

R-06-04

Kapsel för använt kärnbränsle

Svetsning vid 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-06-04

Kapsel för använt kärnbränsle

Svetsning vid 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 rapport redovisar svetsprocessen vid förslutning av kapseln och är en del av 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

Som ett första etappmål i SKB:s program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapseln för använt kärnbränsle görs en sammanhållen redovisning av förutsättningar och metoder för att producera kapseln. I redovisningen ingår kapselns konstruktionsförutsättningar och preliminära beskrivningar av de referensmetoder och processer som SKB tagit fram för tillverkning och förslutning av kapseln.

Denna rapport beskriver den process som utvecklats för svetsning av lock och rör i fem centimeter tjock koppar. Arbetet med att utveckla en lämplig svetsprocess för förslutning av kopparkapslarna har bedrivits vid Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Utvecklingsarbetets mål är att få fram en process som uppfyller de tekniska förutsättningarna angivna i konstruktionsförutsättningarna för kapseln och som uppfyller de krav som ställs av Inkapslingsanläggningen och slutförvaret.

SKB:s referenskapsel har ett kopparhölje bestående av tre komponenter, rör, lock och en botten som svetsas samman till ett integrerat hölje. Svetsning av lock och botten är likartade processer som dock sker under olika betingelser. I inkapslingsanläggningen där kapseln försluts svetsas locket till en kapsel innehållande radioaktivt bränsle vilket kräver säkerhetsarrangemang och fjärrstyrning av processen medan bottensvetsen utförs i normal verkstadsmiljö i den kapselfabrik som planeras i SKB:s referensalternativ för tillverkning av kapslar.

Två olika svetsmetoder har utvecklats vid Kapsellaboratoriet, friktionssvetsning (Friction Stir Welding, FSW) och elektronstrålesvetsning (Electron Beam Welding, EBW). Som referensmetod inför ansökan enligt kärntekniklagen om Clab och inkapslingsanläggning har SKB valt FSW. Därmed har fokus lagts på FSW för svetsning vid tillverkning och förslutning av kapslar. Båda metoderna kommer att utvecklas vidare för att SKB, om möjligt, ska kunna ha två metoder som uppfyller kraven för svetsning i produktion.

Ett omfattande provprogram har utförts på Kapsellaboratoriet för att testa svetssystemens och svetsprocessernas prestanda med fokus på kapacitet, tillgänglighet, tillförlitlighet och egenskaper i svetsgodset. I provprogrammet har bland annat parameterstudier, fullskalesvetsning och seriesvetsning utförts. Samtliga svetsprov har undersökts med oförstörande provning, oftast både före och efter bearbetning. Många svetsprov är också undersökta med förstörande provning för att kartlägga struktur och materialegenskaper i svetsgodset.

Resultaten från provningen har jämförts med ställda krav. SKB har visat att metoden FSW med största sannolikhet kan uppfylla alla krav i den framtida produktionen. Det som främst återstår att utveckla är en anpassning av systemet till kärnteknisk verksamhet med strålskärning samt att automatisera processen.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Denna rapport	12
2	Strategi och arbetssätt	13
3	Förutsättningar och krav	15
3.1	Krav på svetsgodset	15
3.2	Krav på svetsprocessen och svetssystemet	16
3.3	Krav på inkommande komponenter	16
4	Svetsning	17
4.1	Historik	17
4.2	Friction stir welding	18
4.2.1	Svetsprocessen	18
4.2.2	Svetsystemet	20
4.3	Elektronstrålesvetsning	21
4.3.1	Svetsprocessen	22
4.3.2	Svetsystemet	22
5	Resultat och erfarenheter	25
5.1	FSW	25
5.1.1	Svetsprocessen	26
5.1.2	Svetsystemet	27
5.1.3	Svetsgodsets materialegenskaper	27
5.1.4	Observerade diskontinuiteter	28
5.1.5	Forskning	29
5.2	EBW	29
5.2.1	Svetsprocessen	29
5.2.2	Svetsystemet	30
5.2.3	Svetsgodsets materialegenskaper	30
5.2.4	Observerade diskontinuiteter	32
5.2.5	Fortsatt utveckling	32
6	Val av referensmetod	33
6.1	Kriterier för utvärdering av svetsmetoderna	33
6.2	Utvärdering av svetsmetoderna	34
6.2.1	Svetsystem	34
6.2.2	Svetsprocess	34
6.2.3	Svetsgods	34
6.2.4	Parameterstudie	34
6.2.5	Fullskalesvetsning	35
6.2.6	Seriesvetsning	35
6.3	Sammanfattande resultat	35
7	Kommentarer till ställda krav	37
7.1	Uppföljning av krav på svetsgodset	37
7.2	Uppföljning av krav på svetsprocessen och svetsystemet	37
7.3	Uppföljning av krav på inkommande komponenter	38
7.4	Plan för kvalificering	38

8	Framtida handlingslinje	41
8.1	Svetsgods	41
8.2	Svetsprocessen och svetssystemet	41
9	Referenser	43
	Förkortningar	45
Bilaga 1	Diskontinuiteter vid FSW	47
Bilaga 2	Ritning på FSW-system för botten svets	55

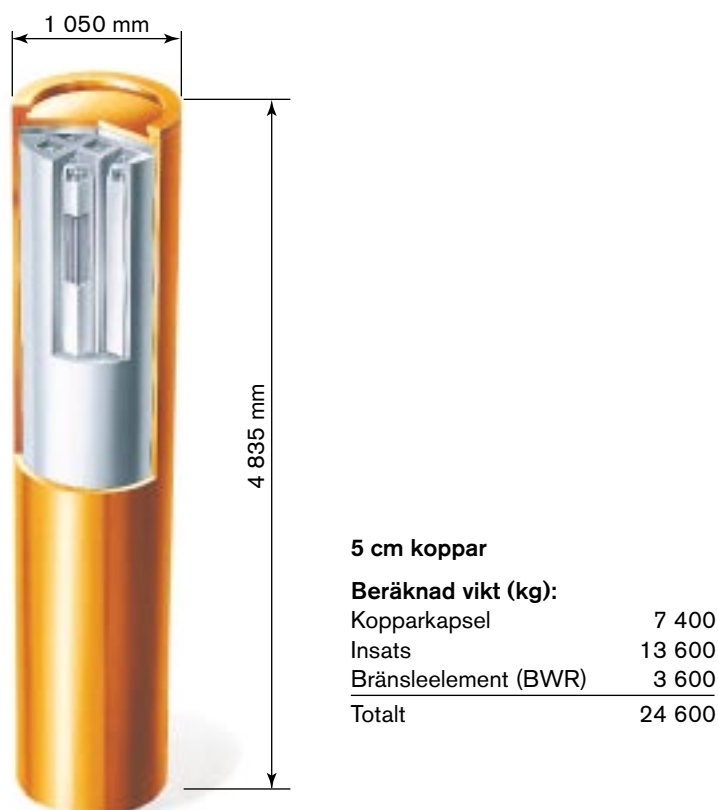
1 Inledning

Slutförvaret för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden utformas för långsiktig 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 slutförvaret har kapseln till uppgift att isolera det använda kärnbränslet från omgivningen. SKB:s referensutförning 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.

Kapseln utformas och dimensioneras för att motstå de belastningar den förväntas bli utsatt för i slutförvaret. Den ska också kunna tillverkas, hanteras, transporteras och deponeras i slutförvaret på ett säkert sätt.

För att genomföra deponering och tillverkning av kapslar krävs, förutom anläggningar för geologisk slutförvaring och inkapsling av bränslet, ett system för tillverkning av kapslar. Utvecklingen av detta system utgår från teknik som har förutsättningar att uppfylla specifikationer avseende kapselns utformning, material och kvalitet.



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

Inför en framtida driftssituation ställs krav på kvalificering av leverantörer, system och processer 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. Det första etappmålet i programmet, år 2006, är att presentera den preliminära tekniska dokumentationen av systemet för tillverkning och förslutning av kapslar. Den preliminära tekniska dokumentationen har utarbetats inom ramen för ett projekt 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.

Den preliminära dokumentationen omfattar beskrivningar av SKB:s referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapseln. Referensutformningen omfattar de metoder, system och processer som i dagsläget bedöms kunna användas för att producera kapslar som uppfyller ställda krav. SKB bedriver i flera fall utveckling av kompletterande eller alternativa metoder som också kan bli aktuella i framtiden.

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 inkapslingsanläggningen där förslutning och kontroll av svetsen görs.

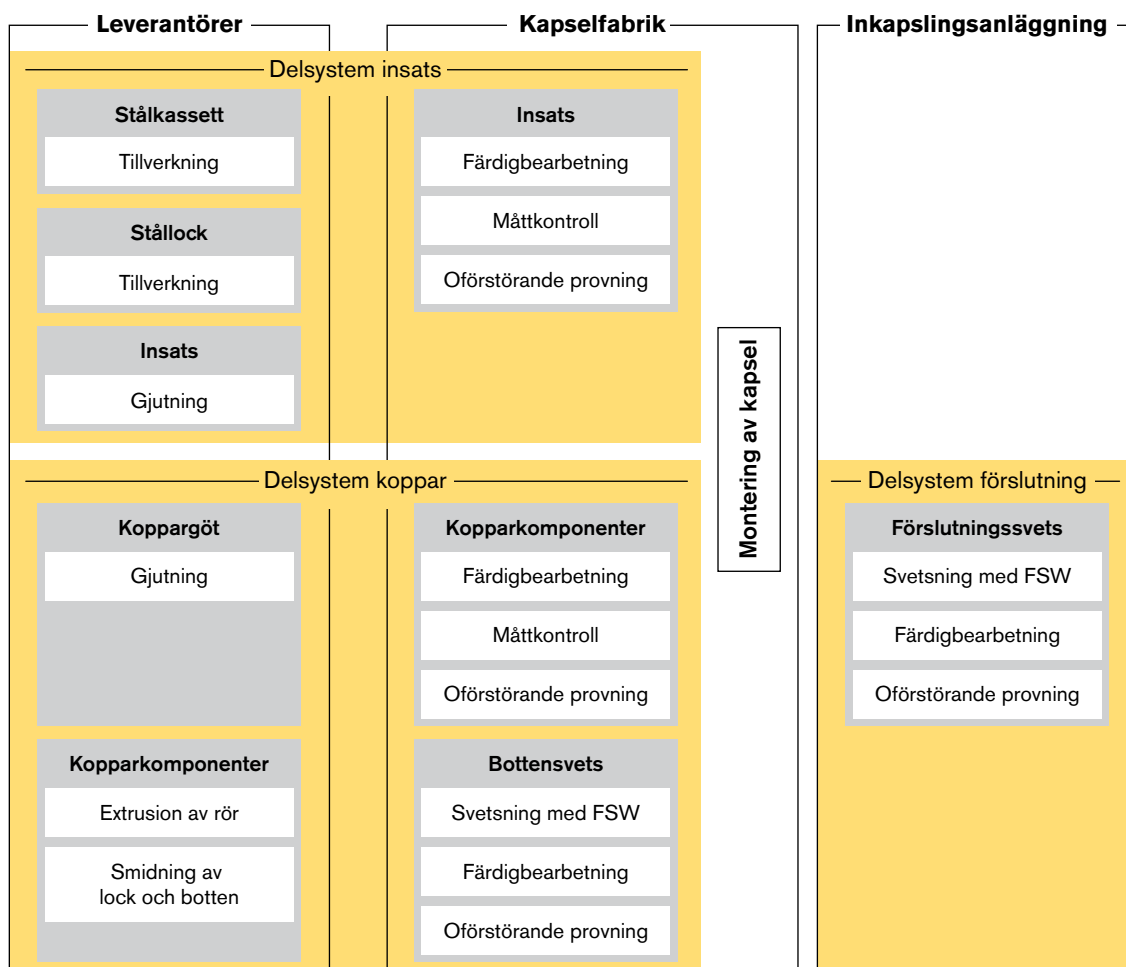
Tillverkningsmetoderna i referensutformningen är:

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

Dokumentationen, se figur 1-3, från projektet omfattar en sammanfattande huvudrapport och sex underlagsrapporter. Huvudrapporten /SKB 2006a/ beskriver de övergripande sammanhangen och logiken i dokumentationen och underlagsrapporterna omfattar:

Förutsättningar för den preliminära tekniska dokumentationen

- Konstruktionsförutsättningarna /SKB 2006b/ 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.



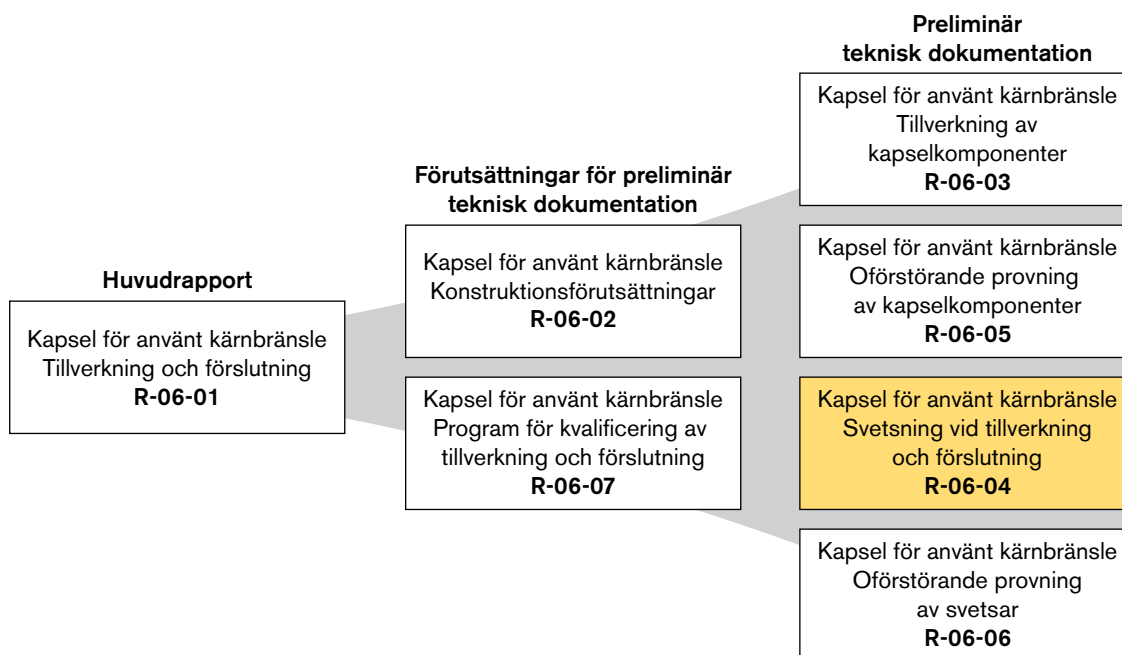
Figur 1-2. Referensutformning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapslar.

Preliminär teknisk dokumentation

- Beskrivning av tillverkningsmetoder i produktionssystemet, kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning samt kapsel fabriken /SKB 2006c/.
- Beskrivning av svetstekniken vid förslutning av kapseln och svetsning av kopparbotten samt bakgrunden till valet av referensmetod för svetsning (denna rapport).
- 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 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 redovisningen.

1.1 Denna rapport

I denna rapport redovisas processerna för svetsning av kopparbotten till röret samt förslutningssvetsning av kopparlocket. För närvarande utvecklas två alternativa svetsmetoder; friction stir welding (FSW) och elektronstrålesvetsning (EBW) vid Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Som referensmetod inför ansökan enligt kärntekniklagen om Clab och inkapslingsanläggning har SKB valt FSW. Detta innebär att SKB lagt fokus på att redovisa uppfyllande av satta krav för svetsning vid tillverkning och förslutning med FSW.

Rapporten redovisar hur SKB tar hand om de krav som ställs på svetsningen enligt följande:

1. Presentera strategi och arbetssätt (kapitel 2).
2. Härleda och beskriva de krav som ställs på kopparkapselns svetsar samt på svetsprocessen och systemet (kapitel 3).
3. Visa hur kraven kan och kommer att kunna uppfyllas genom att:
 - a Beskriva svetsprocesserna och svetsystemen som används vid Kapsellaboratoriet (kapitel 4).
 - b Presentera resultat och erfarenheter från svetsförsök vid Kapsellaboratoriet (kapitel 5).
 - c Beskriva val av referensmetod (kapitel 6).
 - d Kommentera hur långt SKB kommit i utvecklingsarbetet med att uppfylla kraven för svetsning med referensmetoden (kapitel 7).
 - e Beskriva framtida handlingslinjer för referensmetoden (kapitel 8).

2 Strategi och arbetssätt

Kapsellaboratoriet utgör centrum för utveckling och demonstration av inkapslingstekniken. Verksamhetens huvudsakliga syfte är att utveckla och verifiera processerna som krävs för svetsning och oförstörande provning samt ta fram underlag för produktionsanpassning och integrering av procedurer och utrustningar för tillverkning och förslutning av kapseln.

Processflödet i Kapsellaboratoriet är i princip utformat på samma sätt som planeras i Inkapslingsanläggningen, det vill säga arbetsstationer för uppriktning och montering av ingående komponenter, för svetsning samt för oförstörande provning (röntgen och ultraljudsprovning). Bearbetning av svetsade kapslar och provuttag har skett av externa leverantörer.

För löpande utvärdering finns utrustningar för provberedning och undersökning av makroprov. Mer kvalificerade undersökningar av svetsgodsets materialegenskaper har utförts av ackrediterade laboratorier för att erhålla en opartisk, kvalificerad och dokumenterad utvärdering.

Vid svetsning loggas svetsparametrarna och svetsförloppen videofilmas. Varje svetsning utvärderas och dokumenteras enligt etablerade rutiner.

Svetssystemen har efter installationen fortlöpande vidareutvecklats, underhållits och kalibrerats för att generera svetsar av hög kvalitet.

Erfarenheterna från svetssystemen i Kapsellaboratoriet har inarbetats i projekteringen av inkapslingsanläggningen.

Huvudmomenten i arbetet kan beskrivas enligt följande:

- Testa, utveckla och produktionsanpassa svetsprocessen och svetssystemet.
- Verifiera uppfyllande av ställda krav på svetsprocessen, svetssystemet och svetsgodsets egenskaper.
- Ta fram underlag för kvalificering vid svetsning.

3 Förutsättningar och krav

Referenskapselns kopparhölje består av ett rör, lock och botten. Svetsningen kommer i framtiden ske i två olika anläggningar, kopparbotten kommer att svetsas i kapsel fabriken medan förslutningssvetsen görs i inkapslingsanläggningen. Svetsning av lock och botten är likartade processer. Den stora skillnaden är att i inkapslingsanläggningen då locket svetsas till kapseln, innehåller den radioaktivt bränsle, vilket kräver väsentligt större säkerhetsarrangemang och fjärrstyrning av processen.

För att säkerställa att kapselns funktion i slutförvaret uppfylls, ställs det flera krav på kapselns svetsar. Dessa krav kommer från olika intressenter och kan delas in i krav på svetsgodset, och krav på svetsprocessen och svetsystemet. För att dessa krav ska uppfyllas ställer svetsprocessen i sin tur krav på de inkommande kapselkomponenterna. Kraven kommer primärt från konstruktionsförutsättningarna för kapseln samt från inkapslingsanläggningen och slutförvaret. Hur kraven för svetsning vid tillverkning och förslutning av kapseln tas om hand redovisas i kapitel 7.

3.1 Krav på svetsgodset

Konstruktionsförutsättningarna (KFK) /SKB 2006b/ där kapselns funktion som barriär i slutförvaret behandlas, ställer krav på kopparkomponenterna som svetsgodset ska uppfylla, se tabell 3-1.

Tabell 3-1. Krav på svetsgodset.

Benämning	Krav
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/svetsgods: Cr < 30 ppm Co < 30 ppm Al < 30 ppm Ni < 30 ppm O < 30 ppm
Mekanisk beständighet	Mekaniska egenskaper hos koppar/svetsgods: Duktilitet: > 30 % Krypduktilitet: > 8 %, leder till krav på Kornstorlek: < 800 µm Tilläggskrav enligt KTS001 /SKB 2005b/: P = 30–100 ppm (krypduktilitet) S < 12 ppm (svavelutskiljning)
Hantering och tillverkning	Ska uppfylla krav på provningsbarhet med oförstörande provning av eventuella diskontinuiteter i godset. Speciellt avses ultraljudsdämpning i materialet och ytfinhet. Specifikationer för mikrostruktur (t ex kornstorlek) och ytfinhet utreds. Kontroll med OFP, rengöring: Eventuella krav på ytfinhet är under utredning.

3.2 Krav på svetsprocessen och svetssystemet

Kraven som ställs på svetsprocessen och -systemet redovisas i tabell 3-2.

Ett övergripande krav är att arbetet med svetsning ska ta fram erforderliga underlag för att uppfylla innehållet i de milstolpar som är definierade i SKB:s tidsplan för kvalificering /SKB 2006f/.

Tabell 3-2. Krav på system och processer vid svetsning.

	Krav på system och processer
Teknik	Metoder och system för att försluta och kontrollera svetsarna 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 tillräckligt hög för att säkerställa säkerheten under drift och efter deponering. <i>Utvecklingsmål:</i> minst 99,9 % av levererade kapslar ska uppfylla kvalitetskraven.
Kapacitet och varaktighet	Delsystemet ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av 1 kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).
Kärnteknisk tillämpning	Svetssystemet i inkapslingsanläggningen ska vara anpassat för att arbeta i radioaktiv miljö, med strålskärmade väggar och fjärrmanövrerad styrning.
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005b/ vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.

3.3 Krav på inkommande komponenter

För att kunna uppfylla kraven i avsnitten 3.1 och 3.2 ställer svetsprocessen följande krav på inkommande komponenter, se tabell 3-3.

Tabell 3-3. Krav på inkommande komponenter.

Benämning	Krav
Fogytor	Fogytorna på kopparkomponenterna ska uppfylla angivna krav på ytfinhet. Inga skador som kan påverka svetsprocessen får finnas i fogområdet.
Material	Kopparkomponenterna ska uppfylla kravet på kemisk sammansättning enligt /SKB 2005b/.
Diskontinuiteter	Krav på tillåten förekomst av diskontinuiteter i fogområdet på kopparkomponenter som ska svetsas måste fastställas för att kravet på svetskvalitén ska uppfyllas.

4 Svetsning

Två metoder utvecklades för närvarande på Kapsellaboratoriet, friktionssvetsning (Friction Stir Welding, FSW) och elektronstrålesvetsning (Electron Beam Welding, EBW).

4.1 Historik

När SKB 1982 började undersöka möjligheten att svetsa på locket till den då tio centimeter tjocka kopparkapseln identifierades EBW som den enda möjliga svetsmetoden. The Welding Institute (TWI) i Cambridge, England utvecklade i samarbete med SKB en teknik som med hjälp av en elektronstråle i reducerat tryck smältsvetsade samman lock och rör. Det koncept som utarbetades innebar att en roterande kapsel i stående läge svetsades med en horisontell elektronstråle. Kapselns väggjocklek kunde senare reduceras till fem centimeter vilket öppnade möjligheten att även använda andra svetsmetoder. TWI tillverkade en prototypmaskin för svetsning med elektronstråle som levererades till Kapsellaboratoriet 1997 och installerades 1998. Prototypmaskinen togs i drift 1999 vilket innebar en start för utvecklingsarbetet med svetsning av kopparlok och kopparrör i full skala.

Samtidigt hade en ny metod FSW för svetsning av huvudsakligen aluminiumlegeringar uppfunnits, patenterats och utvecklats av TWI. En fördel med FSW var att materialet svetsades samman utan att smälta. Efter inledande svetsprov av upp till fem centimeter tjocka kopparplattor på en modifierad fräsmaskin 1998, utvecklade SKB och TWI en enkel prototypmaskin för provsvetsningar av kopparringar på TWI. Proven var så lovande att SKB beställde en svetsmaskin för fullskaleprov av ESAB AB i Laxå vilken installerades 2003 på Kapsellaboratoriet.

Ett tredje alternativ till svetsmetod är den teknik som utvecklades av Posiva i Finland, att med hjälp av en vertikal elektronstråle i vakuum smältsvetsa samman en roterande kopparkapsel och kopparlok i stående läge. Posiva har dock inte kommit så långt i sina försök att svetsmetodens förmåga kan bedömas än.



Figur 4-1. FSW på Kapsellaboratoriet.



Figur 4-2. EBW på Kapsellaboratoriet.

4.2 Friction stir welding

Friction stir welding (FSW) som är en variant av friktionssvetsning uppfanns 1991 på TWI. FSW är en termomekanisk fasttillståndprocess, d v s inte en smältsvetsmetod. Detta innebär att de materialförändringar som uppstår vid smältsvetsning såsom korntillväxt och segringsfenomen kan undvikas. Den resulterande strukturen vid FSW i koppar liknar den som fås vid varmformning av kapselns kopparkomponenter. I detta avsnitt ges en övergripande beskrivning av svetsprocessen och -systemet medan en mer detaljerad beskrivning finns i /SKB 2005a/.

4.2.1 Svetsprocessen

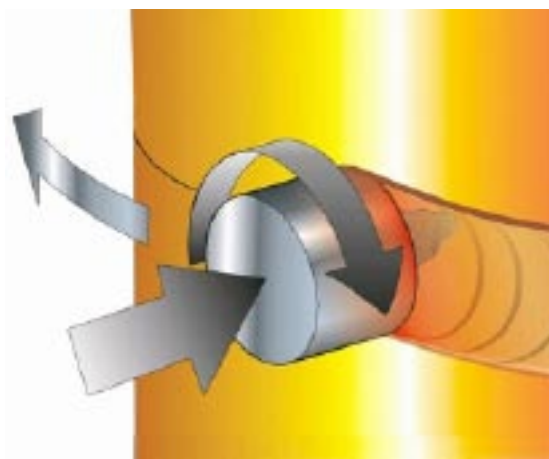
Ett roterande verktyg bestående av en konisk tapp och en cylindrisk skuldra, se figur 4-3, pressas ner i svetsgodset. Tappens funktion är att genom friktion värma upp svetsgodset och genom sin form och rotation tvinga godset att flyta runt dess form och skapa en svets. Skuldrans funktion är att genom friktion värma upp godset och förhindra att detta pressas ur svetsen. Figur 4-4 visar när verktyget förflyttas längs fogen och bildar en svets.

En anledning till att användandet av FSW inom industrin snabbt ökar är att metoden har få processparametrar vilket innebär att processen enkelt kan kontrolleras. Svetsverktyget roterar med ett specifikt antal varv per minut och förflyttar sig längs fogen med en konstant hastighet. Verktygsskuldrans position i relation till kapselytan kontrolleras sedan med en specifik nedåtriktad kraft. I de flesta fall vinklas också verktyget relativt till svetsobjektet så att verktygsskuldran ”surfar” på ytan.

Vid svetsning mäts och registreras både inmatade parametrar (spindelmotorns rotationshastighet, svetshastighet och svetskraft) och resulterande parametrar (skuldrans djup i svetsgodset, verktygstemperatur, spindelmotorns moment och kraften på verktyget i framförningsriktningen).



Figur 4-3. Svetsverktyget.



Figur 4-4. Skiss av FSW-processen.

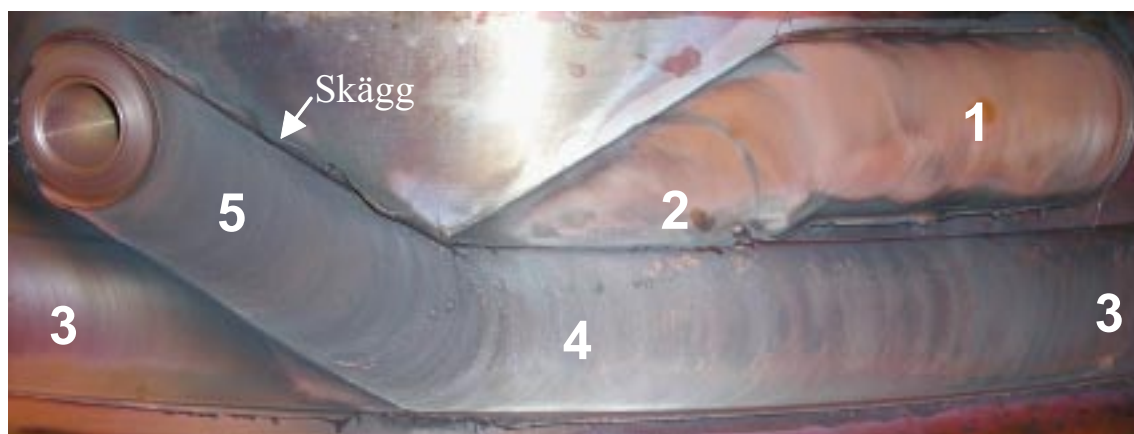
Det finns ett klart samband mellan de inmatade och resulterande parametrarna, bland annat så är produkten av spindelmotorns rotationshastighet och moment lika med värmetillförseln och påverkar därmed verktygets temperatur i hög grad. Dessa relativt elementära samband innebär att processen är enkel att tolka, utveckla och kontrollera.

Svetsmaskinen som finns på Kapsellaboratoriet har kylning av både lockklamparna som trycker locket mot röret och hållaren för verktyget. Syftet med kylningen är att skydda maskinen mot höga temperaturer och minska förslitningsskador på spindelmotorn och verktygshållaren.

En svetscykel kan delas upp i flera sekvenser, som kan ses i figur 4-5. Först borrar ett hål 75 mm ovanför foglinjen som det roterande verktyget sedan pressas in i så att kopparen värms upp. När verktygstemperaturen har nått ett specifikt värde accelereras svets-hastigheten upp till ett konstant värde som en funktion av verktygstemperaturen. Efter att accelerationssekvensen är avslutad och verktygstemperaturen har nått den så kallade jämviktstemperaturen och är stabil förflyttas verktyget ner till foglinjen. Där sker foglinjesvetsningen och efter ett helt varv förflyttas verktyget upp 75 mm där svetscykeln avslutas och det oundvikliga utgångshålet parkeras. Både accelerationssekvensen och utgångshålet bearbetas sedan bort när locket får sina slutgiltiga dimensioner.

Accelerationssekvensen är viktig då den påverkar skäggbildningen och risk för diskontinuiteter under nedgångssekvensen. De övriga sekvenserna, nr 2–5 i figur 4-5, kan sammanföras till den så kallade jämviktssekvensen där alla parametrar håller ett relativt konstant värde.

Efter att kapseln är positionerad i maskinen tar det cirka en timme att försluta kapseln inklusive inspänning av kapsel och lock (fem minuter), borrar av starthål (fem minuter) och svetsning (50 minuter). Tidsåtgång för svetsoperationen i inkapslingsanläggningen beräknas vara likvärdig. Erfarenheten från Kapsellaboratoriet är att flera kapslar kan förslutas per dag.



Figur 4-5. Sekvenser i svetscykeln: 1) accelerationssekvensen, 2) nedgångssekvensen, 3) foglinjesvetsning, 4) överlappssekvensen och 5) parkeringssekvensen.

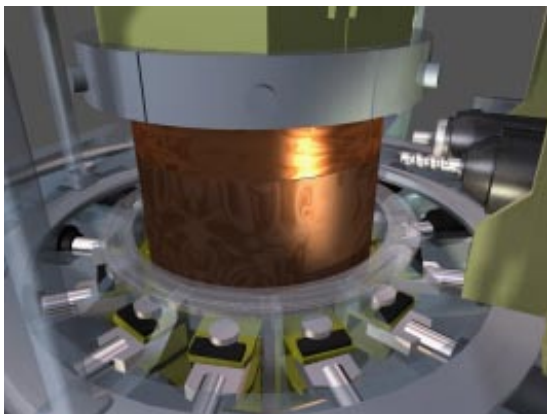
4.2.2 Svetssystemet

I början av 2002 beställdes en svetsmaskin av ESAB AB i Laxå designad för fullskalig svetsning, se figur 4-6. Maskinen är robust utformad och uppfyller industriella krav för svetsning /SKB 2004/.

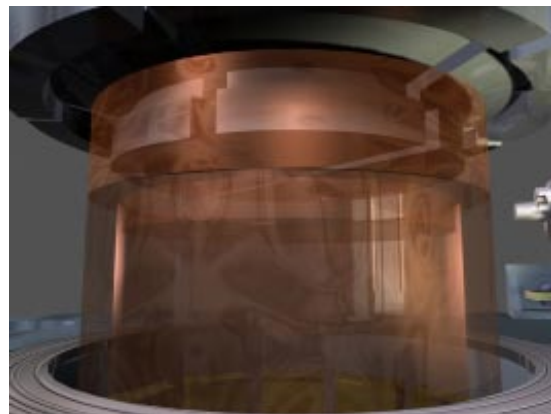
Inför svetsning hissas kapseln upp i svetsmaskinen med hjälp av lastbäraren. När kapseln har positionerats i maskinen spänns den fast med expanderande tryckbackar, se figur 4-7. Totaltrycket uppgår till 3 200 kN fördelat på 12 backar. I nästa skede expanderas lockklamparna, se figur 4-8, och ett tryck på 390 kN pressar ner locket mot kapseln. Ett starthål borras, se figur 4-9, med en separat borrenhet vid sidan av spindeln och svetscykeln startar med att verktyget förs in i hålet, enligt figur 4-10. Under processen roterar svetshuvudet runt kapseln, den maximala vridningsvinkeln uppgår till 425 grader.



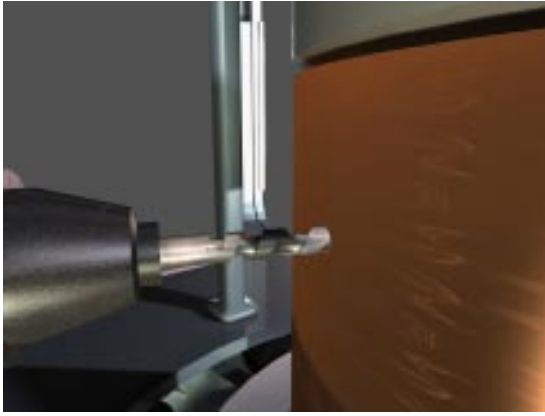
Figur 4-6. Svetsmaskinen på Kapsellaboratoriet.



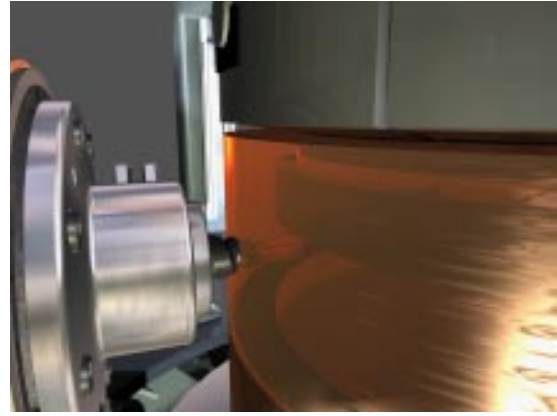
Figur 4-7. Fastspänning av kopparkapsel.



Figur 4-8. Inspänning av lock.



Figur 4-9. Borrning av starthålet.



Figur 4-10. Verktyg i starthålet.

Verktyget är en viktig komponent vid FSW av koppar, se figur 4-3. Verktyget måste tåla en hög processtemperatur liksom de höga laster som det utsätts för under svetsning. En svetscykel tar cirka 50 minuter och svetsen är cirka fyra meter lång.

En nickelbaserad superlegering (Nimonic 105) används som material i verktygstappen. Nickelbaslegeringar har goda högttemperaturegenskaper med god nötningsbeständighet och tillräcklig hållfasthet som möjliggör förslutning av kapslar. Verktugsskuldran tillverkas av en volframlegering (Densimet) med lämpliga termiska och mekaniska egenskaper för processen. Verktugstappen byts efter varje förslutningssvets medan skuldran kan återanvändas till flera svetsar.

Mjukvaran som övervakar svetsprocessen loggar alla parametrar varje tiondels sekund, det vill säga med en frekvens på 10 Hz. Under svetsförloppet visas utvalda parametrar numeriskt och grafiskt för svetsoperatören. Två videokameror visar också verktyget bakifrån och framifrån. Förutom accelerationssekvensen där svetshastigheten går upp till ett konstant värde som funktion av verktygstemperaturen sker all reglering av svetsprocessen (för närvarande genom ändringar av spindelrotationen och/eller svetskraften) manuellt av svetsoperatören. Som beskrivs i den framtida handlingslinjen i kapitel 8 är utvecklingen av en helautomatiserad svetsprocess en viktig milstolpe innan kvalificering av svetsystem och svetsprocess.

Eftersom temperaturen har visat sig vara väldigt viktig för processen görs för närvarande två separata och oberoende mätningar av denna. Sedan installationen av svetsystemet har ett termoelement placerats i verktygstappen som mäter temperaturen under hela svetsförloppet, och det är detta värde som redovisas som verktygstemperaturen i denna rapport. Under hösten 2005 installerades också en infraröd kamera för att mäta temperaturen på verktygsskuldran. Detta har visat sig vara ett utmärkt komplement till termoelementet.

4.3 Elektronstrålesvetsning

Elektronstrålesvetsning (Electron Beam Welding, EBW) är en avancerad smältsvetsmetod som bland annat används vid svetsning av komponenter med höga krav på precision och formriktighet eller vid svårsvetsade material. En detaljerad beskrivning av svetsystemet och utförda svetsförsök på Kapsellaboratoriet finns i /Claesson 2003/.

4.3.1 Svetsprocessen

Principen för metoden är att smältvärme alstras av ett bombardemang av elektroner mot svetsobjektet. Elektronerna smälter svetsobjektets yta och åter sig sedan snabbt in i materialet och bildar ett så kallat nyckelhål. Därefter förflyttas arbetsstycket så att den smälta metallen stelnar bakom elektronstrålen. Den största skillnaden jämfört med andra smältsvetsmetoder är den höga energitätheten i strålen vilket medför att mycket stort inträngningsdjup i förhållande till bredden kan åstadkommas. Svetsningen sker dessutom vanligen i vakuum vilket eliminerar risken för bildandet av oxider i svetsgodset. Svetsmaskinen har cirka 30 olika parameter som kan ställas in. De flesta parametrarna är av typen grundparametrar som inte ändras under svetsningens gång, till exempel centrering av elektronstrålen genom elektronkanonen. Viktiga parametrar som direkt inverkar på svetskvaliteten är programstyrda för att säkerställa god styrning av svetsprocessen. De viktigaste parametrarna är accelerationsspänning, strålström, svetshastighet, fokuseringslinser, strålavlänkning och kammарtryck.

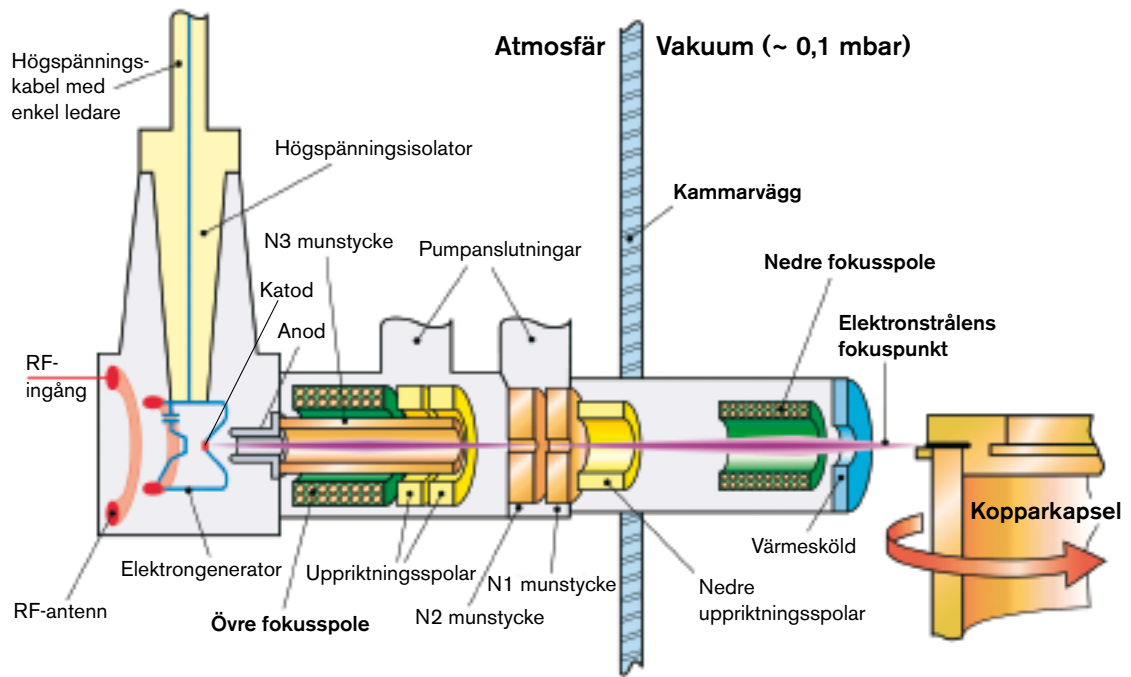
Svetscykeln för en förslutningssvets bestående av dockning i svetsstation, svetsning och utdockning från svetsstation tar cirka 2,5 timmar på Kapsellaboratoriet. I en skisserad svetsstation för produktion kan tiden ungefär halveras, baserat på att svetskammaren minskas i storlek från 180 till cirka 30 m³.

4.3.2 Svetssystemet

Efter en studie av svetsning i tjock koppar med hjälp av elektronstrålesvetsning vid TWI i England beställde SKB en prototypmaskin av TWI för svetsning i reducerat tryck. Svetsmaskinen var vid leveransen till Kapsellaboratoriet 1997 inte helt färdigutvecklad.

Elektronkanonen är konstruerad för användning vid reducerat tryck. Reducerat tryck innebär måttligt krav på vakuum, för närvarande används ett tryck av 10⁻¹ mbar. Vid konventionellt EBW-system används 10⁻³ mbar eller lägre. Konstruktionen, se figur 4-11, är unik med en indirekt upphettad diodkanon. Elektronstrålen bildas genom att ett filament hettas upp och börjar avge elektroner. Genom att en växelspanning är pålagd mellan filament och katod skapas en primär elektronstråle i riktning mot katoden som hettas upp och börjar emittera elektroner. De emitterade elektronerna accelereras upp till cirka 2/3 av ljushastigheten med hjälp av en hög accelerationsspänning och passerar därefter igenom en hålad anod. Ett system av spolar centrerar och fokuserar elektronstrålen genom elektronkanonen och vidare mot arbetsstycket.

Processen övervakas av ett datorsystem utvecklat av TWI. Systemet består av en del som registrerar och lagrar parametrar under svetsning och en del som övervakar och vid behov alarmerar eller nödstoppar systemet. Aktuella parametrar kan följas på en bildskärm under pågående svetsning. Termoelement övervakar eventuella temperaturstegringar i elektronkanonen. Processen kan också följas visuellt på två bildskärmar vid manöverkonsolen via tre kameror som är placerade inne i svetskammaren. För att kontrollera katodens tillstånd utförs mätning av elektronernas intensitet och fördelning i strålen med ett system som kallas ”beam probing”. Ett system för strålavlänkning installerades 2003. Systemet kan fördela och styra elektronerna enligt ett förprogrammerat mönster. Primärt används systemet för att omsmälta svetsytan genom att en mindre del av elektronstrålen omlänkas för efterbehandling av svetsen.



Figur 4-11. Utformning av elektronstrålesystemets elektrongenerator.

5 Resultat och erfarenheter

Detta kapitel sammanfattar resultat och erfarenheter från de svetsförsök som gjorts på Kapsellaboratoriet. För FSW redovisas arbete från april 2003 och för EBW från februari 1999.

För att förenkla svetsförsöken och minska mängden förbrukad koppar har de flesta svetsproven utförts på mindre försöksobjekt:

- Svetsning av lock på kortare rör. Rören kapas och fogbereds efter utförd svetsning för att kunna användas till ytterliggare svetsprov.
- Svetsning av lock på 20–30 cm höga ringar. Ringarna placeras på ett kortare rör som används som stöd under svetsningen.

För att kalibrera EBW-systemet innan svetsning görs regelbundet provsvetsningar på rektangulära kopparblock.

Som hjälpmedel vid utvärdering av svetsförsöken har svetsarna först undersökts med oförstörande provning (OFP) i form av ultraljud och röntgen. För kartläggning av svetsgodsets egenskaper har metallografiprov, hållfasthetsprov, krypprov, korrosionsprov, restspänningsmätning och kemiska analyser utförts.

5.1 FSW

Efter 52 lock- och bottensvetsar (locksvets innebär med insats och bottensvets innebär utan insats) kan erfarenheter från såväl svetsprocessen som svetsssystemet summeras som att dessa är robusta och stabila. Svetsförsöken har visat att repeterbarheten och tillförlitligheten i svetsprocessen är mycket hög. Fortsatt optimering av såväl process som system planeras. Av intresse är att undersöka alternativa verktygsmaterial samt att automatisera svetscykeln och så långt som möjligt eliminera den mänskliga faktorn. Statusen i dag är att det går att svetsa med stor repeterbarhet och tillförlitlighet tack vare det stora processfönstret och den tröghet mot förändringar som den adaptiva processen ger.

De 52 lock- och bottensvetsarna innefattar:

- 3 bottensvetsar och 1 locksvets på fullstora kapslar.
- 1 bottensvets och 1 locksvets på kortare rör.
- 18 bottensvetsar och 8 locksvetsar på ringar för utveckling, t ex parameterstudie.
- 20 locksvetsar på ringar för demonstrationsserie.

Undersökning av svetsresultaten visade att svetsförsöken som utförts på kortare rör eller ringar ger samma resultat som svetsning av lock/botten på fullstora kapslar både avseende svetskvalitet, process och system.

5.1.1 Svetsprocessen

Processen har i svetsförsöken varit mycket stabil och haft en hög repeterbarhet. Detta förklaras av att processen är adaptiv dvs den viktiga processtemperaturen mäts kontinuerligt och processen justeras automatiskt för att hålla temperaturen inom ett givet intervall. Inga störningar eller parameterförändringar vid svetsförsöken på Kapsellaboratoriet har påverkat svetskvaliteten vilket visar att processfönstret är relativt stort.

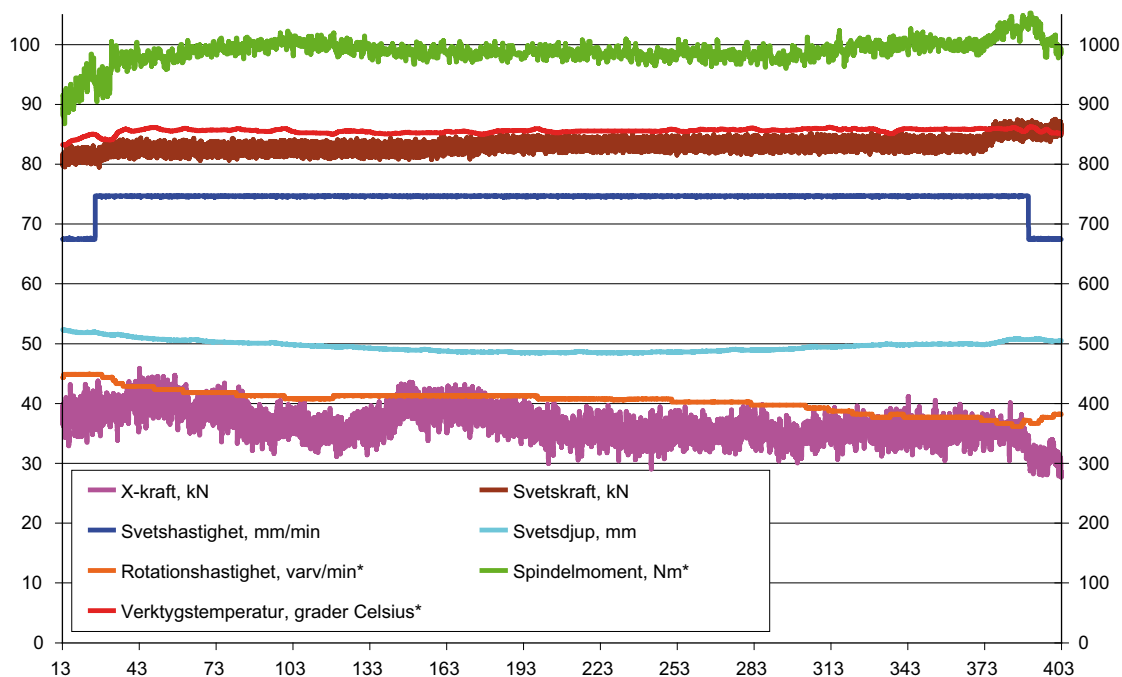
Med processfönster avses det tillåtna intervallet som inmatade parametrar och resulterande parametrar får variera inom utan att svetsresultatet påverkas.

I parameterstudien /Öberg 2005/ som genomfördes under 2004 inför seriesvetsningen (se kapitel 6) optimerades processen och ett processfönster fastställdes vid den optimerade svetshastigheten på 74,3 mm/min, se tabell 5-1.

Som tabell 5-1 visar är det utprovade tillåtna intervallet för verktygstemperaturen 790–910 °C. Detta kan jämföras med svetsdata från locksvetsar. Figur 5-1 visar svetsdata från jämviktssekvensen (sekvens 2–5 i figur 4-5) vid en förslutningssvets, vilket motsvarar en sträcka på 390 grader eller 45 minuter. Verktygstemperaturen varierar mellan 835 och 860 °C det vill säga 25 °C jämfört med processfönstret på 120 °C.

Tabell 5-1. 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



Figur 5-1. Svetsdata från locksvets. * innebär värde på högra y-axeln.

5.1.2 Svetssystemet

Svetssystemet på Kapsellaboratoriet har haft nära 100 % tillgänglighet sedan installation, vilket är mycket bra med tanke på att det bygger på ett nytt koncept. Mot bakgrund av detta bedöms de planerade maskinerna i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen, vilka bygger på samma konstruktionsprinciper, också kunna uppfylla produktionskraven på minst en svets per dag.

Vid svetsförsök före och efter service och underhåll har svetsmaskinen visat sig vara mycket stabil och ingen påverkan på resulterande svetsparametrar eller svetskvalitet har observerats.

Efter varje svetsning byts regelmässigt verktyget ut och normala variationer i utförandet av verktyget har inte kunnat kopplas till påverkan på svetsresultatet. Även när det gäller övriga komponenter som bytts ut så fungerar systemet väl efter bytet. Delar som inte är färdigutvecklade med tanke på en produktionssituation är verktyget där man kan öka och fastlägga säkerhetsfaktorn för livslängden, och en automatisering av styrsystemet för att minska den mänskliga faktorn.

5.1.3 Svetsgodsets materialegenskaper

Diverse tester har genomförts på locksvetsar utförda vid Kapsellaboratoriet för att bedöma svetsarnas långtidsegenskaper samt för att bedöma hur väl svetsgodset uppfyller ställda kraven på kopparkapseln:

Metallografi

Svetsgodsets struktur med fokus på kornstorlek har undersökts i ett femtiotal makrosnitt, se figur 5-2. Samtliga makrosnitt har en finkornig rekristalliserad struktur med en kornstorlek på cirka 75 μm /Andersson 2004/. Kornstorleken är i nivå med grundmaterialet eller till och med något finare.

Hållfasthetsprovning

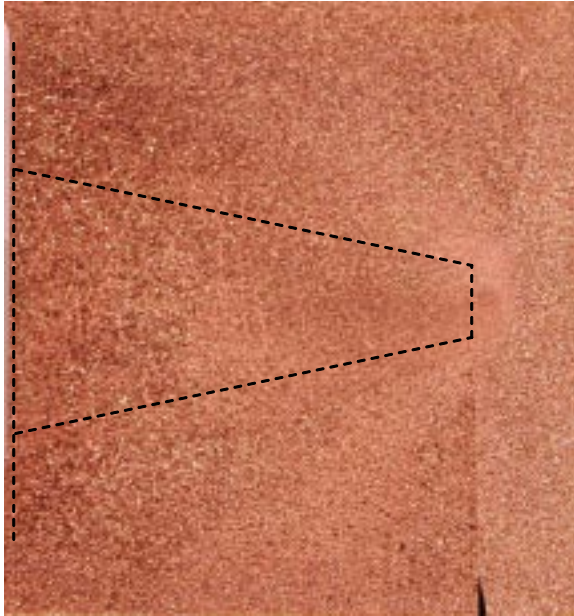
Dragprovning har utförts på 45 och 20 mm breda plattprovstavar samt på runda provstavar med en diameter på 10 mm /Claesson 2005/. Resultatet visar att svetsar utförda med FSW har liknande hållfasthetsegenskaper som grundmaterialet, brottgräns (206–209 MPa), sträckgräns (68–82 MPa) eller brottförlängning (48–53 %). Provstavarna som varit uttagna ur både överlappssekvensen och foglinjesvetsningen från flera locksvetsar, har gått till brott i den värmepåverkade zonen utanför svetsen.

Krypprovning

Krypprovning med olika belastning och temperatur visar att svetsgodset har liknande krypegenskaper som grundmaterialet /Andersson 2004/. Alla provstavar har haft över 30 % krypduktilitet och jämn förlängning. Ytterligare krypprovning pågår.

Korrosionsprovning

Korrosionsprovning har utförts på en locksvets /Gubner 2004/. Provet visar ingen tendens till korngränskorrosion eller spänningskorrosion på grund av restspänningar.



Figur 5-2. Tvärsnitt från locksvets som även visar verktygets position.

Restspänningsmätning

Restspänningsmätning har utförts på en locksvets /Jaensson 2005ab/. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 39 MPa dvs väl under sträckgränsen för svetsgodset.

Kemiska analyser

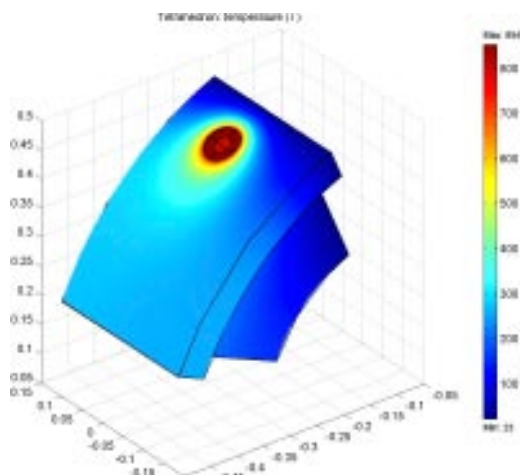
Kemiska analyser av svetsgodset har utförts på flera locksvetsar /Salonen 2004/. Spår av nickelpartiklar från verktygstappen på upp till 20 ppm samt kopparoxidpartiklar upp till 25 ppm har analyserats.

5.1.4 Observerade diskontinuiteter

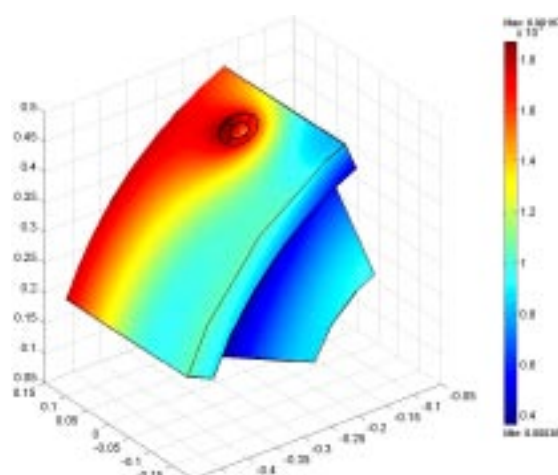
Både oförstörande och förstörande provning har genomförts för att fullständigt utvärdera integriteten hos lock- och bottenhetsarna. Oförstörande provning (OFP) har utförts med röntgen och ultraljudsprovning före och efter bearbetning. Dessutom har förstörande provning i form av diverse mikroskopstudier och kemisk analys av svetsgodsets sammansättning utförts. De diskontinuiteter som har påvisats finns redovisade i bilaga 1.

Som helhet är svetsgodset mycket homogent. Endast en typ av återkommande diskontinuitet har detekterats med OFP i svetsarna. Det är en så kallad foglinjeböjning som uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen ut mot ytan. Det är ofta vid överlappssekvensen som tappens spets kommer för djupt. Foglinjeböjningen kan reduceras avsevärt med ett kortare verktyg, vilket har visats i fyra locksvetsar som utfördes efter demonstrationsserien. Även materialflödets riktning kan ändras. Prov utförda med omvänd verktygsrotation (spegelvänd verktygstapp) har visat att denna diskontinuitet kan minimeras. En rimlig uppskattning som nu kan göras är att i en produktion kan foglinjeböjningen begränsas till en radiell utbredning av två millimeter.

Förutom foglinjeböjningen har endast en typ av diskontinuitet, inre håligheter, påvisats med OFP dock endast om svetsparametrarna varit utanför processfönstret. Svetsning med svetsparametrar utanför processfönstret har utförts med avsikt att skapa diskontinuiteter som kan undersökas vid utveckling av tekniken för oförstörande provning.



Figur 5-3. Temperaturdistribution.



Figur 5-4. Termisk expansion.

5.1.5 Forskning

Ett arbete /Källgren 2005/ med att modellera, både analytiskt och numeriskt, och karaktärisera FSW i fem centimeter tjock koppar påbörjades 2001 på Kungliga Tekniska Högskolan, KTH.

Bland annat har temperaturdistribution, materialflöde och termisk expansion predikterats för en fullskalig förslutningssvets i 2D och 3D och modelleringsresultaten, se figur 5-3 och 5-4, överensstämmer med experimentella temperaturmätningar.

5.2 EBW

För utveckling av svetsprocess och svetsystem har 63 lock svetsats och cirka 200 svetsar utförts i testblock. Svetsförsöken har visat att repeterbarheten och tillförlitligheten i svetscykeln är hög och att parameterfönstret är brett. En annan slutsats är att svetsystemet behöver fortsatt utveckling mot ökad robusthet för att nå produktionsstatus.

De 63 locksvetsarna är fördelade enligt:

- 1 förslutningssvets på fullstor komplett kapsel.
- 3 förslutningssvetsar på avkortade rör med insats.
- 3 svetsningar av lock på ringar för parameterstudier.
- 36 svetsningar av lock på avkortade rör alternativt ringar för utveckling av svetsprocess och svetsystem.
- 20 svetsningar av lock på ringar för demonstration av seriesvetsning.

5.2.1 Svetsprocessen

Parameterstudierna visar att processen är robust inom det provade toleransområdet och att lämpligt processfönster kan definieras. Fullskaleprovet visar ingen skillnad i kvalitet eller penetration jämfört med svetsning i korta rör utan insats. Serieprovet som utförts med samma parameterinställning visar att svetsprocessen är stabil och ger likformigt svetsresultat. Ett byte av katod under seriens gång har inneburit en viss förändring av svetsroten.

Katoderna som för närvarande tillverkas manuellt har ojämn kvalitet vilket påverkar svetsningen.

5.2.2 Svetssystemet

Att svetssystemet inte var färdigutvecklat vid leveransen har avspeglat sig i både problem med bristande tillförlitlighet och avsaknad av viktiga funktioner. Systemet har utvecklats och förbättrats till ett för närvarande fungerande svetssystem och efter installation av ett system för strålavlänkning 2003 har svetskvaliteten avsevärt förbättrats. Tillförlitligheten har också förbättrats men ytterligare behov av utveckling finns för att uppnå den robusthet som krävs av ett svetssystem avsett för produktion.

Några viktiga iakttagelser under utvecklingsarbetet:

- Nuvarande system är en prototyp och uppfyller inte kraven för ett produktionssystem.
- Ytterligare utveckling av elektronkanon krävs där komponenterna katod och system för strålgenomgång ännu inte är färdigutvecklade.
- Oacceptabelt långa tidsrymder har åtgått för reparationer och modifieringar av systemet.
- System för att rikta elektronstrålen mot den dolda foglinjen krävs för säker svetsning i produktion.

5.2.3 Svetsgodsets materialegenskaper

Diverse tester har genomförts på locksvetsar utförda på Kapsellaboratoriet:

Metallografi

Samtliga locksvetsars metallografi har undersökts i makrosnitt på Kapsellaboratoriet, se figur 5-5. Två locksvetsar har undersökts med fokus på struktur och kornstorlek /Håkansson 2004/. Undersökningen visar att svetsgodsets har normal stelningsstruktur med typiska pelarkorn vid smältgränsen. Kornstorleken ligger i intervallet 353–639 μm med medelvärde 535 μm . Hårdheten i svetsgods och grundmaterial har uppmätts i en locksvets med resultatet 45HV i svetsgodset, 50HV i locket och 67HV i röret.

Hållfasthetsprovning

Dragprovning har utförts på två tidiga locksvetsar samt från fyra locksvetsar ur svetsserien. Två olika typer av provstavar har använts, platta provstavar med en bredd på 20 mm och runda provstavar med en diameter på 10 mm /Claesson 2005/. Resultatet visar att svetsar utförda med EBW har något lägre hållfasthetsegenskaper jämfört med grundmaterialet, brottgräns (179–187 MPa), sträckgräns (47–66 MPa) eller brottförlängning (29–33 %). Provstavarna som varit uttagna ur både överlappsområdet och enkelsvetsområdet har gått till brott i svetsgodset.

Krypprovning

Krypprov /Andersson 2004/ har utförts på en tidig locksvets, vilken inte är representativ för nuvarande svetssteknik. Locksvetsningen har utförts med flera svetsvarv vilket medfört att kornstorleken i svetsgodset blivit mycket stor, cirka 2 000 μm jämfört med 535 μm som är medelvärdet med dagens teknik som utförs i ett varv. Trots att den stora kornstorleken verkar nedsättande på kryphållfastheten är marginalen mot sprickbildning mycket god. Krypduktiliteten i svetsgods är mätt till 20–30 %.

Korrosionsprovning

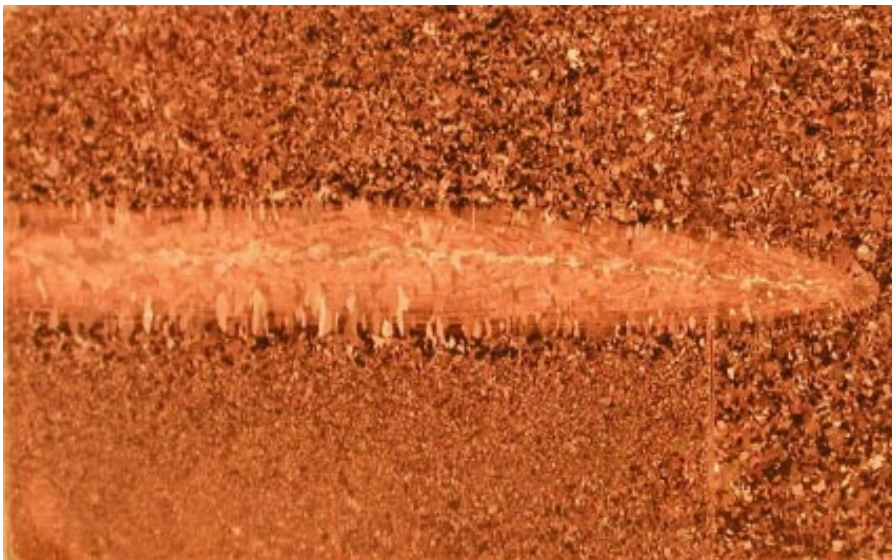
Korrosionsprov /Gubner 2004/ har utförts på fyra tidigt utförda locksvetsar. Proven visar att det är högst osannolikt att korngränskorrosion är ett problem för den långsiktiga säkerheten i slutförvaret.

Restspänningsmätning

Mätning av restspänningar har utförts /Jaensson 2005ab/ på en locksvets. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 33 MPa dvs väl under sträckgränsen för svetsgodset.

Kemiska analyser

Kemiska analyser av svetsgodsets sammansättning har utförts på flera locksvetsar /Håkansson 2004/. Den kemiska sammansättningen av svetsgodset är jämförbar med lock och rör. Förekomsten av oxid har även undersökts med hjälp av ett väteförspädningstest på en locksvets /Salonen 2004/ som visade att svetsgodset inte innehåller oxid.



Figur 5-5. Tvärsnitt från locksvets.

5.2.4 Observerade diskontinuiteter

Under utvecklingsarbetet med svetsprocessen och svetsmaskinen har ett antal olika typer av diskontinuiteter förekommit främst i form av inre håligheter, rotfel och små porer. Efter utveckling av system och process är numera svetsgodsets kvalitet generellt mycket god och vanligen indikeras endast mindre diskontinuiteter. Om maskinproblem uppstår under pågående svetsning kan lokalt större diskontinuiteter bildas i form av håligheter i svetsgodset.

5.2.5 Fortsatt utveckling

För EBW kommer utvecklingsarbetet att fokuseras på att processen och systemet ska uppnå den tillförlitlighet och tillgänglighet som krävs i produktion. Prototypsystemets svagheter är uppmärksammade, dokumenterade och delvis åtgärdade. Det som återstår är vissa utvecklingsarbeten och förbättringar på svetsystemet, följt av förnyade provningar samt en del arbete med utveckling av processen. Arbetet som beräknas pågå under perioden 2006–2008 kan i korthet beskrivas enligt följande:

- Metod för precisionstillverkning av katoder kommer att utvecklas i samarbete med TWI för att åstadkomma en säker strålgenomgång och ett svetsgodset utan rotfel.
- Droppkanten kommer att förstärkas för att säkrare hindra svetsmältan från att rinna ut från fogen. I första hand ska droppkanten bearbetas fram från befintligt lockämne.
- Strålmönstret ska optimeras mot mindre mängd svetsstrut för att undvika driftstörningar och minska mängden kopparkapslar i svetskammaren.
- Start och överlappssekvenserna ska utvecklas för att minska risken för diskontinuiteter i överlappningsområdet.
- Förslag på uppgradering av datorer för enklare styrning av processen och tätare loggning av parametrarna kommer att tas fram.
- Teknik för reparation av oacceptabla diskontinuiteter i svetsen genom lokal omsmältning av svetsgodset kommer att utvecklas. En sådan reparationsteknik är synnerligen gynnsam och kostnadseffektiv jämfört med att skära loss locket, kassera kopparkapseln, ladda om en ny kapsel och svetsa på ett nytt lock.
- Teknik för automatisk inställning av strålläget i position för svetsning kommer att studeras.
- Efter avslutat utvecklingsarbete planeras någon form av svetsserie för att demonstrera att processen och systemet uppnått den tillförlitlighet och tillgänglighet som krävs i produktion.

6 Val av referensmetod

Efter en noggrann analys av alla utförda svetsförsök med de två svetsmetoderna har SKB valt FSW som referensmetod. De viktigaste kriterierna för valet av metod är svetsprocessens och svetsystemets goda robusthet och tillförlitlighet samt uppnådd kvalitet vid seriesvetsning och övriga svetsar. En annan fördel är att den icke smältande svetsprocessen ger mycket goda materialegenskaper i svetsgodset.

Val av FSW som referensmetod innebär inte att utvecklingsarbetet med EBW avslutas utan båda metoderna kommer att utvecklas vidare för att SKB om möjligt, ska kunna ha två metoder som uppfyller kraven för svetsning i produktion.

6.1 Kriterier för utvärdering av svetsmetoderna

För att genomföra utvärderingen identifierades ett antal olika kriterier över metodens tillämplighet i SKB:s kommande anläggningar. De viktigaste kriterierna, vilka redovisas i denna rapport, kan sammanfattas enligt följande:

- Svetsystem och svetsprocess; uppnådd och förväntad robusthet, tillförlitlighet och repeterbarhet i en produktionssituation.
- Svetsgodset; uppnådd och förväntad kvalitet hos de producerade svetsarna.
- Systemets och processens lämplighet i inkapslingsprocessen.
- Kostnader och miljöeffekter.

Till detta ska läggas de erfarenheter och iakttagelser som gjorts under utvecklingsarbetet som kan anses vara relevanta i utvärderingen.

För att få fram underlag inför valet har ett program genomförts under senare delen av 2004 och början av 2005 med syfte att fastställa metodernas produktionsegenskaper. Programmet har innefattat följande huvudpunkter:

- Parameterstudie; undersökning av svetsprocessernas robusthet med avseende på tillåtna variationer hos processparametrarna.
- Fullskalesvetsning; verifiering av att processen kan utföras i full skala genom förslutningssvetsning av en komplett kapsel.
- Seriesvetsning; demonstration av seriemässig kapacitet och resulterande kvalitet genom svetsning av 20 lock.

Seriesvetsningen har även haft till syfte att:

- Visa den kvalitet som kan åstadkommas under seriemässiga former i nuvarande utvecklingsläge.
- Fastställa om processerna kan drivas under seriemässiga former.
- Identifiera eventuella tillkortakommanden hos system och processer.
- Skapa en trovärdighet i SKB:s val av referensmetod.

6.2 Utvärdering av svetsmetoderna

Båda svetsmetoderna har utvärderats mot de kriterier som redovisats i föregående avsnitt. Utförligare beskrivningar av svetsmetodernas resultat mot kriterierna finns i kapitel 5.

6.2.1 Svetssystem

FSW-systemets tillgänglighet har varit mycket god och inte utgjort någon begränsning i utvecklingsarbetet. Prestandan har varit tillräcklig för det första utvecklingskedet.

EBW-systemets tillgänglighet under utvecklingsfasen har begränsats av tekniska problem samt otillräckliga prestanda hos det ursprungligt levererade systemet. Under slutfasen av projektet har en rimlig tillgänglighet uppnåtts och systemets prestanda har varit tillräcklig för att kunna driva utvecklingsarbetet med processen.

6.2.2 Svetsprocess

FSW-processen har visat sig vara enkel att applicera på kopparkapseln, vilket kan förklaras av det grundläggande fysikaliska förhållandet att processen äger rum i fast fas. Erfarenheterna är att även med ganska stora forcerade störningar i processen kan ett godtagbart resultat åstadkommas. Som exempel kan anges att metoden fungerar trots att millimeterstora spalter placerats i fogen. Det har varit svårt att störa processen för att åstadkomma diskontinuiteter, dvs processen är robust. En begränsning i processfönstret utgörs av den högsta tillåtna processtemperaturen vilken sätts av verktyget.

EBW-processen är mycket nära kopplad till EBW-systemet. Processutvecklingen har därför inneburit motsvarande systemutveckling. Införandet av strålscillering har inneburit att problemet med uttrinning av smälta har kunnat bemästras även om lösningen mot uttrinning i överlappsområdet ännu inte fått en helt tillfredställande lösning. Rotfelen har kunnat åtgärdas genom optimering av elektronstrålens form som i sin tur beror av katodutformningen.

6.2.3 Svetsgods

Svetsgodsets egenskaper påverkas av svetsprocessen. FSW är en process som sker i fast form vilket medför att svetsgodset behandlas gynnsamt till en finkornig struktur liknande grundmaterialet enligt figur 5-2. EBW är en smältsvetsprocess vilket medför att svetsgodset antar en grovkorning gjutgodslignande struktur enligt figur 5-5.

Båda svetsprocesserna resulterar i svetsgods (se kapitel 5) som uppfyller ställda krav. FSW klarar kraven med större marginal än EBW förutom när det gäller föreningar.

6.2.4 Parameterstudie

För att undersöka processernas robusthet har så kallade faktorförsök genomförts. Syftet har varit att undersöka om mindre förändringar av en eller flera av de inställda processparametrarna skulle kunna påverka processerna. För båda metoderna gäller att processen fungerar inom ett betryggande parameterintervall.

6.2.5 Fullskalesvetsning

Båda metoderna har verifierats i fullskala på en kapsel med insats, FSW med en botten- och locksvets på den så kallade C12-kapseln och EBW med en locksvets på C8-kapseln. Det finns inget i svetsprocessen eller svetskvaliteten som tyder på någon skillnad i resultatet mellan de korta ringar som används i utvecklingsarbetet och förslutning av kompletta kapslar.

6.2.6 Seriesvetsning

Svetsning av 20 lock under seriemässiga former har genomförts med båda svetsmetoderna.

I FSW-serien innehöll samtliga svetsar en foglinjeböjning som reducerade korrosionsbarriären med som mest fem millimeter. Inga diskontinuiteter i övrigt har kunnat påvisas i svetsarna med OFP.

I EBW-serien fick ett avbrott göras på grund av att ett fel uppstod i den enda tillgängliga katoden. Felet ledde till att två svetsar misslyckades. En ersättningskatod från TWI anskaffades. Med denna katod erhöles svetsar av godtagbar men inte optimal kvalitet. Efter katodbytet uppstod rotfel som kan kopplas till en spetsig elektronstråle. Ett mindre antal indikationer som tyder på små diskontinuiteter har även påvisats.

6.3 Sammanfattande resultat

Inför metodvalet sammanfattades uppnådda och förväntade resultat, se tabell 6-2.

Tabell 6-2. Utvärdering av svetsmetoder, sammanfattande resultat.

Kriterium	EBW	FSW
Status svetsssystem – 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

Enligt redovisning i tabell 6-2 uppfyller FSW samtliga krav både avseende process och system. Beträffande EBW uppfylls ställda krav på processen men kraven på systemets tillförlitlighet och demonstrerad svetskvalitet uppfylls inte. Antagna kostnader ligger på liknande nivåer och miljöeffekterna bedöms också vara likvärdiga. För FSW återstår det att anpassa systemet för arbete i radioaktiv miljö och för EBW att förbättra systemets tillförlitlighet.

Med hänsyn till de resultat som sammanfattats här valde SKB FSW som referensmetod i maj 2005.

7 Kommentarer till ställda krav

I detta kapitel kommenteras hur de krav som ställts upp på svetsssystemet, svetsprocessen och svetsgodset i kapitel 3 har uppfyllts för FSW vid svetsförsök på Kapsellaboratoriet eller kommer att uppfyllas i en produktionsanläggning.

7.1 Uppföljning av krav på svetsgodset

I tabell 7-1 kommenteras hur kraven på svetsgodset som beskrivs i tabell 3-1 uppfylls i nuvarande skede av svetsutvecklingen.

Tabell 7-1. Uppföljning av krav på svetsgodset.

Benämning	Kunskapsläge
Kemisk beständighet	Korrosionsprov visar att det är högst osannolikt att korngränskorrosion kan bli ett problem för den långsiktiga säkerheten i slutförvaret. Se avsnitt 5.1.3.
Mekanisk beständighet	Svetsgodset har undersökts avseende metallografi, hållfasthets- och krypegenskaper, föroreningar och restspänningar. Svetsgodset har en finkornig rekristalliserad struktur som uppfyller ställda fordringar. De mekaniska egenskaperna är jämförbara med grundmaterialet. Se avsnitt 5.1.3.
Hantering och tillverkning	Svetsgodset uppvisar en homogen struktur med hållfasthet i nivå med grundmaterialet och uppfyller med marginal kravet på lyftbarhet i locket av komplett kapsel. Se avsnitt 5.1.3. och /SKB 2006b/.
Provbarhet	Provbarhet av svetsarnas kvalitet med oförstörande provning med såväl ultraljud som röntgen är generellt god och väl utprovad på Kapsellaboratoriet, se /SKB 2006e/.

7.2 Uppföljning av krav på svetsprocessen och svetsystemet

I tabell 7-2 kommenteras hur kraven på svetsprocessen och svetsystemet som beskrivs i tabell 3-2 uppfylls i nuvarande skede av svetsutvecklingen.

Tabell 7-2. Uppföljning av krav på system och processer vid svetsning.

Benämning	Kunskapsläge
Teknik	Svetsprocessens, svetsystemets och OFP metodernas tillämpbarhet är demonstrerade.
Kvalitet	Uppställda kvalitetskrav baserade på idag angivna acceptanskriterier /SKB 2005b/ har visats kunna uppfyllas /Ronneteg et al. 2006/. Svetsning sker enligt SKB:s rutiner.
Tillförlitlighet	En systematisk studie av tillförlitligheten i processen har visat att den minsta intakta kopparkopplingsleken i någon svets förväntas vara 4 cm (baserat på 4 500 svetsar) /Ronneteg et al. 2006/.
Kapacitet och varaktighet	Med hänsyn till tidsåtgången vid svetsning (ca 1 timma) och svetsystemets tillgänglighet, bedöms kravet på en kapsel per dag under lång tid kunna uppfyllas, se avsnitt 5.1.2. Kravet på max 1 % kassation i produktion bedöms kunna uppfyllas, se avsnitt 6.2.6.
Kärnteknisk tillämpning	Hänvisning till senare skede i projekteringen av inkapslingsanläggningen. Se även avsnitt 6.3.
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Program för kvalificering, se avsnitt 7.4 och /SKB 2006f/.

7.3 Uppföljning av krav på inkommande komponenter

I tabell 7-3 kommenteras hur kraven på inkommande komponenter som beskrivs i tabell 3-2 uppfylls i nuvarande skede av svetsutvecklingen. Alla komponenter som använts på Kapsellaboratoriet har uppfyllt de krav som ställts för svetsning.

Tabell 7-3. Uppföljning av krav på inkommande komponenter.

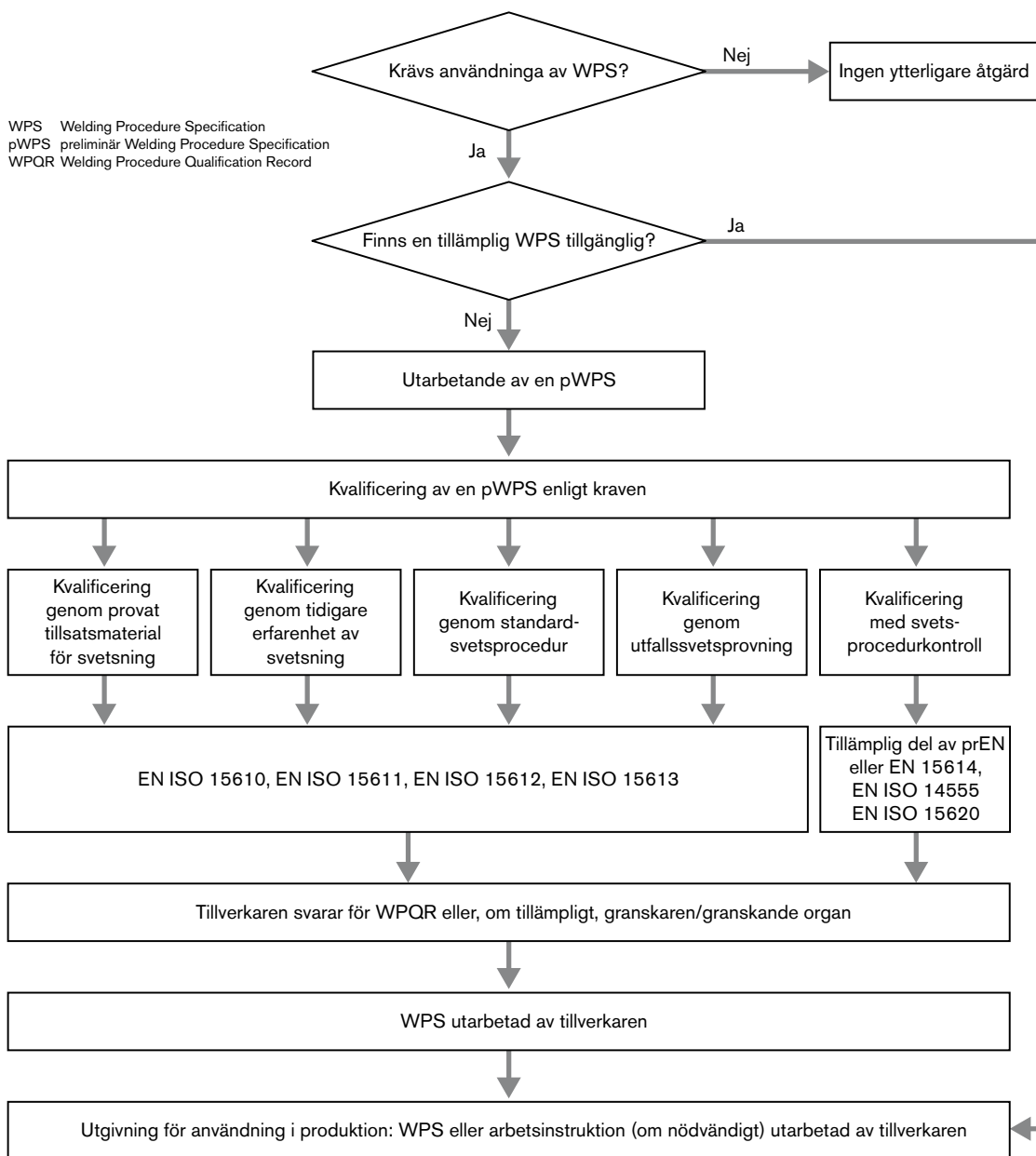
Benämning	Kunskapsläge
Fogytor	Krav på fogytorna är satta på ritningar för tillverkning av komponenter som ska svetsas. Transportskydd är framtagna. Ytorna kontrolleras i samband med ankomstkontroll av gods till Kapsellaboratoriet samt vid montage före svetsning.
Material	Kopparkomponenter med krav på specifik sammansättning levereras med intyg om att sammansättningen är kontrollerad och ligger inom satta gränser.
Diskontinuiteter	Förekomsten av diskontinuiteter i fogområdet på kopparkomponenter som ska svetsas kontrolleras regelbundet okulärt. Arbete pågår med att kartlägga förekomsten av diskontinuiteter i fogområdet med oförstörande provning. Därefter kan nivån för tillåten förekomst av diskontinuiteter fastställas.

7.4 Plan för kvalificering

SKB ämnar kvalificera de svetsystem och svetsprocedurer som ska användas för produktion av kapslar för att därigenom säkerställa att kvaliteten i botten- och förslutningssvetsen uppfyller ställda krav. I huvudsak kommer anvisningarna i SS-EN 729-1, Kvalitetskrav för svetsning att följas, vilka säger att: *Svetsning är en specifik 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 krav uppfylls.*

För närvarande finns inga FSW-specifika standarder tillgängliga för kvalificering av svets-system och svetsprocedurer. En EN ISO-standard för kvalificering av utrustning, procedur och personal vid FSW av aluminium är under framtagning av en arbetsgrupp inom International Institute of Welding (IIW), Commission III-B-1. Standarden beräknas vara klar under 2008. Om lämpliga standarder saknas vid tidpunkten för kvalificering kommer SKB att komplettera befintliga standarder alternativt efter behov ta fram egna specifikationer i samråd med systemleverantör och annan lämplig expertis. Ett svetssystem avsett för produktion kommer enligt planerna att köpas med kvalificering ingående som en del i leveransen.

Vid kvalificering av svetsprocessen, se figur 7-1, kommer svetsparametrarna att ställas in enligt ett preliminärt svetsdatablad (preliminary Welding Procedure Specification, pWPS) som baseras på tidigare svetsprov. Den lämpligaste metoden för kvalificering är sedan enligt EN ISO 15613 Specifikation för och kvalificering av svetsprocedurer för metalliska material – Kvalificering genom utfallssvetsprovning. Detaljuppgifter om svetsproceduren



Figur 7-1. Flödesdiagram för utarbetande och kvalificering av en WPS.

och provningsresultaten ska redovisas i ett protokoll (Welding Procedure Qualification Record, WPQR). Kvalificeringen ska övervakas av ett ackrediterat organ och provningen av svetsgodsets egenskaper ska utföras av ett ackrediterat laboratorium. Efter fullgjord och godkänd kvalificering kommer svetsdatabladet (Welding Procedure Specification, WPS) att godkännas för användning i produktion.

8 Framtida handlingslinje

Med utgångspunkt från den kunskapsnivå som redovisas i denna rapport (kapitel 5–7) och den kravbild som definierats i kapitel 3 har ett antal viktiga framtida aktiviteter identifierats. Huvudsyftet med kommande arbete är att säkerställa att en tillförlitlig svetsprocess och svetssystem finns tillgängliga enligt SKB:s kvalificeringstidsplan /SKB 2006f/. Detta arbete innefattar en verifierad tillförlitlig svetsprocess och system som anpassats för kapselabrik och inkapslingsanläggning med dokumentation som möjliggör kvalificering.

För FSW kommer utvecklingsarbetet att fokuseras på att produktionsanpassa process och system för botten- och förslutningssvetsningen. För att nå produktionsstatus kommer verktygstappen att undersökas och vidareutvecklas. Vidare kommer en helautomatiserad svetscykel att utvecklas med hjälp av förändringar i mjukvaran. Även svetsgodsets långtidsegenskaper kommer att undersökas ytterligare.

8.1 Svetsgods

Svetsgodset kommer att undersökas fortlöpande. Följande utvecklingsarbeten planeras.

Tabell 8-1. Framtida handlingslinjer för svetsgods.

Benämning	Aktivitet	Tidpunkt
Kemisk beständighet	Föroreningar i svetsgods Det finns inga indikationer på att de låga föroreningshalter av framförallt Ni och Cr som påvisats i svetsgodset påverkar dess kemiska beständighet /SKB 2006b/. Metoder för att minska eller eliminera föroreningarna från svetsverktyget kommer dock att studeras genom prov med alternativa verktygsmaterial och ytbehandling av verktyget. Prov med argon som skyddsgas kommer att utföras för att undersöka om förekomsten av oxider i svetsgodset kan reduceras.	2006–2007

8.2 Svetsprocessen och svetssystemet

Processen och systemet kommer att utvecklas med målsättning att uppfylla samtliga krav som ställs för produktionssvetsning av kopparkapslarna. Följande utvecklingsarbeten planeras.

Tabell 8-2. Framtida handlingslinjer – svetsning.

Benämning	Aktivitet	Tidpunkt
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 kassel utvecklas. Samma svets- och konstruktionsprincip som på Kapsellaboratoriet kan användas. Bilaga 2 visar en ritning från ESAB AB på hur ett system för bottensvetsning kan se ut. Inspänningen av kapsel och tten förenklas och kapseln roterar istället för maskinen.	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. Inledande prov med en maskinbearbetad defekt på 2×35 mm visade att denna defekt kunde lagas men en utförligare studie kommer att genomföras. En viktig del i utvecklingen är också 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 den slutliga svetscykeln är färdigutvecklad finns sannolikt behov av att optimera processen med avseende på stabilitet och repeterbarhet inom ett så brett processfönstret som möjligt.	2008
Kärnteknisk tillämpning	Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av svetssystemet i inkapslingsanläggningen, t ex automatiskt verktygsbyte.	2009–2010
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Program för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017

9 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, Swedish Institute for Metals Research, IM-2004-110.

Claesson S, 2005. Tensile test on copper material for encapsulation of nuclear waste, summary report SKB 1045935. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gubner R, 2004. Grain boundary corrosion of copper canister weld material. Swedish Corrosion Institute, 80019.

Håkansson B, 2004. Undersökning av svetsprover. TEK04-509, CSM Materialteknik AB.

Jaensson B, 2005a. X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. TEK04-0643, CSM Materialteknik AB.

Jaensson B, 2005b. X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. TEK05-0226, CSM Materialteknik AB.

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

Källgren T, 2005. Friction Stir Welding of Copper Canisters for Nuclear Waste. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology.

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

Salonen T, 2004. Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Posiva Oy.

SKB, 2004. Elektronstrålesvetsning av kopparlock rapport 2. SKB R-04-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2005a. Friktionssvetsning av kopparkapslar rapport 1. SKB R-05-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2005b. Kapseltillverkning. Kvalitetshandbok (pärm 1). Ritningar Specifikationer Rutiner (pärm 2). Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006a. Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning och förslutning. SKB R-06-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006b. Kapsel för använt kärnbränsle. Konstruktionsförutsättningar. SKB R-06-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2006c. Kapsel för använt kärnbränsle. Tillverkning av kapselkomponenter. SKB R-06-03, 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.

Svensk Standard, 2002. Svetsning och besläktade förfaranden. Klassificering av diskontinuiteter och formavvikelser i metalliska material. Del 2: Trycksvetsning. International Organization for Standardization, standard 6520-2:2001.

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

Förkortningar

EBW	Electron beam welding, Elektronstrålesvetsning
FSW	Friction stir welding, Friktionssvetsning
OFP	Oförstörande provning
UT	Ultrasonic testing, Ultraljudprovning
RT	Radiographic testing, Radiografisk provning
Katod	Keram som skapar huvudelektronstrålen
Filament	Glödtråd som skapar primärelektronstrålen

Diskontinuiteter vid FSW

I denna bilaga beskrivs de diskontinuiteter som påvisats vid svetsning i fem centimeter tjock koppar med FSW. Vissa av de diskontinuiteter som påvisats uppstår endast under påtvingade och extrema betingelser och vissa uppstår under normala svetsbetingelser. För att kartlägga de möjliga diskontinuiteterna har flera angreppssätt använts:

- Indikationer från OFP av svetsar utförda vid Kapsellaboratoriet har undersökts likväl som svetsar från utvecklingsarbetet vid TWI. Indikationerna har verifierats genom metallografiska undersökningar.
- Undersökningar av områden där svetsprocessen har varit utanför processfönstret. I utvalda områden har delar kapats ur för vidare undersökning med framför allt röntgen och slutligen med metallografi.
- Områden med indikationer från OFP och även slumpmässigt utvalda prov har undersökts med mikrofokusdatortomografi och i vissa fall kompletterat med avslutande metallografiska undersökningar.
- Flera metallografiska undersökningar av oberoende laboratorier har gett information om framför allt mycket små diskontinuiteter eller andra avvikelser som inte påvisas vid OFP.

De påvisade diskontinuiteterna har klassificerats i tabell A-1 enligt Svetsning och besläktade förfaranden – Klassificering av diskontinuiteter och formavvikelser i metalliska material /Svensk standard 2002/.

Foglinjeböjning (bindfel) ISO 6520-2:2001 P. 4013 /Svensk standard 2002/

Beskrivning: Den vertikala skarven mellan rörets insida och locket böjs mot verktygsskuldran på grund av materialflödet runt verktygstappen, se figur A-1.

Storlek: Upp till 5,5 mm utbredning i radiell ledd har noterats. Normalt har foglinjeböjning en tangentiell utbredning på någon/några decimeter. I extremfall kan de dock finnas längs hela svetsvarvet.

Lokalisering: I svetsroten.

Karakteristik: Tät sprickliknande diskontinuitet, figur A-2, med utbredning i radiell ledd med en spalt på $< 10 \mu\text{m}$.

Förekomst: Vid överlappssekvensen i samtliga locksvetsar.


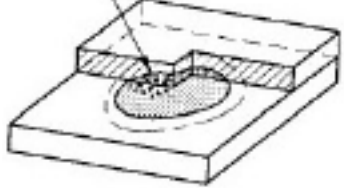
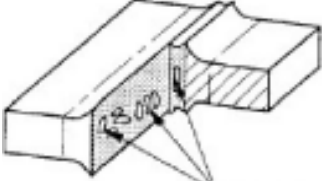
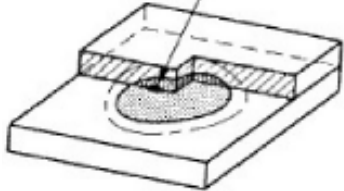
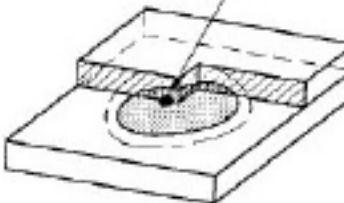
Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Reducerar korrosionsbarriären.

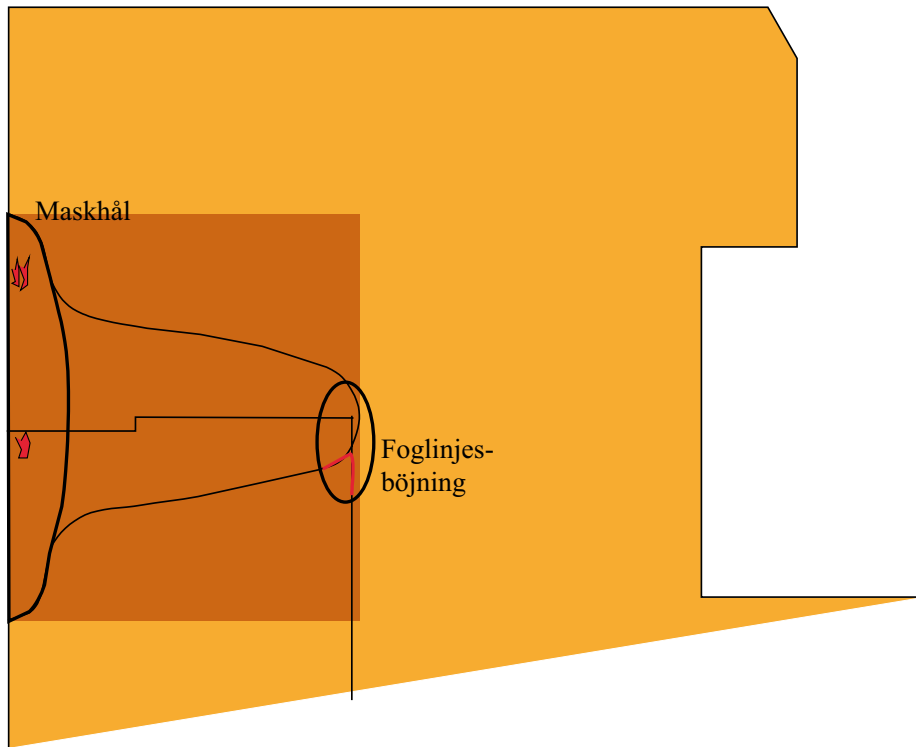
Orsak: Materialflödet leder till att den vertikala obundna delen av foglinjen dras ut i horisontell ledd. Storleken på foglinjeböjningen är kopplad till verktygstappens penetrering.

Åtgärd: Minska materialflödet det aktuella området genom att minska verktygstappens inträngningsdjup, alternativt ändra materialets flödesriktning genom att ändra svetsriktningen eller rotationsriktning på verktyget.

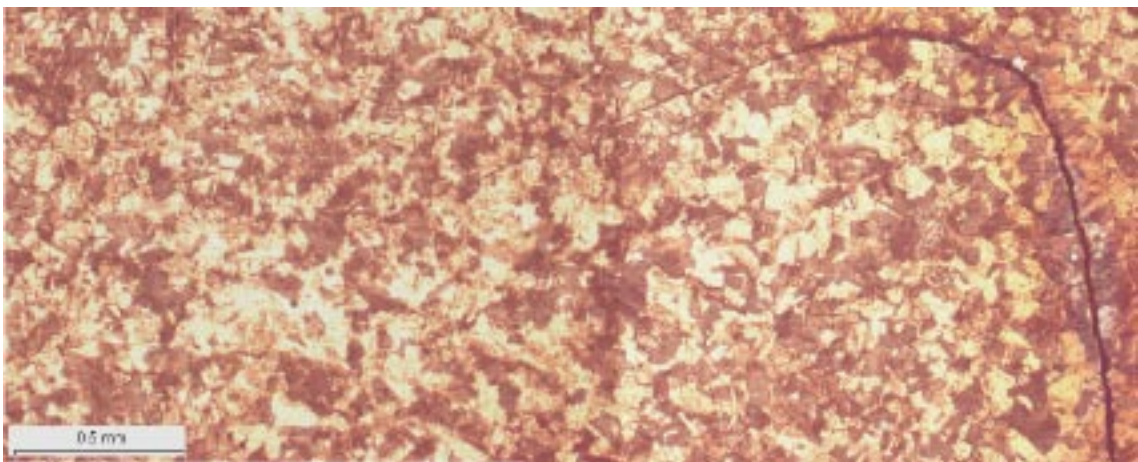
Provningsmetod: Ultraljudprovning från locket ovansida.

Tabell A-1. Klassificering av diskontinuiteter.

Referensnummer SS-EN-ISO 6520	Benämning och förklaring	Illustration
P 4013	<p>Bindfel Ofullständig bindning i svetsförbandet.</p>	 <p>4013</p>
P 2013	<p>Porsamling En grupp porer med godtycklig geometrisk fördelning.</p>	 <p>P 2013</p>
P 2016	<p>Maskhål Rörformig hålighet i svetsgodset, i allmänhet samlade klungor och fördelade i ett fiskbensmönster.</p>	 <p>P 2016</p>
P 303	<p>Oxidineslutning Tunna metalliska oxidineslutningar i svetsen (isolerade eller samlade i klungor).</p>	 <p>P 303</p>
P 304	<p>Metallineslutning Partikel av en främmande metall innesluten i svetsgodset.</p>	 <p>P 304</p>



Figur A-1. Lokalisering av diskontinuiteter i svetsar.



Figur A-2. Makroprov av foglinjeböjning.

Inre hålighet (maskhål) ISO 6520-2:2001 P. 2016 /Svensk standard 2002/

Beskrivning: Ytnära diskontinuitet som uppstår vid verktygets skärande sida, vilken även kan vara ytbrytande vid accelerationssekvensen.

Storlek: Upp till tio millimeter har noterats vid ogynnsamma svetsparametrar. I tangentiell ledd är utbredningen mindre än tio millimeter, dock kan kluster av diskontinuiteter ge en betydligt större tangentiell utbredning.

Lokalisering: Har påvisats från ytan ned till ett djup av tio millimeter.

Karakteristik: Oftast bestående av kluster med täta diskontinuiteter i tangentiell ledd med primär utbredning i radiell/axiell ledd, ibland sammanväxta till volymetriska diskontinuiteter. Oregelbunden form med ojämna ytor, se figur A-3.

Förekomst: Större diskontinuiteter påträffades tidigt i utvecklingen av svetsprocessen medan endast mindre diskontinuiteter (< 3 mm) har indikerats i senare svetsar.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Reducerar korrosionsbarriären.

Orsak: Svetsparametrar utanför processfönstret, framför allt för litet svetsdjup och för låg svetstemperatur.

Åtgärd: Svetsparametrar inom processfönstret.

Provningsmetod: Visuellt vid ytbrytande diskontinuiteter och ultraljud från lockets ovan sida vid icke-volymetrisk inneslutna diskontinuiteter. Endast påvisbar vid radiografering i extremfallet då den formar en volymetrisk diskontinuitet.



Figur A-3. Makroprov av inre hålighet.

Porsamling ISO 6520-2:2001 P. 2013 /Svensk standard 2002/

Beskrivning: Enstaka porer eller porstråk.

Storlek: Stråk på upp till nio millimeter har observerats. Porena är storleksordning 0,1–0,5 mm.

Lokalisering: Har påträffats i alla områden av svetsen.

Karakteristik: Se figur A-4.

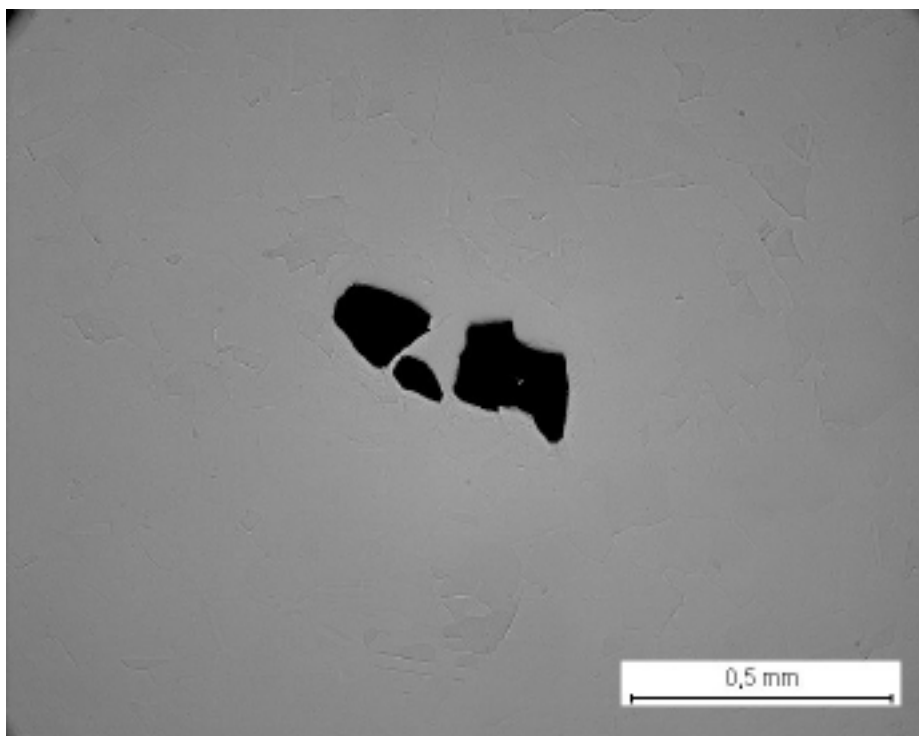
Förekomst: Vid svetsning inom processfönstret har endast enstaka små porer observerats.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Vid svetsning inom processfönstret har de liten inverkan på den effektiva korrosionsbarriären.

Orsak: Uppstår då en eller flera svetsparametrar är utanför processfönstret speciellt vid för litet skulderdjup vid överlappssekvensen.

Åtgärd: Kräver ingen ytterligare åtgärd än att tillse att svetsprocessen drivs inom processfönstret. Yt nära porsamlingar bearbetas ofta bort när locket får sina slutliga dimensioner.

Undersökningsmetod: Kan endast påvisas vid metallografiska undersökningar.



Figur A-4. Porsamling i överlappszonen på locksvets 35.

Oxidineslutning

Beskrivning: Kopparoxid, se figur A-5.

Storlek: Oxider med utbredning < 300 µm har påträffats.

Lokalisering: Vanligast förekommande nära ytan i ett område som bearbetas bort.

Karakteristik: Se figur A-5.

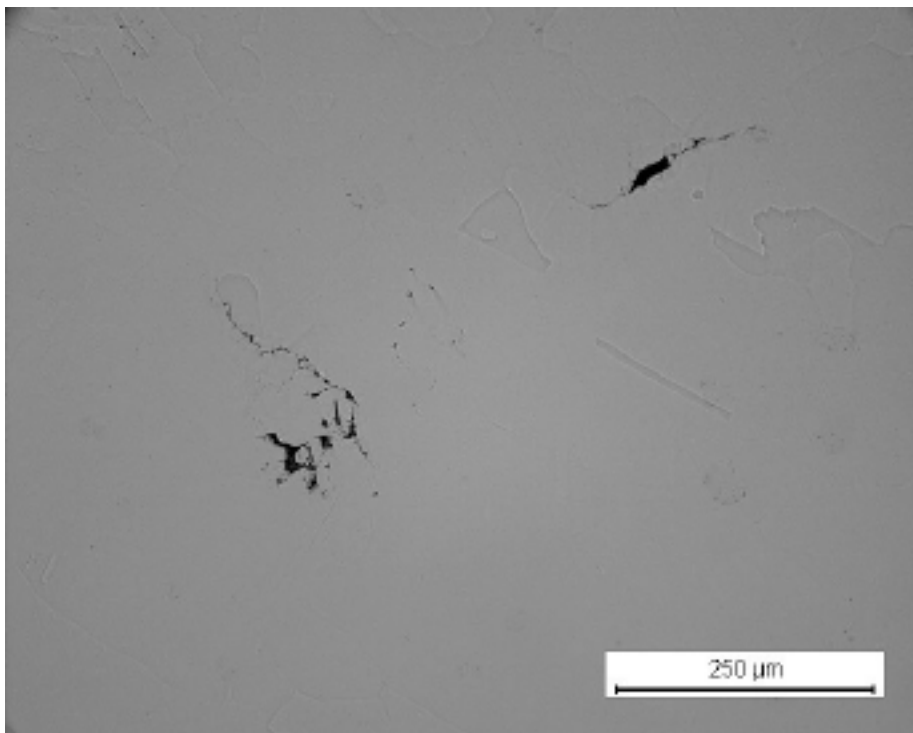
Förekomst: Förekommer i samtliga undersökta locksvetsar, vanligen i överlappssekvensen.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Mycket liten inverkan på den effektiva korrosionsbarriären.

Orsak: Om svetsningen sker i atmosfär med syre närvarande oxiderar koppar snabbt och oxiden rörs in i svetsgodset.

Åtgärd: Prov är planerade där svetsning ska ske i skyddsgas.

Undersökningsmetod: Kan endast påvisas vid metallografiska undersökningar.



Figur A-5. Ansamling av oxiderade partiklar i överlappszonen på locksvets 36.

Metallinneslutning

Beskrivning: Spår av verktygsmaterial i svetsgodset.

Storlek: Partiklar med utbredning < 300 µm har påträffats.

Lokalisering: Kan förekomma i hela svetsgodset, dock vanligen nära ytan.

Karakteristik: Se figur A-6, dessa inneslutningar bearbetas dock bort när kapseln får sina slutgiltiga dimensioner.

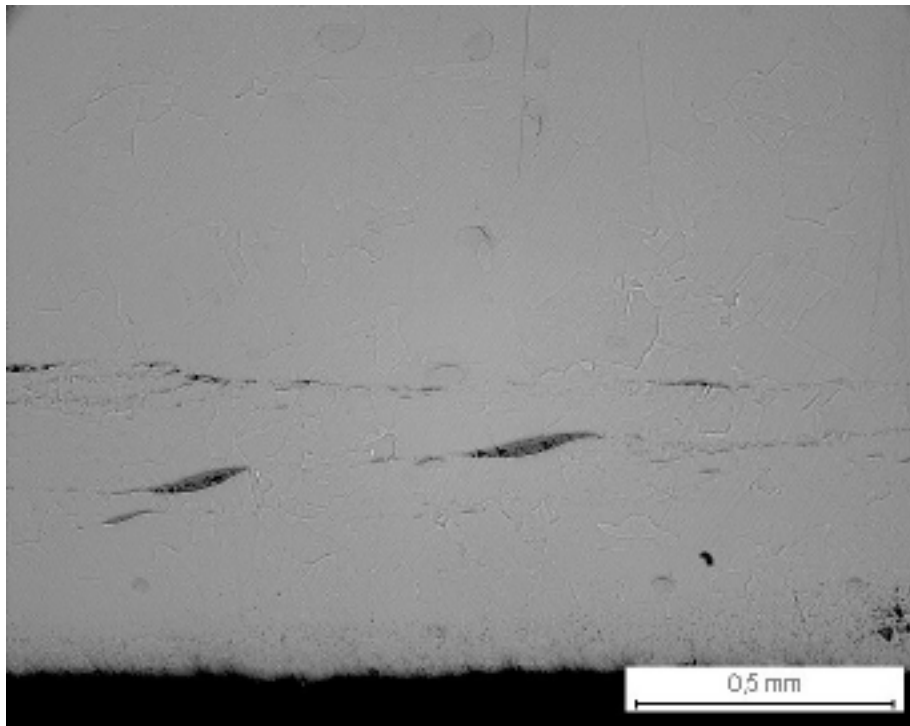
Förekomst: I samtliga locksvetsar.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: På grund av den lilla partikelstorleken bedöms de inte påverka korrosionsbarriären.

Orsak: Nötning av verktyget.

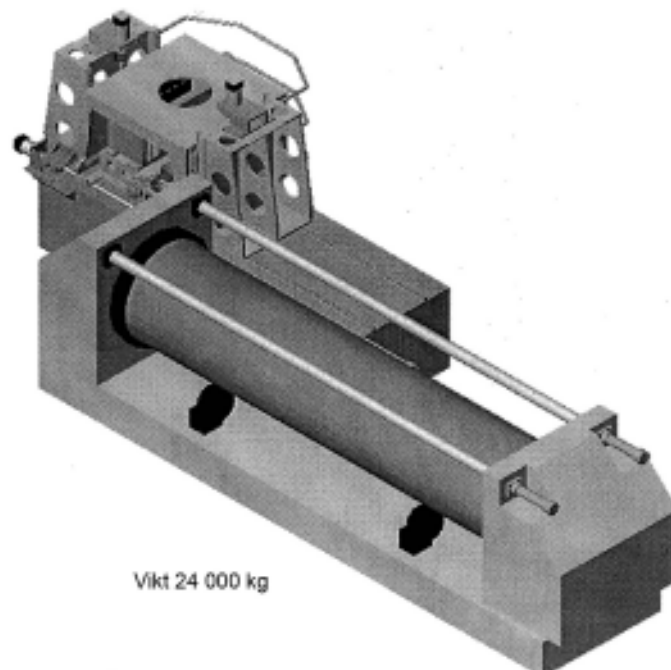
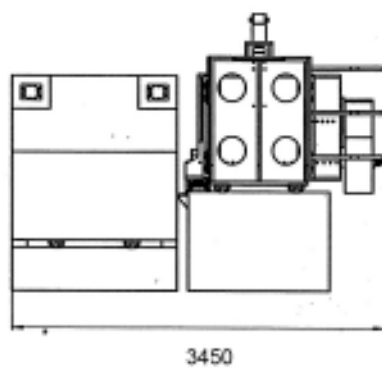
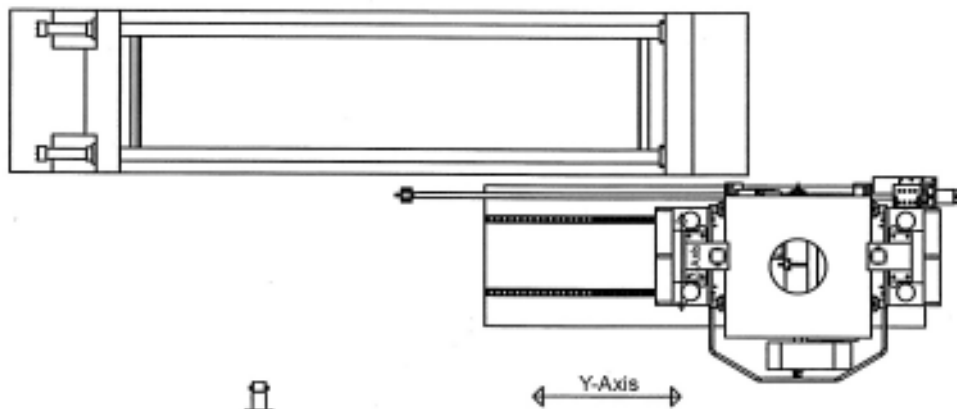
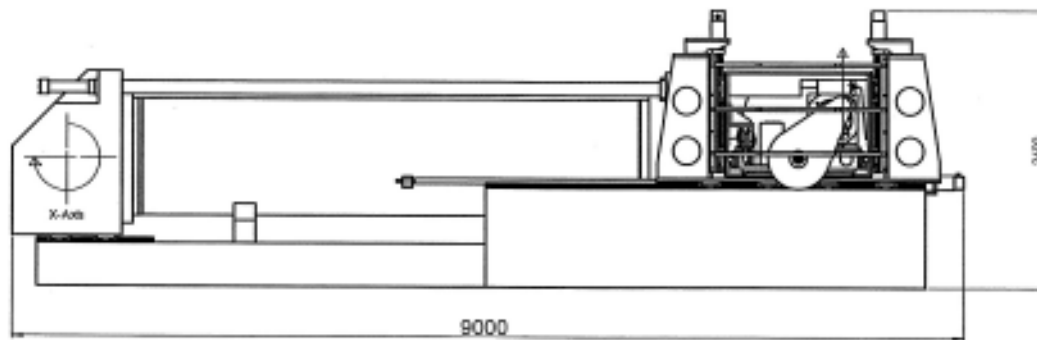
Åtgärd: Kräver vidare undersökningar.

Undersökningsmetod: Kan påvisas med högkänslig röntgen på urkapade objekt eller via kemisk analys av svetsgodset som förhöjd halt av främmande metaller.



Figur A-6. Spår av främmande material (W och O) i locksvets 20.

Ritning på FSW-system för botten svets



Vikt 24 000 kg