gropar som visade att lokal korrosion förekommit. Det resultatet stämmer också med ett par andra vetenskapliga studier där man sett aktivitet från bakterier och bildning av en biofilm på kopparytan. Gemensamt för alla försök där man sett biofilm och/eller lokal korrosion från bakteriell aktivitet är att koncentrationen av sulfid i lösningen varit högre än de högsta som man mätt upp i grundvattnet i Forsmark. Proverna i näringsfattig lösning (som liknar grundvatten) hade inte några sådana gropar. Alla proverna hade dock gropar och repor, som troligen uppkommit under provprepareringen, det vill säga de liknade helt oexponerade referensprover som också undersökts.

Lokal korrosion vid förvarförhållanden

Framförallt från studierna av bildning av korrosionsfilmer har det gått att bestämma vilka sulfidflöden in mot kapselytan som behövs för att olika typer av korrosionsmekanismer ska uppträda. Lägre sulfidkoncentrationer i lösningen ger lägre sulfidflöden mot kapselytan, och högre koncentration ger högre flöden. Bentoniten runt kapseln i förvaret kommer att begränsa flödet av sulfidhaltigt grundvatten och därför hindra att korrosionsprocesser som kräver högt sulfidflöde kan uppträda. Nya modellberäkningar av den omättade buffertens kapacitet att transportera sulfid i gasform visar dessutom att denna är mycket mindre än vad som tidigare pessimistiskt antagits av SKB.⁵

Komplettering om kapselintegritet

För att gropkorrosion av den traditionella typen ska uppstå, krävs att en kompakt film av korrosionsprodukter bildas och som dessutom gör kopparytan passiv. Uppkomst av passivitet har aldrig observerats som en spontan korrosionsmekanism för koppar i sulfidlösning. Den kompakta film av korrosionsprodukter som dessutom skulle krävas, förutsätter ett sulfidflöde som är minst 100 gånger högre än vad som erhålls med en intakt bentonitbuffert i förvaret, oavsett om den är omättad eller fullständigt vattenmättad. Sulfidflödet är även för lågt för att mikrogalvanisk korrosion ska uppkomma om bufferten är intakt.

Vid laboratorieförsök har observerats att koppar i sulfidlösning reagerat på ett sätt som skulle kunna tolkas som mikrogalvanisk korrosion. Det har inte helt kunnat uteslutas att mikrogalvanisk korrosion kan uppkomma vid de allra högsta förekomsterna av sulfidflöden (kombinationerna av högsta sulfidkoncentration och högsta grundvattenflöde) som beräknats för förvaret. Detta gäller den lilla andel deponeringshål där bufferten kan tänkas gå förlorad till följd av erosion av buffertmaterialet (se avsnitt 2). Eftersom det under utredningsarbetet inte gått att helt utesluta att mikrogalvanisk korrosion kan uppkomma i förvaringsmiljön har konsekvenserna av att med pessimistiska antaganden inkludera detta i riskberäkningen utretts, se vidare avsnitt 9.

Vad gäller lokal korrosion på grund av en aktiv biofilm med sulfatreducerande bakterier på en kapselyta direkt exponerad för grundvattnet, bedöms detta inte kunna förekomma i slutförvaret. Varken en biofilm eller lokal korrosion i närvaro av dessa bakterier har observerats under förhållanden som motsvarar dem i förvaret.

Slutsatser

Från både tidigare och nya studier av korrosion på koppar i sulfidlösning utan närvaro av sulfatreducerande bakterier är det möjligt att ange vilka sulfidflöden som krävs för att olika korrosionsformer ska kunna uppträda. Genom att därefter jämföra dessa med de sulfidflöden som är möjliga i förvaret dras följande slutsatser angående gropkorrosion:

- Både tidigare och nyttillkomna studier visar att en passiverande sulfidfilm inte kan bildas under förvaringsförhållanden. Uppkomst av passiva filmer har bara observerats vid artificiella elektriska förhållanden i laboratoriet. Den gängse formen av gropkorrosion (engelska; pitting), bedöms därför inte kunna uppkomma under några förhållanden i slutförvaret.
- Om bentoniten är intakt, och oavsett om den är omättad (som den är initialt) eller vattenmättad, så är sulfidflödet så lågt att inte heller mikrogalvanisk korrosion, en mild form av lokal korrosion, kan uppkomma.
- För det fåtal deponeringshål där bufferten kan tänkas gå förlorad till följd av erosion av buffertmaterialet efter typiskt 100 000 år, har det inte gått att utesluta att mikrogalvanisk korrosion kan uppkomma för de allra högsta sulfidflödena. Denna process har därför inkluderats i riskberäkningen, se avsnitt 9.

En ny studie av mikrobiell sulfidbildning bekräftar att detta inte förekommer under omättade förhållanden. Under mättade förhållanden är både sulfatkoncentrationen och tillgången till näringsämnen för låga för att en biofilm, som skulle kunna ge upphov till lokal korrosion, ska kunna bildas på kopparytan.

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

Vad gäller frågan?

Spänningskorrosion är ett fenomen som inte bara kräver en korrosiv miljö utan också dragspänningar i materialet, det vill säga mekaniska krafter som vill dra isär materialet. För koppar kan denna korrosionsform inträffa under oxiderande förhållanden (med syre närvarande) i lösningar med till exempel ammoniak, vilket behandlades i underlaget till säkerhetsanalysen SR-Site. För koppar i sulfidlösning har ett par studier presenterats där observationerna tolkats som spänningskorrosion. Traditionellt undersöks spänningskorrosion med så kallad långsam dragprovning av någon typ av provstav i en bestämd kemisk miljö, för att se hur de mekaniska egenskaperna eventuellt påverkas. Ofta drar man då i provstaven ända tills den går av.

Koppars mikrostruktur har också betydelse för denna fråga. Kapselkopparn är uppbyggd av kristallkorn med en storlek av typiskt 100 mikrometer (μm), det vill säga 0,1 millimeter. Spänningskorrosion kan förekomma som både sprickor mellan korn eller tvärs genom korn. En annan form av korrosion är korngränskorrosion, vilket innebär att korrosion sker enbart utmed korngränserna och utan koppling till mekaniska spänningar.

MMD:s bedömning av frågan

Mark- och miljödomstolen bedömer att risken för spänningskorrosion är liten om tillförseln av sulfider är diffusionskontrollerad, dvs. långsam, vilket bedöms vara fallet i mättade deponeringshål. SSM har ändå bedömt att risken för spänningskorrosion i sulfidmiljö är den mest betydelsefulla osäkerheten. Domstolen instämmer i SSM:s bedömning att det finns risk för spänningskorrosion. Det gäller bl.a. Aaltonemekanismen och variabiliteten i de kemiska betingelserna. SKB har inte redovisat underlag och argument som utesluter risk för spänningskorrosion i sulfidmiljö. Det går inte att bortse från den tolkning Peter Szakálos m.fl. gör av MiniCan-försöken, dvs. att mikroskopbilder från försöken indikerar att spänningssprickor uppkommit. Det är osäkert om resultaten från MiniCan-försöken kan anses visa att spänningskorrosion är utesluten. Domstolen bedömer att det finns risk för spänningsskorrosion på grund av de kemiska förhållandena i slutförvarsmiljön som gör att passiverande skikt uppkommer. Spänningskorrosion är i likhet med gropkorrosion en process som, om den väl uppkommer, kan fortgå under lång tid. Den kan dessutom gå förhållandevis snabbt. Sammantaget finns det en betydande osäkerhet avseende spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid. Det kan inte uteslutas att ett betydande antal kapslar havererar inom 100 000 år. Ytterligare underlag behövs som verifierar SKB:s antagande att spänningskorrosion under reducerande betingelser inte hotar kapslarnas integritet.

I mark- och miljödomstolens yttrande framfördes också att saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion behöver utvärderas.

Tidigare och nya undersökningar

Inledningsvis konstateras följande:

- I avsnitt 3 bedöms saunaeffekten vara försumbar i ett KBS-3-förvar i Forsmark och saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion diskuteras därför inte vidare här.
- Enligt slutsatserna i avsnitt 5 visar både tidigare och nyttillkomna studier att en passiverande sulfidfilm inte kan bildas under förvarsförhållanden.

Komplettering om kapselintegritet

Under de senaste drygt 10 åren har fem olika forskargrupper genomfört laboratorieexperiment för att undersöka om spänningskorrosion kan uppträda i koppar som exponeras i sulfidlösning. Resultaten har dock inte varit samstämmiga. I en japansk studie från 2007–2008 noterades små ytliga sprickor, men flera andra iakttagelser pekar på att det kan ha varit angrepp i korngränserna och inte traditionell spänningskorrosion. SKB lät en grupp vid University of Toronto i Kanada försöka upprepa de japanska försöken under 2012–2013, men trots aggressiva betingelser och att många faktorer varierades hittades inga sprickor. Även en grupp vid forskningsinstitutet VTT i Finland försökte upprepa de japanska försöken under 2011–2014. Först publicerades resultat som visade på att sulfid snabbt skulle tränga in i materialet, men författarna kunde i en senare publikation konstatera att det berodde på en olämplig provberedningsmetod.

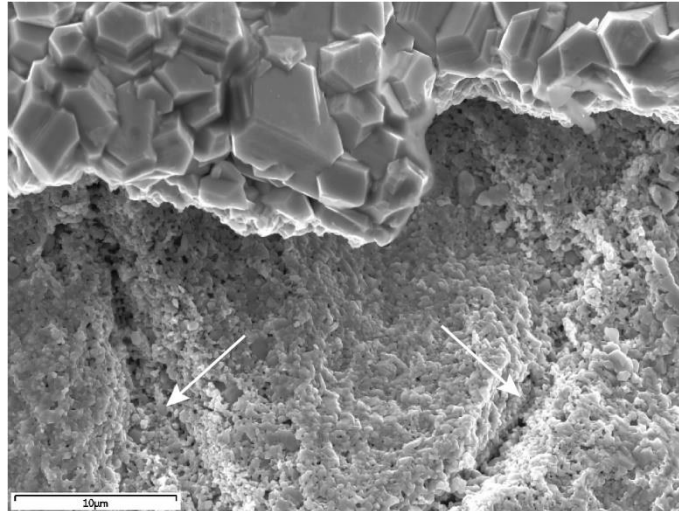
Vid Studsvik AB har SSM låtit genomföra ytterligare provning och material från de exponerade provstavarna har också undersökts vid Aalto University i Finland. Här användes en annan sorts provstav med konisk form och olika koncentrationer av sulfid. Till skillnad från de tidigare studierna användes också en fosfatbuffert för att hålla pH (surhetsgraden) stabilt i sulfidlösningen som omgav provstaven. Vid sulfidkoncentrationen 10^{-3} mol/L noterades några små sprickor, med ett största djup på 0,05 millimeter. (10^{-3} mol/L är tio gånger högre än de högsta koncentrationer som förväntas i förvaret i Forsmark.) Vid en 10 gånger lägre sulfidkoncentration (10^{-4} mol/L) noterades några mindre defekter i provstavens yta, men då sådana återfanns även längre in i materialet drog författarna slutsatsen att dessa hade någon annan orsak (t ex provstavstillverkningen). Resultaten tolkades vidare som att någon sorts tröskel för uppkomsten av de ytliga sprickorna fanns mellan dessa sulfidkoncentrationer. Vid Aalto University undersöktes vätehalten i olika prover och författarna menade sig se högre halter väte i kopparn efter exponering i sulfidlösning. Resultaten kan dock ifrågasättas eftersom även oexponerade delar av provstavarna hade lika hög vätehalt som exponerade delar, och väte kan inte röra sig så fort i materialet som skulle krävas för att väte som tagits upp i den exponerade delen av provstaven skulle kunna diffundera (vandra) till den oexponerade delen.

SKB har de senaste tre åren låtit Swerea KIMAB (numera RISE KIMAB) försöka upprepa både de japanska försöken och studien vid Studsvik.^{12,13} Undersökningarna gjordes med runda och platta provstavar, med olika bearbetning av kopparmetallen, vid olika temperaturer, med olika sulfidkoncentrationer och både med och utan fosfatbuffert för pH-reglering. Provstavarna undersöktes med ljusoptiskt mikroskop och med svepelektronmikroskop. När provstavarna drogs till brott var brotten sega (duktila) och inte spröda, vilket brukar vara fallet när de sprickor som uppkommer har en försvagande effekt på materialet. Det fanns tecken på angrepp i korngränserna, se Figur 6-1., vilket liknar det som andra grupper tolkat som spänningskorrosion. Vid studierna med fosfatbuffert kunde ytliga defekter konstateras vid hög sulfidhalt (10^{-3} mol/L eller högre), men inte vid låg sulfidhalt (2×10^{-5} mol/L), se Figur 6-2.

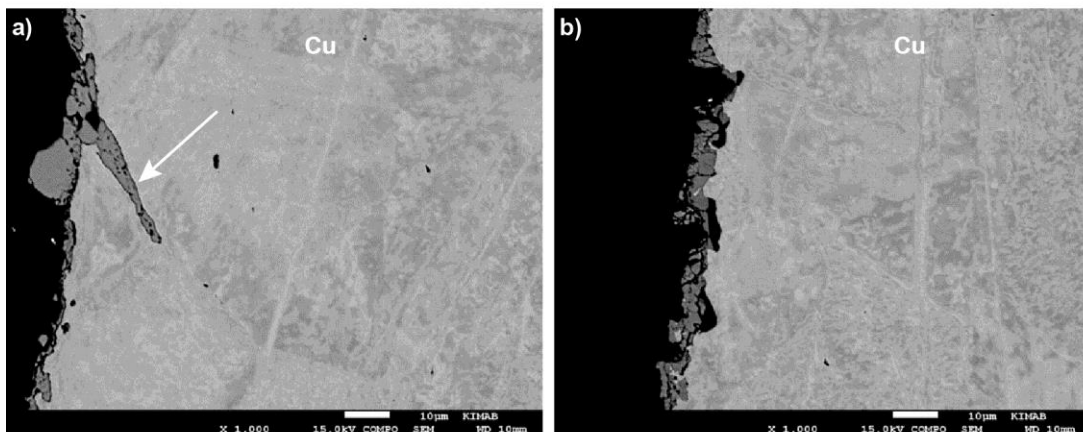
De till synes motsägelsefulla resultaten från de olika studierna kan i stor utsträckning förklaras med en mekanistisk beskrivning av korrosionen där transport av sulfid in i sprickan spelar en central roll. Om transporten är tillräckligt snabb, det vill säga om sulfidflödet in i sprickan är tillräckligt högt, kan initialt ett visst mått av korngränskorrosion uppträda. Sulfidflödet till botten av sprickan kommer sedan att dämpas, både av de bildade korrosionsprodukterna och av att sprickan blir djupare, vilket till slut gör att fenomenet avstannar.

¹² Taxén, C, Flyg J, Bergqvist H, 2018. Stress corrosion testing of copper in sulfide solutions. SKB TR-17-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

¹³ Taxén C, Flyg J, Bergqvist H, 2019. Stress corrosion testing of copper in near neutral sulfide solutions. SKB TR-19-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.



Figur 6-1. Ytliga spår på kopparprovstaven efter långsam dragprovning i en lösning med 10^{-5} mol/L sulfid vid 80 °C. Pilarna pekar på ytliga angrepp i korngränser.



Figur 6-2. Tvärsnitt längs med provstaven efter provning i a) lösning med 10^{-3} mol/L sulfid, b) 2×10^{-5} mol/L sulfid. Båda proven exponerades vid 90° C. Pilen i a) markerar en spricka.

Det går inte helt att utesluta att kapseln utsätts för dragspänningar som går igenom hela materialtjockleken i förvaret. Dock är det högsta sulfidflöde som kan uppstå, även i fallet med eroderad buffert (10^{-9} mol/(m² s)), åtminstone 1000 gånger lägre än de flöden som förekommit i de laboratorieexperiment där små sprickor har rapporterats.

Redan i underlaget till SKB:s ansökan 2011 diskuterades också om den så kallade Aaltonen-mekanismen skulle kunna vara en spänningskorrosionsmekanism. Mekanismen innebär att sprickor växer till följd av att ett överskott av vakanser, det vill säga atomära ”hål”, förflyttas till sprickan. SKB har låtit experter vid VTT återigen gå igenom¹⁴ de publicerade studierna. Då konstaterades att de laborieförsök där inverkan av vakanser studerats har utförts under förhållanden som aldrig kan uppstå i förvaret.

¹⁴ **Huotilainen C, Saario T, Toivonen A, 2018.** Review of the Aaltonen-mechanism. SKB R-18-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

Vad gäller de mindre sprickor som observerats i vissa prover i MiniCan-försöken vid Äspölaboratoriet, har SKB tidigare rapporterat att dessa inte bedöms vara orsakade av korrosion utan att de troligtvis har uppkommit under provtillverkningen.

Slutsatser

Trots att det finns några studier som rapporterar ytliga sprickor på koppar som exponerats för dragspänningar och hög sulfidkoncentration (och därmed högt sulfidflöde) finns inget experimentellt stöd för att spänningskorrosion uppträder på koppar i sulfidlösning. Framförallt är de mekaniska brott som uppkommer vid experiment inte spröda utan sega (duktila).

Det är betydligt mer rimligt och konsekvent att tolka de sprickbildningar som observerats experimentellt vid samtidig sulfidexponering och dragspänning som korngränskorrosion. Detta fenomen kräver ett visst sulfidflöde, och flödena i förvarsmiljön är mycket lägre än vad som krävs för att detta ska kunna uppstå. Även vid experiment där flödet är tillräckligt högt är fenomenet begränsat till ytliga sprickor eftersom bildade korrosionsprodukter därefter dämpar flödet i sprickorna.

Sammanfattningsvis blir slutsatserna således:

- De ytliga sprickor som observerats i vissa försök är inte spänningskorrosion, utan kan förklaras som en form av korngränskorrosion. De kräver sulfidflöden som är åtminstone 1000 gånger högre än de högsta som kan uppkomma i slutförvaret.
- Också vid så höga experimentella flöden avstannar fenomenet eftersom korrosionsprodukter hindrar fortsatt sulfidflöde i de relativt ytliga, mikroskopiska sprickor som uppkommit.
- Varken spänningskorrosion eller korngränskorrosion utgör något hot mot kapselns integritet i ett KBS-3-förvar i Forsmark.
- En ny expertbedömning visar att de studier som ligger till grund för den så kallade Aaltonenmekanismen gäller förhållanden som aldrig kan uppkomma i slutförvaret.

7 Väteförsprödning

Vad gäller frågan?

Väte kan existera som enskilda väteatomer, H, eller som vätemolekyler, H₂, i koppar. Väte kan, om det finns i tillräckliga koncentrationer, påverka metallens mekaniska egenskaper negativt. Detta är ett välkänt fenomen som gäller metaller i allmänhet. Atomärt väte kan bindas till olika typer av defekter och föroreningar i kopparn. Det kan också bilda molekyllärt, gasformigt väte i mikroskopiska porer i metallen. Detta kan ha en negativ effekt på koppars mekaniska egenskaper och brukar kallas väteförsprödning. Dock tillhör koppar en grupp metaller som är mycket obenägna att ta upp väte.

Väte som reagerar med syre i metallen kan bilda molekyllärt vatten (i form av vattenånga) i mikroporer, vilket också kan ha en negativ effekt på de mekaniska egenskaperna. Fenomenet kallas ibland vätesjuka.

Koppar och många andra typer av metaller och legeringar med liknande atomstruktur, som aluminiumlegeringar, vissa rostfria stål samt nickel, drabbas inte av väteförsprödning, och försprödning anses generellt inte vara ett problem för dessa typer av material i industriella tillämpningar. Det gäller också koppar med låga halter av syre, så kallad syrefri koppar.

Enligt kraven på den syrefria koppar som används för kapslarna får maximalt 0,6 miljondelar av vikten utgöras av väte. Motsvarande krav för syre är 5 miljondelar. Dessa krav tjänar till att förhindra väteförsprödning och vätesjuka. Liknande krav på syrehalten har använts i många år för koppar i olika tillämpningar. Detta har varit så framgångsrikt att väteförsprödning inte längre anses vara ett tekniskt problem i koppar, vilket illustreras av det faktum att väteförsprödning i koppar knappast har rönt något vetenskapligt intresse under de senaste 40 åren.

Utgångsmaterialet för kopparkapslarna är tillräckligt rent för att väteförsprödning inte ska utgöra något problem. Det behöver också säkerställas att materialet inte påverkas vid tillverkning av kapslarna eller i slutförvaret på ett sådant sätt att väteförsprödning skulle kunna uppstå och påverka kapselgenskaperna negativt.

MMD:s bedömning av frågan

Mark- och miljödomstolen anser i likhet med SSM att användning av koppar med låg syrehalt medför att risken är mycket liten för sammanhängande kopparoxider i kopparmaterialet som medför väteförsprödning. Av utredningen framgår dock att oxidslinor förekommit i svetsfogen efter FSW-svetsning, vilket skulle kunna leda till väteförsprödning. Det är således inte klarlagt att användning av Cu-OF helt eliminerar risken för väteförsprödning. SKB har inte redovisat i vilken utsträckning inträngning kan ske av sådant väte som kan bildas på kapselns yta på grund av korrosionsreaktion med sulfid i grundvatten. Även om denna effekt sannolikt har mindre betydelse för kapselns hållfasthet, är det en brist att SKB inte redovisat en beräkning av detta. SKB har inte heller, som SSM angett, redovisat hur mycket väte som behöver tränga in i kopparmaterialet för att i betydelsefull omfattning påverka dess egenskaper. Det är också viktigt att SKB, enligt vad SSM anfört, ger in ett bättre underlag för bedömning av risken för sprickpropagering i områden med höga kryptöjningar om hög väteladdning föreligger. SKB bedöms inte heller ha tillräckligt beaktat risken för att atomärt väte tränger in och påverkar kopparhöljets egenskaper på ett större djup än 50 µm. Mark- och miljödomstolen uppfattar att det råder enighet om att det väte som bildas om koppar korroderar i syrgasfritt vatten skulle kunna tränga in i kopparn. Det råder dock delade meningar om omfattningen och betydelsen av denna vätebildning och risken för inträngning. Det finns ingen anledning att ifrågasätta de simuleringar som Peter Szakálos m.fl. har genomfört och de mekanismer som de föreslagit utifrån dessa simuleringar bedöms trovärdiga. Men domstolen anser inte att de kan ge något klart svar på omfattningen av inträngningen av detta väte. Sammantaget är risken för väteinträngning och effekten av den inte tillräckligt utredd. Det är därför inte möjligt att dra slutsatsen att väteförsprödning inte kan medverka till kapselbrott. Osäkerheten hänger till viss del samman med den osäkerhet som finns när det gäller de processer som kan ge upphov till vätebildning vid ytan. Det har bedömts råda störst osäkerhet när det gäller koppars reaktion med syrgasfritt vatten. SKB behöver ge in ytterligare underlag i denna del. Den osäkerhet som kvarstår bedöms vara betydande.

Låg syrehalt i kopparn

SKB har under lång tid arbetat med kravet att hålla syrehalten i kapselkopparn på en låg nivå. Detta görs dels genom att helt enkelt bara använda koppar med ett lågt innehåll av syre (max 5 miljondelar av materialets vikt), dels genom att utveckla svetsmetoden för förslutning av kopparkapseln så att fastsvetsningen av kapselns lock och botten inte leder till att syre förs in i svetsfogarna.

Kravet på kopparmaterialet är väl etablerat och det finns leverantörer som tillhandahåller material enligt SKB:s krav. Under senare år har SKB bedrivit ett omfattande arbete med att utveckla svetsmetoden så att svetsning kan göras utan att syre förs in i fogen. Det är fullt möjligt att åstadkomma låga syrehalter i kopparkapslarnas svetsfogar genom att svetsa under så kallat gasskydd, det vill säga i en atmosfär där man kontrollerar gassammansättningen och håller

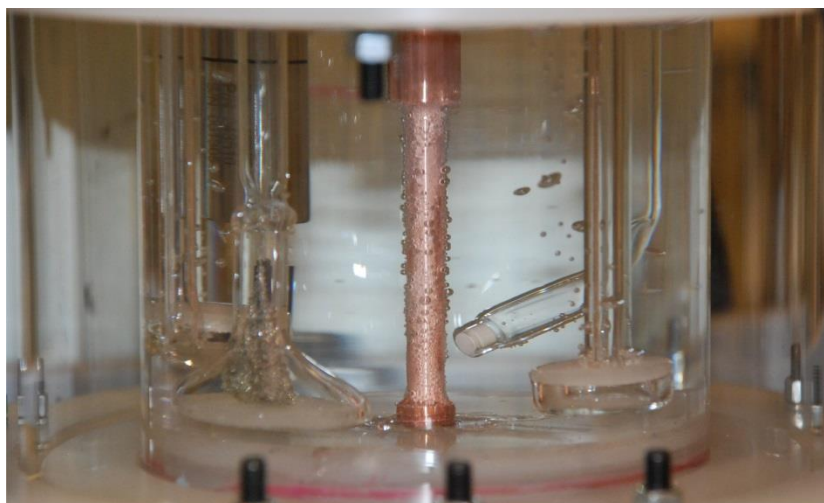
Komplettering om kapselintegritet

syrgashalten mycket låg. Detta är en metod som används industriellt i många andra sammanhang och som alltså visats vara tillämpbar också vid svetsningen av kopparkapslarna.

I en ny rapport¹⁵ visas att den kopparoxidhalt som kan åstadkommas är tillräckligt låg för att undvika oxidstråk och därmed risk för väteförspredning. I samma rapport visas även att om oxidhalten i svetsfogen är tillräckligt låg påverkas inte materialets mekaniska egenskaper eller korrosionsegenskaper.

Tillförsel av väte i laboratorieförsök

Det är väl känt att väte kan fås att tränga in i koppar i laboratorieförsök och att detta kan ge en påverkan på materialet. Detta kräver dock extrema förhållanden, det vill säga helt andra förhållanden än de som kommer att gälla i förvaringsmiljön i Forsmark. En metod är att värma tunna kopparbitar till minst 600 °C och samtidigt exponera dem för tiotals atmosfärers vätgasttryck. En annan och mer vanlig metod är att ladda koppar med väte på elektrokemisk väg. Här ligger kopparn i en vattenlösning med speciell sammansättning och man leder ström genom kopparn och lösningen. Lösningen är sammansatt så att väteatomer då frigörs vid kopparytan och kan gå in i metallen. Väteatomerna vid kopparytan kan också slås samman till gasformiga vätemolekyler som då bubblar upp från vätskan istället för att gå in i kopparn, se Figur 7-1. För att dämpa denna andel tillsätter man också speciella så kallade rekombinationshämmare till lösningen. Trots detta har det konstaterats att bara ungefär en tiondels promille av vätet går in i kopparn vid dessa forcerade försök.



Figur 7-1. Försöksupställning där man bland annat laddar koppar med väte på elektrokemisk väg. Bubblorna på kopparstaven i mitten är väte som bildat vätgas i stället för att gå in i kopparn. Uppskattningsvis en tiondels promille av det väte som bildas vid kopparytan går in i metallen.

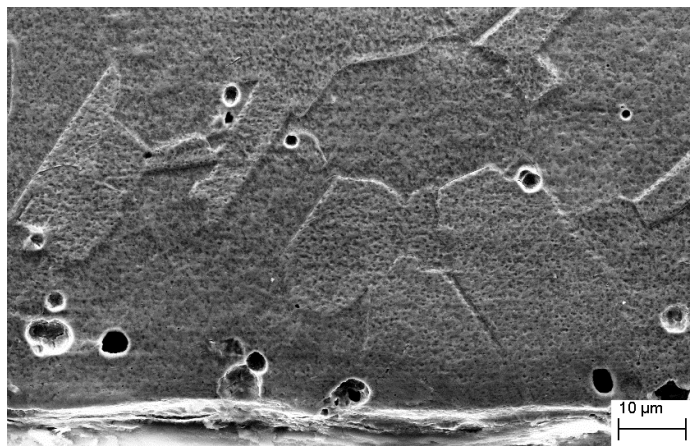
Oavsett om man laddar koppar med väte vid höga vätgasttryck och temperaturer eller elektrokemiskt, kan man endast åstadkomma vätehalter i kopparn på som mest några miljondelar av den totala vikten hos provet, vilket ändå är betydligt mer än vad som ursprungligen finns i materialet. Vid dessa halter tenderar väteatomer att leta sig fram till mikroskopiska porer i kopparmetallen och där slå sig ihop till vätemolekyler så att man får vätgasfyllda porer. Vätgasttrycket i dessa kan bli så högt att porerna utvidgas genom att tränga undan kopparn och man kan till slut få mikrometerstora porer fyllda med vätgas i materialet, se Figur 7-2. Om man laddar kopparn elektrokemiskt vid metallens yta, blir inträngningen av väte begränsad till någon tiondels

¹⁵ Björck M, Taxén C, Vuoristo T, Elger R, Zavalis T, Wikström L, Sparr M, 2019. Embedded oxide particles in FSW. Posiva SKB Report 10, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

millimeter, även om laddningen pågår under mycket lång tid och under aggressiva elektrokemiska förhållanden. Eftersom vätet rör sig i alla riktningar inuti materialet nås efter en tid en balans mellan väte som laddas in och sådant som återgår till omgivningen.

I några försök har man också observerat måttliga öknings av vätehalten vid samtidig sulfidkorrosion och mekanisk belastning, samt då koppar utsätts för hela den stråldos (se avsnitt 8) som materialet utsätts för i slutförvaret. I dessa försök observerades ytliga korrosionseffekter, men inga porbildningar. Det upptag av väte som uppmätts efter att koppar exponerats för hela förvarsdosen gammastrålning är mindre än vätehalten i SKB:s kapselkoppar. Den har dessutom uppmätts i mycket tunna prover, vilket innebär att effekten på kopparkapseln är än mindre signifikant.



Figur 7-2. Vätgasfyllda porer i närheten av ytan där vätet trängt in vid elektrokemisk laddning i laboratorieförsök. Ytan finns i figurens nederkant.

I en del försök har man också mätt de mekaniska egenskaperna efter väteladdningen och då sett en påverkan som ungefär svarar mot det man kan förvänta sig utifrån att materialet faktiskt förändrats nära ytan. Vid en ny genomgång¹⁶ av tidigare publicerad provning av koppar har inte någon mekanism identifierats som kan ge sprickpropagering i koppar under de tidsrymder som är aktuella i förvaret.

Kvantkemiska beräkningar

Nya omfattande kvantkemiska beräkningar har genomförts¹⁷ av hur väte interagerar med kopparmetallens ytor, med dess inre kristallstruktur och med gränsområdena mellan kristallkornen i koppar. Beräkningarna visar bland annat att även om kopparytan vore helt belagd med väte, oavsett ursprung, blir koncentrationen inne i metallen mycket låg. Resultatet bekräftar en viktig orsak till att väteförspredning inte är ett problem för koppar: Väte är mycket svårlösligt i koppar.

Tillförsel av väte i slutförvaret

Som framgår av avsnitt 4 är det SKB:s tydliga slutsats att omfattningen av korrosion i rent, syrgasfritt vatten är omätbart liten. Därmed bortfaller alltså den källa till vätetillförsel som domstolen bedömt som mest osäker.

¹⁶ Björkblad A, Faleskog J, 2019. Evaluation of Cu-OFP Creep Crack Growth and Theoretical Fracture Models for Cu-OFP, Posiva SKB Report 03, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB

¹⁷ Lousada C M, Korzhavii P A, 2019. Hydrogen sorption capacity of crystal lattice defects and low Miller index surfaces of copper. SKBdoc 1708457 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

I slutförvaret är maximala vätgastryck och temperaturer alldeles för låga för att ge någon inladdning av väte i kopparkapslarna. Den enda kända och rimliga källan till väteinladdning är korrosion, och då i första hand korrosion orsakad av sulfid (väte frigörs vid koppars reaktion med sulfid). Dock ger sulfidkorrosionen upphov till mycket långsammare tillförsel av väte än vad som förekommer vid försöken ovan. Dels begränsas tillförseln av väte av det låga tillflödet av sulfid, dels är det bara en liten andel av vätet från sulfiden som kan förväntas gå in i metallen.

I slutförvaret finns inte heller de speciella så kallade rekombinationshämmare som förhindrar att det bildade vätet avgår som vätgas i stället för att gå in i metallen.

Om man ändå antar att väte förs in i en sådan omfattning att vätgasfyllda porer av det slag man ser i forcerade experiment skulle bildas förväntas en sådan påverkan bara bli ytlig eftersom man skulle nå en balans mellan in- och utflöde av väte som nämnts ovan. Antas det i stället att dessa porer inte bildas, så förväntas vätet spridas inne i kopparn. Om man då pessimistisk antar att inget väte kan gå ut genom kapselns ytteryta där korrosionen sker skulle man till slut få ett utflöde på kopparkapselns insida, till kapselns inre. Också detta skulle ske mycket långsamt och begränsas på ett sådant sätt att skadliga effekter på till exempel kapselns insats skulle undvikas med stor marginal. Vätehalterna i kopparn skulle också hållas på en låg nivå.

Slutsatser

Väteförspredning bedöms inte utgöra något hot mot kopparkapslarnas inneslutande förmåga i KBS-3-förvaret i Forsmark. Detta är i överensstämmelse med SKB:s tidigare slutsats och den stöds nu också av följande nya material:

- Det är nu visat att den reduktion av oxidhalt som kan åstadkommas genom svetsning av kopparkapseln i gasskydd är tillräcklig för att undvika oxidstråk och därmed risk för väteförspredning.
- Risken att väte tränger in och påverkar kopparmaterialets egenskaper på djupet är nu bedömda, både för ett fall att väteporer bildas i metallen och för ett fall där detta inte antas ske. Resultaten visar att omfattningen av den korrosion som kan förekomma i slutförvaret är för liten för att det väte som frigörs ska ge någon signifikant påverkan på kapslarna.
- Nya omfattande kvantkemiska beräkningar visar också att även om kopparytan vore helt belagd med väte, oavsett ursprung, blir koncentrationen av väte inne i metallen mycket låg. Detta bekräftar en viktig orsak till att väteförspredning inte är ett problem för koppar: Väte är mycket svårslösligt i koppar.

Det är också SKB:s tydliga slutsats enligt avsnitt 4 att den källa till vätetillförsel som domstolen bedömt som mest osäker, kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten, är omätbart liten.

8 Radioaktiv strålnings inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförspredning

Vad gäller frågan?

Kopparkapseln kommer att utsättas för såväl gamma- som neutronstrålning från det inkapslade använda kärnbränslet. En del av strålningen kommer att absorberas i kopparmaterialet och en del kommer att tränga igenom kapseln och påverka korrosionsprocesser på kapselns utsida. När strålning absorberas, uppstår defekter inne i kopparmaterialet genom att atomer på olika sätt ändrar position. Detta kan i princip, beroende på i vilken omfattning det sker, leda till försämrade materialegenskaper, till exempel minska den mekaniska hållfastheten hos kopparhöljet. Den strålning som tränger igenom kapseln sönderdelar i viss utsträckning vattenmolekyler på kapselns

Komplettering om kapselintegritet

utsida. En del av de molekylfragment som då bildas är kemiskt aggressiva och orsakar en viss korrosion. Hur stora dessa effekter blir beror på flera faktorer av vilka de viktigaste är strålningens intensitet (doshastighet), den totala stråldosen samt kopparhöljets tjocklek och temperatur.

I underlaget till säkerhetsanalysen SR-Site som låg till grund för SKB:s ansökan drogs två huvudsakliga slutsatser angående strålningens effekter:

1. Strålningen från det inkapslade kärnbränslet kommer visserligen att bidra till en viss korrosion av kopparkapseln, men denna effekt är liten jämfört med andra bidrag till korrosion och påverkar inte kapselns inneslutande funktion under den tidsperiod på en miljon år för vilken långsiktig strålsäkerhet analyseras.
2. De stråldoser som kapselmaterialet (järn och koppar) kommer att utsättas för är minst en faktor tio för låga för att ge mätbara effekter på kapselns mekaniska egenskaper.

MMD:s bedömning av frågan

SKB:s underlag för beräkning av strålningsinducerad bildning av salpetersyra på utsidan av kapseln är tillförlitligt. Denna effekt av gammastrålningen har ingen beaktansvärd betydelse för kapselns integritet. Redovisade försök har visat att strålningen kan medverka till gropkorrosion på koppar i syrefri miljö. Mark- och miljödomstolen anser likom SSM att SKB inte har lagt fram underlag som gör att risken för gropkorrosion i slutförvarsmiljön kan uteslutas. Som Peter Szakálos m.fl. anfört framgår det inte heller att SKB undersökt risken för strålningens inverkan på spänningsskorrosion. Domstolen uppfattar att SKB:s redovisning endast har bäring i fråga om strålningens inverkan på lokal korrosion på det sättet att SKB har tolkat vissa försök så att strålfält kan ge en mer passiverande ytfilm. Enligt domstolens bedömning talar detta snarare för att risken för att strålningen inverkar på spänningsskorrosion är större än vad SKB antagit. Domstolen kan vidare inte se att SKB på ett tillfredsställande sätt kunnat förklara orsaken till den korrosionsökning som noterats i försök av Åsa Björkbacka. SKB har inte lagt fram någon konkret utredning som motsäger vad Peter Szakálos m.fl. anfört om att dessa försök pekar på att det finns en okänd samverkans effekt mellan strålning av koppar i rent syrgasfritt vatten och ökad korrosion. Det som talar för att en eventuell strålningsinducerad lokal korrosion inte ger något bidrag av betydelse för kapselns långsiktiga skyddsförmåga är att gammastrålningen minskar under de 300 första åren, dvs. strålningen förekommer under en relativt begränsad tid. Det kan dock inte uteslutas att strålningsinducerad lokal korrosion av betydelse kan ske under den tiden eller att korrosionen kan fortsätta även efter det att strålningen har minskat. Peter Szakálos m.fl. har även lyft fram radioaktiv strålningens inverkan på väteförsprödning. Mark- och miljödomstolen kan inte se att SKB på ett tillfredsställande sätt redovisat underlag och argument som stöder bedömningen att denna effekt inte kan påverka kapselns långsiktiga integritet. Andra effekter av radioaktiv strålning som SKB enligt Peter Szakálos m.fl. inte har utrett är påverkan på atmosfärisk korrosion, korrosion på grund av initialt inneslutet syre samt korrosion på grund av mikrober, sulfat och saltdeponering. Mark- och miljödomstolen bedömer dock att risken för att dessa effekter inverkar på kapselns långsiktiga integritet är liten. Sammantaget finns det en betydande osäkerhet avseende radioaktiv strålningens inverkan på spänningsskorrosion och väteförsprödning.

Strålningsinducerad korrosion

Slutsatsen 1) ovan om strålningens effekter på korrosionsprocessen bygger dels på tidigare experimentella studier av koppars elektrokemiska korrosionsegenskaper (den så kallade korrosionspotentialen) under gammabestrålning, dels på en teoretisk analys av joniserande strålningens inverkan på vattenlösningen (radiolys) invid kapselytan genomförd av Studsvik AB. De experimentella studierna visar att koppars korrosionsegenskaper inte påverkas nämnvärt av den mycket låga strålningsintensitet som råder vid kapselytan i förvaret. Den teoretiska analysen visar att maximalt 14 mikrometer korrosion kan komma att ske till följd av bestrålning, vilket kan jämföras dels med den godstjocklek på 5 centimeter som kopparhöljet har initialt, dels med den

Komplettering om kapselintegritet

millimeterdjupa korrosion som kommer att ske med de allra flesta kapslarna till följd av andra korrosionsprocesser i förvarsmiljön, till exempel sulfidkorrosion.

Inom ett forskningsprojekt som pågått vid KTH sedan 2010 med syfte att fördjupa kunskapen om strålningens effekter på korrosion, har upprepade försök gjorts där koppar i vattenlösning utsatts för gammastrålning motsvarande den dos som kopparkapseln i förvaret kommer att erhålla från det inkapslade kärnbränslet. Experimenten vid KTH har visat att de korrosionsprodukter som bildas under bestrålning är de förväntade kopparoxiderna. Mätningar av korrosionsprodukter på kopparytan och i vattenlösningen har visat på korrosion motsvarande några tiondels mikrometer, det vill säga en mycket liten effekt i sammanhanget och betydligt lägre än det tidigare teoretiskt beräknade 14 mikrometer. Korrosionsgropar med djup på upp till en mikrometer påträffades också och även detta är ett försumbart djup för de 5 centimeter tjocka kapslarna. Dessa försök har därmed bekräftat pessimismen i den teoretiska analysen i SR-Site som förutsagt maximalt 14 mikrometer (0,014 millimeter) korrosion orsakad av bestrålning. Slutsatsen 1) från SR-Site kvarstår således.

Kombinationseffekter

De lokala korrosionsangrepp som observerats i försöken ovan tyder på att kopparytan kan ha blivit passiv under bestrålningen. Dock är den strålningsintensitet som använts i experimenten hundratals till tusen gånger högre än den som kommer att råda vid kopparkapselns yta i förvaret, detta för att kunna erhålla hela förvarsdosen av strålning under en för experimentet rimlig tid. Den låga strålningsintensitet som kommer att råda i förvaret har visats ge försumbara effekter på såväl kopparmaterialets mikrostruktur som på dess korrosionspotential, vilket sammantaget gör att förutsättningar för spänningskorrosion inte föreligger. Äldre experimentella studier av koppar under bestrålning och samtidig dragspänning styrker detta. Vidare består den korrosionsfilm som bildas under bestrålningen av kopparoxider, som inte är långsiktigt stabila i den sulfidhaltiga grundvattenmiljön utan omvandlas till kopparsulfider. Därmed är frågorna om strålningens effekter på gropkorrosion och spänningskorrosion återförda till processerna ”gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid” och ”spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid”, vilka behandlades i avsnitten 5 och 6. Det lågintensiva strålfältet på kopparkapselns yta bidrar inte till någon ökad risk för gropkorrosion eller spänningskorrosion.

Risken för väteförspredning, det vill säga att kopparmaterialet förspredas till följd av väteupptag, kan analyseras på samma sätt som för väteupptag vid sulfidkorrosion i avsnitt 7. Där drogs slutsatsen att upptaget av väte, vid de flöden av väte från sulfid som kan uppkomma vid kapselytan i förvaret, blir för lågt för att kunna ha någon effekt på materialets egenskaper. På liknande sätt kan man räkna ut att inflödet av väte från bestrålning och sönderdelning av vatten (radiolys) blir ännu lägre och kommer därför inte heller kunna leda till något signifikant upptag av väte inuti kopparhöljet. Ytligt upptag av mindre mängder väte har observerats experimentellt i koppar efter bestrålning, men de halter av väte som absorberats är för små för att påverka kopparkapselns inneslutande funktion.

Teoretisk förståelse

En fråga som varit obesvarad fram till nyligen är varför en teoretisk modell, som använts framgångsrikt för att beskriva korrosion av till exempel uran under bestrålning, förutsåg betydligt mindre korrosion av koppar än den som observerats experimentellt vid KTH. Denna fråga tycks nu ha fått ett svar då nya experiment och analyser¹⁸ som SKB låtit genomföra vid KTH visat att vissa ytkemiska reaktioner i modellen behöver beskrivas olika för koppar jämfört med till exempel uran. Den reviderade modellen är fortfarande under utveckling, men förutsäger nu den experimentella

¹⁸ Soroka I, Jonsson M, 2019. Radiation induced corrosion of copper – an update on the mechanism. SKBdoc 1706535 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

observerade korrosionen av koppar under gammabestrålning med relativt god precision. Därmed finns det inte heller något behov av att utreda någon okänd samverkans effekt mellan strålning av koppar i rent syrgasfritt vatten och ökad korrosion.

Strålskador i koppar och järn

Slutsatsen 2) ovan om strålningseffekter inuti kopparmaterialet bygger i huvudsak på tidigare datorberäkningar av strålskador till följd av gamma- och neutronstrålning. Eftersom slutsatsen ifrågasatts, har SKB funnit det lämpligt att förnya beräkningarna av strålskador genom att låta en forskargrupp vid KTH undersöka frågan. De nya beräkningarna av strålskador har utförts för både gamma- och neutronstrålning samt för båda kapselmaterialet koppar och järn. Nästan tjugo år har gått sedan de tidigare beräkningarna gjordes och såväl programvara som dataunderlaget har utvecklats sedan dess och nu använts i nya beräkningar. De nya beräkningarna¹⁹ förutsäger att strålskadorna i materialet blir något lägre än vad de tidigare beräkningarna förutsagt.

I såväl tidigare som nya beräkningar av strålskador har man försummat effekten av att det bestrålade materialet "självläker" samtidigt som strålskador skapas. Mekanismen bakom detta kan förenklat beskrivas som att atomerna i ett material har en viss rörlighet vid de temperaturer som råder i kapselmaterialet och att atomer som "hamnat fel" till följd av bestrålning därmed får en viss sannolikhet att "hoppa tillbaka" till sin ursprungsplats. Försummelsen av denna mekanism har varit medveten vid beräkningarna och medför alltså att resultaten blir pessimistiska vad gäller omfattningen av strålskadorna. Uppskattningar av självläkningens effektivitet²⁰ tyder på att den verkliga omfattningen av strålskadorna är åtminstone en faktor 100 lägre än den redan låga omfattning som förutsagts av datorberäkningar.

Parallellt med de nya strålskadeberäkningarna har SKB även låtit en forskargrupp i Storbritannien göra ett försök att experimentellt verifiera små strålskador i koppar efter gammabestrålning med en dos representativ för förhållandena i slutförvaret.²⁰ Redan på förhand stod det klart att den ringa omfattning av strålskador som förutsagts av beräkningar är för låg för att detekteras, ambitionen med försöket blev istället att använda de experimentella metodernas känslighet för att verifiera att skadornas omfattning inte översteg den som kunde detekteras i experimentet, vilket också visades.

Slutsatser

SKB drar även fortsatt slutsatsen att omfattningen av den korrosion av koppar som sker till följd av strålning saknar betydelse för kapselns inneslutande förmåga, samt att den ringa grad av lokal korrosion som eventuellt sker till följd av bestrålningen inte har någon betydelse för korrosionsförloppet på lång sikt. Detta eftersom den oxidfilm som bildas under bestrålning inte är stabil i det sulfidhaltiga grundvattnet. Ett visst mått av strålningsinducerad lokal korrosion kan inte uteslutas under bestrålningen, då detta observerats i experiment. Omfattningen av denna lokala korrosion är dock mycket liten och har inkluderats i SKB:s bedömningar.

Spänningskorrosion i koppar under bestrålning bedöms fortsatt inte kunna uppkomma då de bestrålningsförhållanden som råder vid kapselytan i förvaret inte ger tillräckligt oxiderande förhållanden (eller tillräckligt stor effekt på koppars korrosionspotential) och då de joner som är nödvändiga för processen saknas i grundvattnet.

¹⁹ **Yang Q, Toijer E, Olsson P, 2019.** Analysis of radiation damage in the KBS-3 canister materials. SKB TR-19-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

²⁰ **Padovani C, Pletser D, Jurkschat K, Armstrong D, Dugdale S, Brunt D, Faulkner R, Was G, Johansson A J, 2019.** Assessment of microstructural changes in copper due to gamma radiation damage. SKB TR-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komplettering om kapselintegritet

SKB drar fortsatt slutsatsen att upptag av väte till följd av strålningsinducerad korrosion, inte kan ske i en omfattning som påverkar kapselns mekaniska egenskaper eller inneslutande förmåga.

Idag finns en betydligt bättre mekanistisk och kvantitativ förståelse för den ringa korrosion som observerats i de strålningsförsök av Björkbacka som domstolen refererar till. Den tidigare påtalade avvikelserna mellan den teoretiskt beräknade omfattningen av korrosion och den faktiskt uppmätta korrosionen berodde ytterst på en ofullständig förståelse för mekanismen och därmed felaktiga antaganden i den tidigare beräkningsmodellen.

Resultaten från nya beräkningar och experimentella försök bekräftar den tidigare slutsatsen från säkerhetsanalysen SR-Site, att strålskadorna inuti materialen är för små för att ge mätbara effekter på materialets mekaniska egenskaper, elektriska ledningsförmåga och kemiska sammansättning, och detta med större marginal än man tidigare kunnat visa.

9 Konsekvenser för säkerhet efter förslutning

Från analyserna i föregående avsnitt av de fem frågor om kapselns inneslutande förmåga som mark- och miljödomstolen ansett behöver belysas ytterligare, framgår att fyra av de fem frågorna inte bedöms ha inverkan på kapslarnas långsiktiga integritet. Detta gäller för kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten, för spänningskorrosion i sulfidmiljö, för väteförsprödning och för strålnings effekter på korrosionsfenomen. För vissa av dessa fenomen kan potentiellt skadliga effekter ha observerats i relativt aggressiva laboratorietester, medan slutförvaret ger en miljö där effekten inte skulle uppstå eller vara betydligt mildare och inte kunna leda till kapselbrott. Slutsatserna av analyserna sammanfattas mer utförligt i avsnitt 10.

En av frågorna, lokal korrosion i form av mikrogalvanisk sulfidkorrosion, kan inte kategoriskt uteslutas för de högsta sulfidflödena som kan förväntas i förvarsmiljön. Därför har en uppdaterad doskonsekvensberäkning baserad på en pessimistisk tolkning av tillgänglig data om mikrogalvanisk gropbildning genomförts.

Även om endast en av de studerade processerna skulle kunna påverka riskkurvorna, kan det vara av intresse att illustrera i vilken mån KBS-3-förvaret är tåligt mot kapselskador i allmänhet. Därför har även gränssättande fall där alla kapslar har små, genomgående skador på kopparhöljet redan vid deponering analyserats.

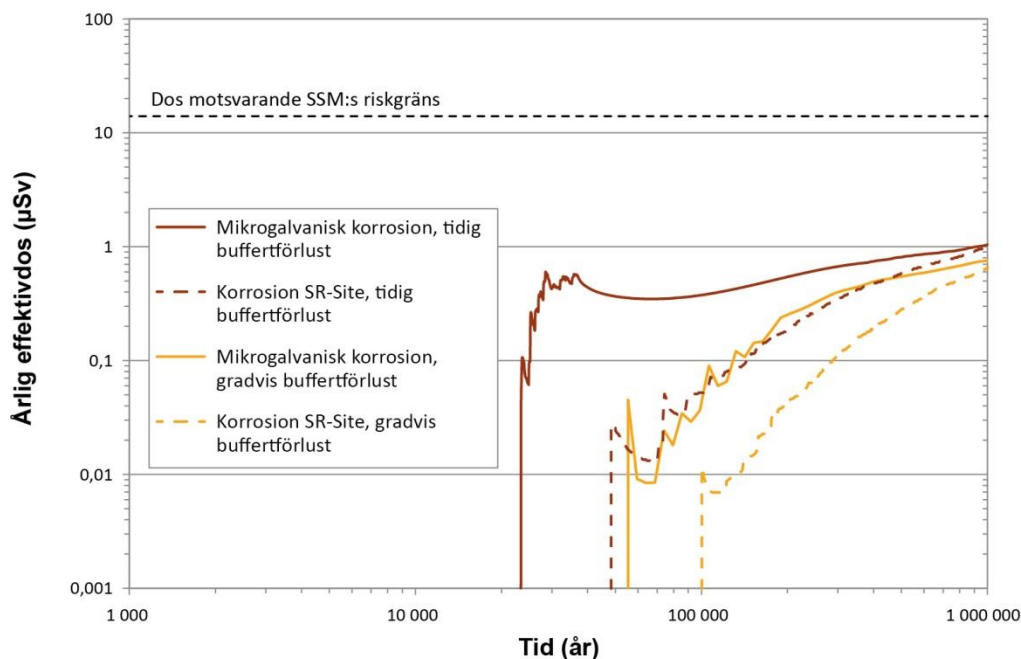
Konsekvensberäkningar för lokal korrosion

Som framgår av tidigare avsnitt har lokal korrosion till följd av mikrogalvaniska effekter som kan uppkomma vid höga sulfidflöden inte helt kunnat uteslutas. Fenomenet skulle kunna förekomma vid de högsta sulfidflödena som kan tänkas uppkomma långt in i framtiden då ett fåtal deponeringshål kan ha tappat en avsevärd del av sin buffert till följd av erosion. SKB har därför gjort beräkningar av vad konsekvensen skulle bli om man antar att mikrogalvanisk korrosion förekommer då sulfidflödena överstiger de gränsvärden för vilka man inte kunnat utesluta effekten i laboratorieförsök.

För de deponeringshål där sulfidflödena beräknas bli tillräckligt höga antas att lokal korrosion förekommer. Pessimistiskt antas att det lokala korrosionsdjupet är 20 gånger större än det allmänna korrosionsdjupet, det vill säga det som uppstår vid jämn korrosion. Faktorn 20 är pessimistiskt vald baserat på de djupaste korrosionsgropar som observerats i experimenten. Det är dessutom pessimistiskt att anta att detta förhållande, att gropdjupet är 20 gånger större än medeldjupet, kvarstår ända till kapseln är genomkorroderad. Det vore rimligare att anta att gropar även växer i sidled, växer ihop med andra gropar och jämnas ut med tiden.

Komplettering om kapselintegritet

I riskberäkningen för säkerhetsanalysen SR-Site, avsnitt 13.9, ingick sex fall med kapselskador till följd av korrosion, tre för en situation där bufferten gradvis förloras i ett fåtal deponeringshål under lång tid och tre där bufferten pessimistiskt antas förlorad i ett tidigt skede för samtliga deponeringshål. Doskonsekvenser beräknades och jämfördes med den dos som svarar mot SSM:s riskgräns. De två fall som gav de högsta konsekvenserna i SR-Site för gradvis förlorad respektive tidigt förlorad buffert har nu räknats om på så sätt att också lokal korrosion enligt ovan tagits med. Figur 9-1 visar de två fallen från SR-Site (streckade kurvor) och de två nya beräkningarna (heldragna kurvor). Som framgår av figuren ligger samtliga kurvor med marginal under den dos som svarar mot SSM:s riskgräns. De nya fallen ger konsekvenser tidigare än de gamla och detta är att förvänta eftersom korrosionen ju går fortare så att genomgående kapselskador uppkommer tidigare då lokal korrosion inkluderas. Bara de kapslar som utsätts för de allra högsta sulfidflöden drabbas av lokal korrosion i beräkningen. Dessa fick genomgående skador också då lokal korrosion inte inkluderades, fast då inte lika tidigt. Det totala antalet skadade kapslar är alltså snarlikt i de båda beräkningarna, vilket bidrar till att också de maximala doserna är snarlika då de gamla och de nya kurvorna jämförs.



Figur 9-1. Jämförelse av doskonsekvenser med och utan mikrogalvanisk korrosion inkluderad. De streckade kurvorna som inte inkluderar mikrogalvanisk korrosion är tagna ur säkerhetsanalysen SR-Site. De heldragna kurvorna är nya beräkningsresultat som visar effekten av att inkludera mikrogalvanisk korrosion.

Illustrerande beräkning av initiala skador hos samtliga kapslar

Även om endast en av de studerade processerna skulle kunna påverka riskkurvorna, och då i begränsad utsträckning, det vill säga endast kapslar i deponeringshål med de högsta sulfidflödena och efter bufferterosion, kan det vara av intresse att illustrera i vilken mån KBS-3-förvaret är tåligt mot kapselskador i allmänhet. I detta avsnitt analyseras därför ett gränssättande fall där alla kapslar har små, genomgående skador på kopparhöljet redan vid deponering. I en variant antas även att bufferten gradvis förloras till följd av erosion. Ingen av varianterna är på något sätt förenlig med resultaten i de föregående avsnitten, utan är avsedda att sätta frågorna kring kapselns integritet i ett övergripande säkerhetsperspektiv, där kapseln endast är en av flera barriärer. En rad andra fall med liknande syfte analyserades i avsnitt 13.7.3 i säkerhetsanalysen SR-Site.

Det är svårt att tänka sig en naturligt förekommande skademekanism som omedelbart skulle leda till en stor skada. Även till exempel de skador på grund av kraftig mekanisk påverkan på kapseln

Komplettering om kapselintegritet

vid jordbävningar som analyserades i SR-Site skulle börja som en spricka i kopparhöljet och gradvis utvecklas till en större skada. Därför antas att de initiala penetrerande skadorna är små. Fallets uppbyggnad, både vad gäller de initiala kapselskadornas natur, skadornas utveckling och funktionen hos förvarssystemet i övrigt, bygger på liknande fall som analyserades i SR-Site.

Två fall har beräknats:

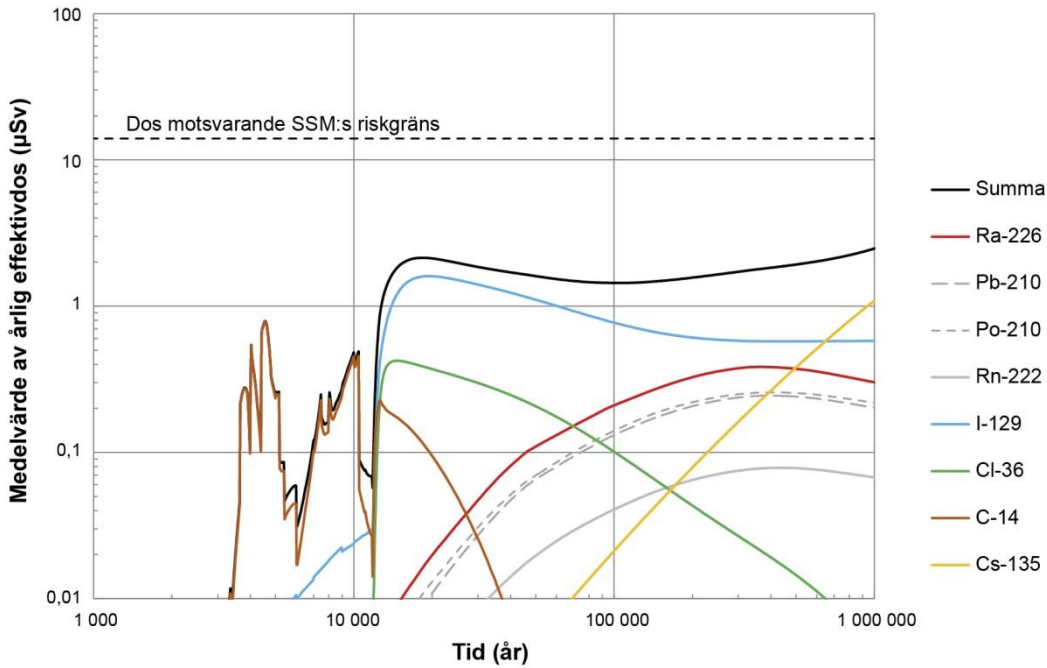
- A. Alla 6000 kapslar antas ha en liten genomgående skada i form av ett hål med diametern 4 millimeter redan vid deponeringen. Övriga delar av förvarssystemet antas vara intakt.
- B. Alla 6000 kapslar antas ha en liten genomgående skada i form av ett hål med diametern 4 millimeter redan vid deponeringen. Bufferten som omger kapslarna antas eroderas enligt den modell för buffererosion som används i säkerhetsanalysen SR-Site. Detta leder till att bufferten förloras i så hög grad att den inte längre skyddar kapseln i en liten andel deponeringshål, och detta efter typiskt hundratusen år.

Om en kapsel har en liten, genomgående skada på kopparhöljet förväntas vatten tränga in genom skadan, långsamt fylla utrymmet mellan kopparhöljet och kapselns insats, därefter tränga igenom tätningen till locket i kapselinsatsen och så småningom komma i kontakt med bränsleelementen. Detta förlopp förväntas ta åtminstone hundratals år, och kan inte äga rum förrän bufferten mättats med vatten. En liten andel av radionukliderna i bränsleelementen kan lösas i det inträngande vattnet medan den överväldigande andelen ligger inbäddad i bränslekutsarna och bara blir tillgängliga i takt med den mycket långsamma upplösningen av kutsarna. Så länge skadan i kopparhöljet är liten kommer den att bromsa uttransporten av radionuklider från kapselns inre. Med tiden kommer insatsen av järn att korrodera av det inträngande vattnet. En effekt som inte kan uteslutas är då att korrosionsprodukterna, som tar större plats än det intakta järnet, med tiden kommer att ”bända upp” det från början lilla hålet i kopparhöljet så att det blir betydligt större, och därmed försvinner det hinder själva kopparhöljet utgjort för uttransport av nuklider. I båda fallen antas därför, som i SR-Site, att den lilla initiala skadan leder till att det bildas en sammanhängande transportväg ut ur kapseln för radionuklider efter 1000 år. Den lilla skadan antas, också som i SR-Site, att utvecklas till ett stort hål efter 10 000 år. De radionuklider som tränger ut ur kapseln fördröjs i buffert och berg. En andel kan så småningom nå biosfären utan att hinna sönderfalla till icke radioaktiva ämnen längs vägen.

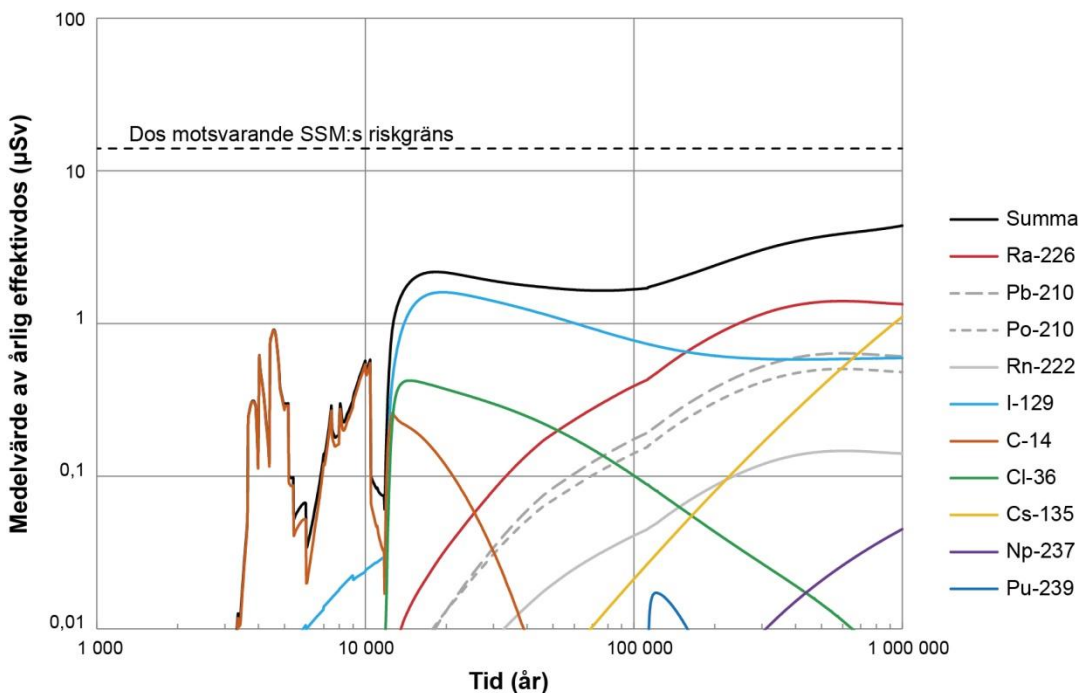
Konsekvensanalyserna har genomförts med samma modeller som i säkerhetsanalysen SR-Site (avsnitt 13.4 i SR-Site). Data är också tagna från säkerhetsanalysen SR-Site, med ett undantag: För biosfären har en del data som i SR-Site togs ur den allmänna litteraturen nu ersatts med plats-specifika data för platsen Forsmark. Detta rör data som inhämtats genom mätningar på platsen efter färdigställandet av SR-Site. Samma plats-specifika data användes i SKB:s senaste säkerhetsanalys av förvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall i Forsmark, (SFR). I SR-Site användes några olika tillvägagångssätt för biosfärsanalyserna: Om endast någon eller ett fåtal kapslar skadades antogs pessimistiskt bland annat att hela utsläppet nådde den punkt i biosfären där dosen blev maximal. Om ett större antal kapslar skadades antogs utsläppen till de olika punkterna i biosfären styras av de olika transportvägarna från förvaret genom berget, vilket ledde till att radionukliderna fördelades över ett större område på ytan. I analyserna som nu gjorts har det senare tillvägagångssättet använts eftersom fallen handlar om att samtliga kapslar skadas.

Resultaten av beräkningarna visas i Figur 9-2 respektive Figur 9-3. Doserna ligger hela tiden för båda fallen under den dos som svarar mot SSM:s riskgräns.

Komplettering om kapselintegritet



Figur 9-2. Doskonsekvenser av fall A där samtliga kapslar har en liten genomgående skada redan vid deponeringen. De förhållandevis snabba variationerna i dosen för kol-14 (C-14) beror på landskapets utveckling till följd av landhöjningen som pågår några tusen år efter förvarets förslutning.



Figur 9-3. Doskonsekvenser av fall B där samtliga kapslar har en liten genomgående skada redan vid deponeringen och där bufferten gradvis förloras i deponeringshålen med högst grundvattenflöde. De förhållandevis snabba variationerna i dosen för kol-14 (C-14) beror på landskapets utveckling till följd av landhöjningen som pågår några tusen år efter förvarets förslutning.

Komplettering om kapselintegritet

Fallen är inte analyserade på samma rigorösa sätt som fall som används för att visa att doser orsakade av förvaret i strikt bemärkelse ligger under SSM:s riskgräns. Fallen ger emellertid en tydlig indikation på, att även med helt realistiska antaganden om kapselskador är förvarets säkerhet i nivå med SSM:s riskgräns. Det finns också flera pessimistiska antaganden bakom biosfärmodellen, till exempel att landskapsobjekten till vilka utsläppen inträffar förväntas utnyttjas fullt ut av lokalbefolkningen och därigenom ge maximala doser.

Sammanfattningsvis blir slutsatsen att också andra delar än kapslarna i ett KBS-3-förvar i Forsmark har en avsevärd skyddsförmåga mot utsläpp av radionuklider i biosfären. Det svårösta bränslet, komponenter inuti kapseln, bentonitbufferten, berget och de låga grundvattenflödena i Forsmark är faktorer som alla bidrar till begränsningar i dos även i de helt realistiska fall där samtliga kopparkapslar antas vara skadade från deponering. Förvarskonceptet KBS-3 har således flera barriärer och fördröjande faktorer, vilket också framgått av säkerhetsanalysen SR-Site och alla SKB:s tidigare analyser av förvarskonceptet.

10 Sammanfattning och slutsatser

Slutsatser kring kapselintegritetsfrågor

De fem frågorna kring kapselns integritet i mark- och miljödomstolens yttrande är:

- a) korrosion på grund av reaktion i syrgasfritt vatten
- b) gropkorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på gropkorrosion
- c) spänningskorrosion på grund av reaktion med sulfid, inklusive saunaeffektens inverkan på spänningskorrosion
- d) väteförsprödning
- e) radioaktiv strålningens inverkan på gropkorrosion, spänningskorrosion och väteförsprödning.

Dessa har behandlats i avsnitt 4 till 8 och slutsatserna återges i korthet här.

För att kunna utvärdera kapselns integritet är det nödvändigt att ta hänsyn till vilka kemiska förhållanden och mekaniska belastningar som kommer att råda i det slutförvar av KBS-3-typ som SKB ansökt om att uppföra i Forsmark, och att relatera dessa till de förhållanden som gällt vid olika laboratorieförsök där någon av processerna a-e ovan studerats. Många försök på kopparmaterial har gjorts vid laboratorieförhållanden som är betydligt mer aggressiva än förvarsmiljön. I avsnitt 2 ges därför en kort redovisning av hur SKB beskrivit förhållandena i förvaret i ansökan, kompletterat med resultat av ett antal nyare studier av framförallt förhållanden innan bufferten vattenmätts. Analyserna visar att halter och/eller flöden av sulfid är begränsade både innan och efter att bufferten vattenmätts. Detta gäller även för det fåtal deponeringshål som på lång sikt kan förlora en avsevärd del av bufferten så att kapselytan blir direkt exponerad för grundvattenflödet.

I avsnitt 3 dras slutsatsen att saunaeffekten, i form av saltanrikning till följd av förångning av inflödande vatten till ett deponeringshål inte kommer att kunna upprätthållas i ett KBS-3-förvar. Slutsatsen baseras på såväl laboratorieförsök som modellberäkningar och observationer i fältförsök. Slutsatsen är således att saunaeffekten inte kommer att vara verksam i ett KBS-3-förvar i Forsmark och att den därför inte heller påverkar de korrosionsprocesser som förekommer i slutförvaret.

I avsnitt 4 dras slutsatsen att det inte finns något vetenskapligt stöd för att koppar korroderar i rent, syrgasfritt vatten på något annat sätt än vad etablerad vetenskap förutsäger. Flera tidigare rapporterade experiment under noggrant kontrollerade förhållanden stöder slutsatsen och resultaten

Komplettering om kapselintegritet

har nyligen publicerats i en vetenskaplig tidskrift. Dessutom har grundligt sökande, såväl experimentellt som teoretiskt, efter hittills okända föreningar mellan koppar, syre och väte som skulle ha kunnat förklara en okänd reaktion mellan koppar och vatten inte lett till att någon sådan hittats. Även om de forskare som hävdar att koppar korroderar på ett för vetenskapen tidigare okänt sätt skulle ha rätt, skulle omfattningen i slutförvaret bara bli ett korrosionsdjup av cirka en millimeter på en miljon år.

Flera nya studier har genomförts för att ytterligare studera lokal korrosion och förutsättningarna för detta i förvarsmiljön. I avsnitt 5 dras slutsatsen att traditionell gropkorrosion (engelska; pitting) till följd av sulfidkorrosion kan uteslutas, eftersom detta skulle kräva bildning av en passiv film av kopparsulfid på kopparytan. Sådana filmer har aldrig observerats, inte ens i lösningar med sulfidkoncentrationer långt över de som förväntas i förvarsmiljön i Forsmark. Vad gäller andra former av lokal korrosion, finns ett fåtal observationer från laboratorieförsök med koppar i sulfidlösningar som kan tolkas som så kallad mikrogalvanisk korrosion. När dessa laboratorieförhållanden översätts till förvarsförhållanden kan det inte helt uteslutas att mikrogalvanisk korrosion skulle kunna förekomma för de högsta sulfidflödena som kan förväntas förekomma i förvaret. Detta gäller de fåtal deponeringshål som på lång sikt (100 000 år) kan tänkas förlora en avsevärd del av sin buffert och detta har inkluderats i riskberäkningen.

Lokal korrosion under en biofilm tas också upp i avsnitt 5, och där dras slutsatsen att det inte kommer att förekomma, särskilt som förekomsten av näringsämnen i grundvattnen på förvarsdjup inte är tillräcklig för att ge förutsättningar för bildning av en biofilm. De studier som visat på lokal korrosion av koppar under en biofilm är gjorda under förhållanden med betydligt högre halter av näringsämnen än vad som finns i förvarsmiljön.

I avsnitt 6 dras slutsatsen att sulfidexponering i kombination med dragspänningar inte förväntas hota kapselns integritet i förvarsmiljön. Dragspänningar kan inte uteslutas i delar av kapseln under vissa perioder. I laboratorieförsök har mikroskopiska sprickor iakttagits i ytan hos kopparprover som utsatts för dragspänningar i kombination med höga sulfidkoncentrationer. Dock är sulfidkoncentrationerna och sulfidflödena sådana att de inte kommer att förekomma vid kapselytorna i slutförvaret. Dessutom bedöms iakttagelserna inte vara exempel på traditionell spänningskorrosion, utan snarare en form av så kallad korngränskorrosion som uppträder bara vid mycket höga sulfidflöden i kombination med dragspänningar. Slutsatserna i avsnitt 6 baseras på flera nya studier.

I avsnitt 7 dras slutsatsen att väteförspredning inte kommer att äventyra kapselns inneslutande förmåga i ett KBS-3-förvar. Slutsatsen baseras på *i*) möjliga inflöden av väte till kopparn, där vätet frigjorts i korrosionsprocesser i förvaret och *ii*) bedömningar baserade på både experiment och modellberäkningar av hur sådana inflöden skulle påverka metallen. Miljön i de laboratorieförsök där skador uppstått relativt ytligt i kopparmaterialet är betydligt mer aggressiv än förvarsmiljön. Det är också visat att svetsningen av kapseln kan utföras så att oxidstråk i svetsen undviks, vilket undanröjer en möjlig orsak till förspredning.

I avsnitt 8 dras slutsatsen att inga signifikanta skador av strålningen från bränslet kommer att uppkomma i kapselmaterialen, det vill säga varken i segjärnsinsatsen eller i kopparhöljet. Slutsatsen baseras på uppdaterade strålskadeberäkningar och i någon mån på nya experiment. Tidigare pessimistiskt försummade självläkningseffekter har också visats reducera strålskadorna väsentligt. Från experiment med strålningsinducerad korrosion och på teoretiska överväganden dras slutsatsen att strålningen i slutförvaret har försumbar inverkan på lokal korrosion, spänningskorrosion och väteförspredning. Den teoretiska förståelsen för strålningsinducerad korrosion är väsentligt förbättrad.

Komplettering om kapselintegritet

Sammanfattningsvis bedöms fyra av frågorna inte påverka kapselns integritet, i enlighet med bedömningarna i säkerhetsanalysen SR-Site och kompletterande material till SSM under granskningen av SR-Site, och nu med ytterligare stöd av en rad nya studier. En av frågorna, lokal korrosion på grund av mikrogalvaniska effekter under mycket höga sulfidflöden kan, baserat på befintligt underlag, inte helt uteslutas ge en viss påverkan på kapselns inneslutande förmåga på mycket lång sikt.

Inverkan på risken – konsekvenser för säkerhet efter förslutning

Lokal korrosion i form av mikrogalvanisk sulfidkorrosion kan inte kategoriskt uteslutas påverka kapselns integritet för de högsta sulfidflödena som kan förväntas i förvarsmiljön. En uppdaterad doskonsekvensberäkning baserad på en pessimistisk tolkning av tillgänglig data om mikrogalvanisk gropbildning visar att den beräknade maximala risken endast påverkas marginellt jämfört med resultaten i säkerhetsanalysen SR-Site. Den maximala risken ligger under en tiondel av SSM:s riskgräns under hela den en miljon år långa analysperioden.

Förvarssystemet är tåligt mot skador på kapslarna. Detta framgår av två hypotetiska beräkningsfall. Dessa visar att även om alla kapslar hypotetiskt antas ha genomgående skador i ett mycket tidigt skede, är den beräknade risken fortfarande i nivå med SSM:s riskgräns.

Slutsatserna i SKB:s komplettering om kapselintegritet bygger på tidigare tillgängligt material och på cirka 25 nya rapporter, PM och vetenskapliga publikationer från en rad experiment och teoretiska analyser. Det har varit möjligt att sammanställa materialet redan ungefär ett år efter mark- och miljödomstolens yttrande, eftersom arbete pågick inom alla områden, då frågorna var väl kända och studerats långt före huvudförhandlingen i domstolen. Som en följd av domstolens yttrande intensifierades insatserna.

Det övergripande resultatet av genomförda kompletterande studier och analyser är att den viktigaste slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site är oförändrad: Ett slutförvar som byggs enligt KBS-3-metoden i Forsmark är långsiktigt säkert och uppfyller SSM:s krav på säkerhet efter förslutning.