



Öppen

Promemoria (PM)

DokumentID 1333208	Version 2.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (6)
Författare Christina Lilja			Datum 2012-02-09	
Kvalitetssäkrad av Allan Hedin			Kvalitetssäkrad datum 2012-02-10	
Godkänd av Johan Andersson			Godkänd datum 2012-02-10	

## Inre övertryck i kapseln

Denna PM har tagits fram inom ramen för KUPP (uppdatering av konstruktionsförutsättningarna för kärnbränsleförvaret) och kompletterar de analyser som gjorts i Processrapporten (Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site, TR-10-46). Syftet är att dokumentera underlaget för kravet på maximalt tillåten mängd kvarvarande vatten, samt analysera kapselns motståndskraft mot inre övertryck.

# 1 Processer i kapseln som ger inre övertryck

## 1.1 Inledning

Det inre övertrycket i kapseln är skillnaden mellan det inre trycket som byggs upp inuti kapseln och det yttre trycket, som beror av lufttrycket, svälltryck från bentoniten och det hydrostatiska trycket. Det inre trycket bestäms av temperaturen samt av den gas som finns initialt, och den som produceras eller frigörs inuti kapseln över tid. Gastryckets olika komponenter omfattar därför:

- initial gas (> 90 % argon) inuti kapseln
- bildning av vattenånga orsakad av uppvärmning av kvarvarande vatten
- produktion av vätgas genom korrosion av gjutjärnet med kvarvarande vatten
- produktion av vätgas genom radiolys av kvarvarande vatten
- produktion av vätgas från korrosion av salpetersyra, bildad från kväveoxider från gammastrålning på kvarvarande kvävgas
- produktion av helium orsakad av alfastrålningen i bränslet.

Eftersom det är övertrycket som är avgörande för belastningen på kapselkonstruktionen måste hänsyn tas till tidsutvecklingen för de olika processerna.

## 1.2 Hanteringssteg fram till förslutning

Bränslet kommer att torkas innan det placeras i kapseln. Maximalt tillåten kvarvarande vattenmängd har satts till 600 g vatten per kapsel (TR-09-22).

Atmosfären i kapseln kommer att bytas från luft till >90 % argon (eller annan ädelgas) vid inkapslingen, för att minska den mängd salpetersyra som skulle kunna bildas genom gammastrålning på kvarvarande kvävgas (som kan ge kväveoxider som löst i vatten ger salpetersyra).

Själva svetsningen påverkar inte mer än tillfälligtvis insatsen med en viss temperaturhöjning. Normalt tar det några timmar efter atmosfärsbyte innan kapseln försluts. Under denna tid ökar temperaturen i insatsen och därmed trycket. Detta minskar risken för inläckage till insatsen om dess tätning inte skulle vara helt tät.

### 1.3 Mängd initialt fylld argongas

Vid atmosfärsbytet pumpas luften ur och ersätts med argongas. Detta sker i två omgångar. För att undvika avkylning då argonet expanderar förvärms gasen till rumstemperatur. Vid evakueringen av atmosfären fås en viss kontroll av att locktätningen är tillräcklig för att uppnå målet med atmosfärsbytet. Vid fyllning begränsas trycket i insatsen till 0,11 MPa (högsta luttryck uppmätt i Sverige är 1063,70 hPa). Det valda trycket ska ge en extra garanti att luft inte kan läcka in innan kapseln försluts och samtidigt inte skapa ett onödigt övertryck i insatsen.

Initial mängd gas (räknat som 100 % Ar) kommer att vara, vid 1 m<sup>3</sup> tomvolym inuti kapseln, fyllt gastryck på 0,11 MPa, och rumstemperatur (20°C):

$$n_{Ar} = \frac{1,1 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1 \text{ m}^3}{8,314 \text{ J}/(\text{mol}, \text{K}) \cdot 293\text{K}} = 45,2 \text{ mol}$$

### 1.4 Mängd vätgas från kvarvarande vatten

Bränslet kommer att torkas innan det sätts ner i kapseln, men det kan inte uteslutas att något vatten finns kvar inuti zirkaloy-kapslingen hos skadat bränsle. Som gräns för mängd vatten har angetts maximalt 600 g. Denna gräns sattes utifrån antagandet att det finns en skadad bränslestav per bränsleelement i en BWR-kapsel. Tomvolymen i en bränslestav är 50 cm<sup>3</sup>, vilket med 12 element i en kapsel ger 600 g. Denna maximala mängd har använts i analyserna i Processrapporten TR-10-46.

Det finns flera processer som kan ge vätgas från detta vatten:

- vattnet reagerar med järnet i insatsen direkt (korrosion) och ger vätgas
- gamma-strålning ger radiolys av vatten vilket ger ett flertal olika produkter, bl.a. vätgas
- gamma-strålning på kvarvarande kvävgas (i luft) ger kväveoxider som ger salpetersyra (HNO<sub>3</sub>) när det löser sig i vatten, syran korroderar järnet och bildar vätgas.

Om man antar att allt det kvarvarande vattnet blir till vätgas (via direkt korrosion eller radiolys) blir maximal mängd vätgas

$$n_{H_2} = \frac{600 \text{ g}}{18 \text{ g/mol}} = 33,3 \text{ mol}$$

Den maximala mängd kvävgas som kan vara kvar efter byte till argonatmosfär (>90 % Ar) inuti kapseln är, med 79 % kväve i luft, 1 m<sup>3</sup> tomvolym inuti kapseln och normalt tryck och temperatur

$$n_{N_2} = 0,1 \cdot 0,79 \frac{1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1 \text{ m}^3}{8,314 \text{ J}/(\text{mol}, \text{K}) \cdot 293\text{K}} = 3,3 \text{ mol}$$

Varje mol kvävgas ger max 2 mol salpetersyra, men en mol HNO<sub>3</sub> ger bara ½ H<sub>2</sub>, varför maximalt 3,3 mol vätgas kan bildas från kvarvarande kväve, under förutsättning att det finns vatten som kan lösa kväveoxiden.

Maximalt bildad mängd vätgas blir ändå 33,3 mol eftersom den initiala mängden vatten ger samma mängd vätgas oavsett om den bildas direkt genom korrosion/radiolys eller genom att salpetersyra bildas i ett första steg.

## 1.5 Mängd helium i bränslet

Som beskrivs i avsnitt 2.5.8 i Processrapporten TR-10-46 byggs helium upp i bränslet p.g.a. alfasonderfall hos aktiniderna, och i texten där ges exempel på bildad mängd helium vid några tidpunkter i förvaret.

För att beskriva uppbyggnaden av trycket som funktion av tid har tidsserien i Table 3 i Roudil et al (2008) använts. Författarna redovisar där beräknat heliuminnehåll som funktion av tid för UOx- och MOX-bränslen med utbränningen 47,5 GWd/t. För urandioxidbränsle anger Roudil et al (2008)  $7,0 \cdot 10^{18}$  at/g vid 1000 år, medan beskrivningen i Processrapporten TR-10-46 anger  $9 \cdot 10^{18}$  at/g vid samma tidpunkt för bränsle med utbränningen 60 GWd/t. Data i Roudil et al (2008) har därför ansetts kunna representera tidsutvecklingen hos heliumproduktionen i de bränslen som är aktuella för slutförvaret.

Följande antaganden har sedan gjorts i beräkningen av mängd helium:

- Mängden urandioxid har antagits vara  $175+23=198$  kg/bränsleelement, (TR-11-01, Table 5-7).
- Bränslestavarnas inre har antagits vara förtryckta med helium till ett fåtal MPa (satt till 3 MPa i beräkningen), och 96 stavar med vardera tomvolymen  $50 \text{ cm}^3$  har antagits per bränsleelement. Denna förtryckning ger 69,7 mol helium per kapsel.
- Effekter av MOX-bränsle och dess högre heliumproduktion har beräknats med data från Roudil et al (2008), under antagandet att högst ett element innehåller MOX-bränsle och övriga 11 element är vanligt bränsle.

Mängden helium som funktion av tid framgår av tabell 1, och man kan konstatera att redan vid ca 10 år är mängden helium ungefär lika stor som summan av mängden argon och vatten/vätgas.

*Tabell 1 Mängd helium i en kapsel vid olika tidpunkter, dels för en kapsel med vanligt bränsle, dels för en kapsel med ett MOX-element och 11 element vanligt bränsle. Bränslet antas förtryckt med 69,7 mol helium per kapsel. Data på heliumproduktion från Roudil et al, 2008.*

Tid [år]	Mängd He i UOx-bränsle [mol/kapsel]	Mängd He i 1 MOX + 11 UOx-bränsle [mol/kapsel]
10	75,66	76,81
100	81,19	84,18
1000	97,36	107,23
5000	117,09	132,87
10000	124,98	145,70
50000	168,38	199,62

## 1.6 Utveckling över tiden av det inre trycket i kapseln

I en pessimistisk analys av det maximala inre övertrycket på kopparhöljet görs följande antaganden:

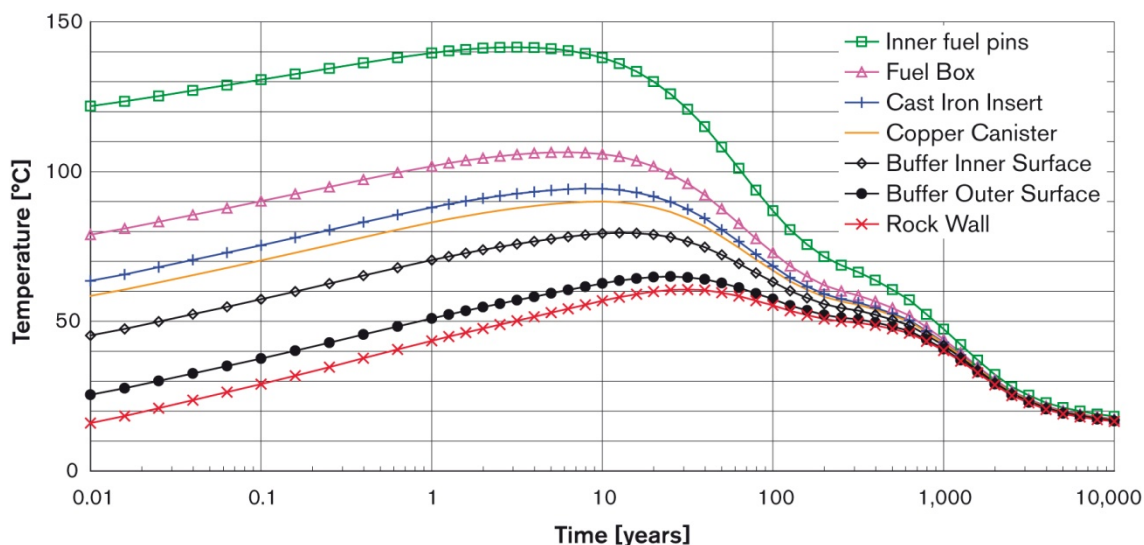
1) Återmätnaden av bufferten och uppbyggnaden av svälltrycket har analyserats i SR-Site. I huvudrapporten (TR-11-01) beskrivs återmättnaden i avsnitt 10.3.8, med slutsatsen att återmättnadstiden för både buffert och återfyll sträcker sig från några få tiotals år till flera tusen år.

Som pessimistiskt fall för denna analys sätts därför det yttre trycket till atmosfärstryck (0,1 MPa) under perioden 0-10 000 år. Därefter antas fullt utbildat svälltryck på 4,5-13 MPa (avsnitt 10.3.9 i TR-11-01). Till det kommer det hydrostatiska trycket på knappt 5 MPa.

- 2) Maximal mängd kvarvarande vatten har genom korrosionsreaktioner övergått till vätgas. Ingen hänsyn har tagits till att icke-reagerat vatten kan vara i vätskeform, vilket skulle ge ett lägre tryck bestämt av ångtrycket hos vattnet.
- 3) Allt bildat helium i bränslet har tagit sig ut ur både bränslematrisen och bränslekapslingen.
- 4) Efter förslutningen tillgodoses inte insatsens tätning, utan gasen inuti insatsen antas gå ut även i gapet mellan insats och kopparhölje.
- 5) Ingen hänsyn tas till utdiffusion av gas genom kapselmaterialen.

Temperaturen i gasen har ansatts som medelvärdet av temperaturen hos insatsen och bränsleboxarna, och varierar med tiden. Temperaturberäkningen från SR-Can (TR-06-09) har använts. Beräkningen finns illustrerad i figur 9-17 i TR-06-09 (återges i figur 1 nedan), medan data direkt ur beräkningarna har använts i tryckanalysen här. Maxtemperaturen på kopparytan i denna beräkning är 90°C, vilket överskrider maxtemperaturen för majoriteten kapslar i SR-Site. I en dimensionerande beräkning för SR-Site är dock den pessimistiskt uppskattade maxtemperaturen på kapselytan 102°C för de allra hetaste kapslarna. Resultatet från SR-Site antyder att temperaturen under uppskattningsvis de inledande 100 åren pessimistiskt skulle kunna vara omkring 10°C högre än de som redovisas i figur 1. Detta har dock marginell inverkan på resultaten eftersom skillnaden i absolut temperatur och därmed inre tryck blir mindre än 3 procent.

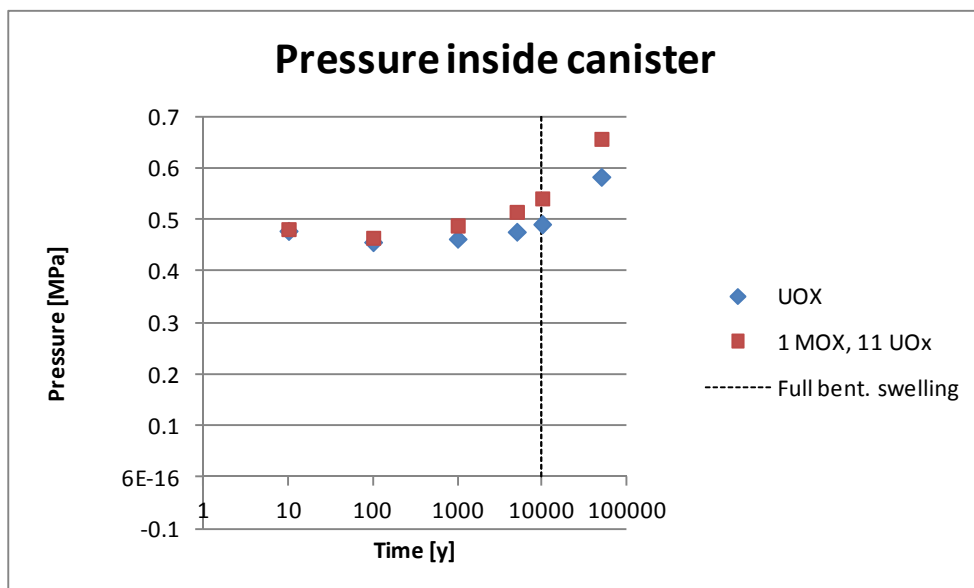
Gaserna har betraktats som ideala gaser.



Figur 1 Temperaturutvecklingen i närområdet (Fig. 9-17, TR-06-09).

I figur 2 visas det inre trycket på kopparhöljet, som funktion av tid. Argon, vatten/vätgas samt helium från förtryckningen är inräknat. Kurvor för både en kapsel med enbart UOx-bränsle och för en kapsel med ett MOX-element och 11 UOx-element visas. Data för heliumproduktion saknas för kortare tider än 10 år. Trycket från argon och vatten/väte, vars maximala mängd är ca hälften av heliummängden vid 10 år, ger ett tryck på ca 0,2 MPa.

Efter full bentonitsvällning förväntas det yttre trycket överstiga det inre. Detta antas ske senast efter 10 000 år.



Figur 2 Utvecklingen av det inre trycket i kapseln. Argon, vatten/vätgas samt helium från förtryckningen av bränslestavarna är inräknat. (Tryck före år 10 inte utsatt i figuren).

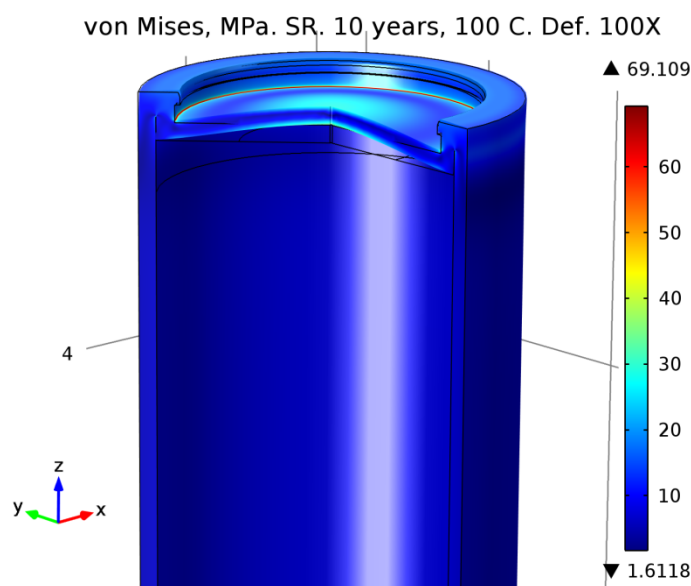
## 2 Analys av kopparhöljet

Ur figur 2 framgår att det inre trycket vid 10 000 år uppgår till 0,5 MPa för kapslar med enbart UOx-bränsle och 0,55 MPa för kapslar med ett MOX-element och 11 UOx-element. Med atmosfärstryck utanför kapseln ger detta ett övertryck på 0,4 resp. 0,45 MPa. Efter 10 000 år antas bentonitsvällningen fullt utbildad varvid det inre övertrycket försvinner.

Resultat från en pessimistisk FEM-analys (elasto-plastisk, med och utan spänningsrelaxation, d.v.s. med och utan krypning) av kopparhöljet vid 0,6 MPa övertryck och en kopparterperatur på 100°C visas i figur 3.

Kapseln antas axialsymmetrisk (2D-beräkning) och väsentligen symmetrisk med avseende på överdel och underdel, varför endast överdelen simuleras. Kapseln antas vidare vara homogen, d.v.s. samma konstitutiva ekvationer kan användas för svetsen som för resten av kapseln. Spalten mellan lock och rör är medtagen, där ofta de största spänningarna och töjningarna uppträder. Spetsen på spalten antas helt skarp (radie 0,15 mm). En så skarp anvisning representerar ett konservativt antagande eftersom en skarp spricka snabbt rundas av (blunting) (se R-09-41).

Inom ramen för beräkningarnas noggrannhet är resultaten från de båda beräkningarna identiska, vilket innebär att ingen krypning har ägt rum. De största effektivspänningarna återfinns i nedre hålkärlet på locket och i spetsen på spalten. Den största effektiva plastiska töjningen är 0,0023 och är lokaliserad i spetsen på spalten. Förskjutningen är maximal i centrum på locket, och maximalt 0,5 mm. Detta belastningsfall ger låga spänningar och töjningar.



Figur 3 Von Mises-spänningar i kapsel under inre övertryck – krypberäkning (elastoplastisk beräkning med spänningsrelaxation=SR). Deformationen förstörd 100 gånger.

### 3 Slutsatser

#### 3.1 Krav på maximal mängd kvarvarande vatten

Eventuellt kvarvarande mängd vatten kan ge vätgas via flera olika processer, och bidrar till det inre övertrycket innan full bentonitsvällning uppnåtts. Gränsen för maximalt tillåten mängd vatten förslås därför vara oförändrad.

#### 3.2 Inre övertryck på kopparhöljet

Påkänningen på kopparhöljet som konsekvens av det maximala inre övertrycket är liten, även i en analys med flera pessimistiska antaganden. Efter full vattenmättnad hos bentoniten är det inre trycket minst en storleksordning mindre än det yttre trycket, och påkänningen från inre övertryck försvinner.

### 4 Referenser

Roudil, D., Bonhoure, J., Pik, R., Cuney, M., Jègou, C., Gauthier-Lafaye, F., Diffusion of radiogenic helium in natural uranium oxides, *Journal of Nuclear Materials*, 378 (2008) 70-78.

- |          |  |
|----------|--|
| TR-06-09 | Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation<br>Main Report of the SR-Can project  |
| TR-09-22 | Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment<br>SR-Can and some subsequent analyses |
| R-09-41  | Creep properties of phosphorus alloyed oxygen free copper under multiaxial stress state                                    |
| TR-10-46 | Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site   |
| TR-11-01 | Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark<br>Main report of the SR-Site project         |