

**R-06-02**

# **Kapsel för använt kärnbränsle**

## **Konstruktionsförutsättningar**

Svensk Kärnbränslehantering AB

September 2006

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co  
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-06-02

# **Kapsel för använt kärnbränsle**

## **Konstruktionsförutsättningar**

Svensk Kärnbränslehantering AB

September 2006

# Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, ansvarar för att det radioaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken hanteras på ett sätt som är säkert både för människa och miljö. SKB:s anläggningar SFR, Slutförvar för radioaktivt driftavfall och Clab, Centralt mellanlager för använt kärnbränsle, är i drift medan inkapslingsanläggningen och slutförvaret ännu inte har uppförts.

I slutförvaret kommer det använda kärnbränslet att vara placerat i kemiskt beständiga kapslar bestående av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en bärande insats av segjärn. Kapslarna har till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen. Det produktionssystem för att tillverka och försluta kapslarna som SKB utvecklar omfattar hela kedjan från framställning av koppar- och segjärnsgöt för tillverkning av kapselkomponenterna till en färdig och försluten kapsel.

Denna rapport redovisar konstruktionsförutsättningarna för kapseln. Konstruktionsförutsättningarna anger kraven som ställs på kapseln. Ur dessa kan krav på de processer som utvecklas för tillverkning, förslutning och kvalitetskontroll härledas. Rapporten är en del av den preliminära tekniska dokumentationen för kapseln som utgör det första etappmålet i SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kopparkapseln för använt kärnbränsle.

Dokumentationen har utarbetats inom ramen för ett projekt (Dokap) med syfte att i sammanhållen form redovisa hur kapselns långsiktiga säkerhet säkerställs genom den utvecklade konstruktionen och de system och processer som utvecklats för tillverkning och förslutning av kopparkapseln.

Många författare, inom och utom SKB, har bidragit till den preliminära tekniska dokumentationen:

Huvudrapport: redaktör Karin Pers (Kemakta Konsult AB)

Program för kvalificering av tillverkning och förslutning: Håkan Rydén (SKB)

Konstruktionsförutsättningar: Håkan Rydén (SKB), Lars Werme (SKB), Peter Eriksson (SKB)

Tillverkning av kapselkomponenter: Nina Leskinen (SKB), Peter Eriksson (SKB),  
Martin Burström (MABU Consulting)

Svetsning vid tillverkning och förslutning: Lars Cederqvist (SKB), Sören Claesson  
(Bodycote Materials Testing)

Oförstörande provning av kapselkomponenter: Göran Emilsson (Bodycote Materials Testing)

Oförstörande provning av svetsar: Ulf Ronneteg (Bodycote Materials Testing)

2006-09-22

Håkan Rydén

*Enhetschef Inkapslingsteknik*

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	7
<b>2</b>	<b>Denna rapport</b>	9
2.1	Förutsättningar och krav	10
<b>3</b>	<b>Funktionskrav och övriga krav på kapseln</b>	11
<b>4</b>	<b>Utformning</b>	13
4.1	Innesluta bränslet	14
4.1.1	Geometrisk- och utrymmeskrav	15
4.1.2	Bränslemängder och resteffekt	15
4.2	Kemiskt beständighet under förvarets livstid	15
4.2.1	Kemisk beständighet hos kopparhöljet	18
4.2.2	Kemisk beständighet hos insatsen	23
4.3	Mekanisk beständighet	24
4.3.1	Mekanisk beständighet hos kopparhöljet	26
4.3.2	Mekanisk beständighet hos insatsen	31
4.4	Säkerställande av att kriticitet inte uppstår	36
4.5	Liten påverkan på övriga barriärer	37
4.5.1	Strålningspåverkan	37
4.5.2	Kemisk påverkan	38
4.5.3	Termisk påverkan	38
<b>5</b>	<b>Viktiga parametrar som påverkar kapseln</b>	39
<b>6</b>	<b>Hantering</b>	41
6.1	Tillverkning och hantering av kapseln fram till inkapslingsanläggningen	41
6.2	Förslutning och hantering under inkapslingsprocessen	42
6.3	Hantering under transport och deponering	42
6.4	Hanterings- och bearbetningsskador	42
6.4.1	Skador under tillverkningsskedet	42
6.4.2	Skador hos den förslutna kapseln, krav för hanteringssäkerhet	43
6.4.3	Långsiktig säkerhet	44
6.5	Sammanfattning – acceptanskriterier för skador	44
<b>7</b>	<b>Sammanfattande krav för referenskapseln</b>	45
<b>8</b>	<b>Handlingslinje</b>	47
8.1	Materialfrågor	47
8.2	Hållfasthetsfrågor	48
8.3	Handlingslinje för konstruktionsförutsättningarna	49
	<b>Referenser</b>	51

# 1 Inledning

Kraven på långsiktig säkerhet efter förslutning utgör grunden för utformningen av slutförvaret och dess delar inklusive kapseln. Om – och hur väl – slutförvaret uppfyller kraven utreds i säkerhetsanalyser och redovisas i de säkerhetsrapporter (SR) för slutförvaret som stegvis utvecklas i kärnbränsleprogrammet. I säkerhetsrapporterna redovisas de processer i slutförvaret som kan påverka kapseln och de dimensionerande scenarier som utgör utgångspunkt för konstruktionsförutsättningarna för kapseln.

Kunskapen om de processer som kan tänkas påverka slutförvarets säkerhet sammanställs inför varje säkerhetsanalys. Baserat på denna sammanställning beskrivs sedan förvarets utveckling i en uppsättning scenarier. Slutförvaret ska uppfylla kraven givet dessa scenarier. Säkerhetsanalysen, och fördjupad kunskap om de processer som påverkar förvarets utveckling i tiden, ger underlag för att härleda konstruktionsförutsättningar för slutförvaret och dess delar, genom att kvantifiera påfrestningarna på de olika delsystemen i de olika scenarierna och sannolikheten för dessa.

SKB presenterade den första upplagan av konstruktionsförutsättningar för kapseln 1998 /Werme 1998/. Syftet var ge grundförutsättningarna för dimensionering av kapseln. Efter 1998 har mycket kunskap tillkommit avseende mekaniska och kemiska belastningar på kapseln i slutförvaret.

## 2 Denna rapport

Arbetet med konstruktionsförutsättningarna är en pågående aktivitet för att säkerställa att kapseln uppfyller alla krav. Syftet med denna upplaga av konstruktionsförutsättningarna är att uppdatera kunskapsläget och identifiera och ange de specifika kraven på kapselns utformning. Detta innebär att utifrån funktionskraven för kapseln ta fram erforderliga specifikationer avseende material och utförande. Dessa krav är styrande för utvecklingen av kapselns detaljkonstruktion samt utvecklingen av tillverkningsmetoder och metoder för kvalitetskontroll.

När det gäller de långsiktiga säkerhetskraven finns en nära koppling mellan konstruktionsförutsättningarna för kapseln (KFK) och säkerhetsanalysen. Detta innebär att en översyn av KFK måste ske i samband med varje ny säkerhetsanalys. Sammanställningen av konstruktionsförutsättningar i denna rapport utgår från säkerhetsanalysen SR-Can. Ett viktigt underlag är den sammanställning av processer som påverkar kapseln vilken ingår som en underlagsrapport till SR-Can /SKB 2006b/. Eftersom arbetet med huvudrapporten för SR-Can pågår vid sammanställningen av denna version av KFK är inte alla resultat från säkerhetsanalysen inarbetade i rapporten.

Ett viktigt syftet med denna upplaga av KFK är att specificera härledbara krav avseende utformning samt tillverknings- och kontrollmetoder. Vidare att i samlad form ange vilka ytterligare analyser som måste ske innan kraven kan specificeras.

Konstruktionsförutsättningarna behandlar kraven på kapseln för att uppnå säker:

- hantering under inkapsling och deponering,
- förvaring av bränslet i slutförvaret.

Utgångspunkt för konstruktionsförutsättningarna är SKB:s referenskapsel som består av en yttre vattentät och korrosionsbeständig kapsel av koppar och en lastbärande insats av segjärn /SKB 2004a/.

Rapportens disposition utgår från konstruktionsförutsättningarna för förvaret /SKB 2002/. Slutförvarets primära syfte och funktion är att hålla använt kärnbränsle isolerat från människa och miljö under den period efter deponering för vilken säkerhetsanalyserna genomförs.

Rapporten är upplagd för att:

- Utgående från funktionskraven på kapseln identifiera de dimensionerande processerna för slutförvaret och dimensionerande händelser under driftfasen samt de detaljerade krav avseende material och utformning som kan härledas utifrån dessa.
- Redovisa verifierande undersökningar och kontrollberäkningar för kapselns mekaniska hållfasthet.
- Redovisa en handlingsplan för fortsatt arbete.

Dimensionering av kapseln utgår dels från de *dimensionerande situationer* dvs händelser som kan inträffa, under inkapsling, transport och deponering av kapseln och dels från de *dimensionerande processer* som kan inträffa, efter att förvaret förslutits och som påverkar utformningen eller specifikationer för kapseln. De dimensionerande processerna bestäms av dimensionerande scenarier som behandlas i säkerhetsanalysen SR-Can /SKB 2006a/ och är identifierade i processrapporter /SKB 2006bc/.

I vissa dimensionerande situationer är kapseln *konstruktionsbestämmande* för system eller *bestämmande* för processer som används vid inkapsling, transport och deponering. Kapseln dimensioneras inte för att motstå belastningar som kan uppstå i samband med mindre sannolika missöden under drifttiden. Istället anpassas systemen för förslutning, hantering, transport, lagring och deponering till kapseln. Tillförlitligheten i dessa system måste hållas och utformningen av systemen göras med hänsyn till tänkbara missöden.

## 2.1 Förutsättningar och krav

Kraven på konstruktionsförutsättningarna är att:

- Ange funktionkraven för delsystem kapsel i slutförvaret.
- Identifiera de dimensionerande processer som kan uppstå i förvaret och de påkänningar på kapseln som de ger upphov till.
- Ange de specifikationer på material, utförande och dimensionering som krävs för att kapseln ska motstå de dimensionerande processerna.
- Uppfylla redovisningskraven som myndigheterna ställer.

Funktionskraven anges i kapitel 3.

Specifikationerna för kapseln utreds i rapporten och sammanfattas i tabell 7-1.

Myndighetskraven framgår bland annat av SKI:s granskning av Fud-program 2004 /SKB 2004a/ där följande kommentarer ges:

- *"SKI vidhåller vikten av att konstruktionsförutsättningar tas fram. Dessutom skall anges inom vilka gränser olika parametrar, som har betydelse för förvarets funktion, måste hålla sig"*.

Detta är primärt en fråga som belyses i säkerhetsanalysen SR-Can. För kapseln viktiga parametrar ges i tabell 5-1 och tabell 5-2.

- *"SKI saknar i Fud-program 2004 fortfarande en klar och logisk koppling mellan de detaljerade konstruktionskraven för kapseln och kraven på långsiktig säkerhet i förvaret"*.

Som påpekas i inledningen pågår arbetet med att slutföra SR-Can då denna rapport färdigställs. Viktig information har dock inhämtats från olika underlag som ingår i SR-Can.

- *"SKB bör redovisa inom vilka gränser olika parametrar, som har betydelse för kapselns funktion, måste hålla sig. Redovisningen skall utgå från en kartläggning av vilka defekter som kan förekomma och deras konsekvenser för kapselns integritet och slutförvarets funktion. SKI anser att den preliminära gränsen för minsta tillåtna koppartäckning är tydligt formulerad, vilket även flera remissinstanser framfört"*.

Dessutom har SKI ytterligare förtydligat sin syn på konstruktionsförutsättningarna i en utredningsrapport /SKI 2006/.

I handlingslinjen kapitel 8 diskuteras hur SKB tolkar myndigheternas kravbild och hur den avses att tas om hand inför ansökan 2009.

### 3 Funktionskrav och övriga krav på kapseln

För systemdelen kapsel i slutförvaret finns följande övergripande funktionskrav /SKB 2002/:

- Innesluta bränslet.
- Täthet vid deponering.
- Kemisk beständighet under förvarets livstid.
- Mekanisk beständighet under förvarets livstid.
- Liten inverkan på övriga barriärer.
- Säkerställande av att kriticitet inte uppstår.

Funktionskravet för slutförvarssystemets driftfas är att kapseln ska kunna inkapslas, transporteras, deponeras och i övrigt hanteras på ett säkert sätt. För att uppnå detta ställs vissa krav på kapseln. Dock är i många fall de långsiktiga funktionskraven hos kapseln överordnade vilket innebär att de system och processer som används under driftfasen måste anpassas till kapseln.

#### ***Övriga krav***

För att uppfylla kraven enligt Euratoms kärnämneskontroll krävs att kapseln har en unik identitet vilken ska vara lätt att avläsa, även efter återtag från slutförvaret, så att kärnämnets faktiska placering entydigt kan anges.



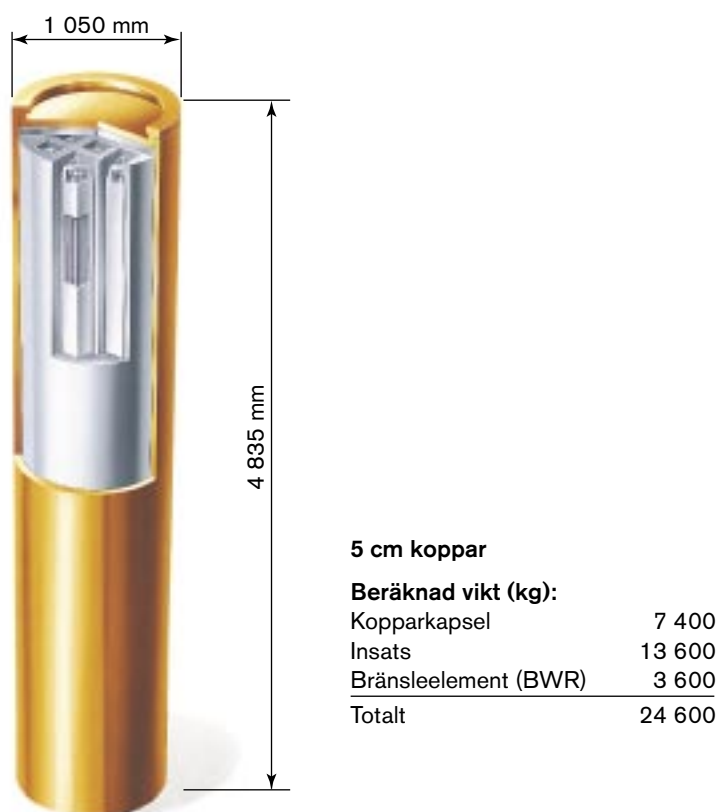
## 4 Utformning

Utformningen av SKB:s referenskapsel med tryckbärande insats av segjärn med yttre korrosionsbarriär av koppar visas i figur 4-1.

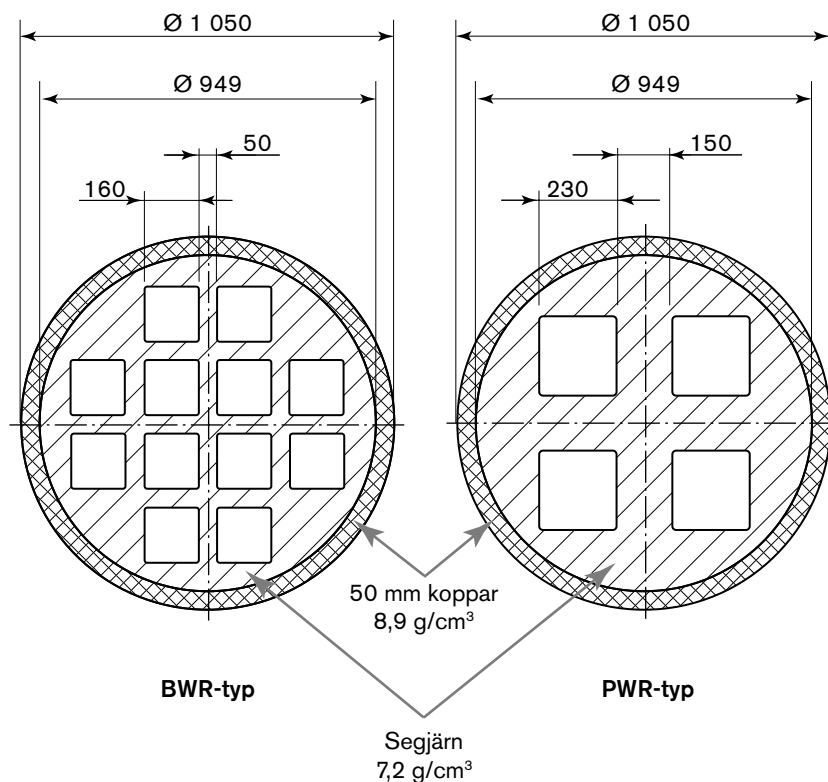
Kapseln finns i två utformningar för BWR- respektive PWR-bränsle. Figur 4-2 visar den principiella skillnaden mellan de båda kapselutförandena. Kapselns detaljutförande finns beskrivet i SKB:s ledningsystem för kapseltillverkning /SKB 2005/.

De funktionskrav för systemdelen kapsel i slutförvaret som påverkar kapselns utformning och materialval är:

- Innesluta bränslet.
- Kemisk beständighet under förvarets livstid.
- Mekanisk beständighet under förvarets livstid.
- Säkerställande av att kriticitet inte uppstår.



*Figur 4-1. Utformning av kapsel för BWR-bränsle.*



**Figur 4-2.** Principiell skillnad mellan kapsel i BWR- respektive PWR-utförande.

## 4.1 Innesluta bränslet

Kapseln ska innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen. Kapslarna ska dimensioneras så att alla förekommande bränsletyper i det svenska programmet kan kapslas in i kapslar med samma ytterdimensioner.

Det använda BWR-bränslet ska inkapslas med bränsleboxar och det använda PWR-bränslet med styrstavar. Dimensioner i tabell 4-1 anger de styrande måtten för kapseln. Flera olika bränsletyper från de svenska kärnkraftsverken med något mindre dimensioner förekommer liksom speciella bränsletyper, som MOX-bränsle och Ågesta-bränsle. I dessa fall ska distansstycken användas för att fylla ut bränslekanalerna. Även bränslelement med läckande stavar ska kunna kapslas in.

**Tabell 4-1. Bränsleegenskaper av betydelse för utformning av kapseln.**

Bränsletyp	BWR	PWR
Total längd	4,398 m	4,243 m
Tvårsnittsarea	140×140 mm <sup>2</sup>	214×214 mm <sup>2</sup>
Antal bränslestavar	63–100	15×15 el. 17×17
Anrikning (% U-235)	max 3,6 % (med Gd 4,2 %)	max 4,2 %
Utbränning (max)	55 MWd/kg U	60 MWd/kg U
Utbränning (medel)	38 MWd/kg U	42 MWd/kg U
Avklingning (min)	30 år	30 år
Resteffekt per element	100–150 W	300–450 W

## 4.1.1 Geometriska- och utrymmeskrav

### *Bränslekanalernas geometri*

Vid bestämning av bränslekanalernas geometri är utgångspunkten bränsleelementens storlek. För att säkerställa att formförändrade bränsleboxar passar i kanalerna används endast bränsle som tidigare transporterats och passat i den bränsletransportbehållare som används vid transport av bränsle till Clab. Geometriska avvikelser hos bränslelementen orsakas av höga neutronflöden i reaktorhärden och avstannar så snart elementen tas ur härden och därför uppstår ytterligare formförändringar inte under lagringen i Clab. Tabell 4-2 ger aktuella mått för tvärsnitten i kanalerna.

I praktiken sker kontroll av att insatsens bränslekanaler innehåller dessa mått och även uppfyller kraven på rakhet etc med en tolk.

**Tabell 4-2. Dimensionskrav för insatsens bränslekanaler.**

Bränsletyp	Tvärsnittets mått (mm)
BWR	150×150
PWR	230×230

## 4.1.2 Bränslemängder och resteffekt

Kapselns utformning begränsar mängden bränsle per kapsel vilket blir en av de bestämmande faktorerna för antalet kapslar som måste deponeras.

Dimensionerande för den tillåtna resteffekten i kapseln är kraven på kemisk stabilitet av bentonitbufferten /SKB 2006a/. Ett temperaturkrav är bestämmande för inkapslingsprocessen (tillåten resteffekt) men inte för kapselns utformning.

## 4.2 Kemiskt beständighet under förvarets livstid

Grundvattenkemin på de orter (Simpevarp/Laxemar och Forsmark) som nu är föremål för platsundersökningar är väl undersökta. I SKB:s säkerhetsanalys SR 97 /SKB 1999/ redovisas den förutsedda utvecklingen av grundvattnet på förvarsdjup från förslutning av förvaret och 10 000 år in i framtiden. Dessa data användes även av /King et al. 2001/ för en bedömning av omfattningen på kopparkorrosionen under förvarsförhållanden (se tabell 4-3 och 4-4). Under byggnadsskedet kan salta grundvatten strömma upp från stora djup. Den högsta salinitet i vattnet som bedöms kunna strömma upp ges i tabell 4-5.

**Tabell 4-3. Förutsedd kemisk sammansättning av grundvattnet vid förvarsdjup i Simpevarpsområdet i Oskarshamn. Halterna anges i mg/L.**

Beståndsdel	Vid förslutning	Efter återmättnad (< 100 år efter förslutning)	10 000 år in i framtiden
pH	6–8	7,7	8–9
Eh (mV)	0 to –400	–300	–200 to –300
Na <sup>+</sup>	1 000–3 000	2 100	100–2 000
K <sup>+</sup>	5–20	8	2–10
Ca <sup>2+</sup>	1 000–3 000	1 890	20–2 000
Mg <sup>2+</sup>	10–200	42	1–40
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10–1 000	10	10–20
Cl <sup>-</sup>	3 000–10 000	6 410	200–5 000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100–600	560	1–400
HS <sup>-</sup>	0–10	0,15	0–1

**Tabell 4-4. Förutsedd kemisk sammansättning av grundvattnet vid förvarsdjup i Forsmarkssområdet i Norduppland. Halterna anges i mg/L. Till skillnad från tabellen i /King et al. 2001/ anges bara värden för en kustnära plats i Norduppland.**

Beståndsdel	Vid förslutning av förvaret	Efter återmättnad (< 100 år efter förslutning)	10 000 år in i framtiden
pH	6–8	7,0–7,9	7–9
Eh (mV)	0 to –400	–200/–250	–200 to –300
Na <sup>+</sup>	300 –2 000	1 700	100–1 000
K <sup>+</sup>	2–13	13	2–10
Ca <sup>2+</sup>	150–1 650	1 650	20–1 000
Mg <sup>2+</sup>	17–110	110	4–100
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50–300	47	20–40
Cl <sup>-</sup>	500–5 000	5 500	200–5 000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	40–400	370	1–400
HS <sup>-</sup>	0–10	< 0,01	0–1

**Tabell 4-5. Sammansättningen på glaciellt smältvatten vid Grimsel (Schweiz) och vatten med förväntad högsta salinitet under glacielltillståndet. Halter anges i mg/L.**

Beståndsdel	Grimsel: glaciellt smältvatten	Högsta salinitet från uppströmning
pH	9,6	7,9
Na <sup>+</sup>	16	5 750
K <sup>+</sup>	0,20	19,55
Ca <sup>2+</sup>	5,6	10 827
Mg <sup>2+</sup>	0,015	2,43
Fe(II)	0,00017	0,11
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	27,45	9,15
Cl <sup>-</sup>	5,68	29 110
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5,77	961
HS <sup>-</sup>	0	< 0,01

I ett längre perspektiv, en istidscykel på 150 000 år, kan större förändringar förväntas i grundvattnets kemiska sammansättning som en följd av klimatförändringarna. Tre karaktäristiska klimattillstånd förväntas förekomma:

- tempererat/borealt tillstånd,
- permafrosttillstånd,
- glacialt tillstånd.

**Tempererat/borealt tillstånd:** Under den period då klimatet gradvis förändras är förändringar av strandlinjen den enda process av betydelse för grundvattnets sammansättning. Detta kan ge upphov till att färskvatten ersätts av bräckvatten eller saltvatten beroende på salthalten i havsvattnet. Nuvarande Östersjön kan också tidvis komma att vara en färskvattensjö. Med nuvarande kunskap måste antas att för längre tidsperioder (tusen år) kan salthalten i nu kustnära områden komma att vara lika hög som den nuvarande salthalten i Atlanten. Detta ger en övre gräns för salthalten på 35 g/L i det vatten som infiltrerar berggrunden /Vieno 2000/.

**Permafrosttillstånd:** Under dessa förhållanden förväntas vattenomsättningen vara lägre än under nuvarande förhållanden. De i det närmaste vattentäta områdena av frusen mark förväntas tvinga ned grundvattenrörelserna till större djup. En annan följd av permafrosttillståndet är att lösta ämnen fryser ut. Utfrysningen av salt och den låga vattenomsättningen kan tillsammans leda till en betydande ökning av salthalten i vattnet. Salthalten förväntas bli något över 35 g/L /King et al. 2001/.

**Glacialtillstånd:** Under dessa förhållanden kommer grundvattenflödet att styras av istäcket och dess utbredning. I avsmältningssonen och vid iskanten kan höga vattentryck förväntas. Detta kommer att driva ner glacialt smältvatten till stora djup. Beräkningar visar att det är möjligt att transportera glacialt smältvatten till förvarsdjupet. Beräkningar visar också att bergets redoxbuffrande förmåga gör att endast syrefritt vatten kommer att nå förvarsdjup /Guimerà et al. 1999, 2006/, men det förväntas innehålla mycket låga eller inga halter av reducerande järn eller svavel specier. Det glaciala smältvattnet förväntas också ha mycket låg jonstyrka jämfört med dagens grundvattnet på förvarsnivå (jämför glacialt smältvatten från Grimsel, tabell 4-5, data från /Hoehn et al. 1998/). Under glacialtillståndet är det också möjligt att salta grundvatten strömma upp från stora djup. Den högsta salinitet i vattnet som strömmar upp under glacialtillståndet ges i tabell 4-5.

Kapseln är omgiven av kompakterad bentonit. Typisk bentonit består av lermineralet montmorillonit och assessoriska mineral som till exempel fältspat, kvarts, gips (eller anhydrit), pyrit och kalcit. Bentonitens fysikaliska egenskaper av betydelse för funktionen i slutförvaret bestäms av halten montmorillonit. Montmorillonit har relativt låg löslighet och det är de närvarande assessoriska mineralerna som tillsammans med grundvattnet bestämmer sammansättningen på bentonitporvattnet, dvs det fria vattnet i jämvikt med bentoniten. Osäkerheterna kring variationerna i sammansättning och mängderna av assessoriska mineral i referensbentoniten MX-80 förväntas vara små /King et al. 2001/.

Bentonit innehåller inga klorhaltiga mineraler av någon betydelse. Kloridhalten i grundvattnet kommer därför att bestämma kloridhalten i bentonitporvattnet. Sulfidhalten kommer att bestämmas av upplösning av gips (eller anhydrit) och kommer att vara betydligt högre än halterna i grundvattnet. Sulfidhalterna däremot förväntas inte bli högre än i grundvattnet, även om pyrit finns närvarande i bentoniten, på grund av den låga lösligheten av sulfidmineral /King et al. 2001/. Även karbonathalterna kan bli förhöjda, upp till omkring 200 mg/L. pH värdet förväntas ligga i intervallet 7–9.

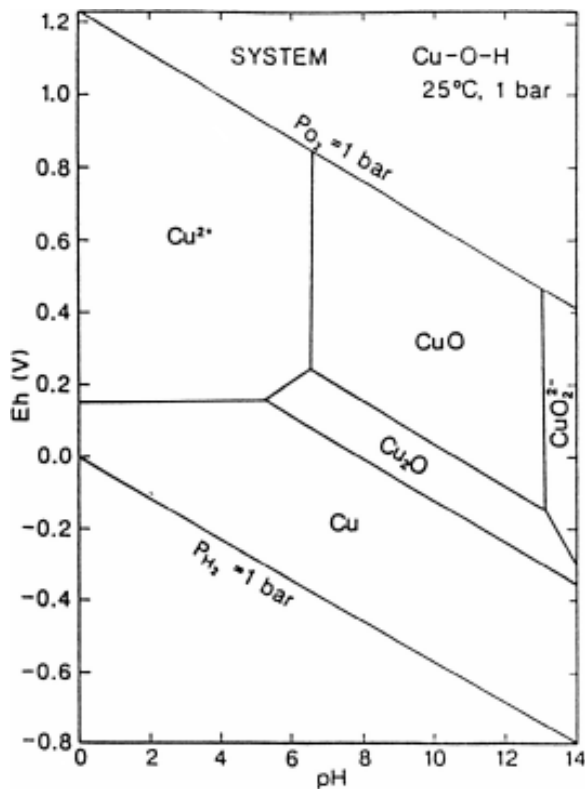
Tiden för att omsätta vattenvolymen i bentoniten uppskattas vara i storleksordningen 10 000 år /King et al. 2001/.

#### 4.2.1 Kemisk beständighet hos kopparhöljet

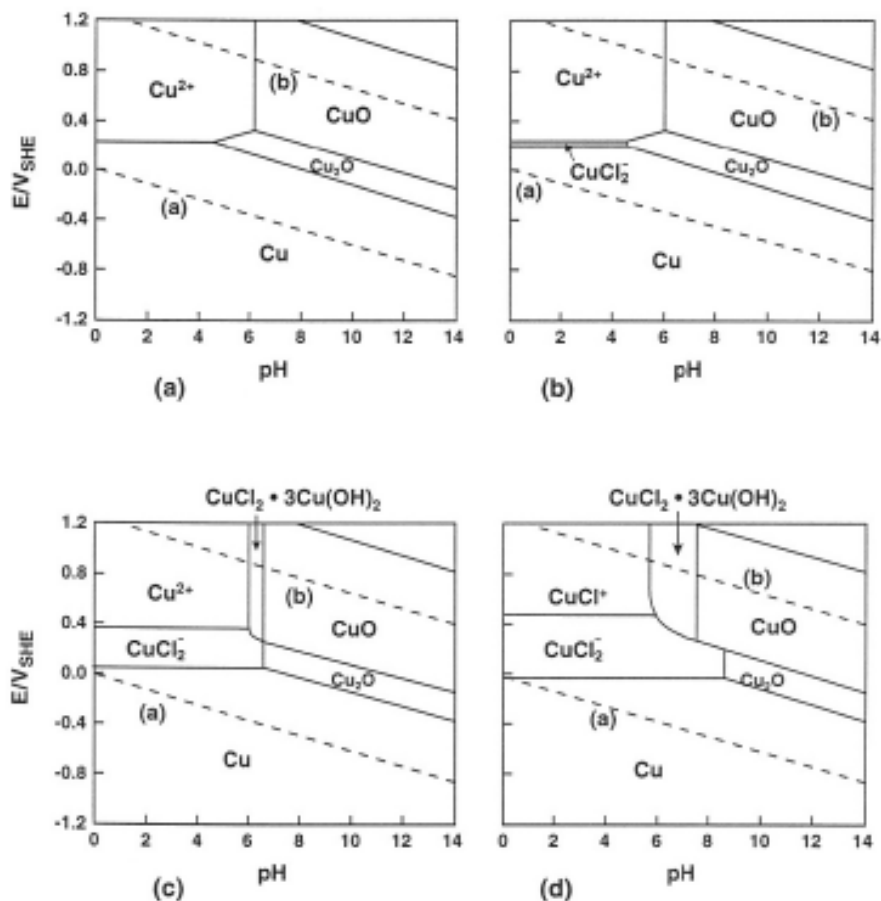
Som framgår av ovan kommer grundvattnen, bortsett från driftperioden och under vattenmättnadsskedet, att vara syrefritt och reducerande. Kloridhalterna kan under vissa förhållanden gå upp till 35 000 ppm. Vattnet kommer efter förslutning att vara neutralt eller milt alkaliskt, med ett pH-värde huvudsakligen i intervallet 7 till 9. Sulfidinnehållet kommer att vara under eller mycket under 1 mg/L. Koppar är immunt mot korrosion i rent syrefritt vatten. För att koppar ska korrodera i vattenlösningar krävs:

- närvaro av löst syre,
- höga kloridhalter,
- låga pH-värden eller löst sulfid.

Figurerna 4-3 till 4-5 visar Pourbaixdiagram för Cu/O-H, Cu/Cl-O-H och Cu/C-S-O-H systemen. Som framgår av diagrammen kommer koppar även vid de högsta kloridhalterna att vara immun mot korrosion vid de pH-värden som förväntas. Den enda korrodant som finns tillgänglig är löst sulfid. Koppars stabilitet i rent syrefritt vatten förenklar modellerna för långtidskorrosion i slutförvaret.



**Figur 4-3.** Potential/pH (Pourbaix) diagram för systemet Cu/H<sub>2</sub>O vid 25 °C. Figuren är ritad för en total löst Cu aktivitet på  $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .



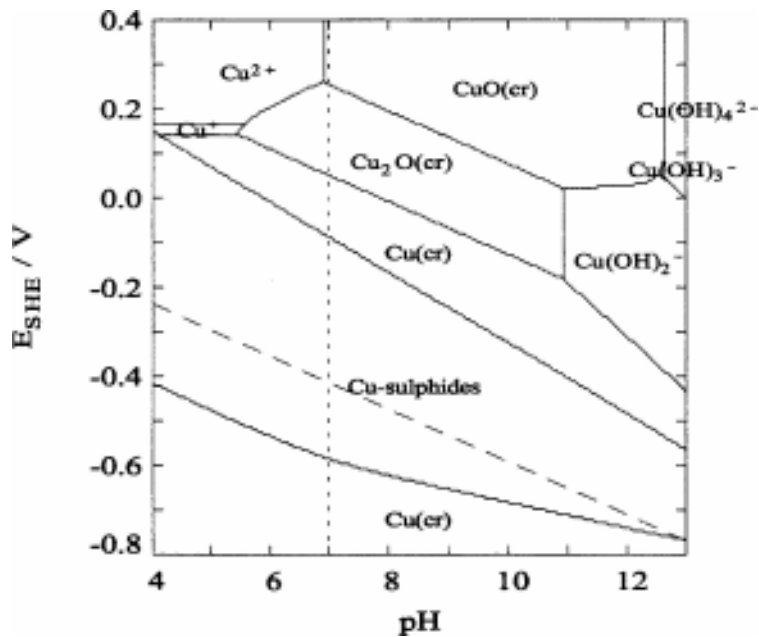
**Figur 4-4.** Potential/pH (Pourbaix) diagram för systemet  $Cu/Cl^-/H_2O$  vid 25 °C för olika kloridhalter: (a)  $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , (b)  $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,  $1,0 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Figurerna är ritade för en total löst Cu aktivitet på  $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

### Materialval

Vid valet av kopparmaterial utifrån korrosionsöverväganden kan kopparlegeringar uteslutas på grund av riskerna för selektiv korrosion av legeringsämnena. Syre har mycket låg löslighet i koppar, cirka 90 ppm vid 1 065 °C och under 20 ppm vid 600 °C /Dies 1967 p 680/. Koppar med låg syrehalt ska därför väljas för att eliminera riskerna för korngränskorrosion på grund av oxidutskiljningar i korngränserna. Av samma skäl krävs att kopparen har låga halter av föroreningsämnen som skulle kunna korrodera selektivt eller segregera till korngränserna och öka riskerna för korngränskorrosion.

### Svetsbarhet och egenskaper hos svetsgodset

Av tillverknings-skäl ställs krav på svetsbarhet hos kopparmaterialet. SKB har utvecklat två svetsmetoder elektronstrålesvetsning (EBW) och friction stir welding (FSW). Som referensmetod har SKB valt FSW. För FSW kan inga ytterligare krav på kopparmaterialet härledas utöver de som diskuterats ovan. För EBW visar erfarenheterna att syrehalten i kopparmaterialet måste hållas under 5 ppm för att svetsgodsets sammansättning ska bli fullgott /Sanderson och Werme 1986/.



**Figur 4-5.** Potential/pH diagram för systemet Cu/HS-/H<sub>2</sub>O vid 25 °C. Figuren är ritad för en total löst Cu aktivitet på 10<sup>-6</sup> mol · dm<sup>-3</sup>.

Om friktionssvetsningen (FSW) utförs i luft kan syrehalten öka i svetsgodset /Salonen 2004/. Det är också möjligt att små mängder metall från svetsverktyget kan bli kvar som föroreningar i svetsen. De föroreningar som observerats är aluminium, kobolt, krom och nickel och halterna är som högst några tiotal ppm. Även om föroreningarna ligger som diskreta mikroinklusioner har detta obetydlig påverkan på svetsens kemiska beständighet.

Vid elektronstrålesvetsning (EBW) kommer inga främmande ämnen att introduceras i svetsen eftersom svetsningen sker i vakuum. Trots de högre syrehalterna i friktionssvetsen har korrosionsprovning visat att dessa svetsar har bättre beständighet mot korngränskorrosion i aggressiva vattenlösningar än elektronstrålesvetsarna. Korngränskorrosion under förvarförhållanden kan uteslutas för båda svetsmetoderna /Gubner et al. 2006/. Syrehalterna i svetsgodset kan därför få uppgå till några tiotal ppm.

Det bör framhållas att fortsatt utveckling av FSW pågår och bland annat studeras svetsning i skyddsgas. Detta gör att iakttagelserna rörande FSW som redovisas ovan kan komma att revideras.

### **Aerob korrosion**

Numeriska beräkningar av syreförbrukande kemiska processer har använts för att uppskatta tiden för att nå syrefria förhållanden i tunnarna i slutförvaret. Den beräknade hastigheten för förbrukningen av syret beror på antaganden om storleken på den aktiva arean på reagerande mineral, men ändå kan slutsatsen dras att syrefria förhållanden kommer att råda en månad efter att tunnelåterfyllningen vattenmättats /Grandia et al. 2006/. Under den initiala fasen fram till syrefria förhållanden sker endast obetydlig korrosion av kopparn motsvarande en avfrätning av 30 µm /SKB 2006b/. Denna process är inte dimensionerande.



## Anaerob korrosion

Efter att syret förbrukats kommer korrosionen att styras helt av tillförseln av löst sulfid till kapseln. Detta gör att kapselkorrosionen inte behöver beskrivas i reaktionskinetiska termer med de osäkerheter som kan finnas för korrosionshastigheter och korrosionsmekanismer över långa tider. I stället reduceras problemet till att beskriva diffusiv transport av lösta sulfider genom bentoniten till kapselytan. Detta ökar tillförlitligheten i förutsägelseerna betydligt, eftersom diffusiv transport i porösa media är väl känd och förstådd.

Med den modell som användes i SR-Can /Hedin 2004/ beräknas korrosionsangreppet på de mest utsatta delarna på kapseln uppgå till mindre än 6 mm /SKB 2004b/. I SR-Can diskuteras även osäkerheter i modellen och speciellt effekter av bentoniterosion. Slutsatsen är att ytterligare kunskaper krävs kring buffererosion innan dessa osäkerheter kan undanröjas.

Vad det gäller effekter av repor och andra geometriska avvikelser i kopparhöljets yta som kan uppstå vid bearbetning eller hantering så påverkar dessa inte den anaeroba korrosionen /King 2004/. Det finns följaktligen inget skäl att ställa krav på till exempel tillåtet djup hos repor och slagmärken ur korrosionssynpunkt så länge tjockleken på den återstående intakta korrosionsbarriären inte understiger 6 mm.

**Anaerob korrosion** är en *dimensionerande process* för kapseln och koppartäckningen måste minst uppgå till 6 mm.

**Anaerob korrosion** är en *bestämmande process* för kopparkvaliteten. Koppar med låg syrehalt ska väljas för att eliminera riskerna för korngränskorrosion på grund av oxidutskiljningar i korngränserna. Av samma skäl krävs att kopparen har låga halter av föroreningsämnen som skulle kunna korrodera selektivt eller segregera till korngränserna och öka riskerna för korngränskorrosion. För att få tillräcklig kemisk beständighet kan syrehalter på upp till 30 ppm tolereras. Samma högsta nivåer är tillåtna för aluminium, kobolt, krom och nickel.

## Radiolys

/Lundgren 2004/ har beräknat dosraten utanför en referenskapsel. Vid beräkningarna har hänsyn tagits till sekundärelektroner. Resultaten visar att genomsnittliga ytdosraten är cirka 0,15 Gy/h. På grund av kapselinsatsens utformning varierar ytdosraten runt kapselns omkrets med ungefär en faktor fyra, med ett högsta värde på cirka 0,4 Gy/h /Lundgren 1998/.

Efter deponering och innan vattenmättnad av bentoniten skett kommer kapseln att stå i luft med hög luftfuktighet vid en temperatur av 90–100 °C. Gammabestrålningen av fuktig luft leder till att kväveoxider bildas, som genom kontakt med vatten ger salpetersyra. I /Marsh 1990/ visas en enkel metod att göra en överslagsberäkning av mängden producerad salpetersyra. Hastigheten för bildandet av salpetersyra ges av:

$$\frac{d[HNO_3]}{dt} = \frac{G \cdot V \cdot \rho \cdot D_0}{A_v} \cdot e^{\frac{-0,693t}{T}}$$

där

- G = G-värdet (molekyler/eV),
- V = bestrålade luftvolymen (dm<sup>3</sup>),
- ρ = luftens densitet (g/dm<sup>3</sup>),
- D<sub>0</sub> = begynnelsesdosraten (eV/g · år),
- t = tiden (år)
- T = halveringstiden för strålkällan (år)
- A<sub>v</sub> = Avogadros tal

Under förutsättning att gammastrålkällan har en halveringstid på 30 år erhålls en produktionshastighet som resulterar i en total produktion av salpetersyra på 0,008 mol om

$G = 0,02$  molekyler/eV,

en luftspalt på 5 mm runt kapseln ( $V = 85 \text{ dm}^3$ ),

$\rho = 1,184 \text{ g/dm}^3$  och

en begynnelsesdosrat på 1 Gy/h.

Detta är en liten mängd, som har en försumbar påverkan på kapselns livslängd.

Efter vattenmättnad kommer radiolys av vatten nära kapseln att äga rum. Detta leder till bildning av oxidanter och vätgas. Om dessa radiolysprodukter inte förs bort eller förbrukas genom kemiska reaktioner kommer jämvikt att nås och produktion av ytterligare väte och oxidanter upphör. Om radiolysprodukterna däremot avlägsnas till exempel genom att vätgasen diffunderar bort eller oxidanterna reagerar med kopparkapseln eller andra oxiderbara atomer/joner i systemet kommer produktionen av radiolysprodukter att fortsätta. /Christensen och Pettersson 1997/ har gjort beräkningar av radiolys utanför en kapsel vid en dosrat på 1 Gy/h. Mängden oxiderad koppar kan uppskattas genom att anta att oxidationen av koppar är lika effektiv som oxidationen av löst Fe(II) i Christensens beräkningar. Genom att anta att oxidanterna i ett 5 mm tjockt skikt runt kapseln kommer att nå kapseln kommer högst 0,5 kg koppar att kunna oxideras på 300 år. Detta motsvarar ett korrosionsdjup mindre än 4  $\mu\text{m}$ . Enligt /King et al. 2001/ förefaller den totala effekten av strålning på kopparkorrosion att vara försumbar eller till och med orsaka en minskning av korrosionshastigheten.

**Radiolys** är en *dimensionerande process* för kapseln. Kravet på begränsning av ytdosraten påverkar valet av vägg tjocklek för kopparkapsel och insats. Högsta tillåtna genomsnittliga ytdosrat på kapseln har satts till 1 Gy/h. Referenskapslarna (BWR, PWR) uppfyller kraven på ytdosrat.

### **Spänningskorrosion**

För att spänningskorrosion ska kunna ske krävs ett samspel av flera parametrar. Dessa finns diskuterade i /King och Kolar 2004, 2005/. De avgörande parametrarna är:

1. Värdena på korrosionspotentialen  $E_{\text{CORR}}$  och pH vid kopparytan måste vara sådana att en duplexfilm av  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  är termodynamiskt stabil.
2.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$  eller  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  måste finnas närvarande vid kapselytan samtidigt som  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  filmen är stabil.
3. Halterna  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$  eller  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  måste vara tillräckligt höga för att kunna ge upphov till spänningskorrosion.
4. Halten  $\text{Cl}^-$  måste vara låg för att spänningskorrosion inte ska hämmas.
5. Dragspänningarna i kapselytan måste vara tillräckligt höga för att sprickbildning och sprickutbredning ska kunna ske.

Tillräckligt hög potential för att stabilisera en  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  filmen är möjlig under ett tidigt skede efter deponeringen. Under vattenmättnadsfasen kan dessutom kväveföreningar vara närvarande som radiolysprodukter eller som sprängämnesrester. De halter som skulle kunna förekomma är mycket låga och utgör inte någon risk för spänningskorrosion särskilt som kopparkapseln, innan vattenmättnad (dvs innan kapseln står under övertryck), i stort sett är fri från dragspänningar på ytan.

Efter vattenmättnad kan dragspänningar uppstå lokalt på kapselytan. Dessa dragspänningar går inte genom hela koppartjockleken /Cakmak 1995/. Restsyret i förvaret kommer att förbrukas mycket snabbt (se ovan) och redoxpotentialen kommer att vara för låg för att stabilisera en  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$  film. Dessutom kommer koncentrationerna av ämnen som kan orsaka spänningskorrosion att vara mycket låga. Inga tester i grundvatten eller simulerat bentonitporvatten har visat någon känslighet för spänningskorrosion /King et al. 2001/.

Slutsatsen är att det är mycket osannolikt att spänningskorrosion skulle kunna förekomma under förvarsförhållanden.

*Kommentar:* SKB:s slutsatser gällande spänningskorrosion i koppar har ifrågasatts av SKI:s internationella expertgrupp för hållfasthetsfrågor. För att ytterligare underbygga slutsatsen kommer analyser av spänningsnivåerna hos kopparhöljet att genomföras liksom en översyn av argumentationen utifrån ett kemiskt perspektiv.

**Spänningskorrosion** är inte en dimensionerande process för kapseln.

#### 4.2.2 Kemisk beständighet hos insatsen

Insatsen kommer att skyddas mot omgivningen av kopparhöljet så länge som detta är intakt. Materialval och konstruktion hos insatsen bygger på att den inte påverkas av den kemiska miljön i slutförvaret. Trots detta kan viss kemisk påverkan uppstå på insatsen orsakad av mindre mängder vatten som kan följa med bränslet då det kapslas in. Den möjliga transportvägen utgörs av skadade bränslestavar som behåller vatten i den torkoperation som planeras i inkapslingsanläggningen.

Ett konservativt antagande är att en bränslestav per bränsleelement är vattenfyllt vilket innebär att 600 g vatten förs in i kapseln. På längre sikt kommer detta vatten att kunna läcka ut i insatsens bränslekanaler och komma i kontakt med kvävet som finns i luftatmosfären i insatsen. Analogt med radiolysen av vatten utanför kapseln som beskrivs ovan, kan salpetersyra då bildas inne i kapseln. Mängden salpetersyra som kan bildas kan dock begränsas genom att reducera tillgången på kväve. Detta kan uppnås genom att luftatmosfären i insatsen byts ut vid inkapslingen så att den består av minst 90 % argon eller annan ädelgas. Därigenom kan högst 225 g salpetersyra bildas. Denna mängd är inget hot mot kapselns integritet genom allmän korrosion eller spänningskorrosion. Det krävs dessutom dragspänningar för att spänningskorrosionssprickor ska uppstå och efter full vattenmättnad är spänningarna i insatsen i allt väsentligt kompressiva. Även om dragspänningar förekommer är de lokala och förekommer bara i små områden /Ekberg 1995/ vilket begränsar den möjliga sprickutbredningen. En skadetålighetsanalys för de största tänkbara spänningskorrosionssprickorna (bestämda av dragspänningarnas utbredning i insatsen) kommer att genomföras för de olika belastningsfallen som insatsen dimensioneras för.

Som en följd av att kvävet till stor del ersätts med till exempel argon sker motsvarande minskning av mängden tillgängligt syre i kapseln. Om vatten finns i överskott i relation till syre är det tänkbart att anaerob järnkorrosion som bildar vätgas uppstår efter den inledande aeroba korrosionen. För att klarlägga om den bildade vätgasen kan komma att påverka kapselmaterialet pågår undersökningar av detta.

**Anaerob korrosion i kapseln** är en process som är styrande för torkningen av bränsle i inkapslingsprocessen.

Vidare utredningar krävs kring mängden vatten som kan följa med bränslet in i kapseln liksom undersökningar av inverkan på kapselmaterialet från vätgas samt effekter av eventuella spänningskorrosionssprickor på insatsens hållfasthet.

### 4.3 Mekanisk beständighet

Kapseln i KBS-3-metoden ingår i ett komplext mekaniskt system. Överföring av krafter till kapseln kan ske på mekanisk och hydraulisk väg. Klimatförändringar på jordytan som glacialcykler påverkar kapseln både mekaniskt och hydrauliskt. I systemet finns närmast kapseln en kemisk/mechanisk buffert bestående av 35 cm bentonit. Bentoniten orsakar mekaniska påkänningar på kapseln genom dess svällning. Kapselns insats ger den huvudsakliga mekaniska hållfastheten hos kapseln. Vid en mekanisk analys av systemet måste hela detta system beaktas.

Den konsekutiva utvecklingen av förvaret efter förslutning i perspektivet mekaniska påkänningar på kapseln kan indelas i följande faser:

- vattenmättnadsfasen,
- tempererad/boreal fas och permafrostfasen,
- glaciala fasen
- postglaciala fasen.

#### **Vattenmättnadsfasen**

Efter förslutning av förvaret sker en isostatisk tryckuppbyggnad runt kapseln på grund av ökande grundvattentryck och bentonitsvällning. Det förväntade grundvattentrycket är direkt kopplat till förvarsdjupet. Detta gör att trycken blir olika i Forsmarksområdet där förvaret ligger på 400 m djup (4 MPa) och i Laxemarområdet där det ligger på 500 meters djup (5 MPa).

Vatteninflödet i deponeringshålen orsakar svällning av bentonitbufferten. Bentonitens svälltryck är direkt kopplat till dess vattenmättnadsdensitet som i referensfallet ligger intervallet 1 950–2 050 kg/m<sup>3</sup>. För den övre densiteten blir bentonitens svälltryck 11,7 MPa och för den lägre densiteten 3,4 MPa /Börgesson et al. 2004/. Totaltrycket efter vattenmättnadsfasen framgår av tabell 4-6.

#### **Tempererad/boreal fas och permafrostfasen**

Efter vattenmättnadsfasen råder stabila mekaniska förhållanden för kapseln, dock kan vissa tryckojämnheter kvarstå efter vattenmättnadsfasen orsakad av ojämn bentonitsvällning och eventuell inverkan från deponeringshålets geometri.

**Tabell 4-6. Totaltryck och tryckkomponenter i Laxemar respektive Forsmark. Samtliga värden givna i MPa.**

	Vattentryck	Svälltryck bentonit	Tryck under tempererad/boreal fas	Tryckökning motsvarande Weichselistiden	Tryckökning motsvarande Saaleistiden	Totalt under glaciala fasen (avrundat)
Laxemar lägsta	4	3,4	7,4	22		29,4 (30)
Laxemar högsta	4	11,7	15,7		26	41,7 (42)
Forsmark lägsta	5	3,4	8,4	26		34,4 (35)
Forsmark högsta	5	11,7	16,7		28	44,7 (45)

## **Glaciala fasen**

När isbildningen startar sker en långsam isostatisk tryckuppbyggnad i förvaret. Denna tryckökning antas för Forsmark kunna uppgå till 26 MPa och för Laxemar till 22 MPa om istjockleken blir densamma som under den senaste istiden (Weichsel-istiden). Det tjockaste istäcket under de senaste två miljoner åren fanns under Saale-istiden och under sådana förhållanden skulle tryckökningen på förvarsdjupet bli 28 MPa i Forsmark och 26 MPa i Laxemar /SKB 2006a/. Av tabell 4-6 framgår att det högsta isostatiska trycket på kapseln bli 45 MPa för Forsmarksfallet och 42 MPa för Laxemarfallet vilket motsvarar Saale-istiden. (Weichsel-istiden ger 43 MPa för Forsmark och 40 MPa för Laxemar).

## **Postglacialt tillstånd**

Efter glaciationsfasen sker en långsam trycksänkning i förvaret tillbaka till de förhållanden som rådde innan den glaciala fasen. Då berget avlastas kan under vissa förhållanden jordbävningar uppstå som ger mekanisk påverkan på kapseln. I SR-Can diskuteras sannolikheten för dessa jordbävningar. En jordbävning kan leda till att befintliga sprickor som skär deponeringshål kan aktiveras och skjuvas.

## **Jordbävningens frekvens**

En expertbedömning inom ramen för ett projekt lett av SSI /Hora och Jensen 2005/ pekar på att det i genomsnitt sker 0,1 jordbävningar med magnitud 6 inom 10 km från förvarsplatsen under en glacialcykel. Projektet syftade till att prova metodiken för att ta fram expertbedömningar snarare än att ge ett svar på frågan om sannolikheten för ett jordskalv. Det visade dock en anmärkningsvärd samstämmighet mellan olika experters uppfattningar trots mycket olika sätt att angripa problemet. Detta tyder på att den uppskattade sannolikheten för jordskalv ändå kan betraktas som realistisk. I SR-Can /SKB 2006a/ bedöms sannolikheterna för en jordbävning av magnitud 6 eller större. Utifrån data från /La Pointe et al. 1999, Hora och Jensen 2005/ kommer man till slutsatsen att sannolikheten för en jordbävning inom en radie på 5 km under en glacialcykel på 120 000 år är  $3 \cdot 10^{-2}$ . Översatt i skadade kapslar motsvarar detta  $1,4 \cdot 10^{-2}$  kapslar för Forsmark och  $7,7 \cdot 10^{-3}$  för Laxemar. I avvaktan på resultat från pågående simuleringar /t ex Lund 2005/ har man ansett detta antagande adekvat för säkerhetsanalysen.

## **Skjuvningens amplitud**

Referensfallet med en jordbävning med magnitud 6 orsakar en skjuvrörelse över ett deponeringshål motsvarande 0,1 m /SKB 2006a/.

## **Lastöverföring till kapseln via bentonitbufferten**

Bentonitbufferten i ett deponeringshål fungerar som en kudde mellan kapseln och berget, som avsevärt reducerar inverkan av en skjuvning. Ju lägre densitet bentoniten har desto mjukare buffert och desto mindre påverkan på kapseln. Med ökande densitet ökar bentonitens styvhet. Styvheten vid skjuvning är också en funktion av skjuvhastigheten och styvheten ökar med ökande skjuvhastighet. /Börgesson et al. 2004/ har undersökt styvheten och skjuvhållfastheten hos buffertmaterialet vid olika vattenmättnad i laborieförsök vid olika skjuvhastigheter. Med hjälp av dessa tester har en materialmodell som tar hänsyn till skjuvhastighet och densitet formulerats. Försöken har utförts med skjuvhastigheter upp till 6 m/s.

## **Inverkan på kapseln**

Effekter av bergskjuvning har modellerats av /Börgesson et al. 2004/ och beräknats med ABAQUS som är ett program för finit element analys. De parametrar som användes i beräkningarna är:

- Skjuvrörelsens storlek – 5, 10 och 20 cm.
- Skjuvrörelsens riktning – Antas pessimistiskt vara vinkelrät mot kapselns axel.
- Läget för skuvning – Mitt på kapseln eller vid en fjärdedel av kapseln längd.
- Skjuvningshastigheten – Antas pessimistiskt ske med 1 m/s, se diskussion i /SKB 2006a/.
- Buffertens styvhet – Fyra olika skjuvbrottgränser i intervallet 3 900 till 15 200 kPa vilket svarar mot bentonitdensiteterna 1 950 respektive 2 100 kg/m<sup>3</sup>.

Resultaten visar att inverkan av buffertens densitet och skjuvplanets läge är särskilt stor, men också att skjuvhastigheten och storleken hos skjuvrörelsen har en signifikant påverkan. Vid lägre densitet är en skjuvning på en fjärdedel av kapseln längd farligare men vid högre densitet är en skjuvning mitt på kapseln värst.

Referensfallet med bentonitdensiteten 2 000 kg/m<sup>3</sup> och skjuvrörelsen 10 cm ger en maximal töjning på 1,6 % i insatsen. För en ökad skjuvrörelse till 20 cm ökar töjningen till 4,4 %.

Vid den konservativa kombinationen av skjuvhastigheten 1 m/s, skjuvrörelsen 20 cm och densiteten 2 100 kg/m<sup>3</sup> blir kapselinsatsen starkt påverkad med plastiska töjningar upp till 19 %.

*Kommentar:* /Andersson et al. 2005/ redovisar i en större undersökning förlängningsvärden som erhållits vid provgjutning av tre insatser. En allmän slutsats är att ganska stor spridning kan förväntas mellan provstavarna och att ett probabilistiskt angreppssätt krävs för att ge relevanta resultat angående insatsens hållfasthet. För närvarande pågår ett utvecklingsprogram för att förbättra produktionsmetoderna som kommer att utvärderas under 2007. Bentonitdensiteten har stor betydelse för skjuvbelastningarna på kapseln.

**Skjuvning av deponeringshål** orsakad av postglaciala jordbävningar är *en dimensionerande process* och kapseln dimensioneras för en skjuvrörelse på 0,1 m.

### **4.3.1 Mekanisk beständighet hos kopparhöljet**

Under förvarets utveckling finns tre faser där kopparhöljet kan utsättas för mekaniska laster.

Dessa är:

- vattenmättnadsfasen,
- tempererat/borealt och permafrostfasen,
- postglaciala fasen.

#### **Vattenmättnadsfasen**

Tryckuppbyggnaden under vattenmättnadsfasen gör att kopparhöljet deformeras och tar stöd mot insatsen. Sannolikt sker förloppet som en kombination av plastisk deformation och krypning. Storleken på de plastiska och/eller kryptöjningar beror på storleken på glappet mellan kopparhölje och insats och ökar i stort sett linjärt med detta så att ett gap på 1 mm ger 1,9 % töjning medan 4 mm ger 7 % /Cakmak 1995/. Detta är oberoende av koppartjocklek.

Tillverkningsstoleranserna gör att det maximala radiella glappet uppgår till 1,75 mm vilket svarar mot en kryptöjning på 4 %. Senare förändringar i kapselns detaljutformning gör att beräkningarna ovan behöver kompletteras för att fastställa den maximala töjningen som kan uppstå. Det finns dock betydande marginaler i töjningsegenskaper hos kopparhöljet oberoende av vilken töjningsmekanism som är aktiv. Den lägsta duktiliteten i kopparhöljet finns i svetsarna där brottförlängningen uppgår till 50 % och krypduktiliteten till 30 %. Detta gäller även vid ett pessimistiskt antagande om att all deformation under vattenmättnadsfasen sker genom krypning.

**Krypning under vattenmättnadsfasen** är en dimensionerande process för kopparmaterialet och krypduktiliteten måste uppgå till minst 4 %.

### **Tempererad/boreal fas och permafrostfasen**

/Werme 1998/ anger ett fall där kopparhöljet belastas på grund av ojämn bentonitsvällning. Fallet kan tänkas uppstå efter vattenmättnad men kan bli bestående. Fallet beskrivs i figur 4-6.

Svällningstrycket är fullt utbildat runt nedre halvan av kapseln medan svällningstrycket är 20 % lägre runt övre halvan. Den resulterande uppåtriktade kraften, som uppkommer av skillnaderna i tryck mot kapselns ändtytor, balanseras av en skjuvkraft längs nedre halva mantelytan. Lastfallet innebär att hela lasten kommer att bäras av den yttre kopparmanteln. Den obalanserade kraften mellan kapselns ändar måste bäras av den axiella friktionen mellan koppar och bentonit. Den obalanserade kraften är:

$$\Delta F = \Delta p \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

där:

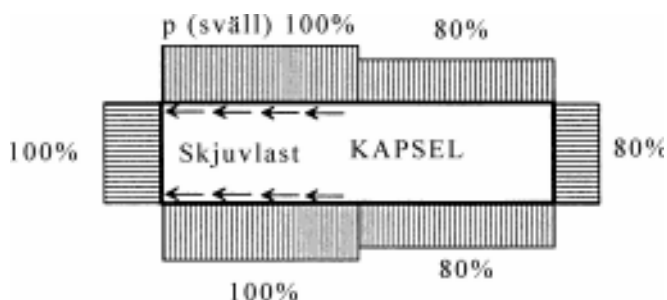
$\Delta F$  är den obalanserade axiella kraften

$\Delta p$  är tryckskillnaden mellan kapselns ändar (20 % av 7 respektive 13 MPa)

$D$  är kapselns ytterdiameter (1,05 m)

$\Delta F = 1,21$  MN för 7 MPa och 2,25 MN för 13 MPa.

Genom att bortse från friktionen mellan kopparmanteln och insatsen kommer den obalanserade kraften att tas upp av kopparmanteln, motsvarande en axiell spänning i koppargodset på 7,8 respektive 14,5 MPa. Detta är låga spänningar jämfört med sträckgränsen på > 45 MPa. De resulterande skjuvspänningarna är betydligt lägre.



**Figur 4-6.** Ojämn bentonitsvällning orsakar belastning på kopparhöljet.

## **Postglaciala fasen**

Några mekaniska påkänningar i övrigt på kopparhöljet kommer inte att uppstå innan den postglaciala fasen. I samband med postglaciala jordbävningar kan emellertid skjuvrörelser i deponeringshålet påverka kopparhöljet. Sker skjuvning av ett deponeringshål uppstår en växelverkan mellan buffert och kapsel där insatsen tvingar bentonitbufferten att flyta. Bentonitens flytrörelse överförs till kopparhöljet via friktionen mellan de två medierna och resulterar i en plastisk töjning av kopparhöljet. Efter plasticeringsfasen sker en återhämtning i bentoniten genom krypning som även den delvis överförs till kopparhöljet. Enligt /Börgesson et al. 2004/ ger 10 cm skjuvning, skjuvhastighet 1 m/s och bentonitdensiteten 2 000 kg/m<sup>3</sup> en initial plastisk töjning i kopparhöljet på 7 %. Beräkningarna har kompletterats av /Hernelind 2006/ genom att inkludera effekter från kryprelaxationen i bentoniten som via friktion påverkar kopparhöljet. Modellen som använts ger en pessimistisk uppskattning av kryptöjningen i kopparhöljet på 7,7 %. Pågående beräkning med hjälp av en förbättrad modell förväntas ge ett lägre värde. Se även tabell 4-9.

## **Dimensionerande processer för kopparhöljet**

**Kopparhöljets deformation** under vattenmättnadsfasen är *en dimensionerande process* och kopparmaterialet måste ha en krypduktilitet på minst 4 %.

**Skjuvning av deponeringshål är en dimensionerande process** som ger upphov till en plastisk töjning på 7 % och en kryptöjning på 7,7 %.

## **Kopparmaterialets mekaniska egenskaper**

Krypprovning har genomförts på alternativa kopparmaterial och resultaten hittills visar att ren syrefri koppar<sup>1</sup> har för låg krypduktilitet vid temperaturer över 160 °C. Den låga duktiliteten är kopplad till svavelinnehållet. Vid en svavelhalt på 10 ppm är krypduktiliteten lägre än 1 %. Augeranalyser visade på höga halter svavel (8 till 13 atomprocent) i korngränserna /Henderson och Sandström 1997/. Andra kopparmaterial, speciellt fosfor- och silverlegerad koppar, har visat sig inte ha den rena syrefria koppars begränsningar i detta avseende /Henderson och Werme 1996, Lindblom et al. 1995, Andersson et al. 1999/.

Resultaten från krypprovningarna visar att modifieringar måste göras i sammansättningen hos den syrefria kopparn för att kraven på krypduktilitet också ska uppnås. /Andersson et al. 1999/ har visat att en tillsats av 30 ppm fosfor ökade krypduktiliteten och kryplivslängden medan en ytterligare ökning (upp till 100 ppm) inte påverkade egenskaperna ytterligare. För den fosforhaltiga kopparen hade svavelhalter i intervallet 6 till 12 ppm ingen mätbar påverkan på krypduktiliteten. Kornstorlekar i intervallet 100 till 800 µm hade heller ingen inverkan på krypduktiliteten. En teoretisk studie av /Korzhavyi et al. 1999/ förklarar fosfors påverkan på krypduktiliteten med konkurrens mellan svavel och fosfor om vakanspositioner vid korngränserna. Fosfor har även en annan önskvärd egenskap som desoxidant. Korrosionsprovning har visat att tillsatsen av fosfor inte ökar kopparmaterialets känslighet för korngränskorrosion, varken i grundmaterialet eller i svetsat gods /Fennell et al. 2001, Gubner et al. 2006/.

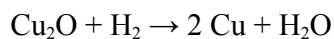
---

<sup>1</sup> Enligt standarden ASTM UNS C10100 (Cu-OFE)



Av vikt är att kopparmaterialet har låga halter av vissa olösliga grundämnen: bly, tellur, selen och vismut som försprödar koppar. De exakta kraven i detta avseende har hämtats ur materialstandarderna EN 1976 Cu-OFE och EN Cu-OF1.

Slutligen ställs krav på vätehalten. Vid varmformningsprocesserna, vilka sker vid höga temperaturer, kan väte ge upphov till väteförsprödning genom att det reducerar kopparoxid till koppar enligt formeln /Dies 1967, p 118/.



Det bildade vattnet kan skapa porer i materialet vilket inte är önskvärt.

För samtliga undersökta kopparmaterial i /Andersson et al. 1999/ var brottförlängningen för dragprov över 30 % och med undantag för den största kornstorleken, 2 000 µm, över 40 %.

En senare sammanställning av /Claesson 2005/ som inkluderar samtliga aktuella tillverknings- och svetsmetoder visar att olika formnings- och svetsprocesser har en tydlig inverkan på materialegenskaperna. Brottförlängningen ligger dock över 50 % (lägsta rapporterade värde 49 %) med undantag för EBW-svetsat material som visar en brottförlängning på cirka 30 %.

Utöver grundmaterialet har även elektronstrålesvetsar och svetsar utförda med friction stir welding (FSW) krypprovats /Andersson et al. 2005/. Krypprovningarna har inte visat några större skillnader mellan svetsen och grundmaterialet för krypduktilitet och kryplivslängd /Andersson et al. 2005/.

### **Strålningspåverkan**

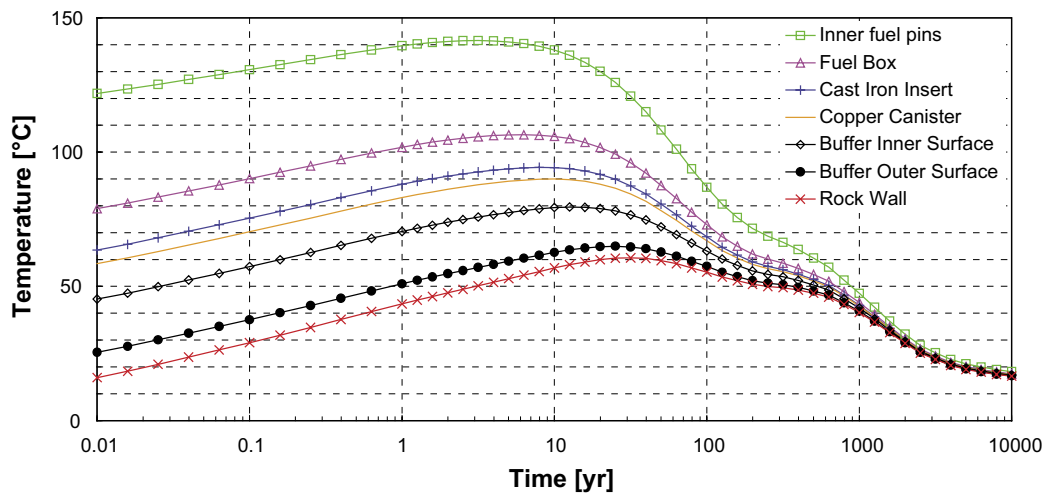
Högenergetisk strålning kan ge skador på fasta material som påverkar dimensioner och fysiska egenskaper. /Guinan 2001/ har utrett effekterna av gamma- och neutronstrålning på kapselmaterialet. Utredningen visar att inga detekterbara skador eller förändringar på kapselmaterialet kommer att uppkomma under kapseln livstid. Genom jämförelser med experiment redovisade i litteraturen drar /Guinan 2001/ slutsatsen att storleken på eventuella förändringar av fysiska egenskaper (t ex sträckgräns, kryphastighet eller försprödning) på grund av strålningspåverkan kommer att vara försumbara. Strålningspåverkan på kopparmaterialet kan därför försummas vid dimensionering av kopparhöljet.

### **Temperaturpåverkan**

Temperaturutvecklingen i kapseln styrs av resteffekten i kapseln, värmeledningen i de olika gränsskikten mellan olika materialen i systemet kapsel-bentonit-berg, värmeledningsförmågan hos de olika materialen i systemet samt avstånden mellan kapslarna i förvaret. Figur 4-7 beskriver temperaturutveckling i kapseln och närområdet /SKB 2006a/.

### **Förutsättningar och viktiga indata vid beräkningarna**

Pessimistiskt antas att förhållanden före vattenmättnad består under 10 000 år, dvs ett bestående gap på 5 mm mellan kapseln och bentoniten och ett gap på 3 cm mellan bentoniten och berget. Detta påverkar beräkningarna så att en viss överskattning av temperaturen på lång sikt sker.



Figur 4-7. Temperaturutveckling hos kapseln och närområdet.

## Resultat

Temperaturen är beräknad till högst 90 °C i kopparhöljet och högst 95 °C i gjutjärnsinsatsen.

## Kommentar

Enligt avsnitt 4.3.1 kommer kopparhöljet deformeras och ta stöd av insatsen under vattenmättnadsfasen. Konservativt antas denna deformation ske genom krypning men en plastisk kollaps av kopparhöljet kan inte uteslutas. Undersökningarna av krypning i koppar inleddes vid 175 °C men krypbeteendet har undersökts vid successivt lägre temperaturer och idag studeras krypning vid 75 °C /Andersson et al. 2005a/. Det finns ytterligare krypdata vid KIMAB (ej publicerade) inom det temperaturområde som är aktuellt under vattenmättnadsfasen.

När det gäller snabbare deformationsförlopp vid i det intressanta temperatur intervallet behövs fler undersökningar. Vissa dragprover av koppar har utförts vid 100 °C, mätningarna är gjorda av TWI /Bell 1996/ och visar en sänkning av flytgränsen på 14 % relativt den vid 20 °C och en sänkning av brottgränsen på 12 % jämfört med 20 °C. KIMAB (ej publicerad) har undersökt FSW svetsen vid 100 °C. KIMAB:s resultat visade inte några väsentliga skillnader i flytgräns och brottgräns mellan 22 °C och 100 °C tvärs svetsen. Vid rumstemperatur finns omfattande dragprovdata avseende såväl olika svetsmetoder och olika tillverkningsmetoder /Claesson 2005/.

Vid postglaciala jordbävningar kan kopparhöljet utsättas för plastisk töjning och laster som ger upphov till krypning enligt avsnitt 4.3.1. Den förväntade temperaturen vid dessa belastningar överstiger 0 °C /SKB 2006a/. Kompletterande studier av koppars mekaniska egenskaper i detta temperaturområde speciellt vad det gäller krypegenskaperna kommer att genomföras.

## Slutsatser

Ur mekanisk synpunkt kan således härledas att kopparmaterialet minst måste uppfylla kraven i tabell 4-7:

**Tabell 4-7. Härledda tillåtna halter i kopparmaterialet.**

<b>Krav</b>	<b>Förtydligande</b>
O < 5 ppm	Krävs för svetsbarhet med elektronstrålesvetsning
S < 12 ppm	Försprödning
30 ppm < P < 100 ppm	Krypduktilitet
Se < 3 ppm	Risk för försprödning. Se även tilläggskrav i standard i EN 1976 Cu-OFE alternativt EN 1976 Cu-OF1
Te < 2 ppm,	Risk för försprödning. Se även tilläggskrav i standard i EN 1976 Cu-OFE alternativt EN 1976 Cu-OF1
Pb < 5 ppm	Risk för försprödning. Se även tilläggskrav i standard i EN 1976 Cu-OFE alternativt EN 1976 Cu-OF1
Bi < 1 ppm	Risk för försprödning. Se även tilläggskrav i standard i EN 1976 Cu-OFE alternativt EN 1976 Cu-OF1
H < 0,6ppm	Risk för väteförsprödning under värmebehandling

## **Struktur**

Kornstorleken < 800 µm.

### **SKB:s materialspecifikation för koppar**

SKB:s specifikation för kopparmaterialet KTS001 tar som utgångspunkt standarderna EN 1976 Cu-OFE alternativt EN 1976 Cu-OF1. Dessa standarder har ett bredare tillämpningsområde och specificerar ytterligare halter som primärt inte påverkar de mekaniska egenskaperna.

Dessutom har SKB valt att ytterligare skärpa kraven som härletts ovan i vissa avseenden så att S < 8 ppm, P = 30–70 ppm, kornstorlek < 360 µm. Ytterligare krav på kornstorleken kan komma att ställas för att säkerställa att kvalitetskontroll med ultraljudprovning kan ske med tillräcklig tillförlitlighet.

Genom att använda kopparmaterial som uppfyller dessa standarder och SKB:s tilläggskrav uppfylls konstruktionsförutsättningarnas krav på materialsammansättning efter svetsning med FSW /Salonen 2004/.

### **4.3.2 Mekanisk beständighet hos insatsen**

Samtliga faser av förvarets utveckling kommer att ge mekanisk påverkan på insatsen

- vattenmättnadsfasen,
- tempererad/boreal fas och permafrostfasen,
- glaciala fasen,
- postglaciala fasen.

Bentonitbuffertens egenskaper påverkar belastning på kapseln. Det finns två parametrar hos bufferten som krävs för att beskriva lastöverföringen i olika situationer:

- svälltryck,
- skjuvhållfasthet.

Båda dessa är direkt beroende av vattenmättnadsdensiteten hos bufferten. Tabell 4-8 visar sambandet mellan vattenmättnadsdensitet, svälltryck och skjuvhållfasthet /Börgesson et al. 2004/.

Referensvärdet för vattenmättnadsdensiteten hos bufferten är 2 000 kg/m<sup>3</sup>.

### Vattenmättnadsfasen

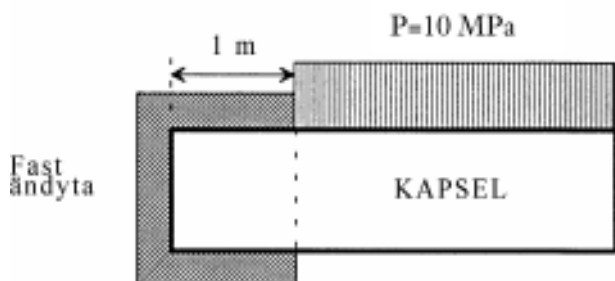
Bevätningen av bentonitbufferten förväntas ske så att svällningstrycket blir jämnt uppbyggt. Det kan dock inte helt uteslutas att viss ojämnheter i tryckuppbyggnaden inträffar. Ojämnheter kan inträffa antingen under vattenmättnadsfasen till följd av ojämn bevätning eller efter full vattenmättnad och beror då på skillnader i bentonitens densitet eller deponeringshålets geometri. I /Werme 1998/ redogörs för olika fall av ojämn tryckfördelning och det mest ogynnsamma fallet som identifierats innebär att bevätningen sker assymetriskt så att svälltrycket utvecklas i bufferten vid ena kapseländan och utefter kapselns ena sida vilket ger ett böjmoment på kapseln. Fallet visas i figur 4-8.

Följande indata användes i beräkningen: svälltryck 10 MPa vilket svarar mot en bentonitdensitet > 2 025 kg/m<sup>3</sup>.

Vid beräkningen av påkänningen betraktas kapseln som inspänd i ena ändan över en längd av en meter. En jämnt utbredd last motsvarande fullt utbildat svällningstryck i bentoniten verkar längs den resterande kapselytans ena sida. Belastningsfallet är analyserat i /Börgesson och Hernelind 1998/. Det verkande svälltrycket är 10 MPa vilket svarar mot en bentonitdensitet > 2 025 kg/m<sup>3</sup>. Analysen visar att begränsande för spänningen i kapseln är bentonitens plastiska egenskaper. Den största dragspänningen i insatsen visar sig ligga under 55 MPa. Denna belastning är dock av övergående art då bevätningen av bufferten blir fullständig.

**Tabell 4-8. Sambandet mellan bentonitens vattenmättnadsdensitet, svälltryck och skjuvhållfasthet.**

Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Svälltryck (MPa)	Skjuvhållfasthet MPa (1 m/s)
1 950	3,4	3,9
2 000	6,1	6,0
2 050	11,6	9,9



**Figur 4-8.** Det mest ogynnsamma belastningsfallet för insatsen under vattenmättnad. Svälltryck utvecklas i bufferten utefter kapselns ena sida i ena ändan av kapseln.

### **Efter vattenmättnadsfasen**

Bevätningen av bentonitbufferten förväntas ske så att svällningstrycket blir jämnt uppbyggt. Det kan dock inte helt uteslutas att bentonitdensitet varierar, att kapseln är snedplacerad eller lutar i deponeringshålet eller att detta har en ogynnsam geometri. I alla dessa fall kan en bestående tryckjämnhet uppstå även efter vattenmättnad. I /Werme 1998/ redovisas olika fall av ojämn tryckfördelning som kan tänkas uppstå beroende på ojämn fördelning av bentonitbuffertens densitet. Ett pessimistiskt antagande är analogt med figur 4-8.

Nedre delen av insatsen är inspänd i bentonit med en medeldensitet på 2 025 kg/m<sup>3</sup>. Längs den resterande kapseln omges ena halvan av bentonit med densiteten 2 050 kg/m<sup>3</sup> och den andra halvan av bentonit med densiteten 1 950 kg/m<sup>3</sup>.

Belastningen på kapseln blir då analog med fallet i figur 4-8 dock med en mindre tryckskillnad som uppgår till 8 MPa jämfört med 10 MPa ovan. Den högsta bestående spänningen orsakad av densitetsskillnader kan då pessimistiskt anges till 55 MPa.

Ojämnheter i deponeringshålet, så som krökning och ovalitet, kan adderas till effekterna ovan. En sammantagen analys där såväl bentonitdensitetsvariationer som geometrisk variation hos deponeringshålet beaktas kommer att utföras. Det kan dock konstateras att begränsningarna i bentonitens styvhet, speciellt vid långsamma förlopp, gör att det är osannolikt att bestående spänningar större än 55 MPa uppstår i kapseln.

**Ojämn svällning, under vattenmättnaden eller som är bestående, är en dimensionerande process** för insatsen och ger upphov till en spänning som pessimistiskt bestäms till 55 MPa.

### **Glaciationsfasen**

De laster som kapseln kommer att utsättas för under förhållanden jämförbara med dagens är sammansatta av det hydrostatiska trycket på förvarsdjupet och bentonitens svälltryck.

Beräkning av det kombinerade lastfallet från svälltryckets variationer, eventuella effekter från borrhålets geometri samt det isostatiska grundvattentrycket kommer att utföras. Översiktligt kan dock konstateras att de axiella krafter som kommer att påverka kapseln är motsatt riktade mot de spänningar som kan uppstå på grund av ojämn svällning.

Kapselns hållfasthet mot det radiellt verkande isostatiska trycket har både beräknats och provats experimentellt i två fall /Andersson et al. 2005, Nilsson et al. 2005/. Den experimentella undersökningen visar att brottsannolikheten är mycket liten. Kompletterande 3-D finita element (FEM) beräkningar är planerade för att utreda vissa tröskelfenomen som framkommit i den genomförda hållfasthetsanalysen med 2-D FEM beräkningar.

**Glaciation** är en *dimensionerande process* för kapseln. Det högsta isostatiska trycket som kapseln kan utsättas för har pessimistiskt angivits till 45 MPa.

### **Postglaciala fasen, jordbävningar**

Som nämns ovan har effekter på kapseln från skjuvning av deponeringshål orsakad av en postglacial jordbävning undersökts med både laboratorieförsök och FEM-beräkningar av /Börgesson et al. 2004/.

Tabell 4-9 redovisar de viktigaste resultaten. Skjuvplanets placering i relation till kapseln anges med beteckningen "es" vid ytterända eller "c" centralt.

**Tabell 4-9. Beräknad maximal plastisk töjning  $\epsilon_p$  i kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen vid olika förskjutningslängder  $\delta$  (es = skjuvning vid kapseländarna, c = skjuvning vid kapselns mitt,  $\delta_p$  = start för plasticering av gjutjärnsinsatsen).**

Skjuvplanets placering/ densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Kopparröret	Berg	Gjutjärnsinsats		
	Max $\epsilon_p$ (%) vid $\delta=20$ cm	$\delta_p$ (cm)	$\epsilon_p$ (%) vid $\delta=5$ cm	$\epsilon_p$ (%) vid $\delta=10$ cm	$\epsilon_p$ (%) vid $\delta=20$ cm
es/1 950	6	3	0,1	0,7	2,7
es/2 000	8	2	0,4	1,6	4,4
es/2 050	15	2	0,8	2,4	6,2
es/2 100	24	2	1,2	4,1	10
c/1 950	4	–	0	0	0
c/2 000	6	4	0,01	0,08	0,17
c/2 050	16	3	0,5	3,6	11
c/2 100	26	2	3	9	19

Resultaten visar att inverkan av buffertens densitet och skjuvplanets läge är särskilt stor, men också att skjuvhastigheten och storleken hos skjuvrörelsen har en signifikant påverkan. Vid de lägre densiteterna är en skjuvning på en fjärdedel av kapselns längd farligare men vid de högre densiteterna är en skjuvning mitt på kapseln värst. Vid referensfallet med buffertdensiteten 2 000 kg/m<sup>3</sup> och skjuvrörelsen 10 cm är den maximala i töjningen insatsen till 1,6 %. Ökar skjuvrörelsen till 20 cm blir töjningen 4,4 %.

### **Material och egenskaper hos insatsen**

/Werme 1998/ ger bakgrunden till valet av gjutjärn för insatsen. Kapselinsatsen tillverkas av segjärn. Detaljer kring utformning och tillverkning av kapselinsats ges i /Andersson 1998, 2001, 2005/ och /Andersson et al. 2004/.

Materialet i insatsen ska uppfylla kraven i ”EN 1563 grade EN-GJS-400-15U” (Nummer EN-JS1072, SS 07 17-00). Insatsens lock ska vara av stålplåt enligt ”EN 10025 S355J2G3, SS 14 2172 eller liknande kvalitet med minst samma hållfasthet och duktilitet, se tabell 4-10.

Som diskuterats ovan måste kapseln dimensioneras för att motstå (referensfallen):

1. en böjspänning på 55 MPa (ojämn svällning),
2. ett maximalt isostatiskt övertryck på 45 MPa (glaciation),
3. en skjuvrörelse tvärs kapseln på 0,1 m (postglacial jordbävning).

Fall 1. ger en belastning på insatsen som motsvarar cirka 25 % av den nominella sträckgränsen, vilket innebär innebär en femfaldig säkerhet mot plasticering.

Fall 2. har analyserats av /Andersson et al. 2005, Dillström 2005/ i en probabilistisk analys där även tillverkningskvaliteten beaktats och viktiga tillverkningsfaktorer identifierats och tagits om hand i SKB:s specifikationer. Vidare har två fullskaliga tryckprov genomförts som i allt väsentligt bekräftar beräkningarna /Nilsson et al. 2005/.

Fall 3. ger måttliga töjningar, < 1,6 % för referensvärdet på bentonitdensiteten 2 000 kg/m<sup>3</sup> vilket ska jämföras med brotttöjningen som nominellt uppgår till 11 %.

**Tabell 4-10. Minimikrav för hållfasthet och duktilitet för segjärn EN-GJS-400-15U och konstruktionsstål S355J2G3 vid rumstemperatur och 100 °C.**

Materialkvalitet	Brottgräns (MPa)	Brottöjning %	Sträckgräns vid 20 °C (MPa)	Sträckgräns vid 100 °C (MPa)
EN-GJS-400-5U	370	11	240	~ 230
S355J2G3	490–630	19	335	~ 295

I praktiken har man inte nått upp till de nominella värdena vid provtillverkning av insatser /Andersson et al. 2004/. Tillverkningsprocessen har dock förbättrats och en ny utvärdering kommer att genomföras under 2007 baserad på en demonstrationsserie om fem insatser gjutna under seriemässiga former.

### ***Insatsens lock och botten***

Insatsen gjuts så att en integrerad botten erhålls. Stållocket tillverkas av stålplåt.

Handboksberäkningar visar att för den dimensionerade högsta lasten måste bottendelen vara 41 mm tjock för BWR-utförandet och 70 mm tjock för PWR-utförandet. En säkerhetsfaktor på 2 har använts för gjutjärnet. För locket är motsvarande värden 31 mm respektive 52 mm. En säkerhetsfaktor på 1,5 har använts för konstruktionsstål /Raiko 2005/.

För att komplettera dessa underlag pågår eller planeras följande:

- 3-D-analys till global kollaps av insatsen. Analysen utgör en komplettering till /Andersson et al. 2005, Dillström 2005/.
- Skadetålighetsanalys av insatsen för att identifiera detekteringsmål för oförstörande provning.
- Analys av eventuella spänningskorrosionssprickors utbredning och skadetålighetsanalys av insatsen för dessa.
- Bestämning av materialdata och deras spridning för en färdigutvecklad process. Arbetet utgör en komplettering till /Andersson et al. 2005, Dillström 2005/.
- Beräkning av stållockets hållfasthet med hänsyn till detaljkonstruktionsändringar för atmosfärsbyte i kapseln.

### ***Långsiktig mekanisk beständighet***

Insatsen kommer att belastas under lång tid. Som komplement till hållfasthetsberäkningarna behöver en tidsberoende analys göras. Tidsberoende effekter kan uppstå genom att segjärnet kryper. Därför pågår krypprovning av segjärn.

### ***Temperaturpåverkan***

Den största tryckbelastningen på kapseln kommer att inträffa i samband med avsmältningen av inlandsis, dvs tiotusentals år framåt i tiden. Som framgår av figur 4-7 har temperaturen på gjutjärnsinsatsen då kommit tillbaka till omgivningstemperaturen och de data som redovisas i /Andersson et al. 2005/ är relevanta data.

Under tidigare faser med förhöjd temperatur är belastningarna på insatsen låga och en lägre flytgräns (uppskattningsvis mindre än 5 %) kommer inte att ha någon betydelse för hållfastheten.

#### 4.4 Säkerställande av att kriticitet inte uppstår

För hantering och slutförvaringen av använt kärnbränsle tillämpas normala kriterier för säkerhet mot kriticitet. Detta betyder att den effektiva neutronmultiplikationskonstanten ( $k_{\text{eff}}$ ) inklusive osäkerheter ej får överskrida 0,95. /Agrenius 2002/ har beräknat  $k_{\text{eff}}$  för ett antal fall där bränslet är torrt respektive där vatten kommer i kontakt med bränslet. Om inget vatten finns i kapseln i slutförvaret och kapseln innehåller obestrålat bränsle är  $k_{\text{eff}}$  mindre än 0,5, det vill säga systemet är underkritiskt med mycket stor marginal. Om vatten tränger in i kapseln var resultatet:

BWR:  $k_{\text{eff}} = 0,9050 \pm 0,0012$

PWR:  $k_{\text{eff}} = 1,0550 \pm 0,0012$

För det osannolika fallet med en vattenfylld kapsel under torrförvaring ger det värsta fallet:

BWR:  $k_{\text{eff}} = 0,9319 \pm 0,0012$

PWR:  $k_{\text{eff}} = 1,0903 \pm 0,0012$

Slutsatsen är alltså att reaktivitetskriteriet inte kan uppfyllas med det pessimistiska antagande att bränslet är obestrålat utan att utbränningskreditering är nödvändig för PWR bränsle.

/Agrenius 2002/ beräknar även neutronmultiplikationskonstanten för bestrålat bränsle med olika begynnelseanrikning med hänsyn till isotophalterna för tre uppsättningar isotoper:

Set 1:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ .

Set 2: Set 1 +  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{145}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ .

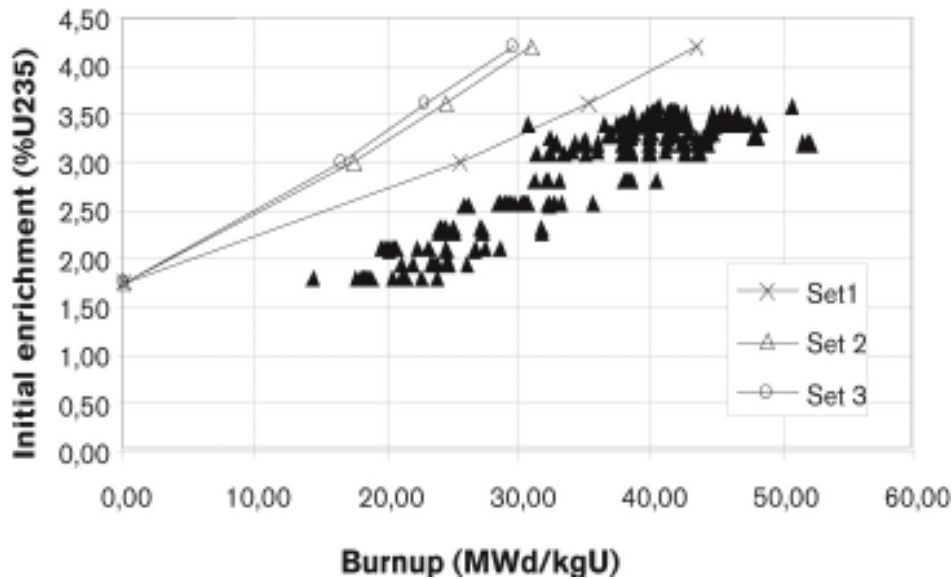
Set 3: Set 2 +  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ .

I Figuren 4-9 och 4-10 visas begränsningskurvor. Dessa kurvor sammanbinder alla punkter där begynnelseanrikning och utbränning ger  $k_{\text{eff}} = 0,95$ . Figuren visar också inventariet av bränsle i Clab 1998-12-31. Det framgår att kreditering för aktiniderna i Set 1 gör att även för PWR bränsle kan kriteriet  $k_{\text{eff}} = 0,95$  uppfyllas. Ytterligare marginaler mot kriticitet fås med Set 2, medan Set 3 bara ger en marginell förbättring.

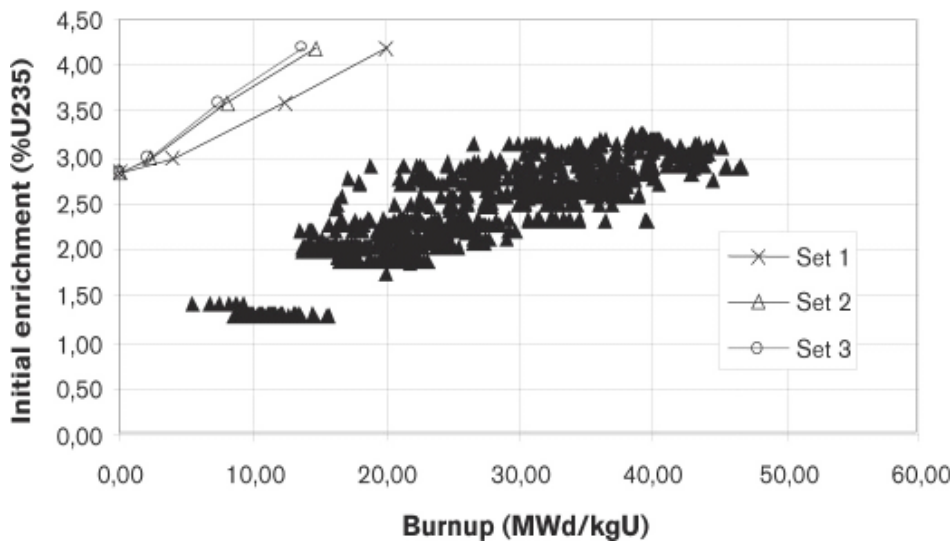
**Sammanfattning:** Bränslet kommer att förbli underkritiskt med nuvarande utformning på insatsen om utbränningskreditering används.

Ett tänkbart tillverkningsfel vid gjutning av insatsen är att delar av mellanväggarna saknas. Det är av intresse att studera hur sådana fel skulle påverka kriticitetsberäkningarna för kapseln. Kompletterande beräkningar kommer därför att utföras.





Figur 4-9. Begränsningskurvor för PWR-bränsle jämfört med inventariet i Clab 1998.



Figur 4-10. Begränsningskurvor för BWR-bränsle jämfört med inventariet i Clab 1998.

## 4.5 Liten påverkan på övriga barriärer

Kapseln får inte påverka slutförvarets flerbarriärsystem. Analysen nedan omfattar de fall där en påverkan på bufferten anses vara möjlig.

### 4.5.1 Strålningspåverkan

Kapseln måste ge tillräcklig stråldämpning för att inte, genom strålningspåverkan, förändra bentonitbufferten eller vattenkemin i närområdet. Strålning kan orsaka radiolys av vatten eller fuktig luft före vattenmättnad.

#### **4.5.2 Kemisk påverkan**

Kapselmaterialen kan påverka andra barriärer mekaniskt och kemiskt. Lösligheten för kopparsulfid, som är koppars korrosionsprodukt under reducerande förhållanden, är extremt låg. Kemisk påverkan på buffert och berg kan därför uteslutas. Med den extremt låga korrosionshastigheten hos koppar under reducerande förhållanden i förvarsmiljö kommer inte heller någon mekanisk påverkan på närområdet att uppstå.

#### **4.5.3 Termisk påverkan**

Vid alltför höga temperaturer påverkas bentonitbufferten negativt. Av detta skäl får inte temperaturen i bentoniten överskrida 100 °C. Detta krav är inte direkt relaterat till kapselutformningen utan beror av resteffekten på bränslet i kapseln, bergets värmeledningsförmåga och avståndet mellan kapslarna i deponeringstunnlarna.

## 5 Viktiga parametrar som påverkar kapseln

SKB:s utvecklingsstrategi utgår från att definiera en referensutförning för slutförvarssystemet. Referensutförningen definierar alla väsentliga delar och parametrar i systemet. Genom succesiv kunskapsuppbyggnad detaljeras och underbyggs referensutförningen av slutförvarssystemet och toleranserna för olika parametrar kan minskas. I nuvarande läge finns två alternativa platser med olika geologi och med olika parametrar som gör att toleranserna i parametrarna för kapseln måste täcka båda platserna.

Efter platsvalet kommer toleranserna i inparametrarna att kunna minskas men först när detaljundersökningarna på den valda platsen är genomförda, samt ett flertal utredningar, kan dessa parametrar och deras värden fastställas.

Viktiga parametrar i systemet som påverkar de dimensionerande processerna för kapseln finns angivna i tabell 5-1 och 5-2.

SR-Can ger en betydligt mer uttömmande beskrivning kring dessa parametrar.

**Tabell 5-1. Viktiga naturliga systemparametrar i KBS-3 för kapselns integritet.**

Naturlig systemparameter	Påverkan på kapseln	Parameter relaterad till kapseln	Referensvärde eller utförning
Geografisk placering – istjocklek	Isostatiskt tryck under glaciation	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under glaciationsfasen	Se tabell 4-6
Förvarsdjup	Isostatiskt tryck efter vattenmättnad	Tryckhållfasthet	Forsmark eller Laxemar, se tabell 4-6
Vatteninflöde	Tid för vattenmättnad, belastning under vattenmättnadsfasen, varaktighet av belastning under vattenmättnadsfasen	Varaktighet av spänningstillstånd kopparhölje och insats under vattenmättnadsfasen	< 0,1 L/min Se SR-Can
Hydraulisk konduktivitet	Möjlig påverkan på korrosionsprocessen genom påverkan på vattenkemi och/eller att bentoniten delvis kan föras bort	Koppartjocklek	< 10 <sup>-12</sup> m/s Se SR-Can
Bergspänningar	Risk för "spalling" påverkan på hålgeometri	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen	Teknik måste utvecklas för att hantera spalling, Se SR-Can
Sprickförekomstfrekvens och storleksfördelning	Risk för skjuvning vid postglaciala jordbävningar	Skjuvbelastning på kapseln	Se utredning i SR-Can

**Tabell 5-2. Viktiga ingenjörsmässiga parametrar i KBS-3 systemet för kapselns integritet.**

Ingenjörsmässiga system-parametrar	Påverkan på kapseln	Parameter relaterad till kapseln	Referensvärde eller utformning
Bortteknik	Hålgeometri	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen	Utredning, se handlingslinje.
Variation i vattenmättnadsdensitet hos bentoniten	Bestående tryckojämnheter	Spänningstillståndet hos kapseln efter vattenmättnadsfasen	Vattenmättnadsdensitet 2 000 kg/m <sup>3</sup> Konservativ beräkning se avsnitt 4.3.2
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens plastiska egenskaper	Spänningstillståndet hos kapseln under vattenmättnadsfasen	Konservativ beräkning se avsnitt 4.3.2
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens svälltryck, isostatiskt tryck efter vattenmättnad	Spänningstillstånd hos kapseln efter vattenmättnadsfasen	Se tabell 4-6
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens svälltryck, Isostatiskt tryck under glaciation	Spänningstillstånd hos kapseln under glaciationsfasen	Se tabell 4-6
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens plastiska egenskaper, lastöverföring vid postglacial jordbävning	Spänningstillståndet vid jordbävning Plastisk töjning i kopparhöljet Spänningstillståndet i insatsen	Se tabell 4-6
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens kryp-egenskaper, lastöverföring efter postglacial jordbävning	Spänningstillståndet efter postglacial skjuvning Kryptöjning i kopparhöljet Relaxationen av spänningar i insatsen	Utredning, se handlingslinje.

## 6 Hantering

Det övergripande kravet är att kapseln konstrueras och dimensioneras så att det är möjligt att säkert lyfta och hantera den under:

- tillverkningskedet,
- transporten till inkapslingsanläggningen,
- inkapsling, transport till slutförvaret och deponering,
- återtag.

Kapselns lock är försett med en lyftfläns som är utformad och dimensionerad för lyft med ett specialverktyg.

Transport av kapseln kommer att ske med en transportbehållare typ B enligt IAEA:s transportbestämmelser. Gränsvärden för tillåtna belastningar på kapseln under transport kommer att fastställas inom ramen för säkerhetsredovisningen för behållaren.

Kapseln dimensioneras ej för de extrema påfrestningar som kan uppstå i samband med missöden under drifttiden. Tre fall av missöden i inkapslingsanläggningen har undersökts av /Unosson 2006/ och visar att kapseln inte tål att tappas från full arbetshöjd. Motsvarande missödesanalys i slutförvaret pågår. Kapseln dimensioneras inte för denna typ av missöden. Istället ska de system och processer som används vid inkapsling, transport och deponering utformas så att en acceptabel risknivå erhålls.

### 6.1 Tillverkning och hantering av kapseln fram till inkapslingsanläggningen

Det övergripande kravet är att kapseln ska tillverkas så att den uppfyller de krav som anges i konstruktionsförutsättningarna. De specifikationer som säkerställer detta anges i specifikationer i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005/ som härleds bland annat ur dimensioneringsunderlagen för kapseln.

Kapseln och dess komponenter ska vara fria från skadlig kontaminering innan montering av kapseln. Förekomst av ämnen i skärvätskor etc som skulle kunna innebära en risk i slutförvaret kommer att inventeras och SKB:s specifikationer /SKB 2006/ kompletteras om skäl föreligger.

Som nämns under avsnitt 4.2 pågår utredning av påverkan av kallbearbetning på kopparkörljets långsiktiga mekaniska egenskaper. Omfattningen av restspänningar som kan uppstå efter den maskinbearbetning som används i dag har undersökts /Jaensson 2005/. Endast mycket ytliga restspänningar har påvisats och beroende på bearbetningsmetod kan dessa endera vara tryck- eller dragspänningar. Spänningarna går ned till ett djup av 50 µm från ytan. De provstavar som används för att bestämma koppars mekaniska egenskaper (dragprov och krypprovning) är bearbetade och innehåller med största sannolikhet även de små bearbetningseffekter liknande de som påvisats i den refererade undersökningen.

Slutsatsen är att vid de bearbetningsparametrar som används i dag uppstår endast obetydliga restspänningar till följd av kallbearbetningseffekter och att kopparhöljets mekaniska egenskaper motsvaras av de egenskaper som bestäms vid drag- och kryppprovning.

Monterad (ej försluten) kapsel ska inte utsättas för fukt eller kondens i spalten mellan koppar och insats på grund av risk för galvanisk korrosion mellan kopparhölje och insats.

## **6.2 Förslutning och hantering under inkapslingsprocessen**

I den planerade verksamheten i inkapslingsanläggningen kommer två lyft att ske av kapseln i locket. Därefter sker transport till slutförvarsanläggningen där kapseln lyfts ur transportbehållaren och hanteras vidare i slutförvarssystemet där ytterligare två lyft sker. En kontrollberäkning av lyftsäkerheten enligt tillämpbara kärntekniska normer har genomförts /Arvidsson 2006/ där hänsyn tagits till förväntad svetskvalitet i inkapslingsprocessen. Indata för svetskvaliteten som har använts finns rapporterade i /Ronneteg et al. 2006/. Resultaten visar att lyftsäkerheten för kapseln har mycket stora marginaler och att upp till 100 lyft kan ske utan risk vilket innebär att även ett återtag av deponerade kapslar kan ske med bibehållen lyftsäkerhet.

## **6.3 Hantering under transport och deponering**

Hantering och transport av kapseln och dess komponenter ska ske så att belastningarna på kapseln inte ger upphov till skador på kapseln. Om skador uppstår måste de utvärderas med hänsyn till kapselns långsiktiga säkerhet men också till efterföljande hanteringsfaser i slutförvaret.

## **6.4 Hanterings- och bearbetningsskador**

Hanteringsskador kan uppkomma under såväl tillverkningskedet, i inkapslingsanläggningen samt under transport och deponering. Bearbetningsskador kan uppstå under tillverkningskedet och vid slutbearbetningen i inkapslingsanläggningen.

### **6.4.1 Skador under tillverkningskedet**

Den grundläggande principen för tillåtna skador i detta skede är att skadan skall utvärderas med hänsyn till:

- efterföljande processteg,
- hanteringssäkerheten hos den förslutna kapseln,
- kapselns långsiktiga säkerhet.

Under tillverkningskedet behöver varje processteg rutiner för inspektion av hanteringsskador och kriterier för tillåtna/icke tillåtna skador tas fram. Dessutom kommer skadan att utvärderas mot kriterier för hanteringssäkerhet och långsiktig säkerhet, se nedan.

## 6.4.2 Skador hos den förslutna kapseln, krav för hanteringssäkerhet

Analogt med ovan är den grundläggande principen för tillåtna skador i detta skede att skadan inte får inverka på:

- efterföljande hanteringssteg,
- hanteringssäkerheten hos den producerade kapseln,
- kapselns långsiktiga säkerhet.

Eventuella hanteringsskador hos en färdig kapsel kommer alltid att drabba kopparhöljet. Vid extrema belastningsfall som tappad kapsel kan dock även insatsen skadas /Unosson 2006/. Hanteringsskador orsakar i ojämnheter i kopparytan och/eller kallbearbetningseffekter vid skadan.

Skadorna i kopparhöljet kan indelas i tre kategorier:

- repor,
- slagmärken,
- deformationer.

### **Repor**

För vissa konstruktionsmaterial finns risken att ytskador kan ge sprickanvisningar. Försök att bestämma de brottmekaniska egenskaperna hos koppar /Bell 1996/ visar dock att materialet är ytterst okänsligt för sprickanvisningar. Detta betyder att repor/skador inte orsakar brottanvisningar i koppar. Vid extremt djupa repor i tangentiell riktning kan dock lyftsäkerheten påverkas. Utredningen om kapselns lyftsäkerhet /Arvidsson 2006/ visar att en 10 mm djup runtomgående diskontinuitet är acceptabel i svetsen ur lyftsäkerhetssynpunkt /Arvidsson 2006/. Samma kriterium kan tillämpas för övriga delar av kopparhöljet. Skador av denna omfattning är ytterst osannolika vid normal hantering. Dock måste all utvärdering ske med hänsyn till risken för andra samverkande diskontinuiteter.

### **Slagmärken**

Slagmärken är i princip att betrakta som en kort repa. Ur lyftsäkerhetssynpunkt kan därför pessimistiskt behandlas som repor.

### **Deformationer**

Deformationer ger kallbearbetningseffekter vilket innebär minskad brottöjning men också ökad hårdhet och brottgräns (deformationshårdnad). Generellt sätt påverkas inte lyftsäkerheten om inte materialet blir så kraftigt plasticerat att en godsfortunning uppstår. Även här kan konservativt kriteriet att tillåta skador med upp till 10 mm.

Ett speciellt fall är om lyftverktyget går sönder och skadar lyftflänsen. Skulle detta inträffa måste detta behandlas som en avvikelse och en separat utredning göras.

### **6.4.3 Långsiktig säkerhet**

Hanteringsskadornas inverkan ur långsiktig säkerhetssynpunkt kan indelas i två kategorier

- Godsförtunning.
- Materialdegradering.

#### ***Godsförtunning***

Ur korrosionssynpunkt påverkar inte ytdefekter /King 2004/. Kravet på minsta koppar-täckning 6 mm är därför dimensionerande för tillåtna skador ur korrosionssynpunkt.

#### ***Materialdegradering***

Försök att bestämma de brottmekaniska egenskaperna hos koppar /Bell 1996 /visar att kopparmaterialet är ytterst okänsligt för sprickanvisningar. Detta betyder att begränsade lokala skador inte förväntas påverka kopparhöljets mekaniska integritet i den elastisk/plastiska regimen. Dock är det av intresse att studera om krypduktiliteten påverkas. Sådana försök planeras, se handlingslinje kapitel 8.

#### ***Spänningskorrosion***

Vid den plasticering som uppstår vid hanteringsskador uppstår lokala tryckspänningar vilket i sig motverkar spänningskorrosion. Å andra sidan motverkas denna effekt av vassa repor och slagmärken som ger upphov till spänningskoncentrationer vid belastningar. SKB:s argumentation för att spänningskorrosion inte är en dimensionerande process baseras dock utifrån kemiska överväganden som inte påverkas av spänningsbilden i materialet.

## **6.5 Sammanfattning – acceptanskriterier för skador**

Kriterier för processbarhet med hänsyn till hanteringsskador kommer att utvecklas detta gäller speciellt för svetsning och oförstörande provning.

Kriterier för hanterbarhet med hänsyn till hanteringsskador måste ställas upp för de olika hanteringssystemen vid inkapslingsanläggningen, transport och deponering.

Ytskador upp till ett djup av 10 mm kan accepteras med hänsyn till lyftsäkerheten. Dock måste detekterade ytskador mätas upp och utvärderas med hänsyn till eventuella samverkande diskontinuiteter.

Kapsel som uppfyller de ovan angivna lyftsäkerhetskraven uppfyller kraven på långsiktig korrosionssäkerhet. Utredning krävs avseende inverkan från plasticeringar på krypduktiliteten.

Inspektionsteknik måste utvecklas som medger att läge och djup hos ytskador kan bestämmas så att bland annat samverkans effekter med andra diskontinuiteter kan utvärderas.



## 7 Sammanfattande krav för referenskapseln

I tabell 7-1 sammanfattas de krav som kan härledas till kapselns utförande och material.

**Tabell 7-1. Sammanfattande krav för kapseln.**

Dimensionerande process/krav	Kopparhölje Utförande	Material	Insats Utförande	Material
Utrymmeskrav för bränslet	–	–	Kanalernas geometri, tabell 4-2	–
Korrosion allmänt	–	Koppar med låg syrehalt Max 30 ppm vardera av: O, Al, Co, Cr, Ni	–	–
Anaerob korrosion	Min 6 mm intakt tjocklek	–	–	–
Radiolys	Materialtjocklek enligt referenskapseln	–	Materialtjocklek enligt referenskapseln	–
Vatten i bränsle, bildning av HNO <sub>3</sub>	–	–	Medge atmosfärsbyte, <i>Utredning</i> Risk för och skadetålighet vid spänningskorrosion	–
Vatten i bränsle anaerob korrosion, bildning av H <sub>2</sub>	–	<b>Utredning</b> Påverkan på mekaniska egenskaper	–	<b>Utredning</b> Påverkan på mekaniska egenskaper
Vattenmättnad buffert	–	Krypduktilitet > 4 % Sträckgräns > 14,5 MPa	–	Sträckgräns > 55 MPa <b>Utredning.</b> Effekt kombinationen hålgeometri och bentonit.
Glaciation (45 MPa övertryck)	–	–	Excentricitet hos kassetten < 5 mm Hömradi kanalrör 15–25 mm	Sträckgräns (0,2 % förlängningsgräns) Rp0,2: min 240 N/mm <sup>2</sup> . Brottgräns Rm: min 370 N/mm <sup>2</sup> . Förlängning A: min 11 %. Mikrostruktur, (nodularitet): Minst 80 % av grafiten ska vara av form V och VI. Grafitform I–III ska inte förekomma. Nodultäthet: min 100 grafitnoder/mm <sup>2</sup> (uppmätt vid 100x förstoring).

<b>Dimensionerande process/krav</b>	<b>Kopparhölje Utförande</b>	<b>Material</b>	<b>Insats Utförande</b>	<b>Material</b>
Postglacial jordbävning, skjuvning	<b>Utredning</b>	Duktilitet > 7 % Krypduktilitet > 7,7 %	–	Sträckgräns > 1,6 %
Kombinerade lastfall	<b>Utredning</b>	<b>Utredning</b>	<b>Utredning</b>	<b>Utredning</b>
Kriticitet	–	–	<b>Utredning</b> Effekt av stora diskontinuiteter i insatsen på kriticitet	Utförande enligt referenskapseln
Lyftsäkerhet	Utförande enligt referenskapseln Min svetsdjup 40 mm		–	–
Krypegenskaper	–	<b>Halter</b> S < 12 ppm 30 ppm < P < 100 ppm <b>Struktur</b> Kornstorleken < 800 µm	–	–

## 8 Handlingslinje

Detta kapitel beskriver den handlingslinje som planeras för att:

- komplettera dimensioneringsunderlagen för kapseln,
- strukturera och komplettera kapselns konstruktionsförutsättningar så att det innehåller den information som SKB behöver och SKI efterfrågar.

För att verifiera den långsiktiga säkerheten hos kapseln i slutförvaret har ett antal områden identifierats där bättre kunskap eller kompletterande data behövs. Grovt kan dessa områden delas in i två kategorier, materialfrågor och hållfasthetsfrågor. Med materialfrågor menas allt som beror på konstruktionsmaterialens egenskaper, som till exempel, vilka föroreningsnivåer, som kan tillåtas i materialen, korrosion och krypegenskaper. Handlingslinjen för hållfasthetsfrågor rör främst insatsen och hur denna klarar de mekaniska påkänningarna som kapseln utsätts för i slutförvaret.

### 8.1 Materialfrågor

Rubrik	Atgärd	Tidpunkt
<b>Koppars krypegenskaper</b>	<p>Provning av krypegenskaperna hos koppar har pågått under flera år. Under senare tid har undersökningarna koncentrerats kring FSW svetsens egenskaper, effekter av extremt långsam pålastning och krypning med fleraxligt spänningstillstånd. Resultaten analyseras och sammanfattas och jämförelser görs mot kraven.</p> <p>Frågeställningar kring fosforns långtidsstabilitet har förekommit och grunden för dessa frågeställningar måste också vidare analyseras.</p> <p>För att beräkna belastningarna på kapseln måste dessutom en validerad krypmodell tas fram då tidsberoende förlopp måste beaktas vid t ex postglacial skjuvning av kapseln.</p> <p>Av intresse är att studera krypning vid låg temperatur 0 °C.</p>	2007–2008
<b>Vätets påverkan på koppar och segjärn</b>	<p>Enstaka bränslestavar kan vara skadade och vatten kan ha trängt in i staven. Eftersom det inte kan garanteras att detta vatten avlägsnas vid den torkning av bränslet som planeras i inkapslingsanläggningen kan vatten finnas i kapseln efter förslutningen. Då atmosfären i insatsen byts till argon kan på sikt anaerob korrosion av järnet i insatsen uppstå med bildning av vätgas som följd. Av intresse är därför att studera om vätet påverkar de mekaniska egenskaperna hos segjärn och koppar.</p> <p>Om vätet har någon påverkan på materialet så kommer det att utredas vilka halter av väte som kan tillåtas.</p>	2006–2007
<b>Kallbearbetningseffekter i koppar orsakad av hanteringsskador</b>	<p>Plasticering av kopparhöljet kan uppstå vid hantering. Ur mekanisk synpunkt leder detta till deformationshårdnader med åtföljande ökning av brottgränsen och minskad brottförlängning. Av intresse är att närmare studera hur krypegenskaperna påverkas av detta.</p> <p>Om kallbearbetning har någon effekt på kapselns långtidsegenskaper så kommer att utredas vilken grad av kallbearbetning som kan tillåtas.</p>	2006–2007
<b>Spänningskorrosion i koppar</b>	<p>Under senare tid har möjligheten att spänningskorrosion i kopparhöljet kan uppstå i slutförvaret åter diskuterats. Av intresse är att genomföra spänningsanalyser av kopparhöljet men även att se över den argumentering utifrån kemisk synpunkt som finns inom området.</p>	2007

Rubrik	Åtgärd	Tidpunkt
<b>Mekaniska egenskaper hos koppar vid 0 °C och 100 °C</b>	Dragprov vid hög och låg temperatur för att verifiera kopparhöljets egenskaper i hela temperaturintervallet.	2007
<b>Segjärnets krypegenskaper</b>	Kapselinsatsens långsiktiga integritet ska verifieras mot krypning. Försök pågår där krypning i segjärn undersöks.	2007
<b>Kriticitet</b>	En förnyad beräkning på kriticitet i kapseln kommer att göras. Denna beräkning kommer bland annat ge svar på hur stora diskontinuiteter som kan finnas mellan kassettrören och vilket avstånd mellan kassettrören som krävs för att kriticitet inte ska uppstå.	2007

## 8.2 Hållfasthetsfrågor

Rubrik	Åtgärd	Tidpunkt
<b>Postglaciala jordbävningar</b>	Postglaciala jordbävningar kan ge upp till skjuvlaster på kapseln som påverkar såväl kopparhölje som segjärnsinsats. Frågan är komplex och beror av såväl geologiska förutsättningar som bentonitbuffertens mekaniska egenskaper. Påverkan på kapseln har studerats men förfina beräkningar pågår där påverkan på kopparhöljet studeras.	2007
<b>Brottmekaniska analyser vid höga tryck</b>	I projektet probabilistisk analys så har kapselns hållfasthet utvärderats i förhållande till så kallad lokal kollaps. Lokal kollaps betyder inte att kapseln har kollapsat utan att begynnande plasticering av insatsen har inträffat. Tröskeeffekter hos vissa parametrar har påvisats i projektet vilket gör att det är av intresse att ur brottmekanisk synpunkt studera hur kapseln beter sig upp till det tryck då kapseln kollapsar.	2007
<b>Kombinerade lastfall för insatsen</b>	Den totala spänningsnivån som kan uppstå i insatsen då olika belastningar samverkar fastställs.	2008
<b>Skadetålighet hos insatsen</b>	Av intresse är att studera vilka diskontinuiteter som kan accepteras i insatsen och även interaktionen mellan olika diskontinuiteter. Ett projekt pågår som syftar till att svara på frågan vilka diskontinuiteter som kan tillåtas i insatsen. Undersökningen kommer att ge underlag för kvalitetskontroll av insatsen med oförstörande provning. Detta projekt kommer också att behandla effekten av eventuella spänningssprickor som kan uppstå i insatsen.	2006
<b>Säkerhet mot kriticitet</b>	Effekten av större diskontinuiteter i insatsens mellanväggar på säkerheten mot kriticitet kommer att undersökas. Undersökningen kommer att ge underlag för kvalitetskontroll av insatsen med oförstörande provning.	2007
<b>Hanteringssäkerhet</b>	Att kapseln uppfyller kraven på säker hantering och att kapselns långsiktiga integritet inte påverkas av effekter som uppstår under hanteringen måste säkerställas. Möjliga hanteringsskador kartläggs och deras effekt på kapselns hanteringssäkerhet och långsiktiga integritet analyseras.  Missöden under driftfasen studeras och deras påverkan på kapselns förmåga att innesluta bränslet bestäms.	2008
<b>Tjocklek på insatsbotten och stållock</b>	Kontrollberäkningar av insatsens botten och stållocket (med aktuell detaljkonstruktion) kommer att genomföras för att säkerställa att hållfastheten på dessa delar är tillräcklig.	2007

### **8.3 Handlingslinje för konstruktionsförutsättningarna**

Ett återstående arbete är att utgående från SR-Can huvudscenarion sammanställa de belastningskombinationer som kan uppstå i slutförvaret och sannolikheten för dessa.

Utgående från risksammanställningen i SR-Can identifiera i vad mån mindre sannolika scenarier kan påverka kapselns kapselns utförande.

Ansätta säkerhetsfaktorer vid dimensioneringen av kapseln som kopplar till sannolikheten för att den dimensionerande belastningen eller kombination av laster kan uppstå.

Ytterligare underbygga de sammanfattande kraven som anges i tabell 7-1.

Fastställa acceptanskriterier för tillåtna diskontinuiteter och andra viktiga parametrar hos kapseln.

Genomföra de revideringar av konstruktionsförutsättningarna som kan föranledas av nästa säkerhetsanalys SR-site.

Arbetet kommer att succesivt genomföras parallellt med nästa säkerhetsanalys SR-Site.

## Referenser

- Agrenius L, 2002.** Criticality safety calculations of storage canisters. SKB TR-02-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C-G, 1998.** Provtillverkning av kopparkapslar med gjutna insatser. Lägesrapport augusti 1998. SKB R-98-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C-G, 2001.** Utveckling av tillverkningsteknik för kopparkapslar med gjutna insatser. Lägesrapport i augusti 2001. SKB R-01-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C-G, 2005.** Utveckling av gjutna insatser i segjärn. SKB R-05-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 1999.** Influence of phosphorous and sulphur as well as grain size on creep in pure copper. SKB TR-99-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C-G, Eriksson P, Westman M, 2004.** Lägesrapport kapseltillverkning. SKB R-04-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson C-G, Andersson M, Björkegren L-E, Dillström P, Erixon B, Minnebo P, Nilsson F, Nilsson K-F, 2005.** Probabilistic analysis and materials characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report. SKB TR-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Andersson H, Seitisleam F, Sandström R, 2005a.** Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 and 175°C. SKB TR-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Arvidsson H, 2006.** Hållfasthet hos kopparlock till förvaringskapsel för kärnbränsle. DNV rapport 18755700-1. DNV.
- Bell K, 1996.** Tearing resistance and integrity assessment of electron beam welds in nuclear fuel canisters. SKB PPM 96-3420-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 1998.** Uneven swelling pressure on the canister. FEM calculations of the effect of uneven water supply in the rock. SKB Projekt Inkapsling Projekt PM 98-3420-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Johannesson L-E, Hernelind J, 2004.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. SKB TR-04-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cakmak E, 1995.** Beräkningar av maximal töjning i kopparbehållare för slutförvaring av utbränt kärnbränsle. SKB Inkapsling Projekt PM 95-3420-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Christensen H, Pettersson S-O, 1997.** Beräkning av radiolys utanför intakt kapsel. Studsvik Report /M-97/67, Studsvik Material.

- Claesson S, 2005.** Tensile test on copper material for encapsulation of nuclear waste. Summary report. SKB 1045935, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dies K, 1967.** Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Dillström P, 2005.** Probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel. SKB TR-05-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ekberg M, 1995.** Lagringsbehållare för utbränt kärnbränsle, kollapstryck hos gjuten cylinder. SKB Inkapsling Projekt PM 95-4320-11.
- Fennell P A H, Graham A J, Smart N R, Sofield C J, 2001.** Grain boundary corrosion of copper canister material. SKB TR-01-09, Svensk Kärnbränslehantering AB
- Guimerà J, Duro L, Jordana S, Bruno J, 1999.** Effects of ice melting and redox front migration in fractured rocks of low permeability. SKB TR-99-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Guimerà J, Duro L, Delos A, 2006.** Changes in groundwater composition as a consequence of deglaciation: implications for PA (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grandia F, Domènech C, Arcos D, Duro L, 2006.** Assessment of the oxygen consumption in the backfill. Geochemical modelling in a saturated backfill (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gubner R, Andersson U, Linder M, Nazarov A, Taxén C, 2006.** Grain boundary corrosion of copper canister weld material. SKB TR-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Guinan M W, 2001.** Radiation effects in spent nuclear fuel canisters, SKB TR-01-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedin A, 2004.** Integrated near-field evolution model for a KBS-3 repository. SKB R-04-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Henderson P J, Werme L, 1996.** Creep testing of copper for radwaste canisters. EUROMAT 96, Materials and Nuclear Power, Bournemouth.
- Henderson P J, Sandström R, 1997.** Low temperature creep ductility of OFHC copper. Materials science and engineering, A246, 143–150.
- Hernelind J, 2006.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole when creep is considered. First model (i manus). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hoehn E, Eikenberg J, Fierz T, Drost W, Reichlmayr E, 1998.** The Grimsel migration experiment: field injection-withdrawal experiments in fractured rock with sorbing tracers. J. Contaminant Hydrol., 34:85-106.
- Hora S, Jensen M, 2005.** Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Rapport 2005:20, Statens strålskyddsinstitut.
- Jaensson B, 2005.** Continued X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. Technical report TEK05-0226. CSM Material teknik.

- King F, Ahonen L, Taxén C, Vuorinen U, Werme L, 2001.** Copper corrosion under expected conditions in a deep geological repository. SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, 2004.** The effect of discontinuities on the corrosion behaviour of copper canisters. SKB TR-04-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Kolar M, 2004.** Theory manual for the copper corrosion model for stress corrosion cracking of used fuel disposal containers. CMM-SCC.0, Ontario Power Generation Report No: 06819-REP-01300-10095-R00.
- King F, Kolar M, 2005.** Preliminary assessment of the stress corrosion cracking of used fuel disposal containers using the CMM-SCC.0 model, Ontario Power Generation Report No: 06819-REP-01300-10103-R00.
- Korzhavyi P A, Abrikosov I A, Johansson B, 1999.** Theoretical investigation of sulfur solubility in pure copper and dilute copper-based alloys. Acta mater., Vol 47, No 5, pp 1417–1424.
- La Pointe P R, Cladouhos T T, Outters N, Follin S, 2000.** Evaluation of the conservativeness of the methodology for estimating earthquake-induced movements of fractures intersecting canisters. SKB TR-00-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindblom J, Henderson P, Seitisleam F, 1995.** Creep testing of oxygen-free phosphorous copper and extrapolation of results. Report IM-3197, Swedish Institute for Metals Research.
- Lund B, 2005.** Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: A parametric study of simple Earth and ice models. SKB TR-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lundgren, 1998.** Kontroll av strålskärmsberäkningar för kopparkapsel. Rapport 97-0028R, Alara Engineering.
- Lundgren K, 2004.** Final disposal of fuel – Electron radiation outside copper canister. SKB TR-04-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsh G P, 1990.** A preliminary assessment of the advanced cold process canister. Report AEA-InTec-0011, Harwell Laboratory, AEA Industrial Technology.
- Nilsson K-F, Lofaj F, Burström M, Andersson C-G, 2005.** Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. SKB TR-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Raiko H, 2005.** Disposal canister for spent nuclear fuel – design report. Posiva 2005-2, Posiva Oy. Finland.
- Ronneteg U, Cederqvist L, Rydén H, Öberg T, Müller C, 2006.** Reliability in sealing of canister for spent nuclear fuel. SKB R-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Salonen T, 2004.** Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Encapsulation Technology, Memo, Posiva Oy.
- Sanderson A, Werme L, 1986.** Can high power electron beam welding encapsulate nuclear waste for 1000 years. The welding research bulletin, 1986 27(11), 365–370.
- SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR 97 – Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport – Del I, Del II och Sammanfattning, Svensk Kärnbränslehantering AB.



**SKB, 2002.** Övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet. SKB R-02-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2004a.** Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2004b.** Interim main report of the safety assessment SR-Can. SKB TR-04-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2005.** Kapseltillverkning – Kvalitetshandbok (pärm1). Ritningar Specifikationer Rutiner (pärm 2), Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2006a.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2006b.** Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB 2006c.** Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKI, 2006.** Utredning av kontrollordning för tillverkning av kapsel för slutförvar av använt kärnbränsle. SKI/109 Utredningsrapport, Statens kärnkraftinspektion.

**Unosson M, 2006.** Finit elementanalys – Tappad kapsel. Swedpower Rapport nr T-CHS06-001.

**Vieno T, 2000.** Groundwater salinity at Olkiluoto and its effects on a spent fuel repository. Posiva 2000-11, Posiva Oy.

**Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.