

**R-06-01**

Huvudrapport

## **Kapsel för använt kärnbränsle**

### **Tillverkning och förslutning**

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-06-01

**Huvudrapport**

# **Kapsel för använt kärnbränsle**

## **Tillverkning och förslutning**

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 huvudrapport sammanfattar den preliminära tekniska dokumentationen för kapseln. Redovisningen utgör det första etappmålet i SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapseln 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*

# Sammanfattning

## ***Kapsel för använt kärnbränsle***

I slutförvaret har kapseln till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen. SKB:s referensutformning för kapseln består av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. Kapseln har en diameter på drygt en meter och den är nästan fem meter lång.

## ***Kvalificering av tillverkning, förslutning och kontroll***

SKB angav i handlingsplanen /SKB 2004a/ att ett program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar ska redovisas i samband med ansökan enligt kärntekniklagen om Clab och inkapslingsanläggningen. Arbetet har resulterat i ett program som övergripande beskriver förutsättningar och de olika stegen vid genomförandet av erforderliga kvalificeringar. Programmet beskriver hur SKB kommer att använda kvalificeringar av leverantörer och processer som ett led i att säkerställa att det framtida produktionssystemet producerar kapslar som uppfyller ställda krav. När det gäller omhändertagande av myndighetskrav beskrivs detta på en principiell nivå i programmet eftersom det vid utarbetandet av programmet inte funnits något fastlagt regelverk för kvalificeringarna. Arbetet med framtagning av en kontrollordning anpassad för kapseln har pågått parallellt vid SKI och SKB kommer att anpassa kvalificeringsprogrammet till dessa.

Den tekniska dokumentation som utgör underlag för kvalificeringarna syftar till att härleda de krav som måste ställas på de leverantörer och processer som ingår i produktionssystemet och precisera dessa i form av specificerade uppgifter.

Det första etappmålet i kvalificeringsprogrammet är att i preliminär form presentera en sådan teknisk dokumentation för systemet för tillverkning och förslutning av kapslar under 2006. Dokumentationen, omfattar denna sammanfattande huvudrapport och sex underlagsrapporter. Huvudrapporten beskriver de övergripande sammanhangen och logiken i dokumentationen medan underlagsrapporterna omfattar:

- Förutsättningar för den preliminära tekniska dokumentationen
  - Konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006a/ redovisar de krav som ställs på kapseln samt dess utformning och är en utgångspunkt för utformningen av produktionssystemet.
  - Programmet för kvalificering /SKB 2006f/ anger förutsättningar för och identifierar mål och milstolpar för implementering och kvalificering av produktionssystemet.
- Den preliminära tekniska dokumentationen
  - Beskrivning av tillverkningsmetoder i produktionssystemet, kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkning samt kapselfabriken /SKB 2006b/.
  - Beskrivning av svetstekniken vid förslutning av kapseln samt bakgrunden till valet av referensmetod för svetsning /SKB 2006c/.
  - Beskrivning av provningstekniken för kvalitetskontroll av förslutnings- och botten-svetsen /SKB 2006e/.
  - Beskrivning av provningstekniken för kvalitetskontroll av kapselns komponenter /SKB 2006d/.

Den dokumentation som SKB nu lägger fram ger en bas för framtagningen av den dokumentation som erfordras inför ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret, även om den primärt är framtagen som ett första steg i att ta fram underlag för de framtida kvalificeringarna. Avseende förslutningsteknik är dokumentationen mera fullständig än för andra delar av produktionssystemet där mycket arbete pågår och planeras för att komplettera underlagen. Detta framgår av de handlingsplaner som presenteras.

### ***Krav på kapseln och konstruktionsförutsättningar***

Arbetet med konstruktionsförutsättningarna är en pågående aktivitet som syftar till att identifiera de krav som ställs på kapseln och omsätta dessa i krav på konstruktion, tillverkning och kontroll. Det principiella arbetssättet är att identifiera dimensionerande processer i slutförvaret samt dimensionerande händelser under driftfasen. Utgående från dessa redovisas undersökningarna och kontrollberäkningarna för kapselns mekaniska och kemiska integritet samt härledbara utformnings- och materialkrav. Den viktigaste och mest komplexa delen av konstruktionsförutsättningarna behandlar den långsiktiga säkerheten i slutförvaret. Det faktum att arbetet med säkerhetsanalysen SR-Can pågår medför att konstruktionsförutsättningarna inte på ett helt konsekvent sätt behandlar alla aspekter och olika scenarier som tas upp i där.

Inför ansökan 2009 och den redovisning av de tekniska underlag som är planerad till 2012 enligt kvalificeringsprogrammet /SKB 2006f/ återstår en del arbete. SKB:s handlingsplan för konstruktionsförutsättningarna för kapseln omfattar fortsatta grundläggande materialfrågor, hållfasthetsberäkningar och skadetålighetsanalyser samt förbättring av strukturen i konstruktionsförutsättningarna och kompletteringar föranledda av säkerhetsanalysen.

### ***Produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar***

Produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar omfattar hela kedjan från framställning av koppargöt och komponenter till färdig och försluten kapsel. SKB:s referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar omfattar ett nätverk av leverantörer som tillverkar kapselkomponenterna och en kapselfabrik där slutbearbetning, slutlig kvalitetskontroll med oförstörande provning och montering av komponenterna till kapslar utförs. De kapselkomponenter som ska tillverkas är: kopparrör, kopparlock och kopparbotten, insats av segjärn samt insatslock av stål. Produktionssystemet har delats in i tre delsystem; delsystem koppar, delsystem insats och delsystem förslutning.

De övergripande kraven på produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar, härledda ur bland annat konstruktionsförutsättningar för delsystem kapsel i slutförvaret utgör utgångspunkter för att specificera produktionssystemets uppgifter, erforderliga funktioner och förmågor i form av teknik, kvalitet hos producerade kapslar, tillförlitlighet samt kapacitet och varaktighet. Dessutom ska alla kärntekniska krav avseende kvalitet, kontrollordning, kvalificering etc uppfyllas.

Metoder och system för att tillverka och kontrollera kapselkomponenterna finns och referensmetoder har valts. I dag provtillverkas kapselkomponenter hos leverantörer som är certifierade för ISO 9001 och ISO 9002. Att de kopparkomponenter som tillverkas uppfyller kvalitetskrav ställda i konstruktionsförutsättningarna och SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning har demonstrerats medan motsvarande demonstration för insatserna kommer att genomföras under 2007.

Förslutning och svetsning av botten görs med friction stir weldning (FSW). Den valda referensmetoden ger bra materialegenskaper och låg sannolikhet för att få avvikelser, så kallade diskontinuiteter, i svetsgodset. En studie av tillförlitligheten hos svetsprocessen har genomförts som visar att den minsta intakta koppartjockleken i någon svets förväntas vara 4 cm vid svetsning av 4 500 kapslar. Arbete med att ytterligare förbättra tekniken fortgår. Även tillförlitligheten vid kvalitetskontrollen med oförstörande provning av svetsarna visar hög tillförlitlighet. Den sammantagna tillförlitligheten i delsystem förslutning i inkapslingsanläggningen bedöms vara mycket hög.

Motsvarande studie av tillförlitligheten vid tillverkning av kopparkomponenter respektive insatser kommer att genomföras inför nästa säkerhetsanalys.

Det finns ingenting i dag som tyder på att produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar inte kommer att kunna uppfylla slutförvarssystemets krav på kapacitet och varaktighet, dvs att tillverka en kapsel per dag under lång tid.

### ***Handlingslinje***

Arbetet med att identifiera alla krav på systemet för tillverkning och förslutning av kapslar och presentera nuvarande kunskapsläge på ett systematiskt sätt har varit en bra utgångspunkt för att identifiera behov av fortsatt utveckling och demonstration. De handlingslinjer som presenteras omfattar arbete, med att förfina och förbättra vissa delar av styrning och kontroll av tillverkningsprocesserna, till exempel vid gjutning av insatser. System för svetsning av botten på liggande kapsel ska tas fram och demonstreras och vissa förbättringar av till exempel verktyget som används vid FSW planeras. När det gäller oförstörande provning av kapselkomponenter återstår en hel del arbete både med metodutveckling, provningskonfigurationer och tillförlitlighetsstudier. Detta har i huvudsak genomförts för provning av svetsar där arbetet kommer att inriktas på optimering och framtagning av specifikationer.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	11
1.1	Bakgrund	11
1.2	Produktion av kapslar	12
1.3	Denna rapport	14
<b>2</b>	<b>Förutsättningar</b>	17
2.1	SKB:s plan för slutförvaring av använt kärnbränsle	17
2.2	Kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar	17
2.2.1	Kvalificeringsprogram	18
2.3	Krav på kapseln	19
2.3.1	Systematisk kravhantering	20
2.3.2	Kravhantering avseende kapseln	20
<b>3</b>	<b>Konstruktionsförutsättningar för kapseln</b>	21
3.1	Funktionskrav och övriga krav på kapseln	21
3.2	Utformning av kapseln	22
3.2.1	Innesluta bränslet	23
3.2.2	Kemisk beständighet	23
3.2.3	Mekanisk beständighet	24
3.2.4	Säkerställa att kriticitet inte uppstår	27
3.2.5	Liten påverkan på övriga barriärer	27
3.3	Parametrar i slutförvaret som påverkar kapseln	28
3.4	Hantering	28
3.4.1	Hantering vid tillverkning, inkapsling, transporter och deponering	29
3.4.2	Skador hos den förslutna kapseln	30
3.5	Referenskapseln – sammanfattning	30
3.6	Handlingslinje	33
<b>4</b>	<b>Produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar</b>	35
4.1	Inledning	35
4.2	Krav på produktionssystemet	35
4.3	Utformning av produktionssystemet	36
4.3.1	Produktionssystemets delsystem	37
4.3.2	Kapsel fabriken	38
<b>5</b>	<b>Delsystem insats</b>	41
5.1	Krav på delsystem insats	41
5.2	Teknik	41
5.2.1	Tillverkning	41
5.2.2	Oförstörande provning	42
5.3	Kvalitet vid provtillverkning	43
5.4	Tillförlitlighet	44
5.5	Kapacitet vid serieproduktion	45
5.6	Kvalificering	45
5.7	Uppföljning av krav på delsystem insats	45
<b>6</b>	<b>Delsystem koppars</b>	47
6.1	Krav på delsystem koppars	47

6.2	Teknik	48
6.2.1	Tillverkning	48
6.2.2	Oförstörande provning	50
6.3	Kvalitet vid provtillverkning	51
6.4	Tillförlitlighet	53
6.5	Kapacitet vid serieproduktion	53
6.6	Kvalificering	54
6.7	Uppföljning av krav på delsystem koppar	54
<b>7</b>	<b>Delsystem förslutning</b>	<b>57</b>
7.1	Krav på delsystem förslutning	57
7.2	Referensmetod för svetsning av koppar	57
7.3	Teknik	59
7.3.1	Svetsning med FSW	59
7.3.2	Oförstörande provning	61
7.4	Kvalitet i svetsgodset	62
7.5	Tillförlitlighet	63
7.6	Kapacitet vid serieproduktion	64
7.7	Kvalificering	65
7.8	Uppföljning av krav på delsystem förslutning	66
<b>8</b>	<b>Kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning</b>	<b>67</b>
8.1	Beskrivning av ledningssystemet	67
<b>9</b>	<b>Handlingslinje</b>	<b>69</b>
9.1	Delsystem insats	69
9.2	Delsystem koppar	71
9.3	Delsystem förslutning	73
<b>10</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>75</b>
<b>11</b>	<b>Referenser</b>	<b>77</b>



# 1 Inledning

SKB angav i handlingsplanen /SKB 2004a/ att ett program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar ska redovisas i samband med ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen.

Det första etappmålet i programmet, mitten av 2006, är att presentera den preliminära tekniska dokumentationen av systemet tillverkning och förslutning av kapslar. Den preliminära tekniska 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.

Redovisningen omfattar denna huvudrapport samt sex underlagsrapporter. Huvudrapport för en sammanhållen redovisning av hur kapseln planeras att utformas, tillverkas, förslutas och kontrolleras för att uppfylla ställda krav. Underlagsrapporterna behandlar konstruktionsförutsättningar för kapseln, tillverknings-, svets- och provningsteknik samt miljö- och kvalitetsstyrning av kapseltillverkningen.

## 1.1 Bakgrund

### ***KBS-3-metoden***

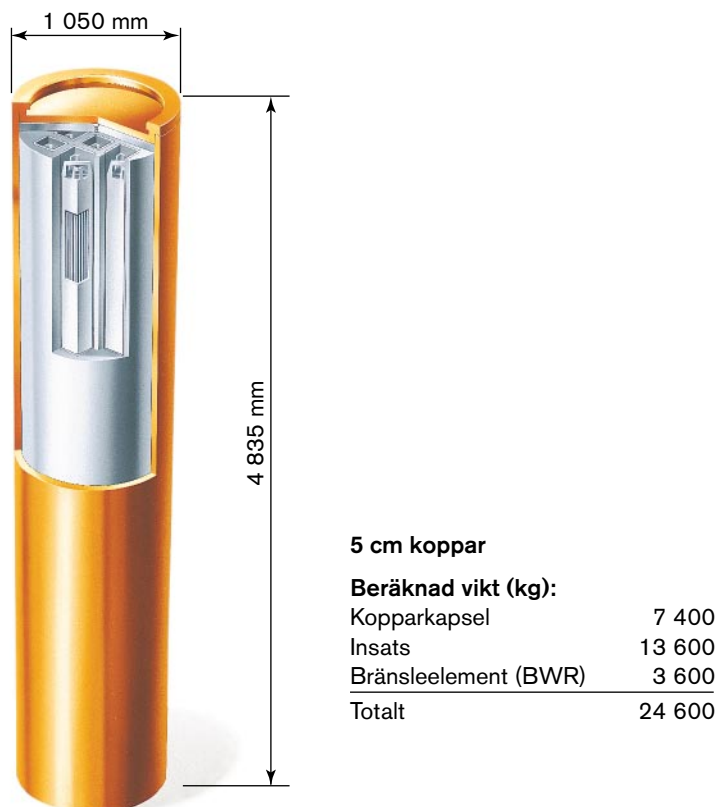
Slutförvaret för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden utformas för långsiktigt säker förvaring. Metoden innebär att det använda kärnbränslet kapslas in i lastbärande och vattentäta kapslar. Kapslarna deponeras i kristallint berg på 400–700 meters djup och omges av en buffert som hindrar vattenflöde och skyddar kapseln. Efter deponering återfylls de bergrum som krävs för deponeringen.

I den stegvisa utformningen av KBS-3-systemet använder SKB begreppet referensutformning. Med det avses den aktuella utformningen av systemet och dess delar. Referensutformningen uppdateras stegvis, allt eftersom resultaten från forskning, teknikutveckling och säkerhetsanalys blir tillgängliga.

### ***Kapseln för använt kärnbränsle***

I slutförvaret har kapseln till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen. SKB:s referensutformning för kapseln består av en yttre korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. Kapseln har en diameter på drygt en meter och den är nästan fem meter lång, se figur 1-1. Fylld med BWR-element väger den 25 ton och fylld med PWR-element 27 ton.

Säker hantering vid inkapsling och deponering samt säker förvaring av bränslet i slutförvaret utgör konstruktionsförutsättningar för kapseln.



**Figur 1-1.** Kapsel för använt kärnbränsle. Kapseln består av ett ytterhölje av koppar och en insats av segjärn för BWR-element.

## 1.2 Produktion av kapslar

För att leverera kapslar för deponering i slutförvaret krävs ett system för tillverkning av kapslar och en inkapslingsanläggning där kapslarna fylls med använt kärnbränsle och försluts. Utvecklingen av produktionssystemet utgår från teknik som har förutsättningar att med god tillförlitlighet leverera kapslar enligt specifikation avseende utformning och material.

Inför en framtida driftssituation ställs krav på kvalificering av leverantörer, processer och system som kommer att ingå i produktionssystemet. Kraven som ställs är spårbara till myndighetskrav och SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning. Programmet för kvalificering av tillverkning och förslutning /SKB 2006f/ beskriver det långsiktiga arbetet med att bygga upp förutsättningar för att genomföra kvalificeringar.

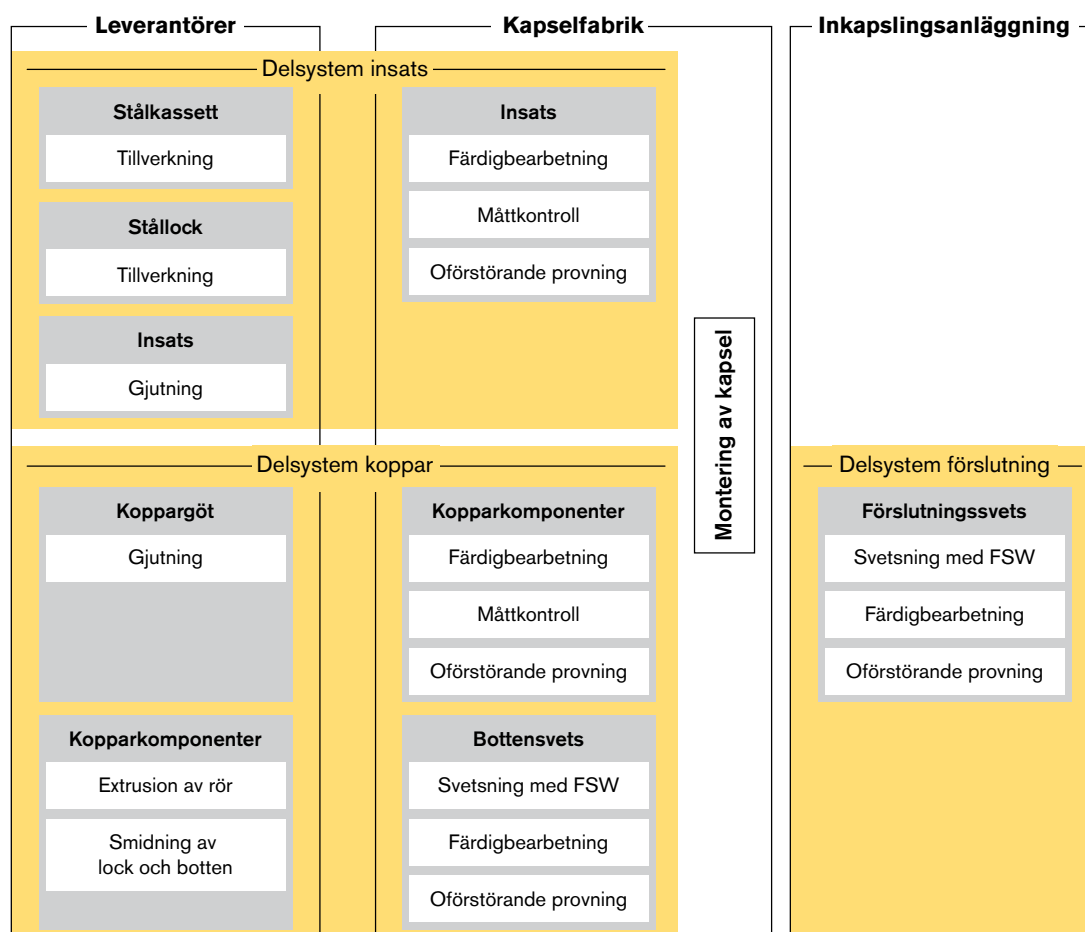
SKB:s referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapseln omfattar de metoder, system och processer som i dagsläget bedöms kunna användas för att producera kapslar som uppfyller ställda krav.

Referensutformningen av produktionssystemet, se figur 1-2, omfattar:

- Leverantörer som tillverkar koppargöt.
- Leverantörer som tillverkar kapselns kopparkomponenter – kopparrör, kopparlock och kopparbotten.
- Gjuterier som tillverkar insatser i segjärn.
- En kapselfabrik där svetsning av kopparbotten, slutbearbetning, kontroll och montering av kapseln sker.
- En inkapslingsanläggning där förslutning och kontroll av svetsen görs.

Tillverkningsmetoderna i referensutformningen är:

- Gjutning av insatsen i segjärn.
- Gjutning av koppargöt.
- Extrusion av kopparrör.
- Smidning av lock och botten.
- Svetsning av botten med friction stir welding (FSW).
- Förslutning av kapseln med FSW.



**Figur 1-2.** Referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar. Figuren visar tre delsystem; delsystem koppar, delsystem insats och delsystem förslutning (gula rutor), samt de huvudsakliga processerna som ingår i respektive delsystem (vita rutor). Heldragna linjer markerar leverantörer, kapselfabrik respektive inkapslingsanläggning.

## 1.3 Denna rapport

Denna rapport är huvudrapport för en sammanhållen redovisning av hur kapseln utformas, tillverkas, försluts och kontrolleras för att uppfylla ställda krav. Redovisningen utgör den preliminära tekniska dokumentationen inom ramen för SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar och omfattar beskrivningar av de metoder som ingår i referensutformningen av produktionssystemet. Referensutformningen bedöms kunna användas för att tillverka en kapsel som uppfyller ställda krav. Vidare redovisas utvecklingsläget samt planerna för fortsatt utveckling av de system och processer som används vid tillverkning av kapselkomponenter, svetsning av lock och bottenar samt vid oförstörande provning.

Hela dokumentationen, se figur 1-3, omfattar denna sammanfattande huvudrapport och sex underlagsrapporter. Huvudrapporten beskriver de övergripande sammanhangen och logiken i dokumentationen medan underlagsrapporterna omfattar:

### Förutsättningar för den preliminära tekniska dokumentationen

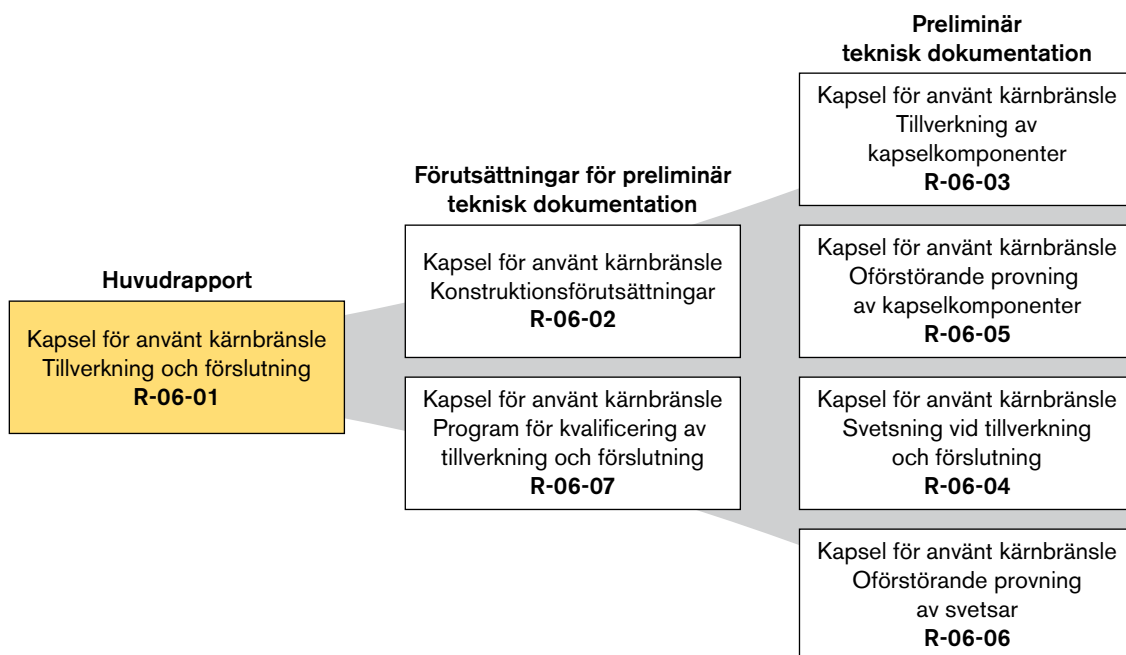
- Konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006a/ redovisar de krav som ställs på kapseln samt dess utformning och är en utgångspunkt för utformningen av produktionssystemet för kapslar.
- Program för kvalificering /SKB 2006f/ anger förutsättningar för och identifierar mål och milstolpar för implementering och kvalificering av produktionssystemet.

### Den preliminära tekniska dokumentation

- Beskrivning av tillverkningsmetoder i produktionssystemet, kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkning samt kapselfabriken /SKB 2006b/.
- Beskrivning av svetstekniken vid förslutning och svetsning av kopparbotten samt bakgrunden till valet av referensmetod för svetsning /SKB 2006c/.
- Beskrivning av provningstekniken för kvalitetskontroll av kapselns komponenter /SKB 2006d/.
- Beskrivning av provningstekniken för kvalitetskontroll av förslutnings- och botten-svetsen /SKB 2006e/.

Redovisningen av den preliminära tekniska dokumentationen har följande struktur:

- Identifikation av krav som ställs på system och processer. Viktiga krav härleds huvudsakligen från konstruktionsförutsättningarna och kvalificeringsprogrammet.
- Tekniska beskrivningar av system och processer.
- Utvärdering av om de ställda kraven är uppfyllda.
- Presentation av handlingslinjer för att uppfylla krav och förutsättningar.



*Figur 1-3. Rapporter i Projekt Dokap. Denna huvudrapport är gulmarkerad.*

## 2 Förutsättningar

### 2.1 SKB:s plan för slutförvaring av använt kärnbränsle

SKB:s mål är att ta i drift ett system för slutförvaring av använt kärnbränsle omkring år 2017. Innan systemet kan tas i drift ska två kärntekniska anläggningar, en inkapslingsanläggning samt ett slutförvar uppföras.

I SKB:s förslag på upplägg för prövningen /SKB 2006j/ är följande milstolpar av speciellt intresse:

2006 SKB lämnar in ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen.

2009 SKB lämnar in ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret. SKB lämnar också in ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för slutförvarssystemet.

### 2.2 Kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar

En förutsättning för att SKB ska få drifttillstånd för framtida inkapslings- och slutförvarsanläggning är att leverantörer, system och processer för tillverkning och förslutning av kapslarna kan visas uppfylla ställda krav vilket sker genom kvalificering.

SKB:s program för kvalificering /SKB 2006f/ av leverantörer, processer och system vid tillverkning och förslutning av kapslar beskriver det långsiktiga arbetet med att bygga upp förutsättningar för och genomföra kvalificeringar. När det gäller omhändertagande av myndighetskrav är programmet skrivet på en principiell nivå eftersom det i dagsläget inte finns något fastlagt regelverk för hur kvalificeringarna ska gå till. SKI har utarbetat ett regelverk i form av en kontrollordning anpassad för kapseln. SKB:s kvalificeringsprogram kommer att anpassas efter detta.

Med ”kvalificering” avses i programmet även kvalificering av leverantörer. Definitionen lyder ”Undersökning och demonstration som visar att en *leverantör*, person eller provnings-, bearbetnings- eller sammanfogningsprocess kan uppfylla sina specificerade uppgifter”. Detta är en utvidgning i jämförelse med definitionen enligt SKIFS 2005:2 /SKI 2005a/ vilken är en av utgångspunkterna för programmet, (se avsnitt 2.2.1).

Syftet med kvalificering är att visa att de leverantörer, system och processer som avses att användas uppfyller ställda krav vilket innebär att dokumentationen av kravbild och kravuppfyllelsen ska granskas. Dessutom kan praktiska demonstrationer ingå som en del av kvalificeringen. I ett tidigt skede är det därför viktigt att klargöra vilka krav som ställs på kapseln samt vilka krav som ställs på tillverkningen, förslutningen och kontrollerna. Kvalificering av produktionssystemets delar är därför en viktig del i arbetet med att säkerställa att de kapslar som tillverkas och försluts uppfyller de krav som ges av konstruktionsförutsättningarna.

## 2.2.1 Kvalificeringsprogram

Målet med kvalificeringsprogrammet är att säkerställa att erforderliga kvalificeringar av produktionssystemet genomförs. Kvalificeringarna ska vara genomförda vid en tidpunkt som innebär att inga förseningar uppstår vid drifttagning av slutförvarssystemet.

SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar /SKB 2006f/ har som utgångspunkt det regelverk som finns i dagsläget:

- SKI:s föreskrifter som omfattar återkommande kontroller med oförstörande provning av mekaniska anordningar i vissa kärntekniska anläggningar /SKI 2005a/.
- SKI:s föreskrifter som omfattar kvalificering av svetsning i vissa kärntekniska anläggningar /SKI 2005a/.
- Föreskrivna kvalificeringar i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005a/. Det finns rutiner för kvalificering av tillverkningsprocesser (KT0602), oförstörande provning (KT0605) samt leverantörer (KT0603).

Hänsyn måste tas till att författningarna inom kärnkraftsområdet har utarbetats för återkommande kontroller och därmed inte är anpassade till ett tillverkningssystem. Lämpliga delar och strukturer kommer dock med fördel att kunna tillämpas i detta sammanhang, vilket SKI har påpekat.

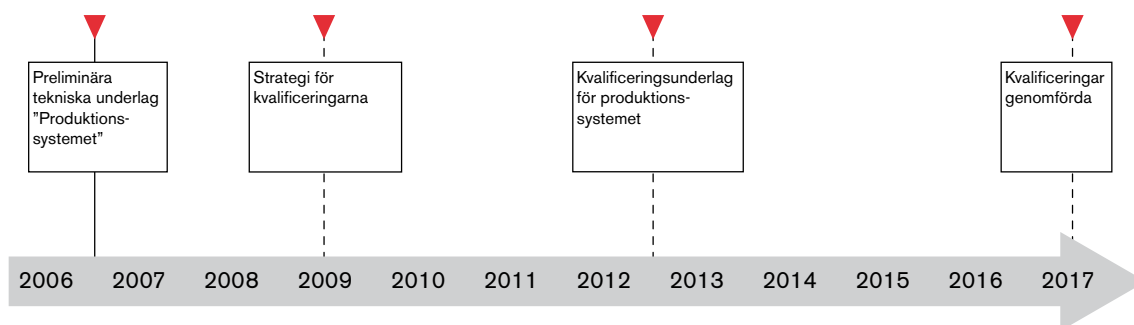
I de regelverk som i nuläget finns används olika kvalificeringsordningar för olika typer av processer. Kvalificeringsordningen beskriver den formella ordningen och ansvarsförhållanden vid en kvalificering. SKB har använt följande indelning av processer i sitt kvalificeringsprogram:

- tillverkningsprocesser,
- svetsning och
- oförstörande provning.

I programmet beskrivs hur urvalet av vilka system och processer som ska kvalificeras ska gå till, hur kvalificeringsmål och acceptanskriterier ska tas fram samt hur kopplingen till säkerhetsanalysen av slutförvaret säkerställs. Vidare beskrivs den stegvisa utveckling där tekniska underlag baserade på utvecklingsarbete, undersökningar och erfarenheter successivt sammanställs och redovisas vid olika tidpunkter.

Programmet utgår från, men är inte begränsat till, den referensutförning som SKB valt för tillverkning och förslutning samt provning. Referensutförningen anger den utförning av produktionssystemet avseende, leverantörer, processer och system som i dagsläget bedöms kunna användas för att producera kapslar som uppfyller ställda krav. SKB bedriver i många fall utveckling av kompletterande eller alternativa metoder som också kan bli aktuella i framtiden. Det finns även alternativa lösningar avseende verksamheten som ska bedrivas i kapselfabriken.

Viktiga etappmål för kvalificeringarna inom inkapslingsteknik har identifierats, se figur 2-1. Tids- och aktivitetsplaner för genomförandet av kvalificeringsprogrammet anpassas till dessa etappmål.



**Figur 2-1.** Etappmål i programmet för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapseln för använt kärnbränsle.

**Etappmål 1 (år 2006)** innebär att SKB redovisar:

- Preliminära konstruktionsförutsättningar för kapseln och preliminära specifikationer för tillverkning, förslutning och kontroll.
- Tekniska underlag för kapselmaterial och processer för tillverkning och förslutning samt kontroll.
- Handlingslinjer för utveckling av produktionssystemet samt preliminär kvalificeringsomfattning.

*Kommentar:* Redovisningen sker i denna huvudrapport och i de underlagsrapporter som tagits fram inom projekt Dokap /SKB 2006a–f/ i samband med ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen.

**Etappmål 2 (år 2009)** innebär att SKB presenterar strategin för kvalificeringarna. Strategin beskriver det angreppssätt som kommer att användas vid kvalificeringarna och även omfattningen av dessa. Vid denna tidpunkt redovisas även hur SKB avser att hantera organisatoriska frågor och kvalitetsfrågor med bäring på kvalificeringarna samt hur kvalificeringsunderlagen kommer att struktureras.

**Etappmål 3 (år 2012)** innebär att SKB redovisar kvalificeringsunderlagen. Viktiga dokument är konstruktionsförutsättningar och tekniska specifikationer för kapseln, samt underlagen för de processer som ingår i produktionssystemet. SKI har angett att en delredovisning av denna punkt måste ske vid ansökan enligt kärntekniklagen respektive miljöbalken för slutförvaret. Förutom de underlag som lämnas vid ansökan behövs kompletteringar för att fylla kraven som underlag för kvalificering.

**Slutmål (år 2017)** innebär att de kvalificeringar som krävs för att kunna få drifttillstånd för inkapslingsanläggningen och slutförvaret är genomförda.

## 2.3 Krav på kapseln

Det är viktigt att ange krav och fastställa vilka övriga förutsättningar som gäller för kapseln och systemet för att tillverka, försluta och kontrollera den.

Säker hantering under inkapsling och deponering samt säker förvaring av bränslet i slutförvaret utgör konstruktionsförutsättningar för kapseln.



### 2.3.1 Systematisk kravhantering

SKB håller på att utveckla metodik, rutiner och en databas för att strukturera och dokumentera krav och övriga konstruktionsförutsättningar för slutförvaret. Databasen är ett verktyg för att fastställa och dokumentera krav och restriktioner.

### 2.3.2 Kravhantering avseende kapseln

Det är primärt krav relaterade till den långsiktiga säkerheten i slutförvaret och krav på säker hantering vid inkapsling och deponering som utgör konstruktionsförutsättningar, se kapitel 3. Tillsammans med krav på till exempel kapacitet och varaktighet utgör konstruktionsförutsättningarna också grunden för de krav som ställs på produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapseln, se avsnitt 4.2. Kapseln är dessutom i vissa fall konstruktionsbestämmande för de system som används vid hantering och deponering.

#### **Dokumentation**

SKB:s dokumentation av hur kraven på kapseln bryts ner och detaljeras i konstruktionsförutsättningar och i processspecifikationer för tillverkning av kapslar är omfattande och är i dagsläget utspridd i ett flertal rapporter. En sammanfattande beskrivning av dokumentationen som utgör underlag för utformningen av kapseln och produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapseln ges nedan. Dokumentationen kommer att uppdateras vid följande tillfällen:

- 2009 Ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaret.
- 2012 SKB redovisar kvalificeringsunderlagen för SKI /SKB 2006f/.
- 2015 SKB lämnar tekniska motiveringar /SKB 2006f/.

**Processrapporter** /SKB 2006gh/ beskriver de processer som är relevanta för slutförvarets långsiktiga utveckling och funktion. Rapporten är en underlagsrapport till säkerhetsredovisningen för slutförvaret. Processbeskrivningarna omfattar processer i slutförvaret och dess barriärer och delar men också processer i berget som beror av utbyggnaden av slutförvaret. En **klimatrapport** /SKB 2006i/ beskriver, på motsvarande sätt de klimat och geologiska förändringar som påverkar eller kan komma att påverka slutförvarets funktion och utveckling. Utgående från dessa redovisningar kan de processer och klimat- och geologiska förändringar som kan komma att påverka kapselns funktion i slutförvaret att identifieras. Genom att beakta dessa processer eller förändringarna vid utarbetandet av de detaljerade konstruktionsförutsättningarna för kapseln säkerställs att kunskap om slutförvarets utveckling tillvaratas i utformningen av kapseln.

I **konstruktionsförutsättningarna för kapseln** /SKB 2006a/ sammanställs funktionskrav och övriga krav på kapseln, se kapitel 3. I rapporten görs en genomgång av de processer som förväntas påverka kapseln i slutförvaret och detaljerade krav avseende utförande och material härleds. Dessutom görs en genomgång av belastningarna på kapseln vid hantering vid inkapsling och deponering.

**SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning** /SKB 2005a/, se kapitel 8, omfattar tekniska specifikationer och ritningar på kapseln och dess komponenter och används vid provtillverkning av kapslar. De tekniska specifikationerna utgör styrande underlag för tillverkningen av kapselkomponenter. I de tekniska specifikationerna anges bland annat material och dimensioner samt provnings- och verifikationsmetoder.

### 3 Konstruktionsförutsättningar för kapseln

Kraven på långsiktig säkerhet efter förslutning utgör grunden för utformningen av slutförvaret och dess delar inklusive kapseln. I säkerhetsanalysen SR-Can redovisas processer i slutförvaret som kan påverka kapseln /SKB 2006g/ och de som utgör en viktig utgångspunkt för konstruktionsförutsättningarna för kapseln.

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 de mekaniska och kemiska belastningarna på kapseln i slutförvaret. SKB har utarbetat en ny version av konstruktionsförutsättningarna för kapseln (KFK) /SKB 2006b/ i samband med redovisningen av den preliminära tekniska dokumentationen inför kvalificeringarna av tillverkning och förslutning av kapseln. Detta kapitel sammanfattar KFK men för referenser hänvisas till /SKB 2006b/. Arbetet med konstruktionsförutsättningarna är en pågående aktivitet för att säkerställa att kapseln uppfyller alla krav. Viktiga syften med KFK är att ta fram specifikationer för kapselns material och utförande men även att ange vilka ytterligare utredningar och analyser som måste göras.

Konstruktionsförutsättningarna behandlar de krav som måste ställas på kapseln för att uppnå säker:

- Förvaring av bränslet i slutförvaret.
- Hantering vid tillverkning, inkapsling, transport och deponering.

Dimensionering av kapseln utgår dels från de dimensionerande situationer dvs händelser som kan inträffa vid tillverkning, inkapsling, transport och deponering av kapseln och dels från de dimensionerande processer som kan inträffa, efter att förvaret förslutits och som påverkar utformning eller specifikationer för kapseln. De dimensionerande processerna bestäms av de dimensionerande scenarier som behandlas i säkerhetsanalysen SR-Can.

Myndighetskraven på konstruktionsförutsättningarna framgår bland annat av SKI:s granskning av Fud-program 2004 /SKI 2005b/ och en utredningsrapport /SKI 2006/. Det kan konstateras att det krävs ytterligare tekniska underlag och strukturering av konstruktionsförutsättningarna innan de kan anses uppfylla myndigheternas krav.

#### 3.1 Funktionskrav och övriga krav på kapseln

I slutförvaret ska kapseln innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen. Av detta följer de övergripande funktionskraven /SKB 2002/ vilka innebär att kapseln ska:

- Innesluta bränslet.
- Vara tät vid deponering.
- Vara kemisk beständig under förvarets livstid.
- Vara mekaniskt beständig under förvarets livstid.
- Ha liten inverkan på övriga barriärer.
- Säkerställa att kriticitet inte uppstår.

Dessutom gäller att Euratoms krav på kärnämneskontroll måste uppfyllas vilket innebär att varje kapsel måste ha en unik identitet. Identiteten ska vara lätt att avläsa, även efter ett eventuellt återtag från slutförvaret, så att kärnämnets faktiska placering entydigt kan identifieras.

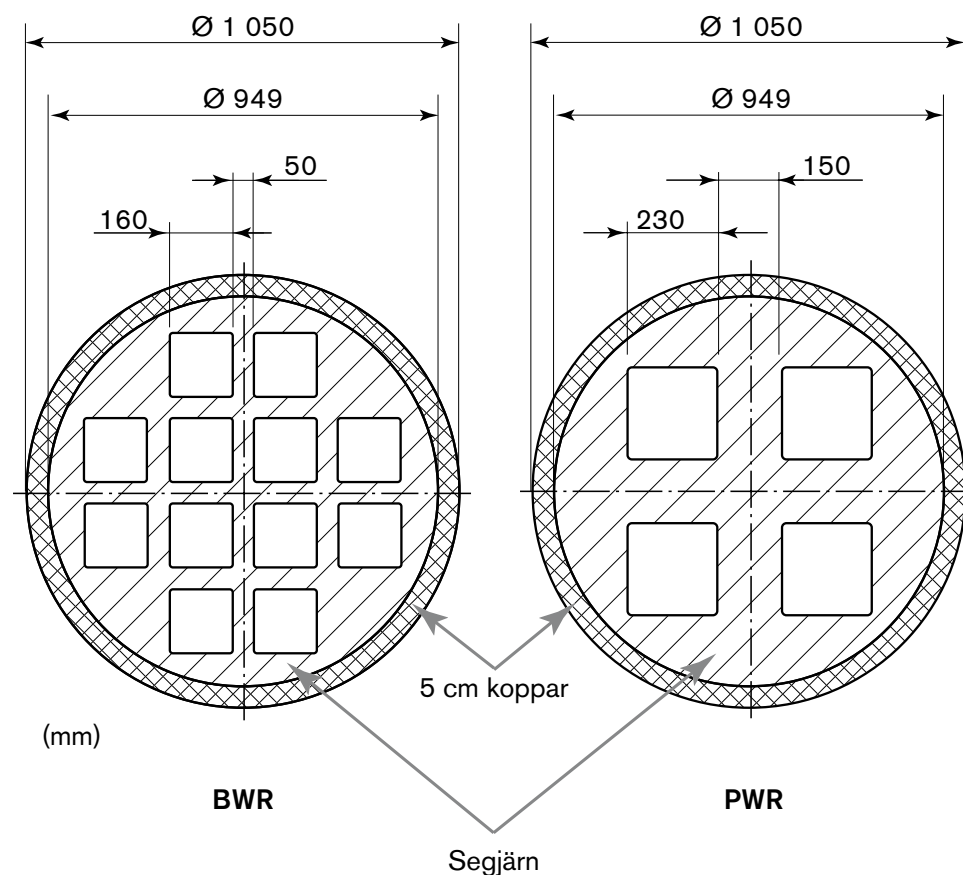
### 3.2 Utformning av kapseln

Den kapsel som utgör SKB:s referenskapsel består av en yttre vattentät och korrosionsbeständig kapsel av koppar och en lastbärande insats av segjärn, se figur 1-1. Kapseln finns i två utformningar en som rymmer 12 BWR-element och en som rymmer 4 PWR-element. Figur 3-1 visar den principiella skillnaden mellan de båda utformningarna. Kapselns detaljutförande finns beskrivet i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005a/.

De funktionskrav som påverkar kapselns utformning och materialval är att kapseln ska:

- Innesluta bränslet.
- Vara kemisk beständig under förvarets livstid.
- Vara mekaniskt beständig under förvarets livstid.
- Säkerställa att kriticitet inte uppstår.

Hur dessa krav beaktas vid utformning av kapselns kopparhölje och insats diskuteras nedan.



Figur 3-1. Principiell skillnad mellan kapsel i BWR- respektive PWR-utförande.

### 3.2.1 Innesluta bränslet

Kapseln ska innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen. Detta innebär att kapseln ska rymma de olika typer av använt kärnbränsle som ingår i det svenska kärnkraftsprogrammet. Bränsleelementens geometri är därför utgångspunkt för att bestämma storleken på kanalerna för bränsleelementen i kapseln.

Dimensionerande för den tillåtna resteffekten i kapseln är krav på kemisk stabilitet i bentonitbufferten. Ett ställt temperaturkrav är bestämmande för inkapslingsprocessen (tillåten resteffekt) men inte för kapselns utformning.

### 3.2.2 Kemisk beständighet

Tre karakteristiska klimattillstånd förväntas förekomma under förvarets livstid som påverkar förutsättningarna för kapselns kemiska beständighet på olika sätt.

Under ett tempererat/borealt tillstånd, dvs den period då klimatet gradvis förändras, är förändringar av strandlinjen den enda process som är av betydelse för grundvattensammansättningen.

Permafrosttillstånd innebär lägre vattenomsättningen än under nuvarande förhållanden. Utfrysning av salt och en låg vattenomsättning kan tillsammans leda till en betydande ökning av salthalten i grundvattnet.

Under ett glacialt tillstånd kommer grundvattenflödet att styras av istäcket och dess utbredning. Detta kommer att driva ner glacialt smältvatten till stora djup. Beräkningar visar att det är möjligt att glacialt smältvatten når förvarsdjup. Beräkningar visar också att bergets redoxbuffrande förmåga gör att endast syrefritt vatten kommer att nå förvarsdjup.

#### **Kopparhöljet**

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 att löst sulfid förekommer.

Grundvattnen på förvarsdjup kommer att vara syrefritt och reducerande utom under driftskedet och under en relativt kort period därefter.

Kapseln är omgiven av kompakterad bentonit. Eftersom bentonit inte innehåller några klorhaltiga mineraler av någon betydelse kommer kloridhalten i grundvattnet att bestämma kloridhalten också i bentonitbufferten. Sulfidhalterna förväntas inte heller bli högre än i grundvattnet och pH-värdet förväntas ligga i intervallet 7–9. Koppar är, även vid de högsta förväntade kloridhalterna, immunt mot korrosion vid de pH-värden som förväntas.

#### **Processer i slutförvaret**

Under den initiala fasen fram till syrefria förhållanden i förvaret sker endast obetydlig aerob korrosion av kopparn motsvarande en avfrätning av 3 µm. Denna process är inte dimensionerande för kapselns utformning.

Efter att syret förbrukats kommer korrosionen (anaerob korrosion) att styras helt av tillförseln av löst sulfid till kapseln. Med den modell som användes i SR-Can beräknas korrosionsangreppet på de mest utsatta delarna på kapseln vara mindre än 6 mm.

I SR-Can diskuteras osäkerheter i modeller, speciellt effekter av bentoniterosion. Slutsatsen är att ytterligare kunskaper krävs kring buffererosion innan dessa osäkerheter kan undanröjas. Anaerob korrosion är en dimensionerande process för kapseln och koppartäckningen måste minst uppgå till 6 mm. De repor och andra geometriska avvikelser i kopparkapselns yta som kan uppstå vid bearbetning eller hantering av kapseln påverkar inte den anaeroba korrosionen. Det finns därför inget skäl att ställa krav på till exempel tillåtet djup hos repor och slagmärken ur korrosionssynpunkt.

För att spänningskorrosion ska kunna ske krävs ett samspel av flera parametrar. De avgörande parametrarna är kemiska förhållandena och dragspänningar i kapselytan. Det är mycket osannolikt att spänningskorrosion skulle kunna förekomma under förvarsförhållanden. Spänningskorrosion är inte en dimensionerande process för kapseln.

Efter vattenmättnad kommer radiolys av vatten nära kapseln att äga rum. Detta leder till krav på begränsning av ytdosraten, vilken har satts till 1 Gy/h. Referenskapslarna (för BWR- respektive PWR-element) uppfyller kravet på ytdosrat.

### **Materialval – korrosion**

Anaerob korrosion är en bestämmande process för valet av kopparkvalitet. Kopparkvalitet ska väljas för att eliminera riskerna för korngränsskorrosion 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 korngränsskorrosion. För att få tillräcklig kemisk beständighet kan syrehalter på upp till 30 ppm tolereras. Samma högsta halter är tillåtna också för aluminium, kobolt, krom och nickel.

Som referensmetod för svetsning har SKB valt friction stir welding (FSW). För FSW kan inga ytterligare krav på kopparkvalitet härledas utöver de som diskuterats ovan. Om FSW utförs i luft kan syrehalten öka i svetsgodset. Det bör framhållas att fortsatt utveckling av FSW pågår och bland annat studeras svetsning i skyddsgas. Små mängder metall från svetsverket 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.

### **Insatsen**

Insatsen kommer att skyddas mot omgivningen av kopparkapseln så länge som detta är tätt. Trots detta kan viss kemisk påverkan på insatsen orsakas av att små mängder vatten som kan följa med bränslet då det kapslas in reagerar med kväve från luft och bildar salpetersyra. Därför utformas insatsen så att luften i insatsen kan bytas ut mot en inert gas till exempel argon. Det är även tänkbart att anaerob järnkorrosion som bildar vätgas uppstår. För att klarlägga om den bildade vätgasen kan påverka kapselmaterialet pågår undersökningar av detta.

### **3.2.3 Mekanisk beständighet**

Kapseln ingår i ett komplext mekaniskt system i slutförvaret. Klimatförändringar på jordytan så som glacialcykler påverkar kapseln både mekaniskt och hydrauliskt. Närmast kapseln finns en kemisk/mechanisk buffert bestående av 35 cm bentonit som orsakar mekaniska påkänningar på kapseln när den sväller.

Den konsekutiva utvecklingen av mekaniska påkänningar på kapseln kan indelas i följande faser:

- vattenmättnadsfasen,
- tempererade-/borealfasen och permafrostfasen,
- glaciala fasen,
- postglaciala fasen.

Vattenmättnadsfasen inträffar relativt direkt efter förslutning av förvaret. Då sker en isostatisk tryckuppbyggnad runt kapseln på grund av ökande grundvattentryck och att bentoniten sväller. Det förväntade grundvattentrycket är direkt kopplat till förvarets djupet. Vatteninflödet i deponeringshålen medför att bentoniten sväller. Det svälltryck som bildas är direkt kopplat till bentonitens densitet.

Efter vattenmättnadsfasen, under tempererade/boreala fasen och permafrostfasen, råder stabila mekaniska förhållanden för kapseln dock kan vissa tryckojämnheter kvarstå efter vattenmättnadsfasen till följd av ojämn svällning av bentoniten och eventuell inverkan från deponeringshålets geometri.

Under den glaciala fasen, vid isbildningen, sker en långsam isostatisk tryckuppbyggnad i förvaret. Denna tryckökning beror av isens tjocklek vilken beror på förvarets geografiska placering och klimatologiska faktorer. Det isostatiska trycket på kapseln blir 45 MPa för Forsmarksfallet och 42 MPa för Laxemar-fallet med det tjockaste istäcke som funnits under de senaste 2 miljoner åren (under Saale-istiden).

Under det postglaciala tillståndet sker en långsam trycksänkning i förvaret tillbaka till de förhållanden som rådde innan den glaciala fasen. När berget avlastas kan, under vissa förhållanden, jordbävningar uppstå som kan påverka kapseln mekaniskt. En jordbävning kan leda till att befintliga sprickor som skär deponeringshål aktiveras och skjuvas. En jordbävning med magnituden 6 orsakar en skjuvrörelse över ett deponeringshål motsvarande 0,1 m.

## **Kopparhöljet**

### **Processer i slutförvaret**

Tryckuppbyggnaden under vattenmättnadsfasen gör att kopparhöljet deformeras och tar stöd mot insatsen. Storleken på de plastiska och/eller kryptöjningar detta ger upphov till beror på storleken på glappet mellan kopparhölje och insats. Tillverkningstoleranserna gör att det radiella glappet uppgår till 1,75 mm. Krypning under vattenmättnadsfasen är en dimensionerande process för kopparmaterialets sammansättning och krypduktiliteten måste uppgå till minst 4 %. Beräkningarna har genomförts av kopparhöljets belastning på grund av ojämn bentonitsvällning. Den inducerade spänningen uppgår till 14,5 MPa att jämföra med sträckgränsen hos koppar på > 45 MPa.

I samband med postglaciala jordbävningar kan skjuvrörelser i deponeringshålet påverka kopparhöljet (plastisk töjning). Efter den initiala plasticeringen sker en återhämtning genom krypning. Beräkningar visar att 0,1 m skjuvning med en skjuvhastighet på 1 m/s och bentonitdensitet på 2 000 kg/m<sup>3</sup> ger en initial plastisk töjning i kopparhöljet på 7 %. En pessimistisk uppskattning av kryptöjningen i kopparhöljet ger resultatet 7,7 %. Skjuvning av deponeringshål är en dimensionerande process för kopparmaterialet som ställer krav på en plastisk töjning på 7 % och en kryptöjning på 7,7 %.

## **Materialval – mekaniska egenskaper**

Resultaten från krypprovningarna visar att modifieringar av sammansättningen hos den syrefria kopparn måste göras för att få tillfredställande krypduktilitet. En tillsats av 30 ppm fosfor ökar krypduktiliteten och kryplivslängden. För den fosforhaltiga kopparen har svavelhalter i intervallet 6 till 12 ppm och kornstorlekar i intervallet 100 till 800 µm ingen mätbar påverkan på krypduktiliteten. Korrosionsprovning har visat att tillsatsen av fosfor inte ökar kopparmaterialets känslighet för korngränskorrosion, varken i grundmaterialet eller i svetsat gods.

Kopparmaterialet ska ha 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. Dessutom ställs krav på vätehalten eftersom väte kan ge upphov till väteförsprödning vid varmformningsprocessernas höga temperaturer.

Utöver grundmaterialet har svetsar utförda med FSW krypprovats. Krypprovningarna har inte visat några större skillnader mellan svetsens och grundmaterialets krypduktilitet och kryplivslängd.

Inga detekterbara skador eller förändringar på kapselmaterialet kommer att uppkomma under kapseln livstid på grund av strålningen från det använda bränslet. Strålningspåverkan på kopparmaterialet kan därför försummas vid dimensionering av kopparhöljet.

## ***Insatsen***

Samtliga faser i förvarets utveckling kommer att ge mekanisk påverkan på insatsen: vattenmättnadsfasen, tempererade/boreala och permafrostfasen, glaciala fasen, samt postglaciala fasen.

## **Processer i slutförvaret**

Bentonitbuffertens egenskaper påverkar belastningen på kapseln. Det finns två parametrar hos bufferten som bestämmer lastöverföringen i olika situationer: svälltrycket och skjuvhållfastheten. Båda dessa är direkt beroende av vattenmättnadsdensiteten hos bufferten.

Bevätningen av bentonitbufferten under vattenmättnadsfasen förväntas ske så att svällningstrycket byggs upp jämnt. Det kan dock inte helt uteslutas att viss ojämnhet erhålls till följd av ojämn bevätning, skillnader i bentonitens densitet eller avvikelser i deponeringshålets geometri.

Det mest ogynnsamma fallet som identifierats under vattenmättnaden innebär att bevätningen sker asymmetriskt så att svälltrycket utvecklas i bufferten vid ena kapseländan och utefter kapselns ena sida vilket ger ett böjmoment på kapseln. Beräkningar visar att bentonitens plastiska egenskaper är begränsande för spänningen i kapseln. Den största böjspänningen i insatsen visar sig ligga under 55 MPa. Denna spänning är övergående då bevätningen av bufferten blir fullständig.

Det går inte att helt uteslutas att bentonitdensiteten varierar, att kapseln är snedplacerad eller lutar i deponeringshålet eller att hålet har en ogynnsam geometri. Även i dessa fall har den högsta böjspänningen, orsakad av densitetsskillnader, pessimistiskt angivits till 55 MPa. Denna spänning betraktas som bestående.

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

De laster som kapseln kommer att utsättas för under glaciationsfasen är sammansatta av det hydrostatiska trycket på förvarsdjup, bentonitens svälltryck och islasten. Kapselns hållfasthet mot det radiellt verkande isostatiska trycket har beräknats, provats experimentellt och en probabilistisk analys av risken för global kapselkollaps med hänsyn till den uppnådda tillverkningskvaliteten hos kapseln har genomförts. Hållfasthetsberäkningar visar att kapseln motstår ett yttre tryck på 110 MPa. Två provtryckningar i isostatpress visade att den globala kollapslasten är  $> 130$  MPa. Den probabilistiska analysen visade att sannolikheten för global kapselkollaps är mycket liten vid 44 MPa ( $2 \cdot 10^{-9}$ ). Kompletterande tredimensionella finita element beräkningar planeras för att utreda vissa tröskelfenomen. Vid den probabilistiska analysen har viktiga parametrar hos kapseln identifierats som ingår i SKB:s specifikationer. Glaciation är en dimensionerande process för kapseln. Det högsta isostatiska trycket som kapseln kan utsättas för har pessimistiskt angivits till 45 MPa.

Den mekaniska påkänningen på kapseln av en skjuvrörelse till följd av postglaciala jordbävningar beror huvudsakligen av buffertens densitet och skjuvplanets läge, men också skjuvhastigheten och storleken hos skjuvrörelsen har signifikant påverkan. Genomförda beräkningar visar att med en buffertdensitet på  $2\,000 \text{ kg/m}^3$  och en skjuvrörelse på 0,1 m är töjningen i insatsen 1,6 %.

### **Materialval – mekaniska egenskaper**

Kapselinsatsen tillverkas av segjärn. Materialet i insatsen ska uppfylla kraven i ”EN 1563 grade EN-GJS-400-15U” (Nummer EN-JS1072, SS 07 17-00).

Insatsens stål-kasset, som åstadkommer kanaler för bränsle elementen, tillverkas av stålplåt enligt ”EN 10025 S355J2G3, SS 14 2172 eller liknande kvalitet med minst samma hållfasthet och duktilitet.

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

### **3.2.4 Säkerställa att kriticitet inte uppstår**

För hantering och slutförvaringen av använt kärnbränsle tillämpas normala kriterier för säkerhet mot kriticitet. Bränslet kommer att förbli underkritiskt med nuvarande utformning på insatsen.

Ett tänkbart tillverkningsfel vid gjutning av insatsen är att mellanväggarna har större avvikelser. Det är av intresse att studera hur sådana avvikelser skulle påverka risken för att kriticitet uppstår. Kompletterande beräkningar kommer därför att genomföras.

### **3.2.5 Liten påverkan på övriga barriärer**

Kapseln får inte påverka slutförvarets flerbarriärsystem. De fall där en påverkan på andra barriärer anses vara möjlig är strålningspåverkan och termisk påverkan på bufferten.



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. Med de begränsningar som ges av resteffekten, kapselns material och geometri erhålls en ytdosrat  $< 1$  Gy/h vilken inte ger någon påverkan på övriga barriärer.

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 flera faktorer så som; resteffekten i bränslet i kapseln, bergets värmeledningsförmåga och avståndet mellan kapslarna i deponeringstunnlarna.

### **3.3 Parametrar i slutförvaret som påverkar kapseln**

SKB:s utvecklingsstrategi utgår från en referensutformning för slutförvarssystemet. Referensutformningen definierar alla väsentliga delar och parametrar i systemet. Genom en successiv kunskapsuppbyggnad detaljeras och underbyggs referensutformningen och toleranserna för olika parametrar kan minskas. I nuvarande läge finns två alternativa platser för slutförvaret med t ex olika geologi. Detta medför att toleranserna i parametrarna för kapseln måste täcka förutsättningarna på båda platserna.

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

Viktiga parametrar i slutförvarssystemet som påverkar de dimensionerande processerna för kapseln finns angivna i tabell 3-1.

### **3.4 Hantering**

Kapseln konstrueras och dimensioneras så att det är möjligt att säkert lyfta och hantera den vid tillverkning, inkapsling, transporter och deponering samt vid ett eventuellt återtag. Kapselns lock är försett med en lyftfläns som är utformad och dimensionerad för lyft med ett specialverktyg.

Gränsvärden för tillåtna belastningar på kapseln under transport kommer att fastställas innanför ramen för transportbehållarens säkerhetsredovisning.

Kapseln dimensioneras inte för de extrema påfrestningar som kan uppstå i samband med missöden under drifttiden. Tre fall av missöden i inkapslingsanläggningen har undersökts och resultaten 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.

**Tabell 3-1. Naturliga och tekniska systemparametrar i slutförvaret som är viktiga för kapseln.**

Parametrar i slutförvarssystemet	Påverkan på kapseln	Parametrar för kapseln
<b>Naturliga</b>		
Geografisk placering – tjocklek på isen	Isostatiskt tryck under glaciation	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under glaciationsfasen
Förvarsdjup	Isostatiskt tryck efter vattenmättnad	Tryckhållfasthet
Vatteninflöde	Tid för vattenmättnad, belastning under vattenmättnadsfasen, varaktighet av belastning under vattenmättnadsfasen	Varaktighet av spänningstillstånd kopparhölje och insats under vattenmättnadsfasen.
Hydraulisk konduktivitet	Möjlig påverkan på korrosionsprocessen genom påverkan på vattenkemi och/eller att bentoniten delvis kan föras bort	Koppartjocklek
Bergspänningar	Risk för "spalling" ger påverkan på hålgeometrin	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen.
Sprickförekomst frekvens och storleksfördelning	Risk för skjuvning vid postglaciala jordbävningar	Skjuvbelastning på kapseln
<b>Tekniska</b>		
Borrteknik (deponeringshål)	Hålgeometri	Spänningstillstånd insats och kopparhölje under och efter vattenmättnadsfasen
Variation i vattenmättnadsdensitet hos bentoniten	Bestående tryckojämnheter	Spänningstillståndet hos kapseln efter vattenmättnadsfasen
Värde på vattenmättnadsdensiteten hos bentoniten	Bentonitens plastiska egenskaper	Spänningstillståndet hos kapseln under vattenmättnadsfasen
	Bentonitens svälltryck, isostatiskt tryck efter vattenmättnad	Spänningstillstånd hos kapseln efter vattenmättnadsfasen
	Bentonitens svälltryck, isostatiskt tryck under glaciation	Spänningstillstånd hos kapseln under glaciationsfasen
	Bentonitens plastiska egenskaper, lastöverföring vid postglacial jordbävning	Spänningstillståndet vid jordbävning Plastisk töjning i kopparhöljet
	Bentonitens krypegenskaper, lastöverföring efter postglacial jordbävning	Spänningstillståndet i insatsen Spänningstillståndet efter postglacial skjuvning Krypttöjning i kopparhöljet Relaxationen av spänningar i insatsen

### 3.4.1 Hantering vid tillverkning, inkapsling, transporter och deponering

Det övergripande kravet är att kapseln och dess delar ska tillverkas och hanteras så att de uppfyller de krav som anges i konstruktionsförutsättningarna när de lämnar kapselfabriken. De specifikationer som säkerställer detta anges i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkningen /SKB 2005a/.

I den planerade verksamheten i inkapslingsanläggningen kommer kapseln att lyftas två gånger 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 tillämplbara kärntekniska normer har genomförts. Resultaten visar att lyftsäkerheten för kapseln har mycket stora marginaler och att upp till 100 lyft kan ske utan risk.

Hantering, inkapsling, transport och deponering av kapseln 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 hanteringssäkerhet och efterföljande processteg.

### **3.4.2 Skador hos den förslutna kapseln**

Hanteringsskador i den färdig kapsels kopparhöljet kommer att kunna förekomma. Hanteringsskador kan bestå av ojämnheter i kopparytan och/eller kallbearbetningseffekter i materialet. Vid extrema belastningsfall som tappad kapsel kan dock även insatsen skadas.

#### ***Hanteringssäkerhet***

Försök som har genomförts för att bestämma de brottmekaniska egenskaperna hos koppar visar att materialet är ytterst okänsligt för sprickanvisningar även om det förekommer ytskador. Vid extremt djupa repor i tangentiell riktning kan dock lyftsäkerheten påverkas. En utredning om kapselns lyftsäkerhet visar att en 10 mm djup runtomgående skada i svetsen är acceptabel ur lyftsäkerhetssynpunkt. Samma kriterium kan konservativt tillämpas för övriga delar av kopparhöljet. Det bör dock påpekas att all utvärdering av skador måste ske med hänsyn tagen till andra samverkande diskontinuiteter.

Skador av typen deformationer ger kallbearbetningseffekter vilket innebär minskad brottöjning i materialet men också ökad hårdhet och brottgräns (deformationshårdnade). Generellt sätt påverkas inte lyftsäkerheten om inte materialet blir så kraftigt plasticerat att godset blir förtunnat. För denna typ av skador kan kriteriet att tillåta skador med upp till 10 mm djup konservativt tillämpas.

#### ***Långsiktig säkerhet***

Förekomsten av skador påverkar inte korrosionen av koppar. Kravet på en minsta koppar-täckning på 6 mm är därför dimensionerande för tillåtna skador ur korrosionssynpunkt.

Det faktum att koppars brottmekaniska egenskaper är ytterst okänsligt för sprickanvisningar betyder att begränsade lokala skador inte påverkar kopparhöljets mekaniska integritet. Dock är det av intresse att studera om krypduktiliteten påverkas av plasticeringar. Sådana försök planeras.

## **3.5 Referenskapseln – sammanfattning**

Kraven avseende kapselns utförande och material anges i konstruktionsförutsättningarna där också utgångsmaterialet för kopparhöljet och segjärnet specificeras. Därutöver måste tillägg göras till dessa krav för att uppnå tillräckliga mekaniska egenskaper eller tillverknings- och provningsbarhet.

Utgångsmaterialet som valts för tillverkning av kopparhöljet är ren syrefri koppar som uppfyller standarden EN 1976, Cu-OFE (tabell 3-2) eller Cu-OF1 (tabell 3-3).

**Tabell 3-2. Kemisk sammansättning hos koppar, EN 1976 Cu-OFE.**

Element	Cu	Ag	As	Fe	S	Sb	Se	Te	Pb
	%	ppm <sup>b)→</sup>							
	99,99 <sup>a)</sup>	25	5	10	15	4	3	2	5
Element	P	Bi	Cd	Mn	Hg	Ni	O	Sn	Zn
	ppm <sup>b)→</sup>								
	3	1	1	0,5	1	10	5	2	1

a) Including Ag.

b) Maximum content.

**Tabell 3-3. Kemisk sammansättning hos koppar, EN133/63 Cu-OF1.**

Element	Cu	Ag	As	Fe	S	Sb	Se	Te	Pb
	remaining	ppm→							
		25 <sup>b)</sup>	5 <sup>c)</sup>	10 <sup>d)</sup>	15 <sup>b)</sup>	4 <sup>b)</sup>	2 <sup>e)</sup>	2 <sup>f)</sup>	5 <sup>b)</sup>

a) Inklusive Ag.

b) Max innehåll.

c) Summa av As+Cd+Cr+Mn+Sb ≤ 15 ppm.

d) Summa av Co+Fe+Ni+Si+Sn+Zn ≤ 20 ppm.

e) Summa av Bi+Se+Te ≤ 3 ppm.

f) Summa av Se+Te ≤ 3,0 ppm.

Tilläggskrav i konstruktionsförutsättningarna, relativt de krav som anges i standarden, avser halterna av svavel (S) och fosfor (P) och ställs för att uppnå tillräckliga mekaniska egenskaper hos kopparhöljet. Ytterligare ett tilläggskrav måste ställas på låg vätehalt för att eliminera risken för väteförsprödning under värmebehandling. Krav på låg syrehalt i koppargötet ställs för att svetsning med EBW ska vara möjlig. Standardens krav på tillåtna halter av vissa metaller (Cr, Co, Al, Ni) ger nödvändig marginal för att säkerställer att korrosionsegenskaperna hos höljet tillgodoses även om en viss förhöjning av halterna kan erhållas i svetgodset vid svetsning med FSW.

När det gäller tillåten kornstorlek kan kravet behöva skärpas, utöver vad som föreskrivs i konstruktionsförutsättningarna, för att tillgodose provbarhet med ultraljud. Arbete pågår för att specificera detta krav.

För att ha marginaler till konstruktionsförutsättningarnas krav är generellt sett kraven i SKB:s specifikationer /SKB 2005a/ strängare än i konstruktionsförutsättningarna, se tabell 3-4.

SKB har valt att tillverka insatsen i segjärn. För att insatsen ska ha de mekaniska egenskaper, hållfasthet och duktilitet, som är nödvändiga ska materialet i insatsen uppfylla de krav som ges i den europeiska standarden EN 1563 grade EN-GJS-400-15U.

En sammanställning av kraven på materialen kapselkomponenterna ges i tabell 3-5 och 3-6.

**Tabell 3-4. Krav på kopparhöljet i konstruktionsförutsättningar samt krav ställda på svetsgods, kapselkomponenter och koppargöt.**

Krav i konstruktionsförutsättningar – kopparhölje	Svetsgods	Kapselkomponent	Koppargöt
Cr < 30 ppm	Cr < 30 ppm	KTS001 /SKB 2005a/	KTS001 /SKB 2005a/
Co < 30 ppm	Co < 30 ppm	KTS001	KTS001
Al < 30 ppm	Al < 30 ppm	KTS001	KTS001
Ni < 30 ppm	Ni < 30 ppm	KTS001	KTS001
O < 30 ppm	O < 30 ppm		O < 5 ppm
S < 12 ppm			S < 8 ppm
30 < P < 100 ppm	30 < P < 100 ppm	H < 0,6 ppm	30 < P < 70 ppm H < 0,6 ppm
Kornstorlek < 800 µm	Ev tilläggskrav för OFP	Kornstorlek < 360 µm, KTS002 Ev tilläggskrav för OFP	
Duktilitet > 30 %	Duktilitet > 30 %	> 40 % (100 °C)	
Krypduktilitet > 8 % *	Krypduktilitet > 8 %	Krypduktilitet > 8 % (20–100 °C)	

\* Krypning kan ske under vattenmättnad samt vid postglacial skjuvning. Angivet värde gäller vid postglacial skjuvning.

**Tabell 3-5. Sammanställning av konstruktionsförutsättningar samt detaljerade krav på segjärnsinsatsen.**

Funktionkrav	Krav angivna i konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006a/	Övriga relaterade krav samt kommentarer
Innesluta bränslet	Insatsen ska rymma 12 BWR- eller 4 PWR-bränsleelement.  Kanalrörens mått måste minst uppgå till: BWR: 150×150 mm. PWR: 230×230 mm.	Teknisk specifikation KTS011 /SKB 2005a/. Ritningsändring på PWR insatsen pågår.  Insatsrörens mått kontrolleras med tolk: BWR: 152×152 mm. PWR: ändring utreds.
Kemisk beständighet	Atmosfären i insatsen ska kunna bytas till > 90 % ädelgas.	Insatsen och stållocket utformas för atmosfärsbyte.
Mekanisk hållfasthet	Insatsen ska motstå påkänningar under vattenmättnadsfasen, bestående belastningar på grund av ojämnt svälltryck i deponeringshålet, isostatiska laster under glaciation samt påkänningar i samband med postglaciala jordbävningar.  Dimensionerande är ett yttre övertryck på 45 MPa.	Teknisk specifikation KTS011 /SKB 2005a/ anger följande standard: EN 1563 grade EN-GJS-400-15U. Materialstruktur/nodularitet: form V och VI (80 %). Sträckgräns: min 240 MPa (20 °C), Brottgräns: min 370 MPa. Brottöjning: min 11 % (vidgjutna provstavar), min 7 % (provstavar från insatsen). Excentricitet hos kassetten < 5 mm. Hörnradier 15–25 mm.
Försumbar inverkan på övriga barriärer och bränslet	Materialtjocklek enligt referenskapseln.	Kontrollberäkningar visar att referenskapseln innehåller detta krav.
Kriticitet	Insatsen utformas så att den även efter vatteninträngning uppfyller kriterier för säkerhet mot kriticitet.	Kontrollberäkningar visar att referenskapseln innehåller detta krav.
Provbarhet	Ska uppfylla krav på provningsbarhet med oförstörande provning av eventuella diskontinuiteter i godset.	Krav på ytfinhet, stagplåtar i kassetten och materialstruktur/nodularitet är under utredning.

**Tabell 3-6. Sammanställning av konstruktionsförutsättningar samt detaljerade krav för kopparkomponenter och svetsar.**

Funktionkrav	Krav angivna i konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006a/	Övriga relaterade krav samt kommentarer
Kemisk beständighet	Min 6 mm intakt koppartjocklek. Materialsammansättning: Kopparmaterial i kapseln ska uppfylla specifikation för ren koppar med låg syrehalt. Tillåtna föroreningshalter i färdig kopparkomponent: Cr < 30 ppm Co < 30 ppm Al < 30 ppm Ni < 30 ppm O < 30 ppm.	För att innehålla konstruktionsförutsättningarna väljs standardmaterial som uppfyller följande specifikationer: EN 1976 Cu-OFE (UNS C10100) eller EN 1976 Cu-OF1 med tilläggskrav enligt KTS001: O < 5 ppm.
Mekanisk beständighet	Mekaniska egenskaper hos koppar: Duktilitet: > 30 %. Krypduktilitet: > 8 %, leder till krav på Kornstorlek: < 800 µm.  Tilläggskrav: P = 30–100 ppm S < 12 ppm	I KTS002* anges följande krav avseende färdig komponent: Duktilitet > 40 %. Krypduktilitet > 10 %. Mikrostruktur med kornstorlek < 360 µm.  Tilläggskrav enligt KTS001: P = 30–70 ppm (krypduktilitet) S < 8 ppm (svavelutskiljning) H < 0,6 ppm (väteförspredning vid varmformning).  * Kraven i KTS överstiger motsvarande i konstruktionsförutsättningarna och kravet på kornstorlek är under utredning (rörprovbarhet med ultraljud).
Försumbar inverkan på övriga barriärer och bränslet	Materialtjocklek enligt referenskapseln.	
Transporteras, deponeras och i övrigt hanteras på ett säkert sätt	Koppartjocklek: erforderlig tjocklek för tillräcklig lyftsäkerhet. Kopparhöljet ska var tillverkningsbart och att ställda krav uppfylls ska kunna verifieras.	Lyftsäkerheten för kapsel med 4 cm koppartjocklek är kontrollberäknad.
Provbarhet	Ska uppfylla krav på provningsbarhet med oförstörande provning av eventuella diskontinuiteter i godset.	Speciellt avses ultraljuddämpning i materialet och ytfinhet. Specifikationer för mikrostruktur (t ex kornstorlek) och ytfinhet utreds.  Kontroll med OFP, rengöring: eventuella krav på ytfinhet är under utredning.

### 3.6 Handlingslinje

För att utarbeta de slutliga konstruktionsförutsättningarna för kapsel återstår en del arbete. Underlagen måste struktureras och kompletteras så att de innehåller den information som krävs för att säkerställa kapselns funktion och tillgodose myndigheternas behov vid granskning.

Det nära sambandet mellan konstruktionsförutsättningarna och säkerhetsanalysen och det faktum att arbetet med säkerhetsanalysen SR-Can pågår medför att konstruktionsförutsättningarna inte fullständigt behandlar alla aspekter från säkerhetsanalysen.

Ett annat område där konstruktionsförutsättningar inte är fullständiga rör acceptanskrav för olika variabler. Vissa av kraven är specificerade men arbete med att ta fram kompletteringar pågår. Konstruktionsförutsättningarna ger alltså idag inte fullständiga underlag för materialval och detaljerad dimensionering av kapseln. I konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006a/ finns en handlingslinje för hur underlagen för kapseln kommer att kompletteras eller förfinas. Handlingslinjen omfattar huvudsakligen frågor som rör material och hållfasthet.

## 4 Produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar

### 4.1 Inledning

Utvecklingen av teknik och metoder för att tillverka kopparkapslar har bedrivits av SKB under lång tid i enlighet med de Fud-program som presenteras vart tredje år. De synpunkter som myndigheter och andra intressenter lämnar på dessa program beaktas i planeringen av utvecklingsarbetet.

### 4.2 Krav på produktionssystemet

De övergripande kraven på produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar, härledda ur bland konstruktionsförutsättningar för delsystem kapsel i slutförvaret utgör utgångspunkter för att specificera produktionssystemets uppgifter, erforderliga funktioner och förmågor i form av teknik, kvalitet hos producerade kapslar, tillförlitlighet samt kapacitet och varaktighet.

Följande har härletts i detta skede:

- *Teknik* – Metoder och system för att tillverka, försluta och kontrollera kapslarna ska finnas. För att uppfylla detta har SKB utvecklat och provat teknik under lång tid. Utvecklingen, som kommer att fortsätta, styrs av erhållna erfarenheter och resultat samt av att tillverkningen ska vara flexibel för kunskaps- och teknikutveckling. Viktiga delar av produktionssystemet ska etableras som kvalificerade produktionsresurser.
- *Kvalitet* – Tillverkade produkter ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna. Detta säkerställs genom att de uppfyller SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005a/. Detta innebär att produktionssystemet, och dess delsystem, måste utformas för att uppfylla detta.
- *Tillförlitlighet* – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräckligt hög för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering. Utvecklingsmålen för produktionssystemet är att minst 99,9 % av levererade kapslar ska uppfylla kvalitetskraven. Tillförlitlighetsanalyser ska genomföras för delsystem "Förslutning", "Insats" och "Koppar" för att verifiera att krav och konstruktionsförutsättningar innehålls. Resultaten från dessa studier används både som underlag till säkerhetsanalysen för slutförvaret och som underlag för kvalificering av tillverknings- och svetsprocesserna.
- *Kapacitet och varaktighet* – Produktionssystemet ska möta slutförvarssystemets krav på deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen). Detta kommer bland annat att omhändertas vid projektering av anläggningar och genom att etablera leverantörer.
- *Uppfylla tillämpbara myndighetskrav* – Alla kärntekniska krav avseende kvalitet, kontrollordning, kvalificering etc ska uppfyllas.

Förutom krav som är härledda från slutförvaret respektive från hantering av kapseln finns krav som kommer från andra intressenter såsom t ex inkapslingsanläggningen där svetsning



och OFP sker i en anläggning med kärnteknisk verksamhet vilket innebär att system och processer i inkapslingsläggningen måste ske fjärrstyrt och strålskärmad.

Att kapseln uppfyller kraven kommer att verifieras med bland annat demonstrationer och i säkerhetsanalysen. En viktig del av arbetet med att verifiera kvalitet och tillförlitlighet är att kvalificera de processer i produktionssystemet som är viktiga för kapselns kvalitet.

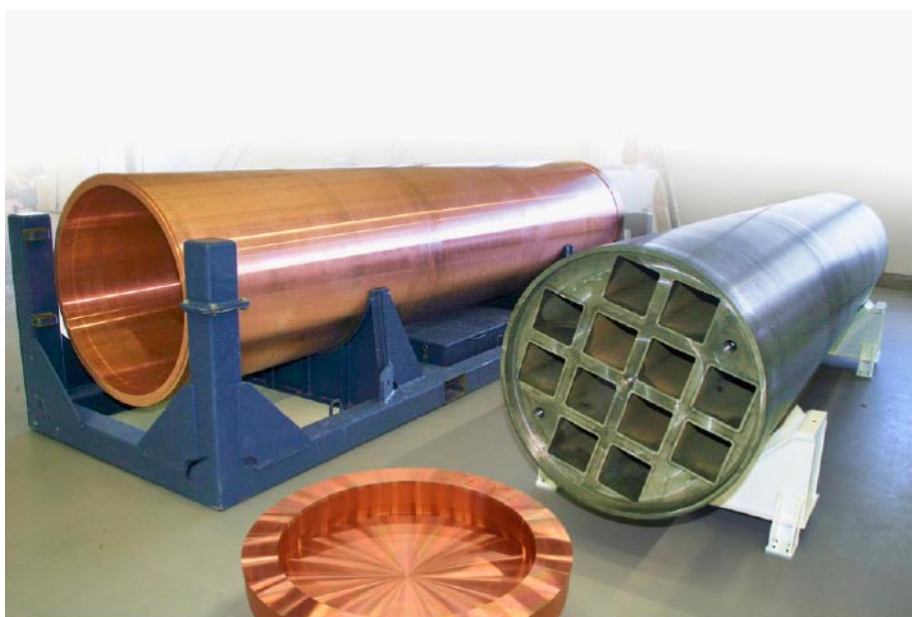
### 4.3 Utformning av produktionssystemet

Med produktionssystemet avses alla de processer och system som behövs för att tillverka kopparkapseln. Produktionssystemet omfattar hela kedjan från framställning av koppargöt och komponenter till färdig och försluten kapsel. SKB:s referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar omfattar ett nätverk av leverantörer som tillverkar kapselkomponenterna och en kapselfabrik där svetsning av kopparbotten, slutbearbetning, kontroll och montering av komponenterna till kapslar utförs. SKB:s huvudalternativ är att uppföra och driva kapselfabriken i egen regi.

De kapselkomponenter, se figur 4-1, som ska tillverkas är: kopparrör, kopparlock och kopparbotten, insats av segjärn samt insatslock av stål. Dessutom tillkommer några komponenter av standardtyp såsom bult till insatsens stållock, en O-ringstättning och en ventil för atmosfärsbyte. Kopparlock och kopparbotten svetsas fast på kopparröret.

Kapselkomponenter av koppar och segjärn tillverkas av flera olika leverantörer. Hanteringen av olika material hålls separerade i kapselfabriken fram till monteringen. Vid monteringen placeras insatsen i kopparhöljet. Den monterade kapseln samt kopparlock och insatslock transporteras från kapselfabriken till inkapslingsanläggningen där bränslet placeras i kapseln, insatslocket monteras och kopparhöljet försluts.

Kvalitetskontroller av olika slag ingår i alla delsystemen. Kapselkomponenterna kan komma att kontrolleras både hos leverantörer och i kapselfabriken. Kontrollerna omfattar materialanalyser, strukturkontroller, dimensionskontroller, oförstörande provning etc.



*Figur 4-1. Foto som visar kapselkomponenterna; kopparrör, insats och kopparlock.*

Syftet med oförstörande provning är att kontrollera att komponenterna inte har avvikelser i materialstrukturen, så kallade diskontinuiteter, som kan påverka kapselns långsiktiga funktion eller säkerhet vid hantering.

Sedan många år bedriver SKB utveckling av metoder och system för att säkerställa att tillverkning av kapselkomponenter och förslutning av kapslar ska finnas när inkapslingsanläggningen ska uppföras. Provtillverkningen och genomförda kontroller ger också svar på om de kapselkomponenter som tillverkas och de förslutningar som görs uppfyller alla ställda krav i konstruktionsförutsättningar, tekniska specifikationer och ritningar.

### **4.3.1 Produktionssystemets delsystem**

Produktionssystemet har delats in i tre delsystem; delsystem kopp, delsystem insats och delsystem förslutning, se figur 1-2. Som framgår av bilden sker tillverkningen i ett nätverk av leverantörer och anläggningar.

Redovisningen av produktionssystemet och dess delsystem omfattar en beskrivning utifrån referensutformningen av produktionssystemet. Med referensutformning menas att metoder som i dagsläget bedöms kunna användas för att tillverka en kapsel som uppfyller ställda krav har valts. SKB har i många fall alternativa metoder som också bedöms kunna användas för att tillverka och försluta kapseln. De tre delsystemen beskrivs i var sitt kapitel, se kapitel 5–7.

#### ***Delsystem insats***

Delsystem insats omfattar processer och system för tillverkning och kontroll av insatsen. De huvudsakliga processerna som ingår i delsystem insats är:

- Gjutning av insats.
- Kvalitetskontroll av insatsen – måttkontroll, oförstörande provning samt materialanalyser.

Dessutom omfattar detta delsystem stödjande processer så som bearbetning av insatsen samt tillverkning av en stålkassett och ett stållock.

Gjutning, grovbearbetning och leveranskontroll av insatsen utförs av leverantörer medan färdigbearbetning och kvalitetskontroller med oförstörande provning utförs i kapselfabriken.

#### ***Delsystem kopp***

Delsystem kopp omfattar processer och system för tillverkning och kontroll av koppkomponenter samt svetsning och kontroll av bottensvets. De huvudsakliga processer som ingår i delsystem kopp är:

- gjutning av koppargöt,
- extrusion av kopparrör,
- smidning av kopparlock och kopparbotten,
- svetsning av botten med friction stir welding (FSW),
- kvalitetskontroll av komponenter och bottensvets – måttkontroll, oförstörande provning (OFP) samt materialanalyser.

Dessutom omfattar delsystemet grov- och färdigbearbetning av komponenter samt färdigbearbetning av bottensvetsen.

Gjutning av göt, varmförning och grovbearbetning av kopparrör samt av lock och botten utförs av leverantörer. Färdigbearbetning, svetsning av kapselns kopparbotten och kvalitetskontroller med oförstörande provning utförs i kapselfabriken.

### **Delsystem förslutning**

Delsystem förslutning omfattar svetsning, kontroll samt färdigbearbetning av kapselns lockförslutning. Delsystemet är placerat i inkapslingsanläggningen och svetsningen görs efter att det använda bränslet har placerats i kapseln, vilket innebär att delsystemet ingår i en kärnteknisk verksamhet. De huvudprocesser som ingår i delsystem förslutning är:

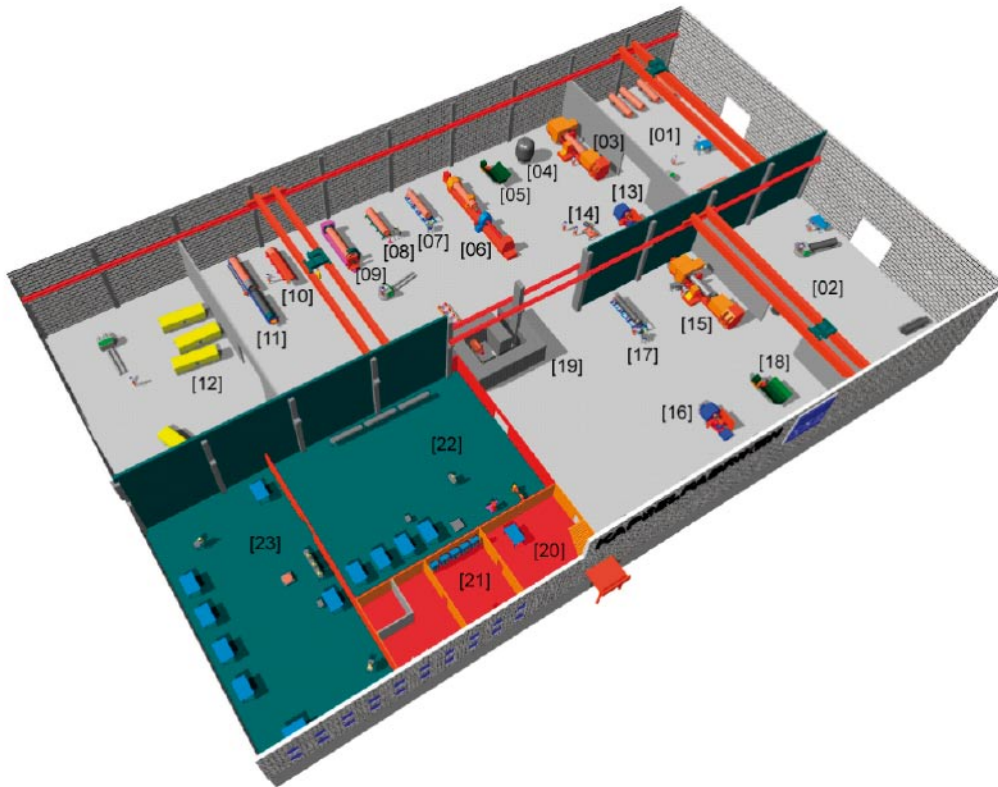
- svetsning av lock med FSW,
- kvalitetskontroll med oförstörande provning.

### **4.3.2 Kapselfabriken**

SKB:s referensalternativ är att bygga och driva en kapselfabrik där all färdigbearbetning och kontroll av kapselkomponenter sker liksom det avslutande momentet i kapseltillverkningen, monteringen av kapseln, då insatsen placeras i kopparhöljet.

Den utformning av kapselfabriken (se figur 4-2) som utgör referensalternativ /SKB 2006b/ innebär att ämnen till kapselkomponenterna levereras till fabriken från olika leverantörer. De levererade komponenterna kontrolleras innan de tas in i fabriken där koppar och segjärn hanteras i separerade bearbetningslinjer fram till att insatsen sätts in i kopparröret. I fabriken sker färdigbearbetning av komponenterna och kopparbotten svetsas på kopparröret varefter en extra bearbetning av svetsområdet genomförs. System för oförstörande provning av samtliga kapselkomponenter och botten svetsen finns i anläggningen.

Efter monteringen placeras kapseln i ett transportemballage för tomma kapslar tillsammans med ett insatslock och ett kopparlock. Varje kapsel förses med ett dokument som anger identifikation och inspektionshandlingar enligt ledningssystemet för kapseltillverkning. Den tomma kapseln är därmed klar för leverans till inkapslingsanläggningen.



- |  |  |
|--|--|
| 01. Mottagning av varmformade kopparämnena         | 13. Bearbetning av lock och botten             |
| 02. Mottagning av ämnen till insatser och stållock | 14. Ultraljudundersökning av lock och botten   |
| 03. Utvändig bearbetning av kopparrör              | 15. Bearbetning av insatser                    |
| 04. Skärvätsketank                                 | 16. Bearbetning av stållock                    |
| 05. Spånpress med filtrering                       | 17. Ultraljudundersökning av insatser          |
| 06. Invändig bearbetning av kopparrör              | 18. Spånpress                                  |
| 07. Ultraljudundersökning av kopparrör             | 19. Röntgen och ultraljud av bottensvets       |
| 08. Måttkontroll                                   | 20. Entré med trapp                            |
| 09. Bottensvetsning – FSW                          | 21. Personalrum med omklädning och bastu       |
| 10. Tvättkammare för kopparrör                     | 22. Verkstad för underhåll och verktygsservice |
| 11. Monteringsstation                              | 23. Laboratorium                               |
| 12. Lager för färdiga kapslar                      |  |

**Figur 4-2.** Kapselbrukets bottenplan med arbetsstationer.

## 5 Delsystem insats

Delsystem insats omfattar alla moment som ingår vid tillverkningen av kapselns insats, dvs gjutning, bearbetning och kontroller. Insatsens huvudsakliga uppgift är att motstå de mekaniska påfrestningar som kapseln utsätts för i slutförvaret och förhindra kriticitet i det använda bränslet.

### 5.1 Krav på delsystem insats

Kraven på delsystem insats omfattar både krav som ställs på insatsen och krav som ställs på de system och processer som används för att tillverka insatsen. Kraven på delsystem insats är att:

- Teknik – Metoder och system för att tillverka och kontrollera insatserna ska finnas.
- Kvalitet – Tillverkade insatser ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna. Detta säkerställs genom att SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning följs /SKB 2005a/.
- Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräcklig för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering. Utvecklingsmålet är att minst 99,9 % av levererade kapslar ska uppfylla kvalitetskraven.
- Kapacitet – Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).
- Leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.

Kraven i ledningssystemets tekniska specifikationer omfattar huvudsakligen krav på material, materialstruktur, dimensioner/ritningar samt mekaniska egenskaper. Kraven på insatsen sammanfattas i tabell 3-5 i avsnitt 3.5. Dessutom finns krav på att insatsen ska kontrolleras för att säkerställa att ställda krav kan visas vara uppfyllda. De tekniska specifikationerna uppdateras vid behov till exempel vid förändringar i konstruktionsförutsättningarna.

### 5.2 Teknik

#### 5.2.1 Tillverkning

Insatsen tillverkas av gjutjärn enligt standarden SS-EN 1563. Standarden ställer inga krav på kemisk sammansättning, däremot ställs krav på grafitform och mekaniska egenskaper för gjutgods i olika dimensioner. SKB har valt att tillverka insatsen av segjärn, ett gjutjärn med en i huvudsak ferritisk grundstruktur där grafit som inte binds i materialet skiljs ut i form av noder när materialet svalnar. Grafitens form, storlek och fördelning har stor betydelse för materialets mekaniska egenskaper och kan styras genom olika tillsatser i smältan, t ex magnesium. Baserat på konstruktionsförutsättningarna för kapseln, standarden och de frihetsgrader den ger har en preliminär teknisk specifikation för tillverkning av gjutna insatser tagits fram (KTS011) inom ramen för miljö- och kvalitetssystemet för kapseltillverkningen /SKB 2005a/. Ritningar anger alla dimensioner som ska innehållas.

Insatserna gjuts med 12 eller 4 kanaler för BWR- respektive PWR-element. Kanaler i gjutgodset åstadkoms genom att en stålkassett, som består av stålrör med fyrkantsprofil vilka bildar kanaler för bränsleelementen, placeras i gjutformen och kringgjuts. Före gjutningen fylls profilrören med sand för att kanalerna inte ska deformeras.

Provtillverkning av insatser har till övervägande delen utförts hos tre gjuterier; Åkers Sweden AB, Guldsmedshytte Bruk AB och Metso Foundaries Karlstad AB /SKB 2006b/. Formsättning och gjutsystem varierar mellan gjuterierna och både sandformar och stålkokiller har använts. Gjutformen kan fyllas med smält järn från toppen, s k fallande gjutning, eller från botten, s k stiggjutning. Insatsen gjuts med integrerad botten. Efter gjutningen får insatsen svalna i formen i några dygn innan den tas ut, kapas i ändarna, rengörs samt maskinbearbetas till rätt dimensioner.

Gjutning av insatser har pågått under lång tid och gjutprocesserna och kvaliteten hos insatserna har utvecklats både genom provgjutningar och med hjälp av datorsimuleringar av gjuttekniken hos de olika gjuterierna /Andersson 2005/.

Lock till insatsen tillverkas av stålplåt som rundskärs till rätt dimensioner enligt teknisk specifikation KTS012 /SKB 2005a/. Locket och övriga komponenter, så som bult, O-ring och ventil för atmosfärsbyte, utgör komponenter av standardtyper, som är möjliga att köpa med tillhörande kvalitetscertifikat, och därför inte kräver något specifikt utvecklingsarbete.

## 5.2.2 Oförstörande provning

Insatsen ska kontrolleras med oförstörande provning (OFP) för att upptäcka eventuella avvikelser i materialet, så kallade diskontinuiteter /SKB 2006d/.

Ett framtida provningsflöde av insatsen kan innebära att leverantören av insatsen gör en första kontroll (leveranskontroll) med OFP. Därefter genomförs OFP i kapselfabriken med system och processer som genomgått kvalificering.

Vid val av metod för OFP är det viktigt att provningen kan mekaniseras eftersom komponenterna är stora, att kritiska diskontinuiteter kan detekteras och att metoder som redan är etablerade i industrin för provning av liknande komponenter om möjligt kan användas. En genomgång av metoder som används i industrin för provning av liknande objekt har genomförts och i dagsläget framstår ultraljud som den mest lämpliga metoden för att hitta diskontinuiteter i ytan eller invändigt i materialet /SKB 2006de/.

För OFP delas insatsen in i två områden, mellan kanalrören och det yttre höljet. För provning mellan kanalrören anses transmissionsteknik mest lämplig medan pulsekotecnik anses mest lämpligt för det yttre höljet. Insatser från samtliga tre gjuterier har provats med ultraljud /Andersson et al. 2005/ och resultaten visar att det är möjligt att detektera diskontinuiteter i insatsen med ultraljud.

Vid den provning som har utförts hittills har avsaknaden av lämplig utrustning för ändamålet försvårat möjligheten att göra en tillförlitlig och rationell provning. Resurser för utveckling och utprovning av provmetoder byggs nu upp vid Kapsellaboratoriet. En rotator har införskaffats för att möjliggöra rationell provning av såväl insatser, kopparrör som monterade kapslar. Rotatorn driftsattes i början av 2006 och utvecklingen av provmetoder har nu intensifierats.

### 5.3 Kvalitet vid provtillverkning

Totalt har 36 insatser gjutits i segjärn, 33 BWR och 3 PWR /SKB 2006b/. Anledningen till den ojämna fördelningen är att BWR-insatsen, med 12 kanaler, är mer komplicerad att tillverka och SKB har valt att fokusera utvecklingen på denna. Gjutningsmetoden har utvecklats under senare år genom förbättringar av till exempel gjuttemperatur och infästning av kassetten /Andersson 2005/.

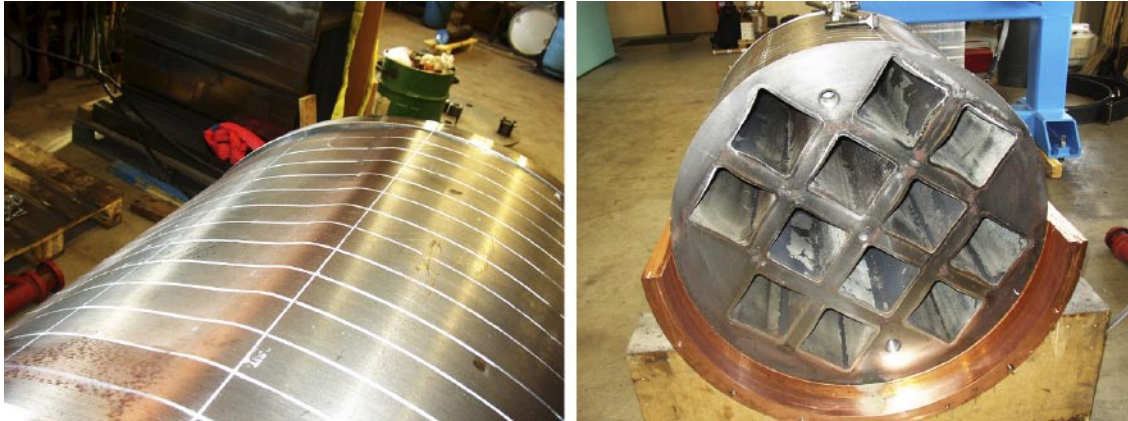
Resultaten från kontroller av insatser gjutna under 2005 visar att kraven på mekaniska egenskaper, hos vidgjutna provstavar och avkapade provbitar, kan uppfyllas, se tabell 5-1.

För att ytterligare kontrollera den mekaniska hållfastheten har två förkortade kapslar (950 mm) med insatser tryckprovats /Nilsson et al. 2005/. Båda proven, vilka utfördes till cirka 130 MPa, visar på en väsentlig säkerhet mot det dimensionerande trycket (45 MPa). Vid 130 MPa hade kapselns radie deformerats cirka 20 mm på ena sidan men kopparhöljet var tätt. Stålprofilerna i kassetten som bildar kanaler för bränsleelementen hade deformerats, se figur 5-1. Proven utfördes på förkortade kapslar eftersom det inte fanns någon tillräckligt kraftig isostatpress att tillgå. Hållfasthetsberäkningar visar att kollapslasten inte väsentligt påverkas av att proven utfördes på förkortade kapslar /Nilsson et al. 2005/. Kassetten mekaniska egenskaper har inte tillgodoräknats vid utformningen av kapseln. Vid genomförda hållfasthetsberäkningar /Dillström 2005/ har det dock visat sig att centreringen av kassetten och radien hos hörnen i fyrkantprofilen har betydelse för insatsens mekaniska hållfasthet. Utifrån dessa beräkningar har centrering och hörnradier specificerats i konstruktionsförutsättningarna och i den tekniska specifikationen för insatsen.

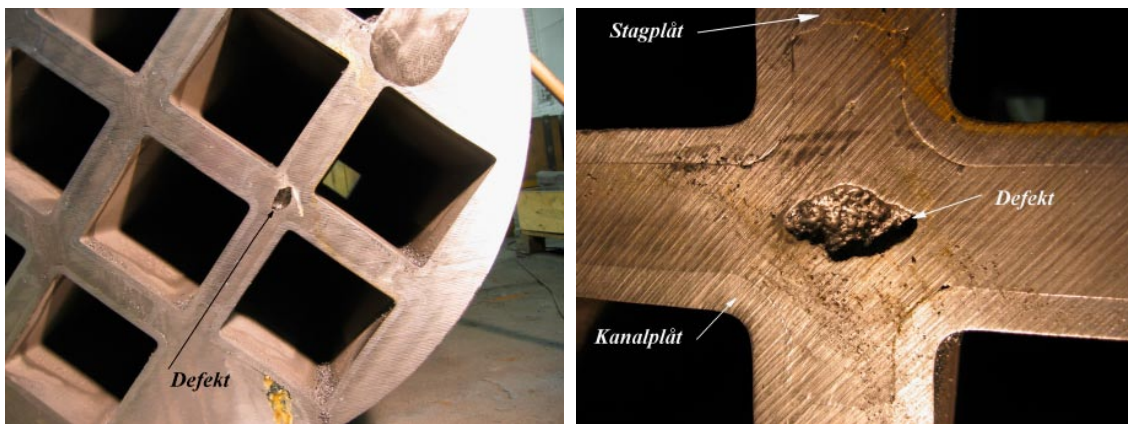
Ingen fullständig provning med OFP har utförts av de komponenter som har tillverkats eftersom utvecklade metoder har saknats. Därför saknas det också i dagsläget en fullständig redovisning av vilka diskontinuiteter som förekommer i insatsen. Inom ramen för ett projekt, probabilistisk analys av kapselhållfastheten /Andersson et al. 2005/, utfördes dock mer ingående provning av tre olika insatser från tre gjuterier. De diskontinuiteter som påvisades i insatserna, med oförstörande och förstörande provning, kan delas in i tre olika grupper /SKB 2006b/: slagg, sugningar samt felaktig grafitform. Den sistnämnda är relativt svår att detektera med ultraljud och försök pågår för att bättre kunna bestämma nodulariteten. Vid transmissionsprovningen kunde insatsens materialstruktur grovt bestämmas och resultaten visade relativt god överensstämmelse med de materialanalyser som sedan utfördes /Andersson et al. 2005/. I en insats (I25) detekterades en relativt stor sugning (se figur 5-2) med transmissionsmetoden, som också detekterar sugningsporer. Detta visar att metoden kan utvecklas för mekaniserad provning men den har inte någon större möjlighet att i detalj lokalisera eller storleksbestämma diskontinuiteterna.

**Tabell 5-1. Hållfasthetsresultat från provstavar från två segjärnsinsatser.**

Insats	Sträckgräns ( $R_{p0,2}$ ), N/mm <sup>2</sup>	Brottgräns (R <sub>m</sub> ), N/mm <sup>2</sup>	Brottöjning (A) %
Krav i KTS011 /SKB 2005a/	min 240	min 370	min 7 (provstavar från insatsen)
IP4 (PWR-insats)	274	379	8,9
I48 (BWR-insats)	277	398	15,5



*Figur 5-1. Bilder som visar deformationen av insatsen och bränslekanalerna vid tryckprovet.*



*Figur 5-2. Exempel på stor diskontinuitet av typen sugning mellan kanalrören i en insats.*

## 5.4 Tillförlitlighet

De krav på mekaniska egenskaper som i dag ställs på insatsen gäller, enligt standarden, väsentligt klenare dimensioner. För att kunna ställa relevanta materialkrav och verifiera den mekaniska hållfastheten genomfördes en probabilistisk analys /Dillström 2005, Andersson et al. 2005/ av den mekaniska hållfastheten hos insatsen. Ett testprogram har beräknat den statistiska fördelningen hos materialparametrar och fördelning av diskontinuiteter baserat på underlag från provning. Sannolikheten för att kapseln ska kollapsa i slutförvaret har beräknats. Resultaten visar att den sannolikheten för brott är liten,  $2 \cdot 10^{-9}$ .

Genomförandet av en tillförlitlighetsanalys av delsystem insats har påbörjats som innehåller följande delar; utveckling av metodik för ultraljudprovning av hela insatser, framtagning av acceptanskriterier och inspektionskrav vid oförstörande provning, bestämning av tillförlitligheten vid OFP av insatsen samt utvärdering av processtillförlitligheten vid gjutning.



## **5.5 Kapacitet vid serieproduktion**

Insatser har hittills tillverkats styckvis och hos flera leverantörer. Detta innebär att ingen serietillverkning är utförd. Med flera leverantörer engagerade bedöms kapaciteten på en insats per arbetsdag kunna uppnås. Kapsel fabriken projekteras för en kapacitet som säkerställer att en kapsel per dag kan levereras till inkapslingsanläggningen under lång tid.

## **5.6 Kvalificering**

Kvalificering av tillverkningsmetoderna kommer att genomföras, för att säkerställa att kapselkomponenter som uppfyller ställda krav kan tillverkas. Detta innebär att leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpliga myndighetskrav kommer att ingå. Ett program för kvalificering av system för tillverkning och förslutning av kapseln har tagits fram av SKB /SKB 2006f/ där omfattning och tidsramar beskrivs.

Identifiering och val av de processer som ska kvalificeras hos leverantörerna kommer att ske i samråd mellan SKB och leverantörerna. Systemet för kvalificering av tillverkningsprocesserna ska utprovas genom att icke formella kvalificeringar s k prekvalificeringar successivt genomförs. Erfarenheter från prekvalificeringarna kommer sedan att ligga till grund för utformningen av de formella kvalificeringarna. Den första prekvalificeringen som är planerad gäller gjutningen av insatser. Ett underlag för en prekvalificering kommer att tas fram tillsammans med Metso Foundries Karlstad AB i samband med serietillverkningen av fem stycken insatser år 2007.

## **5.7 Uppföljning av krav på delsystem insats**

Nedan presenteras en uppföljning av hur väl de ställda kraven på delsystem insats kan uppfyllas genom att beskriva kunskapsläget, se tabell 5-2. Det arbete som återstår för att kunna uppfylla kraven inför kvalificering presenteras i framtida handlingslinjer, se avsnitt 9.1.

**Tabell 5-2. Uppföljning av krav på delsystem insats.**

<b>Krav</b>	Teknik – Metoder och system för att tillverka, och kontrollera kapslarna ska finnas.
<b>Kunskapsläge</b>	Referensmetod, gjutning, är vald och demonstrerad för BWR-insatser. Utveckling av gjutningsteknik för PWR-insats pågår. Alternativa leverantörer finns. Utveckling av metoder för OFP pågår, främst ultraljud.
<b>Krav</b>	Kvalitet – Tillverkade komponenter ska uppfylla kvalitets- och miljöledningssystemet för SKB:s kapseltillverkning /SKB 2005a/.
<b>Kunskapsläge</b>	Att uppställda kvalitetskrav baserade på i dag angivna acceptanskriterier /SKB 2005a/ kan innehållas avses att demonstreras 2007.  I dag finns leverantörer inom området som är certifierade både för ISO 9001 och ISO 9002. Tillverkningen ska ske efter godkända kvalitetsplaner i enlighet med SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning. Inga tillverkningsprocesser eller leverantörer är ännu formellt kvalificerade enligt SKB:s rutiner KT0602 (Qualification of Manufacturing Process) eller KT0603 (Qualification of Supplier/Subcontractor).  Detekteringsförmågan och noggrannheten vid storleksbestämning av diskontinuiteter med OFP har ännu ej fastställts.
<b>Krav</b>	Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräcklig för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering.
<b>Kunskapsläge</b>	En systematisk studie för att bestämma tillförlitligheten i processen pågår.
<b>Krav</b>	Kapacitet och varaktighet – delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år.
<b>Kunskapsläge</b>	Insatser har hittills provtillverkats styckvis och hos flera leverantörer. Ingen serietillverkning är ännu utförd. Med flera leverantörer engagerade bedöms kapaciteten om en insats per dag eller 200 insatser per år vara möjlig att uppnå.  Tidsåtgången vid provning med OFP ej utvärderad.
<b>Krav</b>	Uppfylla tillämpbara myndighetskrav – Leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.
<b>Kunskapsläge</b>	Program för kvalificering /SKB 2006f/.

## 6 Delsystem koppar

Delsystem koppar omfattar processer och system för tillverkning och kontroll av koppar-komponenter samt svetsning och kontroll av bottensvets. Kopparhöljets huvudsakliga uppgift är att vara kemiskt beständigt i slutförvaret.

### 6.1 Krav på delsystem koppar

Kraven på delsystem koppar omfattar både krav som ställs på råmaterialet (koppargöt) och krav på kopparkomponenterna (kopparrör, kopparlock och kopparbotten) samt krav som ställs på de system och processer som används för att tillverka dessa. Kraven på delsystem koppar är att:

- Teknik – Metoder och system för att tillverka och kontrollera kopparkomponenterna ska finnas.
- Kvalitet – Tillverkade kopparkomponenter ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna. Detta säkerställs genom att SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning följs /SKB 2005a/.
- Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräcklig för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering. Utvecklingsmålet är att minst 99,9 % av levererade kapslar ska uppfylla kvalitetskraven.
- Kapacitet – Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).
- Leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.

Kraven på kopparkomponenterna framgår av tabell 3-6 i avsnitt 3.5. Dessa krav preciseras i tekniska specifikationer (KTS001 för koppargöt samt KTS002 för kopparkomponenter) i kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkningen /SKB 2005a/. De tekniska specifikationerna uppdateras om behov föreligger till exempel vid förändringar i konstruktionsförutsättningarna. Kraven på göten omfattar huvudsakligen materialspecifikation, materialsammansättning och vikt. Kraven på kopparkomponenterna omfattar huvudsakligen, materialstruktur, mekaniska egenskaper hos provbitar och dimensioner (ritningar med angivna toleranser). Dessutom finns krav på att kopparkomponenterna ska kontrolleras med oförstörande provning.

## 6.2 Teknik

### 6.2.1 Tillverkning

#### **Koppargöt**

Det utgångsmaterialet som SKB använder för varmformning av kopparkomponenter är cylindriska koppargöt. Vid tillverkningen av göten säkerställs den kemiska sammansättningen hos kopparn. De cylindriska göten som används vid extrusion av kopparrör har en diameter på 850 mm och en vikt på upp till 13,5 ton, se figur 6-1. Provgjutningar av göt har utförts i samarbete med Poricopper Oy, numera Luvata /SKB 2006b/. Gjutningarna utförs som halvkontinuerlig gjutning. Vid framställning av göten har det ibland varit vissa svårigheter att innehålla kraven på låg syrehalt (< 5 ppm), framför allt i ena ändan av göten och fosforhalten har varierat inom götet. Vidare förekommer det ibland kaviteter och inre sprickor i göten, vilka kan leda till att man får avvikelser i materialet, så kallade diskontinuiteter, även i kopparrören om avvikelserna har olämplig placering i göten. Utveckling pågår för att förbättra och effektivisera gjutningsprocessen, bland annat mot större göt så att ändarna som gjuts när processen inte är helt stabil kan kapas bort.

Smidningen av förformade ämnen till kopparlock och kopparbottnar utgår från kontinuerligt gjutna koppargöt med en diameter på 500 mm och en vikt på 1 100 kg.

#### **Kopparrör**

För tillverkning av kopparrör har SKB prövat fyra olika metoder; rullformning av kopparplåt till rörhalvor som svetsas samman, tillverkning av sömlösa rör genom extrusion, dornpressning och smidning. Alla provade metoder är etablerade i industriell tillverkning av stålrör i dimensioner som motsvarar kapselröret. Någon väsentlig erfarenhet av tillverkning i koppar med dessa metoder fanns dock inte när SKB påbörjade sin utveckling av tillverkningsmetoderna 1994–1995. SKB:s bedömning i dag är att kopparrör som uppfyller ställda krav kan tillverkas med alla metoderna men sedan 1998 har verksamheten



*Figur 6-1. Koppargöt för extrusion av kopparrör.*

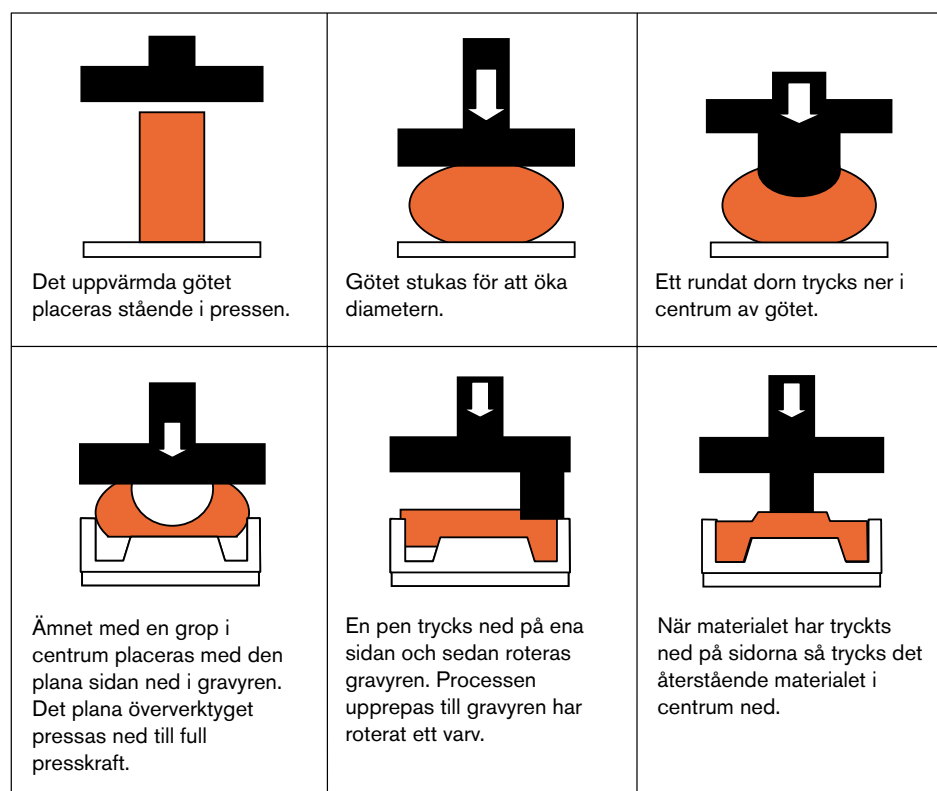
koncentrerats på de tre alternativen som ger sömlösa rör. Motivet för denna bedömning var de otillfredsställande svetsresultat som erhöles vid den tidpunkten och att det var en fördel att undvika svetsning och kontroll av svetsarna.

SKB har goda erfarenheter av den materialstruktur som fås i de kopparrör som tillverkas med extrusion. De andra metoderna kan ha andra fördelar men underlagen och erfarenheterna är mer begränsade i detta skede. Dornpressning (pierce and draw) ger en integrerad botten, vilket är av stort intresse, men svårigheter med att få ett genomsmitt material med bra materialstruktur i botten innebär att utvecklingsarbetet angående detta måste fortsätta. Smidning av rör är relativt nytt för SKB och utvecklingen fortsätter. Sammantaget innebär detta att utveckling av alla tre metoderna pågår och kommer att fortsätta /SKB 2006b/ men denna redovisning fokuserar helt på rör varmformade med extrusion som SKB har valt som referensmetod.

I samarbete med företaget Wyman Gordon i Skottland, där det finns en tillräckligt stor press, har SKB bedrivit utveckling och provtillverkning av rör med extrusion. Metoden innebär att ett koppargöt stukas axiellt och därefter sker håltagningen genom att en dorn pressas centralt och axiellt genom ämnet. Det hålade ämnet maskinbearbetas och förvärms innan det pressas med stor kraft genom ett ringformat munstycke. Extrusionen ger kopparrör med en finkornig materialstruktur. Tillverkningsmetoden kommer att vidareutvecklas för att bland annat förbättra raket och rundhet hos rören.

### **Kopparlock och kopparbotten**

SKB tillverkar kopparlock och kopparbottnar med smidning. Utgångsmaterialet är ett cylindriskt göt som förformas innan det smids i ett slutet verktyg vid knappt 700 °C, se figur 6-2. Utvecklingsarbetet har SKB bedrivit i samarbete med Scana Steel Björneborg AB.



**Figur 6-2.** Schematisk bild av processen för smidning av lock.

Eftersom lock och botten ska svetsas med friction stir welding (FSW), se kapitel 7, måste ämnet tillverkas med extra hög fläns för att det område där svetsningen startas och avslutas ska kunna bearbetas bort. Ett alternativ som undersöks är att ha en start- och avslutningsbit i koppar som placeras i svetsmaskinen.

### **Bottensvets**

SKB avser att använda samma referensmetod för svetsning av botten som för svetsning av locket (förslutningen) det vill säga FSW, som har visat sig vara en repeterbar och tillförlitlig metod samtidigt som den ger en bra materialstruktur och god kvalitet på svetsen. Svetsmetoden och valet av referensmetod presenteras i kapitel 7 och i en underlagsrapport /SKB 2006c/. Där redovisas också krav på svetsprocessen och resultat från provsvetsningar. Kvalitetskrav för bottensvetsen finns angivna i en teknisk specifikation i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning (KTS003) /SKB 2005a/.

Det som huvudsakligen skiljer svetsningen av botten från svetsningen av locket är att botten-svetsen utförs i kapselfabriken på en liggande kapsel /SKB 2006b/ medan svetsningen av förslutningen sker i inkapslingsanläggningen på en stående kapsel. Verksamheten i kapsel-fabriken är inte kärnteknisk. Efter svetsningen av botten följer en utvändigt bearbetning av fogområdet och oförstörande provning av svetsen.

## **6.2.2 Oförstörande provning**

Kopparkomponenterna ska kontrolleras bland annat med oförstörande provning (OFP) för att upptäcka eventuella avvikelser i materialet, så kallade diskontinuiteter. De diskontinuiteter som påverkar kopparhöljets tjocklek anses vara mest kritiska och provmetoder som kan storleksutvärdera diskontinuiteter med en radiell utbredning ska därför prioriteras.

Ett framtida provningsflöde av insatsen kan innebära att leverantören av kopparkomponenter gör en första kontroll (leveransk kontroll) med oförstörande provning (OFP). Därefter genomförs OFP i kapselfabriken med system och processer som genomgått kvalificering.

Vid val av metod för OFP är det viktigt att provningen kan mekaniseras eftersom komponenterna är stora. En genomgång av de metoder som används i industrin för provning av liknande objekt har genomförts. Genomgången visar att för OFP av tjocka metallstrukturer används normalt ultraljudprovning. I dagsläget framstår ultraljud också som den mest lämpliga metoden /SKB 2006d/ för att hitta diskontinuiteter både i ytan eller invändigt i materialet i kapselns kopparhölje. Vid Kapsellaboratoriet har en rotator installerats med en phased array ultraljudutrustning under 2006. Tanken är att SKB:s erfarenheter från ultraljudprovningen av svetsarna, se avsnitt 7.3.2, ska användas för att ta fram processer för provningen av kopparkomponenter.

Svetsen mellan kopparbotten och kopparrör (bottensvetsen) kommer att kontrolleras med OFP i kapselfabriken. Provningen kommer att utformas enligt samma principer som för förslutningssvetsen. Det som skiljer är att bottensvetsen provas på en liggande kapsel i en verksamhet som inte är kärnteknisk.

## 6.3 Kvalitet vid provtillverkning

### Koppargöt

Under den senaste treårsperioden har 21 koppargöt för rör tillverkats hos Outokumpu Poricopper Oy, numera Luvata, och 117 mindre göt för tillverkning av lock/botten har tillverkats hos Norddeutsche Affinerie AG enligt upprättade kvalitetsplaner där krav på materialet, dokumentation och leveranser specificerats enligt ledningssystemet för kapseltillverkning (KTS001) /SKB 2005a/. Vid provtillverkningen har man visat att ställda krav avseende kemisk sammansättning kan innehållas, se tabell 6-1 /SKB 2006b/.

### Kopparrör

Totalt har 23 rör tillverkats med extrusion, som efter riktning och maskinbearbetning, fått dimensioner som uppfyller SKB:s krav. Den geometriska noggrannheten i processen kan dock förbättras.

**Tabell 6-1. Resultat (ppm) av kemisk analys av göt som använts för provtillverkning av extruderade rör /SKB 2006b/.**

Ämne (ppm)	Krav (KTS001)*	Göt			
		T39	T40	T41	T42
P	30–70 *	65	60	59	55
Ag	< 25	13,7	11,6	13,3	14,1
As	< 5	1,02	1,15	1,14	1,2
Bi	< 1	0,18	0,18	0,21	0,44
Cd	< 1	< 0,003	< 0,003	0,00	< 0,01
Fe	< 10	0,4	0,4	1,1	0,8
H	< 0,6 *	0,33	0,44	0,30	0,15
Mn	< 0,5	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1
Ni	< 10	0,5	0,7	0,6	0,9
O	< 30 **	1,3	1,9	2,9	2,3
Pb	< 5	0,24	0,23	0,33	0,41
S	< 8 *	6,5	5,6	6,0	6,5
Sn	< 2	0,12	0,07	0,09	0,21
Te	< 2	0,13	0,24	0,26	0,41
Zn	< 1	< 0,1	< 0,1	0,00	< 0,2

\* SKB:s tilläggskrav utöver de krav som anges i standarden (EN 1976 Cu-OFE) /SKB 2005a, 2006a/

\*\* För svetsbarhet med elektronstrålesvetsning finns krav på att syrehalten måste understiga 5 ppm på grund av ökad risk för porbildning /SKB 2006a/.

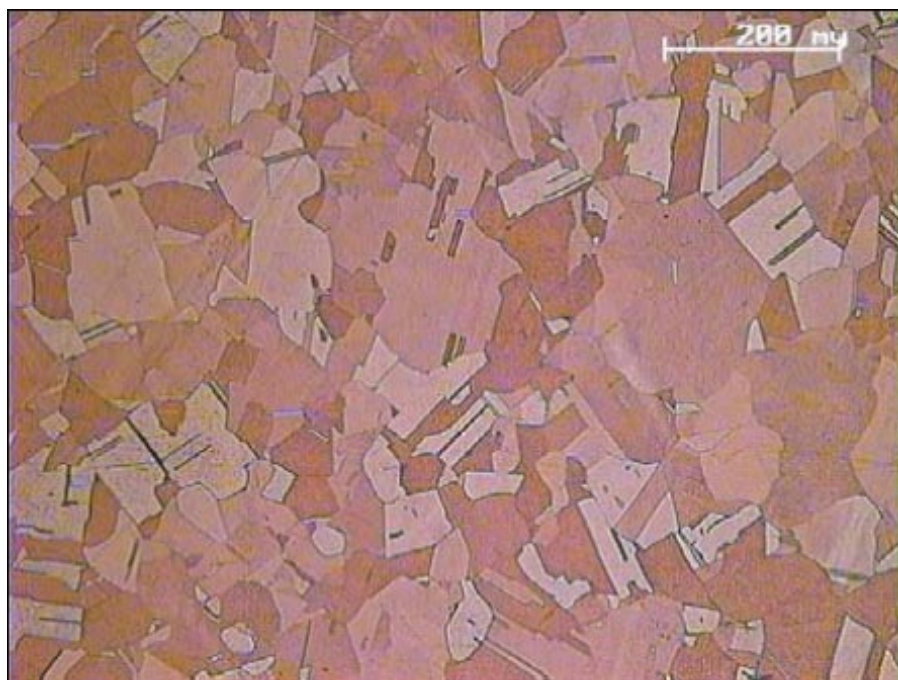
Resultaten från dragprov visar att rören uppfyller ställda krav på mekaniska egenskaper med marginal och att kravet på materialstruktur (kornstorlek) kan innehållas. I tabell 6-2 presenteras provresultat från de fyra senast tillverkade rören och figur 6-3 visar materialstrukturen i ett av rören.

Ingen fullständig OFP har utförts på de kopparrör som har tillverkats eftersom utvecklade metoder saknas. Därför saknas det också en fullständig redovisning av vilka diskontinuiteter som förekommer i objekten. Den OFP av svetsen som utförts vid Kapsellaboratoriet har indirekt inneburit viss provning av de delar av kopparkomponenterna som omger svetsen. Inga diskontinuiteter har indikerats i grundmaterialet (kopparrör och kopparlock) vid provning av cirka 50 stycken rördelar i extruderade rör i samband med provning av svetsar. Detta överensstämmer med erfarenheter från den begränsade provningar som genomförts av leverantörerna av kapselkomponenterna som visar att förekomsten av diskontinuiteter i kopparmaterialet är låg.

Förutom provtillverkning bedriver SKB datorsimulering av aktuella varmformningsprocesser för kopparröret /Ssemakula 2001, Ssemakula och Ståhlberg 2001/ bland annat för att optimera styrningen av de olika processtegen. Simuleringarna ger ökad kunskap om hur materialen deformeras och storleken på materialtöjningen. Vid varmformningen bryts den grovkorniga gjutstrukturen ner till en relativt finkornig struktur. Simuleringarna är ett viktigt redskap för att utreda hur processparametrarna vid varmformningen ska styras så att rätt materialstruktur erhålls och kraftbehovet tillgodoses.

**Tabell 6-2. Resultat från kontroll av mekaniska egenskaper (dragprov enligt EN 10002-1) och materialstruktur i extruderade rör.**

Element	Krav i KTS002 /SKB 2005a/	T39	T40	T41	T42
Kornstorlek ( $\mu\text{m}$ )	< 360	107–127	90–127	90–127	107–127
Duktilitet (%)	> 40	59,5	62,0	65,0	63,0



**Figur 6-3.** Foto som visar kopparmaterialets struktur i rör T38.



### **Kopparlock och kopparbotten**

Totalt har 166 lock eller bottenar tillverkats genom smidning. Metoden ger material med både bra struktur och mekaniska egenskaper. Kornstorleken varierade mellan 90 och 127  $\mu\text{m}$  i de två lock vars tvärsnitt undersökts i detalj. Dragprov har gjorts på provstavar från tre lock och erhållna förlängningsvärden (duktilitet) har i samtliga fall varit större än 50 % vilket innebär att kravet, > 30 %, uppfylls.

Smidesprocessen har simulerats med avseende på töjningar och materialflöden /Andersson et al. 2004/. Töjningen under smidesprocessen har betydelse för vilken kornstorlek man får. De simuleringar som genomförts visar att töjningen är bra i hela locket vilket tyder på att kornstorleken i hela locket klarar kravet på < 800  $\mu\text{m}$  med mycket god marginal.

Vid maskinbearbetning av kopparlocket har en typ av diskontinuitet, slagginneslutning, kunnat indikeras i enstaka fall.

### **Bottensvets**

Svetsning av kopparbotten planeras ske i kapselfabriken med samma referensmetod, FSW, som används för förslutningen, se avsnitt 7.4.

## **6.4 Tillförlitlighet**

För att säkerställa att de tillverkade kapslarna motsvarar de krav som ställs på funktionen i slutförvaret ska kapseltillverkningen redovisa de tillverkade kapslarnas egenskaper så att dessa kan verifieras i säkerhetsanalysen. Underlagen till säkerhetsanalysen kommer att se olika ut för olika skeden, beroende på den kunskap som finns. Genomförda säkerhetsanalyser ger återkoppling till tillverkningen.

Motsvarande underlag, som nu lämnas för delsystem förslutning /Ronneteg et al. 2006/ till säkerhetsanalysen SR-Can, kommer att lämnas till nästa säkerhetsanalys, SR-Site. Underlagen kommer att omfatta tillförlitligheten för hela kapseln, det vill säga förutom delsystem förslutning också delsystem insats och delsystem koppar. När denna samlade analys har genomförts kommer det att finnas underlag för att ställa upp preliminära acceptanskriterier för OFP och därtill kopplade kvalificeringsmål för delsystemen koppar och insats.

Tillförlitlighetsanalys av delsystem koppar pågår vilken omfattar; utveckling av metodik för ultraljudprovning, fastställande av inspektionskrav, bestämning av tillförlitligheten vid OFP samt utvärdering av processtillförlitligheten vid tillverkning av kopparkomponenter.

## **6.5 Kapacitet vid serieproduktion**

Provtillverkningarna har utförts i små serier med upp till fyra rör i följd och upp till 19 lock i följd. Provtillverkningarna har så här långt gett anledning att bedöma att en planerad kapacitet hos leverantörer som innebär en kapsel per dag kan uppfyllas. Kapselfabriken projekteras för en kapacitet som säkerställer att minst en kapsel per dag kan levereras till inkapslingsanläggningen under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).

## 6.6 Kvalificering

Kvalificering av tillverkningsmetoderna kommer att genomföras, för att säkerställa att kapselkomponenter som uppfyller ställda krav kan tillverkas. Detta innebär att leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå. Ett program för kvalificering av system för tillverkning och förslutning av kapseln har tagits fram av SKB /SKB 2006f/ där omfattning och tidsramar beskrivs.

De processer som, i detta skede, bedöms ha stor inverkan på kopparkomponenternas kvalitet är: tillverkningen av göt och varmformning av kopparkomponenter, dvs gjutning av göt, extrusion av kopparrör och smidning av lock och bottenar. Därutöver ska processer för OFP kvalificeras.

Systemet för tillverkningsprocesser kommer att utprovas genom att icke formella kvalificeringar genomförs för att vinna erfarenheter och vid behov förbättra systemet för att utgöra underlag i kvalificeringsarbetet.

## 6.7 Uppföljning av krav på delsystem koppar

Nedan presenteras en uppföljning av hur väl de ställda kraven på delsystem koppar kan uppfyllas genom att beskriva kunskapsläget, se tabell 6-3. Det arbete som återstår för att kunna uppfylla kraven inför kvalificering presenteras i framtida handlingslinjer, se avsnitt 9.2.

**Tabell 6-3. Uppföljning av krav på delsystem koppar.**

---

<b>Krav</b>	Teknik – Metoder och system för att tillverka, och kontrollera kapslarna ska finnas
<b>Kunskapsläge</b>	Referensmetoder är valda och demonstrerade; götframställning, extrusion av rör, smidning av lock och bottenar.  Alternativa eller kompletterande tillverkningsmetoder utvecklas.  Utveckling av metoder för OFP pågår, främst ultraljud.
<b>Krav</b>	Kvalitet – Tillverkade komponenter ska uppfylla SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005a/.
<b>Kunskapsläge</b>	Uppställda kvalitetskrav baserade på i dag angivna acceptanskriterier /SKB 2005a/ kan uppfyllas.  I dag finns leverantörer inom området som är certifierade både för ISO 9001 och ISO 9002. Tillverkningen ska ske efter godkända kvalitetsplaner i enlighet med SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning. Inga tillverkningsprocesser eller leverantörer är ännu formellt kvalificerade enligt SKB:s rutiner KT0602 Qualification of Manufacturing Process eller KT0603 Qualification of Supplier/Subcontractor.  Detekteringsförmågan och noggrannheten vid storleksbestämning av diskontinuiteter med OFP har ännu ej fastställts.
<b>Krav</b>	Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräcklig för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering.
<b>Kunskapsläge</b>	En systematisk studie för att bestämma tillförlitligheten i processen pågår.
<b>Krav</b>	Kapacitet och varaktighet – Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år.
<b>Kunskapsläge</b>	Provtillverkningarna har utförts i små serier med upp till fyra rör i följd och upp till 19 lock i följd. Provtillverkningarna har så här långt gett anledning att bedöma att en planerad kapacitet i kapselfabriken som innebär en kapsel per dag kan uppfyllas.  Tidsåtgången vid provning med OFP är ej utvärderad.
<b>Krav</b>	Uppfylla tillämpbara myndighetskrav – Leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s ledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.
<b>Kunskapsläge</b>	Program för kvalificering /SKB 2006f/.

---

## 7 Delsystem förslutning

Delsystem förslutning omfattar processer och system vid förslutning av kopparkapseln samt vid kontroll av svetsen. SKB har utvecklat två metoder för att utföra svetsen, den ena som är referensmetod är en termomekanisk fasttillståndsprocess, friktionssvetsning (friction stir welding, FSW) /SKB 2006c/ och den andra är en smältsvetsmetod, elektronstrålesvetsning (electron beam welding, EBW).

Förslutningssvetsen kommer att utföras i inkapslingsanläggningen medan svetsningen av botten, som tillhör delsystem koppar, kommer att göras i kapselfabriken. SKB avser att genomföra svetsningen i egen regi vilket innebär att svetsprocesser och system för detta ska utvecklas och ett svetssystem ska installeras i båda anläggningarna. SKB:s strategi är att använda samma svetsmetod i båda anläggningarna.

### 7.1 Krav på delsystem förslutning

Kraven på delsystem förslutning omfattar både krav på svetsgodset och krav på svetsprocessen. Kraven på delsystem förslutning är att:

- Teknik – Metoder och system för att försluta och kontrollera kapslarna ska finnas.
- Kvalitet – Svetssystemet ska generera svetsar som uppfyller konstruktionsförutsättningarna. Svetsarna ska ha en kvalitet som gör att en kassationsfrekvens på mindre än 1 % av kapslarna erhålls.
- Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräcklig för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering. Utvecklingsmålet är att minst 99,9 % av levererade kapslar ska uppfylla kvalitetskraven.
- Kapacitet – Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).
- Leverantörer, processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.
- Svets- och kontrollsystemen ska vara anpassade för kärnteknisk tillämpning.

Kraven på svetsgodset framgår av tabell 3-6 i avsnitt 3.5 och omfattar kemisk sammansättning, mekaniska egenskaper (duktilitet, krypduktilitet, brottgräns), materialstruktur (kornstorlek) och koppartjocklek. Dessutom finns krav på att svetsgodset ska kontrolleras.

### 7.2 Referensmetod för svetsning av koppar

Redan 1982 började SKB tillsammans med The Welding Institute (TWI) i Cambridge, England utreda möjligheten att svetsa på locket på den då 10 cm tjocka kopparkapseln. Då var elektronstrålesvetsning (EBW) den enda möjliga svetsmetoden men när kapselns koppartjocklek minskades till 5 cm öppnades möjligheten att även använda andra svetsmetoder. TWI tillverkade en prototypmaskin för elektronstrålesvetsning som levererades till Kapsellaboratoriet 1997, installerades 1998 och som togs i drift 1999 för start av utvecklingsarbete med svetsning av kopparlock till kopparrör i full skala.

Samtidigt hade en ny metod, friction stir welding (FSW), för svetsning av bland annat aluminiumlegeringar uppfunnits, patenterats och utvecklats av TWI. En fördel med metoden är att materialet svetsades samman utan att smälta. Efter inledande svetsprov på 5 cm tjocka kopparrplattor på en modifierad fräsmaskin 1998 utvecklade SKB och TWI en enkel prototypmaskin för provsvetsningar med kopparringar. Proven var så lovande att SKB beställde en svetsmaskin för fullskaleprov av ESAB AB i Laxå vilken installerades i Kapsellaboratoriet 2003. Utveckling och utredning av båda metoderna har skett parallellt enligt de program som presenterats /SKB 2001, 2004a/ och resultaten av svetsning med båda metoderna visar att de kan producera svetsar med bra kvalitet /SKB 2004b, 2005b/.

### **Valet av referensmetod**

SKB har utvecklat de två svetsmetoderna EBW och FSW parallellt för att om möjligt ha två metoder som uppfyller kraven för produktion. Inför ansökan enligt kärntekniklagen för Clab och inkapslingsanläggningen valdes FSW som referensmetod i maj 2005 /SKB 2006c/ efter en noggrann analys av svetsförsök utförda med de två svetsmetoderna.

Viktiga kriterierna vid metodvalet var bland annat svetsprocessens och svetsystemets kapacitet, robusthet, tillförlitlighet och repeterbarhet, svetsgodsets kvalitet samt systemets och processens lämplighet i inkapslingsprocessen, se tabell 7-1. Dessutom bedömdes kostnader och miljöpåverkan.

Kommande avsnitt i denna rapport behandlar kunskapsläge och utveckling av referensmetoden FSW men utvecklingen av EBW kommer dock att fortsätta vid Kapsellaboratoriet.

**Tabell 7-1. Sammanfattning av utvärdering av svetsmetoder inför valet av referensmetod.**

<b>Kriterium</b>	<b>EBW</b>	<b>FSW</b>
Status svetsystem – Kapacitet – Tillgänglighet – Tillförlitlighet	Ej tillräckligt för att uppfylla ställda krav	Tillräckligt för att uppfylla ställda krav
Status svetsprocess	Tillräcklig för att uppfylla ställda krav	Tillräcklig för att uppfylla ställda krav
Materialegenskaper i svetsgods	Tillräckliga för att uppfylla aktuella krav	Tillräckliga för att uppfylla aktuella krav
Demonstrerad svetskvalitet	Ej tillräckligt för att uppfylla aktuella krav	Tillräckliga för att uppfylla aktuella krav
Status OFP-teknik	Tillräcklig för utvärdering av svetskvalitet	Tillräcklig för utvärdering av svetskvalitet
Miljöaspekter	Små utsläpp av koppar samt hantering av filter innehållande koppar /Kling 2001/. Lägre energiförbrukning	Inga utsläpp av koppar. Högre förbrukning av metaller
Kostnader för system och drift	Likvärdiga	Likvärdiga
Referensmetod för säkerhetsanalysen	Kräver omfattande statistiska analyser för att klara säkerhetsanalysen	Enkla analyser klarar säkerhetsanalysen med god marginal
Bedömning av möjlighet att uppnå produktionsstatus	Kan bedömas om cirka två år	Mycket god

## 7.3 Teknik

### 7.3.1 Svetsning med FSW

Friction stir welding (FSW) är en termomekanisk fasttillståndsprocess vilket innebär att strukturen på svetsgodset som erhålls är finkornig och liknar den som fås vid varmformning av kopparkomponenterna.

Ett roterande svetsverktyg bestående av två delar, en konisk tapp och en cylindrisk skuldra (se figur 7-1) pressas ner i godset och förflyttas längs foglinjen. Tappen både värmer upp materialet genom friktion och tvingar materialet att flyta runt sig genom sin utformning. Skuldran värmer också upp materialet genom friktion och förhindrar att materialet pressas ur svetsen. Figur 7-2 visar hur verktyget förflyttas längs fogen och bildar en svets. Svetsningen startas och avslutas ovanför foglinjen i locketets övre del vilken sedan maskinbearbetas bort, se figur 7-3.

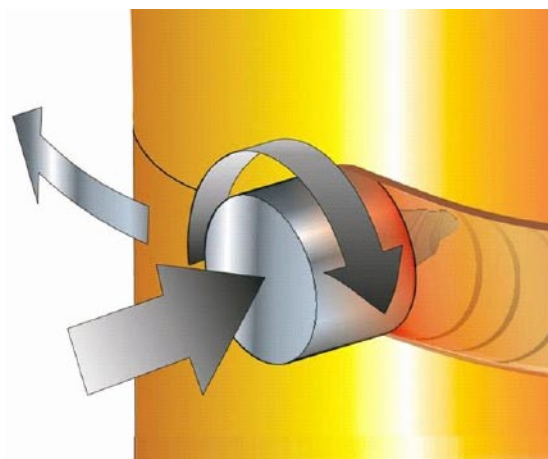
En anledning till att användandet av FSW inom industrin snabbt ökar är att metoden har få processparametrar vilket innebär att processen är relativt enkel att utveckla och kontrollera. Svetsverktyget roterar med ett specifikt varvtal och förflyttar sig längs fogen med en konstant hastighet. Skuldrans position mot kapselytan kontrolleras med en nedåtriktad kraft. Svetsprocessen styrs för närvarande manuellt men övervakas av en dator som registrerar alla parametrar tio gånger i sekunden och visar viktiga parametrar numeriskt och grafiskt för operatören.

Processen är stabil vilket bland annat har visats i en seriesvetsning som genomfördes inför valet av referensmetod /SKB 2006c/. Processen kontrolleras av processläget (adaptiv styrning) vilket gör att den har hög repeterbarhet. Inga störningar eller parameterförändringar vid seriesvetsningen har påverkat svetskvaliteten.

I en parameterstudie /Öberg 2005/ som genomfördes under 2004 inför seriesvetsningen optimerades svetsprocessen och ett processfönster (se tabell 7-2) fastlades. Med processfönster avses det tillåtna intervallet som inmatningsparametrarna och resulterande parametrar får variera inom utan att svetsresultatet påverkas. Figur 7-4 visar svetsdata från svetsning längs foglinjen samt ned- och uppgång vilken motsvarar en sträcka på 390 grader.



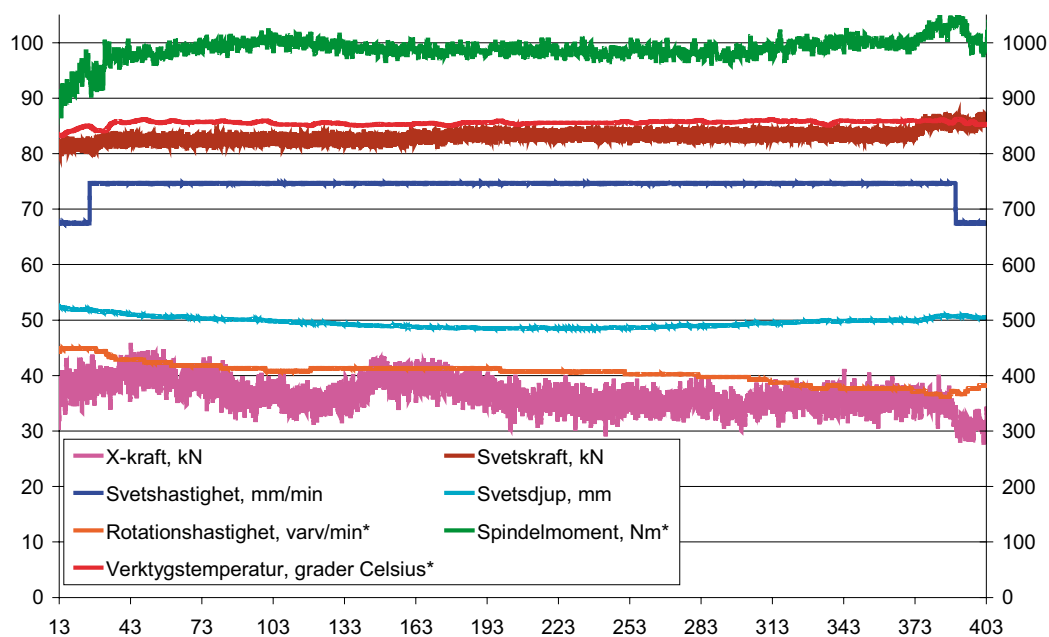
*Figur 7-1. Svetsverktyget.*



*Figur 7-2. Skiss av FSW-processen.*



**Figur 7-3.** Svetsningen startas och avslutas ovanför foglinjen, detta område bearbetas bort.



**Figur 7-4.** Exempel på registrerade svetsdata från locksvets. (\* innebär att värdet ska läsas av på den högra y-axeln).

**Tabell 7-2. Processfönster samt parametrarnas inverkan på processen/svetskvalitén.**

Parameter	Fönster	Vid högt värde	Vid lågt värde
Spindelrotation (varv/min)	350–450	Risk för hög verktygstemperatur	–
Svetskraft (kN)	78–98	Risk för hög verktygstemperatur	Risk för diskontinuiteter
Verktygstemperatur (°C)	790–910	Risk för verktygsbrott	Risk för diskontinuiteter
Skulderdjup (mm)	0,4–1,5	Risk för diskontinuiteter	Risk för diskontinuiteter

### 7.3.2 Oförstörande provning

Syftet med oförstörande provning (OFP) är att kontrollera att svetsarna inte har avvikelser i svetsgodset, så kallade diskontinuiteter som innebär att kapselns funktion påverkas.

I Kapsellaboratoriet bedriver SKB verksamhet för att utveckla, testa och demonstrera system för OFP /SKB 2006e/. Verksamheten har hittills i stor utsträckning varit inriktad på OFP av svetsar. För arbetet med OFP finns utrustning för ultraljud och röntgen. Arbetet var till att börja med inriktat på provning av svetsar gjorda med EBW men sedan 2003 omfattar provningen också svetsar gjorda med FSW. Verksamheten vid Kapsellaboratoriet bedrivs inom följande huvudområden:

- Löpande provning och utvärdering av provsvetsar.
- Utveckling av provningsteknik.
- Utvärdering av provningsteknikens tillförlitlighet.
- Framtagning av specifikationer för provningssystem och provningsprocedurer.

Processkraven på OFP när det gäller teknik och kapacitet är de samma som för andra processer i produktionssystemet och när det gäller tillförlitlighet har kravet formulerats – OFP ska kunna detektera möjliga diskontinuiteter i svetsen. Arbete med att ta fram acceptanskriterier för OFP av svetsar pågår och för detta skede finns förslag på kriterier presenterade i en underlagsrapport till säkerhetsanalysen SR-Can /Ronneteg et al. 2006/.

SKB:s referensmetoder för OFP av svetsar är digital radiografering och ultraljudsprovning. Det är vanligt inom kärnteknisk verksamhet att provning görs med två komplementära metoder, vanligtvis röntgen och ultraljud.

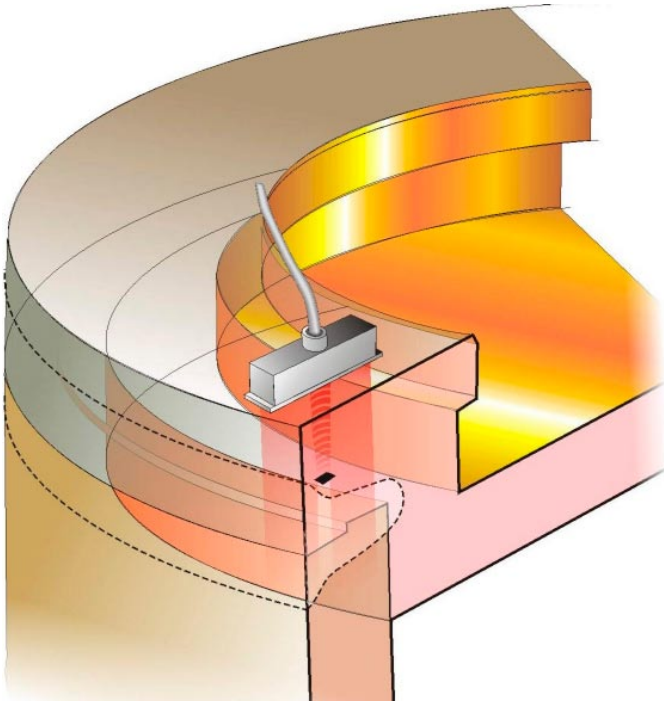
Våren 1999 driftsattes ett system för digital radiografering som används för inspektion av svetsar. Systemet består av en linjäraccelerator (9 MV) som skickar strålning genom svetsområdet i kapseln samtidigt som denna roterar. Den transmitterade strålningen registreras av en detektor, digitaliseras och sammanställs till en digital röntgenbild.

Ett phased array ultraljudssystem för kontroll av svetsar utförda med EBW driftsattes i slutet av 1998 i Kapsellaboratoriet och ett nytt system anpassat för svetsar gjorda med FSW anskaffades 2002. Provningsen med ultraljud görs med phased array teknik. Vid provning av svetsar med denna teknik används ett trettiotal ultraljudkristaller (arraysökarelement) både till att sända och ta emot ljudvågor. Genom att programmera arrayet skickas ljudet i olika riktningar. Principen för ultraljudsprovning av FSW visas i figur 7-5.

För att säkerställa god och repeterbar kvalitet i den oförstörande provningen har rutiner för provning och utvärdering fastställts /Ronneteg 2004, 2005/. Dessa omfattar parameterinställningar, mekaniska inställningar, referensmaterial samt utvärderingskriterier. Resultatet utvärderas sedan med utgångspunkt från uppställda kriterier för att kvaliteten i svetsarna ska kunna säkerställas.

Tekniken för OFP av svetsarna har visat sig fungera tillfredställande. Systemen har med enstaka undantag fungerat mycket bra och OFP-processerna har med gott resultat kunnat användas som ett hjälpmedel vid utveckling av svetsprocesserna.





*Figur 7-5. Princip för ultraljudsprovning av förslutning utförd med FSW.*

## 7.4 Kvalitet i svetsgodset

Svetsgodsets kvalitet uppfyller med marginal gällande krav, vilket stöds av de tester och den provning som har genomförts på materialet. Svetsgodsets struktur med fokus på kornstorlek har undersökts i ett femtiotal makrosnitt, se figur 7-6. Samtliga makrosnitt har en finkornig rekristalliserad struktur med en kornstorlek på cirka 75  $\mu\text{m}$  /Andersson 2004/. Kornstorleken är i nivå med grundmaterialet eller till och med något finare.

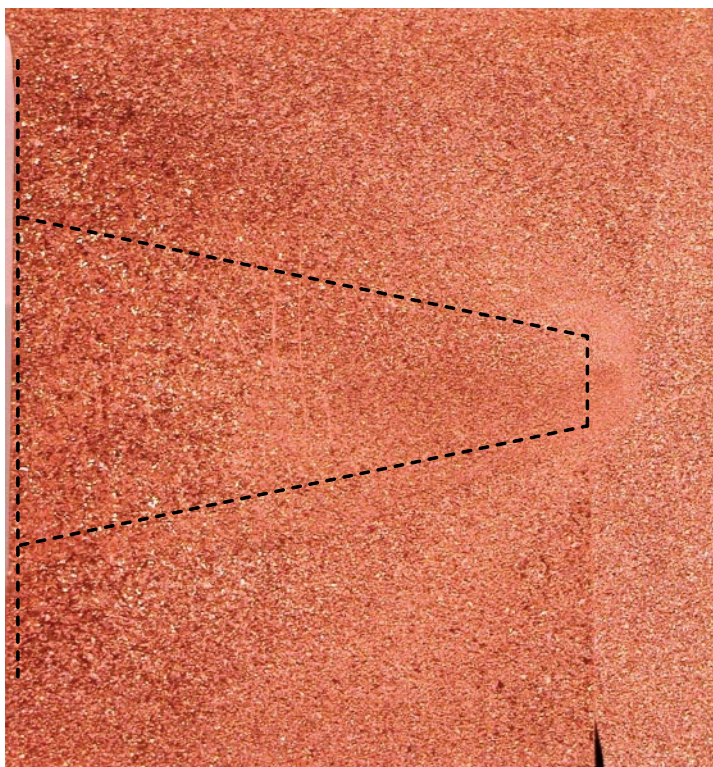
Dragprovning har utförts på 45 och 20 mm breda plattprovstavar samt på runda provstavar med en diameter på 10 mm /SKB 2006c/. Resultatet visar att svetsar utförda med FSW har liknande hållfasthetsegenskaper som grundmaterialet när det gäller brottgräns, sträckgräns och brottförlängning. Provstavarna, som har tagits ur både överlappssekvensen och foglinjesvetsningen från flera locksvetsar, har gått till brott i den värmepåverkade zonen utanför svetsen.

Krypprovning med olika belastning och temperatur visar att svetsgodset har liknande kryp-egenskaper som grundmaterialet /Andersson 2004/. Alla provstavar har haft över 30 % krypduktilitet och jämn förlängning. Kompletterande provning pågår.

Korrosionsprovning har utförts på en locksvets /SKB 2006c/. Provet visar ingen tendens till korngränskorrosion eller spänningskorrosion på grund av restspänningar. Restspänningsmätningar har utförts på en locksvets /SKB 2006c/ och de högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 39 MPa det vill säga väl under sträckgränsen för svetsgodset.

Kemiska analyser av svetsgodset har utförts på flera locksvetsar /SKB 2006c/. Spår av nickelpartiklar från verktygstappen på upp till 20 ppm samt kopparoxidpartiklar upp till 25 ppm har analyserats.

De diskontinuiteter som förekommer i svetsar utförda med FSW är foglinjeböjning och inre håligheter /SKB 2006c/. Som helhet är svetsgodset mycket homogent och provning av svetsar



*Figur 7-6. Tvärsnitt av svets utförd med FSW som visar verktygets position.*

utförda med FSW har givit få indikationer på diskontinuiteter. Endast foglinjeböjning har återkommande detekterats med OFP i svetsarna. Storleken på denna typ av diskontinuitet har haft en utbredning i radiell ledd på upp till 5,5 mm och en tangentiell utbredning på någon eller några decimeter. I extremfall kan den dock finnas längs hela svetsvarvet. Genom att använda ett kortare verktyg eller genom att utföra svetsningen med omvänd verktygsrotations kan denna diskontinuitet reduceras till mindre än 2 mm.

## **7.5 Tillförlitlighet**

För att säkerställa att de tillverkade kapslarna motsvarar de krav som ställs på funktionen i slutförvaret ska kapseltillverkningen redovisa de tillverkade kapslarnas egenskaper så att dessa kan verifieras/valideras i säkerhetsanalysen. Underlagen till säkerhetsanalysen kommer att se olika ut för olika skeden, beroende på den tillgängliga kunskap som finns. Genomförda säkerhetsanalyser ger återkoppling till tillverkningen.

Som underlag till säkerhetsanalysen för SR-Can /Ronneteg et al. 2006/ har tillförlitligheten i det system för förslutning och kontroll som utvecklats för den framtida inkapslingsanläggningen undersökts. Vid undersökningen har förekomsten av diskontinuiteter som kan bildas i svetsarna fastställts såväl kvalitativt som kvantitativt. Dessutom har sannolikheten för att dessa kan påvisas med oförstörande provning (OFP) undersökts. Denna redovisning visar på att såväl svets- som OFP-process med marginal har tillräcklig tillförlitlighet. I dessa underlag redovisas även förslag på acceptanskriterier för såväl svets som OFP.

Svetsprocessen för FSW har verifierats i flera steg. De parametrar i svetsprocessen som bestämmer svetskvaliteten har identifierats under utvecklingsarbetet och gränserna för hur de kan tillåtas variera har fastställts liksom optimala inställningar.

Genomförda undersökningar visar att förekomsten av diskontinuiteter är beroende av svetsparametrarna. En analys och uppskattning av koppärtäckningen i svetsen vid förslutning av 4 500 kapslar visar att den inte understiger 4 cm /Ronneteg et al. 2006/.

För att bestämma OFP-processernas tillförlitlighet, dvs provningens förmåga att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter har undersökningar utförts vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung). Resultaten från tillförlitlighetsanalysen visar på att provningsmetoderna som används för kontroll av svetsen har god förmåga att detektera (tabell 7-3) och storleksbestämma (tabell 7-4) undersökta typer av diskontinuiteter /SKB 2006e, Müller et al. 2006/.

## 7.6 Kapacitet vid serieproduktion

När en kapsel är placerad i svetsmaskinen i Kapsellaboratoriet tar det cirka en timme att försluta kapseln och erfarenheten är att flera kapslar kan förslutas per dag. I dagsläget byts verktyget efter varje svetsning. Svetsmaskinen i Kapsellaboratoriet har haft nära 100 % tillgänglighet vilket är bra med tanke på att maskinen är en prototyp som bygger på ett nytt koncept.

De delar som inte är färdigutvecklade inför en framtida produktion är en automatisering av styrsystem för att minska risken för ”mänskliga fel” och att anpassa arbetet till nukleär verksamhet vilket innebär att strålskärning kommer att krävas.

Mot bakgrund av detta bedöms en svetsmaskin i inkapslingsanläggningen, som kommer att bygga på samma princip, ha kapacitet att svetsa minst en kapsel om dagen.

OFP-processernas kapacitet har testats i samband med att svetsserierna med FSW respektive EBW genomfördes vid Kapsellaboratoriet /SKB 2006e/. Undersökningen med OFP av dessa svetsar innebar att cirka 100 ultraljudprovningar och 60 röntgenundersökningar genomfördes under tre månader. Detta visar att både system och processer har tillräcklig kapacitet och tillgänglighet för att undersöka en lock- eller bottenhetsvets per dag.

**Tabell 7-3. Sammanställning av beräknad ”detekteringsförmåga” för ultraljud och digital radiografering vid undersökning av FSW-svetsar.**

Diskontinuitet	Detekteringsförmåga* (mm)	
	Ultraljud	Digital radiografering
Inre håligheter	6,3	4
Foglinjeböjning	4	

\*(a90/95) mått på metodernas detekteringsförmåga /SKB 2006e/.

**Tabell 7-4. Sammanställning av resultat från noggrannhet vid storleksuppskattning.**

Diskontinuitet	Storleksuppskattning (mm) – överskattning/underskattning	
	Ultraljud	Digital radiografering
Inre håligheter	Ingen överskattning/1,6	0,9/1,2
Foglinjeböjning	1,1/1,4	Detekteras ej

## 7.7 Kvalificering

### **Svetsning**

SKB kommer att kvalificera de svetsssystem och –procedurer som ska användas vid produktion av kapslar för att säkerställa att botten- och förslutningssvetsarna uppfyller ställda krav. I huvudsak kommer anvisningarna i standarden ISO 3834-1:2005 (ersätter SS-EN 729-1) /Svensk Standard 2005/ att följas vilka säger att: *”Svetsning är en s k speciell process vars resultat inte kan verifieras fullt ut genom efterföljande kontroll och provning av produkten och där t ex metodfel uppenbaras först vid produktens användning. Följaktligen erfordras kontinuerlig uppföljning och/eller överensstämmelse med dokumenterade procedurer för att säkerställa att föreskrivna resultat uppfylls.”*

För närvarande finns inga FSW specifika standarder tillgängliga för kvalificering av system och procedurer. En EN ISO-standard för kvalificering av utrustning, procedur och personal för FSW av aluminium håller på att tas fram av en arbetsgrupp inom IIW (International Institute for Welding). Standarden beräknas vara klar under 2008. Om lämpliga standarder saknas vid tidpunkten för kvalificering av svetsning kommer SKB att komplettera befintliga standarder alternativt efter behov ta fram egna specifikationer i samråd med systemleverantörer och annan expertis. Enligt SKB:s planer kommer ett svetsssystem avsett för produktion att köpas med kvalificering som en del av leveransen.

Inför kvalificeringen av svetsprocessen kommer svetsparametrarna att ha fastställts i ett preliminärt svetsdatablad (preliminary Welding Procedure Specification, pWPS) baserat på genomförda svetsprov och kontroller av dessa. Den lämpligaste metoden för kvalificering är, enligt EN ISO 15613 (Specifikation för och kvalificering av svetsprocedurer för metalliska material) /Svensk Standard 2004/ en kvalificering genom utfallssvetsprovning. Utfallsprovning innebär att alla detaljer om svetsprocedur och provningsresultat redovisas i ett protokoll och kvalificeringen övervakas av ett ackrediterat laboratorium. Efter fullgjord och godkänd kvalificering kommer svetsdatabladet att godkännas för användning i produktion.

### **Oförstörande provning**

För att ytterligare säkerställa kvaliteten hos svetsarna kommer även OFP av dessa att kvalificeras.

Mycket av det arbete som har utförts vid Kapsellaboratoriet med OFP av kapselns svetsar har till syfte att ta fram underlag inför kommande kvalificering. Kvalificering av OFP görs normalt enligt riktlinjer från ENIQ /European Commission 1999/. Det bör dock nämnas att eftersom svetsarna inte kan komma att inspekteras återkommande med OFP, som är normalt vid kvalificering av OFP, kommer innehållet i de eventuella tekniska motiveringarna att behöva anpassas för den aktuella provningen av svetsarna /SKB 2006f/.

Vid kvalificering av OFP används ofta så kallade tekniska motiveringar. Mycket av det arbete som har utförts vid Kapsellaboratoriet har varit inriktat mot att ta fram underlag. Exempel på detta är den genomförda studien över OFP-processernas tillförlitlighet /Ronneteg et al. 2006/ och modellering av ultraljud som pågår /SKB 2006e/.

## 7.8 Uppföljning av krav på delsystem förslutning

Nedan presenteras en uppföljning av hur väl de ställda kraven på delsystem förslutning kan uppfyllas genom att beskriva kunskapsläget, se tabell 7-5. Det arbete som återstår för att kunna uppfylla kraven inför kvalificering presenteras i framtida handlingslinjer, se avsnitt 9.3.

**Tabell 7-5. Uppföljning av krav på delsystem förslutning.**

<b>Krav</b>	Teknik – Metoder och system för att försluta och kontrollera kapslarna ska finnas.
<b>Kunskapsläge</b>	Referensmetod, friction stir welding (FSW) för förslutning är vald och demonstrerad. Alternativ eller kompletterande svetsmetod (elektronstrålesvetning – EBW) utvecklas. Provmeter utvecklade och demonstrerade.
<b>Krav</b>	Kvalitet – Svetssystemet ska generera svetsar med sådant resultat att en kassationsfrekvens på mindre än 1 % av kapslarna erhålls.
<b>Kunskapsläge</b>	Uppställda kvalitetskrav baserade på i dag angivna acceptanskriterier /SKB 2005a/ har visats kunna uppfyllas /Ronneteg et al. 2006, SKB 2006e/. Svetsning och provning sker enligt SKB:s rutiner. Att OFP kan detektera och storleksbestämma möjliga diskontinuiteter i svetsen så att konstruktionsförutsättningarna innehålls har visats /Ronneteg et al. 2006, SKB 2006e/.
<b>Krav</b>	Tillförlitlighet – Tillförlitlighet och reproducerbarhet hos system och processer ska vara tillräckligt hög för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering.
<b>Kunskapsläge</b>	En systematisk studie av tillförlitligheten i processen har visat att den minsta intakta koppartjockleken i någon svets förväntas vara 4 cm (4 500 svetsar) /Ronneteg et al. 2006/. Detekteringsförmågan och noggrannheten vid storleksbestämning av diskontinuiteter har fastställts /Müller et al. 2006/.
<b>Krav</b>	Kapacitet och varaktighet– Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid, minst 60 år.
<b>Kunskapsläge</b>	Svetssystemets tillgänglighet sedan installation samt tidsåtgången vid svetsning respektive provning möter inkapslingsanläggningens kapacitetskrav.
<b>Krav</b>	Kärnteknisk tillämpning – Svets- och kontrollsystem i inkapslingsanläggningen ska vara anpassade till radioaktiv miljö, med fjärrmanövrerad styrning och strålskärnade väggar.
<b>Kunskapsläge</b>	Hänvisning till senare skede i projekteringen av inkapslingsanläggningen.
<b>Krav</b>	Uppfylla tillämpbara myndighetskrav – Processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.
<b>Kunskapsläge</b>	Program för kvalificering /SKB 2006f/.

## 8 Kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning

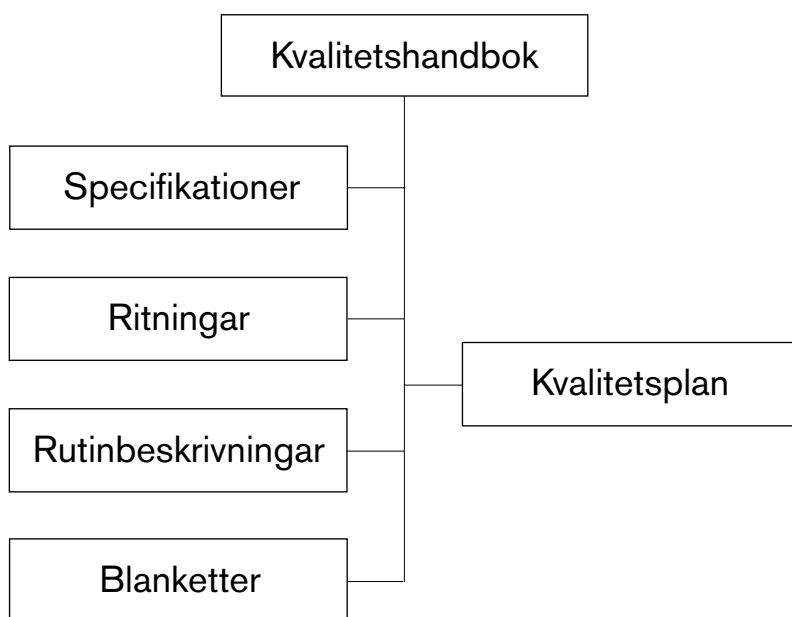
För den framtida produktionen av kapslar i kapselfabriken är leveranssäkerheten från olika leverantörer av kapselkomponenter av stor betydelse. SKB har för provtillverkningen av kapselkomponenter tagit fram ett kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005a/, som är certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001. Detta ledningssystem är tillämpligt för utveckling av kapselkomponenter men förutses kunna utvecklas successivt så att det i ett senare skede ska kunna gälla vid en kommande produktion i fullstor skala av kapslar. Systemet är samordnat med de styrande dokument som gäller för SKB:s ledningssystem generellt.

Avsikten med kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkningen är att säkerställa att:

- arbetet med kapseltillverkning blir effektivt, att beslut och resultat blir dokumenterade, deras innebörd spridd och att besluten blir effektuerade,
- information om arbetets framåtskridande sprids till alla medverkande.

### 8.1 Beskrivning av ledningssystemet

Kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkningen finns dokumenterat i en Kvalitetshandbok för kapseltillverkning som omfattar bland annat; tekniska specifikationer, ritningar, rutinbeskrivningar, blanketter och en kvalitetsplan, se figur 8-1.



*Figur 8-1. Innehåll i SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning.*

Kvalitetsplanen är en ryggrad i ledningssystemet och kan ses som en beskrivning över SKB:s och leverantörers aktiviteter inom kapseltillverkning. De tekniska specifikationerna härleds ur de tekniska krav som ställs på kapseln i konstruktionsförutsättningarna för kapseln och är tillsammans med ritningarna de mest konkreta kravdokumenten. Specifikationerna uppdateras vid behov t ex till följd av förändrad kravbild eller i samverkan med leverantörer med ledning av vunna erfarenheter från provtillverkning.

Vid varje inköp skickas alla relevanta dokument tillsammans med beställningen till leverantörer. Detta ska säkerställa att korrekt information från SKB används av leverantören. Före beställning ska en leverantör av material eller komponent som regel ha presenterat en egen kvalitetsplan som accepterats av SKB Kapseltillverkning.

Handboken och rutinbeskrivningar behandlar inte svetsning av koppar, vilket kommer att utföras i kapselfabriken och i inkapslingsanläggningen. För detta område hänvisas för provtillverkning i första hand till Kapsellaboratoriets styrande dokument. En teknisk specifikation som gäller kvalitetskrav vid svetsning av kopparbotten till rör finns dock.

Granskning av leverantörer görs från Kapseltillverkningens sida dels rent tekniskt, dels ifråga om ledningssystem. Sådana revisioner av ledningssystem har inriktats mot kvalitet och i många fall också mot miljö, då SKB:s centrala funktion medverkat. Hittills har ett 40-tal revisioner av leverantörer utförts. Viktiga leverantörer har reviderats med två eller tre års mellanrum.

## 9 Handlingslinje

De huvudsakliga förutsättningarna för den handlingslinje som presenteras här för fortsatt utveckling av tillverkning, förslutning och kontroll av kopparkapseln med syfte att kunna kvalificera tillverkning och förslutning av kapseln för använt kärnbränsle är:

- Programmet för kvalificering av system vid tillverkning och förslutning av kapsel för använt kärnbränsle /SKB 2006f/.
- SKB:s ansökanplan /SKB 2006j/ som bland annat styr leveranserna av underlag till säkerhetsanalysen.
- Ställda krav och uppföljning av hur väl dessa kan uppfyllas i dag, se avsnitten 5.7, 6.7 och 7.8.
- Kunskapsläget, vilket utgör utgångspunkt för att identifiera behoven av fortsatt utveckling för att uppfylla ställda krav.

I programmet för kvalificering av tillverkning och förslutning anges etappmålen för kvalificeringen, se avsnitt 2.2. Kort gäller att:

- År 2012 ska SKB redovisa kvalificeringsunderlagen. SKI har angett att en delredovisning av underlagen måste lämnas vid ansökan om slutförvaret enligt kärntekniklagen, dvs år 2009.
- År 2017 ska erforderliga kvalificeringar vara genomförda.

De översiktliga handlingslinjer som presenteras nedan avser de aktiviteter som bedöms krävas för att referensmetoderna ska kunna kvalificeras år 2017.

### 9.1 Delsystem insats

Komponenttillverkningen ska vidareutvecklas hos flera av leverantörerna. I den framtida tillverkningen är bedömningen att SKB kommer att behöva ett antal gjuterier för leveranser av insatser eftersom takten är satt till 200 insatser per år. De tekniska specifikationerna för insatsen har under utvecklingsarbetet successivt anpassats och fortfarande kan justeringar komma att införas.

Provningsmetoderna för insatsen behöver utvecklas när det gäller både provningskonfiguration och mekanisering. Utvecklingsarbetet kommer att bedrivas iterativt med återkoppling som ger information om förbättringsåtgärder för både provningen samt tillverkningsprocesserna.

De aktiviteter som planeras för delsystem insats finns sammanställda i tabell 9-1 och tabell 9-2.



**Tabell 9-1. Handlingslinje för tillverkning av insats.**

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Teknik	Utveckling av gjutprocessen för PWR-insatser kommer att genomföras på grund av ritningsändringar.	2006–2008
	SKB genomför ett utvecklingsprogram, hos en leverantör, som innefattar 12 st insatser. Två av dessa ska vara av PWR-typ. Fem BWR-insatser ska tillverkas under seriemässiga förhållanden.	2005–2007
Kvalitet	Kvaliteten på de insatser som tillverkas, enligt ovan, kommer att utvärderas.	2006–2007
Tillförlitlighet	Tillförlitlighetsanalys kommer att genomföras som bland annat baseras på utvärderingen av tillverkade insatser enligt ovan.	2009
Kapacitet och varaktighet	Tillräcklig kapacitet för bearbetning och provning måste finnas i kapsel-fabriken. Studie kommer att genomföras för att säkerställa detta.	2009
	Långsiktig kapacitet i produktionssystemet tillgodoses genom att alternativa kvalificerade leverantörer finns. Provgjutning hos en helt ny leverantör planeras. Syftet är att visa att tillverkningsprocessen fungerar hos ett gjuteri som tidigare inte har deltagit i utvecklingsprocessen.	
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017
	Leverantören som genomfört utvecklingsprogrammet enligt ovan ska ta fram tillräckligt med underlag för en prekvalificering av processen.	2007

**Tabell 9-2. Handlingslinje för OFP av insats med ultraljud.**

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Teknik, kvalitet, tillförlitlighet	Fastställa provningskonfigurationer. Hänsyn ska tas till förväntade diskontinuiteter och de preliminära acceptanskriterier som ska fastställas. Modellering av ljudfältet kan ge underlag för att fastställa och optimera provningskonfigurationer.	2006
	Nodularitetsstudie som syftar till att ge möjlighet att mäta nodulariteten för materialet och därigenom bestämma viktig ultraljuddata.	2006–2008
	Bestämma lämplig ytfinitet på segjärnsinsatsen för att säkerställa tillförlitlig ultraljudprovning.	2006–2007
	Genomföra tillförlitlighetsstudier för provning av segjärnsinsats.	2006–2009
	Modellering av aktuella provningskonfigurationer och dess interaktion med identifierade diskontinuiteter.	2006–2009
	Validering av modeller.	2006–2011
	Undersöka på ett metodiskt sätt vilka faktorer som är viktiga för processens tillförlitlighet.	2007–2012
Kapacitet och varaktighet	Integration i kapsel-fabriken. Förberedelse av system för en framtida kapsel-tillverkning. Erfarenheter från provningen kommer att visa på känsliga punkter.	2007–2012
	Ta fram specifikationer för framtida provningssystem som underlag för upphandling.	2008–2011
	Definiera innehåll i de dokument som ska användas som underlag för upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2008–2011
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017
	Utreda och definiera vilka underlag som krävs vid en kvalificering av OFP-processerna.	2006–2008
	Sammanställa underlag för kvalificering.	2007–2012

## 9.2 Delsystem koppär

För att kunna använda flera leverantörer i den framtida produktionen ska ytterligare en leverantör av stora koppargöt etableras. Tillverkning av ämnen till kopparrör kräver utveckling av dimensionsnoggrannhet, materialutbyte och materialstrukturen. Tillverkningen kräver också utveckling av maskinbearbetningen av kopparrören. Utveckling och förfining av metoden med smidning av kopparlock kommer att fortsätta. Smidning anses vara en möjlig produktionsmetod, vilken bedöms kunna anpassas till en serieproduktion.

Provningsmetoderna för kopparkomponenterna behöver utvecklas när det gäller både provningskonfiguration och mekanisering. Utvecklingsarbetet kommer att bedrivas iterativt med återkoppling som ger information om förbättringsåtgärder för både provningen och tillverkningsprocesserna.

De aktiviteter som planeras för delsystem koppär finns sammanställda i tabell 9-3 till tabell 9-5.

**Tabell 9-3. Handlingslinje för tillverkning av kopparkomponenter.**

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Teknik	Bottensvetsning i kapselfabriken förenklas om den utförs på en liggande kapsel. Samma svets- och konstruktionsprincip kan användas. Svetsprocess för svetsning av botten på liggande kapsel ska utvecklas, se delsystem förslutning.	2008–2010
	Geometrisk noggrannhet i processen extrusion behöver förbättras.	2006–2012
	Mätmetod för invändig mätning av kopparrör ska vidareutvecklas.	2006–2009
	Processkontroll och förfarande vid smidning av lock och botten behöver förbättras.	2006–2009
Kvalitet	Ojämn ljuddämpning i lock och botten till följd av strukturvariationer behöver åtgärdas.	2006–2009
	Anmärkning: Utredning om möjligheten att förändra utformningen på locket för att förbättra materialutbytet. Detta på grund av att locket görs extra högt av svetstekniska skäl. Utprovning av en svetsprocess som inte kräver högt lock är planerad.	2007–2008
Tillförlitlighet	Tillförlitlighetsanalys pågår.	2006–2009
Kapacitet och varaktighet	Tillräcklig kapacitet för bearbetning och provning måste finnas i kapselfabriken. SKB avser att närmare studera hur bearbetning av ett stort flöde av kopparrör kan göras.	2006–2009
	Långsiktig kapacitet i produktionssystemet tillgodoses genom att alternativa kvalificerade leverantörer finns. Alternativa metoderna smidning och dornpressning utvecklas.	2006–2010
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017

**Tabell 9-4. Handlingslinje för OFP av kopparrör med ultraljud.**

<b>Krav</b>	<b>Aktivitet</b>	<b>Tidsplan</b>
Teknik, kvalitet, tillförlitlighet	Fastställa provningskonfigurationer. Hänsyn ska tas till förväntade diskontinuiteter och de preliminära acceptanskriterier som ska fastställas. Modellering av ljudfältet kan ge underlag för att fastställa och optimera provningskonfigurationer.	2006
	Kartlägga vilken inverkan en varierande ljuddämpning i kopparröret har på ultraljudprovningens tillförlitlighet samt fastställa specifikationer gällande röret.	2006–2008
	Bestämma lämplig ytfinitet på kopparröret för att säkerställa tillförlitlig ultraljudprovning.	2006–2007
	Genomföra tillförlitlighetsstudier för provning av kopparrör.	2006–2009
	Modellering av aktuella provningskonfigurationer och dess interaktion med identifierade diskontinuiteter.	2006–2009
	Validering av modeller.	2006–2011
	Undersöka vilka faktorer som är viktiga för processens tillförlitlighet.	2007–2012
Kapacitet och varaktighet	Integration i kapsel fabriken. Förberedelse av system för en framtida kapsel-tillverkning. Erfarenheter från provningen kommer att visa på känsliga punkter.	2007–2012
	Ta fram specifikationer för framtida provningssystem som underlag för upphandling.	2008–2011
	Definiera innehåll i de dokument som ska användas som underlag för upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2008–2011
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017
	Utreda och definiera vilka underlag som krävs vid en kvalificering av OFP-processerna.	2006–2009
	Sammanställa underlag för kvalificering.	2007–2012

**Tabell 9-5. Handlingslinje – OFP av kopparlock/botten.**

<b>Krav</b>	<b>Aktivitet</b>	<b>Tidsplan</b>
Teknik, kvalitet, tillförlitlighet	Fastställa provningskonfigurationer. Hänsyn ska tas till förväntade diskontinuiteter och de preliminära acceptanskriterier som ska fastställas. Modellering av ljudfältet kan ge underlag för att fastställa och optimera provningskonfigurationer.	2006
	Kartlägga vilken inverkan en varierande ljuddämpning i kopparlock/botten har på ultraljudprovningens tillförlitlighet samt fastställa specifikationer gällande lock/botten.	2006–2008
	Bestämma lämplig ytfinitet på kopparlock/botten för att säkerställa tillförlitlig ultraljudprovning.	2006–2007
	Genomföra tillförlitlighetsstudier för provning av kopparlock/botten.	2006–2009
	Modellering av aktuella provningskonfigurationer och dess interaktion med identifierade diskontinuiteter.	2006–2009
	Validering av modeller.	2006–2011
	Undersöka vilka faktorer som är viktiga för processens tillförlitlighet.	2007–2012
Kapacitet och varaktighet	Integration i kapsel fabriken. Förberedelse av system för en framtida kapsel-tillverkning. Erfarenheter från provningen kommer att visa på känsliga punkter.	2007–2012
	Ta fram specifikationer för framtida provningssystem som underlag för upphandling.	2008–2011
	Definiera innehåll i de dokument som ska användas som underlag för upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2008–2011
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017
	Utreda och definiera vilka underlag som krävs vid en kvalificering av OFP-processerna.	2006–2008
	Sammanställa underlag för kvalificering.	2007–2012

### 9.3 Delsystem förslutning

Utvecklingsarbetet för FSW kommer att fokuseras på att produktionsanpassa process och system för användning i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen. För att nå produktionsstatus bör verktygstappen undersökas ytterligare och en helautomatiserad svetscykel bör utvecklas med hjälp av förändringar i mjukvaran. Dessutom kommer svetsgodsets långtidsegenskaper att undersökas ytterligare.

Viktiga syften med kommande arbete med OFP av kapselns förslutningssvets är att säkerställa att en tillförlitlig metod med tillräcklig kapacitet finns.

De aktiviteter som planeras för delsystem förslutning finns sammanställda i tabell 9-6 och tabell 9-7.

**Tabell 9-6. Handlingslinje för svetsning med FSW.**

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Teknik	Framtagning av svetsprocess som inte kräver förhöjt lock, så att en start- och avslutningsbit kan användas.	2007–2008
	För kapselfabriken ska process och system för svetsning av botten på liggande kapsel utvecklas. Samma svets- och konstruktionsprincip som på Kapsellaboratoriet kan användas.	2008–2010
Kvalitet	Utveckling av en optimal tapputformning för att minimera foglinjeböjning kommer att fortsätta.	2006–2007
	Teknik för reparation av diskontinuiteter i svetsen genom lokal omsvetsning kommer att utvecklas. En viktig del i utvecklingen är att kunna starta i ett utgångshål vid foglinjer utan att diskontinuiteter bildas.	2007–2008
Tillförlitlighet	Utvecklingsarbete för att öka den tillåtna processtemperaturen och bestämma verktygstappens livslängd/säkerhetsfaktor.	2006–2007
	Processens adaptiva kontroll är delvis manuell. Målet är att utveckla automatisk kontroll.	2006–2007
	När svetscykeln är färdigutvecklad finns sannolikt behov av att optimera processen med avseende på stabilitet och repeterbarhet inom ett så brett processfönster som möjligt.	2008
Kärnteknisk tillämpning	Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av svetsystemet i inkapslingsanläggningen, t ex automatiskt verktygsbyte.	2009–2010
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra program för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017

**Tabell 9-7. Handlingslinje för OFP av svetsar med ultraljud och digital radiografering.**

<b>Krav</b>	<b>Aktivitet</b>	<b>Tidsplan</b>
Teknik, kvalitet, tillförlitlighet	Optimering av OFP-processen genom utvärdering av nya tekniker, utveckling av befintlig teknik samt modellering.	2006–2010
	Undersökning av viktiga parametrar för OFP; ytfinitet, ljuddämpning, specifikationer för ultraljudutrustning m m.	2006–2011
Kapacitet och varaktighet	Ta fram specifikationer för system för ultraljudprovning respektive radiografering som underlag för upphandling och upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2007–2010
Kärnteknisk tillämpning	Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av OFP-system i inkapslingsanläggningen.	2008–2010
	Utreda OFP-utrustningars tåligghet mot radioaktiv strålning för att fastställa stråldos/dosrat.	2007–2010
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f.	2006–2017
	Utreda, definiera och sammanställa underlag för kvalificering av OFP-processerna.	2006–2012

## 10 Slutsatser

Arbetet med att identifiera alla krav på systemet för tillverkning och förslutning av kapslar och presentera nuvarande kunskapsläge på ett systematiskt sätt har resulterat i att:

- Den preliminära tekniska dokumentation som ska redovisas 2006, enligt SKB:s handlingsplan /SKB 2004a/ och program för kvalificering /SKB 2006f/, har utarbetats (denna rapport med underlagsrapporter).
- Behov av fortsatt utveckling och demonstration har identifierats och omsatts i handlingslinjer för fortsatt arbete.

Vår bedömning är att den samlade dokumentationen utgör en viktig utgångspunkt för SKB:s fortsatta arbete med att kvalificera tillverkningen och förslutningen av kapseln. Den dokumentation som SKB nu lägger fram utgör dessutom grunden för framtagningen av den dokumentation som erfordras inför ansökan för slutförvaret enligt kärntekniklagen, även om den primärt är framtagen som ett första steg i att ta fram underlag för de framtida kvalificeringarna.

## 11 Referenser

**Andersson H C M, 2004.** Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 and 175°C IM-2004-110, Institutet för Metallforskning.

**Andersson C-G, Eriksson P, Westman M, Emilsson G, 2004.** Lägesrapport kapseltillverkning. SKB R-04-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson C-G, 2005.** Utveckling av gjutna insatser. SKB R-05-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Andersson C-G, Andersson M, Erixon B, Björkegren L-E, Dillström P, Minnebo P, Nilsson K-F, Nilsson F, 2005.** Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel. Summary report. SKB TR-05-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Dillström P, 2005.** Probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel. SKB TR-05-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**European Commission, 1999.** ENIQ Methodology For Qualification (SECOND Issue) Swedish Version, ENIQ Report nr. 2 EUR 17299 SV.

**Kling H, 2001.** Fortsatt arbetsmiljöutredning vid elektronstrålesvetsning på SKB:s Kapsellaboratorium i Oskarshamn TEK01-0613, CSM Materialteknik AB.

**Müller Ch, Elagin M, Scharmach M, Bellon C, Jaenisch G-R, Bär S, Redmer B, Goebbels J, Ewert U, Zscherpel U, Boehm R, Brekow G, Erhard A, Heckel T, Tessaro U, Tscharncke D, Ronneteg U, 2006.** Reliability of nondestructive testing (NDT) of the copper canister seal weld. SKB R-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**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.

**Ronneteg U, 2004.** Ultraljudprovning, system P258.2, SKB-instruktion SDKL-010.

**Ronneteg U, 2005.** Radiografering, System P258-1, SKB-instruktion SDKL-009.

**Ronneteg U, Cederqvist L, Rydén H, Öberg T, Müller Ch, 2006.** Reliability in sealing of canister for spent nuclear fuel. SKB R-06-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2001.** FUD-program 2001. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, 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.** Elektronstrålesvetsning av kopparlock rapport 2. Statusrapport till 2003-12-31. SKB R-04-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2005a.** Kapseltillverkning. Kvalitetshandbok (pärm 1). Ritningar Specifikationer Rutiner (pärm 2). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005b.** Friktionssvetsning av kopparkapslar rapport 1. Statusrapport till 2005-06-31. SKB R-05-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006a.** Kapsel för använt kärnbränsle. Konstruktionsförutsättningar. SKB R-06-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006b.** Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning av kapselkomponenter. SKB R-06-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006c.** Kapsel för använt kärnbränsle. Svetsning vid tillverkning och förslutning. SKB R-06-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006d.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av kapselkomponenter. SKB R-06-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006e.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av svetsar. SKB R-06-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006f.** Kapsel för använt kärnbränsle. Program för kvalificering av tillverkning och förslutning. SKB R-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006g.** Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006h.** Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006i.** Climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006j.** Ansökansplan för inkapslingsanläggningen och slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-06-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKI, 2005a.** Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om mekaniska anordningar i vissa kärntekniska anläggningar. SKIFS 2005:2 (ersätter SKIFS 2000:2). Statens kärnkraftinspektion.
- SKI, 2005b.** SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av Fud-program 2004. Rapport 2005:31, Statens kärnkraftinspektion.
- SKI, 2006.** Utredning av kontrollordning för tillverkning av kapsel för slutförvar av använt kärnbränsle. SKI/109 Utredningsrapport, Statens kärnkraftinspektion.
- Ssemakula H, 2001.** Manufacturing of large copper canisters by extrusion. International journal of engineering and simulation 2, 2001.
- Ssemakula H, Ståhlberg U, 2001.** Grain size as influenced by process parameters in copper extrusion. Scandinavian journal of Metallurgy 30, (2001) 232–237 2.
- Svensk Standard, 2004.** Specifikation för och kvalificering av svetsprocedurer för metalliska material. Kvalificering genom utfallssvetsprovning, ISO 15613:2004.



**Svensk Standard, 2005.** Kvalitetskrav för smältsvetsning av metalliska material.  
Del 1: Kriterier för val av tillämplig nivå för kvalitetskrav, ISO 3834-1:2005 (ersätter SS-EN 729-1).

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

**Öberg T, 2005.** Preliminära statistiska beräkningar för demonstrationsserier för FSW och EBW processen PM-2005/2, Tomas Öberg Konsult AB.