

## Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

Rozszerzone szwedzkie podsumowanie TR-19-15 – Dodatkowe informacje na temat kwestii integralności kapsuły

W odniesieniu do wniosku o zezwolenie, na mocy kodeksu ochrony środowiska, dla instalacji w spójnym systemie ostatecznego zdeponowania zużytego paliwa jądrowego i odpadów jądrowych, M2018-00217/Me oraz

wniosków o zezwolenie, na mocy ustawy o technologii jądrowej dla pośrednich urzędzeń do składowania i unieszkodliwiania zużytego paliwa jądrowego i odpadów jądrowych, M2018/00221/Ke

*This document is the Polish version of SKBdoc 1718509 - Komplettering om kapselintegritet (In Swedish). In the event of any discrepancy between the Swedish and Polish versions, the Swedish original will take precedence.*

## Treść

1	Wprowadzenie .....	3
2	Środowisko repozytorium.....	4
3	Efekt sauny.....	7
4	Korozja spowodowana reakcją w wodzie beztlenowej .....	10
5	Korozja z powodu reakcji z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję wżerową .....	15
6	Korozja naprężeniowa spowodowana reakcją z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję naprężeniową .....	19
7	Kruchość wodorowa.....	23
8	Wpływ promieniowania radioaktywnego na korozję wżerową, korozję naprężeniową i kruchość wodorową.....	27
9	Konsekwencje dla bezpieczeństwa po zamknięciu kapsuł.....	31
10	Streszczenie i wnioski .....	36

# 1 Wprowadzenie

Sąd ds. gruntów i środowiska przy Sądzie Okręgowym w Nacka (MMD) w swojej opinii dla rządu z 23.01.2018 r. w sprawie dopuszczalności, na podstawie kodeksu ochrony środowiska, repozytorium typu KBS-3 w Forsmarku zażądał dodatkowych informacji na temat następujących pięciu kwestii w odniesieniu do integralności miedzianej kapsuły:

- a) korozja spowodowana reakcją w wodzie beztlenowej
- b) korozja z powodu reakcji z siarczkiem, w tym wpływu efektu sauny na korozję wżerową
- c) korozja naprężeniowa spowodowana reakcją siarczku, w tym wpływu efektu sauny na korozję naprężeniową
- d) kruchość wodorowa
- e) wpływ promieniowania radioaktywnego na korozję wżerową, korozję naprężeniową i kruchość wodorową.

SKB przeanalizował i uwzględnił wszystkie te zjawiska w analizie bezpieczeństwa, tak zwanej analizie SR-Site,<sup>1</sup> która stanowi podstawę wniosku z 2011 r. o zastosowanie. Dalsza dokumentacja została przedłożona do Strålsäkerhetsmyndigheten (Szwedzki Organ Bezpieczeństwa ds. Promieniowania) (SSM), który uzupełnia badanie wniosku przez władze na mocy ustawy (1984:3) o działalności jądrowej (KTL).

Niniejszy dokument przedstawia wyniki w zakresie zrozumienia pięciu kwestii i wniosków dotyczących ich znaczenia dla bezpieczeństwa - po zamknięciu ośrodka repozytorium KBS-3 w Forsmarku. Dokument jest podsumowaniem szczegółowego technicznego opisu zagadnień,<sup>2</sup> napisanego w języku angielskim, przede wszystkim dla ekspertów w tej dziedzinie, uzupełnionego odpowiednimi cytatami z opinii MMD na temat kwestii kapsuł. Kładzie się nacisk na nowe materiały, które zostały dodane po głównej rozprawie w Sądzie ds. gruntów i środowiska (MMD) jesienią 2017 r. oraz po przeglądzie przez SSM analizy bezpieczeństwa SR-Site z dodatkami. Sprawozdanie techniczne zawiera pełne odniesienia do wszystkich poprzednich i nowych badań, których w sumie jest prawie 200. Ze względów praktycznych dokument ten zawiera jedynie odniesienia do najważniejszych nowych badań od czasu głównego przesłuchania w MMD.

Zanim zajmiemy się pięcioma kwestiami dotyczącymi kapsuł, w części 2 podany jest opis środowiska repozytorium, a w części 3 przedstawiono tak zwany efekt sauny. Pięć kwestii dotyczących kapsuł znajduje się w części 4 i 8. W części 3 i 8 są wprowadzane oceny MMD dla każdego procesu jako pełne cytaty z opinii MMD (strony 323–332). Konsekwencje dla bezpieczeństwa po zamknięciu są analizowane w części 9, a wnioski są podane w części 10.

Ogólny wynik zakończonych uzupełniających badań i analiz jest taki, że główny wniosek z analizy bezpieczeństwa SR-Site pozostaje niezmieniony: Repozytorium zbudowane zgodnie z metodą KBS-3 w Forsmarku jest bezpieczne w dłuższej perspektywie i spełnia wymagania SSM dotyczące bezpieczeństwa po zamknięciu.

<sup>1</sup> Załącznik SR-Site we wniosku o pozwolenie na podstawie kodeksu ochrony środowiska. Bezpieczeństwo po zamknięciu repozytorium zużytego paliwa jądrowego. Raport główny z projektu SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego) (SKB) marzec 2011. [Dostępne na: <http://www.skb.se/projekt-for-framtiden/karnbransleforvaret/vara-ansokningar/ansokningshandlingarna/ansokan-enligt-miljobalken/>]

<sup>2</sup> SKB, 2019. Dodatkowe informacje na temat kwestii integralności kapsuły SKB TR-19-15. Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

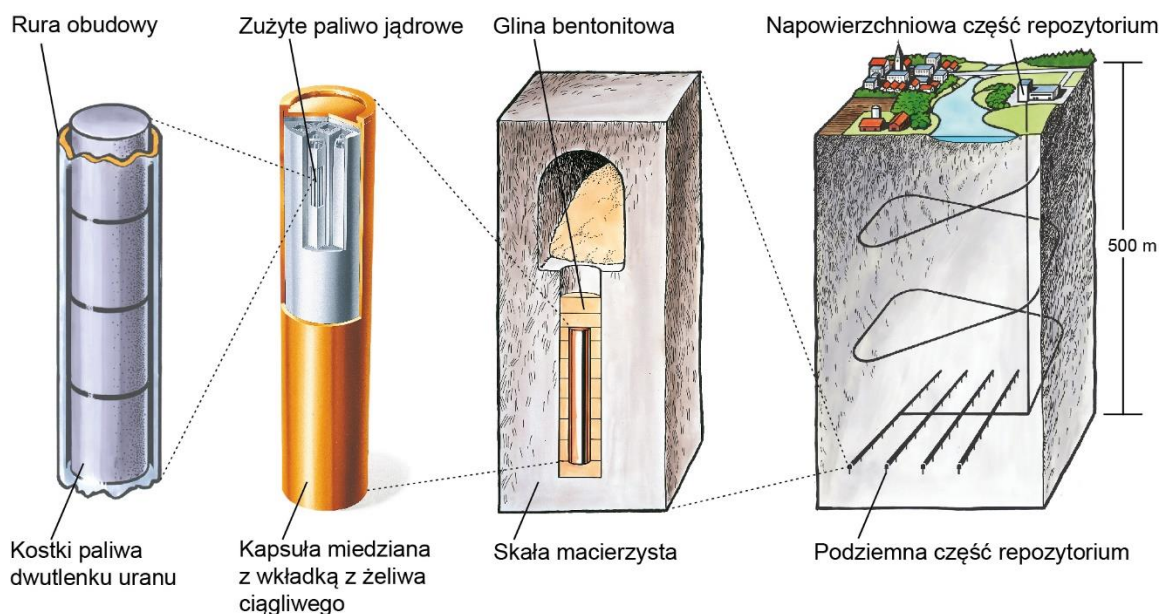
Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

## 2 Środowisko repozytorium

W celu przeprowadzenia oceny integralności kapsuł, należy wziąć pod uwagę warunki chemiczne i inne, które będą panować w repozytorium typu KBS-3, a które SKB chce zastosować do budowy w Forsmarku. Warunki te mogą być następnie związane z warunkami stosowanymi w różnych eksperymentach laboratoryjnych, w których przebadano miedź. Przeprowadzono wiele eksperymentów na materiałach miedzianych w warunkach laboratoryjnych, które są znacznie bardziej agresywne niż środowisko składowania. W niniejszej części przedstawiono zatem krótki opis sposobu, w jaki SKB opisała w swoim wniosku warunki panujące w ośrodku repozytorium, uzupełnione wynikami szeregu nowych badań.

### Repozytorium KBS-3 w Forsmarku

Celem repozytorium KBS-3 jest izolowanie odpadów jądrowych od ludzi i środowiska przez bardzo długi okres. Stosowana tam metoda wykorzystuje kapsuły miedziane z wkładką z żeliwa sferoidalnego, które zawierają zużyte paliwo jądrowe. Kapsuły są otoczone buforem gliny bentonitowej i osadzone na głębokości około 500 metrów w nasyconej wodami gruntowymi skałach granitowych, patrz Rysunek 2-1.



**Rysunek 2-1. Metoda KBS-3 do ostatecznego zdeponowania zużytego paliwa jądrowego.**

Wybrany ośrodek repozytorium w Forsmarku znajduje się w północnej części Uppland w gminie Östhammar. Obszar Forsmark składa się z krystalicznej skały należącej do Tarczy fennoskandyjskiej i powstał około 1,9 miliarda lat temu. Teren jest zbadany przy użyciu różnych metod, w tym około dziesięciu głębokich na prawie 1000 metrów odwiertów rdzeniowych. Podsumowując, z oceny danych z badania terenu wynika, że główne cechy związane z bezpieczeństwem miejsca repozytorium to:

- Niska częstotliwość pęknięć wodonośnych na głębokości repozytorium.
- Korzystne i stabilne lub powoli zmieniające się warunki geochemiczne dla barier na głębokości repozytorium.

Ponadto, stosunkowo wysoka przewodność cieplna w tym miejscu pozwala na efektywne wykorzystanie objętości skały. Dobre są również warunki mechaniczne skał i inne właściwości,

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

które są ważne dla bezpiecznego i efektywnego zbudowania składowiska. Te cechy były decydujące przy wyborze lokalizacji.

### **Środowisko repozytorium i jego zmiany w trakcie opracowywania**

Warunki chemiczne na głębokości repozytorium są korzystne dla integralności kapsuł miedzianych. W dłuższej perspektywie tylko związek siarki, siarczek w wodach podziemnych może powodować znaczną korozję. Poziomy siarczek w Forsmarku są niskie, ale nie bez znaczenia pod względem korozji w bardzo długim okresie.

Obecność i dopływ siarczku na różnych etapach rozwoju repozytorium bezpośrednio wpływa na warunki korozji wżerowej, spowodowanej reakcją z siarczkiem i korozją naprężeniową spowodowaną reakcją z tym pierwszym, co stanowi dwie kwestie, w odniesieniu do których sąd zwrócił się o więcej informacji. Znaczenie tych koncepcji korozji wyjaśniono bardziej szczegółowo w części 5 i odpowiednio w części 6. Centralna część analizy bezpieczeństwa SR-Site poświęcona jest między innymi temu, jak rozwijają się i zmieniają warunki chemiczne w barierach repozytorium i wokół niego. Aby zrozumieć, jak zmienia się środowisko chemiczne, potrzebna jest również wiedza na temat umiarkowanego rozwoju temperatury i przepływów wody.

Moc resztkowa zużytego paliwa jądrowego oznacza, że temperatura powierzchni kapsuły początkowo wzrasta do maksymalnej temperatury około 95 °C, około 10 lat po utylizacji. Temperatura następnie spada do około 40 °C po 1000 latach i do 20 °C po 10 000 lat. Po 100 000 lat temperatura spada do poziomu otaczającej jej skały, tj. około 11 °C w dzisiejszym umiarkowanym klimacie.

Gdy bufor gliny bentonitowej jest zainstalowany w otworze składowiska, to ma on, ze względów praktycznych, ograniczoną zawartość wilgoci. Na dłuższą metę wody gruntowe całkowicie nasycają bufor. Ze względu na niską częstotliwość pęknięć wodonośnych na poziomie składowania w Forsmarku, czas nasycenia wody będzie się znacznie różnić między różnymi otworami składowiska. W otworach połączonych z pęknięciami wodonośnymi nasycenie wodą może nastąpić w ciągu kilku dziesięcioleci, podczas gdy na stanowiskach bez pęknięć wodonośnych może to zająć 1000 lat lub dłużej. Oznacza to, że nienasycone warunki mogą panować na powierzchni kapsuły i w otaczającym buforze przez stosunkowo długi czas oraz że do oceny bezpieczeństwa składowiska wymagana jest dobra znajomość warunków podczas fazy nienasycenia, patrz poniżej.

Innym ważnym aspektem rozwoju buforu jest erozja buforowa w okresach, gdy ten pierwszy może być narażony na działanie wód gruntowych o bardzo niskim zasoleniu. Na podstawie szeroko zakrojonych ocen w części 12.2 analizy bezpieczeństwa SR-Site stwierdzono, że w niewielkiej ilości z łącznej liczby 6000 otworów depozycyjnych zjawisko to może wystąpić do tego stopnia, że powierzchnia kapsuły styka się bezpośrednio z wodami gruntowymi i w ten sposób staje się ona bardziej podatna na korozję spowodowaną przede wszystkim siarczkiem. Liczba otworów składowiska, których to dotyczy, waha się od kilkudziesięciu do kilkuset w zależności od tego, jak pesymistycznie przeprowadzana jest analiza. W przypadku tych otworów składowiska osiągnięcie takiej sytuacji zajmie od dziesiątek tysięcy do setek tysięcy lat.

### **Dodatkowe badania nad warunkami w fazie nasycania**

Zasadniczo pozytywne jest to, że powierzchnia kapsuły może być otoczona nienasyconą gliną bentonitową przez stosunkowo długi czas, ponieważ siarczek rozpuszczony w wodach gruntowych nie może być wówczas w bezpośrednim kontakcie z kapsułą. Ważne jest jednak, aby zrozumieć środowisko chemiczne wokół kapsuły podczas fazy nasycania, aby zapewnić, na przykład, że siarczek nie dociera do kapsuły w żaden inny sposób, tj. w postaci gazowej. W związku z tym przeprowadzono szereg dodatkowych badań dotyczących warunków nienasyconych.



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

Jednym z możliwych źródeł siarczku może być konwersja siarczanu, który występuje zarówno w wodach gruntowych, jak i w materiale bentonitowym, w siarczek za pośrednictwem bakterii redukujących siarczany (SRB). Bakterie wymagają dostępu do wody, ale gdy bentonit jest nasycony wodą, to staje się on zbyt gęsty, aby te bakterie były aktywne. W ramach niedawnych badań<sup>3</sup> sprawdzono, czy SRB może być aktywny w wilgotnej, ale nie nasyconej wodą glinie bentonitowej, tj. na etapie, w którym glina ulega nasyceniu wodą w repozytorium. Wyniki badania stanowią dalsze wsparcie dla punktu wyjścia, między innymi analizy bezpieczeństwa SR-Site, a mianowicie, że mikrobiologiczna konwersja siarczanu na siarczek ma miejsce, gdy drobnoustroje mają dostęp do wolnej (płynnej) wody i składników odżywczych dodawanych na znacznie wyższych poziomach niż są naturalnie obecne w bentonitach i wodach gruntowych. Nie wykryto produkcji siarczku, gdy drobnoustroje były ograniczone do wilgotności względnej 75-100%, ale bez obecności wolnej wody. Inne nowe badanie<sup>4</sup> wskazuje, że tlen, który występuje początkowo zarówno w doświadczeniach, jak i w repozytorium, jest zużywany przez korozję kapsuły, co SKB zakłada również w analizie bezpieczeństwa. Obliczenia w analizie bezpieczeństwa w SR-Site pokazują, że resztkowy tlen prowadzi do korozji mniejszej niż jeden milimetr.

Inną ważną kwestią jest to, jak siarczek może być transportowany przez bufor i wypełniacz tunelu, aby w końcu dotrzeć do kapsuły. W przypadku gliny nasyconej wodą, badano to szeroko, podczas gdy nienasycona glina była traktowana bardziej pesymistycznie i w zakresie szacunków w poprzednich raportach SKB dotyczących bezpieczeństwa. W związku z tym przeprowadzono dodatkowe badania dotyczące nienasyconej gliny.<sup>5</sup> Dochodzenie wykazało, że transport substancji gazowych (np. siarczku) w nienasyconej glinie jest znacznie wolniejszy niż SKB pesymistycznie zakładała w poprzednich sprawozdaniach.

### **Streszczenie odpowiednich warunków repozytorium**

Skała w Forsmarku zawiera małą ilość pęknięć wodonośnych na głębokości składowania. Większość otworów składowiska w repozytorium w Forsmarku nie będzie miała kontaktu z żadną szczeliną wodonośną.

Gliniany bufor otaczający kapsułę i glina wypełniająca tunel są tylko częściowo nasycone wodą w czasie składowania. Osiągnięcie pełnego nasycenia wodą glinki bentonitowej w buforze i uzupełnieniu tunelu może potrwać od kilkudziesięciu do kilku tysięcy lat, w zależności od tego, czy otwór składowiska ma kontakt z pęknięciem wodonośnym, czy nie. Po tej fazie nasycania zaistnieją warunki nasycenia wodą.

W przypadku około stu z 6000 otworów składowiska, bufor może zostać utracony w dłuższej perspektywie przez erozję do tego stopnia, że kapsuła wejdzie w bezpośredni kontakt z wodami gruntowymi.

Siarczek jest na ogół najważniejszym żrącym składnikiem granitowych wód gruntowych w Szwecji. W Forsmarku, podobnie jak w wielu innych miejscach, poziomy siarczek są niskie, ale w dłuższej perspektywie nie bez znaczenia pod względem korozji.

W fazie nasycania siarczek mógłby być zasadniczo utworzony przez aktywność mikrobiologiczną w buforze i wypełniaczu tunelu. Nowe badania potwierdzają, że nie może się to zdarzyć, dopóki

<sup>3</sup> **Svensson D, Kalinowski B E, Turner S, Dopson M, 2019.** Aktywność bakterii redukujących siarczany w bentonicie w funkcji dostępności wody. SKBdoc 1708461 wer. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

<sup>4</sup> **Birgersson M, Goudarzi R, 2018.** Badania ewolucji gazu w nienasyconym repozytorium KBS-3. SKB TR-18-11, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

<sup>5</sup> **Eriksson P, Hedin A, 2019.** Modelowanie strumieni siarczków w buforze nienasyconym i zasypie dla repozytorium KBS-3. SKBdoc 1696975 wer. 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

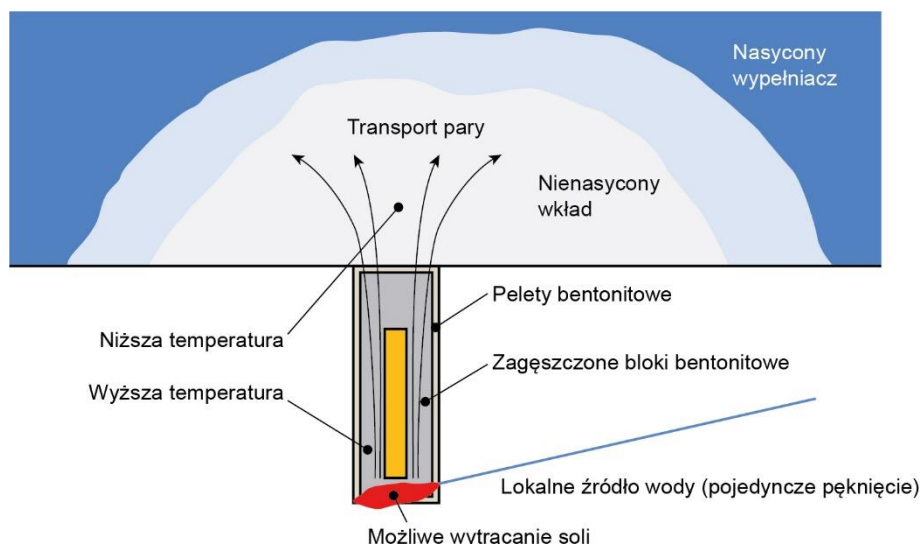
bufor nie osiągnie bardzo wysokiego wskaźnika nasycenia. Ponadto niska dostępność składników odżywczych dla drobnoustrojów jest silnie ograniczającym czynnikiem ich aktywności w nienasyconej glinie. Gлина nasycona wodą jest jednak zbyt gęsta, aby drobnoustroje były aktywne.

Ostatnie badania pokazują, że transport substancji gazowych, takich jak siarczek, w nienasyconej glinie jest znacznie wolniejszy niż wcześniej zakładano w raporcie o bezpieczeństwie SR-Site.

### 3 Efekt sauny

#### *Czego dotyczy ta kwestia?*

Efekt sauny (czasami nazywany efektem łaźni) oznacza, że woda solankowa odparowuje w ciepłym miejscu w systemie i że powstają tam osady soli. W repozytorium kapsuła może być takim miejscem odparowywania, a substancje, w tym siarczek, gromadząc się tam, mogłyby przyczynić się do korozji, patrz Rysunek 3-1. Możliwe wystąpienie tego efektu zostało omówione podczas rozpatrywania wniosku SKB, przy czym SKB przedłożyła suplementy przede wszystkim do SSM. Kwestia ta została również podniesiona podczas głównej rozprawy Sądu ds. gruntów i środowiska.



**Rysunek 3-1.** Schematyczna ilustracja „efektu sauny”.

Rozległe gromadzenie się soli jest możliwe, jeśli duża część wody wchodzącej do otworu składowiska może odparować i opuścić bufor jako para wodna. W związku z tym, jeśli para skrapla się w bentonicie w otworze składowiska, to tylko ograniczona część opuści ją jako para, a ewentualne gromadzenie się soli będzie ograniczone. Kondensacja spowoduje również, że bufor nad kapsułą będzie nasycony wodą. Zdolność pary do poruszania się po bentonitach zmniejsza się wraz z nasyceniem bentonitu wodą i całkowicie ustaje przy pełnym nasyceniu. W ten sposób przepływ pary ustanie, a ewentualne wzbogacenie soli będzie z tego powodu również ograniczone.

SKB w ostatnich latach badała tę kwestię zarówno eksperymentalnie w środowisku laboratoryjnym, jak i za pomocą obliczeń modelowych. Możliwe jest również wyciągnięcie wniosków z badań terenowych, chociaż nie zostały one specjalnie przeznaczone do badania efektu sauny. Ostatnie badania pogłębiają szczegółową wiedzę o tym, jak para wodna jest wchłaniana przez nienasyconą glinę i gdzie się ona kondensuje.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

### Ocena MMD dotycząca tej kwestii

*Wniosek SKB jest taki, że woda, która wyparowała po wejściu do otworu składowiska, skrapla się w bentonicie w pobliżu gorącej kapsuły, tak że bentonit pęcznieje i zapobiega dalszemu przepływowi pary do tunelu składowiska odpadów. Sąd ds. gruntów i środowiska uważa, że nie ma pełnego poparcia dla tego wniosku. Raporty SKB z prób wskazują, że może zaistnieć jakiś transport parowy. Wyniki sugerują, że para nie jest tak łatwo wchłaniana w suchym bentonicie, ale zamiast tego kondensuje się lokalnie i prowadzi do pęknięcia, co nie jest korzystne dla zapobieżenia transportu pary. Wniosek SKB, że ilość nagromadzonej soli będzie niewielka i nie osadza się na kasule, nie wydaje się być wystarczająco uzasadniony.*

*Z drugiej strony, ocena SKB jest taka, że zwiększony poziom chlorków ze względu na efekt sauny nie będzie wiązał się z ryzykiem korozji wżerowej, ponieważ prawdopodobnie nie powstanie tam warstwa pasywna. Sąd ds. gruntów i środowiska orzekł powyżej, że wiele wskazuje na to, że pasywne warstwy tlenku nie będą tworzyć się w warunkach utleniania. Ponadto sąd podziela ocenę SSM, zgodnie z którą efekt sauny jest ograniczony albo krótkim czasem nasycenia buforu, albo niskim przepływem w dłuższym okresie nasycania. Ogólnie rzecz biorąc, istnieje niewielkie ryzyko, że efekt sauny doprowadzi do korozji wżerowej powodując pęknięcie kapsuły w ciągu 1000 lat. Ocena ta opiera się w szczególności na braku korzystnych warunków chemicznych pasywacji. Jednakże, jak stwierdził SSM, potrzebne są dodatkowe dane dotyczące transportu pary w buforze oraz integracji analizy warunków chemicznych z analizą termicznego i hydraulicznego rozwoju buforu i składowiska. Sąd ds. gruntów i środowiska ocenia, że nie ma pewności co do wpływu efektu sauny na korozję wżerową i korozję naprężeniową.*

### Badania laboratoryjne

Pierwszy zestaw prób, zgłoszony w 2013 r., wykazał, że znaczna ilość pary może przepływać przez złożę relatywnie suchych granulek bentonitowych bez wchłaniania. Z drugiej strony, transport pary jest utrudniony, gdy się ona skrapla. W 2017 r. przeprowadzono dalsze próby, w których wewnętrzny grzejnik miedziany był otoczony blokami bentonitowymi (pierścieniami), a następnie pokryty solidnym blokiem bentonitowym, patrz Rysunek 3-2. Układ odzwierciedla konstrukcję depozytorium w taki sposób, że zawiera najważniejsze elementy pod względem efektu sauny. Ogólny wniosek z tych prób jest taki, że kondensacja nastąpi szybko w blokach, a także w granulkach. Dlatego nie oczekuje się, że para wodna w pobliżu kapsuły opuści otwór na składowisku.





Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

**Rysunek 3-2.** *Fotografie z konfiguracji eksperymentalnej, w której grzejnik miedziany jest zamknięty czterema pierścieniami bentonitowymi, a następnie pokryty solidnym blokiem bentonitowym.*

Pod koniec 2018 r. <sup>6</sup> przeprowadzono dalsze eksperymenty z transportem oparów w bentonicie, aby lepiej zrozumieć procesy regulujące dystrybucję wilgoci w częściowo nasyconych blokach bentonitowych i granulach. Wyniki badania zwiększyły zrozumienie tego transportu i nie zaprzeczają wcześniejszym wnioskom SKB na temat efektu sauny.

### **Obliczenia modelowe**

Oprócz eksperymentów przeprowadzono również różne obliczenia modelowe. Przeanalizowano między innymi przypadek, w którym pojedyncze wodonośne pęknięcie przecina otwór składowiska.

Gdy temperatura w obszarze, do którego przedostaje się woda, jest podwyższona, woda może odparować, co z kolei może prowadzić do gromadzenia się soli. Jednak samo parowanie nie prowadzi do gromadzenia się soli w dużym stopniu. Aby sól gromadziła się w znaczącym stopniu, konieczne jest, aby większość przychodzącej wody odparowała, a następnie została przetransportowana bez nasycania bentonitu wodą. Obliczenia pokazują, że możliwe efekty parowania mogą być aktywne najdłużej w pierwszych latach po zamknięciu, co powoduje nieznaczne nagromadzenie się soli.

### **Próby terenowe**

SKB przeanalizowała również wyniki różnych badań terenowych, które nie zostały pierwotnie przeprowadzone w celu zbadania efektu sauny, ale gdzie bentonit był podgrzewany grzejnikami elektrycznymi przez kilka lat. Dotyczy to repozytorium prototypów i testów LOT w laboratorium SKB w Äspö oraz testu FEBEX przeprowadzonego w podziemnym zakładzie w Grimsel w Szwajcarii. Po przerwaniu i przeanalizowaniu doświadczeń badano również, czy istnieją jakiegokolwiek oznaki gromadzenia się soli. Żadne z tych badań nie wykazuje oznak jakiegokolwiek efektu sauny.

### **Wnioski końcowe**

Zakończone prace pokazują, że gromadzenie się soli spowodowane przez wypływającą wodę do otworu składowiska staje się nieistotne w repozytorium KBS-3. Dzieje się tak z kilku powodów:

- Aby znaczne ilości soli się gromadziły, większość dodanej wody musi zostać przekształcona w parę wodną, zamiast nadal przepływać w postaci płynnej. Ponieważ repozytorium KBS-3 jest odpowiednio zaprojektowane, może się to zdarzyć tylko przez bardzo krótkie okresy czasu, co jest weryfikowane za pomocą obliczeń modelowych.
- Wyniki doświadczalne pokazują, że ograniczona ilość wytwarzanej pary jest pochłaniana przez kondensację, co uszczelnia system i uniemożliwia dalszy transport pary.
- W badaniach terenowych nie zaobserwowano istotnych objawów gromadzenia się soli.

Podsumowując, stwierdza się zatem, że efekt sauny będzie nieistotny w repozytorium KBS-3 w Forsmarku. W związku z tym konsekwencje tego procesu nie są brane pod uwagę w dalszych analizach w niniejszym sprawozdaniu.

---

<sup>6</sup> Åkesson M, Börgesson L, Sandén T, Goudarzi R, 2019. Transport par w bentonicie. Badania laboratoryjne i badania teoretyczne. SKBdoc 1712120 wer. 1.0 Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

## 4 Korozja spowodowana reakcją w wodzie beztlenowej

### **Czego dotyczy ta kwestia?**

Woda w kontakcie z atmosferą zawiera rozpuszczony tlen. Jeśli miedź zostanie umieszczona w takiej wodzie, to jest ona atakowana przez cząsteczki tlenu – wówczas miedź koroduje. Z drugiej strony, wody gruntowe na głębokości przechowywania są wolne od tlenu, a już od dawna wiadomo, że korozja spowodowana przez same cząsteczki wody jest bardzo mała i prawdopodobnie nawet niemierzalna. Jest to ważna podstawa dla wyboru miedzi jako materiał kapsuły w metodzie KBS-3.

Od 2007 r. grupa naukowców z KTH wyraża inny pogląd na stopień korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie. Według tych naukowców, stopień korozji jest około milion razy większy niż to, co ustalono. Na poparcie tego przywołuje się własne eksperymenty, które pokazują, że miedź w czystej, beztlenowej wodzie prowadzi do wydzielania wodoru w postaci gazu. Byłoby to uwalnianie przez reakcję, wcześniej nieznaną nauce, między cząsteczkami miedzi i wody (które przecież składają się z atomów tlenu i atomów wodoru). W reakcji powstałyby nieznanym wcześniej związek miedzi, wodoru i tlenu.

Ta kwestia sięga lat 80-tych ubiegłego wieku, kiedy jeden z badaczy KTH, na podstawie innego eksperymentu, stwierdził coś podobnego o korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie. Temu eksperymentowi zaprzeczyły kilka lat później inne eksperymenty przeprowadzone przez innych badaczy z KTH i w Szwajcarii, a zatem kwestia ta została ogólnie uznana za rozwiązana.

Kwestia ta została zatem ponownie podniesiona pod koniec 2000 r., a SKB rozpoczęła następnie szereg działań w celu bliższego zbadania tej sprawy.

### **Ocena MMD dotycząca tej kwestii**

*Kwestia korozji miedzi w wodzie beztlenowej jest jedną z najgorętszych kwestii w tej sprawie. SKB przeprowadziła kilka prób. Eksperymenty zostały również przeprowadzone przez naukowców z KTH i Uniwersytetu w Uppsali. Strony dokonały różnych interpretacji prób i różnych ocen, w jakim stopniu ta forma korozji może przyczynić się do degradacji kapsuły. SKB, Peter Szakálos i inni oraz pozostali kontrahenci zrobili ocene, jak to postrzega Sąd ds. gruntów i środowiska, na podstawie wyników eksperymentów przeprowadzonych w fazie wodnej, tj. warunków, które nie są odpowiednie, gdy bufor jest nienaruszony w środowisku repozytorium. Należy zauważyć, że istnieją różnice zdań w kwestiach naukowych, które są istotne dla oceny ryzyka zgodnie z kodeksem ochrony środowiska. Sąd nie decyduje, która teoria lub interpretacja jest najbardziej wiarygodna. Ocena ryzyka nie może jednak pomijać faktu, że szybkość korozji może być znacznie wyższa niż to jak to ocenił SKB, co może mieć kluczowe znaczenie dla długoterminowej zdolności ochronnej kapsuły. SKB musi zatem przedstawić dodatkowe dowody w tej sprawie. Ogólnie rzecz biorąc, istnieje znaczna niepewność, co do ogólnej korozji spowodowanej reakcją w wodzie beztlenowej.*

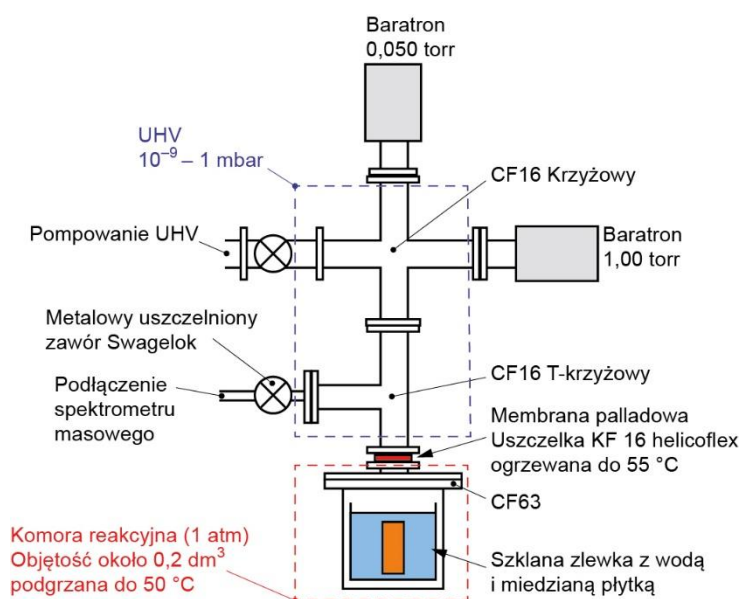
### **Próby na Uniwersytecie w Uppsali**

SKB zleciła dwa duże badania eksperymentalne w celu zbadania kwestii korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie.

Jednym z nich jest w zasadzie powtórzenie eksperymentów badaczy KTH, ale w bardziej kontrolowanych warunkach. Próba ta została przeprowadzona na Uniwersytecie w Uppsali i Rysunek 4-1 pokazuje zastosowaną konfigurację eksperymentalną. W prostych słowach, układ składa się z górnej i dolnej komory, gdzie miedź jest wyeksponowana na czystą, beztlenową wodę w dolnej komorze i gdzie obecność wodoru jest mierzona w górnej komorze. Komory są

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

oddzielone cienką membraną palladu, metalu, który jest przepuszczalny dla wodoru, ale zapobiega transportowi wszystkich innych gazów między komorami. W celu wyeliminowania możliwych źródeł błędów w eksperymencie, zostały postawione bardzo wysokie wymagania m.in. dotyczące jakości miedzi, czystości powierzchni miedzi, jakości wody i atmosfery gazowej, w której przeprowadzono próbę. Ponadto dokonano dokładnych pomiarów bez obecności miedzi w celu określenia wydzielania wodoru w postaci gazowej, do jakiego prowadzi sama aparatura. Wynik z miedzią pokazał, że nie można zmierzyć wydzielania wodoru poza niskim poziomem tła spowodowanym przez samą aparaturę. Grupa badawcza z Uniwersytetu w Uppsali uważnie przyglądała się również produktom korozji, czyli chemicznym związkom miedzi, które powstałyby, gdyby doszło do reakcji między miedzią a wodą. Powierzchnię próbki miedzi, wodę, na którą miedź była wystawiona oraz powierzchnie szklanego pojemnika zawierającego miedź i wodę zbadano czułymi metodami. Nigdzie nie znaleziono poziomów miedzi w pobliżu tego, czego oczekiwano zgodnie z wnioskami naukowców KTH.



**Rysunek 4-1.** Konfiguracja użyta w eksperymencie w Uppsala. Górne i dolne komory są otoczone kropkowanymi prostokątami.

### Próba w Micans w Göteborgu

Drugie badanie eksperymentalne polegało na wystawieniu par próbek miedzi  $1 \times 10 \text{ cm}^2$  w postaci 2-milimetrowej grubości blachy lub folii o grubości 0,1 milimetra do czystej, beztlenowej wody w zamkniętych probówkach, patrz Rysunek 4-2. Nad powierzchnią wody znajdują się pokłady gazu, które są początkowo wypełnione czystym azotem i gdzie skład gazu jest następnie mierzony w regularnych odstępach czasu w celu zbadania, czy powstała jakakolwiek ilość wodoru. Eksperyment ten postawił również wysokie wymagania dotyczące czystości i dokonał precyzyjnego określania poziomów tła wodoru. Metoda eksperymentalna została opracowana w Microbial Analytics Sweden AB (Micans) w Göteborgu, gdzie przeprowadzono również pomiary przy użyciu opracowanej metody.

Jeden z wyników jest pokazany na Rysunek 4-3. Pokazuje on zmierzone ciśnienie wodoru w czasie dla trzech 0,1-milimetrowych folii miedzianych o dokładnie takiej samej jakości i od dostawcy, którego badacze KTH wykorzystali w swoim długoterminowym eksperymencie. Próbkę różni się w sposobie ich obróbki przed wystawieniem na działanie wody – jedna została

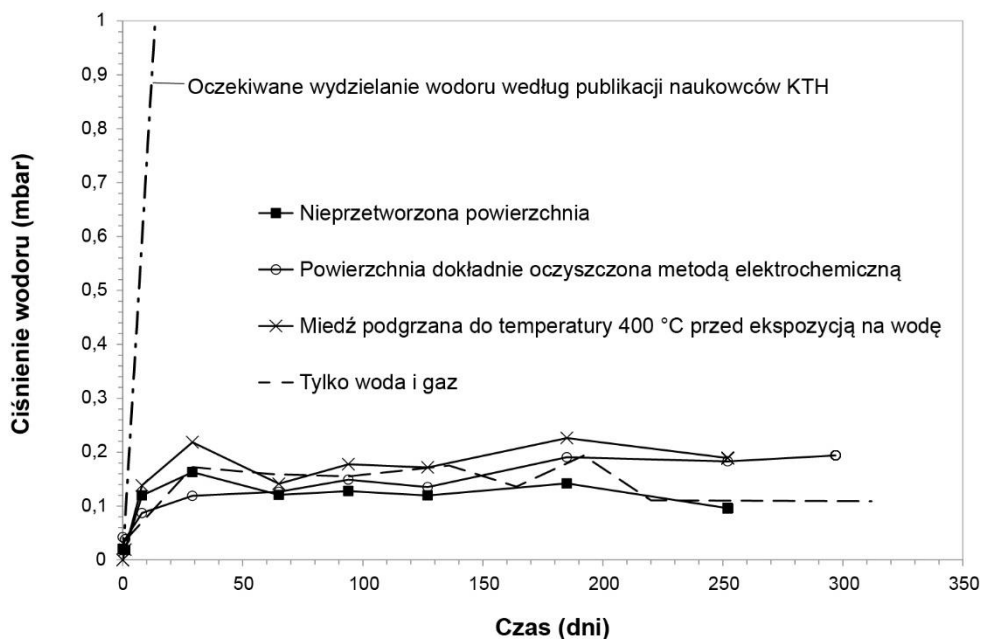
Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

dokładnie oczyszczona, druga podgrzana do temperatury 400 °C, a inna nie została poddana żadnemu działaniu. Jak pokazano na rysunku, każda daje ciśnienie wodoru pomiędzy 0,1 i 0,2 milibara. Rysunek przedstawia również przerywaną krzywą ciśnienia z probówki, która nie zawiera miedzi, a jedynie wodę i azot, i która wydaje się zachowywać podobnie do próbek z miedzią. W związku z tym stwierdzono, że wodór nie wydzielił się w ilości powyżej niskiego poziomu tła w eksperymencie, gdy miedź była obecna w probówkach. Na rysunku znajduje się również linia przerywana, która szybko wzrasta. Pokazuje presję, jakiej można się spodziewać zgodnie z wnioskami naukowców KTH. Użyli oni tę samą jakość miedzi, a ich próbki były, zgodnie z ich publikacjami naukowymi, całkowicie nieprzetworzone przed narażeniem na działanie wody.



**Rysunek 4-2.** Zamknięte probówki testowe z miedzią w czystej, beztlenowej wodzie. Pokłady gazu o wielkości 6 cm<sup>3</sup> z górnej części probówki są regularnie pobierane. Dwie probówki zawierają tylko wodę i gaz. Zdjęcie zostało wykonane, gdy miedź była wystawiona na działanie czystej, beztlenowej wody w temperaturze 70 °C przez 27 miesięcy.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły



**Rysunek 4-3.** Wydzielanie wodoru z folii miedzianych o różnych obróbkach wykonanych przed wystawieniem na czystą, beztlenową wodę. Linia przerywana, która gwałtownie wzrasta, pokazuje oczekiwane wydzielanie wodoru według publikacji naukowców KTH.

Ze wszystkich badanych gatunków miedzi, jeden wykazał wydzielanie wodoru: Kiedy badano blachę miedzi kapsuły SKB o grubości 2 milimetrów, uzyskano wydzielanie wodoru, które było znacznie wyższe niż tło. Jednakże to wydzielanie wodoru można zaobserwować niezależnie od tego, czy próbki są zanurzone w wodzie, czy też znajdują się w próbówce zawierającej tylko azot. Oczywistym wnioskiem jest to, że w tym przypadku wodór pochodzi z samego materiału miedzianego, a nie z jakiegokolwiek reakcji między miedzią a wodą. Około 0,05 promila atomów w materiale kapsuły jest wodorem, a znaczna część z nich jest emitowana, jeśli miedź jest podgrzewana do temperatury około 400 °C w próżni przez jedną godzinę. Po takiej obróbce cieplnej w testach próbek nie obserwuje się wydzielania wodoru, niezależnie od tego, czy miedź jest wystawiona na działanie wody, czy nie. Nie można wykluczyć, że inne gatunki miedzi w badaniach również emitowały niewielką ilość wodoru. Próbki te były jednak tylko 1/20 grubości próbki miedzi kapsuły, co przy tej samej zawartości wodoru dałoby odpowiednio mniejsze całkowite uwolnienie wodoru. Jest ono zbyt małe, aby można było to zmierzyć w eksperymencie. SKB przeprowadziła również obliczenia, w jaki sposób miedź kapsuły emituje wodór, co dodatkowo wzmacnia interpretację eksperymentów z miedzią kapsuły SKB.<sup>7</sup>

Niedawno opublikowane<sup>8</sup> badania w Finlandii przy użyciu metody opracowanej przez Micans potwierdzają powyższe wyniki.

### **Poszukiwanie nieznanymi związków miedzi**

SKB zbadała również, czy między miedzią, tlenem i wodorem może istnieć jakikolwiek dotychczas nieznanymi związek chemiczny o właściwościach zgodnych z interpretacją ich doświadczeń przez naukowców z KTH. Kwestia ta została zbadała zarówno doświadczalnie, jak i teoretycznie przez innych badaczy z KTH w ciągu kilku lat, w wyniku czego nie znaleziono żadnego stabilnego, dotychczas nieznanego związku. Wyniki zostały opublikowane w literaturze naukowej.

<sup>7</sup> **Hedin A, 2019.** Obliczenia zakresu odgazowywania wodoru z Cu-OFP. SKBdoc 1716281 wer. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

<sup>8</sup> **Ollila K.** Eksperymenty korozji miedzi w czystej wodzie w warunkach beztlenowych, Posiva WR 2018-19.



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

## **Pozostałe**

SKB zwróciła uwagę w literaturze naukowej, jak i w bezpośrednich kontaktach na niedociągnięcia w publikacjach badaczy KTH. Na te uwagi ogólnie udzielono jedynie krótkiej i ogólnej odpowiedzi, więc nadal istnieje kilka niejasności co do sposobu, w jaki eksperymenty zostały rzeczywiście przeprowadzone.

SKB opublikowała niedawno krótki artykuł naukowy na temat<sup>9</sup> korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie, którego współautorem jest również grupa badawcza z Uniwersytetu w Uppsali, ponieważ część ich wyników została opublikowana po raz pierwszy w artykule. W artykule opisano próby grupy z Uppsala dotyczące powtórzenia wyników badań KTH, eksperymenty próbek w Micans i poszukiwanie nieznanych związków miedzi. Omówiono tam również niedociągnięcia i niejasności w publikacjach badaczy KTH. Omawiane są również inne eksperymenty w tej dziedzinie, w tym krótka próba naśladowania eksperymentów naukowców KTH w Studsvik.

Na końcu SKB opublikowała obliczenia pokazujące, że nawet gdyby naukowcy z KTH mieli rację w swoich twierdzeniach, zakres zaproponowanego procesu korozji, opartego na danych od naukowców z KTH, wyniósłby tylko około milimetra na milion lat przy temperaturach, które będą panować w środowisku repozytorium. Milion lat to okres, który analiza bezpieczeństwa repozytorium musi obejmować zgodnie z przepisami dotyczącymi SSM.

## **Wnioski końcowe**

Eksperymenty wykorzystane przez grupę badawczą z KTH na poparcie twierdzenia, że miedź w czystej wodzie koroduje znacznie bardziej niż zakłada to nauka, zostały powtórzone w bardziej kontrolowanych warunkach. Wtedy nie zaobserwowano ani sygnału (wydzielania wodoru), który badacze zinterpretowali jako korozję miedzi, ani związków miedzi, które powstałyby, gdyby wystąpiła korozja. Alternatywne metody badania domniemanego zjawiska korozji również nie przyniosły rezultatów, które można interpretować jako korozję.

Dokładne poszukiwania, zarówno doświadczalnie, jak i teoretyczne, dotyczące hipotetycznych, nieznanych dotąd związków między miedzią, tlenem i wodorem (które mogłyby wyjaśnić nieznanie wcześniej zjawisko korozji) nie doprowadziły do takiego odkrycia.

Nawet gdyby naukowcy z KTH mieli rację, zakres takiej korozji w repozytorium obejmowałby tylko głębokość wynoszącą około jednego milimetra na milion lat, co nie wpłynęłoby na zdolność hermetyzacji kapsuły ani na długoterminowe bezpieczeństwo.

Wszystkie te wyniki zostały opublikowane w literaturze naukowej. Również niedociągnięcia w próbach, które rzekomo przynoszą rezultaty sprzeczne z uznaną nauką, zostały wskazane w publikacjach naukowych.

Jest to jasny wniosek SKB, że nie ma naukowego poparcia dla twierdzenia, że miedź koroduje w czystej, beztlenowej wodzie w jakikolwiek inny sposób niż zakłada to nauka, czyli w niewymierzalnie małym zakresie.

---

<sup>9</sup> Hedin A, Johansson A J, Lilja C, Boman M, Berastegui P, Berger R, Ottosson M, 2018. Korozja miedzi w czystej wodzie wolnej od O<sub>2</sub>? Corrosion Science 137, 1–12.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

## 5 Korozja z powodu reakcji z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję wżerową

### **Czego dotyczy ta kwestia?**

Korozja wżerowa jest formą lokalnej korozji, która oznacza, że korozja jest zlokalizowana w pewnych punktach i dlatego powoduje głębszą inwazję niż w przypadku bardziej równomiernego wystąpienia na większej powierzchni. Ogólnie rzecz biorąc, aby doszło do lokalnej korozji, warstwa substancji (produktów korozyjnych) utworzona podczas korozji musi mieć działanie ochronne, pasywujące powierzchnię metalu. W miejscach na powierzchni, gdzie defekty lub „otwory” występują w tej warstwie ochronnej, metal rozpuszcza się i wżerki pojawiają się na powierzchni metalu. Lokalna korozja może występować w różnych formach, z głębokimi wżerkami lub płytkimi wżerkami, które nie wchodzi głęboko.

### **Ocena MMD dotycząca tej kwestii**

*Badanie SKB wykazało, że ryzyko korozji wżerowej z powodu reakcji z siarczkiem jest na ogół niskie przy poziomach siarczku i chlorku, które mogą wystąpić w środowisku repozytorium. Jednak SSM zidentyfikował dwa przypadki, w których stężenie siarczków może być tak wysokie, że mogą tworzyć się pasywne warstwy siarczku i tworzyć ryzyko korozji wżerowej. Jednym z przypadków jest podwyższone stężenie z powodu redukcji siarczanu przez drobnoustroje przed osiągnięciem pełnego ciśnienia pęcznienia. Drugim przypadkiem jest dyfuzja siarczku w stanie gazowym, utworzonego w wypełniaczu, w nienasycone otwory składowiska. Peter Szakálos i inni również wskazywali na te zagrożenia. Dochodzenie wykazało, że istnieje ryzyko korozji wżerowej. Sąd ds. gruntów i środowiska zgadza się z oceną SSM, zgodnie z którą potrzebne są dodatkowe dowody dotyczące zmienności i niepewności poziomów siarczku i chlorków w tych dwóch przypadkach wymienionych powyżej oraz konsekwencji powstawania biernej warstwy siarczkowej. Sąd uważa poniżej, że istnieje znaczna niepewność co do tego, w jaki sposób korozja naprężeniowa może wpłynąć na zdolność ochronną kapsuły. Warunki wystąpienia korozji wżerowej i korozji naprężeniowej w środowisku repozytorium są podobne pod względem warunków chemicznych i ryzyka powstawania warstw pasywujących. Korozja wżerowa jest również procesem, który po jej wystąpieniu może trwać przez długi czas w środowisku repozytorium. Może być również stosunkowo szybka. Ogólnie rzecz biorąc, istnieje znaczna niepewność, co do korozji wżerowej w wyniku reakcji z siarczkiem. W ocenie tej bierze się pod uwagę, że czas do powstania pełnego ciśnienia pęcznienia jest stosunkowo ograniczony, tj. czas, w którym istnieje zwiększone ryzyko mikrobiologicznej redukcji siarczanów i dyfuzji gazowego siarczku.*

W opinii MMD stwierdzono również, że potrzebne są dodatkowe dowody na wpływ efektu sauny na korozję wżerową.

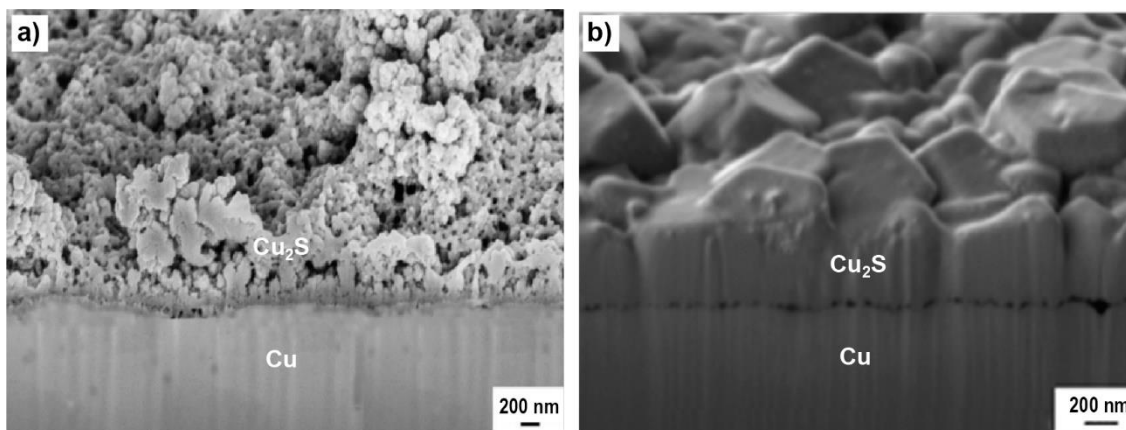
Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

### Poprzednie i nowe badania

Na wstępie należy zauważyć, że w części 3 efekt sauny jest oceniony jako nieistotny w ośrodku repozytorium KBS-3 w Forsmarku. Wpływ efektu sauny na korozję wżerową nie jest zatem przedmiotem dalszych dyskusji.

Korozja miedzi w roztworze siarczku była badana przez SKB przez wiele lat, głównie poprzez pracę na University of Western Ontario w Kanadzie. Miedź kapsuły była eksponowana na działanie roztworów siarczku o różnych stężeniach. Badając właściwości produktów korozyjnych i ich wzrost, można zrozumieć mechanizmy korozji i to, co kontroluje reakcje chemiczne. Wykazano, że przepływ siarczku w kierunku powierzchni miedzi ma kluczowe znaczenie. Jeśli stężenie siarczku jest niskie, przepływ siarczku będzie niski i powstanie porowata warstwa produktów korozji (siarczek miedzi,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ), patrz Rysunek 5-1.a. Jeśli stężenie siarczku jest wysokie, przepływ siarczku będzie wyższy i może powstać bardziej zwarta warstwa, patrz Rysunek 5-1.b.

Aby doszło do korozji wżerowej w tradycyjnym znaczeniu (angielski; pitting), warstwa produktów korozji musi wykazywać pasywność, to znaczy, że uformowana warstwa zapobiega dalszej korozji. Warstwa musi być zwarta, ale musi mieć również specjalne właściwości elektryczne. Takie warstwy można było wytwarzać w eksperymentach, w których do próbki miedzi przykładano się napięcie elektryczne i w sztuczny sposób zwiększa się przepływ siarczków przez obracanie próbki, ale nie przy zwykłej ekspozycji miedzi, bez przyłożonego napięcia. Istnieją inne opublikowane badania, które sugerują, że zaobserwowano pasywność, ale wnioski te są wątpliwe. Dzieje się tak dlatego, że właściwości elektryczne tych warstw nie zostały wystarczająco dokładnie zbadane, a w kilku przypadkach wnioski są wyciągane po interpretacji wyników za pomocą modelu (tak zwanego Point Defect Model), który jest ważny tylko dla warstw pasywnych, co oznacza formę okrężnego rozumowania.



**Rysunek 5-1.** Przekrój powierzchni miedzi wystawionej na działanie roztworu siarczku, a) porowata folia po 4000 godzinach uformowana przy stężeniu siarczku  $5 \times 10^{-5}$  mol/l, b) zwarta warstwa po 1691 godzinach uformowana przy stężeniu siarczku  $5 \times 10^{-4}$  mol/l. Zdjęcia zostały wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego.

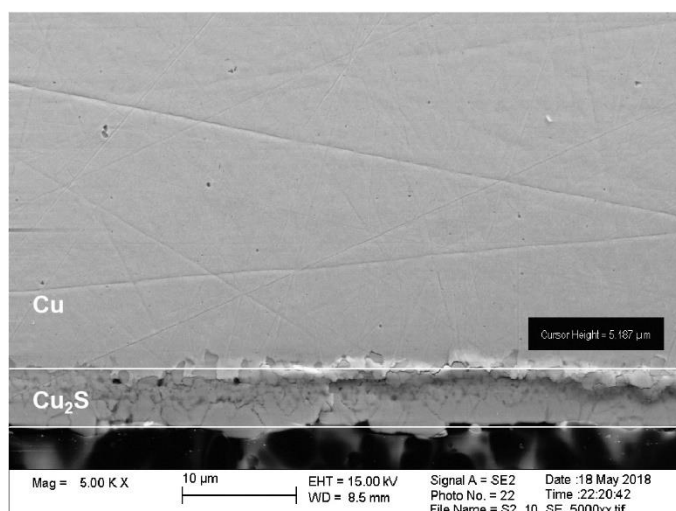
Aby lepiej zrozumieć, czy wżery występują przy korozji miedzi w roztworze siarczkowym, SKB przeprowadziła trzy nowe badania, w których miedź była wystawiona na działanie roztworu

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

siarczku,<sup>10</sup> a także na gaz siarczkowy i roztwór z bakteriami redukującymi siarczan (SRB)<sup>11</sup>. Na pierwszym etapie badano również różne metody usuwania produktów korozji bez uszkodzenia powierzchni lub tworzenia nowych wżerów.

Przy wystarczająco wysokich stężeniach siarczku zaobserwowano wżery, które można interpretować jako korozję mikrogalwaniczną, która jest łagodną formą lokalnej korozji i która prawdopodobnie wystąpiła ze względu na różną grubość warstwy. Wymagane do tego stężenie siarczku było nieco wyższe niż najwyższe oczekiwane w wodach podziemnych w Forsmarku. Najgłębsze wżery wynosiły około 0,006 milimetra, czyli prawie 20 razy głębiej niż średnia korozja powierzchni.

Miedź wystawiona na działanie siarczku w stanie gazowym, przy wysokim i niskim stężeniu, wykazała jedynie nierównomiernie skorodowaną powierzchnię, patrz Rysunek 5-2, i zgodnie z oczekiwaniami z większą korozją przy wyższym stężeniu siarczku i dłuższym czasie ekspozycji.



**Rysunek 5-2.** Przekrój powierzchni miedzi po 30 dniach ekspozycji w 1% siarczku w stanie gazowym (wyższe stężenie) przy wilgotności względnej 75% i temperaturze 85 °C.

W doświadczeniach z bakteriami redukującymi siarczan, miedź była wystawiona na działanie roztworu zawierającego takie bakterie i gdzie roztwór był albo treściwy (wyższe stężenie siarczanu i węgla organicznego) lub ubogi w składniki odżywcze (stężenie siarczanu i węgla organicznego obecne w wodach gruntowych na głębokościach składowania). Uwzględniono również próbki referencyjne z roztworem treściwym, ale bez bakterii, a także z dodatkiem siarczku. Wyniki wykazały, że na próbkach miedzi wystawionych na działanie treściwego roztworu znajdowały się wżery wykazujące lokalną korozję. Wynik ten jest również zgodny z kilkoma innymi badaniami naukowymi, gdzie zauważono aktywność bakterii i tworzenie się biofilmu na powierzchni miedzi. Wspólne dla wszystkich badań, w których zaobserwowano biofilm i/lub miejscową korozję z powodu aktywności bakteryjnej, jest to, że stężenie siarczku w roztworze było wyższe niż najwyższe zmierzone w wodach podziemnych w Forsmarku. Próbki w roztworze ubogim w składniki odżywcze (podobnym do wód gruntowych) nie miały takich wżerów. Jednakże wszystkie próbki miały wżery i zadrapania, które prawdopodobnie powstały

<sup>10</sup> **Chen J, Guo M, Martino T, Ramamurthy S, Noël J J, Shoesmith D, Lilja C, Johansson A J, 2019.** Rozkład uszkodzeń korozyjnych powierzchni miedzianych poddanych działaniu wodnych roztworów siarczków. SKBdoc 1706406, ver. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

<sup>11</sup> **Gordon A, Johansson J, Pahverk H, Börjesson E, Sjögren L, 2018.** Morfologia korozji miedzi w beztlenowych środowiskach siarczkowych. SKB TR-18-14, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

podczas przygotowywania próbek, tj. przypominały całkowicie niewyeksponowane próbki referencyjne, które również były badane.

### **Miejscowa korozja w warunkach repozytorium**

W szczególności, z badań nad tworzeniem się warstw korozyjnych, możliwe było określenie, jak wysokie przepływy siarczku do powierzchni kapsuły są konieczne, aby występowały różne rodzaje mechanizmów korozji. Niższe stężenia siarczku w roztworze powodują niższe przepływy siarczku w kierunku powierzchni kapsuły, a wyższe stężenia generują wyższe przepływy. Bentonit wokół kapsuły w repozytorium ograniczy przepływ wód podziemnych zawierających siarczek, a tym samym zapobiegnie procesom korozji wymagającym wysokiego przepływu siarczku. Ponadto nowe obliczenia modelu zdolności nienasyconego buforu do transportu siarczku w stanie gazowym pokazują, że jest on znacznie mniejszy niż wcześniej pesymistycznie zakładany przez SKB.<sup>5</sup>

Aby doszło do korozji wżerowej tradycyjnego typu, wymagana jest zwarta warstwa produktów korozji, która ponadto sprawia, że powierzchnia miedzi jest pasywna. Nigdy nie zaobserwowano zaistnienia pasywności jako spontanicznego mechanizmu korozji miedzi w roztworze siarczku. Ponadto zwarta warstwa produktów korozji, która byłaby wymagana, zakłada przepływ siarczku co najmniej 100 razy wyższego niż przepływ uzyskany z nienaruszonego buforu bentonitowego w repozytorium, czy to nienasyconego, czy w pełni nasyconego wodą. Natężenie przepływu siarczku jest również zbyt niskie, aby wystąpiła korozja mikrogalwaniczna, jeśli bufor jest nienaruszony.

Eksperymenty laboratoryjne wykazały, że miedź w roztworze siarczku reagowała w sposób, który można interpretować jako korozję mikrogalwaniczną. Nie wykluczono całkowicie, że korozja mikrogalwaniczna może wystąpić przy najwyższych przepływach siarczku (kombinacja maksymalnego stężenia siarczku i maksymalnego przepływu wód gruntowych) obliczonych dla repozytorium. Dotyczy to niewielkiej ilości otworów składowiska, w których bufor może zostać utracony w wyniku erozji materiału buforowego (patrz część 2). Ponieważ w trakcie dochodzenia nie można było całkowicie wykluczyć, że korozja mikrogalwaniczna może wystąpić w środowisku repozytorium, zbadano konsekwencje włączenia tego do obliczeń ryzyka z pesymistycznymi założeniami, patrz więcej w części 9.

Jeżeli chodzi o korozję miejscową spowodowaną aktywnym biofilmem zawierającym bakterie redukujące siarczan na powierzchni kapsuły bezpośrednio wystawionej na działanie wód podziemnych, nie uważa się, że może wystąpić w repozytorium. Nie zaobserwowano ani biofilmu, ani lokalnej korozji w obecności tych bakterii w warunkach odpowiadających warunkom panującym w repozytorium.

### **Wnioski końcowe**

Na podstawie wcześniejszych i nowych badań korozji miedzi w roztworze siarczkowym bez obecności bakterii redukujących siarczan możliwe jest wskazanie, jak duże przepływy siarczku są wymagane do pojawienia się różnych form korozji. Porównując je następnie z przepływami siarczku możliwymi w repozytorium, wyciąga się następujące wnioski dotyczące korozji wżernej:

- Zarówno wcześniejsze, jak i ostatnie badania pokazują, że w warunkach panujących w składowisku nie może utworzyć się pasywująca warstwa siarczku. Pojawienie się warstwy pasywnej zaobserwowano tylko w sztucznych warunkach elektrycznych w laboratorium. W związku z tym uważa się, że zwykła forma korozji wżernej (angielski; pitting) nie może wystąpić w żadnych warunkach w repozytorium.
- Jeśli bentonit jest nienaruszony i niezależnie czy jest nienasycony (jak to jest początkowo) czy nasycony wodą, przepływ siarczku jest tak mały, że nie może wystąpić korozja mikrogalwaniczna, łagodna forma lokalnej korozji.



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

- W przypadku nielicznych otworów składowiska odpadów, w których bufor może zostać utracony w wyniku erozji materiału buforowego po upływie zazwyczaj 100 000 lat, nie można było wykluczyć, że korozja mikrogalwaniczna może wystąpić w przypadku największych przepływów siarczku. Proces ten został zatem uwzględniony w obliczaniu ryzyka, patrz część 9.

Nowe badanie tworzenia siarczku przez drobnoustroje potwierdza, że nie występuje to w warunkach nienasyconych. W warunkach nasyconych zarówno stężenie siarczanów, jak i dostępność składników odżywczych są zbyt niskie, aby biofilm, który mógłby spowodować lokalną korozję, tworzył się na powierzchni miedzi.

## 6 Korozja naprężeniowa spowodowana reakcją z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję naprężeniową

### **Czego dotyczy ta kwestia?**

Korozja naprężeniowa jest zjawiskiem, które wymaga nie tylko środowiska korozyjnego, ale także naprężeń rozciągania w materiale, czyli sił mechanicznych, które chcą rozciągnąć materiał. W przypadku miedzi ta forma korozji może wystąpić w warunkach utleniania w obecności tlenu w roztworach na przykład z amoniakiem, co zostało opracowane w podłożu do analizy bezpieczeństwa SR-Site. W przypadku miedzi w roztworze siarczku przedstawiono kilka badań, w których obserwacje zostały zinterpretowane jako korozja naprężeniowa. Tradycyjnie korozja naprężeniowa jest badana za pomocą tak zwanych powolnych testów rozciągania dowolnego typu drążka testowego w określonym środowisku chemicznym, aby zobaczyć, w jaki sposób wpływa to na właściwości mechaniczne. Często wyciąga się drążek testowy, aż pęknie.

Mikrostruktura miedzi jest również ważna dla tej kwestii. Miedź kapsuły składa się z ziaren kryształu o wielkości zazwyczaj 100 mikronów ( $\mu\text{m}$ ), czyli 0,1 milimetra. Korozja naprężeniowa może wystąpić zarówno w przypadku pęknięć między ziarnami, jak i poprzez nie. Inną formą korozji jest korozja graniczna ziarna, co oznacza, że korozja występuje tylko wzdłuż granic ziarena i bez połączenia z napręciami mechanicznymi.

### **Ocena MMD dotycząca tej kwestii**

*Sąd ds. gruntów i środowiska uważa, że ryzyko korozji naprężeniowej jest niewielkie, jeśli dopływ siarczków jest kontrolowany dyfuzyjnie, tj. powolny, co według oceny odnosi się do nasyconych otworów składowania. Niemniej jednak SSM ocenił, że ryzyko korozji naprężeniowej w środowisku siarczkowym jest najbardziej znaczącą niepewnością. Sąd zgadza się z oceną SSM, że istnieje ryzyko korozji naprężeniowej. Dotyczy to między innymi przypadku Mechanizmu Aaltonena i zmienności warunków chemicznych. SKB nie przedstawiła dowodów i argumentów, które wykluczały ryzyko korozji naprężeniowej w środowisku siarczkowym. Interpretacja testów MiniCan przez Petera Szakálosa i in., że obrazy mikroskopowe z eksperymentów wskazują, że pojawiły się pęknięcia naprężeniowe nie może być zignorowana. Nie jest pewne, czy wyniki badań MiniCan można uznać za wykazujące, że korozja naprężeniowa jest wykluczona. Sąd uważa, że istnieje ryzyko korozji naprężeniowej ze względu na warunki chemiczne w środowisku repozytorium, które powodują pojawianie się warstw pasywnych. Korozja naprężeniowa, podobnie jak korozja wżerowa, jest również procesem, który po jej wystąpieniu może trwać przez długi czas. Może być również stosunkowo szybka. Ogólnie rzecz biorąc, istnieje znaczna niepewność, co do korozji naprężeniowej spowodowanej reakcją z siarczkiem. Nie można wykluczyć, że znaczna ilość kapsuł ulegnie awarii w ciągu 100 000 lat. Potrzebna jest dodatkowa*

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

*dokumentacja w celu sprawdzenia założenia SKB, że korozja naprężeniowa w redukujących warunkach nie zagraża integralności kapsuł.*

W opinii Sądu ds. gruntów i środowiska stwierdzono również, że należy ocenić wpływ efektu sauny na korozję naprężeniową.

### **Poprzednie i nowe badania**

Na wstępie należy zauważyć, że:

- W części 3 efekt sauny jest uważany za nieistotny w repozytorium KBS-3 w Forsmarku, dlatego efekt sauny na korozję naprężeniową nie jest tutaj dalej omawiany.
- Zgodnie z wnioskami zawartymi w części 5, zarówno wcześniejsze, jak i ostatnie badania pokazują, że w warunkach repozytorium nie może się utworzyć pasywna warstwa siarczku.

W ciągu ostatnich 10 lat pięć różnych grup badawczych przeprowadziło eksperymenty laboratoryjne w celu zbadania, czy korozja naprężeniowa może wystąpić w miedzi wystawionej na roztwór siarczkowy. Wyniki nie były jednak spójne. Japońskie badania z lat 2007–2008 odnotowały małe powierzchniowe pęknięcia, ale kilka innych obserwacji sugeruje, że mogły to być reakcje na granicach ziaren, a nie tradycyjna korozja naprężeniowa. SKB zleciła zespołowi z University of Toronto w Kanadzie próbę powtórzenia japońskich prób w latach 2012–2013, ale pomimo agresywnych warunków i zróżnicowanych czynników, nie stwierdzono pęknięć. Grupa z Instytutu Badawczego VTT w Finlandii próbowała również powtórzyć japońskie badania w latach 2011–2014. Początkowo opublikowano wyniki wskazujące, że siarczek szybko przeniknie do materiału, ale autorzy mogli stwierdzić w późniejszej publikacji, że było to spowodowane niewłaściwą metodą przygotowania próbki.

W Studsvik AB, SSM zlecił dalsze badania i materiały z odsłoniętych prętów testowych, zostały również zbadane na Uniwersytecie Aalto w Finlandii. W tym przypadku zastosowano inny typ pręta testowego o stożkowym kształcie i różne stężenia siarczku. W przeciwieństwie do poprzednich badań, bufor fosforanowy był również stosowany w celu utrzymania stabilnego pH (kwasowości) w roztworze siarczkowym otaczającym pręt testowy. Przy stężeniu siarczku  $10^{-3}$  mol/l odnotowano kilka małych pęknięć o maksymalnej głębokości 0,05 milimetra. ( $10^{-3}$  mol/l jest dziesięć razy wyższe niż maksymalne stężenia oczekiwane w repozytorium w Forsmarku). Przy 10-krotnie niższym stężeniu siarczku ( $10^{-4}$  mol/l) odnotowano pewne drobne defekty na powierzchni pręta testowego, ale ponieważ stwierdzono je również głębiej w materiale, autorzy doszli do wniosku, że miały one inną przyczynę (np. produkcja pręta testowego). Ponadto wyniki interpretowano w ten sposób, że między tymi stężeniami siarczku istniał jakiś próg pojawienia się powierzchniowych pęknięć. Na Uniwersytecie Aalto zawartość wodoru badano w różnych próbkach, a autorzy twierdzili, że po ekspozycji w roztworze siarczku stwierdzono wyższe poziomy wodoru w miedzi. Jednak wyniki są wątpliwe, ponieważ nawet niewyekspozowane części prętów testowych miały taką samą zawartość wodoru jak ekspozowane części, a wódór nie może poruszać się tak szybko w materiale, jak byłoby to wymagane dla wodoru pobranego w odsłoniętej części pręta testowego do rozproszenia (wędrowania) do niewyekspozowanej części.

W ciągu ostatnich trzech lat SKB zleciło Swerea KIMAB (obecnie RISE KIMAB) powtórzenie zarówno japońskich prób, jak i badań przeprowadzonych w Studsvik.<sup>12,13</sup> Badania

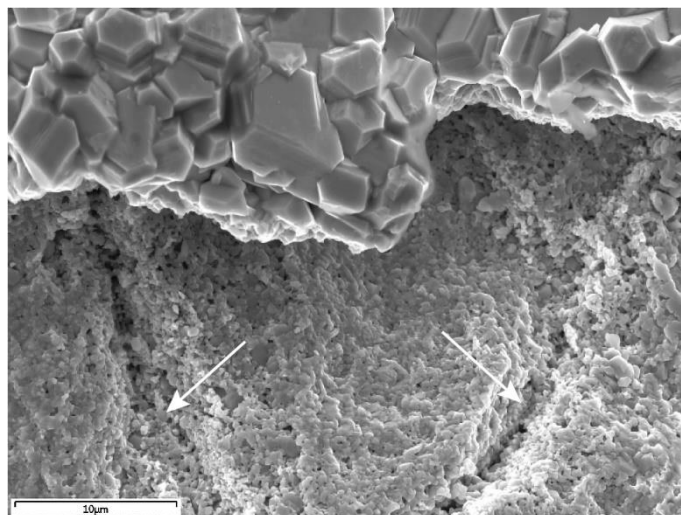
<sup>12</sup> Taxén, C, Flyg J, Bergqvist H, 2018. Badanie korozji warunków skrajnych miedzi w roztworach siarczku. SKB TR-17-16, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

<sup>13</sup> Taxén, C, Flyg J, Bergqvist H, 2019. Badanie korozji warunków skrajnych miedzi w roztworach siarczku. SKB TR-19-13, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

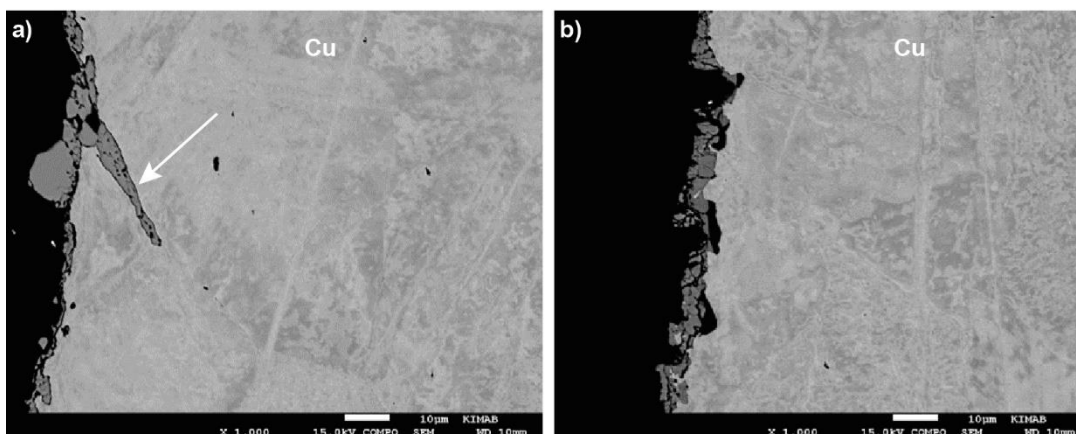
przeprowadzono za pomocą okrągłych i płaskich prętów testowych, z różną obróbką metalu miedzianego, w różnych temperaturach, z różnymi stężeniami siarczku oraz z buforem fosforanowym do regulacji pH i bez niego. Pręty testowe zostały zbadane za pomocą mikroskopu optycznego i skaningowego mikroskopu elektronowego. Kiedy pręty testowe zostały poddane pęknięciom, to były one twarde (ciągliwe), a nie kruche, co ma zwykle miejsce, gdy pęknięcia, które się pojawiają, osłabiają materiał. Pojawiły się oznaki reakcji na granicach ziaren, patrz Rysunek 6-1., co jest podobne do tego, co inne grupy zinterpretowały jako korozję naprężeniową. W badaniach bufora fosforanowego stwierdzono powierzchniowe defekty przy wysokiej zawartości siarczku ( $10^{-3}$  mol/l lub wyższe), ale nie przy niskiej zawartości siarczku ( $2 \times 10^{-5}$  mol/l), patrz Rysunek 6-2.

Pozornie sprzeczne wyniki różnych badań można w dużej mierze wytłumaczyć mechanistycznym opisem korozji, w którym transport siarczku do pęknięcia odgrywa centralną rolę. Jeśli transport jest wystarczająco szybki, to znaczy, jeśli przepływ siarczku do pęknięcia jest wystarczająco wysoki, początkowo może wystąpić w pewnej mierze korozja granic ziaren (korozja międzykrystaliczna). Przepływ siarczku do dna pęknięcia zostanie następnie zmniejszony, zarówno przez uformowane produkty korozji, jak i przez pogłębienie pęknięcia, co ostatecznie powoduje zatrzymanie zjawiska.



**Rysunek 6-1.** Powierzchnowe rowki na miedzianym drążku testowym po badaniu na powolne rozciąganie w roztworze siarczku  $10^{-2}$  mol/l w temperaturze  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Strzałki wskazują na powierzchniowe ataki na granicach ziaren.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły



**Rysunek 6-2.** Przekrój wzdłuż pręta testowego po przeprowadzeniu badania w roztworze a)  $10^{-3}$  siarczek mol/l, b) siarczek  $2 \times 10^{-5}$  mol/l. Obie próbki były poddane temperaturze 90 °C. Strzałka w a) oznacza pęknięcie.

Nie można całkowicie wykluczyć, że kapsuła jest narażona na naprężenia rozciągające, które przechodzą przez całą grubość materiału w repozytorium. Jednakże maksymalny przepływ siarczku, który może wystąpić, nawet w przypadku erozji bufora ( $10^{-9}$  mol/(m<sup>2</sup> s)), jest co najmniej 1000 razy niższy niż przepływy obecne w doświadczeniach laboratoryjnych, w których zgłoszono małe pęknięcia.

Już w wniosku SKB z 2011 r. dyskutowano między innymi o tym, czy tak zwany mechanizm Aaltonena może być mechanizmem korozji naprężeniowej. Mechanizm polega na wzroście pęknięć w wyniku przemieszczania się do pęknięć nadmiaru wakansów, czyli atomowych „luk” w sieci krystalicznej. SKB zleciła ekspertom VTT na ponowny przegląd<sup>14</sup> opublikowanych badań. W wyniku tego ustalono, że testy laboratoryjne, w których badano wpływ wakansów, zostały przeprowadzone w warunkach, które nie mogą wystąpić w repozytorium.

W odniesieniu do drobnych pęknięć zaobserwowanych w niektórych próbach MiniCan w laboratorium Äspö, SKB informowało wcześniej, że nie są one uważane za spowodowane korozją, ale prawdopodobnie powstały podczas produkcji próbek.

### **Wnioski końcowe**

Chociaż istnieją pewne badania informujące o powierzchniowych pęknięciach miedzi narażonej na napięcia rozciągające i wysokie stężenie siarczku (a tym samym wysoki przepływ siarczku), nie ma eksperymentalnego wsparcia dla pojawienia się korozji naprężeniowej na miedzi w roztworze siarczku. Przede wszystkim złamania mechaniczne, które występują podczas eksperymentów, nie są kruche, ale twarde (plastyczne).

Znacznie bardziej rozsądne i spójne jest interpretowanie pęknięć obserwowanych doświadczalnie w wypadku równoczesnego wyeksponowania na siarczek i naprężenia rozciągającego jako korozji granic ziaren. Zjawisko to wymaga pewnego przepływu siarczku, a przepływy w środowisku repozytorium są znacznie niższe niż jest to do tego wymagane. Nawet w eksperymentach, gdzie przepływ jest wystarczająco wysoki, zjawisko ogranicza się do powierzchniowych pęknięć, ponieważ utworzone produkty korozji następnie tłumią przepływ w pęknięciach.

<sup>14</sup> **Huutilainen C, Saario T, Toivonen A, 2018.** Przegląd mechanizmu Aaltonena. SKB R-18-03, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

Podsumowując, wnioski są zatem następujące:

- Powierzchowne pęknięcia zaobserwowane w niektórych próbach nie są korozją naprężeniową, ale można je wytłumaczyć jako formę korozji granic ziaren (korozji międzykrystalicznej). Wymaga ona przepływów siarczku co najmniej 1000 razy wyższych niż maksymalna, jaka może wystąpić w repozytorium.
- Nawet przy tak wysokich przepływach doświadczalnych zjawisko zatrzymuje się, ponieważ produkty korozyjne zapobiegają ciągłemu przepływowi siarczku w stosunkowo powierzchniowych, mikroskopijnych pęknięciach, które powstały.
- Ani korozja naprężeniowa, ani korozja granic ziaren nie stanowią zagrożenia dla integralności kapsuły w repozytorium KBS-3 w Forsmarku.
- Nowa ocena ekspertów pokazuje, że badania, na których opiera się tak zwany mechanizm Aaltonena, odnoszą się do warunków, które nigdy nie mogą wystąpić w repozytorium.

## 7 Kruchość wodorowa

### *Czego dotyczy ta kwestia?*

Wodór może istnieć w miedzi jako pojedyncze atomy wodoru, H, lub jako cząsteczki wodoru, H<sub>2</sub>. Wodór, jeśli występuje w wystarczających stężeniach, może niekorzystnie wpływać na właściwości mechaniczne metalu. Jest to dobrze znane zjawisko, które odnosi się do metali w ogóle. Wodór atomowy może się połączyć z różnego rodzaju defektami i zanieczyszczeniami w miedzi. Może również tworzyć molekularny, gazowy wodór w mikroskopijnych porach w metalu. Może to mieć negatywny wpływ na właściwości mechaniczne miedzi i jest powszechnie określane jako kruchość wodorowa. Jednak miedź należy do grupy metali, które są bardzo niechętne do absorpcji wodoru.

Wodór, który reaguje z tlenem w metalu może tworzyć wodę molekularną (w postaci pary wodnej) w mikroporach, co może mieć również negatywny wpływ na właściwości mechaniczne. Zjawisko to jest czasami nazywane chorobą wodorową.

Kruchość wodorowa nie dotyczy miedzi i wielu innych rodzajów metali oraz stopów o podobnej strukturze atomowej, takich jak stopy aluminium, niektóre stale nierdzewne i nikiel, a kruchość ogólnie nie jest uważana za problem dla tego typu materiałów w zastosowaniach przemysłowych. Dotyczy to również miedzi o niskim poziomie tlenu, tak zwanej miedzi beztlenowej.

Zgodnie z wymaganiami dotyczącymi miedzi beztlenowej stosowanej w kapsułach, maksymalnie 0,6 części na milion masy może być wodorem. Podobny wymóg na tlen wynosi 5 części na milion. Wymagania te służą zapobieganiu kruchości wodorowej i choroby wodorowej. Podobne wymagania dotyczące zawartości tlenu są stosowane przez wiele lat w przypadku miedzi w różnych zastosowaniach. Było to tak udane, że kruchość wodorowa nie jest już uważana za problem techniczny w miedzi, o czym świadczy fakt, że kruchość wodorowa miedzi prawie nie wzbudza zainteresowania naukowego w ciągu ostatnich 40 lat.

Materiał wyjściowy do kapsuł miedzianych jest wystarczająco czysty, aby zapobiec problemowi kruchości wodorowej. Konieczne jest również zapewnienie, że materiał nie zostanie naruszony podczas produkcji kapsuł lub w repozytorium w taki sposób, aby mogło dojść do kruchości wodorowej i niekorzystnie wpłynąć na właściwości kapsuły.



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

### **Ocena MMD dotycząca tej kwestii**

*Podobnie jak SSM, Sąd ds. gruntów i środowiska uważa, że stosowanie miedzi o niskiej zawartości tlenu oznacza, że istnieje bardzo małe ryzyko przyległych tlenków miedzi w materiale miedzi mogących spowodować kruchość wodorową. Jednakże badanie wykazało, że pętle tlenku pojawiły się w przegrodzie spawalniczej po spawaniu metodą FSW, co może prowadzić do kruchości wodorowej. Dlatego nie jest jasne, czy stosowanie Cu-OF całkowicie eliminuje ryzyko kruchości wodorowej. SKB nie ujawniła, w jakim stopniu przenikanie wodoru może zaistnieć na powierzchni kapsuły z powodu reakcji korozyjnej z siarczkiem w wodach gruntowych. Chociaż efekt ten może mieć mniejszy wpływ na wytrzymałość kapsuły, wadą jest to, że SKB nie zgłosiła związanych z tym obliczeń. SKB nie podała również, jak wskazał SSM, ile wodoru musi przeniknąć do materiału miedzi, aby znacząco wpłynąć na jego właściwości. Ważne jest również, aby SKB, jak stwierdził SSM, przedstawiła lepszą podstawę do oceny ryzyka rozprzestrzeniania się pęknięć w obszarach o wysokim pelzającym rozszężaniu, jeśli występuje wysoki ładunek wodoru. Uważa się również, że SKB nie uwzględniła w wystarczającym stopniu ryzyka przenikania wodoru atomowego i wpływu na właściwości obudowy miedzianej na głębokości większej niż 50 µm. Sąd ds. gruntów i środowiska uważa, że istnieje zgoda co do tego, że wodór powstający w wyniku korozji miedzi w wodzie beztlenowej może penetrować miedź. Istnieją jednak różnice zdań co do znaczenia tego tworzenia się wodoru i ryzyka penetracji. Nie ma powodu, aby kwestionować symulacje przeprowadzone przez Petera Szakálosa i innych, a mechanizmy, które zaproponowali na podstawie tych symulacji, uznaje się za wiarygodne. Sąd nie uważa jednak, aby mogły one udzielić jasnej odpowiedzi co do zakresu penetracji tego wodoru. Ogólnie rzecz biorąc, ryzyko przenikania wodoru i jego działania nie są wystarczająco zbadane. Nie można zatem stwierdzić, że kruchość wodorowa nie może przyczynić się do pęknięcia kapsuły. Niepewność ta jest częściowo związana z niepewnością, jaka istnieje w odniesieniu do procesów, które mogą prowadzić do powstawania wodoru na powierzchni. Oceniono, że największa niepewność dotyczy reakcji miedzi z wodą beztlenową. SKB musi dostarczyć dodatkową dokumentację w tej części. Niepewność, która pozostała uznaje się za istotną.*

### **Niska zawartość tlenu w miedzi**

SKB od dłuższego czasu pracuje nad wymogiem utrzymania zawartości tlenu w miedzianej kapsule na niskim poziomie. Odbywa się to częściowo przy użyciu miedzi o niskiej zawartości tlenu (maksymalnie 5 części na milion masy materiału), a częściowo poprzez opracowanie technologii spawania do zamknięcia kapsuły miedzianej, tak aby spawanie górnej części i dna kapsuły nie prowadziło do wprowadzania tlenu do spoin.

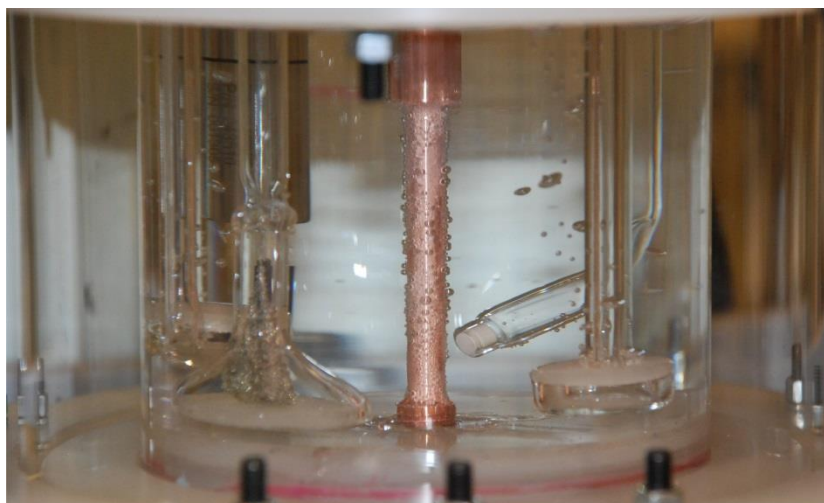
Wymóg dotyczący materiału miedzianego jest dobrze ugruntowany i istnieją dostawcy, którzy zapewniają materiał zgodnie z wymaganiami SKB. W ostatnich latach SKB przeprowadziła szeroko zakrojone prace nad opracowaniem metod spawania, tak aby można było je wykonać bez wprowadzania tlenu do spoiny. Niski poziom tlenu w połączeniach spawalniczych w kapsułach miedzianych jest całkowicie możliwy do osiągnięcia poprzez spawanie w ramach tak zwanej ochrony gazowej, czyli w atmosferze, w której sprawdzany jest skład gazu, a zawartość tlenu jest utrzymywana na bardzo niskim poziomie. Jest to metoda stosowana przemysłowo w wielu innych kontekstach, a w związku z tym wykazano, że ma zastosowanie również do spawania kapsuł miedzianych.

Nowy raport <sup>15</sup> pokazuje, że zawartość tlenu miedzi, którą można osiągnąć, jest wystarczająco niska, aby uniknąć smug tlenkowych, a tym samym ryzyka kruchości wodorowej. Ten sam raport pokazuje również, że jeśli zawartość tlenu w spoinie spawalniczej jest wystarczająco niska, nie ma to wpływu na właściwości mechaniczne lub korozję materiału.

<sup>15</sup> Björck M, Taxén C, Vuoristo T, Elger R, Zavalis T, Wikström L, Sparr M, 2019. Osadzone cząstki tlenu w FSW. Posiva SKB Report 10, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

### **Dodawanie wodoru w eksperymentach laboratoryjnych**

Powszechnie wiadomo, że wodór może przenikać do miedzi w eksperymentach laboratoryjnych, co może mieć wpływ na materiał. Wymaga to jednak ekstremalnych warunków, czyli zupełnie innych warunków niż te, które będą panować w środowisku repozytorium w Forsmarku. Jedną z metod jest podgrzewanie cienkich kawałków miedzi do temperatury co najmniej 600 °C, a jednocześnie wystawianie ich na dziesiątki atmosfer fizycznych (atm) ciśnienia wodoru. Inną i bardziej powszechną metodą jest ładowanie miedzi wodorem za pomocą środków elektrochemicznych. Tutaj miedź znajduje się w roztworze wodnym o specjalnym składzie, a prąd przepływa przez miedź i roztwór. Roztwór jest tak sformułowany, że atomy wodoru są następnie uwalniane na powierzchni miedzi i mogą dostać się do metalu. Atomy wodoru na powierzchni miedzi mogą również zostać połączone w gazowe cząsteczki wodoru, które następnie wypływają z cieczy zamiast przedostawać się do miedzi, patrz Rysunek 7-1. Aby zmniejszyć tę proporcję, do roztworu dodaje się również specjalne, tak zwane inhibitory rekombinacji. Niemniej jednak stwierdzono, że tylko około jednej dziesiątej promila wodoru dostaje się do miedzi podczas tych wymuszonych prób.



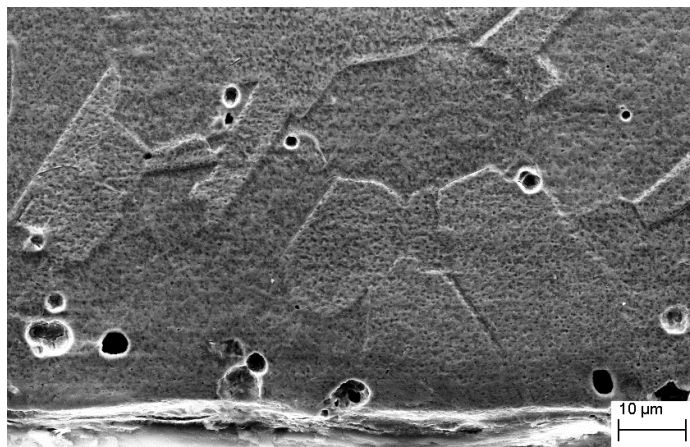
**Rysunek 7-1.** Eksperymentalna konfiguracja, w której miedź jest ładowana wodorem za pomocą środków elektrochemicznych. Pęcherzyki na miedzianym pręcie w środku to wodór, który zamiast przedostawać się do miedzi, tworzył gazowy wodór. Szacuje się, że jedna dziesiąta promila wodoru utworzonego na powierzchni miedzi przenika do metalu.

Niezależnie od tego, czy miedź jest ładowana wodorem przy wysokich ciśnieniach i temperaturach wodoru, czy elektrochemicznie, stężenia wodoru w miedzi mogą osiągnąć tylko co najwyżej kilka części na milion całkowitej masy próbki, co jest nadal znacznie większe niż pierwotnie w materiale. Przy tych stężeniach atomy wodoru mają tendencję do znajdowania drogi do mikroskopijnych porów w miedzi metalicznej i tam łączą się w cząsteczki wodoru, tak że pory wypełniają się gazem wodorowym. Ciśnienie wodoru w nich może być tak wysokie, że pory rozszerzają się wypierając miedź i można w końcu uzyskać wypełnione wodorem pory w materiale o wielkości mikrometra, patrz Rysunek 7-2. Jeśli miedź jest ładowana elektrochemicznie na powierzchni metalu, penetracja wodoru jest ograniczona do kilku dziesiątych milimetra, nawet jeśli ładowanie trwa bardzo długo i w agresywnych warunkach elektrochemicznych. Ponieważ wodór porusza się we wszystkich kierunkach wewnątrz materiału, po pewnym czasie osiąga się równowagę między wodorem, który jest naładowany, a tym, który powraca do otoczenia.

W niektórych badaniach zaobserwowano również umiarkowany wzrost zawartości wodoru przy jednoczesnej korozji siarczkowej i obciążeniu mechanicznym, a także gdy miedź jest wystawiona na działanie całej dawki promieniowania (patrz część 8), na którą materiał jest narażony w

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

repozytorium. W tych badaniach obserwowano powierzchniowe efekty korozji, ale nie zaobserwowano formacji porów. Wychwył wodoru mierzony po wystawieniu miedzi na działanie całej dawki promieniowania gamma jest mniejszy niż zawartość wodoru w miedzi kapsuły SKB. Ponadto został zmierzony w bardzo cienkich próbkach, co oznacza, że wpływ na kapsułę miedzianą jest jeszcze mniej znaczący.



**Rysunek 7-2.** Pory wypełnione wodorem w pobliżu powierzchni, na której wodór przenikał podczas ładowania elektrochemicznego w eksperymentach laboratoryjnych. Powierzchnia znajduje się w dolnej części rysunku.

W niektórych eksperymentach właściwości mechaniczne zostały również zmierzone po naładowaniu wodorem, a następnie zaobserwowano wpływ, który w przybliżeniu odpowiada temu, czego można by oczekiwać na podstawie faktycznych zmian w materiale w pobliżu powierzchni. W wyniku ponownego przeglądu <sup>16</sup> wcześniej opublikowanych badań miedzi nie zidentyfikowano mechanizmu, który może powodować pękanie miedzi w okresie objętym repozytorium.

### **Obliczenia kwantowo-chemiczne**

Przeprowadzono nowe obszerne obliczenia kwantowo-chemiczne <sup>17</sup> dotyczące interakcji wodoru z powierzchniami miedzi metalicznej, jego wewnętrzną strukturą krystaliczną i obszarami granicznymi między ziarnami kryształu w miedzi. Obliczenia pokazują między innymi, że nawet jeśli powierzchnia miedzi była całkowicie pokryta wodorem, niezależnie od pochodzenia, stężenie wewnątrz metalu będzie bardzo niskie. Wynik potwierdza ważny powód, dla którego kruchość wodorowa nie jest problemem dla miedzi: wodór jest bardzo trudny do rozpuszczenia w miedzi.

### **Wchłanianie wodoru w repozytorium**

Jak pokazano w części 4, jasny jest wniosek SKB, że stopień korozji w czystej, beztlenowej wodzie jest niezmiernie mały. Tak więc eliminuje to źródło zaopatrzenia w wodór uznane przez sąd za najbardziej niebezpieczne.

W repozytorium maksymalne ciśnienie i temperatura wodoru są zbyt niskie, aby zapewnić jakiegokolwiek wchłanianie wodoru do kapsuł miedzianych. Jedynym znanym i właściwym źródłem naładowania wodorem jest korozja, a przede wszystkim korozja powodowana przez siarczki

<sup>16</sup> Björkblad A, Faleskog J, 2019. Ocena wzrostu pęknięć Cu-OFP i teoretycznych modeli pęknięcia dla Cu-OFP, Posiva SKB Raport 03, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego)

<sup>17</sup> Lousada C M, Korzhavii P A, 2019. Zdolność sorpcyjna wodoru defektów sieci krystalicznej i powierzchni miedzi o niskim indeksie Millera. SKBdoc 1708457 wer. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądowego).

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

(wodór uwalnia się podczas reakcji miedzi z siarczkiem). Jednakże korozja przez siarczki wytwarza znacznie wolniejsze dodawanie wodoru niż w powyżej wspomnianych badaniach. Z jednej strony, dostarczanie wodoru jest ograniczony przez niski napływ siarczku, a z drugiej strony można oczekiwać, że tylko niewielki procent wodoru z siarczku dostanie się do metalu. W repozytorium nie ma również specjalnych tak zwanych inhibitorów rekombinacji, które zapobiegają odpływowi utworzonego wodoru w postaci gazu zamiast wnikięcia do metalu.

Zakładając jednak, że wodór jest wprowadzany do tego stopnia, że powstaną pory wypełnione wodorem, takie jak w wymuszonych eksperymentach, taki efekt będzie tylko powierzchniowy dlatego, że osiągnięto by równowagę między dopływem i odpływem wodoru, jak wspomniano powyżej. Jeśli zamiast tego zakłada się, że pory te nie tworzą się, oczekuje się, że wodór rozprzestrzeni się wewnątrz miedzi. Jeśli następnie pesymistycznie przyjmie się, że wodór nie może wydostać się przez zewnętrzną powierzchnię kapsuły, w której ma miejsce korozja, to w końcu nastąpi wypływ po wewnętrznej stronie kapsuły, do wnętrza miedzianej kapsuły. To też byłoby bardzo powolne i ograniczone w taki sposób, że uniknie się z dużym marginesem szkodliwego wpływu na, na przykład, wnętrze kapsuły. Poziom wodoru w miedzi byłby również utrzymany na niskim poziomie.

### **Wnioski końcowe**

Kruchość wodorowa nie jest uważana za zagrożenie dla zdolności hermetyzacji kapsuł miedzianych w repozytorium KBS-3 w Forsmarku. Jest to zgodne z wcześniejszymi wnioskami SKB i jest teraz również poparte następującymi nowymi materiałami:

- Obecnie wykazano, że zmniejszenie zawartości tlenku, które można osiągnąć poprzez spawanie miedzianej kapsuły w ochronie gazowej, jest wystarczające, aby uniknąć smug tlenków, a tym samym ryzyka kruchości wodorowej.
- Obecnie ocenia się ryzyko przenikania wodoru i wpływu na właściwości materiału miedzianego, zarówno w przypadku, gdy pory z wodorem tworzą się w metalu, jak i w przypadku, gdy nie zakłada się, że tak się stanie. Wyniki pokazują, że stopień korozji, która może wystąpić w repozytorium, jest zbyt mały, aby uwolniony wodór miał znaczący wpływ na kapsuły.
- Nowe kompleksowe obliczenia kwantowo-chemiczne pokazują między innymi, że nawet jeśli powierzchnia miedzi byłaby całkowicie pokryta wodorem, niezależnie od pochodzenia, stężenie wewnątrz metalu będzie bardzo niskie. Potwierdza to ważny powód, dla którego kruchość wodorowa nie jest problemem dla miedzi: wodór jest bardzo trudny do rozpuszczenia w miedzi.

To jest również jasny wniosek SKB, wg części 4, że źródło wodoru uznane przez sąd za najbardziej niepewne, korozja miedzi w czystej, beztlenowej wodzie jest niezmiernie małe.

## **8 Wpływ promieniowania radioaktywnego na korozję wżerową, korozję naprężeniową i kruchość wodorową**

### ***Czego dotyczy ta kwestia?***

Miedziana kapsuła będzie narażona zarówno na promieniowanie gamma, jak i neutronowe ze strony zużytego paliwa jądrowego w niej się znajdującego. Część promieniowania zostanie wchłonięta do materiału miedzianego, a część przeniknie przez kapsułę i wpłynie na procesy korozji na jej zewnętrznej stronie. Kiedy promieniowanie jest pochłaniane, to w materiale



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

miedzianym pojawiają się defekty spowodowane przez atomy zmieniające położenie na różne sposoby. Może to zasadniczo, w zależności od stopnia, w jakim występuje, prowadzić do pogorszenia właściwości materiału, na przykład, zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej obudowy miedzianej. Promieniowanie, które przenika przez kapsułę do pewnego stopnia rozkłada cząsteczki wody na zewnątrz kapsuły. Niektóre z powstających fragmentów molekularnych są chemicznie agresywne i powodują pewną korozję. Zakres tych skutków zależy od kilku czynników, z których najważniejszym jest intensywność promieniowania (szybkość dawkowania), całkowita dawka promieniowania oraz grubość i temperatura obudowy miedzianej.

W ramach analizy bezpieczeństwa SR-Site, która stanowiła podstawę do wniosku SKB, wyciągnięto dwa główne wnioski dotyczące skutków promieniowania:

1. Chociaż promieniowanie z hermetyzowanego paliwa jądrowego przyczyni się do pewnej korozji miedzianej kapsuły, efekt ten jest niewielki w porównaniu z innymi przyczynami korozji i nie wpływa na funkcję hermetyzacji kapsuły w okresie miliona lat, dla którego długoterminowe bezpieczeństwo radiacyjne jest analizowane.
2. Dawki promieniowania, na które narażone będą materiały kapsuł (żelazo i miedź), są co najmniej dziesięciokrotnie zbyt niskie, aby uzyskać wymierny wpływ na właściwości mechaniczne kapsuły.

### **Ocena MMD dotycząca tej kwestii**

*Podstawy SKB do obliczania powstawania kwasu azotowego wywołanego promieniowaniem na zewnątrz kapsuły jest wiarygodna. Ten efekt promieniowania gamma nie ma znaczącego wpływu na integralność kapsuły. Zgłoszone eksperymenty wykazały, że promieniowanie może przyczynić się do korozji wżerowej miedzi w środowisku beztlenowym. Podobnie jak SSM, Sąd ds. gruntów i ochrony środowiska uważa, że SKB nie dostarczyła dowodów aby można było wykluczyć ryzyko korozji wżerowej w środowisku repozytorium. Ponadto jak stwierdził Peter Szakálos i inni, nie jest oczywiste, że SKB zbadała ryzyko wpływu promieniowania na korozję naprężeniową. Sąd uważa, że raport SKB dotyczy jedynie wpływu promieniowania na korozję lokalną, ponieważ interpretacja pewnych doświadczeń przez SKB jest taka, że pole promieniowania może spowodować bardziej pasywną warstwę powierzchniową. Z oceny sądu wynika raczej, że ryzyko promieniowania mającego wpływ na korozję naprężeniową jest większe niż zakłada SKB. Ponadto sąd nie widzi, aby SKB była w stanie odpowiednio wyjaśnić przyczynę wzrostu korozji odnotowanej w doświadczeniach Åsa Björkbacka. SKB nie przedłożyła konkretnego badania, które jest sprzeczne z tym, co Peter Szakálos i inni stwierdzili, że eksperymenty te wskazują, iż istnieje nieznan efekt interakcji między napromieniowaniem miedzi w czystej wodzie beztlenowej a zwiększoną korozją. To co sugeruje, że jakakolwiek lokalna korozja wywołana promieniowaniem nie przyczynia się znacząco do długoterminowej zdolności ochronnej kapsuły, to jest to, że promieniowanie gamma zmniejsza się w ciągu pierwszych 300 lat, tj. promieniowanie występuje przez stosunkowo ograniczony czas. Nie można jednak wykluczyć, że w tym czasie może wystąpić lokalna korozja wywołana promieniowaniem lub że korozja może się utrzymać nawet po zmniejszeniu się promieniowania. Peter Szakálos i inni podkreślili również wpływ promieniowania radioaktywnego na kruchość wodorową. Sąd ds. gruntów i środowiska nie może stwierdzić, że SKB w zadowalający sposób przedstawiła dowody i argumenty potwierdzające ocenę, że efekt ten nie może mieć wpływu na długoterminową integralność kapsuły. Inne skutki promieniowania radioaktywnego, których SKB według Petera Szakálosa i innych nie zbadał, to wpływ na korozję atmosferyczną, korozję spowodowaną początkowo uwięzionym tlenem i korozję spowodowaną drobnoustrojami, siarczanem i złożem soli. Jednakże, Sąd ds. gruntów i środowiska uważa, że istnieje niewielkie ryzyko tych skutków mających wpływ na długoterminową integralność kapsuły. Ogólnie rzecz biorąc, istnieje znaczna niepewność co do wpływu promieniowania radioaktywnego na korozję naprężeniową i kruchość wodorową.*



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

### **Korozja wywołana promieniowaniem**

Powyższy wniosek 1) dot. wpływu promieniowania na proces korozji opiera się, z jednej strony, na poprzednich badaniach eksperymentalnych właściwości elektrochemicznych korozji miedzi (tak zwany potencjał korozji) podczas napromieniania gamma, a z drugiej strony na teoretycznej analizie wpływu promieniowania jonizującego na roztwór wodny (radiolizę) w pobliżu powierzchni kapsuły przeprowadzonej przez Studsvik AB. Badania eksperymentalne pokazują, że na właściwości korozji miedzi nie ma znaczącego wpływu bardzo niska intensywność promieniowania panująca na powierzchni kapsuły w repozytorium. Analiza teoretyczna pokazuje, że w wyniku napromieniania może wystąpić maksymalnie 14 mikrometrów korozji, co można porównać częściowo z grubością ścianki 5 cm, jaką początkowo ma miedziany płaszcz, a częściowo z milimetrową głębokością korozji, która wystąpi w większości kapsuł w wyniku innych procesów korozyjnych w środowisku repozytorium, takich jak korozja siarczkowa.

W ramach projektu badawczego prowadzonego w KTH od 2010 roku, którego celem jest pogłębienie wiedzy o wpływie promieniowania na korozję, wielokrotnie podejmowano próby, w których miedź w roztworze wodnym była poddawana działaniu promieniowania gamma odpowiadającego dawce, jaką miedziana kapsuła w repozytorium otrzyma od paliwa jądrowego w niej zawartego. Eksperymenty w KTH wykazały, że produkty korozji powstające podczas napromieniania są oczekiwanymi tlenkami miedzi. Pomiarów produktów korozji na powierzchni miedzi i w roztworze wodnym wykazały korozję równoważną kilku dziesiątym mikrometru, czyli bardzo mały efekt w tym kontekście i znacznie mniejszy niż wcześniej obliczone teoretycznie 14 mikrometrów. Znalezione również wżery korozji o głębokości do jednego mikrometru, a to również jest znikoma głębokość dla kapsuł o grubości 5 centymetrów. Eksperymenty te potwierdziły w ten sposób pesymizm analizy teoretycznej w SR-Site, która przewidywała maksymalnie 14 mikrometrów (0,014 milimetra) korozji spowodowanej napromienianiem. Wniosek 1) z SR-Site pozostaje zatem niezmienny.

### **Efekty kombinowane**

Miejscowe ataki korozji zaobserwowane w powyższych doświadczeniach sugerują, że powierzchnia miedzi mogła stać się pasywna podczas napromieniania. Jednak intensywność promieniowania stosowana w doświadczeniach jest od setek do tysiąca razy wyższa niż ta, która panuje na powierzchni miedzianej kapsuły w repozytorium, to w celu uzyskania całej dawki promieniowania czasu składowania przez rozsądny okres czasu dla eksperymentu. Wykazano, że niska intensywność promieniowania, która będzie panować w repozytorium, ma nieznaczny wpływ zarówno na mikrostrukturę materiału miedzianego, jak i na jego potencjał korozji, co razem oznacza, że warunki dla korozji naprężeniowej nie istnieją. Świadczą o tym starsze badania eksperymentalne miedzi podczas napromieniania i jednoczesnego naprężenia rozciągającego. Ponadto warstwa korozji utworzona podczas napromieniania składa się z tlenków miedzi, które nie są długoterminowo stabilne w środowisku wód gruntowych zawierających siarczki, ale są przekształcane w siarczki miedzi. Zatem pytania o wpływ promieniowania na korozję wżerową i korozję naprężeniową powracają odnośnie do procesów „korozja wżerowa w wyniku reakcji z siarczkiem” i „korozja naprężeniowa w wyniku reakcji z siarczkiem”, które omówiono w częściach 5 i 6. Pole promieniowania o niskiej intensywności na powierzchni miedzianej kapsuły nie przyczynia się do zwiększonego ryzyka korozji lub korozji naprężeniowej.

Ryzyko kruchości wodorowej, czyli kruchości materiału miedzi w wyniku wchłaniania wodoru, można analizować w taki sam sposób, jak w przypadku wchłaniania wodoru w korozji siarczkowej w części 7. Stwierdzono, że pobranie wodoru, przy przepływach wodoru z siarczku, który może wystąpić na powierzchni kapsuły w repozytorium, będzie zbyt niski, aby mieć jakikolwiek wpływ na właściwości materiału. Podobnie można obliczyć, że napływ wodoru z napromieniania i rozkładu wody (radioliza) będzie jeszcze mniejszy, a zatem nie będzie w stanie doprowadzić do znacznego pobrania wodoru wewnątrz obudowy miedzianej. Powierzchnowy wychwyty mniejszych

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

ilości wodoru zaobserwowano doświadczalnie w miedzi po napromieniowaniu, ale poziomy pochłanianego wodoru są zbyt małe, aby wpłynąć na funkcję hermetyzującą kapsuły miedzianej.

### **Teoretyczne zrozumienie**

Jedno pytanie, które do niedawna pozostawało bez odpowiedzi, to dlaczego model teoretyczny, stosowany z powodzeniem do opisanego korozji, na przykład uranu w procesie napromieniania, przewidywał znacznie mniejszą korozję miedzi niż ta obserwowana doświadczalnie w KTH. Wydaje się, że to pytanie otrzymało odpowiedź, ponieważ nowe eksperymenty i analizy<sup>18</sup> przeprowadzone przez SKB w KTH wykazały, że pewne reakcje chemiczne powierzchni w modelu muszą być opisane inaczej w odniesieniu do miedzi – w porównaniu na przykład z uranem. Zmieniony model jest nadal w fazie rozwoju, ale teraz przewiduje eksperymentalnie obserwowaną korozję miedzi podczas napromieniania gamma ze stosunkowo dobrą precyzją. W związku z tym nie ma również potrzeby badania nieznanego wpływu interakcji między napromieniowaniem miedzi w czystej wodzie beztlenowej a zwiększoną korozją.

### **Uszkodzenia radiacyjne w miedzi i żelazie**

Wniosek 2) powyżej dotyczący efektów promieniowania wewnątrz materiału miedzianego opiera się głównie na wcześniejszych obliczeniach komputerowych dotyczących uszkodzeń radiacyjnych w wyniku promieniowania gamma i neutronowego. Ponieważ wniosek został zakwestionowany, SKB uznała za właściwe odnowienie obliczeń szkód spowodowanych promieniowaniem poprzez zbadanie tej kwestii przez grupę badawczą w KTH. Nowe obliczenia uszkodzeń radiacyjnych zostały przeprowadzone zarówno dla promieniowania gamma i neutronowego, jak i dla obu materiałów kapsułowych miedzi i żelaza. Od czasu wcześniejszych obliczeń minęło prawie dwadzieścia lat, a od tego czasu opracowano zarówno oprogramowanie, jak i bazę danych, które teraz zostały wykorzystane w nowych obliczeniach. Nowe obliczenia<sup>19</sup> przewidują, że uszkodzenia radiacyjne w materiałach będą nieco niższe niż wcześniej przewidywano.

Zarówno poprzednie, jak i nowe obliczenia uszkodzeń radiacyjnych zaniedbały efekt „samonaprawienia” napromieniowanego materiału w tym samym czasie, gdy powstają uszkodzenia radiacyjne. Mechanizm, który za tym stoi, można w uproszczeniu opisać jako atomy w materiale posiadające pewną ruchliwość w temperaturach panujących w materiałach kapsuły i że atomy, które „znalazły się w złym miejscu” w wyniku promieniowania, mają potem pewne prawdopodobieństwo „skoku” do ich miejsca pochodzenia. Ominięcie tego mechanizmu było zamierzone przy obliczeniach, co sprawia, że wyniki są pesymistyczne co do stopnia uszkodzenia radiacyjnego. Szacunki skuteczności samonaprawienia<sup>20</sup> sugerują, że rzeczywisty stopień uszkodzenia radiacyjnego jest co najmniej 100 niższy niż już niski zasięg przewidywany przez obliczenia komputerowe.

Równoległe z nowymi obliczeniami szkód spowodowanych promieniowaniem, SKB zleciła również grupie badawczej w Wielkiej Brytanii eksperymentalną weryfikację niewielkich uszkodzeń radiacyjnych w miedzi po napromieniowaniu dawką gamma reprezentatywną dla warunków w repozytorium.<sup>20</sup> Już z góry było jasne, że niewielki zakres uszkodzeń spowodowanych promieniowaniem, które są przewidywane w obliczeniach, jest zbyt niski, aby można było go wykryć, a ambicją eksperymentu było wykorzystanie czułości metod

<sup>18</sup> **Soroka I, Jonsson M, 2019.** Korozja miedzi wywołana promieniowaniem – aktualizacja mechanizmu. SKBdoc 1706535 ver. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

<sup>19</sup> **Yang Q, Toijer E, Olsson P, 2019.** Analiza uszkodzeń radiacyjnych w materiałach z pojemnika KBS-3. SKB TR-19-14, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

<sup>20</sup> **Padovani C, Pletser D, Jurkschat K, Armstrong D, Dugdale S, Brunt D, Faulkner R, Was G, Johansson A J, 2019.** Ocena zmian mikrostrukturalnych w miedzi z powodu uszkodzeń spowodowanych promieniowaniem gamma. SKB TR-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB (Szwedzki urząd ds. paliwa jądrowego).

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

eksperymentalnych w celu sprawdzenia, czy zakres uszkodzeń nie przekracza zakresu, który można było wykryć w eksperymencie, jak to również wykazano.

### **Wnioski końcowe**

SKB nadal stwierdza, że stopień korozji miedzi wynikający z promieniowania nie ma znaczenia dla właściwości hermetyzacji kapsuły oraz że niski stopień lokalnej korozji, który może wystąpić w wyniku napromieniania, nie ma długoterminowego wpływu na proces korozji. Dzieje się tak dlatego, że warstwa tlenkowa powstała podczas napromieniania nie jest stabilna w wodach gruntowych zawierających siarczki. Podczas napromieniania nie można wykluczyć pewnej ilości lokalnej korozji wywołanej promieniowaniem, jak zaobserwowano to w doświadczeniach. Jednakże zakres tej lokalnej korozji jest bardzo mały i został uwzględniony w ocenach SKB.

Korozja naprężeniowa miedzi podczas napromieniania jest nadal uważana za nie mogącą nastąpić, ponieważ warunki napromieniania panujące na powierzchni kapsuły w repozytorium nie zapewniają wystarczających warunków utleniania (lub wystarczającego wpływu na potencjał korozji miedzi) oraz dlatego, że jony niezbędne do procesu nie występują w wodach gruntowych.

SKB w dalszym ciągu stwierdza, że wchłanianie wodoru w wyniku korozji wywołanej promieniowaniem nie może wystąpić w stopniu, który wpływa na właściwości mechaniczne lub możliwości hermetyzacji.

Obecnie istnieje znacznie lepsze mechanistyczne i ilościowe zrozumienie niewielkiej korozji obserwowanej w eksperymentach promieniowania wykonanych przez Björkbacka, do których odnosi się sąd. Wcześniej wskazana rozbieżność między teoretycznie obliczonym zakresem korozji a rzeczywistą zmierzoną korozją wynikała ostatecznie z niepełnego zrozumienia mechanizmu, a tym samym błędnych założeń w poprzednim modelu obliczeniowym.

Wyniki nowych obliczeń i testów eksperymentalnych potwierdzają wcześniejsze wnioski z analizy bezpieczeństwa SR-Site, że uszkodzenia wewnątrz materiałów spowodowane promieniowaniem są zbyt małe, aby mieć wymierny wpływ na właściwości mechaniczne, przewodność elektryczną i skład chemiczny materiału, i to z większym marginesem niż to wcześniej wykazano.

## **9 Konsekwencje dla bezpieczeństwa po zamknięciu kapsuł**

Analizy zawarte w poprzedniej części, dotyczące pięciu kwestii zajmujących się właściwościami hermetyzującymi kapsuły, które Sąd ds. gruntów i środowiska uważał, że wymagają dodatkowego naświetlenia, pokazują, że cztery z pięciu kwestii nie mają wpływu na długoterminową integralność kapsuł. Dotyczy to korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie, korozji naprężeniowej w środowisku siarczkowym, kruchości wodorowej i wpływu promieniowania na zjawiska korozji. W przypadku niektórych z tych zjawisk potencjalnie szkodliwe skutki można było zaobserwować w stosunkowo agresywnych testach laboratoryjnych, podczas gdy repozytorium zapewnia środowisko, w którym efekt nie wystąpiłby lub byłby znacznie łagodniejszy i nie mógłby prowadzić do pęknięcia kapsuł. Wnioski z analiz podsumowano bardziej szczegółowo w części 10.

Jedną z kwestii, czyli lokalnej korozji w postaci mikrogalwanicznej korozji przy obecności siarczku, nie można kategorycznie wykluczyć dla najwyższych przepływów siarczku, których można się spodziewać w środowisku repozytorium. W związku z tym dokonano zaktualizowanej oceny konsekwencji dawki na podstawie pesymistycznej interpretacji dostępnych danych dotyczących wzerów mikrogalwanicznych.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

Chociaż tylko jeden z badanych procesów może mieć wpływ na krzywą ryzyka, to może to być interesujące zilustrowanie stopnia, w jakim repozytorium KBS-3 jest ogólnie odporne na uszkodzenia kapsuł. W związku z tym przypadki graniczne, w których wszystkie kapsuły mają małe, przechodzące na wylot uszkodzenia miedzianej obudowy już przy składowaniu, zostały przeanalizowane.

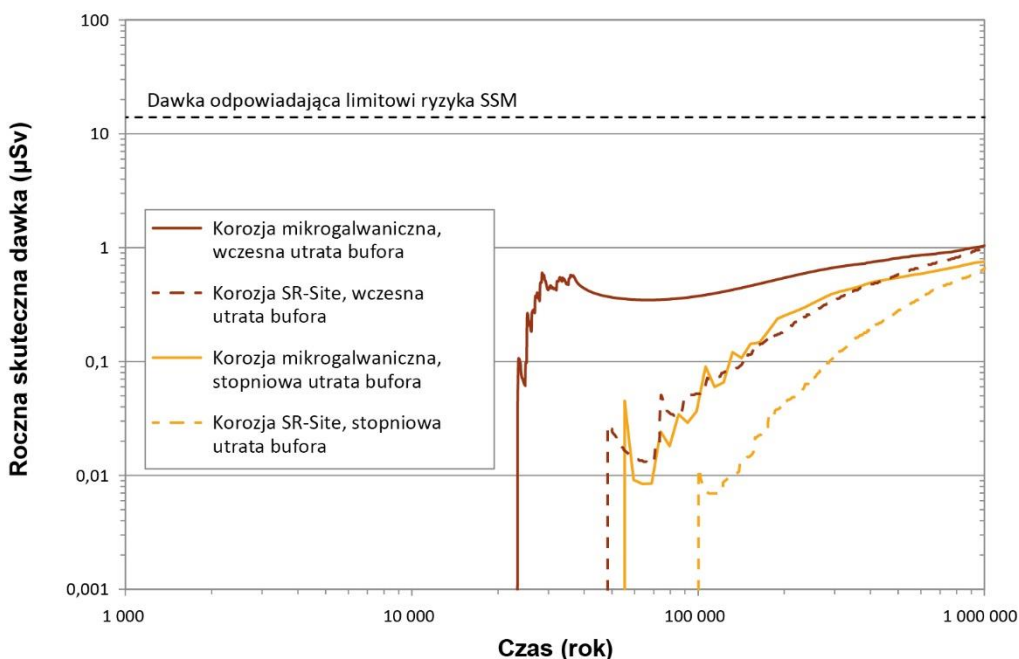
### **Obliczenia konsekwencji lokalnej korozji**

Jak widać z poprzednich rozdziałów, lokalna korozja spowodowana efektami mikrogalwanicznymi, które mogą wystąpić przy dużych przepływach siarczków, nie została całkowicie wykluczona. Zjawisko to może wystąpić przy najwyższych przepływach siarczku, które mogą zaistnieć również w przyszłości, gdy kilka otworów składowiska mogłoby utracić znaczną część bufora w wyniku erozji. SKB obliczyła zatem, jakie byłyby konsekwencje, gdyby przyjęto, że korozja mikrogalwaniczna występuje, gdy przepływy siarczku przekraczają wartości dopuszczalne, dla których skuteczność nie może być wykluczona w badaniach laboratoryjnych.

W przypadku otworów składowiska, w których przepływy siarczku szacuje się na wystarczająco wysokie, zakłada się lokalną korozję. Pesymistycznie przyjmuje się, że lokalna głębokość korozji jest 20 razy większa niż ogólna głębokość korozji, czyli ta, która występuje przy równomiernej korozji. Współczynnik 20 jest pesymistycznie wybrany na podstawie najgłębszych wżerów korozji zaobserwowanych w doświadczeniach. Ponadto pesymistyczne jest założenie, że stosunek głębokości wżeru 20 razy większy niż średnia głębokość utrzymuje się aż do przekorodowania kapsuły. Bardziej rozsądne byłoby założenie, że wżery również rosną na boki, rosną razem z innymi wżerami i wyrównują się z czasem.

Obliczenie ryzyka dla analizy bezpieczeństwa w SR-Site, część 13.9, obejmowało sześć przypadków uszkodzenia kapsuł spowodowanych korozją, trzy w przypadku, gdy bufor jest stopniowo utracony w kilku otworach składowiska przez długi okres czasu i trzy, w których bufor jest pesymistycznie traktowany za utracony na wczesnym etapie dla wszystkich otworów składowiska. Konsekwencje dawki zostały obliczone i porównane z dawką odpowiadającą limitowi ryzyka SSM. Dwa przypadki, które przyniosły największe konsekwencje w SR-Site dla stopniowo i wcześniej utraconych buforów, zostały teraz ponownie obliczone w taki sposób, że uwzględniono również lokalną korozję, jak opisano powyżej. Rysunek 9-1 pokazuje te dwa przypadki z SR-site (krzywe linią przerywaną) i dwa nowe obliczenia (krzywe linią ciągłą). Jak pokazano na rysunku, wszystkie krzywe są znacznie poniżej dawki odpowiadającej limitowi ryzyka SSM. Nowe przypadki mają konsekwencje wcześniej niż stare i należy się tego spodziewać, ponieważ korozja jest szybsza, dzięki czemu uszkodzenie na wylot kapsuł występuje wcześniej, gdy uwzględniona jest lokalna korozja. Tylko w kapsułach narażonych na najwyższe przepływy siarczku występuje lokalna korozja w obliczeniach. Te kapsuły doznały uszkodzeń na wylot, nawet gdy nie uwzględniono lokalnej korozji, choć nie tak wcześniej. Całkowita liczba uszkodzonych kapsuł jest zatem podobna w obu obliczeniach, co przyczynia się do tego, że maksymalne dawki są podobne przy porównywaniu starych i nowych krzywych.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły



**Rysunek 9-1.** Porównanie konsekwencji dawki z uwzględnieniem korozji mikrogalwanicznej i bez niej. Krzywe linią przerywaną, które nie zawierają korozji mikrogalwanicznej, pochodzą z analizy bezpieczeństwa SR-Site. Krzywe linią ciągłą są nowymi wynikami obliczeń, które pokazują wpływ włączenia korozji mikrogalwanicznej.

### Przykładowe obliczenie początkowych uszkodzeń we wszystkich kapsułach

Chociaż tylko jeden z badanych procesów mógł wpływać na krzywe ryzyka, i tylko w ograniczonym stopniu, tj. tylko kapsuły w otworach depozycyjnych o największych przepływach siarczków i po erozji buforu, interesujące może być zilustrowanie, w jakim stopniu repozytorium KBS-3 jest ogólnie odporne na uszkodzenia kapsuł. W związku z tym w tej sekcji przeanalizowano przypadek graniczny, w którym wszystkie kapsuły mają niewielkie, uszkodzenia na wylot miedzianej obudowy już na składowisku. W jednym wariantcie zakłada się również, że bufor jest stopniowo utracony w wyniku erozji. Żaden z wariantów nie jest w żaden sposób zgodny z wynikami w poprzednich częściach, ale ma na celu umieszczenie kwestii integralności kapsuły w ogólnej perspektywie bezpieczeństwa, gdzie kapsuła jest tylko jedną z kilku barier. W części 13.7.3 analizy zabezpieczeń SR-Site przeanalizowano wiele innych podobnych przypadków.

Trudno sobie wyobrazić naturalnie występujący mechanizm uszkodzeń, który natychmiast doprowadziłby do poważnych uszkodzeń. Nawet, na przykład, uszkodzenia spowodowane silnym wpływem mechanicznym na kapsułę podczas trzęsień ziemi, które były analizowane w SR-Site, rozpoczną się jako pęknięcie obudowy miedzianej i stopniowo przekształcą się w większe uszkodzenia. Dlatego zakłada się, że początkowe uszkodzenia penetrujące są niewielkie. Założenia tego przypadku, zarówno pod względem charakteru pierwotnego uszkodzenia kapsuły, rozwoju szkody, jak i ogólnego funkcjonowania systemu repozytorium, opiera się na podobnych przypadkach, które zostały przeanalizowane w SR-Site.

Obliczono dwa przypadki:

- A. Zakłada się, że wszystkie 6000 kapsuł mają niewielkie uszkodzenia w postaci otworu o średnicy 4 milimetrów już w momencie składowania. Przyjmuje się, że pozostałe części systemu repozytorium są nienaruszone.



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

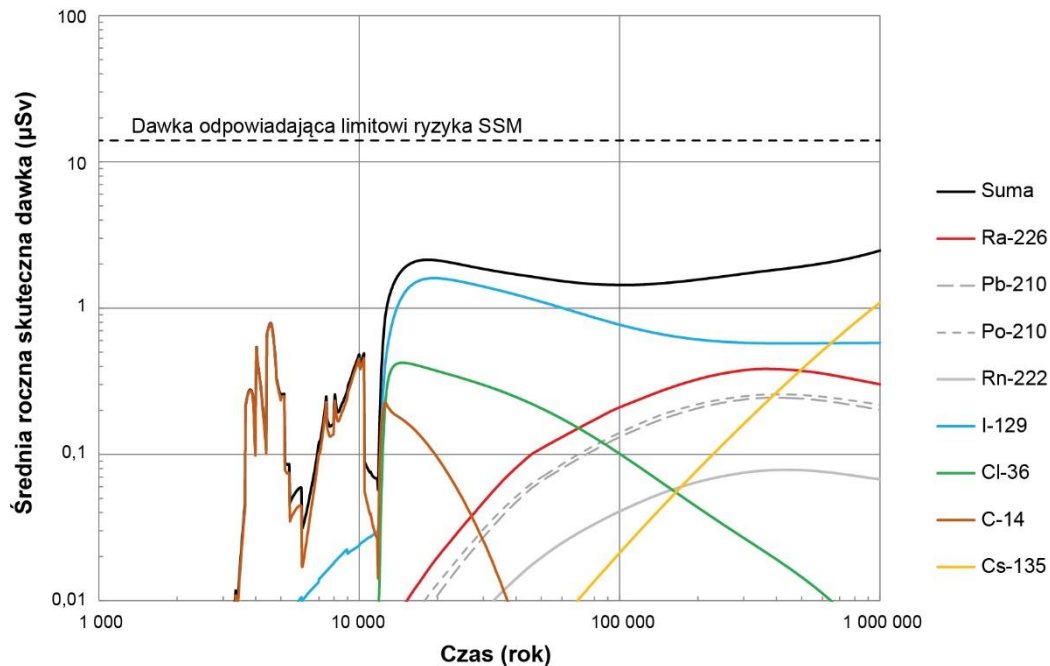
- B. Zakłada się, że wszystkie 6000 kapsuł mają niewielkie uszkodzenia w postaci otworu o średnicy 4 milimetrów już w momencie składowania. Przyjmuje się, że bufor otaczający kapsuły ulega erozji zgodnie z modelem erozji buforu stosowanym w analizie bezpieczeństwa SR-Site. W rezultacie bufor jest tracony do tego stopnia, że nie chroni już kapsuły w niewielkim procencie otworów składowiska, a to po zazwyczaj stu tysiącach lat.

Jeśli kapsuła ma małe, uszkodzenie na wylot miedzianej obudowy, można się spodziewać, że woda przeniknie przez uszkodzenie, powoli wypełniając przestrzeń między miedzianą obudową a wkładką kapsuły, a następnie wniknie przez uszczelnienie do pokrywy wkładki kapsuły i ostatecznie zetknie się z elementami paliwowymi. Zakłada się, że ten proces trwa co najmniej setki lat i nie może mieć miejsca, dopóki bufor nie zostanie nasycony wodą. Niewielka część radionuklidów w elementach paliwowych może zostać rozpuszczona w przenikającej wodzie, podczas gdy przeważająca część jest osadzona w granulkach paliwa i staje się dostępna tylko stopniowo, przy bardzo powolnym rozpuszczaniu się granulek. Dopóki uszkodzenie w miedzianej obudowie jest małe, spowolni to transport radionuklidów z wewnętrznej części kapsuły. Z biegiem czasu wkładka z żelaza ulegnie korozji przez przenikającą wodę. Efektem, którego nie można wykluczyć jest to, że produkty korozji, które zajmują więcej miejsca niż nienaruszone żelazo, z czasem „wyważą” początkowo mały otwór w miedzianej obudowie, w taki sposób, że stanie się on znacznie większy, usuwając w ten sposób przeszkodę dla wypływu nuklidów, którą jest miedziana osłona. W obu przypadkach, podobnie jak w SR-Site, zakłada się, że niewielkie uszkodzenie początkowe prowadzi do utworzenia pełnej drogi transportowej z kapsuły dla radionuklidów po 1000 latach. Zakłada się, że niewielkie uszkodzenie, podobnie jak w SR-Site, przekształci się w dużą dziurę po 10 000 lat. Radionuklidy, które przenikają z kapsuły są opóźniane w buforze i skale. Część może ostatecznie dotrzeć do biosfery nie mając czasu na rozkład na substancje nieradioaktywne po drodze.

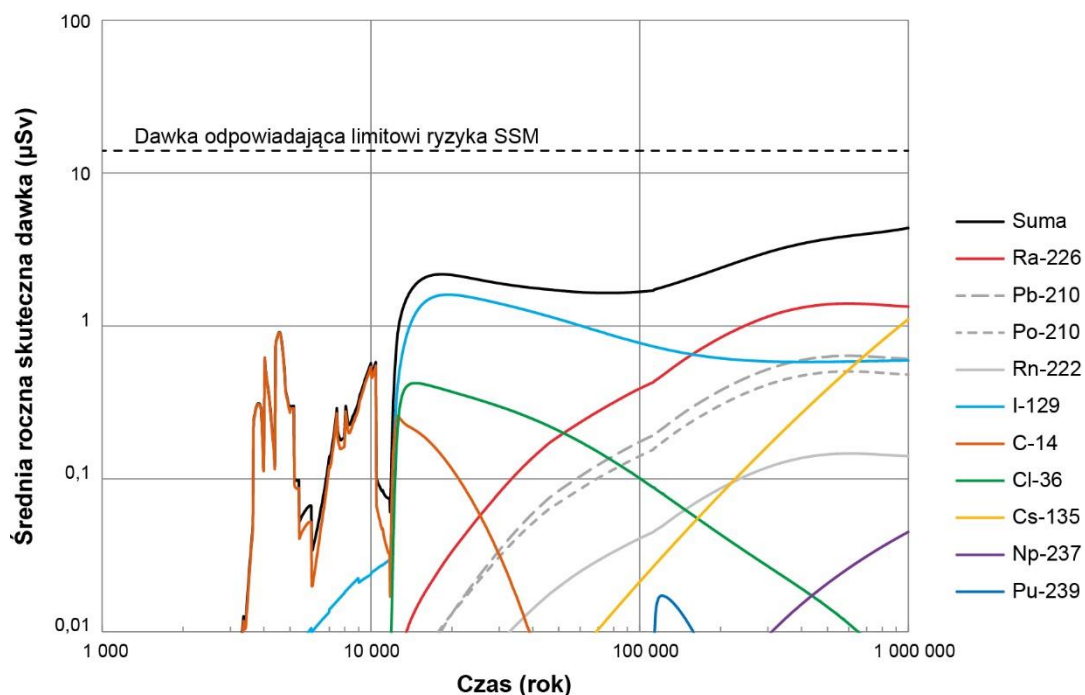
Oceny skutków zostały przeprowadzone przy użyciu tych samych modeli, co w analizie bezpieczeństwa SR-Site (część 13.4 SR-Site). Dane są również pobrane z analizy bezpieczeństwa SR-Site, z jednym wyjątkiem: W przypadku biosfery niektóre dane zaczerpnięte z ogólnej literatury w SR-Site zostały zastąpione danymi specyficznymi dla miejsca Forsmark. Dotyczy to danych zebranych w ramach pomiarów na miejscu po zakończeniu prac na SR-Site. Te same dane specyficzne dla miejsca składowania zostały wykorzystane w najnowszej analizie bezpieczeństwa SKB dla składowania krótkotrwałych nisko- i średnioaktywnych odpadów w Forsmarku (SFR). W SR-Site wykorzystano kilka różnych podejść do analiz biosfery: jeśli uszkodzeniu uległa tylko jedna lub kilka kapsuł, to pesymistycznie zakładano między innymi, że cały wypływ dotarł do takiego punktu w biosferze, w którym dawka była maksymalna. W przypadku uszkodzenia większej liczby kapsuł, zakładano, że emisje do różnych punktów biosfery są kontrolowane przez różne drogi transportowe od repozytorium przez skałę, co doprowadziło do rozmieszczenia radionuklidów na większej powierzchni. W przeprowadzonych obecnie analizach zastosowano to drugie podejście, ponieważ przypadki te obejmują uszkodzenie wszystkich kapsuł.

Wyniki obliczeń są przedstawione odpowiednio w Rysunek 9-2 oraz Rysunek 9-3. W obu przypadkach dawki są zawsze poniżej dawki odpowiadającej limitowi ryzyka SSM.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły



**Rysunek 9-2.** Konsekwencje dawki w przypadku A, w którym wszystkie kapsuły mają niewielkie uszkodzenie na wylot już w momencie ich utylizacji. Stosunkowo szybkie zmiany dawki węgla-14 (C-14) wynikają z rozwoju krajobrazu w wyniku podniesienia powierzchni, które ma miejsce kilka tysięcy lat po zamknięciu repozytorium.



**Rysunek 9-3.** Konsekwencje dawki w przypadku B, w którym wszystkie kapsuły mają niewielkie uszkodzenia na wylot już na składowisku i gdzie bufor jest stopniowo utracony w otworach składowiska o najwyższym przepływie wód gruntowych. Stosunkowo szybkie zmiany dawki węgla-14 (C-14) wynikają z rozwoju krajobrazu w wyniku podniesienia powierzchni, które ma miejsce kilka tysięcy lat po zamknięciu repozytorium.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

Przypadki nie są analizowane w taki sam rygorystyczny sposób, jak przypadki stosowane w celu wykazu, że dawki spowodowane przez repozytorium są ściśle poniżej limitu ryzyka SSM. Jednakże przypadki dają wyraźny sygnał, że nawet przy całkowicie nierealistycznych założeniach dotyczących uszkodzenia kapsuł, bezpieczeństwo repozytorium jest zgodne z limitem ryzyka SSM. Istnieje również kilka pesymistycznych założeń dotyczących modelu biosfery, na przykład takich, że obiekty krajobrazowe, do których występują emisje, zostaną w pełni wykorzystane przez miejscową ludność, zapewniając w ten sposób maksymalne dawki.

Podsumowując, stwierdza się, że również inne części niż kapsuły w magazynie KBS-3 w Forsmarku mają znaczną zdolność ochrony przed uwalnianiem się radionuklidów do biosfery. Ciężko rozpuszczalne paliwo, składniki wewnątrz kapsuły, bufor bentonitowy, skały i niskie przepływy wód gruntowych w Forsmarku to czynniki, które przyczyniają się do ograniczenia dawki nawet w całkowicie nierealistycznych przypadkach, w których zakłada się, że wszystkie miedziane kapsuły są uszkodzone w wyniku składowania. Koncepcja repozytorium KBS-3 ma zatem kilka barier i czynników opóźniających, co wykazała również analiza bezpieczeństwa SR-Site i wszystkie wcześniejsze analizy koncepcji repozytorium przeprowadzone przez SKB.

## 10 Streszczenie i wnioski

### *Wnioski dotyczące kwestii integralności kapsuł*

Pięć kwestii dotyczących integralności kapsuły w opinii Sądu ds. gruntów i środowiska to:

- a) korozja spowodowana reakcją w wodzie beztlenowej
- b) korozja z powodu reakcji z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję wżerową
- c) korozja naprężeniowa spowodowana reakcją z siarczkiem, w tym wpływ efektu sauny na korozję naprężeniową
- d) kruchość wodorowa
- e) wpływ promieniowania radioaktywnego na korozję wżerową, korozję naprężeniową i kruchość wodorową.

Zostały one omówione w częściach 4 do 8, a wnioski końcowe są tu pokrótce przedstawione.

W celu oceny integralności kapsuły należy wziąć pod uwagę warunki chemiczne i obciążenia mechaniczne, które będą panować w repozytorium typu KBS-3, który SKB chce zastosować do budowy w Forsmarku, oraz powiązać je z warunkami stosowanymi w różnych badaniach laboratoryjnych, w których badano jeden z procesów a) do e), przedstawionych powyżej. Przeprowadzono wiele eksperymentów na materiałach miedzianych w warunkach laboratoryjnych, które są znacznie bardziej agresywne niż środowisko składowania. W związku z tym część 2 zawiera krótkie omówienie, w jaki sposób SKB opisała w swoim wniosku warunki w repozytorium, uzupełnione o wyniki szeregu najnowszych badań, dotyczących przede wszystkim stanu przed nasyceniem bufora wodą. Analizy pokazują, że stężenia i/lub przepływy siarczku są ograniczone zarówno przed, jak i po nasyceniu bufora wodą. Dotyczy to również kilku otworów składowiska, które w dłuższej perspektywie mogą utracić znaczną część buforu, tak że powierzchnia kapsuły będzie bezpośrednio wystawiona na przepływ wód gruntowych.

W części 3 wnioskuje się, że efekt sauny, w postaci gromadzenia się soli z powodu odparowania wody dopływowej do otworu składowego, nie będzie utrzymany w repozytorium KBS-3. Wniosek ten opiera się na eksperymentach laboratoryjnych, a także obliczeniach modelu i obserwacjach w badaniach terenowych. W związku z tym stwierdza się, że efekt sauny nie będzie działał w magazynie KBS-3 w Forsmarku, a zatem nie wpłynie na procesy korozji obecne w repozytorium.

Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

W części 4 podsumowano, że nie ma naukowego potwierdzenia korozji miedzi w czystej, beztlenowej wodzie w inny sposób niż zakłada to nauka. Kilka wcześniej zgłoszonych eksperymentów w starannie kontrolowanych warunkach potwierdza ten wniosek, a wyniki zostały niedawno opublikowane w czasopiśmie naukowym. Ponadto, zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne poszukiwanie do tej pory nieznaną związków między miedzią, tlenem i wodorem, które mogłyby wyjaśnić nieznaną reakcję między miedzią i wodą nie doprowadziło do takiego odkrycia. Nawet jeśli naukowcy, którzy twierdzą, że miedź koroduje w nieznaną wcześniej dla nauki sposób mieliby rację, to zakres korozji w repozytorium wynosiłby tylko głębokość około jednego milimetra w ciągu miliona lat.

Przeprowadzono kilka nowych badań w celu dalszego zbadania lokalnej korozji i warunków do tego w środowisku repozytorium. W części 5 wnioskuje się, że można wykluczyć tradycyjną korozję wżerową (angielski; pitting) w wyniku korozji siarczkowej, ponieważ wymagałoby to utworzenia pasywnej warstwy siarczku miedzi na powierzchni miedzi. Takie warstwy nigdy nie były zaobserwowane, nawet w roztworach o stężeniach siarczku znacznie przekraczających te, których oczekuje się w środowisku repozytorium w Forsmarku. W przypadku innych form lokalnej korozji, istnieje kilka obserwacji z eksperymentów laboratoryjnych z miedzią w roztworach siarczkowych, które mogą być interpretowane jako tak zwana korozja mikrogalwaniczna. Jeżeli te warunki laboratoryjne przełożyć na warunki składowiska, nie można całkowicie wykluczyć, że korozja mikrogalwaniczna może wystąpić w przypadku najwyższych przepływów siarczku, jakich można się spodziewać w repozytorium. Dotyczy to nielicznych otworów składowiska, które w perspektywie długoterminowej (100 000 lat) mogą stracić znaczną część bufora i zostało to uwzględnione w obliczeniach ryzyka.

Lokalna korozja pod biofilmem jest również poruszana w części 5, gdzie stwierdza się, że ona nie wystąpi, zwłaszcza, że obecność składników odżywczych w wodach gruntowych na głębokości składowania nie jest wystarczająca, aby zapewnić warunki do powstawania biofilmu. Badania wykazujące lokalną korozję miedzi pod biofilmem są wykonywane w warunkach o znacznie wyższym poziomie składników odżywczych niż w środowisku repozytorium.

W części 6 stwierdza się, że wyeksponowanie na siarczki w połączeniu z napięciami rozciągania nie zagraża integralności kapsuły w środowisku repozytorium. W niektórych okresach nie można wykluczyć napięcia rozciągania w częściach kapsuły. W eksperymentach laboratoryjnych zaobserwowano mikroskopijne pęknięcia na powierzchni próbek miedzi poddanych naprężeniom rozciągającym w połączeniu z wysokim stężeniem siarczku. Jednakże takie stężenia i przepływy siarczku nie wystąpią na powierzchniach kapsuł w repozytorium. Ponadto obserwacje nie są uważane za przykłady tradycyjnej korozji naprężeniowej, ale raczej za formę tak zwaną korozji granic ziaren (korozji międzykrystalicznej), która występuje tylko przy bardzo wysokich przepływach siarczku w połączeniu z napięciami rozciągania. Wnioski z części 6 opierają się na kilku nowych badaniach.

W części 7 wnioskuje się, że kruchość wodorowa nie zagrazi właściwościom hermetyzacyjnym kapsuły w repozytorium KBS-3. Wniosek opiera się na *i*) możliwym napływie wodoru do miedzi, gdzie wodór został uwolniony w procesach korozji w repozytorium oraz *ii*) ocenach opartych zarówno na doświadczeniach, jak i na modelowych obliczeniach oddziaływania takich wpływów na metal. Środowisko w eksperymentach laboratoryjnych, w których uszkodzenia wystąpiły stosunkowo powierzchownie w materiale miedziowym, jest znacznie bardziej agresywne niż środowisko repozytorium. Wykazano również, że spawanie kapsuły można przeprowadzić w taki sposób, aby uniknąć smug tlenku w spoinie, eliminując możliwą przyczynę kruchości wodorowej.

W części 8 stwierdzono, że w materiałach kapsuły, tj. ani we wkładce z żeliwa sferoidalnego, ani w osłonie miedzianej nie wystąpią żadne znaczące uszkodzenia spowodowane promieniowaniem paliwa. Wniosek opiera się na zaktualizowanych obliczeniach uszkodzeń spowodowanych promieniowaniem i do pewnego stopnia na nowych eksperymentach. Wykazano również, że



Uzupełnienie dotyczące integralności kapsuły

wcześniej pesymistycznie ominięte efekty samonaprawy znacznie zmniejszają uszkodzenia spowodowane promieniowaniem. Z doświadczeń z korozją wywołaną promieniowaniem i ze względów teoretycznych wynika, że promieniowanie w repozytorium ma nieznaczący wpływ na lokalną korozję, korozję naprężeniową i kruchość wodorową. Znacznie poprawiono teoretyczne rozumienie korozji wywołanej promieniowaniem.

Podsumowując, uważa się, że cztery kwestie nie wpływają na integralność kapsuły, zgodnie z ocenami w analizie bezpieczeństwa SR-Site i dodatkowymi materiałami do SSM podczas przeglądu SR-Site, a teraz przy dalszym wsparciu szeregu nowych badań. Jednym z zagadnień jest lokalna korozja spowodowana efektami mikrogalwanicznymi podczas bardzo wysokich przepływów siarczku, której wpływ na zdolność hermetyczną kapsuły w bardzo długim okresie nie można całkowicie wykluczyć na podstawie istniejących dowodów.

### ***Wpływ na ryzyko - konsekwencje dla bezpieczeństwa po zamknięciu***

Nie można kategorycznie wykluczyć miejscowej korozji w postaci mikrogalwanicznej korozji siarczkowej wpływającej na integralność kapsuły przy największych przepływach siarczków, jakich można się spodziewać w środowisku repozytorium. Zaktualizowana ocena konsekwencji dawki oparta na pesymistycznej interpretacji dostępnych danych dotyczących wżerów mikrogalwanicznych pokazuje, że na szacowane maksymalne ryzyko ma to wpływ tylko w niewielkim stopniu w porównaniu z wynikami analizy bezpieczeństwa SR-Site. Maksymalne ryzyko jest niższe niż jedna dziesiąta limitu ryzyka SSM w całym analizowanym okresie wynoszącym milion lat.

System repozytorium jest odporny na uszkodzenia kapsuł. Świadczą o tym dwa hipotetyczne przypadki obliczeń. Pokazują one, że nawet gdy hipotetycznie zakłada się, że wszystkie kapsuły mają uszkodzenia na wylot (przebicia) na bardzo wczesnym etapie, szacowane ryzyko jest nadal na poziomie limitu ryzyka SSM.

Wnioski z suplementu SKB na temat integralności kapsuł opierają się na wcześniej dostępnych materiałach oraz na około 25 nowych raportach, notatkach i publikacjach naukowych z szeregu eksperymentów i analiz teoretycznych. Materiał ten można było sporządzić już około roku po wydaniu opinii Sądu ds. gruntów i środowiska, ponieważ prace były w toku we wszystkich dziedzinach, gdyż kwestie te były dobrze znane i analizowane na długo przed główną rozprawą w sądzie. W wyniku opinii sądu wysiłki zostały zintensyfikowane.

Ogólny wynik zakończonych uzupełniających badań i analiz jest taki, że główny wniosek z analizy bezpieczeństwa SR-Site pozostaje niezmienny: repozytorium zbudowane zgodnie z metodą KBS-3 w Forsmarku jest bezpieczne w dłuższej perspektywie i spełnia wymagania SSM dotyczące bezpieczeństwa po zamknięciu.