

R-98-08

Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle

Lars Werme

Svensk Kärnbränslehantering AB

September 1998

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



Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle

Lars Werme

Svensk Kärnbränslehantering AB

September 1998

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	I	
1	INLEDNING	1
2	GRUNDFÖRUTSÄTTNINGAR	2
3	FUNKTIONS- OCH EGENSKAPSKRAV	3
3.1	BRÄNSLETYP	3
3.2	SÄKERHET: DJUPFÖRVAR	3
3.3	SÄKERHET: DRIFT	4
4	KONSTRUKTIONSFÖRUTSÄTTNINGAR	5
4.1	SÄKERHET DJUPFÖRVAR	5
4.1.1	Täthet	5
4.1.2	Påverkan på andra barriärer	9
4.2	SÄKERHET DRIFT	11
4.2.1	Produktion	11
4.2.2	Hantering	11
4.2.3	Transport	12
4.2.4	Återtag	12
5	KONSTRUKTION	13
5.1	MATERIALVAL	13
5.1.1	Kemisk beständighet	13
5.1.2	Mekanisk hållfasthet	16
5.1.3	Val av kopparkvalitet	17
5.1.4	Påverkan på andra barriärer i djupförvaret	19
5.2	KAPSELUTFORMNING	20
5.2.1	Principutformning	20
5.2.2	Kopparkapseln	21
5.2.3	Tryckbärande komponent	25
5.2.4	Dimensionering av kapsel med insats	30
6	REFERENSKAPSEL	32
	REFERENSER	35
	BILAGA 1: KONSTRUKTIONSUUNDERLAG FÖR KAPSEL	41

1 INLEDNING

Syftet med rapporten är att lägga fast grundförutsättningarna för dimensionering av kapsel för deponering av använt kärnbränsle, egenskapskrav, konstruktionsförutsättningar och presentera alternativa kapselkonstruktioner, som uppfyller förutsättningarna. Utgångspunkten för kapselkonstruktionen har varit att kapseln skall kunna användas för både BWR och PWR bränsle.

2

GRUNDFÖRUTSÄTTNINGAR

Det använda bränsle som genereras av det svenska kärnkraftsprogrammet skall kunna inkapslas för deponering i ett djupförvar på ett sådant sätt att säkerheten hålls på en hög nivå under:

- inkapsling.
- transport.
- deponering.
- slutförvaring.

Styrande förutsättning är säkerhet under slutförvaring. Vid slutförvaringen måste alla hot mot kapselns integritet och risker för läckage till biosfären mötas genom lämpligt val av utformning och material. I övriga moment under hanteringen av kapseln kan kapselns integritet garanteras genom skyddande åtgärder, till exempel genom användning av stötdämpande material kring kapseln, stötupptagande material och strålskärmande anordningar.

3 FUNKTIONS- OCH EGENSKAPSKRAV

3.1 BRÄNSLETYP

De väsentliga egenskaperna för BWR och PWR bränsle finns uppräknade i Tabell 3-1.

Tabell 3-1. Bränsleegenskaper av betydelse för dimensionering av kapsel.

BRÄNSLETYP	BWR	PWR
Total längd	4,398 m	4,243 m
Tvårsnittsarea	140x140 mm ²	214x214 mm ²
Antal bränslestavar	63-100	15x15 el. 17x17
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

Det använda BWR bränslet skall inkapslas med bränslekanaler och det använda PWR bränslet med styrtavar. Dimensioner i Tabell 3-1 är de konstruktionsstyrande måtten. Flera olika bränsletyper med något olika dimensioner förekommer. Det finns också speciella bränsletyper, som MOX bränsle och Ågesta bränsle som kan kräva specialdimensionering. Även bränslelement med läckande stavar skall kunna kapslas in.

3.2 SÄKERHET: DJUPFÖRVAR

Det svenska kärnkraftprogrammet beräknas ge upphov till cirka 8000 ton använt kärnbränsle. Detta skall slutförvaras i granitiskt berg på ett djup av ca 500 m. Läckage av radioaktiva ämnen från detta förvar förhindras av ett flerbarriärsystem bestående av bränslet självt, en korrosionsbeständig kapsel, bentonitbuffert och den överliggande bergmassan. Kapseln förhindrar all spridning av radioaktivitet till omgivningen, så länge den är intakt. De övriga barriärerna kan fördröja och dämpa spridningen till acceptabla nivåer om kapseln börjar läcka.

Avsedd funktion:

Kapselns funktion i djupförvaret är att isolera det använda bränslet från omgivningen. Kravet är formulerat så att kapseln skall helt isolera avfallet och inga kända korrosionsprocesser skall bedömas kunna leda till att kapseln inte kan förbli intakt under minst 100.000 år. Detta krav på täta kapslar leder till krav på:

- initial täthet.
- kemisk beständighet i den miljö, som förväntas i djupförvaret.
- mekanisk hållfasthet under de betingelser, som förväntas råda i förvaret.

För att uppfylla kravet på att övriga barriärer skall fördröja och dämpa spridningen till acceptabla nivåer, om kapseln börjar läcka, måste dessutom ställas kravet att kapslarna inte får ha någon skadlig inverkan på övriga barriärer i djupförvaret. Detta ställer krav på:

- val av ett kapselmateriale som inte negativt påverkar buffert och berg.
- begränsning av värme och stråldos till närområdet.
- en utformning sådan att bränslet i kapseln förblir underkritisk även om vatten tränger in i kapseln.
- begränsning av kapselns bottenstryck mot bentoniten.

3.3 SÄKERHET: DRIFT

Kraven på säkerhet vid drift och underhåll av inkapslingsanläggningen är höga. Kapselns konstruktion skall motsvara de krav som kan ställas med hänsyn till normala och exceptionella driftfall i inkapslingsanläggningen. Detta innebär att kapseln skall kunna:

- tillverkas i serieproduktion motsvarande 200 kapslar per år med upprätthållande av specificerade kvalitetskrav.
- hanteras så att inga missöden, som kan förutses, leder till att personal och anläggning utsätts för oacceptabla stråldoser eller utsläpp av radioaktivt material.
- transporteras till djupförvaret och deponeras på ett säkert sätt.
- återtas från djupförvaret på ett säkert sätt om så erfordras.

4 KONSTRUKTIONSFÖRUTSÄTTNINGAR

4.1 SÄKERHET DJUPFÖRVAR

4.1.1 Täthet

Kravet på täthet kan delas upp i initial täthet, kemisk beständighet och mekanisk hållfasthet.

Initial täthet

Kapslarna skall vara täta när de lämnar inkapslingsanläggningen.

Kapslarna skall tillverkas, förslutas och kontrolleras med metoder som garanterar att högst 0,1% av de färdiga kapslarna innehåller fel, som är större än vad acceptanskriterierna för den oförstörande provningen tillåter. Detta är en nivå som kan uppnås med tillgängliga metoder för provning.

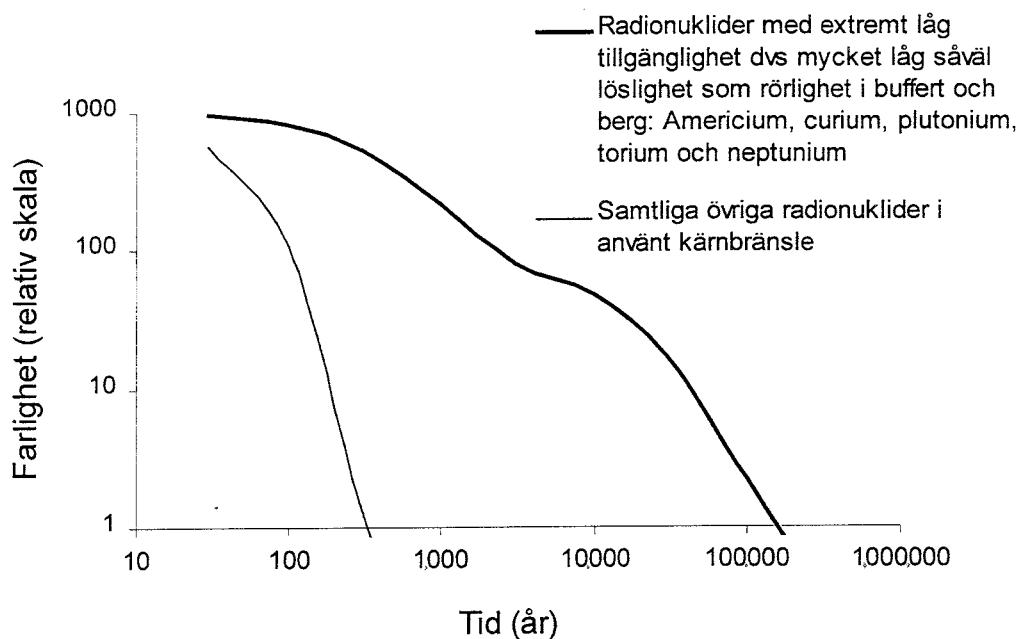
Kemisk beständighet

Inga kända korrosionsprocesser skall bedömas kunna leda till att kapselns livslängd blir mindre än 100.000 år i djupförvaret.

Den relativa farligheten hos bränslet som funktion av tid illustreras i Figur 4-1. Kurvan gäller för intag med föda, men förloppet med tiden är i stort sett detsamma även för inandning. Farligheten 1 motsvarar farligheten hos de 8 ton naturligt uran med döttrar, som 1 ton bränsle framställts av. Som framgår av figuren, avtar farligheten för de lättare tillgängliga radionukliderna till låga nivåer genom sönderfall under de första tre hundra åren. Det största bidraget till bränslets farlighet kommer från aktiniderna. Under de första tusen åren dominerar curium och americium. Därefter står plutoniums isotoper för det största bidraget fram till cirka 100.000 år då minskningen i aktivitet av ^{239}Pu börjar bli märkbar.

Restvärmets i bränslet alstras huvudsakligen av fissionsprodukter under de första hundratalen år. En isolering av bränslet i 1 000 år motsvarar ur radiotoxisk synpunkt en reduktion med ungefär en faktor 10, men medför också att huvuddelen av de mer lättillgängliga radionukliderna avklingat. En ytterligare tiofaldig reduktion erhålls först efter ytterligare 50.000 år.

En isolering på 100.000 år skulle ge en reduktion av toxiciteten med över en faktor 100, en tiofaldig reduktion av plutonium och dessutom göra bränslets toxicitet jämförbar med det uran det tillverkats av.



Figur 4-1: Relativ farlighet för använt kärnbränsle som funktion av tiden.

Mekanisk hållfasthet

Kapseln skall klara en last motsvarande 14 MPa yttre tryck med sedvanliga säkerhetsmarginaler.

konstruktionsstyrande svällningstryck har satts till 7 MPa /Bäckblom/. Konstruktionsstyrande hydrostatiskt tryck har satts till 7 MPa.

Fall 1 Normallast

Kapslarna skall klara deponering på 700 m djup i granitiskt berg, omgivna av kompakterad bentonitlera. Detta innebär en jämnt fördelad belastning av 7 MPa hydrostatiskt tryck och 7 MPa svällningstryck från bentoniten. Dessa tryck betraktas som additiva och isostatiska. Dimensioneringen för dessa belastningar skall göras med iakttagande av sedvanliga säkerhetsmarginaler.

Fall 2 Islast

Kapselns hållfasthet skall också beräknas för ett postulerat ökat hydrostatiskt tryck i samband med nedisning. I detta fall skall till grundvattentrycket på 7 MPa adderas 30 MPa, motsvarande ett konservativt fall med cirka 3000 m istäcke. Det totala grundvattentrycket blir 37 MPa och med bentonitens

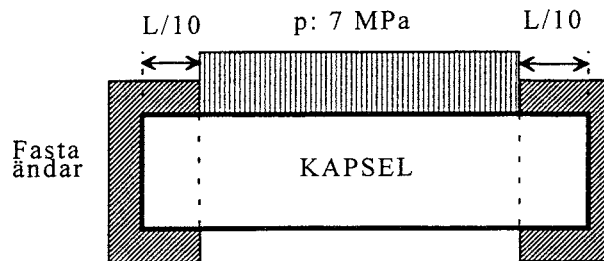
svällningstryck blir det totala trycket 44 MPa. Detta lastfall skall betraktas som ett extremfall för vilken inga extra säkerhetsmarginaler krävs.

Ojämn tryckuppbyggnad i bentoniten

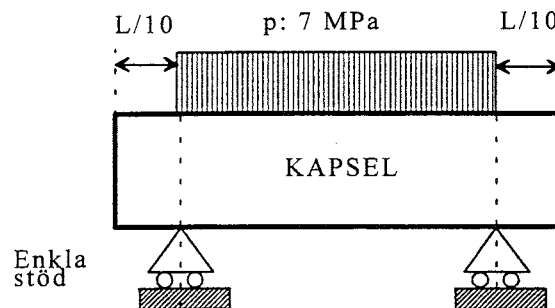
Ojämnhet i tryckuppbyggnaden i bentoniten kan inträffa dels under vattenmättnaden och dels efter vattenmättnaden. Konstruktionsförutsättningarna för kapselns mekaniska hållfasthet finns diskuterade i detalj i Bilaga 1. En kort sammanfattning ges nedan.

Vattenmättnadsfasen

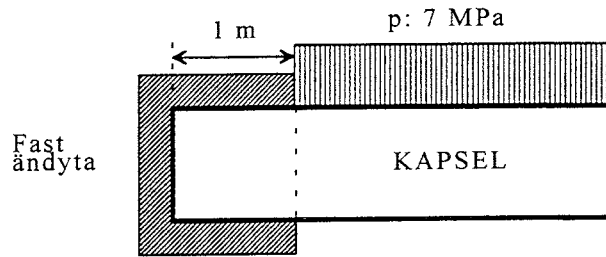
Tre fall skall kontrollberäknas. Dessa är enkla att beräkna men inte helt relevanta eftersom inspänningsgrad och tryckskillnader är överdrivna. Om kapseln inte klarar dessa fall bör man göra mer kvalificerade studier:



- Fall 3 Kapseln är fast inspänd i ändytorna och i en tiondel av längden längs mantelytan närmast ändytorna. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt utbildat svällningstryck i bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.



- Fall 4 Kapseln är fritt upplagd längs en tiondel av längden längs mantelytan närmast ändarna. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt utbildat svällningstryck från bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.



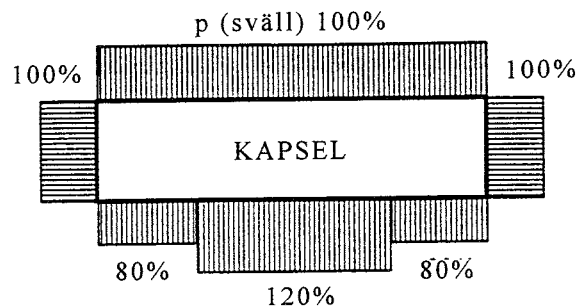
Fall 5 Kapseln är fast inspänd i ena ändytan och 1 m längs mantelytan närmast denna ändyta. En jämnt utbredd horisontell last motsvarande fullt utbildat svällningstryck i bentoniten (7 MPa) verkar längs den resterande kapselytans ena sida.

Lastfallen 3 till 5, som inträffar utan vattentryck, skall betraktas som ett extremfall för vilka inga extra säkerhetsmarginaler krävs.

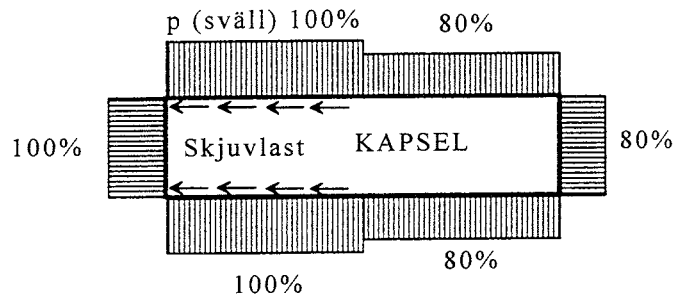
Efter vattenmättnad

Om kapseln är snedplacerad eller lutande i deponeringshålet eller om berget är ojämnt kan en bestående tryckojämnhet uppstå i bentoniten även efter vattenmättnad med fullt vattentryck och islast.

Dimensioneringen för följande belastningar skall göras med iakttagande av sedvanliga säkerhetsmarginaler.



Fall 6A Svällningstrycket är fullt utbildat på ena sidan av kapselns mantelyta och ändytorna. På andra sidan av mantelytan råder 20% förhöjt svällningstryck längs den centrala halvan och 20% sänkt svällningstryck längs de resterande fjärdedelarna vid kapseln ändar.



Fall 7A 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.

Motsvarande lastfall, Fall 6B och 7B, där svällningstrycken är 50% högre respektive lägre skall betraktas som extremfall för vilka inga extra säkerhetsmarginaler krävs.

Fall 8 Bergrörelser

Kapselns hållfasthet skall också beräknas för en postulerad förskjutning på 0,1 m utmed en flackt orienterad spricka. Detta lastfall skall betraktas som ett extremfall för vilket inga extra säkerhetsmarginaler krävs.

Fall 9 Litostatiskt tryck

Med hänsyn till dimensionerna på tunnlar och deponeringshål kommer eventuellt kryp i berget inte att kunna registreras som ökad last för kapseln. Litostatiskt tryck är därmed inte konstruktionsstyrande.

4.1.2 Påverkan på andra barriärer

Materialpåverkan på grundvatten, buffert och berg

Kapselmaterialet eller dess korrosionsprodukter får inte påtagligt försämra buffertens funktion.

Lösta ämnen från kapselmaterialet eller dess korrosionsprodukter får inte kemiskt förändra bufferten så att dess svällningsegenskaper, hydrauliska konduktivitet och diffusionsmotstånd påtagligt försämras i bufferten i sin helhet eller lokalt genom att skapa snabba transportvägar genom bufferten. Detsamma gäller gasformiga korrosionsprodukter.

Tillväxten av korrosionsprodukter på kapselytan får inte leda till en tryckuppbyggnad i bufferten, som skulle kunna leda till att kapselns mekaniska integritet hotas.

Värmepåverkan på grundvatten, buffert och berg

Kapselns yttemperatur får inte överstiga 100°C.

Förhöjd temperatur i samband med ogynnsam grundvattenkemi kan negativt påverka bentonitbuffertens kemiska stabilitet.

Om kraftig förångning av grundvatten sker under det tidiga skedet i förvaret innan det vattenmättats, kan anrikningar av utfällda ämnen, till exempel salt, bildas på kapselytan. I samband med vattenmättnad kan då vattenkemin i kapselns omedelbara närhet vara betydligt aggressivare än annars förutsett. För att undvika detta dimensioneras kapseln så att den maximala yttemperaturen blir under 100°C.

Detta medför en begränsning av kapselns tillåtna yteffekt, det vill säga relationen mellan tillåten resteffekt för bränslet i kapseln och kapselns ytterarea.

Strålningspåverkan på grundvatten, buffert och berg

Kapselns ytdosrat får inte överstiga 1 Gy/h.

Kapseln måste ge tillräcklig strålskärmning för att inte, genom strålningspåverkan, förändra bentonitbufferten eller vattenkemin i närområdet. Detta kan ske genom radiolys av vatten eller fuktig luft före vattenmättnad. Det bidrag till kapselkorrosionen, som kommer från radiolysprodukterna skall vara försumbar i jämförelse med övrig korrosion under kapselns livslängd i förvaret.

Efter deponering och innan vattenmättnad 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 kontakten 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:

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

där G är G-värdet (molekyler/eV), V den bestrålade luftvolymen (dm³), ρ luftens densitet (g/dm³), D₀ begynnelse-dosraten (eV/g·år), t är tiden i år och T är halveringstiden i år för strålkällan. Om man förutsätter att gammastrålkällan har en halveringstid på 30 år får man med: G = 2 molekyler/100eV, en luftspalt på 5 cm runt kapseln (V = 825 dm³) och ρ = 1,184 g/dm³ en produktionshastighet för salpetersyra på 0,001 mol/år. Detta är en liten mängd, som inte märkbart påverkar kapselns livslängd.

Kväveföreningar som nitrit och ammoniak kan ge upphov till spänningskorrosion i koppar. De halter som skulle kunna förekomma är mycket låga och utgör inte någon risk för spänningskorrosion särskilt som kopparkapseln, innan vattenmättnad, i stort sett är fri från dragspänningar på ytan.

I bentonitbufferten kan produktionshastigheten uppskattas till 0,005 mol/år. Med tanke på kalcitinhållet i bentoniten kommer bentoniten, med denna låga produktionshastighet, att neutralisera syran. Den kommer därför inte att kunna vara farlig för kapseln.

Efter vattenmättnad leder radiolysen av bentonitporvattnet till att oxidanter bildas i systemet. Detta har undersökts av King (1996), som drar slutsatsen att för dosrater i storleksordningen 1 Gy/h kan inga effekter av strålningen på korrosionen förväntas.

Kriticitet

Bränslet i kapseln får inte bli kritiskt.

Kapseln måste utformas så att bränslet förblir underkritiskt även om vatten skulle tränga in i kapseln. Detta påverkar utformningen av kapselns inre aningen genom att utforma kapseln så att den mängd moderator (vatten), som kan rymmas i kapseln begränsas eller genom att lämpliga neutronabsorbatorer används vid utformningen av kapseln.

Bottentryck mot bentoniten

Kapseln får inte sjunka genom bentoniten.

Kapseln måste vara så utformad att bentonitlagret under kapseln förmår bära kapselns tyngd under mycket lång tid.

4.2 SÄKERHET DRIFT

4.2.1 Produktion

200 kapslar skall kunna produceras per år.

Kapseln skall vara så utformad att den kan produceras i serietillverkning med upprätthållande av specificerade kvalitetskrav. Detta ställer även krav på materialval och tillverknings- och kontrollmetoder. Materialen måste väljas så att kapaciteten hos underleverantörer kan garantera att material och kapselämnen alltid kan finnas tillgängligt i nödvändiga kvantiteter. Materialen bör i största möjliga utsträckning vara standardmaterial, som kan levereras av flera alternativa tillverkare.

4.2.2 Hantering

Inga hanteringsmissöden, som kan förutses, skall leda till att personal utsätts för oacceptabla stråldoser och att anläggningen utsätts för utsläpp av radioaktiva ämnen.

Hantering av kapseln skall kunna genomföras så att påfrestningar och belastningar från förutsedda missöden antingen kan tas upp av kapseln själv eller, där detta inte är möjligt, av lämpligt utformade mekaniska skydd.

4.2.3 Transport

Kapseln skall kunna transporteras säkert.

Kapseln skall kunna transporteras i därför avsedd transportbehållare, som uppfyller gängse krav på strålskärning, brandsäkerhet och mekaniskt skydd.

4.2.4 Återtag

Kapseln skall kunna återtas från djupförvaret inom 40 år efter deponering.

Kapseln skall vara så utformad att återtag från förvaret är möjligt utan att eventuella anordningar på kapseln för detta ändamål äventyrar kapselns integritet i ett långtidsperspektiv i förvaret. En återtagen kapsel skall efter eventuell mellanlagring kunna återdeponeras.

Kapseln skall vara så utformad att återtag efter längre tid än 40 år inte görs omöjligt.

5 KONSTRUKTION

5.1 MATERIALVAL

5.1.1 Kemisk beständighet

Kemiska förhållanden i djupförvaret

Under mer än 15 års tid har en omfattande databas med grundvattenkemisk information byggts upp. Trots att data har stor geografisk spridning över Sverige, ger de ändå en relativt samstämmig bild. Grundvatten i granitiska berg i Sverige är syrefria och reducerande från ett djup på 100 till 200 meter. Redoxpotentialen under detta djup ligger på -200 till -300 mV på väteskalan och vattnet har ett pH värde från neutralt till mildt alkaliskt (7-9).

Även när det gäller innehållet av lösta ämnen är variationsbredden relativt begränsad. Kloridhalterna i grundvattnet kan dock variera inom mycket vida gränser och sträcker sig från cirka 0,15 mmol/dm³ till cirka 1,5 mol/dm³. Kloridhalterna balanseras av ekvivalenta mängder natrium och i saltare vatten företrädesvis kalcium. Halterna av övriga ämnen är i allmänhet låga. De reducerande grundvattnen har dessutom en typisk halt av lösta sulfider på 1,5·10⁻⁵ mmol/dm³.

Den kemiska miljön i kapselns omedelbara närhet styrs av sammansättningen på bentonitporvattnet. Den i sin tur styrs av växelverkan mellan bentoniten och grundvattnet i det omgivande berget. Tabell 5-1 visar typiska värden för karbonathaltigt grundvatten med låg kloridhalt jämviktat med bentonit.

Tabell 5-1. Typiska värden (mmol/dm³) för karbonathaltigt grundvatten med låg kloridhalt jämviktat med bentonit.

Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ²⁻	pH
90	2	30	3	9,3

Kloridhalten påverkas inte av bentoniten, vilket leder till att för grundvatten med höga kloridhalter erhålls motsvarande värden i bentonitporvattnet med motsvarande ökning av natrium och även av kalciumhalterna. Med undantag av klorid styrs halterna av övriga dominerande anjoner för överskådlig tid av växelverkan med bentoniten.

Kemisk beständighet hos alternativa kapselmateriäl

Beständighet mot korrosion kan uppnås på flera sätt. Kapseln kan tillverkas i ett material som inte angrips av korrosion under de förutsedda förhållande-

na, det vill säga, materialet är immunt mot korrosion. Alternativt kan beständighet uppnås genom att kapselmaterialet skyddas genom att bilda ett svärgenomträngligt ytskikt av korrosionsprodukter. Materialet är då passivt under förhållandena i djupförvaret. Ett tredje alternativ är att tillverka kapseln i ett material som korroderar på ett förutsägbart sätt, och ge den en korrosionsmån som garanterar önskad livslängd i förvaret.

Material som är immuna är ädelmetallerna och många keramer. Till de passiva metallerna hör titan, titanlegeringar, rostfria stål med flera. Kapslar med korrosionsmån skulle kunna tillverkas i låglegerade kolstål.

Korroderande material, som låglegerade kolstål, har korrosionshastigheter på någon tiondels mikrometer per år upp till några mikrometer per år under förvarförhållanden /Blackwood et al./. Under 100.000 år motsvarar detta en avfrätning på några tiotals millimeter upp till några hundratals millimeter. Osäkerheterna i att extrapolera från laborierdata på korrosionshastigheter mätta under månader och år till tusentals år gör att säkerhetsfaktorer måste läggas till de uppskattade korrosionsangreppen. I ett konservativt fall med en korrosionshastighet på några mikrometer per år och en säkerhetsfaktor på två till tre, skulle en vägg tjocklek på kapseln på upp till en halv meter krävas. En kapsel med den vägg tjockleken skulle bli mycket tung, 75 till 100 ton, och detta skulle försvåra hanteringen i inkapslingsanläggningen och i djupförvaret. Den relativt höga korrosionshastigheten skulle även leda till kraftig uppbyggnad av korrosionsprodukter, som skulle mekaniskt, och möjligen också kemiskt, påverka övriga barriärer i närområdet.

Passiva metaller har en mycket låg korrosionshastighet. Extrapolering av laborierdata visar att allmänkorrosionen för t.ex. titan skulle vara mycket liten även under långa tidsperioder /Mattsson och Olefjord 1990, Mattsson et al 1990/. Alla passiva metaller är relativt nya material och mycket litet är känt om deras egenskaper över långa tidsperioder. Det gäller i första hand stabiliteten hos passivfilmen, som är grunden till korrosionsbeständigheten. Många av dessa metaller, som t.ex. aluminium och titan, är i sig mycket instabila kemiskt och skulle korrodera mycket snabbt om passivfilmen bröts ned. De är också, om än i varierande grad, känsliga för lokal korrosion, främst spaltkorrosion.

Ädla metaller, som skulle vara immuna mot korrosion under alla förhållanden som kan förekomma i djupförvaret, är egentligen bara guld och platina. Ingen av dessa är praktiska alternativ som kapselmaterial.

Koppar, å andra sidan, har ett stort stabilitetsområde i syrefritt vatten /Beverkog och Puigdomènech/ och syrefria förhållanden förväntas under huvuddelen av förvarstiden. Lösta sulfider i grundvattnet förändrar situationen och koppar kan då korrodera genom bildning av kopparsulfid och vätgas. Halterna löst sulfid i kapselns närområde är emellertid mycket låga och korrosionsangreppen på koppar under långa tidsperioder kommer att styras av tillgången på lösta sulfider /Korrosionsinstitutet 1978, Korrosionsinstitutet 1983, Werme et al. 1992/.

Många keramer är stabila eller korroderar extremt långsamt under förvarsförhållanden, t.ex. aluminiumoxid och titandioxid. I gengäld är dessa material, jämfört med metaller, spröda och därigenom känsliga för hanteringsmissöden. Stötar och slag mot kapseln skulle kunna leda till sådana skador att kravet på täthet hos kapseln inte kan uppfyllas. Även om det pågår ett utvecklingsarbete mot duktila keramer, är dessa material för närvarande knappast realistiska alternativ. Ytterligare en nackdel med keramiska kapselmaterial är att de kräver höga temperaturer för förslutning av kapseln i inkapslingsanläggningen. Detta ökar riskerna för bränsleskador och utsläpp av radioaktiva ämnen.

Val av kapselmaterial från kemiska överväganden

Utifrån korrosionsöverväganden rankas koppar högst. Koppars korrosionsegenskaper är väl kända och förekomsten av gedigen koppar och flera tusen år gammalt arkeologiskt material gör det möjligt att bekräfta modeller för allmän korrosion och gropfrätning i skilda miljöer för långa tidsperioder.

Koppars stabilitet i rent syrefritt vatten förenklar modellerna för långtidskorrosion i djupförvaret. Efter att syret är förbrukat i förvaret efter allra högst några hundra år /Wersin et al. 1994A/, 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 vad gäller korrosionshastigheter och korrosionsmekanismer över långa tider. I stället reduceras problemet till att beskriva diffusiv transport av lösta sulfider till kapselytan. Detta ökar tillförlitligheten i förutsägelseerna betydligt, eftersom diffusiv transport i porösa media är väl känd och förstådd.

Korrosionen på en kopparkapsel i djupförvarsmiljö har studerats ingående under mer än 15 år och en förväntad livslängd på över 100.000 år kan uppnås med betryggande marginaler med rimliga vägg tjocklekar på kapseln /Korrosionsinstitutet 1978, Korrosionsinstitutet 1983, Werme et al.1992, Wersin et al. 1994 B/.

Bedömningen av koppars livslängd i förvaret skulle kunna påverkas av bakteriell korrosion om en biofilm av sulfatreducerande bakterier bildades på kapselytan. Experimentella undersökningar har emellertid visat att med bentonitdensiteter på 1800 kg/m³ eller högre kan inga sulfatreducerande bakterier överleva i bufferten eller på kapselytan /Pedersen et al., Motamedi et al./.

För inga andra av de alternativa materialen, med undantag för keramer, kan motsvarande långtidsbedömningar göras med samma grad av tillförlitlighet även om det inte är osannolikt att andra material också skulle kunna få tillräcklig livslängd i djupförvaret. Ur korrosionssynpunkt har därför koppar valts som kapselmaterial till kapslar för använt kärnbränsle.

5.1.2 Mekanisk hållfasthet

Mekaniska förhållanden i djupförvaret

Kapseln kommer att deponeras i granitiskt berg på 400 till 700 meters djup under vattenmättade förhållanden. Detta innebär ett hydrostatiskt tryck på 4 till 7 MPa. Det dimensionerande hydrostatiska trycket är därför 7 MPa. Till detta kommer svällningstrycket från bentonitbufferten. Det dimensionerande svällningstrycket från bentoniten är satt till 7 MPa /Bäckblom/. Dessa båda tryckkomponenter betraktas som additiva vilket gör att den konstruktionsstyrande lasten är 14 MPa. Kapseln skall dimensioneras för detta yttre övertryck med gängse säkerhetsfaktor.

Valet av säkerhetsfaktor har gjorts utifrån gängse praxis för stålbyggnadskonstruktioner och tryckkärl. Eftersom kapseln inte kan betraktas som ett konventionellt tryckkärl i så måtto att den utsätts för yttre övertryck i stället för inre övertryck, har i första hand riktlinjerna för stålbyggnad beaktats. Valet av säkerhetsfaktor diskuteras av Savås /Savås/. För kapseln har säkerhetsfaktorn satts till minst 2,5, vilket skall jämföras med den minsta tillåtna säkerhetsfaktorn på 2. Säkerhetsfaktorn skall täcka osäkerheter i materialgenskaper, tillverkning och även osäkerheter i belastningen i djupförvaret. Med en nominell last på 14 MPa skall kapseln alltså dimensioneras för 35 MPa. Under en istid kan en extra last på upp till 30 MPa (motsvarande 3000 m vatten) eventuellt tillkomma utöver de 14 MPa. För att även täcka detta fall utan extra säkerhetsmarginaler (säkerhetsfaktor 1) måste kapseln dimensioneras för minst 44 MPa som därmed blir det dimensionerande lastfallet.

Mekanisk hållfasthet hos alternativa kapselmateriäl

Den mekaniska hållfastheten hos en kapsel för använt kärnbränsle är till stor del beroende av kapselutformningen. Kapseln kan utformas så att kapselns eget hölje förmår bära det yttre trycket. Alternativt kan den utformas så att den mekaniska hållfastheten fås genom att ytterhöljet stöds av en lämpligt utformad inre struktur. Av tillverkningstekniska skäl och hållfasthetsskäl förutsätts kapseln vara utformad som en cylinder med plant lock och plan botten.

För att ett cylindriskt skal med rimlig godstjocklek skall kunna bära lasten av grundvattentryck och svällningstryck i bentoniten med önskad säkerhetsfaktor måste materialet ha en sträckgräns på över 250 MPa (Se dimensioneringsberäkningarna i /Savås/). Utifrån korrosionsöverbäganden har koppar bedömts som det mest lämpade kapselmaterialet. Ren glödgad koppar har emellertid en sträckgräns på ungefär 50 MPa. Detta innebär att en kapsel av ren koppar inte kan göras självbärande. Hållfastheten hos koppars kan ökas genom tillsatser av legeringsämnen. Även om vissa kopparlegeringar, som kopparnickel, har bättre korrosionsbeständighet än koppar under oxiderande förhållanden kan spänningsnivåerna i en självbärande kopparkapsel i djupförvaret öka risken för spänningsskorrosion. Bedömningen av materialets korrosionsegenskaper under mycket långa tider kompliceras också av att kopparmaterialet genom legering görs mindre ädelt. För vissa legeringar

finns också risken att legeringsämnen i det långa tidsperspektivet lakas ut eftersom de är mindre ädla än koppar. Om koppar väljs som kapselmateriäl måste kapseln utformas så att nödvändig hållfasthet ges av en inre stödjande struktur. Dessutom ställs krav på att kopparmaterialets duktilitet tillåter de eventuella deformationer som kan bli aktuella i djupförvaret då kopparkapseln tar stöd av den inre tryckbärande komponenten.

Nödvändig hållfasthet hos en kopparkapsel kan uppnås genom att tomvoly-
men inne i kapseln helt fylls. I KBS-3 diskuterades möjligheterna att åstad-
komma detta genom att fylla kapseln med bly eller att tillverka en solid
kopparkapsel genom het isostatisk pressning. Som alternativ till dessa me-
toder kan nödvändig hållfasthet uppnås genom att kapseln förses med en
tryckbärande insats av ett material med tillräckligt hög hållfasthet.

Val av kapselmateriäl från mekaniska överväganden

Fyllning av en kapsel med smält bly eller tillverkning av kapseln med hjälp
av het isostatisk pressning förutsätter att kapseln med bränsle utsätts för för-
höjda temperaturer och i fallet isostatisk pressning även för höga tryck.
Detta ökar riskerna för missöden i inkapslingsanläggningen och har därför
betraktats som mindre lämpade kapselutformningar. Alternativet att ge kop-
parkapseln nödvändig mekanisk hållfasthet genom att förse den med en in-
sats av ett tillräckligt hållfast materiäl rankas därför högst.

5.1.3 Val av kopparkvalitet

Från korrosionssynpunkt bör ren syrefri koppar användas. Kraven på meka-
nisk hållfasthet är underordnade, men för alternativet med lastbärande insats
kommer det av tillverkningstekniska skäl att vara nödvändigt med ett radi-
ellt gap på någon millimeter mellan insats och kopparhölje. Vid pålastning-
en kommer kopparhöljet att deformeras för att ta stöd mot insatsen. Detta
kräver att ett kopparmateriäl med tillräcklig duktilitet, även krypduktilitet,
väljs. Krypprovning har genomförts på alternativa kopparmateriäl och re-
sultaten hittills visar att ren syrefri koppar enligt standarden ASTM UNS
C10100 (Cu-OFE) eller EN133/63: 1994 Cu-OF1 visar otillfredsställande
krypduktilitet vid förhöjd temperatur (200 till 250°C) /Henderson och Sand-
ström/. Andra kopparmateriäl, speciellt fosfor- och silverlegerad koppar, har
visat sig inte ha den rena syrefria koppars begränsningar i detta avseende
/Henderson och Werme, Lindblom et al./

Vid en sammanvägning av andra krav än korrosionsbeständighet har materi-
älet till kopparkapseln specificerats med standarden ASTM UNS C10100
(Cu-OFE) eller EN133/63: 1994 Cu-OF1. Sammansättningen på dessa kop-
parkvaliteter framgår av Tabell 5-2.

Tabell 5-2: Sammansättningen i ppm för syrefri koppar enligt europeisk och amerikansk standard.

Legering	Cu (%)	Ag	As	Fe	S	Sb	Se	Te	Pb
C10100	99,99 ¹	25 ²	5 ²	10 ²	15 ²	4 ²	3 ²	2 ²	5 ²
Cu-OF1		25 ²	5 ³	10 ⁴	15 ²	4 ²	2 ²	2 ⁵	5 ²

¹ Inklusive silver

² Högsta tillåtna halter

³ Σ As + Cd + Cr + Mn + Sb max. 0,0015% (15 ppm)

⁴ Σ Co + Fe + Ni + Si + Sn + Zn max. 0,0020% (20 ppm)

⁵ Σ Bi + Se + Te max. 0,0003% (3 ppm), Σ Se + Te max. 0,00030% (3,0 ppm)

Utöver dessa specifikationer gäller för Cu-OF1 att syrehalten skall vara sådan att ingen väteförsprödning kan förekomma. För C10100 gäller följande högsta halter för övriga ämnen: Bi: 1 ppm, Cd: 1 ppm, Mn: 0,5 ppm, Hg: 1 ppm, Ni: 10 ppm, O: 5 ppm, Sn: 2 ppm, Zn: 1 ppm.

Utöver kraven på kopparkvaliteten, som är relaterade till korrosionsegenskaper, tillkommer krav relaterade till tillverkningen av kapseln och de nödvändiga mekaniska egenskaperna (diskuteras även under 5.1.2). Dessa krav är: H < 0,6 ppm, S < 8 ppm, P 40 - 60 ppm och kornstorleken 180 - 360 μ m. Kornstorleken mäts enligt ASTM:s jämförelsemetod E 112. I Tabell 5-3 ges motiveringar till kraven på analys, kornstorlek och mekaniska egenskaper.

Elektrolytkoppar har vanligen mycket hög renhet. Föroreningar och värdefulla spårämnen samlas som slam på botten av elektrolystanken. Förhållandena under smältning och gjutning bestämmer sedan koppars syrehalt (och fosforhalt om fosfordesoxiderad koppar produceras). Föroreningarna påverkar koppars rekristallisationstemperatur även vid koncentrationer på under 10 ppm /Sundberg/. Mekaniska egenskaper, som draghållfasthet och duktilitet, påverkas i allmänhet inte av små föroreningshalter, men det är troligt att de föroreningsämnen som ger förhöjda rekristallisationstemperaturer redan i haltområdet 1 till 10 ppm, visar på korngränssgring och därmed risk för svaghet i korngränserna. Mot den bakgrunden är det troligt att svavel, vismut, selen och tellur, som har låg löslighet i koppar, är mest skadliga.

Vismuthalter på 10 ppm kan ge upphov till sprödhet i temperaturintervallet 450-600°C.

SKB:s undersökningar har visat att koppars krypduktilitet kan vara kraftigt påverkad även av små halter svavel /Henderson et al. 1992, Henderson och Sandström 1997/. Augeranalyser visade på höga halter svavel (8 till 13 atomprocent) i korngränserna. Takuno et al. har bekräftat detta. På samma sätt som Henderson et al. (1992) fann Takuno att utskiljningen av svavel till korngränserna påverkas av fosfor (och syre Takuno et al.)).

Även fosfor påverkar rekristallisationstemperaturen, men eftersom lösligheten för fosfor är relativt hög är mekanismen troligen en annan.

Det är troligt att den observerade nedsatta krypduktiliteten i temperaturintervallet 200 till 250°C orsakas av svavelsegringar till korngränserna med försprödning som följd. Fosfor förändrar uppenbarligen detta, men mekanismen är ännu inte klarlagd.

Tabell 5-3. Motiveringar till kraven på analys, kornstorlek och mekaniska egenskaper.

Krav	Förklaring
O < 5 ppm	Risk för försämrad svetsbarhet vid högre halter.
H < 0,6 ppm	Menlig inverkan på mekaniska egenskaper vid högre halter.
S < 8 ppm	Nivåer över den specificerade har menlig inverkan på de mekaniska egenskaperna p.g.a. kopparsulfid i korngränserna.
P 40 - 60 ppm	Fosforhalter av denna storleksordning lindrar effekten av svavelföreningar, ökar krypduktiliteten, höjer rekristallisationstemperaturen och har liten påverkan på svetsbarheten.
Kornstorlek < 360 µm	Vid denna kornstorlek får man vid ultraljudprovning en upplösning jämförbar med radiografi av 50 mm tjock koppar.
Brottförlängning > 40% RT - 100°C	Kopparkapseln kommer att deformeras ca 4% under förvaring ¹ .
Krypbrottförlängning > 10% RT - 100°C	Kopparkapseln kommer att deformeras ca 4% under förvaring ¹ .

¹ Se beräkningar utförda av Cakmak.

5.1.4 Påverkan på andra barriärer i djupförvaret

Materialpåverkan

Passiva material som titan och titanlegeringar skyddas mot korrosion genom ett svärgenomträngligt och svårlösligt ytskikt. Så länge materialet förblir passivt kommer alltså den kemiska påverkan på buffert och berg att vara försumbar. Detsamma gäller mekanisk påverkan, eftersom den mycket långsamma tillväxten av korrosionsprodukter leder till en motsvarande mycket långsam tryckupbyggnad i bufferten.

Korroderande material med korrosionsmån, som järn och stål, kommer att ge upphov till påtagliga mängder korrosionsprodukter. Eftersom densiteten av korrosionsprodukterna är lägre än ursprungsmaterialets, kommer detta att leda till en tryckupbyggnad i kapselns närområde. Om korrosionsproduk-

terna till någon del är lösliga, till exempel som Fe^{2+} för järn eller stål, kan heller inte en kemisk påverkan på bentoniten uteslutas.

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 (se avsnitt 5.2.2) kommer inte heller någon mekanisk påverkan på närområdet att uppstå.

Värmepåverkan

Värmepåverkan på bentonit och berg är inte relaterad till materialvalet utan i första hand till kapselutformningen.

Strålningspåverkan

Strålningspåverkan på bentonit och berg är inte relaterad till materialvalet utan i första hand till kapselutformningen.

Kriticitet

Frågan om kriticitet i förvaret är inte relaterad till materialvalet utan i första hand till kapselutformningen.

Bottentryck mot bentoniten

Bottentrycket mot bentoniten är inte relaterad till materialvalet utan i första hand till kapselutformningen.

5.2 KAPSELUTFORMNING

5.2.1 Principutformning

Kapseln skall utformas så att den har ett yttre hölje av koppar som korrosionsskydd. För att få nödvändig mekanisk hållfasthet skall kopparhöljet stödjas med en tryckbärande insats. Utgångspunkt för dimensioneringen har varit att det skall vara möjligt att inkapsla 12 BWR element eller 4 PWR element i varje kapsel /Pettersson/.

5.2.2 Kopparkapseln

Dimensionering

Korrosionsskydd

Ur korrosionssynpunkt skall väggjockleken på kopparkapseln skall vara minst 15 mm.

Kopparhöljet är kapselns korrosionsbarriär. Det skall ge betryggande skydd mot korrosion i förvaret under lång tid efter vattenmättnad. Det skall också ge skydd mot atmosfärisk korrosion innan deponering och efter deponering innan vattenmättnad. Inga kända former av korrosionsangrepp skall kunna leda till att kapseln får en livslängd kortare än 100 000 år. Kopparkapselns utsida kommer i ett djupförvar att kunna korrodera av:

- syre från förvarets öppethållande innan vattenmättnad.
- syre som tillförs från bufferten eller från grundvatten via bufferten.
- sulfid som tillförs från bufferten eller från grundvattnet via bufferten.

Korrosion under syrehaltiga förhållanden

I närvaro av syre kommer koppar att oxideras till Cu_2O eller CuO i rent vatten beroende på redoxpotentialen. I närvaro av ligander kan hydroxisulfater, hydroxikarbonater eller hydroxiklorider bildas. Dessa kan också bildas vid atmosfärisk korrosion.

Korrosion innan djupförvaring: Utvändig korrosion på kopparkapsel i avvaktan på djupförvar och under djupförvarets inledningsskede har bedömts av Mattsson (1997). Under eventuell mellanlagring i avvaktan på deponering kommer kapslarna att utsättas för atmosfärisk korrosion. Lagringen förutsätts ske i normal stadsatmosfär. Om ytemperaturen på kapslarna hålls vid 20°C skulle den uppskattade korrosionshastigheten ligga i intervallet 0,006 till 0,027 μm per år. Om ytemperaturen på kapslarna skulle ligga på högsta tillåtna, det vill säga 90°C , uppskattas korrosionshastigheten vara 100 gånger så stor. Uppskattningen är baserad på en antagen fördubbling av den kemiska reaktionshastigheten vid en temperaturhöjning av 10 grader. Om korrosionen sker i torr luft kommer ett skikt av i huvudsak kopparoxid att bildas på kapselytan. Korrosionsangrepp på några mikrometer innan deponering kommer inte att påverka kapselns livslängd i förvaret.

Korrosion orsakad vid aeroba förhållanden under buffertens mättnadsfas: Efter deponering och innan vattenmättnad skett kan kapseln tänkas komma att stå i luft med hög fuktighet vid en temperatur av 90°C . Baserat på korrosionshastigheter vid utomhusexponering av koppar i stadsatmosfär, gör Mattsson bedömningen att korrosionshastigheten kan bli så stor som 100 till 300 μm per år om syretillförseln inte begränsas. Korrosionsangreppet förväntas bli jämnt fördelat över kopparytan eftersom gropfrätning inte är möj-

lig under dessa förhållanden. Totala korrosionsangreppet kan uppskattas med ett massbalansresonemang. Volymen i deponeringstunneln och i deponeringshålet är $56,5 \text{ m}^3$ per kapsel. Porositeten i bentoniten och återfyllnadsmaterialet kan pessimistiskt uppskattas till 40%. Om hela denna porositet skulle utgöras av luft blir mängden syre per kapsel $4,5 \text{ m}^3$ eller cirka 200 mol O_2 . Förutsatt att Cu_2O bildas som korrosionsprodukt kommer 800 mol koppar eller 50 kg oxideras. Detta motsvarar ett största möjliga korrosionsangrepp på $300 \mu\text{m}$ jämnt fördelat över kapseln. I verkligheten kommer korrosionen att bli betydligt mindre eftersom transporten av syre till kapselytan kommer att vara begränsande.

Kopparkorrosion efter vattenmättnad; syrekorrosion: Efter vattenmättnad kommer syre fortfarande att finnas närvarande i kapselns omgivning. Detta syre förbrukas dels genom reaktioner med kopparkapseln, dels genom reaktioner med mineraler i bentonitbufferten. När syret förbrukats kommer de reducerande förhållanden som rådde innan förvaret byggdes att återupprättas. Den tid detta tar har uppskattats till 10 till 300 år /Wersin et al., 1994A/. Under denna tid är också lokal korrosion som gropfrätning möjlig. Dessa typer av korrosion kan leda till lokalt betydligt djupare korrosionsangrepp än den genomsnittliga korrosionen. Omfattningen på gropfrätningen beskrivs ofta med gropfrätningfaktorn, som är kvoten mellan största frättdjup och djupet av den allmänna korrosionen.

Kopparkorrosionen under de förväntade förhållandena i djupförvaret efter vattenmättnad är väl studerad /Korrosionsinstitutet 1978 & 1983, Werme et al.1992, Wersin et al.1994B/. Under en kortare period på upp till högst några hundra år efter deponering i djupförvaret, då syre kommer att vara närvarande, uppskattas maximala frättdjupet mycket pessimistiskt till cirka 2 mm, även om det troligen endast kommer att vara några mikrometer /Wersin et al. 1994B/. I det förra fallet hade en orrealistiskt hög gropfrätningfaktor på 100 använts. I det senare fallet användes gropfrätningfaktor 5. Totala korrosionsangreppet kommer att bestämmas av mängden tillgängligt syre. Det bör observeras att det är den inestängda mängden syre som orsakar korrosionen både före och efter vattenmättnad. De maximala korrosionsangreppen för dessa båda fall skall alltså inte adderas.

Korrosion under syrefria förhållanden

Kopparkorrosion efter vattenmättnad; sulfidkorrosion: I frånvaro av syre är koppar immun mot korrosion i rent vatten. För att ytterligare korrosion skall kunna äga rum måste vattnet innehålla lösta ämnen som kan påverka koppars immunitet. För djupförvarsförhållanden är löst sulfid och mycket höga kloridhalter vid lågt pH tänkbara. Eftersom djupa grundvatten är neutrala eller lätt alkaliska och bentonitbufferten motverkar försurning är lösta sulfider i praktiken de enda korrosiva ämnen som kan reagera med kopparkapseln efter att syret i förvaret förbrukats. Korrosionsprodukterna blir då Cu_2S eller CuS och vätgas. På förvarsdjup har grundvattnen mycket låga sulfidhalter, betydligt mindre än $5 \cdot 10^{-5} \text{ mol/dm}^3$, och lösligheten för de sulfidmineraler som finns i bentoniten är högst av samma storlek. Detta innebär att

korrosionen av kopparkapseln på grund av sulfider kommer att styras av tillgången och tillförseln av sulfider från grundvattnet och bufferten.

På samma sätt som för oxiderande förhållanden har Wersin et al.(1994B) uppskattat omfattningen av korrosionen med en mycket pessimistisk ansats och ett mest troligt fall. I det första fallet blir frättdjupet 2 mm och i det troliga fallet mindre än en tiondels millimeter.

Inverkan av temperatur: Temperaturen förvaret kommer under det oxiderande skedet att vara förhöjd med en högsta temperatur på 90°C på kopparytan. Temperaturhöjningen från 20°C till 90°C ökar korrosionshastigheten för koppar med en faktor hundra utifrån den enkla uppskattningen att reaktionshastigheten fördubblas med tio graders temperaturökning. Detta är emellertid av underordnad betydelse, eftersom diffusionen av reaktanter är styrande för hastigheten och diffusiviteten påverkas i betydligt mindre grad av temperaturen. Inverkan av temperaturen på de kemiska jämvikterna för korrosionsreaktionerna är försumbar för det temperaturintervall som är aktuellt i förvaret.

Inverkan av kemiska förändringar vid nedisningar: Det har diskuterats om nuvarande förhållanden på större djup i svensk berggrund är stabila under långa tider. Den fennoskandiska skölden har varit utsatt för flera nedisningar och det har ifrågasatts om inte syrehaltigt vatten skulle kunna tränga djupt ned i berggrunden i samband med avställning av inlandsisen. I ett djupförvar skulle detta kunna leda till ökad korrosion av kapslarna. Det finns emellertid inga entydiga belägg för att syrehaltigt vatten skulle ha trängt djup ned i berggrunden. Det kan dock inte helt uteslutas att syrehaltigt vatten tidvis tränger ned i krosszoner och sprickor med hög konduktivitet.

Syrehalten i vattnet kan uppskattas till 10 mg/l. Om man förutsätter att en 100 000 års period har sammanlagt 5 000 år av isavsmältning, då syresatt vatten tränger ned i förvaret med ett pessimistiskt satt ekvivalent flöde av 10 liter per år, kommer totalt cirka 400 g koppar att korrodera. Detta motsvarar vid jämn avfrätning 26 µm. Med en gropfrättningsfaktor på 5, som använts i KBS-3, skulle den djupaste frätgropen bli 130 µm.

Spänningskorrosion: Spänningskorrosion är en process som snabbt skulle kunna leda till kapselgenombrott. För initiering och utbredning av spänningskorrosionssprickor krävs en kombination av ogynnsamma kemiska förhållanden och dragspänningar i materialet. Riskerna för spänningskorrosion kan minimeras genom att välja förvarsplats där de kemiska förhållandena är gynnsamma och genom att utforma kapseln så att dragspänningar på kapselytan i största möjliga utsträckning kan undvikas. Riskerna för genombrott på grund av spänningskorrosion blir därigenom inte i första hand relaterade till godstjockleken utan mer till kapselutformningen.

Genomförda undersökningar pekar på att spänningskorrosion för de kopparkvaliteter som är aktuella är osannolik under de förutsedda förvarsförhållanden efter att reducerande förhållanden etablerats i kapselns omedelbara närhet /Benjamin et al., Rosborg och Svensson/.

Sammanfattande bedömning: Med mycket pessimistiska antaganden kommer det maximala korrosionsangreppet under 100.000 år inte att överskrida 5 mm, men det kommer troligen inte att uppgå till mer än några tiondels millimeter.

Osäkerheterna i bedömningarna över långa tidsperioder är stora och koppartjockleken måste därför väljas med lämplig säkerhetsfaktor. Stora säkerhetsfaktorer ligger redan i bedömningarna av omfattningen av korrosionen i de olika faserna i förvarets historia. Det är därför rimligt att använda en säkerhetsfaktor av samma storlek som används för dimensioneringen för mekaniska laster. Detta skulle leda till en från korrosionssynpunkt minsta acceptabel koppartjocklek på 15 mm.

Koppertjocklekens betydelse

Om Ur korrosionssynpunkt är en lämplig minsta väggjocklek, med tanke på långtidssäkerheten, 15 mm, men även andra faktorer påverkar valet av kapseltjocklek. Dessa är:

- tillverkning av kopparcylinder.
- hantering av kopparcylinder.
- förslutningsteknik.
- kontrollteknik.
- hantering av fylld kapsel.

Inverkan av dessa faktorer kommer att undersökas ytterligare och rapporteras vid ett senare tillfälle, men sammanfattningsvis kan följande sägas:

Tillverkningen av kopparplåtar förenklas om godstjockleken minskas. Reduktionsgraden i valsningen kan göras större än för tjockare plåtar och man får därigenom bättre kontroll över mikrostrukturen i materialet. Tunnare väggar leder till minskad mekanisk stabilitet hos kopparcylindern. Alltför tunna väggar kan vara till nackdel vid bearbetning, avspänningsglödning och transport av kapseln.

Förslutning av kapseln och svetsning i koppar förenklas med tunnare gods. Ned till 30 mm bedöms elektronstrålesvetsning som det mest realistiska alternativet. För gods tunnare än 40 mm skulle det kunna vara möjligt att elektronstrålesvetsa utan vakuum. Detta kräver emellertid ytterligare utvecklingsarbete uppskattat till 1 till 2 år. För godstjocklekar under 20 mm kan det vara praktiskt möjligt att svetsa med konventionell teknik, som till exempel TIG. Detta kräver dock förvärmning av koppargodset till några hundra grader. Även vid större godstjocklekar skulle konventionell svetsning kunna genomföras, men detta bedöms inte som ett praktiskt alternativ eftersom det leder till långa svetstider och troligen en oacceptabel uppvärmning av kapseln. Friktionssvetsning är ett möjligt alternativ men kräver stora

utrustningar och ett relativt omfattande utvecklingsarbete både av tekniken och av utrustning. Med de kapseltjocklekar, som är aktuella, är elektronstrålesvetsning den enda beprövade teknik som står till buds idag.

Såväl ultraljudsprovning som radiografi förenklas vid val av tunnare gods. För ultraljud är vinsterna mer marginella, eftersom mikrostrukturen i svetsen dominerar bakgrundsbruset i ultraljudsignalen. För radiografi kan möjligheter att reducera röntgenenergin förenkla radiografiutrustningen, minska kraven på strålskärning och även minska kostnaderna för utrustningen.

Vid en sammanvägning av kraven på korrosionsbeständighet, mekanisk hållfasthet, mikrostruktur i materialet, tillverkningsteknik och oförstörande provning är en väggjocklek på 30 mm ett lämpligt val.

5.2.3 Tryckbärande komponent

Dimensionering

Dimensionering för tryck

Kapselns tryckbärande komponent skall dimensioneras för ett yttre övertryck av 44 MPa, se avsnitt 5.1.2. Låglegerade stål har en sträckgräns i intervallet 200 - 330 MPa vid 100°C. Nödvändig tryckhållfasthet mot plasticering för en självbärande cylinder i dessa material kan inte fås vid rimliga väggjocklekar (ca 50 mm) utan att valet av kapseldimensioner begränsas /Savås/.

Som ett alternativ till den självbärande insatsen kan en insats med stödjande innerstruktur användas, se principskiss i Figur 5-1 för utformningen för BWR bränsle. Kapseln för PWR bränsle skiljer sig i utformningen av tvärsnittet av insatsen, enligt Figur 5-2. Kapseln tillverkas så att varje bränsleelement kan placeras i individuella kanaler med mellanväggar. Denna insats kan gjutas i segjärn (SS 0717), stål (SS 1306) eller eventuellt brons /Werme och Eriksson/. Dimensioneringen av en sådan insats styrs mer av gjuttekniska överväganden än av dimensioneringen mot tryck. Tjockleken på mellanväggar och ytterdiametern på insatsen bestäms av gjutegenskaperna hos gjutgodset och av kravet på att kriticitet kan undvikas om vatten skulle tränga in i kapseln. Av de aktuella materialen har segjärn den bästa gjutbarheten och väljs därför som referensmaterial. Segjärn SS 0717-00 har en densitet på 7100 kg/m³ och mekaniska egenskaper enligt Tabell 5-4.

Tabell 5-4: Mekaniska egenskaper för SS 0717-00 vid 20°C och 100°C .

Egenskaper	Vid 20°C	Vid 100°C
Sträckgräns (MPa)	250	235
Brottgräns (MPa)	400	375
Brottförlängning (%)	22	22
Elasticitetsmodul (GPa)	170	162
Poissons tal	0,3	0,3

Kontrollberäkning av kapselinsats

Fall 1-2 Det kritiska övertrycket för en kapsel med utformning enligt Figur 5-2 har beräknats till 81 MPa respektive 114 MPa för BWR och PWR varianterna /Ekberg. Denna utformning ger också nästan 40 MPa marginal vid det dimensionerande lastfallet. Även om detaljerna kring kapselutformningen kan komma att modifieras av tillverkningstekniska skäl, ger principutformningen betryggande säkerhetsmarginaler. I BWR fallet ansattes avståndet mellan kanalerna för bränsleelementen till 50 mm. Om avståndet minskades till 30 mm var motsvarande det övertrycket minst 60 MPa.

Fall 3-7 Lastfallen är kontrollberäknade efter handbok. Följande ingångsdata har använts för BWR varianten:

Yttröghetsmoment I: 0,02803 m⁴

Böjmotstånd W: 0,05901 m³

Resultaten för lastfallen 3-6 ges i Tabell 5-5.

Tabell 5-5: Böjmoment och böjspänning för lastfallen 3-6.

Lastfall	Maximalt böjmoment	Maximalt böjmoment (MNm)	Maximal böjspänning (MPa)
3	$4/75 \cdot pDL^2$	7,2	122
4	$2/25 \cdot pDL^2$	10,8	183
5	$7,562/25 \cdot pDL^2$	40,7	690
6A	$1/80 \cdot pDL^2$	1,7	29
6B	$1/32 \cdot pDL^2$	4,2	71

Där: p är bentonitens svällningstryck (7 MPa)

D är ytterdiametern på cylindern (0,95 m)

L är längden på cylindern (4,5 m)

Sträckgränsen (240 MPa) nås inte i fallen 3,4 och 6, medan fall 5 leder till oacceptabel belastning på kapselinsatsen. För fallen 4 och 5 har FEM-beräkningar genomförts, där man även tagit hänsyn till bentonitens materialegenskaper /Börgesson och Hernelind/. Största dragspänningarna i kapselinsatsen visade sig då ligga under 55 MPa.

Lastfallen 7A&B är lastfall där hela lasten kan tänkas komma att bäras av den yttre kopparmanteln. Den obalanserade kraften mellan kapselns ändrar måste bäras av den axiella friktionen mellan koppar och bentonit. Den obalanserade kraften är:

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

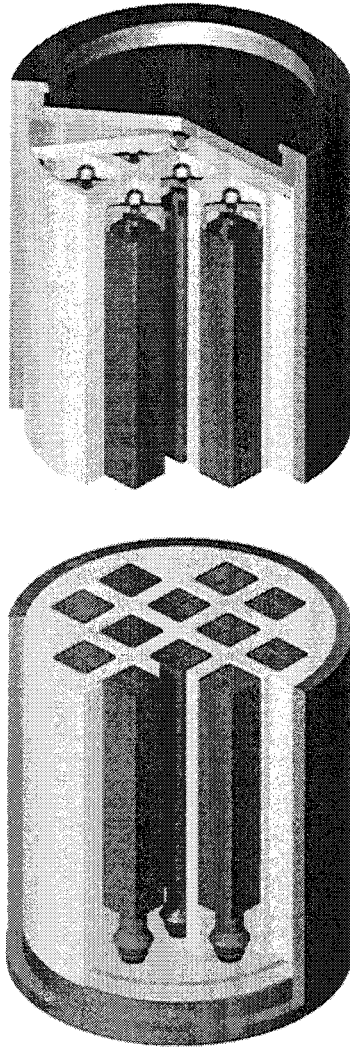
där: ΔF är den obalanserade axiella kraften

Δp är tryckskillnaden mellan kapselns ändrar (20% resp. 50% av 7 MPa)

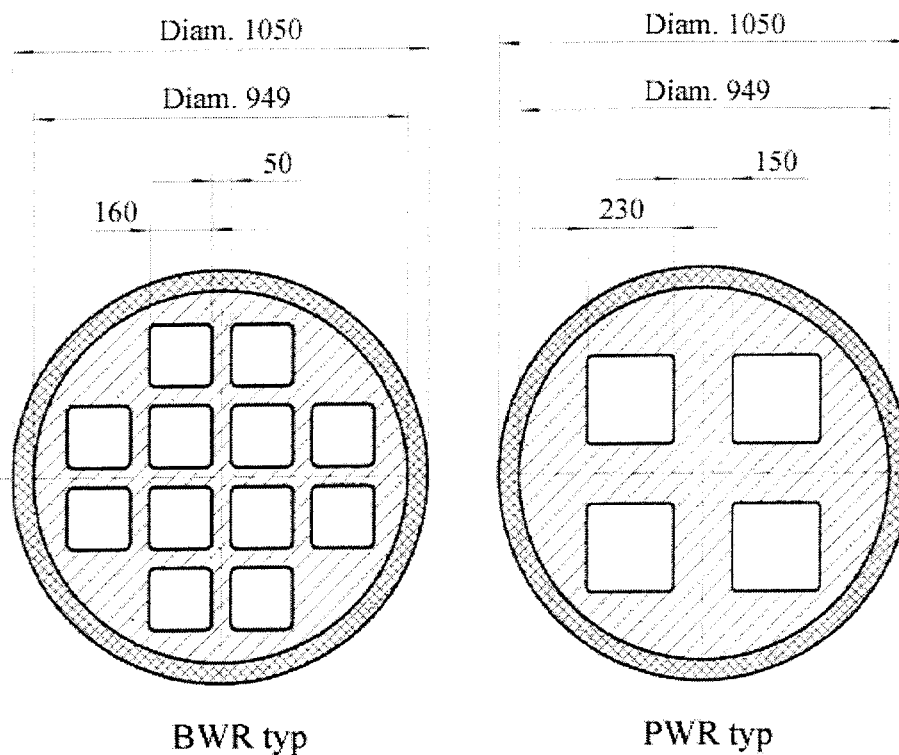
D är kapselns ytterdiameter (1,05 m)

Fall 7A: $\Delta F = 1,2$ MN

Fall 7B: $\Delta F = 3,0$ MN



Figur 5-1. Sprängskiss av kapsel för använt kärnbränsle. Utförande för 12 BWR element.



Figur 5-2. Tvärsnitt av kapsel och kapselinsats i BWR- respektive PWR-utförande.

Om man bortser från friktionen mellan kopparmanteln och insatsen kommer den oblaterade kraften att tas upp av kopparmanteln, motsvarande en axiell spänning i koppargodset på 7,7 respektive 19,3 MPa. Detta är låga spänningar jämfört med sträckgränsen på 45 MPa. De resulterande skjuvspänningarna är betydligt lägre.

Fall 8 Inverkan av berg rörelser på en självbärande koppar-stål kapsels mekaniska stabilitet har utretts av Börgesson. Den undersökta kapseln motsvarar vad Savås analyserade och kollapslasten ligger i intervallet 45 till 55 MPa. Detta är betydligt lägre än vad som är fallet för kopparkapsel med gjuten insats. Beräkningarna kan därför i viss mån betraktas som konservativa. Börgesson fann att berg rörelser i storleksordningen 0,1 m inte leder till kapselbrott. Töjningarna i kopparhöljet var låga, under 2,5%.

Börgesson försökte också att beräkna krypdeformationen efter skjuvrörelsen i berget. En konservativ uppskattning visade att deformationen under en tidsperiod på upp till 100 000 år kunde leda till töjningar på ungefär 6% på den cylindriska delen på kopparkapseln och upp till 36% i locket. Det kan därför inte uteslutas att en mycket tidig skjuvrörelse i berget kan leda till att kapselns livslängd förkortas. Med tanke på den mycket låga sannolikheten

för sådana händelser, bedöms ändå riskerna för kapselgenombrott som mycket små.

5.2.4 Dimensionering av kapsel med insats

Utöver dimensionering för beständighet mot yttre korrosion och mekanisk hållfasthet måste kapseln även dimensioneras med hänsyn till inre korrosion, strålskärning, kriticitet och bottenstryck mot bentonitbufferten.

Inre korrosion

Kapselinsatsen kommer att utsättas för inre korrosion om tomrummet i insatsen är fyllt med luft. Totala tomvolymen i en kapsel i BWR-utförande är cirka $1,3 \text{ m}^3$. Av denna volym upptar bränsleelementen uppskattningsvis 30%. Den återstående tomvolymen är då 1 m^3 , varav 20% utgör syrgas. Detta motsvarar 9 mol, som om det förbrukades genom att reagera med gjutjärnet och producera, konservativt antaget, FeO, skulle ge ett korrosionsdjup på $4 \text{ }\mu\text{m}$.

Vid rumstemperatur har luft med 100% relativ luftfuktighet 25 g vatten per m^3 . Den totala inre insatsarean är 34 m^3 . Om vattnet i luften på samma sätt som syret förbrukas genom bildning av FeO, skulle detta ge ett korrosionsangrepp på $0,3 \text{ }\mu\text{m}$. Detta är korrosionsdjup, som inte kan äventyra kapselns integritet på lång sikt.

Riskerna för inre korrosion orsakad av effekterna av bestrålning av fuktig luft måste också beaktas. Om samma formel används som i avsnitt 4.1.2, blir resultatet att vid en dosrat på 300 till 500 Gy/h skulle allt vatten vara förbrukat till produktion av salpetersyra efter 3 till 6 år. Mängden bildad salpetersyra är då 2,8 mol. Salpetersyran skulle kunna leda till spänningskorrosion, om den kondenserar på områden med dragspänningar på kapselinsatsen.

Under det tidiga skedet efter förslutning och deponering kommer temperaturen på insatsen närmast bränslet att vara över 150°C . Vid den temperaturen finns inget vatten i vätskeform i kapseln och den relativa luftfuktigheten är för låg för att en vattenfilm skall kunna bildas på metallytan, även om vatten skulle ha förts över till kapseln innestängt i en bränslestav. (Den största mängd, som i enstaka fall skulle kunna föras över på detta sätt, bedöms vara 50 g, motsvarande tomvolymen i en bränslestav.) För att en vattenfilm skall bildas krävs en relativ fuktighet på ungefär 40%. Under dessa förhållanden är salpetersyra inte stabil utan sönderfaller till NO_2 , som är den dominerande radiolysprodukten i torr luft /Reed och Van Konynenburg, 1991A, 1991B/. För att vattnet och syret i kapseln inte skall hinna förbrukas under den tid det tar för temperaturen att sjunka så att vatten/salpetersyra kan kondenseras måste korrosionshastigheten vara extremt låg. Risken för skador på kapselinsatsen på grund av spänningskorrosion bör därför vara mycket liten, särskilt som de dragspänningar som kan uppkomma är små och lokala /Ekberg/.

Om det trots detta bedöms att risken för spänningskorrosion är oacceptabel, kan luften i kapseln ersättas med en ädelgas. På så sätt skulle den mängd salpetersyra som kan produceras, kunna begränsas ytterligare /Henshaw/.

Strålskärmning

För att uppfylla kravet på högsta tillåtna ytdosrat på högst 1 Gy/h måste kapseln ha en minsta total väggjocklek på cirka 100 mm /Håkansson 1995, Håkansson 1996, Lundgren/ att fördelas på insats och kopparhölje.

Värmebelastning på bentoniten

Kravet på begränsning av kapseltemperaturen till 100°C är lägre än den högsta tillåtna temperaturen i bentonitbufferten (130°C). Skadlig värmebelastning på bentoniten kan uteslutas.

Ytemperaturen på kapseln är, för varje uppsättning av värmeövergångsdata för bentonitbuffert och berg, en funktion av resteffekten i bränslet och kapselns area. Kravet på en högsta ytemperatur på 100°C sätter en gräns för tillåten yteffekt (W/m^2) på kapseln. Kapselns längd bestäms av bränsleelementens längd medan diametern kan varieras friare. Volymen i kapseln och därmed mängden bränsle som kan inkapslas varierar med diametern i kubik medan kapselarean varierar med diametern i kvadrat. Detta leder till att det finns en övre gräns där kapselns innervolym kan utnyttjas optimalt. Om sammanlagda resteffekten på det inkapslade bränslet är för hög måste kapseln överdimensioneras för att yteffekten skall hållas inom tillåtna gränser.

Betydelsen av kapseldimensionerna för kapselns ytemperatur kommer att redovisas i en separat rapport /Pettersson/, men resultaten hittills tyder på att en kapsel med 12 BWR element eller 4 PWR element ligger nära det optimala för de resteffekter som förutses för bränslet vid inkapslingen.

Kriticitet

Med en kapselinsats i form av en självbärande cylinder kommer tomvolymen i kapseln att vara sådan att det finns risk för kriticitet om vatten tränger in i kapseln. Detta kan motverkas om tomvolymen reduceras, till exempel genom att fylla kapseln med ett pulver eller granulat. Detta komplicerar dock hanteringen i samband med inkapsling. I utformningen med den gjutna insatsen fyller mellanväggarna denna funktion och förhindrar kriticitet även om kapseln skulle vattenfyllas under förutsättning att bränslet krediteras för en relativt låg utbränning /Efrainson/.

Utformningen av referens kapseln för BWR bränsle framgår av Figur 6-1. Den består av en gjuten insats av segjärn med 50 mm separation mellan bränlekanalerna och 50 mm minsta godstäckning till periferin. Kopparkapselns vägg tjocklek är 50 mm för att uppfylla kravet på 100 mm total metalltäckning för strålskärning. En mer detaljerad beskrivning finns i /Werme och Eriksson/.

Innerbehållaren gjuts med integrerad botten i segjärn enligt svensk standard SS 140717-00. Bränlekanalerna byggs av varmdragna kvadratiske rör, 156x156 mm med 10 mm godstjocklek, i form av en kassett som sedan kringgjuts med segjärn. Avståndet mellan närliggande rör i kassetten är 30 mm. Vikten för en kapsel med bränsle är i BWR utförande cirka 25 ton och PWR utförande cirka 27 ton.

Innerbehållarens uppgift är att bära den yttre lasten i djupförvaret, men också att garantera täthet under förslutningen av kopparhöljet. Denna täthet åstadkoms genom att locket försluts med en bult i centrum med O-ringstättningar i Viton.

Insatsen placeras inuti en ytterkapsel av koppar. För att sammanfoga de båda komponenterna har insatsen en ytterdiameter som är 3,5 mm mindre än kopparkapselns innerdiameter. Med detta spel garanteras en maximal töjning i koppargodset på mindre än 4% när kopparkapseln trycks mot insatsen i samband med att vattentrycket och bentonitens svällningstryck byggs upp /Cakmak/. Detta värde innehålls av kraven på duktilitet hos kopparmaterialet.

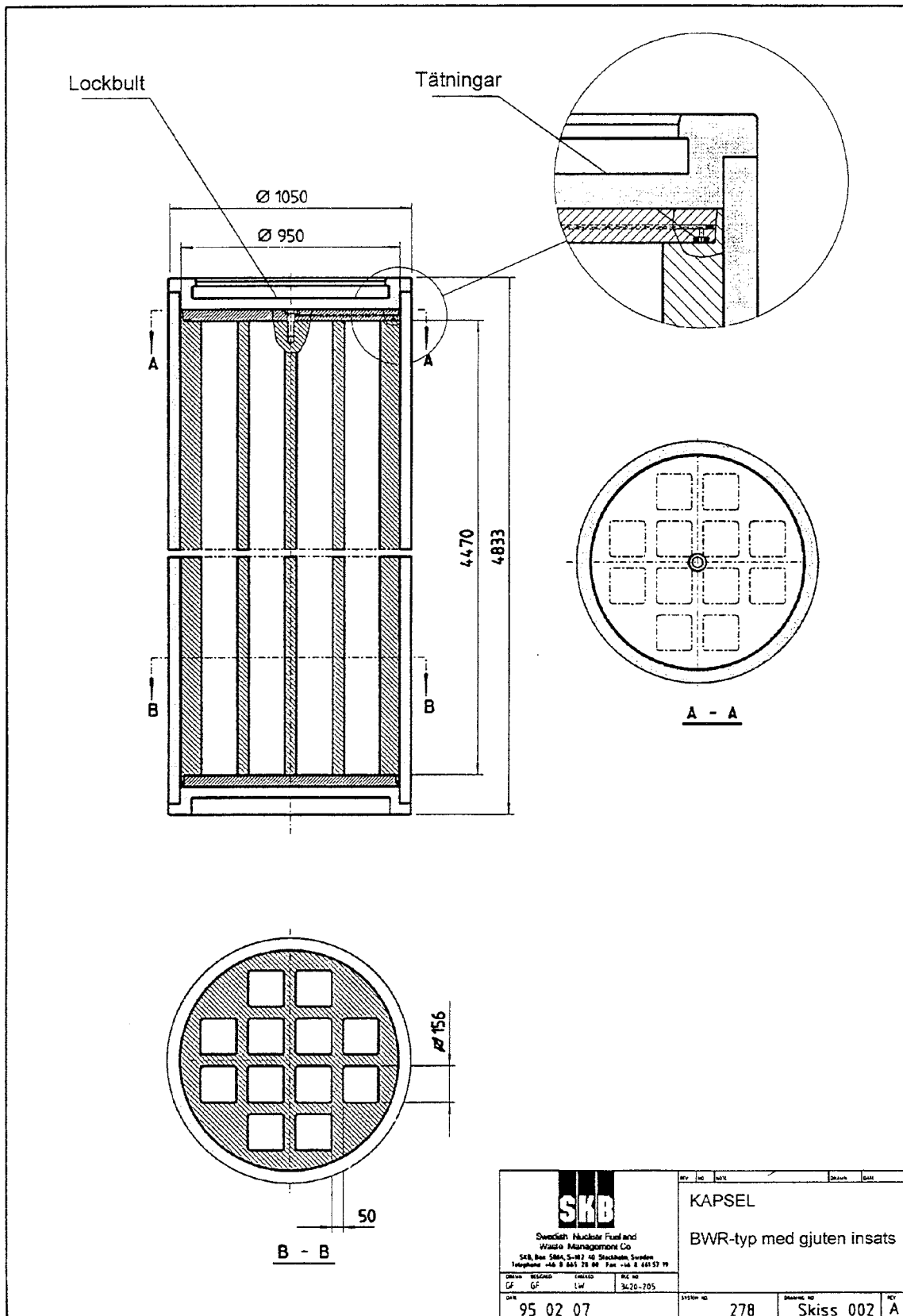
Kopparkapseln tillverkas antingen i form av två rörhalvor formade av valsad plåt, som sedan sammansvetsas med två längsgående svetsar, eller av hel-dragna sömlösa rör. De längsgående svetsarna utförs med konventionell elektronstrålesvetsning.

Utformningen av lock och botten har valts så att möjligheter finns att genomlysas svetsen med röntgen för digital radiografi såväl som för provning med ultraljud. Urtaget i lock och botten gör det möjligt att placera detektorerna för digital röntgen så att fogen kan röntgas i svetsriktningen. Denna utformning gör också att svetsen kommer på ett betryggande avstånd från topp respektive botten på insatsen, som är de områden där de största töjningarna uppstår i kopparkapseln i samband med att fullt vattentryck och svällningstryck utbildas i djupförvaret /Cakmak/.

Utformningen av botten kan möjligen komma i konflikt med kravet att bentonitbufferten skall kunna bära kapseln eftersom det kan vara svårt att

utforma bufferten så att hela bottenytan har stöd av bufferten direkt efter deponering. Tester med provdeponering i Äspölaboratoriet får avgöra om och i så fall hur bottenutformningen skall modifieras.

Urtaget i locket ger också möjlighet att göra en fläns på urtagets insida för lyft och hantering av kapseln efter förslutning i inkapslingsanläggningen och i samband med transporter och hantering till och i djupförvaret. Hållfastheten för lyftflänsen har kontrollberäknats av Lenstad och Kalbantner. Beräkningarna baseras på en kapselvikt på knappt 25 ton som räknats upp med en dynamisk lastfaktor på 1,3 och en faktor på 1,5 för ojämnt fördelad last på lyftdonets lyftfingrar. Beräkningarna visar att lokal plastisk deformation kommer att uppstå. Eftersom locket endast skall belastas ett fåtal gånger bedöms risken för utmattning som liten.



Figur 6-1. Måttskiss av kapsel för använt kärnbränsle. Utförande för 12 BWR element.

REFERENSER

Benjamin, L. A., Hardie, D., Parkins, R. N.

1988

Stress corrosion resistance of pure coppers in groundwaters and sodium nitrite solutions.

Br. Corros. J. 88, 89-95.

Beverskog, B., Puigdomènech, I.

1995.

SITE-94. Revised Pourbaix diagrams for copper at 5-150°C.

Statens Kärnkraftsinspektion SKI Report 95:73.

Blackwood, D. J., Naish, C. C., Rance, A. P.

1995

Further research on corrosion aspects of the Advanced Cold Process Canister.

SKB Inkappling, Projektrapport 95-05.

Bäckblom, G.

1996

Preliminär utformning av djupförvarets närområde.

SKB Djupförvar Arbetsrapport AR D-96-011.

Börgesson, L.

1992

Interaction between rock, bentonite buffer and canister. FEM calculations of some mechanical effects on the canister in different disposal concepts.

SKB Technical Report 92-30.

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 Inkappling Projekt PM 98-3420-33

Cakmak, E.

1995

Beräkningar av maximal töjning i kopparbehållare för slutförvaring av utbränt kärnbränsle.

SKB Projekt Inkappling Projekt PM 95-3420-01

Efraimson, H.

1996

Kriticitetsberäkningar och parameterstudier för slutförvarskapsel med insats.
SKB Inkapsling Projekt PM 96-3430-06.

Ekberg, M.

1995

Lagringsbehållare för utbränt kärnbränsle, kollapstryck hos gjuten cylinder.
SKB Inkapsling Projekt PM 95-4320-11.

Henderson, P. J., Österberg, J-O., Ivarsson, B.

1992

Low temperature creep of copper intended for nuclear waste containers.
SKB Technical Report TR 92-04.

Henderson, P. J., Sandström, R.

1997

Low temperature creep ductility of OFHC copper.
Materials Science and Engineering, A246, 143-150.

Henderson, P. J., Werme, L.

1996

Creep testing of copper for radwaste canisters.
EUROMAT 96 "Materials and Nuclear Power, Bournemouth.

Henshaw, J.

1994

Modelling of nitric acid production in the Advanced Cold Process canister
due to irradiation of moist air.
SKB Technical Report 94-15.

Håkansson, R.

1995

Dosratsberäkningar för kapsel med använt kärnbränsle.
Studsvik Nuclear AB Arbetsrapport N(R)-95/026.

Håkansson, R.

1996

Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle.

Studsvik Nuclear AB Arbetsrapport N(R)-96/079.

KBS-3 Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt Kärnbränsle - KBS-3.

1983

SKBF/KBS 1983.

King, F.

1996

A copper container corrosion model for the in-room emplacement of used CANDU fuel.

Atomic Energy of Canada Limited, report AECL-11552, COG-96-105.

Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp,

1978

Copper as canister material for unprocessed nuclear waste - evaluation with respect to corrosion.

KBS Teknisk Rapport 90.

Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

1983

Corrosion resistance of a copper canister for nuclear fuel.

SKBF/KBS Technical Report 83-26.

Lenstad, T., Kalbantner, P.

1996

Hållfasthetsberäkning av Cu-lock.

SKB Projekt Inkappling Projekt PM 96-3420-15

Lindblom, J., Henderson, P., Seitisleam, F.

1995

Creep testing of oxygen-free phosphorous copper and extrapolation of results.

Swedish Institute for Metals Research Report IM-3197.

Lundgren, K.

1997

Kontroll av strålskärmsberäkningar för kopparkapsel.

ALARA Engineering Rapport 97-0028R.

Marsh, G. P.

1990

A preliminary assessment of the advanced cold process canister.
Harwell Laboratory, AEA Industrial Technology, Report AEA-InTec-0011.

Mattsson, H., Olefjord, I.

1990

Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay. I. The oxide growth.

Werkstoffe und Korrosion 41, 383-390.

Mattsson, H., Changhai Li, Olefjord, I.

1990

Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay - II. The structure of the oxide.

Werkstoffe und Korrosion 41, 578-584.

Mattsson, E.

1997

Utvändig korrosion hos kopparkapslar i avvaktan på slutförvar och under slutförvarets inledningskede.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM 97-3420-22.

Motamedi, M., Karnland, O., Pedersen, K.

1996

Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite.

FEMS Microbiology Letters 141, 83-87.

Pedersen, K., Motamedi, M., Karnland, O.

1995.

Survival of bacteria in nuclear waste buffer materials. The influence of nutrients, temperature and water activity.

SKB Technical report 95-27.

Pettersson, S.

1997

Underlag för slutligt val av kapseldimension.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM 97-3420-27

Reed, D.T., van Konynenburg, R.A.

1991

Effect of ionizing radiation on the waste package environment.

High Level Waste Management II, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 1396-1403.

Reed, D.T., van Konynenburg, R.A.

1991b

Progress in evaluating the corrosion of candidate HLW container metals in irradiated air-steam mixtures.

Proceedings Nuclear Waste Packaging, Focus '91, American Nuclear Society, La Grange Park, IL, 185-192.

Rosborg, B., Svensson, B-M.

1994

Spänningskorrosionsprovning av koppar i syntetiskt grundvatten.

Studsvik Material AB, Report, Studsvik/M-94/73.

Savås, L.

1993

Canister for nuclear waste disposal. Preliminary design of the steel cylinder. SKB Arbetsrapport 93-38.

Sundberg, R.

1997

Influence of impurities in oxygen free copper.

SKB Inkapsling, Projekt PM 98-3420-32.

Takuno, N., Yazima, K., Mae, Y., Ishida, N.

1996

The analysis of grain boundary segregation of sulphur in commercially-pure coppers.

J. Japan Copper and Brass Res. Assn. 35, 204-210.

Werme, L., Sellin, P., Kjellbert, N.

1992

Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects. SKB Technical report 92-26.

Werme, L., Eriksson, J.

1995

Copper canister with cast inner component. Amendment to project on Alternative Systems Study (PASS), SKB TR 93-04.

SKB Technical Report 95-02.

Wersin, P., Spahiu, K., Bruno, J.

1994 A

Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions in a HLW repository.

SKB Technical Report 94-02.

Wersin, P., Spahiu, K., Bruno, J.

1994 B

Kinetic modelling of bentonite-canister interaction. Long-term predictions of copper canister corrosion under oxic and anoxic conditions.

SKB Technical Report 94-25.

BILAGA 1: KONSTRUKTIONSUUNDERLAG FÖR KAPSEL

R. Pusch och L. Börgesson
Clay Technology AB

ALLMÄNT

Fyra faktorer påverkar spänningarna i kapslarna och därmed kapselutformningen:

1. Hydrostatiskt tryck under glaciala förhållanden.
2. Bentonitens svällningstryck som kan vara ojämnt på grund av ojämn bevätning.
3. Trycktillskott p.g.a. bergförskjutningar utmed sprickplan.
4. Trycktillskott p.g.a. krypinducerad minskning av deponeringshållet.

HYDROSTATISKT TRYCK

Vattentrycket byggs sannolikt upp till fullt piezometriskt tryck inom några tiotals år efter förslutningen. Deponering på maximalt 700 m djup ger som högst ett tryck på 7 MPa.

Glaciation kan inom den kommande 100 000-årsperioden ge en landstjocklek av ca 3 km. Djupa sprickor kan nå ned till underytan på isen som kan vara separerad från markytan. Sammanhängande vattenpelare med en höjd av 3,7 km kan därför utbildas till förvarsdjupet 0,7 km, där vattentrycket därför kan bli 37 MPa.

BENTONITENS SVÄLLNINGSTRYCK

Svällningstryckets storlek

Svällningstrycket från bufferten är en funktion av portalet (eller torrdensiteten) och vattenmättnadsgraden. Svällningstrycket når inte sitt maximum förrän vid full vattenmättnad. Svällningstrycket vid full vattenmättnad har beräknats för följande tre fall:

1) Högsta möjliga densitet (lägsta portal) efter utsvällning i spalter under förutsättning att pressningen gjorts under fördelaktigast förhållande för att uppnå hög densitet. Om pressning görs med cirka 500 MPa och naturlig vattenkvot på MX-80 ($w = 10\%$) kan ett portal av cirka $e = 0,38$ förmodligen uppnås (extrapolerat från mätvärden rapporterade av Johannesson et al (1995)). Sådana block placeras runt kapseln med 10 mm spalt till kapseln och 50 mm spalt till berget. Den senare spalten fylls med pellets med samma portal till en "pelletsporositet" av $n = 0,25$. Detta ger följande medelvärden, vilka beräknats från mätvärden rapporterade av Börgesson et al (1995):

$$e = 0,451$$

$$\rho_d = 1920 \text{ kg/m}^3 \text{ (torrdensitet)}$$

$$\rho_m = 2230 \text{ kg/m}^3 \text{ (densitet vid vattenmättnad)}$$

$$s \approx 100 \text{ MPa (svällningstryck)}$$

Utsvällningen uppåt har antagits vara liten eftersom detta antagande ger högst svällningstryck. Dessa värden ligger förmodligen på gränsen för vad som är tekniskt möjligt.

2) Samma som 1) men med pressning till hög vattenmättnad. Pressningen har antagits ske med 500 MPa vid $w = 17\%$. $e = 0,5$ kan förväntas uppnås. Detta ger följande medelvärden:

$$e = 0,577$$

$$\rho_d = 1760 \text{ kg/m}^3 \text{ (torrdensitet)}$$

$$\rho_m = 2130 \text{ kg/m}^3 \text{ (densitet vid vattenmättnad)}$$

$$s \approx 30 \text{ MPa (svällningstryck)}$$

3) Pressningen har gjorts med standardtrycket 100 MPa vid $w = 17\%$ till hög vattenmättnad. $e = 0,57$ kan förväntas uppnås i block och pellets under dessa omständigheter. Pelletsporositeten antas vara $n = 0,33$. Detta ger följande medelvärden:

$$e = 0,678$$

$$\rho_d = 1660 \text{ kg/m}^3 \text{ (torrdensitet)}$$

$$\rho_m = 2060 \text{ kg/m}^3 \text{ (densitet vid vattenmättnad)}$$

$$s \approx 13 \text{ MPa (svällningstryck)}$$

4) Om 7 MPa antas vara dimensionerande svällningstryck erhålls följande medelvärden efter utsvällning och homogenisering:

$$e = 0,75$$

$$\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3 \text{ (torrdensitet)}$$

$$\rho_m = 2020 \text{ kg/m}^3 \text{ (densitet vid vattenmättnad)}$$

Dessa medelvärden kräver antingen att blocken pressas till lägre ursprunglig torrdensitet, vilket kan åstadkommas genom att lägre presstryck används, eller att blocken görs mindre, vilket lämpligen kan åstadkommas genom att diametern minskas.

Svällningstryckets jämnhet

En preliminär slutsats från pågående undersökning av borrhövar från TBM-tunneln i Äspö visar att riklig finsprickighet utbildas till ca 5 mm djup från ytan samt att enskilda flera centimeter långa sprickor utbildas parallellt med och mer eller mindre vinkelrätt mot hålväggen. Den hydrauliska konduktiviteten hos berget intill 5 mm avstånd från fria ytan kan uppskattas vara minst två storleksordningar högre än hos den ostörda kristallmatrisen. Denna ytliga zon kan därför i bästa fall antas fungera som fördelare av vatten som förs fram från omgivande berg till deponeringshålen via någon av de få större hydrauliskt aktiva diskontinuiteterna som förutsätts genomskära varje deponeringshål. Denna hypotes stöds åtminstone delvis av iakttagelsen från Stripa Buffer Mass Test där den yttre delen av bentonitbufferten i sex hål med 0,76 m diameter och 3 m djup, och med olika tillgång till vatten, hade mycket jämn och hög vattenkvot. Däremot varierade vattenkvoten i den inre delen mycket mellan hålen.

Processen vid bevätning kan beskrivas på följande sätt. När grundvattnetrycket börjar byggas upp efter anbringandet av kapsel och buffert tränger vatten in via de mest konduktiva sprickorna som skär hålen. Bentoniten mätas snabbt vid spricköppningarna och blockerar dessa. Här byggs vattentrycket upp och tvingar tillkommande vatten att strömma i sidled runt hålen i den ytliga störda zonen eftersom strömningsmotståndet är lägst här. Vattnet tränger lättast fram i de borrhövargenererade, enskilda sprickorna där bufferten beväts, sväller och tätar. Det tvingar i sin tur vattnet att söka sig fram genom de många fina fissurerna i den borrhövarstörda zonen och fram till buffertkontakten. I fissurer med mindre vidd än ca 150 μm tränger buffertlera inte in och de fungerar därför fortlöpande som ledare för vatten till bufferten. Däremot råder det en osäkerhet om hur samverkan mellan buffert och berg är om vattentillrinningen till den störda zonen är låg.

Trots att svällningstrycket av dessa skäl förväntas bli jämnt uppbyggt finns det osäkerheter i hur samverkan är och det finns skäl att anta att viss ojämnheter i tryckuppbyggnad kan inträffa. Ojämnheterna kan inträffa dels under vattenmättnadsfasen och dels efter fullständig vattenmättnad.

Under vattenmättnadsfasen

Tre fall bör kontrolleras. Dessa är enkla att beräkna men inte helt relevanta eftersom inspänningsgrad och tryckskillnader är överdrivna. Om kapseln inte klarar dessa fall bör man göra mer kvalificerade studier.

Fall 1: Kapseln fast inspänd i ändytorna och cirka 0,5 m. längs mantelytan närmast ändytorna. En jämnt utbredd horisontell last på 10 MPa längs hela resterande kapselytans ena sida.

Fall 2: Kapseln fritt upplagd längs cirka 0,5 m. av mantelytan närmast ändarna. Samma last som fall 1.

Fall 3: Kapseln fast inspänd i ena ändytan och cirka 1,0 m längs mantelytan närmast denna ändyta. Samma last som fall 1.

Dessa fall inträffar utan vattentryck.

Efter vattenmättnad

Om kapseln är något snedplacerad eller lutande i deponeringshålet eller om berget är ojämnt kan en bestående tryckojämnhet i bufferten finnas även efter vattenmättnad. En sådan uppkommer även p.g.a. buffertens svällning i överdelen på hålet. Tryckojämnhetens maximala storlek är svår att uppskatta. Några fall bör vara dimensionerande och några bör kontrolleras.

Följande fall är dimensionerande:

Fullt svällningstryck på ena sidan av kapselns mantelyta och ändytorna. På andra sidan av mantelytan råder 20% förhöjt svällningstryck längs den centrala halvan och 20 % sänkt svällningstryck längs resterande fjärdedelar.

Fullt svällningstryck runt nedre halvan av kapseln. 20% lägre svällningstryck mot övre halvan. Den resulterande uppåtriktade kraften, som uppkommer av skillnaderna i tryck mot kapselns ändytor, balanseras av en skjuvkraft längs nedre halva mantelytan.

Dessa fall kan råda med fullt vattentryck adderat.

Följande fall bör kontrolleras. Om kapseln inte klarar dessa fall bör man göra mer kvalificerade studier.

- Fullt svällningstryck på ena sidan av kapselns mantelyta och ändytorna. På andra sidan av mantelytan råder 50% förhöjt svällningstryck längs den centrala halvan och 50 % sänkt svällningstryck längs resterande fjärdedelar.
- Fullt svällningstryck runt nedre halvan av kapseln. 50% lägre svällningstryck mot övre halvan. Den resulterande uppåtriktade kraften, som upp-

kommer av skillnaderna i tryck mot kapselns ändytor, balanseras av en skjuvkraft längs nedre halva mantelytan.

Dessa fall råder med fullt vattentryck utan säkerhetsfaktor.

BELASTNING FRÅN FÖRSKJUTNINGAR

Trycktillskottet på buffert och kapsel kan uppkomma som följd av tektonik orsakad av regionala spänningsändringar och glaciation. Tre faktorer avgör storleken på de tryckalstrande förskjutningarna: 1) bergets struktur, speciellt förekomsten av svaghetsplan utmed vilka rörelser kan äga rum, 2) spänningarna som kan tas upp i sådana plan, och 3) energimängden som frigörs av den tektoniska händelsen. Om man uttrycker den sistnämnda i form av jordbävningens magnituder, har följande slutsats dragits. Jordbävningar med magnituden 2-3 är samhöriga med snabba förskjutningar utmed stora sprickzoner av 50-100 mm och med upp till 1,4 m förskjutning vid magnituden 8,3 (Pusch, 1994). Magnituden 5 kan uppskattas ge momentana 200 mm-förskjutningar utmed diskontinuiteter av stora zoner och generera 50 mm-förskjutningar utmed små sprickzoner. Jordbävningar av den sistnämnda storleken bedöms kunna ge en momentan förskjutning av högst 1 mm utmed enskilda sprickplan som man bedömer skall kunna skära deponeringshålen. De nämnda förskjutningarna har beräknats på basis av en generaliserad fraktallik, hierarkisk bergstruktur som liknar den som identifierats på flera platser i Sverige, bl.a. i Finnsjön och Forsmark (Pusch, 1995). Avvikelse från denna strukturtyp förväntas inte innebära stora avvikelser i rörelsehänseende.

Det är sannolikt att upprepade tektoniska händelser ger ackumulerad förskjutning utmed de olika svagheter. Magnituden 5 kan således ge till resultat en förskjutning av 0,0005 till 0,001 m utmed plan som skär igenom deponeringshål. Ett rimligt antagande är därför att frekvensen av skalv med så hög magnitud som 5 är utomordentligt låg, kanske en per 1 000 år. På 10 000 år skulle totala förskjutningen därför inte bli större än 0,01 m och på 100 000 år ca 0,1 m. Eftersom en glaciation och deglaciation förväntas inträffa efter 10 000 år kommer spänningsfältet då att ändras men de förskjutningar som en nedisningscykel med samma dignitet som den största av de senaste glaciationerna ger kommer inte att vara bestämmande för kapselens design. Sålunda är bedömningen att skjuvrörelser i samband med uppbyggnad av istryck och avlastning vid glaciärs smältning huvudsakligen utbildas utmed brantstående svagheter i berget, vilket innebär obetydlig mekanisk påverkan på kapslarna.

Ett rimligt antagande vid utformning av kapslarna är därför att förskjutning utmed flackt orienterade sprickor som skär genom deponeringshål sammanlagt kan bli 0,1 m under de närmaste tiotusentalen år.

Litostatiskt tryck

Teoretiskt sett kan bergdeformationerna, under det spänningstillstånd som skapas av bergguttaget för att åstadkomma förvaret, bli av betydelse p.g.a. krypning. Det skulle kunna röra sig om upp till 1 cm minskning av diametern hos deponeringshålen på 1000 år (Pusch, 1994). I praktiken kan krypning bara bli betydelsefull om den sker utmed sprickor med betydande utsträckning i eget plan och det bedöms ge mindre deformationer. Slutsatsen är därför att det, under de första 10 000 åren efter förslutning, inte sker någon signifikant förändring av form och storlek hos deponeringshålen. Följaktligen kommer inverkan av litostatiskt tryck på spänningstillståndet i buffert och kapsel att sakna betydelse.

REFERENSER

1. **Pusch R, 1994.** Waste Disposal in Rock. Developments in Geotechnical Engineering, 76. Elsevier Publ. Co.
2. **Pusch R, 1995.** Rock Mechanics on a Geological Base. Developments in Geotechnical Engineering, 77. Elsevier Publ. Co.
3. **Börgesson L., Johannesson L.-E., Sandén T., and Hernelind 1995.** Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models, and finite element application. SKB Technical Report 95-20.
4. **Johannesson L.-E., Börgesson L., and Sandén T. 1995.** Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. SKB Technical Report 95-19.