

R-06-06

Kapsel för använt kärnbränsle

Oförstörande provning av svetsar

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-06-06

Kapsel för använt kärnbränsle

Oförstörande provning av svetsar

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 oförstörande provning av svetsarna i kopparhöljet och är en del av den preliminära tekniska dokumentationen som 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 lämnas en sammanhållen redovisning av konstruktionsförutsättningarna för kopparkapseln i KBS-3-systemet och preliminära tekniska beskrivningar av de metoder och processer som används vid tillverkning och förslutning av kapseln. Denna redovisning har SKB tagit fram inom ramen för ett projekt, Dokap.

Dokumentationen omfattar en huvudrapport och sex underlagsrapporter. Underlagsrapporterna omfattar, Konstruktionsförutsättningar för kapseln, Program för kvalificering av tillverkning och förslutning av kapslar, Tillverkning av kapselkomponenter, Svetsning vid tillverkning och förslutning, Oförstörande provning av kapselkomponenter samt Oförstörande provning av svetsar. Huvudrapporten sammanfattar underlagsrapporterna samt förklarar hur dessa är sammankopplade. Dessutom presenteras hur denna redovisning kopplas till andra redovisningar, SKB:s säkerhetsanalys etc.

Denna rapport redovisar det arbete som har utförts och det som SKB planerar att utföra inom området oförstörande provning (OFP) av kapselns svetsar, botten- och förslutningssvets. Redovisningen utgår från de krav som ställs på kapseln och hur dessa kan appliceras på provningen. Dessa krav kommenteras med avseende på i vilken grad de har uppfyllts samt vad som krävs för att de ska uppfyllas inom ramen för SKB:s kvalificeringstidsplan.

De OFP-metoder, digital radiografering och ultraljudprovning med phased array-teknik, som har utvecklats för inspektion av förslutningssvetsar utförda med friction stir welding (FSW) och elektronstrålesvetsning (EBW) vid Kapsellaboratoriet beskrivs. Erfarenheter baserade på provning av mer än 100 svetsar (> 60 EBW och > 40 FSW) visar att såväl process som system överlag uppfyller ställda krav beträffande såväl kapacitet som tillförlitlighet.

OFP-processernas tillförlitlighet det vill säga detekteringsförmåga, risk för falsklarm och noggrannhet vid storleksuppskattning har undersökts i ett projekt "NDT Reliability" vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung). Resultat och dokumentation från projektet används bland annat i säkerhetsanalysen för att visa på att tillförlitligheten vid OFP är tillräcklig för att säkerställa förslutningssvetsens integritet i slutförvaret.

Rapporten redovisar även forskning och tillämpad utveckling som pågår inom oförstörande provning av förslutningssvetsen vid olika instanser. Exempel på områden som behandlas är modellering inom såväl ultraljud som digital radiografering samt forskningsaktiviteter vid Uppsala Universitet.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Denna rapport	12
2	Strategi och arbetssätt	13
3	Förutsättningar och krav	15
3.1	Krav på framtida OFP-processer	16
3.2	Krav från svetsutvecklingsprojekten	16
4	Förslutningssvets kopparkapsel	17
4.1	Friction stir welding	17
4.2	Elektronstrålesvets	18
5	OFP-metoder	21
5.1	Bakgrund	21
5.2	Digital radiografering	21
5.2.1	Systembeskrivning	21
5.2.2	Process för radiografering av svetsar	22
5.3	Phased array ultraljud	25
5.3.1	Systembeskrivning	26
5.3.2	Principer för provning av FSW	27
5.3.3	Principer för provning av EBW	29
6	Erfarenheter	31
6.1	OFP-system	31
6.1.1	Röntgensystemet	31
6.1.2	Ultraljudsystemet	31
6.2	OFP-processer	32
6.2.1	Digital radiografering	32
6.2.2	Phased – ultraljud	32
6.3	Diskontinuiteter	33
6.3.1	Friction stir welding	33
6.3.2	Elektronstrålesvetsning	36
6.4	OFP i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen	39
6.4.1	Kapselfabriken	40
6.4.2	Inkapslingsanläggningen	40
7	Tillförlitlighet vid OFP	41
7.1	Bakgrund	41
7.2	Strategi	41
7.2.1	Detekteringsförmåga	42
7.2.2	Noggrannhet i storleksuppskattning	42
7.3	Praktiskt förfarande	45
7.4	Resultat	45
7.4.1	Detekteringsförmåga	45
7.4.2	Noggrannhet i storleksuppskattning	48

8	Utveckling och forskning	51
8.1	Digital radiografering	51
8.1.1	Optimering av röntgenmetodik	51
8.1.2	Modellering	51
8.2	Ultraljud	52
8.2.1	Process för provning av FSW	52
8.2.2	Modellering	52
8.2.3	Forskning vid Uppsala Universitet	55
8.3	Induktiv provning	56
9	Kravhantering	57
9.1	Kommentarer till ställda krav	57
9.1.1	Krav på en OFP i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen	57
9.1.2	Krav på återkoppling till svetsutvecklingsprojekten	58
9.2	Utgående krav till angränsande processer	58
9.3	Kvalificering	59
10	Framtida handlingslinje	61
11	Kommentarer	65
12	Referenser	67
13	Förkortningar	69

1 Inledning

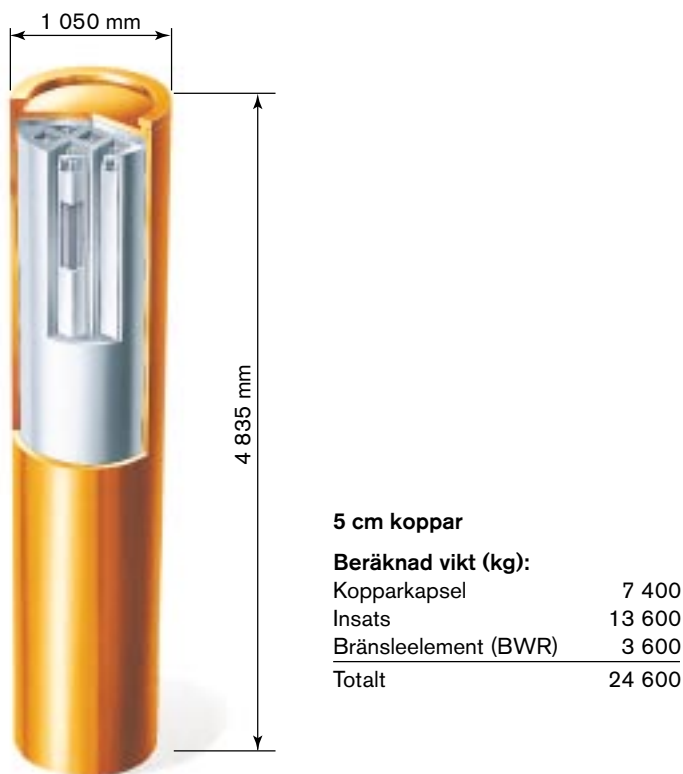
Slutförvaret för använt kärnbränsle enligt KBS-3 metoden utformas för långsiktig säker förvaring. Metoden innebär att det använda kärnbränslet kapslas in i lastbärande och vattentäta kapslar. Kapslarna deponeras i kristallint berg på 400–700 meters djup och omges av en buffert som hindrar vattenflöde 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 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.

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.

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.



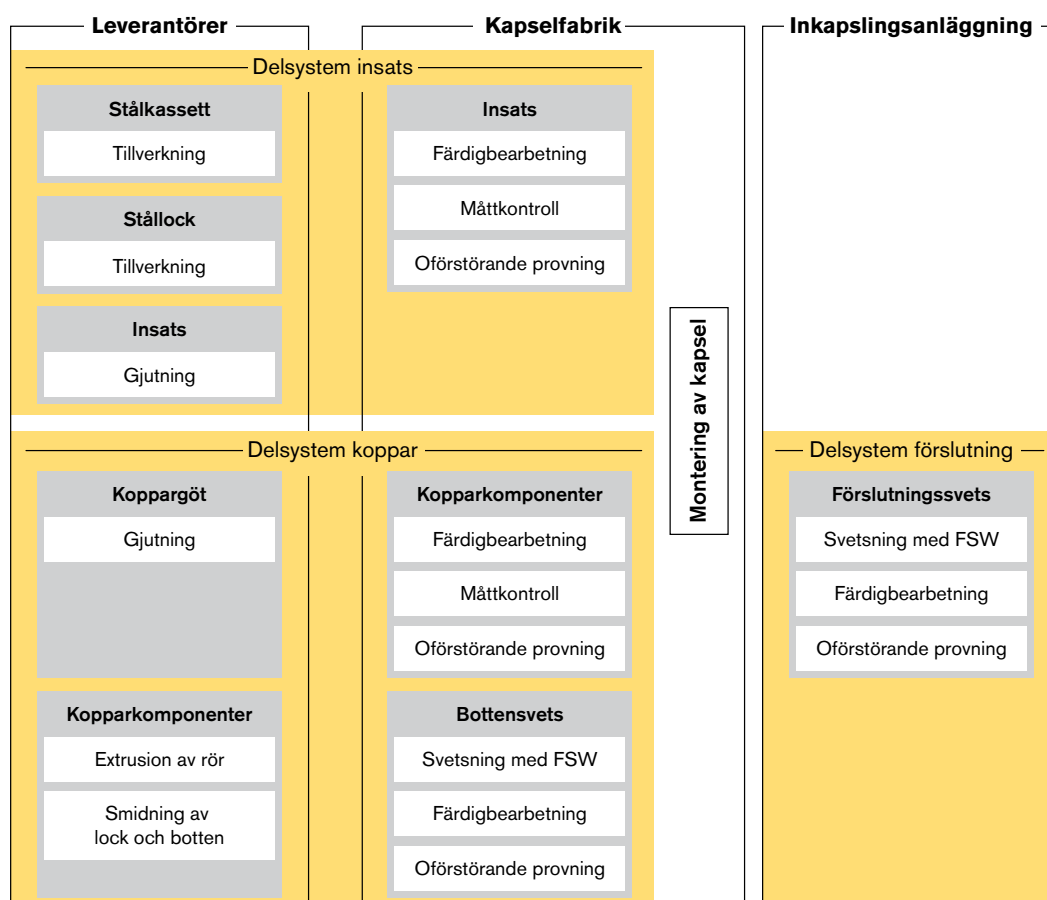
Figur 1-1. Kapsel för använt kärnbränsle. Kapseln består av ett ytterhölje av koppar och en insats av segjärn för BWR-element.

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 referensutförning av produktionssystemet för tillverkning och förslutning av kapseln. Referensutförningen 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.

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

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



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

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.

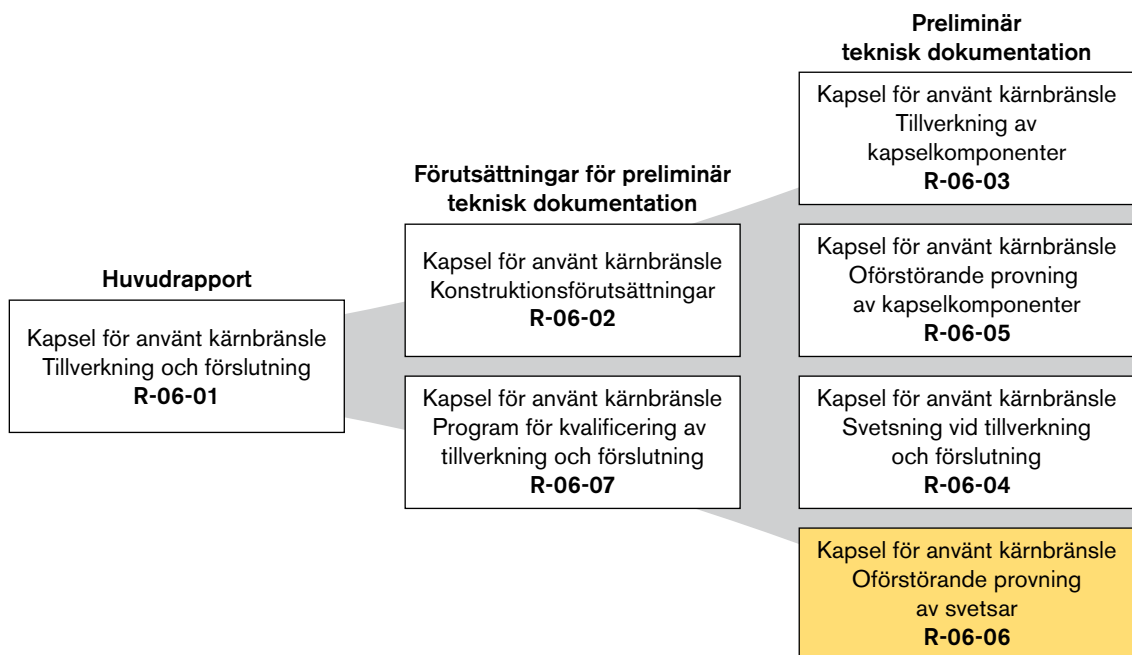
Dokumentationen, se figur 1-3, från projektet omfattar en sammanfattande huvudrapport och sex underlagsrapporter. Huvudrapporten /SKB 2006a/ beskriver de övergripande sammanhangen och logiken i dokumentationen och underlagsrapporterna omfattar:

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.

Preliminär teknisk dokumentation

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



Figur 1-3. Rapporter i projekt Dokap.

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.

1.1 Denna rapport

Denna rapport redovisar de viktigaste resultaten från det arbete som utförts inom området oförstörande provning (OFP) av förslutningssvetsen vid Kapsellaboratoriet. Tyngdpunkten i redovisningen är lagd på de resultat och erfarenheter som vunnits under perioden 2003–2005, perioden 1998–2002 har tidigare redovisats /Ronneteg och Moberg 2003/. Utvecklingen har under perioden koncentrerats kring provningstekniken för svetsar utförda med friction stir welding (FSW). Rapportens syfte är att beskriva det aktuella läget gällande teknikutveckling och verifiering av de oförstörande provningsmetoderna för förslutnings-svetsen.

SKB:s referensalternativ är att fogen för botten utformas som fogen för locket och att likartade processer och system kan användas vid svetsning och provning i båda fallen. Rapporten redovisar även de aktiviteter som pågår och som planeras för att ta fram erforderlig dokumentation enligt SKB:s kvalificeringstidplan.

Rapporten beskriver i:

- Kapitel 2 Vilken strategi och arbetssätt som använts vid arbete med oförstörande provning av kapselns svetsar.
- Kapitel 3 Härledning och beskrivning av de krav som ställs på oförstörande provningen av kapselns svetsar.
- Kapitel 4 Svetsen som provobjekt med avseende på de olika förutsättningar som de två svetsmetoderna innebär för den oförstörande provningen.
- Kapitel 5 De OFP-processer och -system som används vid Kapsellaboratoriet.
- Kapitel 6 Erfarenheter avseende OFP-system, provningsmetoder, möjliga diskontinuiteter i kapselns svetsar samt hur processerna kan anpassas för framtida produktion.
- Kapitel 7 Den studie över tillförlitligheten vid OFP av svetsen som genomförts.
- Kapitel 8 Pågående forskning och tillämpad utveckling.
- Kapitel 9 Hur långt ställda krav på oförstörande provningen av svetsar är uppfyllda.
- Kapitel 10 Framtida handlingslinjer för att uppfylla de krav som ännu ej uppfyllts.
- Kapitel 11 Övriga allmänna kommentarer om OFP av kapselns svetsar.

2 Strategi och arbetssätt

Kapsellaboratoriet i Oskarshamn utgör SKB:s centrum för utveckling av inkapslingstekniken. En viktig del av verksamheten utgörs av att testa, utveckla och demonstrera utrustning för hantering, svetsning och oförstörande provning (OFP). För oförstörande provning av förslutningssvetsen finns utrustning för radiografering, ultraljudprovning samt induktiv provning.

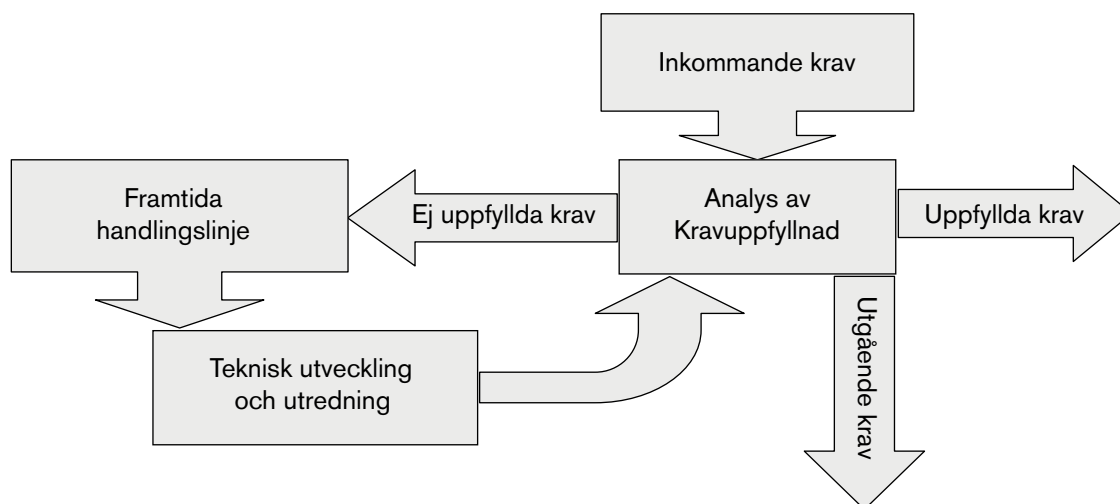
Huvudområden för verksamheten inom oförstörande provning är:

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

Utvecklingsarbete innebär att kunskap successivt byggs upp och att därmed arbetssättet förändras som en följd av ökad kunskap. Till en början var inriktningen grundläggande kunskaps- och teknikuppbyggnad medan fokus på senare tid har varit kring mer specifika frågor som redovisas i denna och kommande rapporter.

En systematisk analys av de krav som ska uppfyllas har genomförts. Figur 2-1 ger en översiktlig bild över hur denna analys har gjorts och det arbetssätt som tillämpas. Ingående krav från olika intressenter identifieras och struktureras. Exempel på krav är formulerade i konstruktionsförutsättningarna och krav som kan härledas från den framtida inkapslingsanläggningen. Kravuppfyllnaden analyseras och om kraven inte kan anses vara uppfyllda definieras vad som krävs för att uppnå dessa.

I grunden är denna systematiserade kravhantering en iterativ process där en kontinuerlig analys utförs för att verifiera att kraven är uppfyllda. Denna analys kan även resultera i krav på andra processer inom produktionssystemet, dessa benämns utgående krav. Ett exempel på detta är krav på ytfinhet vid bearbetning av vissa ytor vilket har betydelse vid ultraljudprovning.



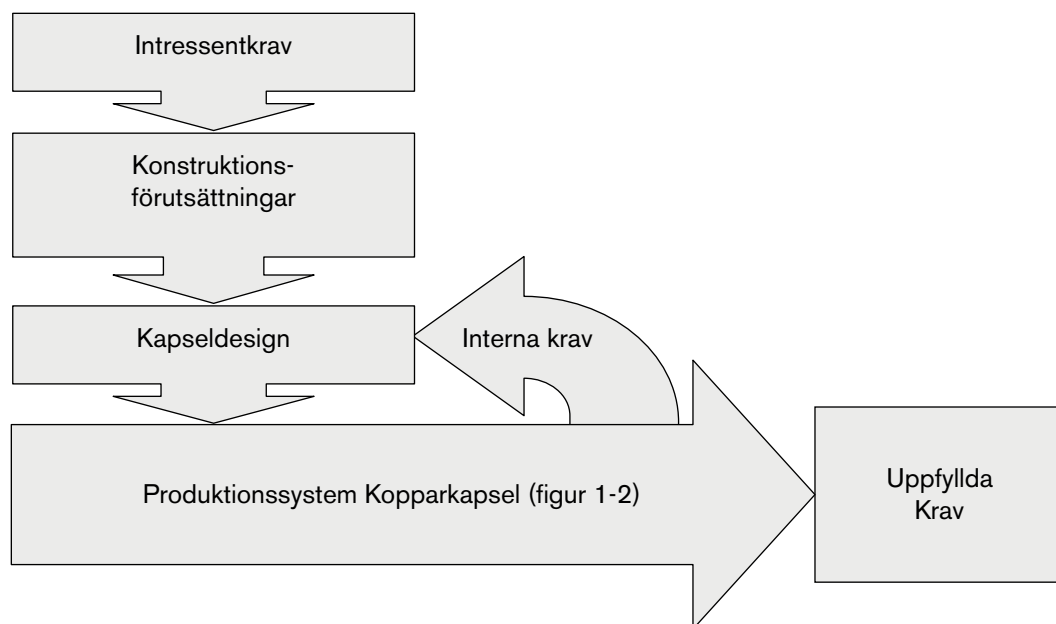
Figur 2-1. Övergripande hantering av krav.

3 Förutsättningar och krav

Vid Kapsellaboratoriet bedrivs utvecklingsarbete med fokus på att ta fram underlag för kopparkapselns förslutningssvets som kommer att utföras i inkapslingsanläggningen. Enligt SKB:s referensalternativ ska botten svetsas fast vid kopparröret i kapselfabriken enligt samma principer som förslutningssvetsen. Detta innebär att det underlag som tas fram gällande oförstörande provning (OFP) av förslutningssvetsen även kan användas för botten svetsen.

Arbetet har omfattat utveckling av provningsteknik för både elektronstrålesvetsning (EBW) och friction stir welding (FSW). Under våren 2005 valdes FSW som referensmetod för svetsning. Detta har medfört att utveckling och utvärdering av tillförlitlighet har fokuserats mot svetsar utförda med FSW.

För att säkerställa att alla viktiga frågor tas om hand har specificerade krav på OFP definierats utifrån konstruktionsförutsättningar för kapseln /SKB 2006b/ samt krav som kan härledas från processerna i produktionssystemet för kapseln, figur 1-2. Flödet hur detta hanteras visas i figur 3-1 nedan.



Figur 3-1. Flöde för produktionssystemets krav.

3.1 Krav på framtida OFP-processer

De övergripande kraven på den oförstörande provningen av svetsar i kapsel fabriken och inkapslingsanläggningen formuleras av flera kravställare. Dessa krav kan formuleras enligt tabell 3-1.

Tabell 3-1. Krav på system och processer för oförstörande provning av svetsar.

Krav	Krav på system och processer
Teknik	Det ska finnas metoder och system för att kontrollera svetsarna.
Kvalitet	OFP ska kunna detektera samt storleks- och lägesbestämma möjliga diskontinuiteter svetsen så att konstruktionsförutsättningarna innehålls.
Tillförlitlighet	Detekteringssannolikheten och noggrannheten vid storleksbestämning ska vara tillräcklig för att säkerställa att konstruktionsförutsättningarna innehålls.
Kapacitet och varaktighet	Processerna för OFP ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av 1 kapsel per dag under lång tid, minst 60 år (konstruktionsförutsättning för inkapslingsanläggningen).
Kärnteknisk tillämpning	Systemet för OFP ska uppfylla kraven för kärnteknisk verksamhet. Detta innebär att provningen ska kunna ske fjärrmanövrerat samt att utrustning dimensioneras för att tåla radioaktiv strålning.
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s kvalitets- och miljöledningssystem för kapseltillverkning /SKB 2005/ vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.

3.2 Krav från svetsutvecklingsprojekten

Utöver kraven som ställs på OFP i framtida anläggningar ställs även krav på den OFP som utförs vid Kapsellaboratoriet från svetsutvecklingsprojekten /SKB 2006d/. Dessa krav innebär att provningen av svetsar ska göras på ett tillförlitligt och kvalitetssäkrat sätt för att säkerställa att tillförlitliga resultat levereras för korrekt utvärdering av svetsförsöken. Dessutom ska kapaciteten för OFP inte begränsa svetsutvecklingens fortskridande.

4 Förslutningssvets kopparkapsel

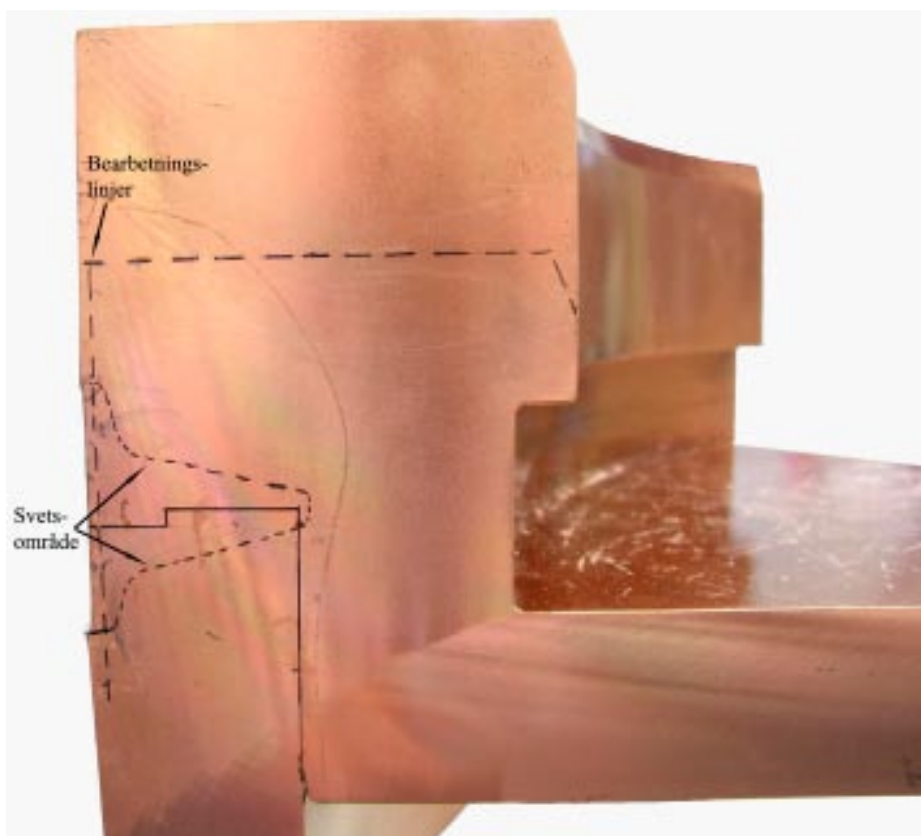
Detta avsnitt behandlar lockutformning och svetsgods för de svetsmetoder, elektronstråle-svetsning (EBW) och friction stir welding (FSW) som utprovas vid Kapsellaboratoriet. Syftet är att ge underlag till parametrar som påverkar den oförstörande provningen av svetsen. För en mer detaljerad beskrivning av kapseln hänvisas till /SKB 2006c/ för ingående komponenter och till /SKB 2006d/ för kapselns svetsar.

Materialet som svetsas består av koppar enligt specifikation EN 1976:1988 med följande tillägg: O < 5 ppm, P 30–70 ppm, H < 0,6 ppm and S < 8 ppm /SKB 2006b/. Lockets och svetsgodsets utformning och struktur beskrivs nedan för respektive svetsmetod.

4.1 Friction stir welding

Den metodik som för närvarande används vid svetsning med FSW /SKB 2006d, Cederqvist 2005/, där svetsprocessen startas och avslutas ovanför foglinjen, kräver ett förhöjt lock. Utgångshålet som kvarstår cirka 75 mm ovanför foglinjen avlägsnas vid bearbetning av lockets ovansida efter svetsning, se figur 4-1. Dessutom bearbetas radien från 528 mm till 525 mm.

FSW-processen ger ett svetsgods med en kornstorlek som i vissa områden till och med är mindre än grundmaterialet, se figur 4-2.



Figur 4-1. Fogutformning FSW.

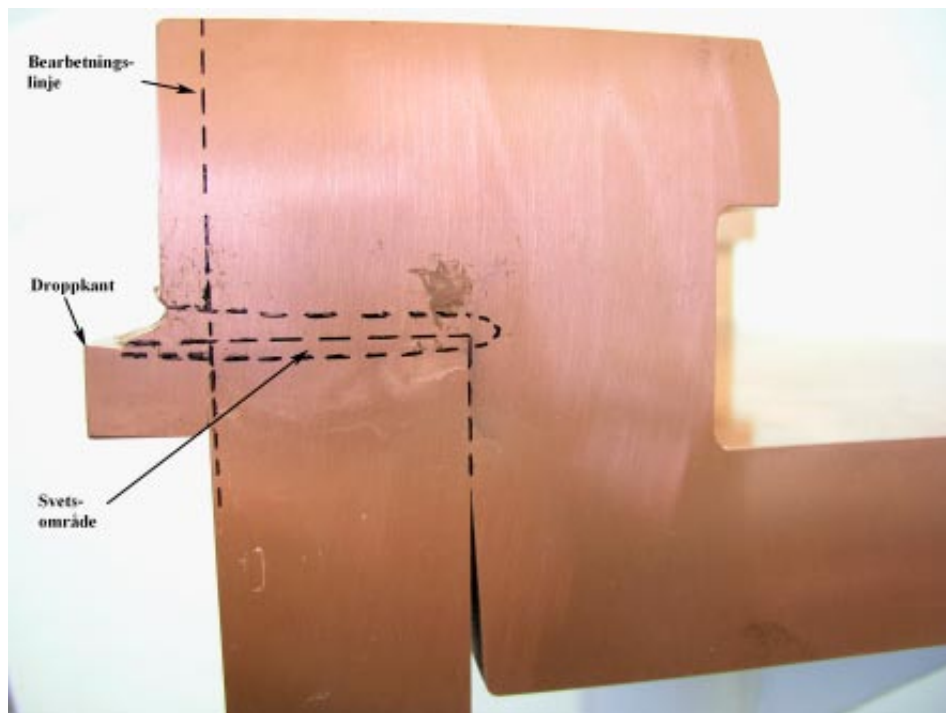


Figur 4-2. Materialstruktur FSW.

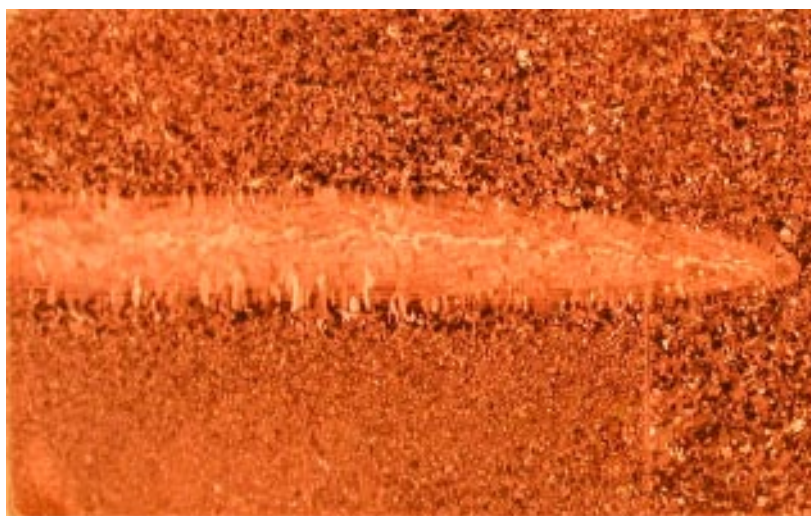
4.2 Elektronstrålesvets

Den metodik som för närvarande används vid svetsning med EBW /SKB 2006d, SKB 2004b/ kräver en droppkant på locket (fronting bar) för att förhindra svetssmältan att rinna ut, se figur 4-3. Efter svetsning bearbetas denna droppkant samt ytterligare 7,5 mm på radien så att den slutliga radien på 525 mm erhålls.

EBW-processen som är en smältsvetsmetod ger en relativt kraftig kornstillväxt i svetsgodset till cirka 500–600 μm jämfört med grundmaterialet som normalt ligger inom intervallet 100–300 μm , se figur 4-4.



Figur 4-3. Fogutformning EBW.



Figur 4-4. Materialstruktur EBW.

5 OFP-metoder

Detta avsnitt beskriver de OFP-metoder, ultraljudprovning och digital radiografering, som används vid provning av förslutningssvetsen vid Kapsellaboratoriet. För provning av kapselns komponenter hänvisas till /SKB 2006e/. Redovisningens tyngdpunkt är lagd på de processer som används för slutkontroll av kapseln efter maskinbearbetning. För att få en första indikation över svetskvaliteten har svetsarna även provats före bearbetning. Denna provning utförs enligt liknande principer som slutkontrollen med undantag för inställning av provningsparametrar.

5.1 Bakgrund

I samband med förprojektering av inkapslingsanläggningen identifierades att provningen av kapselns förslutningssvets borde utföras med två oberoende metoder. Grundförutsättningar för valet av metoder var att de skulle kunna härledas till konventionella tekniker samt att modern teknik var att föredra. Som en följd av kapselns geometri och godstjocklek ansågs ultraljud och radiografering som lämpliga metoder. Med utgångspunkt från dessa aspekter kontaktades leverantörer av utrustningar som tog fram förslag för inspektion av förslutningssvetsen utgående från krav på detekteringsförmåga och inspektionstid. Denna upphandling resulterade i ett system för digital radiografering och ett system för phased array ultraljudprovning.

5.2 Digital radiografering

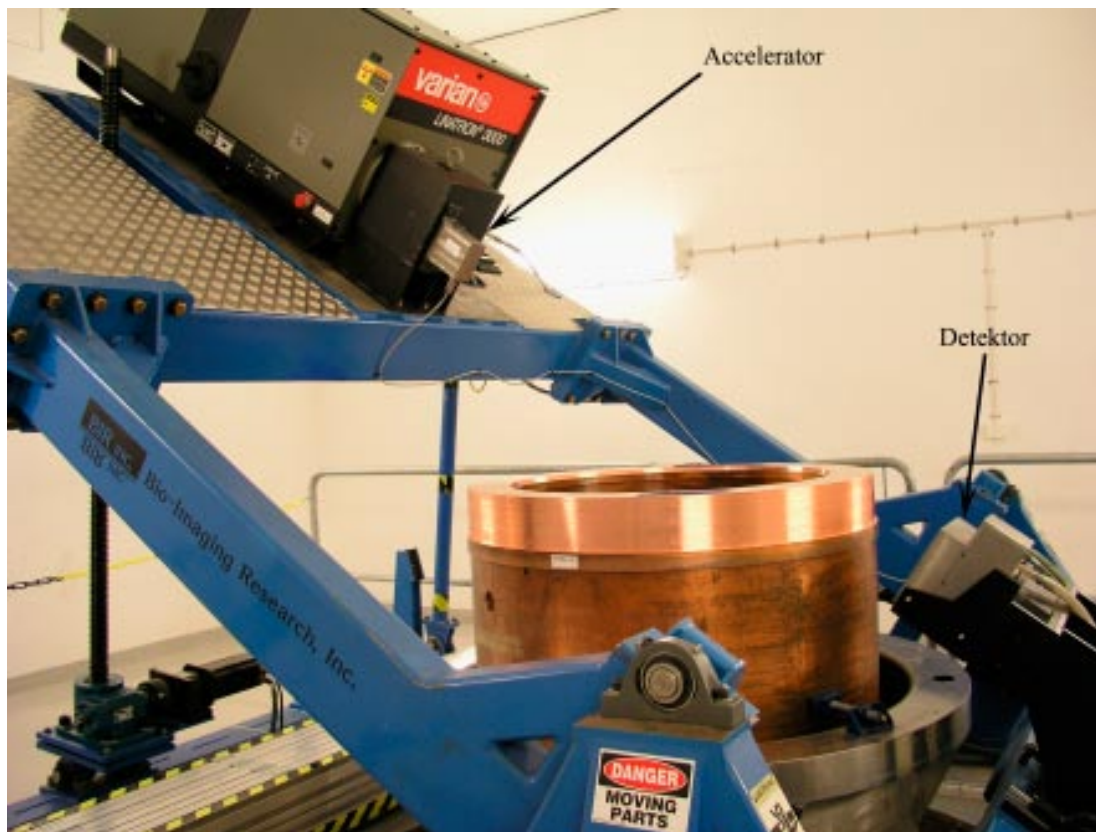
Digital radiografering är ett samlingsnamn för röntgentekniker som genererar röntgenbilder digitalt jämfört med konventionell radiografering som genererar röntgenbilder genom svärtning av film. Inom området för digital radiografering finns ett flertal olika tekniker, Imaging Plates, Flat Panel Detectors and Line Cameras (linjärdetektor).

5.2.1 Systembeskrivning

Våren 1999 driftsattes det system för digital radiografering som levererades hösten 1998 till Kapsellaboratoriet av BIR (Bio-Imaging Research Inc.). Syftet med detta system var att inspektera förslutningssvetsar med avseende på volumetriska diskontinuiteter. Ett dimensionerande krav var att inspektionstiden inte skulle vara begränsande för flödet i inkapslingsanläggningen. Ett annat krav var att bakgrundsstrålningen från kapseln inte skulle påverka inspektionen.

Kapsellaboratoriets system för digital radiografering består av följande huvudkomponenter, figur 5-1:

- Linjäraccelerator, 9 MV.
- Detektorsystem med linjärdetektor.
- Manipulator för positionering av accelerator och detektor.
- Mjukvara för parameterinställning och utvärdering av resultat.



Figur 5-1. Del av röntgensystemet för provning av förslutningssvetsen.

BIR verkade som systemleverantör genom att för egen del utföra design och montering. Linjäracceleratoren är dock en standardiserad industriprodukt från Varian Medical systems som integrerats i systemet. Acceleratorn har exceptionell prestanda med avseende på att generera röntgenstrålning med hög energi och hög dosrat. Den höga dosraten på upp till 3000 rad/min gör att inverkan på provningen från en kapsel med använt kärnbränsle kan anses som försumbar, 0,2–2 % (beräknat på kapselns ytdosrat /Anttila 2005/). Detta värde är beräknat på att kapselns strålning är likriktad i samma riktning som röntgenstrålningen. I verkligheten är dock riktningen på strålningen från bränslet randomiserad, vilket gör att detta värde är betydligt lägre.

Röntgenstrålningen kräver även speciella skyddsanordningar, exempelvis består röntgenkammaren av väggar med över 1,5 meter betong för att förhindra läckage.

5.2.2 Process för radiografering av svetsar

För att säkerställa att god och repeterbar kvalitet uppnås vid förstörande provning av kapselns locksvets har instruktioner /Ronneteg 2000, 2005a/ för proceduren för provningens genomförande och utvärdering fastställts. Dessa omfattar parameterinställningar, mekaniska inställningar, referensmaterial samt utvärderingskriterier.

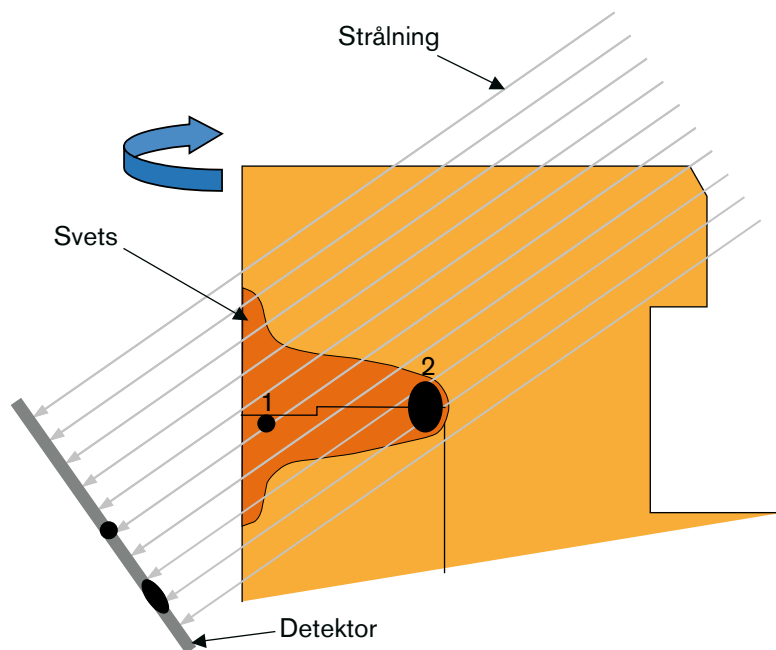
Vid provning av svetsar används för närvarande samma metodik för såväl EBW som FSW. Dock skiljer sig de preliminära utvärderingskriterierna då diskontinuiteters läge inte kan bestämmas i radiell ledd vid provning av FSW beroende på den breda svetsen.

Vid provning roteras kapseln medan acceleratoren pulserar röntgenstrålning genom svetsen med 35° infallsvinkel, se figur 5-2. Den transmitterade strålningen detekteras av en linjär detektor (100 mm hög) placerad vinkelrätt mot strålriktningen med 0,4 mm upplösning (kanalbredd) i vertikal ledd. I horisontell ledd uppnås samma upplösning genom att en vertikal kollimator fokuserar strålningen och för varje 0,4 mm rotation av kapseln byggs röntgenbilden upp, se figur 5-3. Resultatet utvärderas sedan med utgångspunkt från kriterier som baseras på kapselns geometri i förhållande till strålningsriktningen samt systemets signal/brus förhållande.

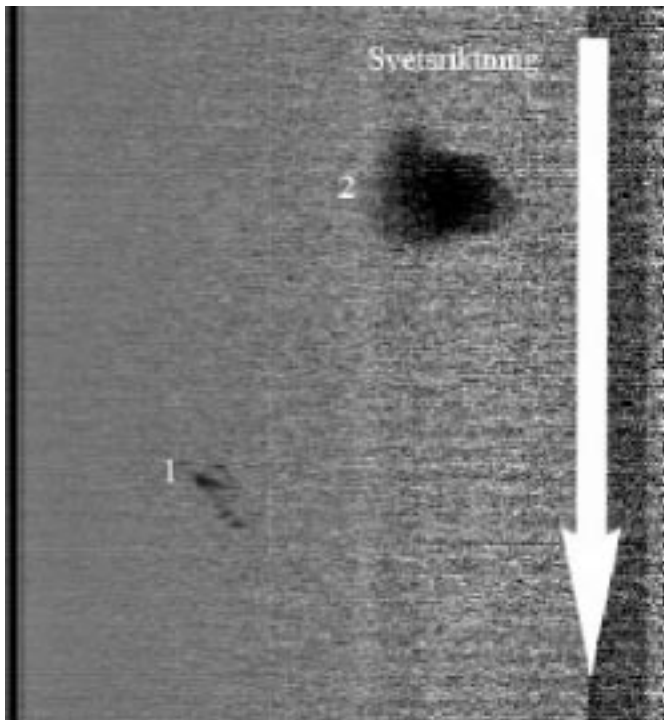
Siffrorna i figurerna 5-2 och 5-3 visar var indikationerna i röntgenbilden till höger är lokaliserade i svetsen. Den horisontella axeln i bilden till höger representerar detektorns axel medan den vertikala axeln representerar svetsriktningen med nollpunkten i ovankant.

För kompensering av de kraftiga variationerna av godstjockleken i svetsområdet, se figur 5-4, i strålgången utförs en medelvärdeskalibrering. Denna görs genom att delar av kapselns omkrets scannas i cirka 500 mätpunkter och att medelvärdet för varje detektor-kanal beräknas. Vid provningen utnyttjar sedan systemet dessa medelvärden som referens.

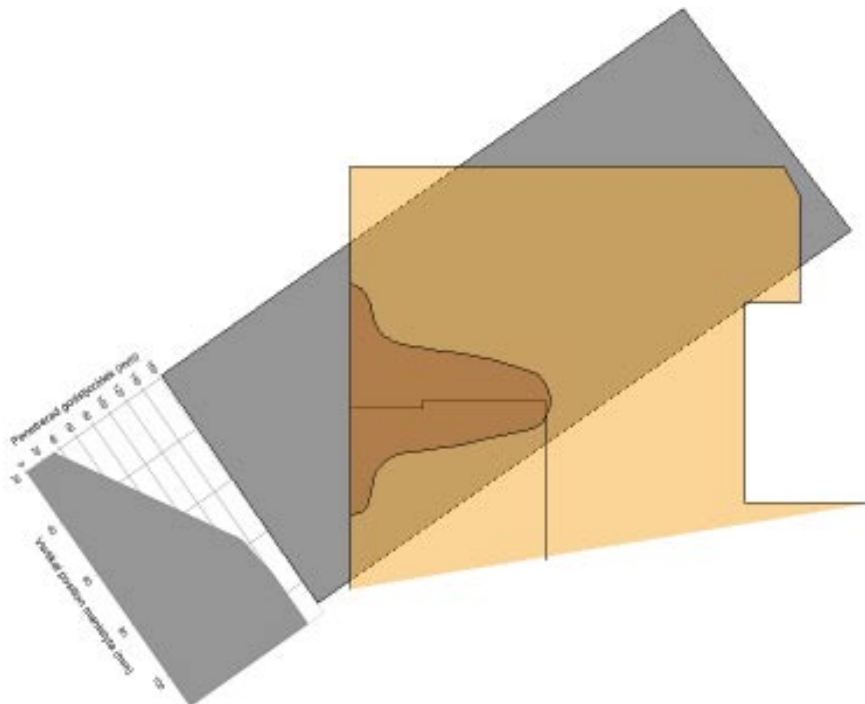
För att säkerställa den radiografiska känsligheten vid provningen används 1 och 2 mm koppardenrametrar tillverkade enligt gällande standard /ASTM International/.



Figur 5-2. Skiss över radiografisk provning av FSW.



Figur 5-3. Röntgenbild.



Figur 5-4. Tjockleksvariationer vid radiografering av förslutningssvets FSW efter maskinbearbetning.

5.3 Phased array ultraljud

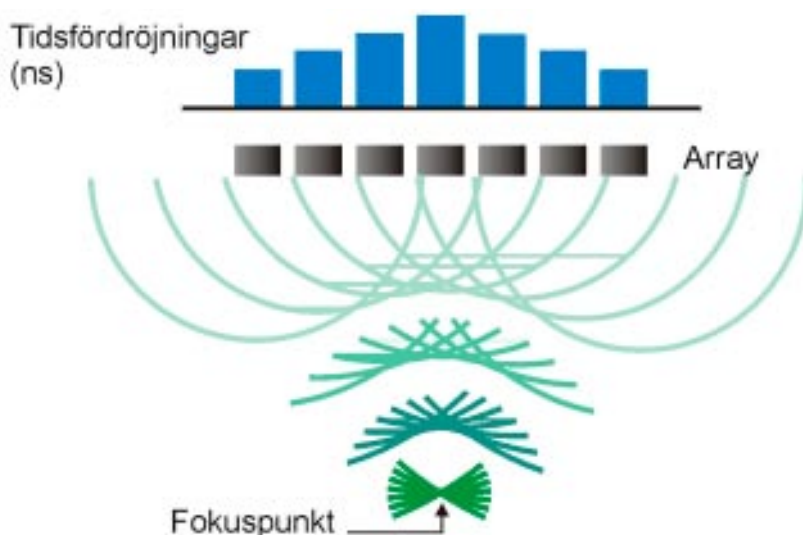
Phased array ultraljud /R/D Tech inc 2004/ är en teknik där så kallade arraysökare används. Dessa sökare består av ett flertal ultraljudkristaller och kan delas in i olika grupper beroende hur de är utformade, se figur 5-5.

Vid provning med phased array-teknik används ett flertal av arraysökarens element (ultraljudkristaller), oftast 8–32 stycken, för att skapa en grupp (apertur). Denna grupp används sedan både till att sända och ta emot ljudvågor. Aperturen kan programmeras för att generera ljudfält med varierande fokusering genom att olika tidsfördröjningar för respektive element appliceras. Exempelvis kan ljudet fokuseras, figur 5-6, på olika djup och styras i olika riktningar, figur 5-7. Dessutom kan arrayet programmeras för elektronisk scanning, vilket innebär att avsökning i en ledd sker elektroniskt i stället för genom en mekanisk manipulator, se figur 5-8.

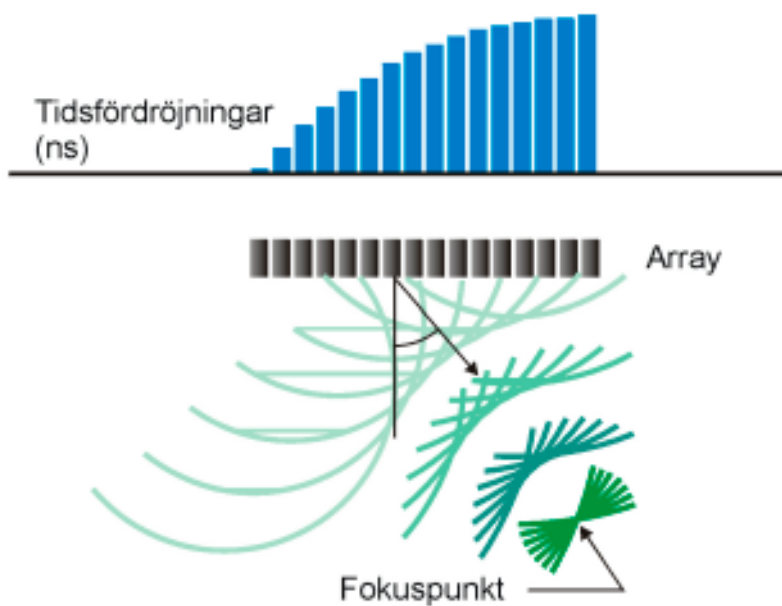
I slutet av 1998 driftsattes det system (All-In) för phased array ultraljudprovning som levererats av R/D Tech. Specifikationerna för systemet var anpassade för elektronstrålsvetsar. När det under år 2002 blev aktuellt med provning av FSW var bland annat systemets bandbredd och flexibilitet otillräcklig. Som en följd av detta anskaffades ett nytt system från Technology Design Ltd.



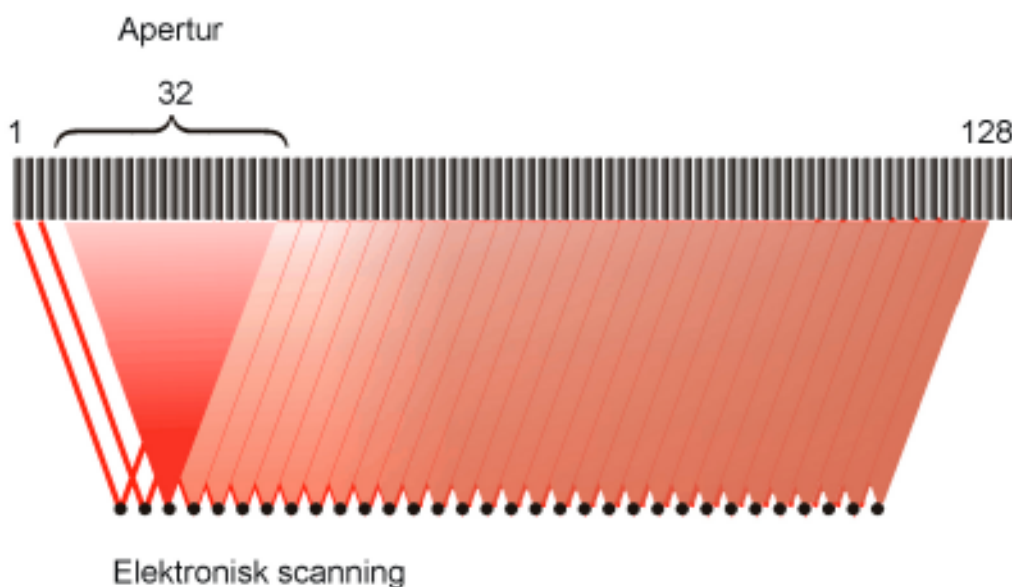
Figur 5-5. Schematisk skiss över olika arraysökare.



Figur 5-6. Princip för fokusering med phased array ultraljud.



Figur 5-7. Princip för styrning av phased array ultraljud.

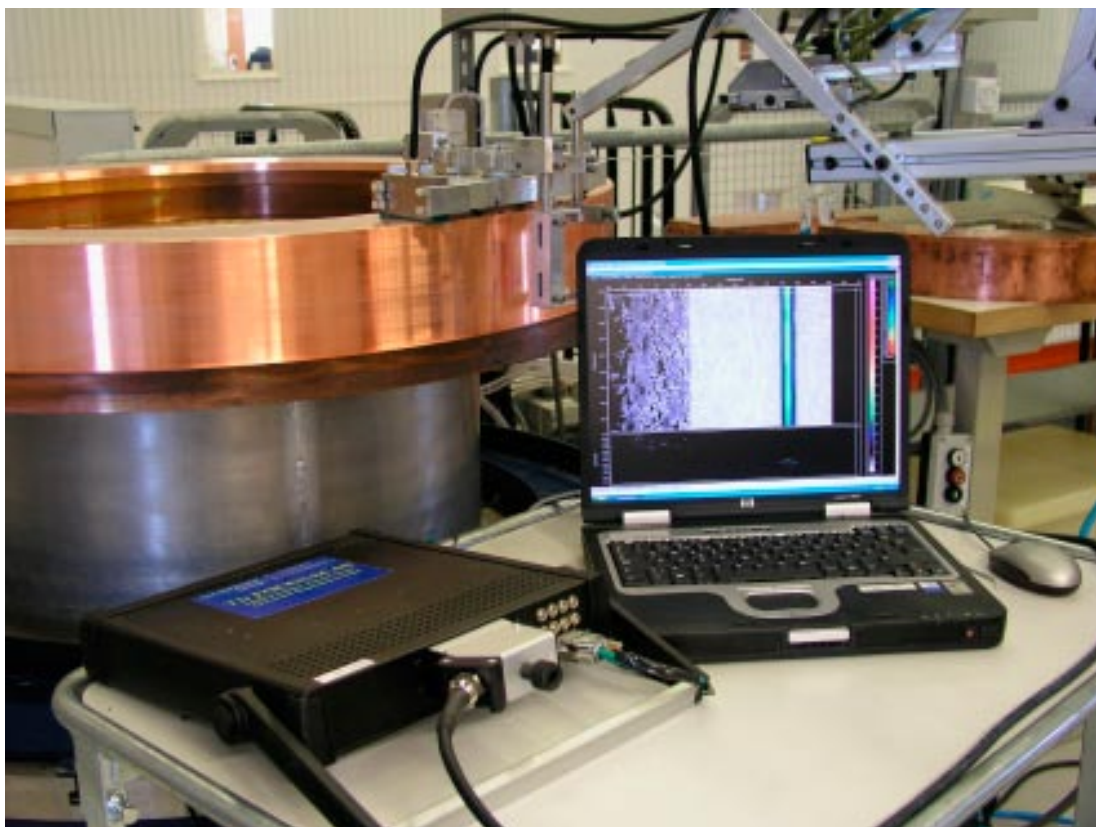


Figur 5-8. Princip för elektronisk scanning.

5.3.1 Systembeskrivning

Systemet för ultraljudprovning består av följande huvudkomponenter, figur 5-9:

- TD Focus-Scan MKI, phased array system.
- Ett flertal plana linjärarray med 32–128 element inom frekvensintervallet 2,7–10 MHz.
- Mjukvara (TD-Scan) för datainsamling och utvärdering.
- Manipulator med system för fixering av arraysökare.



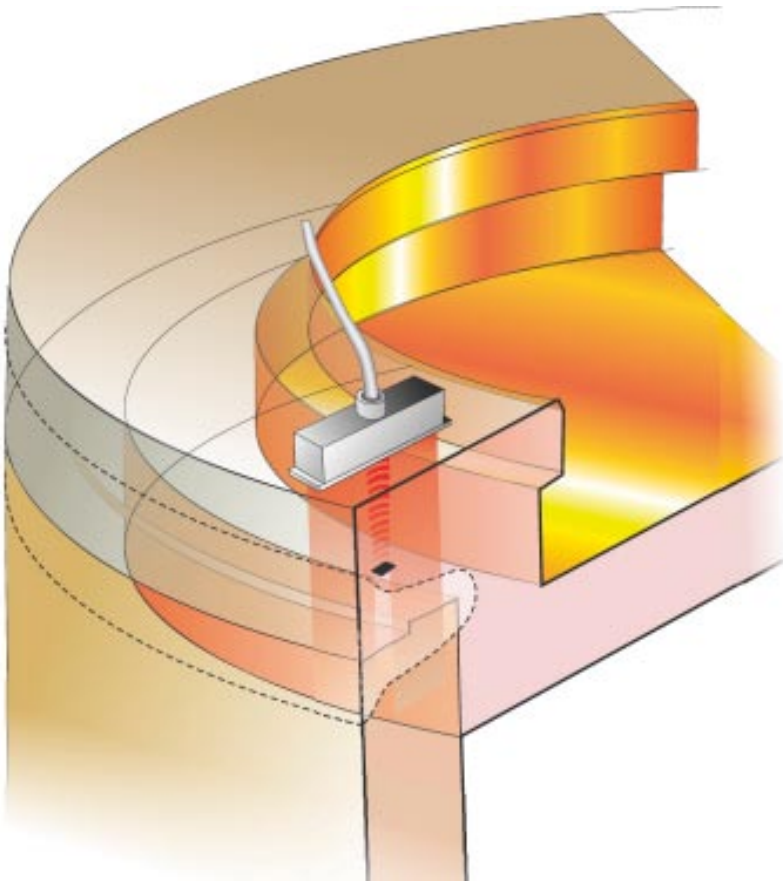
Figur 5-9. Ultraljudsystem för inspektion av förslutningssvetsar.

5.3.2 Principer för provning av FSW

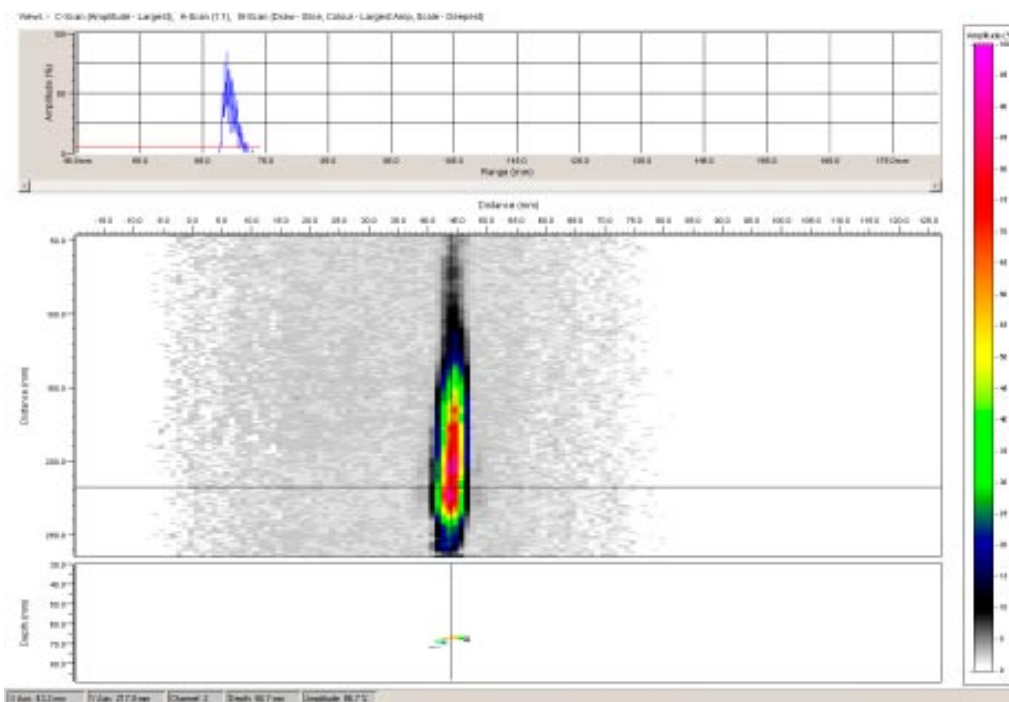
För att säkerställa att god och repeterbar kvalitet uppnås vid ultraljudprovning av kapselns locksvets har instruktioner /Rydén 2000, Ronneteg 2004/ för detta fastställts. Dessa omfattar utrustning, parameterinställningar, referensmaterial samt utvärderingskriterier.

Principen vid provningen är att kapseln roterar medan en ultraljudsökare elektroniskt sveper ljudstrålen i kapselns radiella ledd, se figur 5-10. Sökaren består av 80 skivelement med 5 MHz centerfrekvens där sökarelementen styrs elektroniskt. För att få koppling av ljudvågorna in i kapseln används en tunn vattenfilm som kopplingsmedel. Vid provning används två sekvenser, vinklat ljudfält mot kapselns mantelyta och fokuserat ljudfält i de inre delarna av svetsen. För fokusering används en apertur bestående av 32 element. Resultatet från provningen presenteras sedan som en tvådimensionell bild (C-scan), se figur 5-11, bestående av den maximala ultraljudamplituden i indexeringspunkterna. Bildens vertikala ledd följer kapselns omkrets. Utvärdering sker genom att indikationer med amplitud över ett givet tröskelvärde lokaliseras och storleksbestämning görs enligt halvvärdesmetoden /The International Institute of Welding 1987/.

För inspektion av området i svetsroten används ytterligare ett avsöknings sätt för att kartlägga eventuell foglinjeböjning, se avsnitt 6.3.1. Denna inspektion görs enligt samma princip som ovan. I detta fall skickas ljudet i flera fasta vinklar under avsökningen.



Figur 5-10. Princip för ultraljudprovning av FSW.

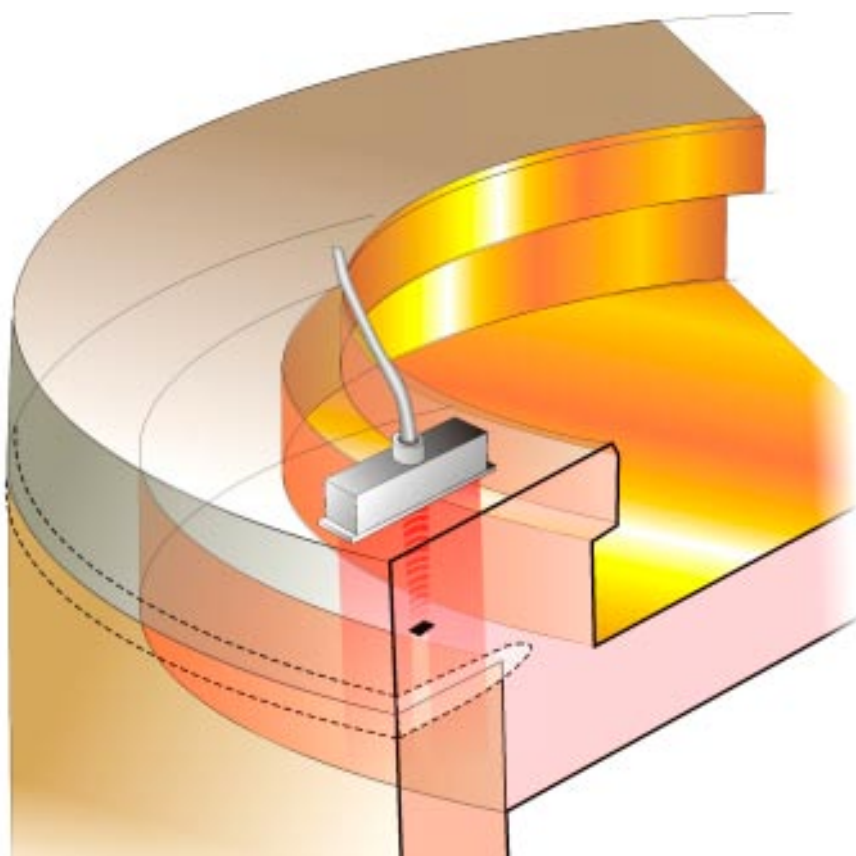


Figur 5-11. Ultraljudprovning av FSW. A-scan högst upp, c-scan i mitten och b-scan längst ner.

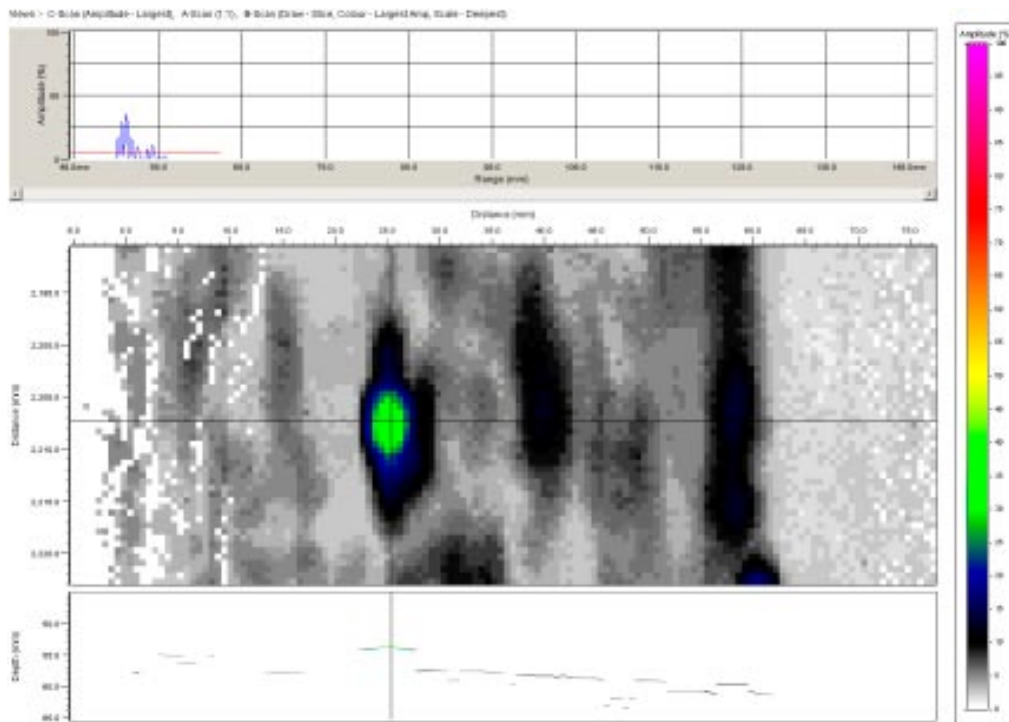
5.3.3 Principer för provning av EBW

Provningen av EBW, se figur 5-12, följer samma principer som provningen av FSW. Det som skiljer är främst att ett sökararray med en lägre centrumfrekvens (2,7 MHz) används vilket ger en lägre upplösning. Detta är en nödvändig anpassning till kornstorleken i svetsgodset för att undvika så kallad korngränsspridning, vilket är en accentuerad effekt i koppar i och med materialets anisotropi. Dessutom vinklas ljudstrålen något vid ytan och vid roten för att säkerställa att även dessa områden undersöks.

I figur 5-13 visas resultat från ett segment av svetsen med svetsytan till vänster medan det ljusare området till höger indikerar området innanför svetsen i locket. Grundmaterialet i locket har finare kornstruktur än svetsgodset vilket kan användas för bestämning av svetsdjupet.



Figur 5-12. Skiss över ultraljudsprovning av EBW.



Figur 5-13. Ultraljudprovning av EBW. A-scan högst upp, c-scan i mitten och b-scan längst ner.

6 Erfarenheter

I detta avsnitt redovisas de erfarenheter som erhållits vid utveckling och provning av svetsar vid Kapsellaboratoriet. Huvudsakligen redovisas erfarenheter efter år 2002 eftersom tidigare erfarenheter har redovisats i /Ronneteg och Moberg 2003/.

Vid Kapsellaboratoriet har till och med juni 2005 mer än 100 svetsar (> 60 EBW och > 40 FSW), varav flertalet både före och efter bearbetning, inspekterats med såväl ultraljud som med radiografering. Som en följd av att demonstrationsserier /SKB 2006d/ bestående av 20 svetsar för respektive svetsmetod har genomförts har OFP-processernas kapacitet testats. Undersökningen av dessa svetsar har resulterat i att cirka 100 ultraljudprovningar och 60 röntgenundersökningar har utförts under en period av tre månader, vilket visar på att såväl system som processer har tillräcklig kapacitet och tillgänglighet. Dessutom har den omfattande provningen bidragit till att öka kunskapen över möjliga diskontinuiteter som kan förekomma i svetsarna.

6.1 OFP-system

OFP-systemen har visat att de fungerar i en produktionsliknande miljö. Systemens möjligheter och begränsningar redovisas i kommande avsnitt.

6.1.1 Röntgensystemet

Manipulatorens i systemet, se figur 5-1, är mycket stabil och ger hög reproducerbarhet. Det problem med systemet som har uppkommit är en följd av perioder med långa stillestånd för linjäracceleratoren som är byggd för att användas kontinuerligt.

I och med att systemet är specificerat för en speciell provningskonfiguration begränsas möjligheten för vidareutveckling av alternativa konfigurationer utan att större modifieringar genomförs.

Bortsett från de komponenthaverier som inträffade under de första åren (1999–2002) har systemet (dator, mjukvara och styrsystem) fungerat utan några större problem.

6.1.2 Ultraljudsystemet

I detta avsnitt behandlas de erfarenheter som vunnits från användning av TD Focus-Scan MKI då All-In inte använts sedan år 2003.

Ultraljudsystemet har överlag uppfyllt SKB:s specifikationer. Dock har följande begränsningar identifierats:

- Provning med phased array-teknik genererar stor mängd data, vilket gör att hastigheten för överföring av data från systemet till datorn begränsar provningshastigheten.
- Programvaran för utvärdering och presentation är inte tillräckligt utvecklad för att möjliggöra rationell utvärdering.
- Vid ett tillfälle slutade ett flertal ultraljudkanaler att fungera vilket föranledde att systemet reparerades av leverantören. Detta har medfört att mer specificerade rutiner gällande kalibrering av systemet utarbetas.

En fördel är att systemet är portabelt vilket innebär att provning och utveckling även kan ske ”off site”.

6.2 OFP-processer

De oförstörande provningsmetoderna för förslutningssvetsen har utvecklats parallellt med att de har använts som hjälpmedel för att kontrollera och ge information om svetskvalitén inom utvecklingen av svetsprocesserna /SKB 2006d/. En mer ingående redovisning av OFP-processernas tillförlitlighet finns i kapitel 7.

6.2.1 Digital radiografering

Radiografering har varit ett viktigt hjälpmedel vid utvärdering av de provsvetsningar som utförts. En allmän kommentar är att kapselns excentricitet och ovalitet är kritisk för röntgenbildernas kvalitet och för lägesbestämning av diskontinuiteter i kapselns radiella ledd. Dessutom bör utvärderingen av resultaten göras mer rationell.

Vid provning av elektronstrålesvetsar har röntgenmetodiken fungerat mycket väl. Detta som en följd av att en stor del av de diskontinuiteter som kan uppstå är volymetriska. Det är även möjligt att lokalisera varifrån indikationer härrör då den relativt smala svetsen möjliggör lokalisering av detta.

För FSW fungerade röntgenmetodiken som ett bra hjälpmedel för processutvecklingen i ett tidigt skede, vilket var till stor nytta då tekniken för ultraljudprovning inte till en början var tillräckligt utvecklad. Tidigt i utvecklingen av processen genererade FSW relativt stor andel volymetriska diskontinuiteter medan dessa på senare tid endast har indikerats i undantagsfall.

6.2.2 Phased – ultraljud

Ultraljudprovningen har visat sig fungera väl som ett hjälpmedel i utvecklingen av de båda svetsprocesserna.

För EBW har en utvecklad provningsmetodik använts under hela svetsutvecklingsprocessen vilket har bidragit till att underlätta förståelsen för de viktiga parametrarna under utvecklingsarbetet. Ultraljudprovningen har varit ett bra komplement till radiograferingen då oklarheter vid tolkning av indikationer har uppkommit. Dessutom har ultraljudprovningen indikerat andra typer av fel, till exempel om svetsen inte smält upp en del av fogen (bindfel), som normalt inte kan indikeras med röntgen. Provningen har även fungerat mycket väl för bestämning av svetsdjupet då gränsen mellan den grova svetsstrukturen och den mindre kornstorleken i locket indikeras mycket väl. De kända diskontinuiteter (detekterade med röntgen) som inte indikerats med ultraljud har huvudsakligen haft ogynnsam orientering för ljudfältet och lokaliserats nära svetsytan.

För FSW har ett annat angreppssätt använts som en följd av den begränsade kunskap över vilka typer av diskontinuiteter som kan förekomma. Detta har inneburit att provningsmetodiken har utvecklats parallellt med utvecklingen av svetsprocessen. Arbetet har försvårats (ur OFP synpunkt) av att få diskontinuiteter, och därmed indikationer, uppstår vid svetsningen. För att säkerställa att alla relevanta diskontinuiteter indikerats har ett flertal olika metoder utvärderats, till exempel har olika varianter av provning från svetsytan studerats, se Fud-program 2004 /SKB 2004a/.

6.3 Diskontinuiteter

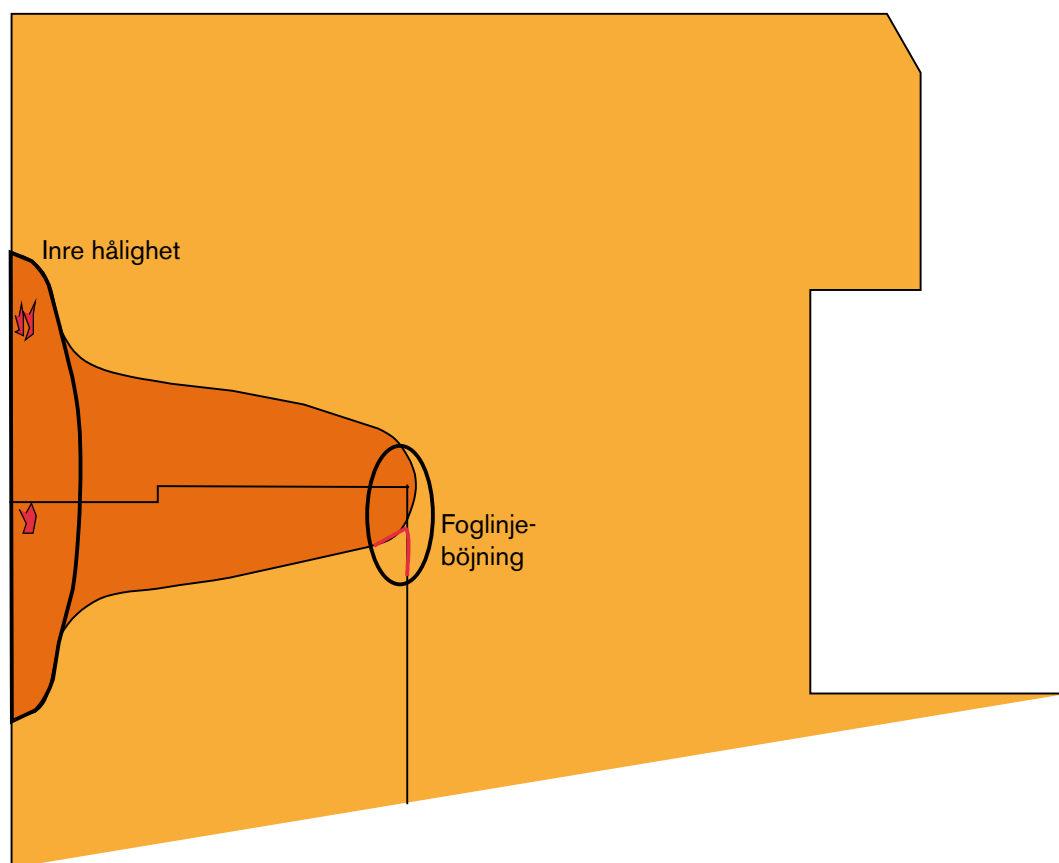
I detta avsnitt redovisas de makroskopiska diskontinuiteter som indikerats med OFP i svetsar gjorda med parametrar inom eller nära processfönstret. Syftet med denna redovisning är att ge en översiktlig bild över de diskontinuiteter som behandlats i tillförlitlighetsstudien i kapitel 7. En mer utförlig beskrivning av möjliga diskontinuiteter finns i /SKB 2006d/.

6.3.1 Friction stir welding

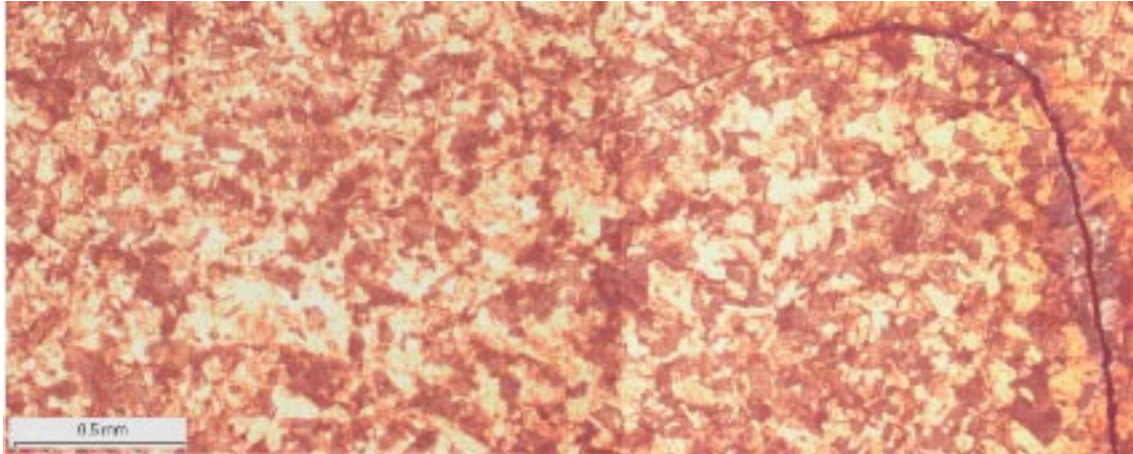
Vid försöken med friktionssvetsning är det huvudsakligen två typer av diskontinuiteter som har indikerats, foglinjeböjning och inre håligheter, se figur 6-1. Foglinjeböjning har indikerats i de flesta svetsar medan inre håligheter har indikerats i tidigt utförda svetsar samt i enstaka svetsar där processparametrarna inte varit optimerade.

Foglinjeböjning (bindfel)

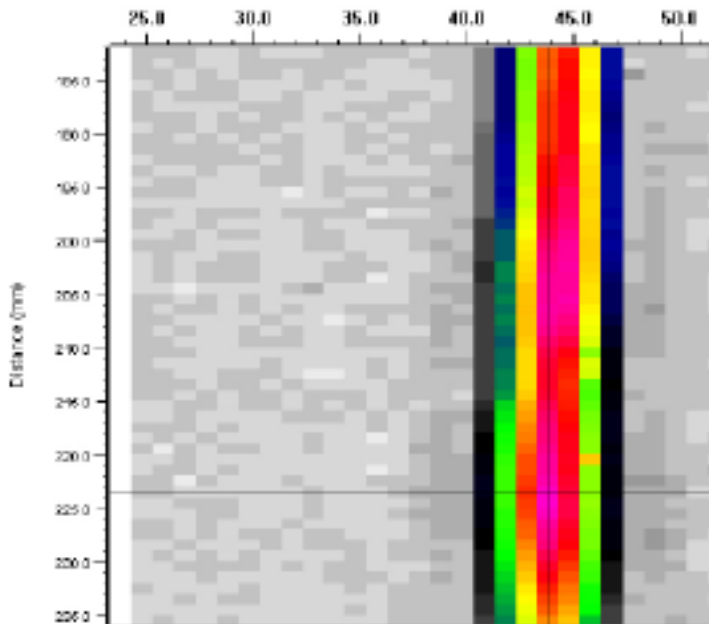
Foglinjeböjning, se figur 6-2, kan förekomma i svetsens inre del som en följd av att den vertikala fogen mellan röret och locket böjs vid svetsning. Detekterbarheten för denna typ av diskontinuitet är mycket god med ultraljud, se figur 6-3, medan den inte kan detekteras med radiografering.



Figur 6-1. Lokalisering av diskontinuiteter i FSW-svetsar.



Figur 6-2. Makroprov av foglinjesböjning.



Figur 6-3. Ultraljudprovning (c-scan) av foglinjesböjning.

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

Lokalisering: I svetsroten.

Karakteristik: Tät sprickliknande diskontinuitet med utbredning i radiell ledd med en spalt på $< 10 \mu\text{m}$, vinkel radiellt/axiellt $< 20^\circ$. God ytfinhet.

Provningmetod: Phased array ultraljud från lockets ovsida med ljudfält riktade inom intervallet $\pm 20^\circ$.

Inre hålighet (maskhål)

De inre håligheterna, se figur 6-4, kan förekomma i svetsens yttre del som en följd av svetsparametrar utanför processfönstret. Detekterbarheten för denna typ av diskontinuitet är god med ultraljud, se figur 6-5 och 6-6, men är endast påvisbar vid radiografering i extremfallet då den formar en volymetrisk diskontinuitet.

Storlek: Radiell storlek upp till 10 mm har noterats vid ogynnsamma svetsparametrar. I tangentiell ledd är utbredningen mindre än 10 mm, dock kan kluster av diskontinuiteter ge en betydligt större tangentiell utbredning.

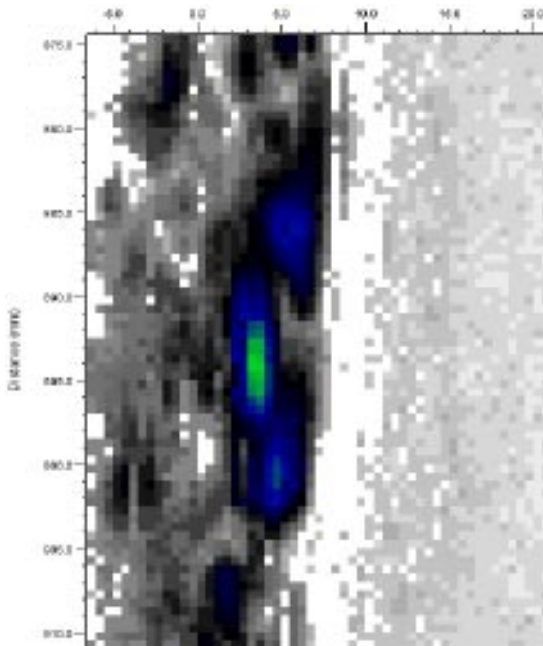
Lokalisering: Har påvisats från ytan ned till ett djup av 10 mm.

Karakteristik: Består oftast 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.

Provningsmetod: Visuellt vid ytbrytande diskontinuiteter, phased array ultraljud från lockets ovansida med ljudfält riktade inom intervallet 0–30° och röntgen av volymetriska diskontinuiteter.



Figur 6-4. Makroprov av inre hålighet.



Figur 6-5. *Ultraljudprovning (c-scan) av inre hålighet.*



Figur 6-6. *Radiografering av inre hålighet.*

6.3.2 Elektronstrålesvetsning

Vid försöken med elektronstrålesvetsning är det huvudsakligen två typer av diskontinuiteter som har uppkommit, inre håligheter och porsamling i roten.

Inre hålighet (maskhål)

De inre håligheterna, se figur 6-7, kan förekomma var som helst i svetsens radiella ledd, orienterad i svetsgodsets övre del. Detekterbarheten för denna typ av diskontinuitet kan anses vara god med såväl ultraljud, figur 6-8, som radiografering, figur 6-9.

Karakteristik: Volymetrisk linsformad hålighet.

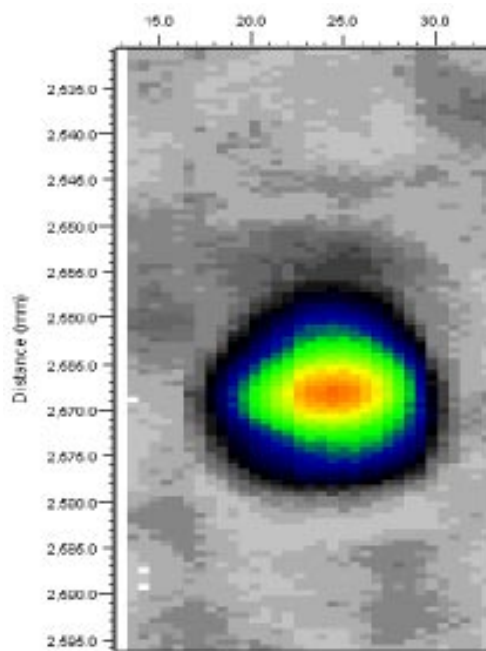
Lokalisering: Håligheten ligger vanligen orienterad i svetsgodsets övre del.

Storlek: Vid normala svetsparametrar < 5 mm i radiell ledd och något mindre i tangentiell ledd. Dock har betydligt större inre håligheter indikerats vid kraftiga störningar i svetsprocessen.

Provningsmetod: Phased array ultraljud från lockets ovasida med ljudfält riktat 0°, samt digital radiografering.



Figur 6-7. Makroprov av inre hålighet.



Figur 6-8. Ultraljudprovning (c-scan) av inre hålighet.



Figur 6-9. Radiografering av inre hålighet.

Porsamling i roten

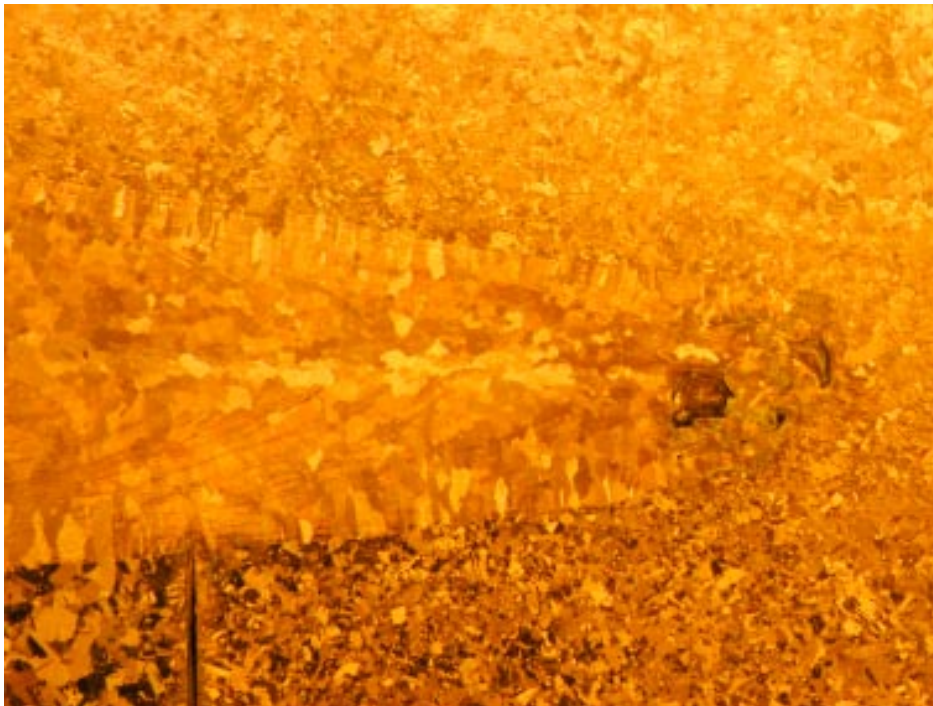
Porsamlingar i roten, se figur 6-10, är orienterad i svetsgodsets inre del, så kallad rot. Detekterbarheten för denna typ av diskontinuitet kan anses vara god med såväl ultraljud, se figur 6-11, som radiografering, se figur 6-12. Beroende på dess karakteristik kan i vissa fall, då diskontinuiteten har liten volym, medföra låg detekterbarhet med radiografering. I dessa fall är dock detekterbarheten med ultraljud mycket god.

Karakteristik: Hålighet eller ojämnhet i svetsgodsets rot.

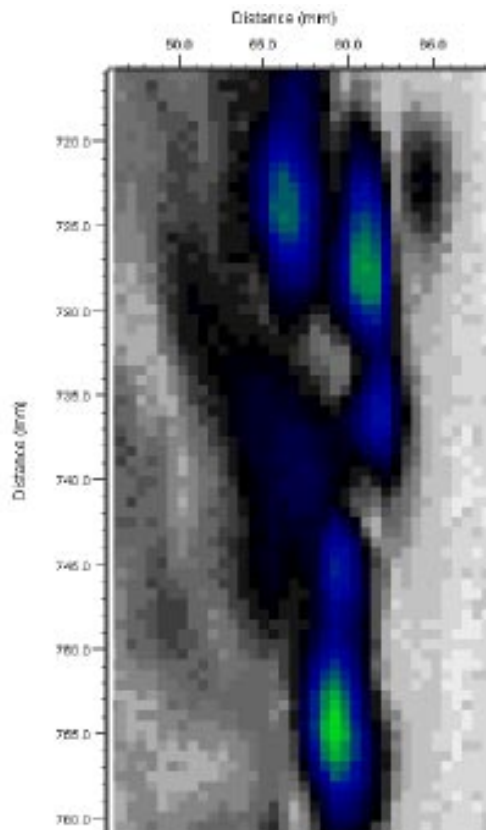
Lokalisering: Håligheten ligger orienterad i svetsgodsets inre del kallad rot.

Storlek: Normalt < 3 mm, men större har indikerats i enstaka fall.

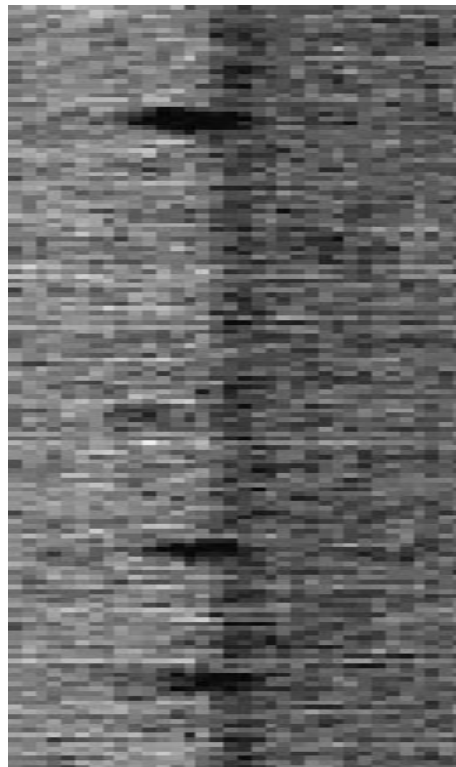
Provningsmetod: Phased array ultraljud från lockets ovansida med ljudfält riktat 0°, samt digital radiografering.



Figur 6-10. Makroprov av porsamling i roten.



Figur 6-11. Ultraljudprovning (c-scan) av porsamling i roten.



Figur 6-12. Radiografering av porsamling i roten.

6.4 OFP i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen

SKB:s referenskapsel består av en gjuten insats med stållock som placeras i ett kopparhölje. Kopparhöljet består av ett extruderat rör, en smidd botten och ett smitt lock. Såväl lock som botten svetsas fast vid röret med friction stir welding.

För tillverkning av kapslar är referensalternativet att SKB kommer driva en kapselfabrik där slutbearbetning och kontroll av kapselns komponenter kommer att ske. I kapselfabriken kommer även kopparbotten svetsas fast på röret och undersökas med OFP. Locket kommer däremot att svetsas fast i inkapslingsanläggningen efter att kapselns har fyllts med använt kärnbränsle.

SKB:s huvudlinje är att provningen av kapselns lock- och botten svets ska provas enligt samma principer och därmed kommer samma typ av utrustning att användas i kapselfabriken som i inkapslingsanläggningen.

6.4.1 Kapsel fabriken

I kapsel fabriken /SKB 2006c/ kommer kapseln huvudsakligen hanteras liggande. Detta innebär att OFP-systemen kommer anpassas för provning med kapseln liggande.

För såväl röntgen- som ultraljudsystemet innebär detta modifieringar, exempelvis måste fixturen för ultraljudssökaren modifieras för att möjliggöra god akustisk kontakt med botten. I övrigt kan samma avsökningssätt och parameterinställningar användas som för förslutningssvetsen.

6.4.2 Inkapslingsanläggningen

I inkapslingsanläggningen kan röntgen- och ultraljudsystemen utformas enligt samma principer som de befintliga systemen vid Kapsellaboratoriet. Den stora skillnaden är att all hantering i samband med provning kommer att utföras fjärrmanövrerat.

I inkapslingsanläggningen kommer all OFP att utföras i samma cell. Detta innebär att de delar av ultraljudsystemet som finns inne i cellen måste strålskyddas då röntgenacceleratoren är påslagen. Dessutom krävs att de ultraljudssökare som används är konstruerade för att tåla den strålning som kapseln kommer att avge samt den temperatur som kapseln kommer att hålla.

7 Tillförlitlighet vid OFP

Med tillförlitlighet vid oförstörande provning avses förmågan att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter samt uppskatta risken för falska indikationer /Müller och Öberg 2004/. Sedan år 2003 drivs ett projekt ”NDT Reliability” vid BAM (Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung) för att bestämma OFP-processernas tillförlitlighet. Resultatet av undersökningen redovisas översiktligt i detta kapitel medan en utförlig redovisning finns i projektets slutrapport /Müller et al. 2006/.

7.1 Bakgrund

En inledande undersökning för att bestämma OFP tillförlitligheten utfördes 2001 /Ronneteg och Moberg 2003/. Undersökningen omfattade 43 diskontinuiteter som indikerats i svetsar (EBW) där uppskattad storlek med ultraljud och röntgen jämfördes mot uppmätt storlek vid metallografiska undersökningar. Studien visade god korrelation mellan OFP och metallografi. En slutsats var att en mer utförlig studie krävs för att på systematisk sätt bestämma OFP-metodernas detekteringsförmåga.

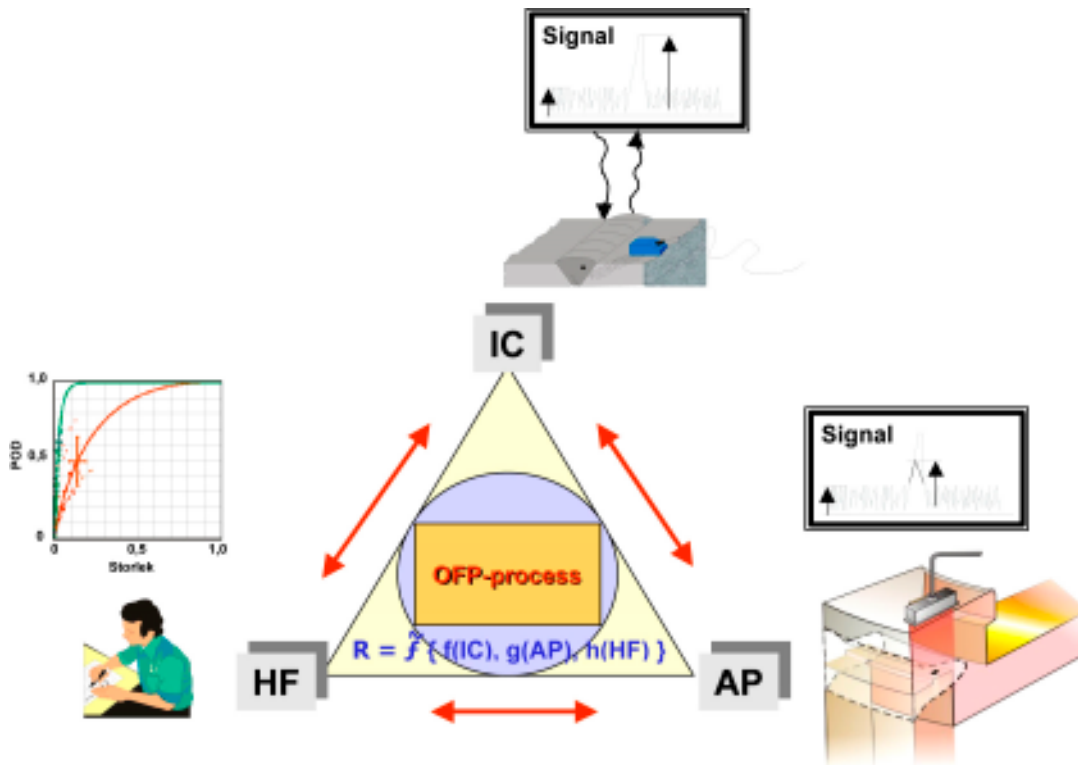
En bred studie initierades vid BAM 2003, projekt ”NDT Reliability”. Projektet har omfattat utvärdering av OFP av svetsar gjorda med EBW och FSW med syfte att bestämma detekteringsförmågan, POD (Probability of Detection), samt noggrannhet vid uppskattning av diskontinuiteters storlek. Som utgångspunkt för studien användes de då gällande kraven /Werme 1998/ på resterande koppartjocklek av 15 mm.

7.2 Strategi

För att bestämma OFP-processers tillförlitlighet (R) kan dessa indelas i tre delar enligt figur 7-1, där varje del påverkar processens tillförlitlighet:

- Metodens fysiska förmåga att detektera relevanta diskontinuiteter för processen (intrinsic capability, IC).
- Parametrar i den tekniska applikationen som inverkar på provningen (application parameter, AP).
- Effekter från mänskliga faktorer (human factors, HF).

I projektet var målet att bestämma OFP-processernas förmåga att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter med fokus på de fysiska parametrarna (IC). Övriga tekniska faktorer samt de mänskliga faktorerna kommer att vara föremål för undersökning i ett senare skede när mer slutgiltiga tekniska lösningar finns framme. Målet är att dessa faktorer ska minimeras vid utformning av processer och system.



Figur 7-1. Tillförlitlighet vid OFP.

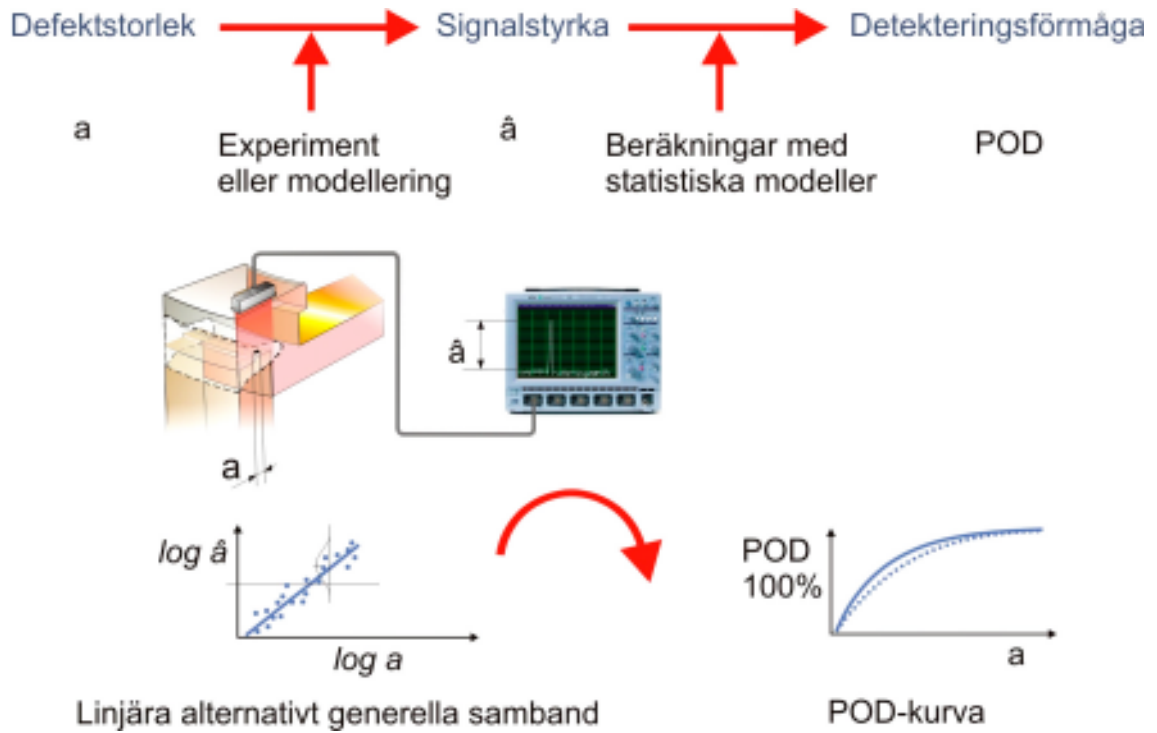
7.2.1 Detekteringsförmåga

Den metod som använts för bestämning av detekteringsförmågan, Probability of Detection (POD), använder förhållandet mellan signalstyrkan \hat{a} från detekteringssystemet och diskontinuitetens storlek a , se figur 7-2. Metoden beskrivs i /US Department of Defence 1999/ och utvecklades för USA:s militära rymdindustri.

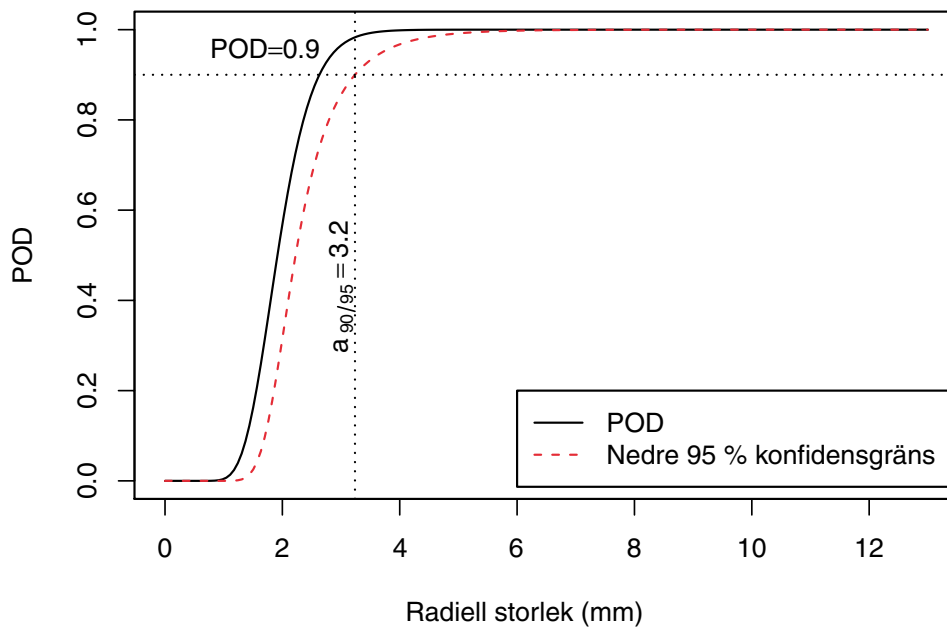
För att kunna applicera metoden på provningen av kapselns förslutningssvets har denna vidareutvecklats. Framför allt som en följd av att metoden är anpassad för OFP-metoder där ”signalstyrkan” direkt påverkas av storleken på indikationen. Detta är dock inte fallet för SKB:s OFP-processer då det är diskontinuiteternas radiella utbredning som bestämmer kapselns integritet. Det värde ” $a_{90/95}$ ” som används som ett mått på metodernas detekteringsförmåga är det värde då den nedre kurvan för 95 % konfidensgräns når 90 % detekteringsförmåga, se figur 7-3. Indexeringen (90/95) anger att 90 % av diskontinuiteterna med storleken a kommer att detekteras inom ett konfidensintervall på 95 %, det vill säga osäkerheten vid bestämning av POD-kurvan.

7.2.2 Noggrannhet i storleksuppskattning

Beträffande provningsmetodernas precision i storleksbestämning har en metodik använts där resultaten presenteras i så kallade ”box plots” (figur 7-4).



Figur 7-2. Generell beskrivning av metodik för bestämning av POD.



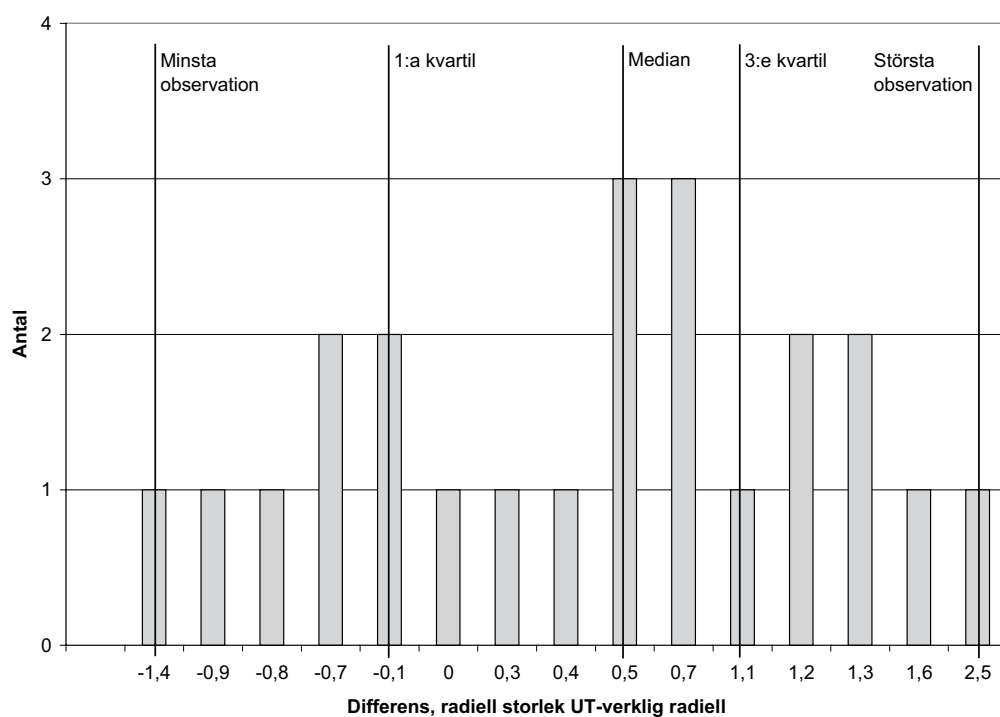
Figur 7-3. Exempel på POD-kurva med 95 % nedre konfidensgräns korsar 90 % POD.

En "box plot" sammanfattar fem nivåer av de datapunkter (figur 7-5) som används enligt följande:

- Minsta observation i populationen.
- 1:a kvartil.
- Median.
- 3:e kvartil.
- Största observation i populationen.



Figur 7-4. Exempel på "box plot".



Figur 7-5. Beskrivning av datapunkter för "box plots".

7.3 Praktiskt förfarande

För att få fram provobjekt med olika populationer av diskontinuiteter i tillräcklig omfattning utfördes svetsningar under betingelser som inte var normala. Exempel på störningar som infördes är kontaminering och mekaniska skador på fogytor samt avvikelser från normala processparametrar. Syftet var att generera ett stort antal realistiska diskontinuiteter som kan tänkas uppstå i processerna. Dessutom har kompletterande material använts från andra svetsar där diskontinuiteter har indikerats med OFP för att få ett tillräckligt statistiskt underlag för analysen.

Svetsarna undersöktes med OFP enligt instruktioner vid Kapsellaboratoriet för radiografering och ultraljudprovning. Objekt och undersökningsresultat från OFP levererades till BAM där objekten undersöktes med olika referensmetoder, ultraljudprovning i immersion, HECT (High Energy Computed Tomography) och μ -CT (Micro-focus Computed Tomography). Kompletterande utvärdering har även skett vid Kapsellaboratoriet. Slutligen har även metallografiska undersökningar /Ronneteg 2005b, Samuelsson 2005/ utförts för att verifiera diskontinuiteternas förekomst, form och utbredning.

7.4 Resultat

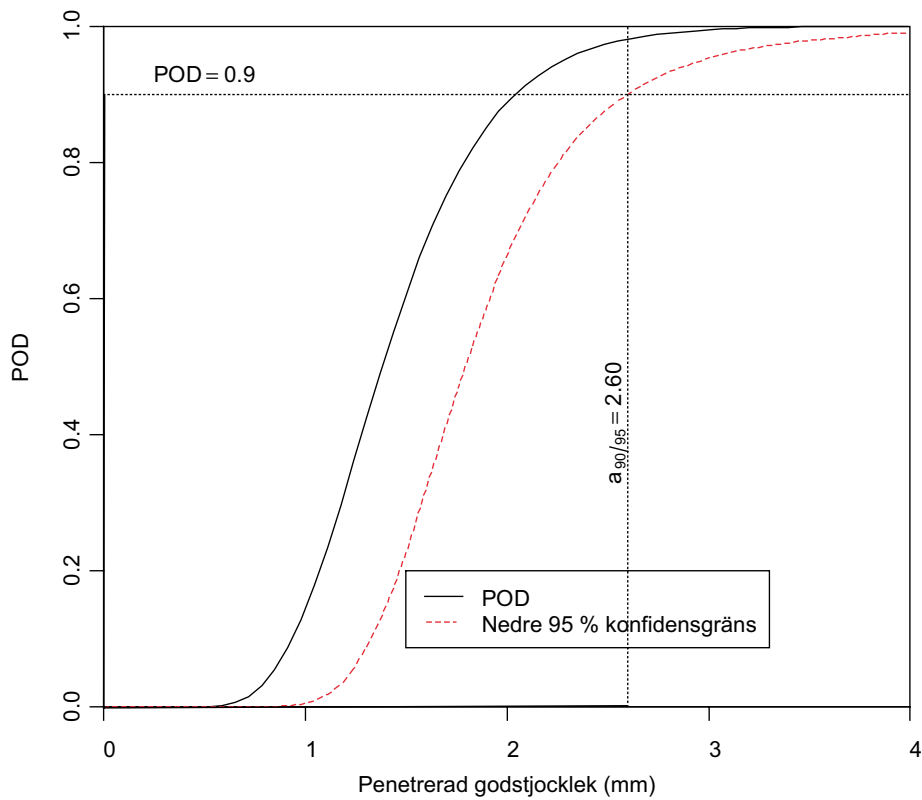
Resultaten från tillförlitlighetsstudien visar på att provningsmetoderna för svetsen har god förmåga att detektera och storleksbestämma undersökta typer av diskontinuiteter. I denna rapport redovisas endast resultat för FSW medan resultat för EBW redovisas i projektets slutrapport /Müller et al. 2006/. Resultaten har använts som indata till säkerhetsanalysen tillsammans med en analys av förväntad svetskvalitet i framtida produktion /Ronneteg et al. 2006/.

7.4.1 Detekteringsförmåga

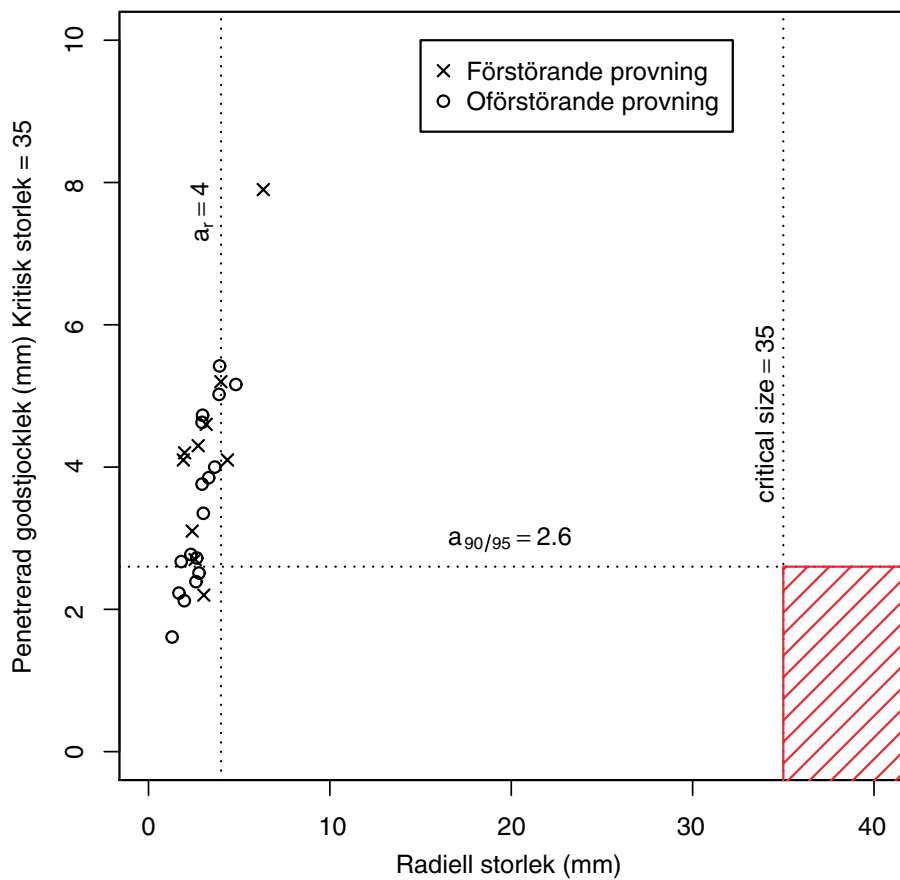
För diskontinuiteter av typ inre hålighet har det inte varit möjligt att få ett direkt samband mellan signalstyrkan och diskontinuiteternas radiella storlek (a_r). För radiografering har först ett värde på $a_{90/95}$ för penetrerad godstjocklek med HECT bestämts, figur 7-6. Därefter har detta värde korrelerats mot diskontinuiteternas verkliga storlek, figur 7-7, vilket ger ett värde på a_r på 4 mm. För ultraljud bestämdes först ett värde på $a_{90/95}$ för diskontinuiteternas reflekterade area vid immersionsprovning, figur 7-8. Därefter har detta värde korrelerats mot diskontinuiteternas verkliga storlek, figur 7-9, vilket ger ett värde på a_r på 6,3 mm.

För diskontinuiteter av typ foglinjeböjning har ett direkt samband mellan signalstyrkan och diskontinuiteternas radiella storlek kunnat användas som en följd av att den tangentiella utbredningen är betydligt större än ljudfältet i denna riktning. Dessa prov visar på en detekteringsförmåga $a_{90/95}$ på 4 mm, se figur 7-10.

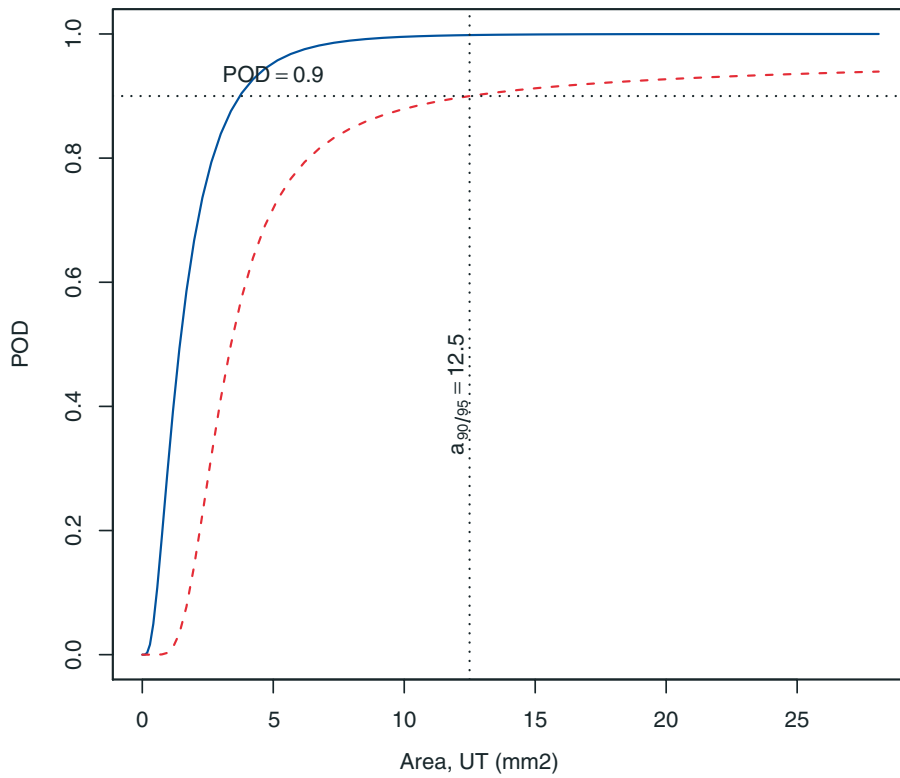
Resultaten är sammanställda i tabell 7-1 medan mer utförliga resonemang presenteras i /Müller et al. 2006/.



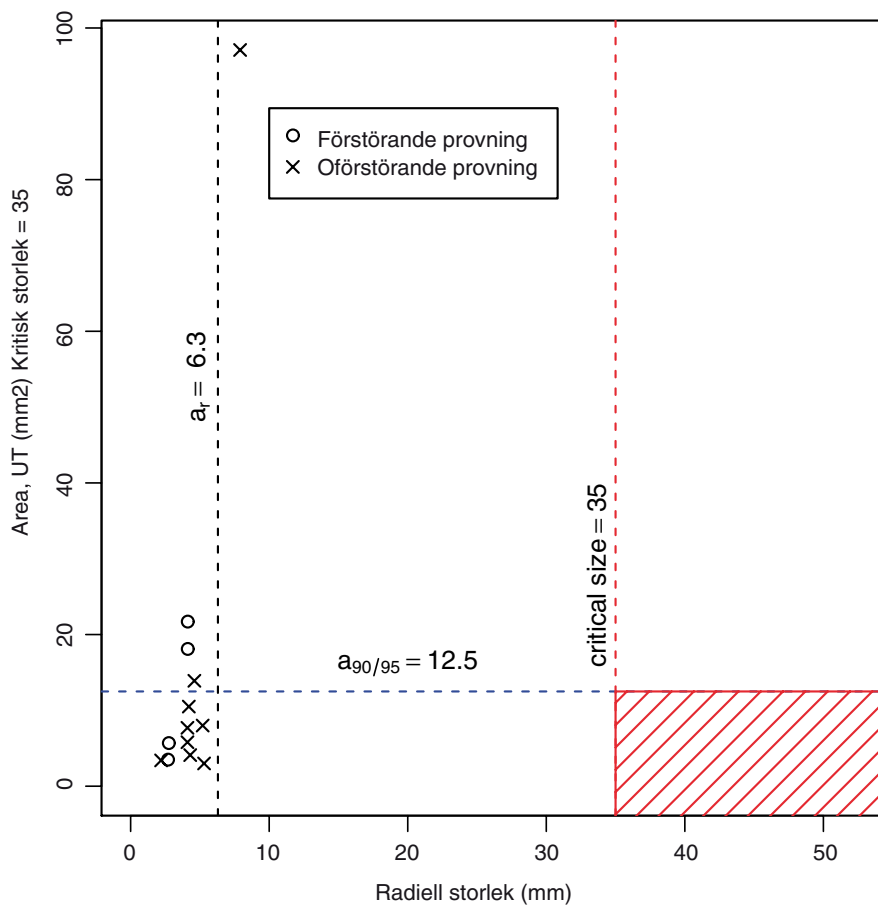
Figur 7-6. POD för radiografering av inre hålighet.



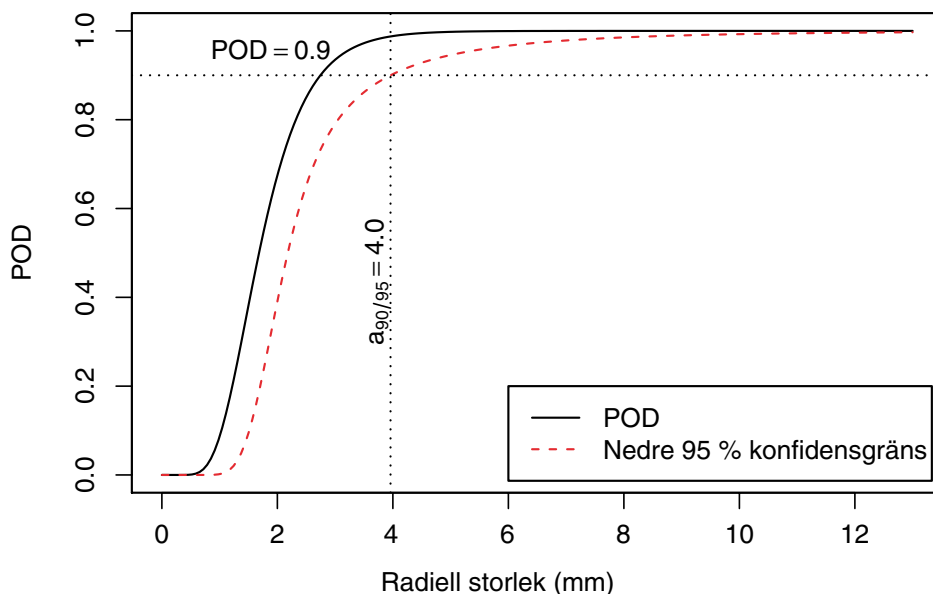
Figur 7-7. Spridningsdiagram för radiografering av inre hålighet.



Figur 7-8. POD för ultraljudprovning av inre hålighet.



Figur 7-9. Spridningsdiagram för ultraljudprovning av inre hålighet.



Figur 7-10. POD för ultraljudprovning av foglinjesböjning.

Tabell 7-1. Sammanställning av POD-resultat för svetsar gjorda med FSW.

	$a_{90/95}$ UT	$a_{90/95}$ RT
Inre håligheter	6,3 mm	4 mm
Foglinjesböjning	4 mm	

Sammanfattningsvis kan nämnas att detekteringsförmågan med ultraljud är bättre för foglinjesböjning än för inre håligheter. Detta kan naturligt förklaras med att foglinjesböjning är en bra reflektor medan inre håligheter har oregelbunden form. Det är även logiskt att foglinjesböjning inte kan detekteras med radiografering då dess volym är mycket liten.

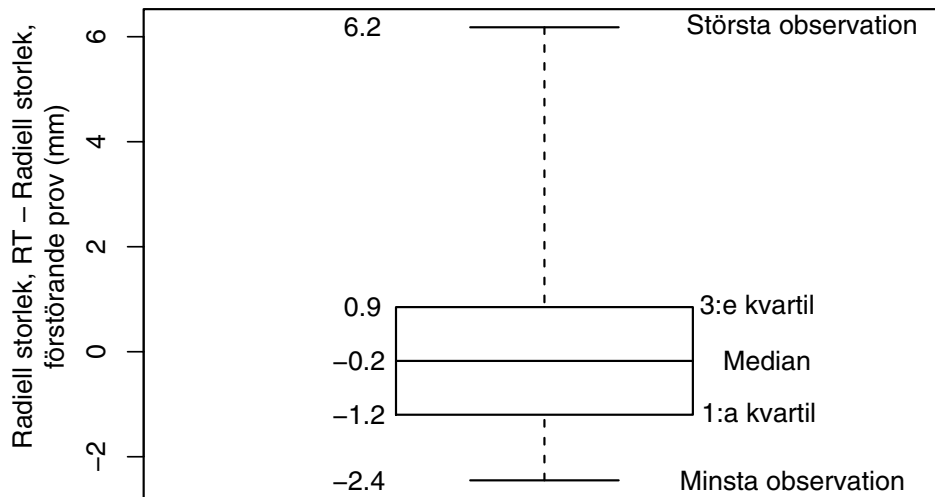
7.4.2 Noggrannhet i storleksuppskattning

Studierna över provningsmetodernas förmåga att storleksbestämma diskontinuiteter presenteras i så kallade ”box plots” i figurerna 7-11 till 7-13 nedan. Sammanfattade resultat presenteras i tabell 7-2. För bestämning av noggrannhet i storleksuppskattning med OFP används nivån för 1:a respektive 3:e kvartil i dessa ”box plots”.

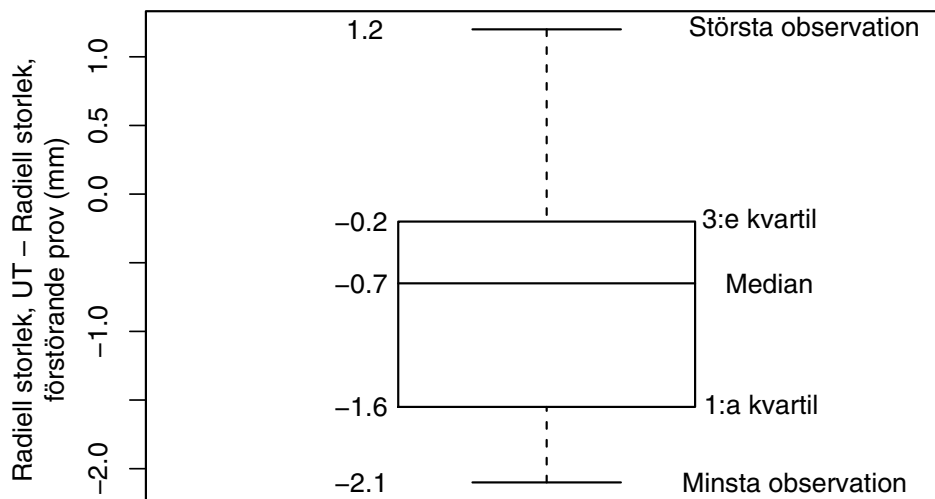
Sammanfattningsvis kan noteras att samtliga undersökta typer av diskontinuiteter i FSW kan storleksbestämmas med en noggrannhet bättre än 2 mm.

Tabell 7-2. Sammanställning av resultat från noggrannhet vid storleksuppskattning.

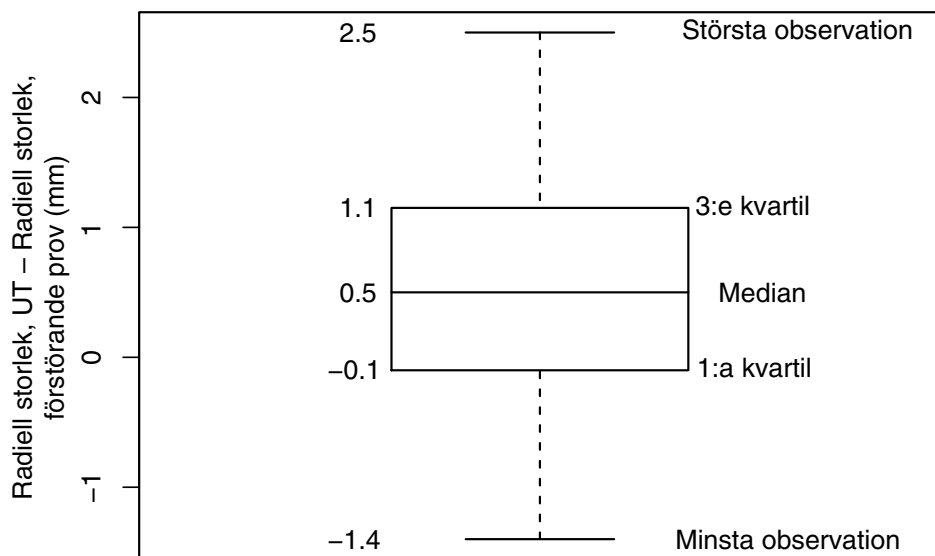
	Storleksuppskattning UT		Storleksuppskattning RT	
	Överskattning	Underskattning	Överskattning	Underskattning
Inre håligheter	Ingen överskattning	1,6 mm	0,9 mm	1,2 mm
Foglinjesböjning	1,1 mm	0,1 mm	Detekteras ej	Detekteras ej



Figur 7-11. "Box plot" för radiografering av inre hålighet.



Figur 7-12. "Box plot" för ultraljudprovning av inre hålighet.



Figur 7-13. "Box plot" för ultraljudprovning av foglinjesböjning.

8 Utveckling och forskning

För att säkerställa att tillräcklig information över de oförstörande provningsmetoderna för svetsen erhålls bedriver SKB forskning och tillämpad utveckling inom flera områden. Inom vissa områden görs utveckling för att ta fram ny teknik medan syftet inom andra områden är att säkerställa framtida kompetens.

8.1 Digital radiografering

Inom området digital radiografering har arbete utförts inom ramen för projekt ”NDT Reliability” vid BAM /Müller et al. 2006/.

8.1.1 Optimering av röntgenmetodik

En del av projektet vid BAM är inriktat på kartläggning och optimering av SKB:s system och metodik för digital radiografering. Som utgångspunkt för kartläggningen har gällande standarder för konventionell radiografering använts /European Committee for Standardization 1997, 1994a–c/. Dessutom har systemets prestanda jämförts med andra digitala röntgensystem.

I och med att den nya europastandarden /European Committee for Standardization 2001/ för radiografering inte är anpassad för material med större godstjocklek än 85 mm har karakteriseringen av SKB:s system gjorts med utgångspunkt från europastandarden för inspektion av svetsar med radiografering /European Committee for Standardization 1997/.

Resultat

Resultaten visar på att SKB:s system och process överlag uppfyller kraven i denna standard. Framför allt är signal till brusförhållandet (SNR) mycket bra medan oskärpan, det vill säga förmågan att särskilja flera diskontinuiteter, är något sämre än kraven. För övrigt redovisas dessa undersökningar i detalj i slutrapporten för projekt ”NDT Reliability” vid BAM /Müller et al. 2006/.

8.1.2 Modellering

De mätningar som BAM har gjort på SKB:s röntgensystem har utnyttjats för att optimera den modell som beskriver radiografering av svetsen. Målet är att denna modell ska kunna användas för att ta fram en stor mängd data för bestämning av röntgenmetodens tillförlitlighet utan att en stor mängd praktiska experiment behöver utföras. Dessutom kan modellen användas för att uppskatta detekteringsförmågan för olika typer av diskontinuiteter samt om geometrin för kapseln behöver ändras.

För närvarande pågår verifiering av modellen och resultaten från denna presenteras i slutrapporten från projekt ”NDT Reliability” vid BAM /Müller et al. 2006/.

8.2 Ultraljud

Inom området för phased array ultraljudsteknik har en stor del av insatserna riktats mot utveckling av metodik för provning av kapslar förslutna med FSW.

8.2.1 Process för provning av FSW

Eftersom FSW är en relativt ny svetsmetod och speciellt i applikationen på 50 mm tjock koppar var kunskapen om vilka diskontinuiteter som kan uppkomma begränsad till en början. Detta medförde att ett brett synsätt har använts vid utvärdering av olika möjliga provningskonfigurationer. I Fud-program 2004 /SKB 2004a/ beskrivs olika konfigurationer som har utvärderats. Det har dock visat sig att de flesta av dessa konfigurationer inte varit tillräckligt robusta för att motivera vidareutveckling. Dessutom har den ökade kunskapen över möjliga diskontinuiteter verifierat att dessa konfigurationer inte har varit nödvändiga för att detektera processens diskontinuiteter. Detta innebär att arbetet kommer att fokuseras på vidareutveckling av befintliga konfigurationer med hjälp av experimentella försök och modellering.

8.2.2 Modellering

Inom området för modellering av ultraljud har aktiviteter utförts såväl vid BAM som vid SKB. Modelleringen vid BAM beskrivs i detalj i slutrapporten för ”NDT Reliability” /Müller et al. 2006/.

Den modellering som pågår vid SKB har hittills utförts med syfte att få förståelse för de konfigurationer som används vid provning av svetsar. För simulering har ett verktyg, Ultrasim /Holm 1995/, utvecklat vid Oslo Universitet använts. Detta programpaket är primärt utvecklat för arraysökare med medicinska tillämpningar men är även anpassat för oförstörande provning. För att utöka förståelsen över ljudfältens interaktion med diskontinuiteter i materialet har nyligen ett projekt vid Chalmers Universitet initierats.

Den simulering som utförts hittills har huvudsakligen varit inriktad mot:

- Bestämning av ljudfält vid aktuella konfigurationer för provning av FSW.
- Undersökning av vilken effekt antalet element som används för fokusering apertur har.
- Undersökning av vilken effekt defekta/ojämna arrayer har på ljudfältet.
- Undersökning av effekten från dynamisk fokusering.

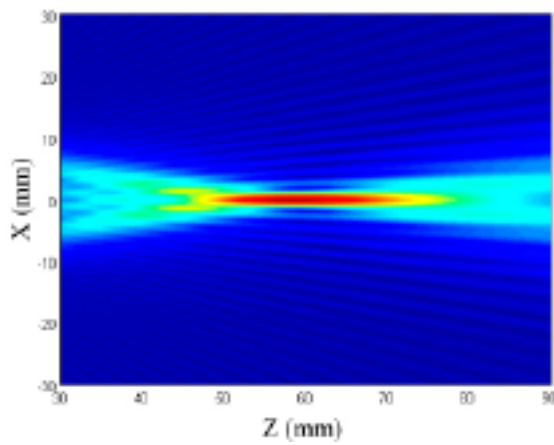
Resultat

I detta avsnitt redovisas exempel på resultat från den simulering som utförts.

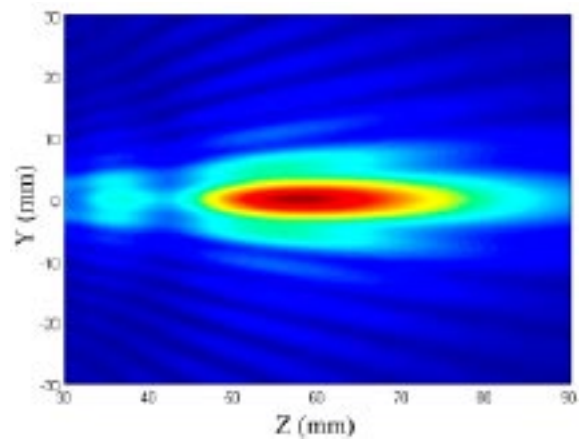
Det första som undersökts är hur ljudfältet ser ut vid provning med normalt infallande ljud. Figur 8-1 visar ljudets fokusering i radiell ledd (xz-plan) medan figur 8-2 visar fokusering i tangentiell ledd (yz-plan) för kapseln. Som förväntat visar resultaten på ett betydligt mer fokuserat ljudfält i radiell ledd som en följd av den phased array-teknik som används. I tangentiell ledd är det endast arrayets fysiska egenskaper som bestämmer fokuseringen som en vanlig ultraljudsökare.

Vid provning med arrayer med defekta element alternativt med ojämna arrayer visar resultaten på att mer energi sprids medan fokuseringen inte nämnvärt påverkas, se figurerna 8-3 till 8-6.

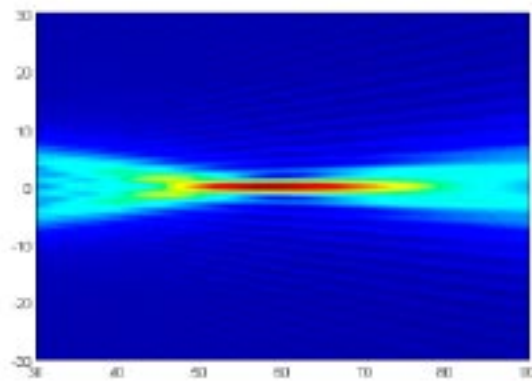
Figur 8-7 visar på att den dynamiska fokusering som används på mottagarsidan vid provning av svetsen ger en bättre fokusering och ett högre ljudtryck inom ett bredare fokuseringsdjup.



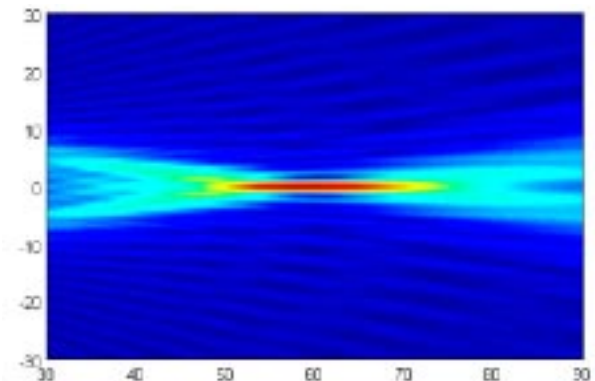
Figur 8-1. Fokusering i radiell ledd (fokus 60 mm, 32 element).



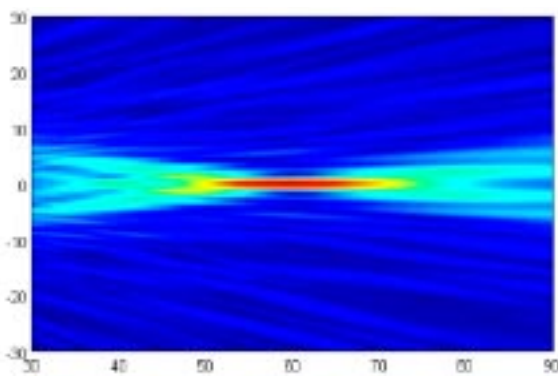
Figur 8-2. Fokusering i tangentiell ledd (fokus 60 mm, 32 element).



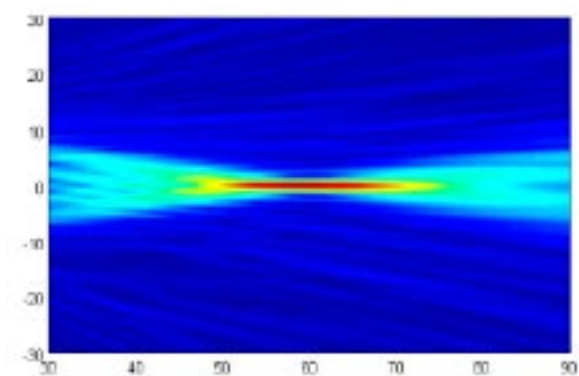
Figur 8-3. Fokusering i radiell ledd, fungerande array.



Figur 8-4. Fokusering i radiell ledd, element nr 16 ur funktion.

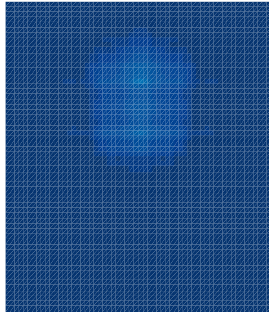


Figur 8-5. Fokusering i radiell ledd, element nr 5, 16, 20 och 25 ur funktion.



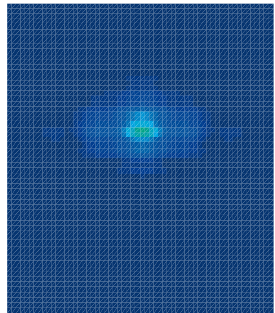
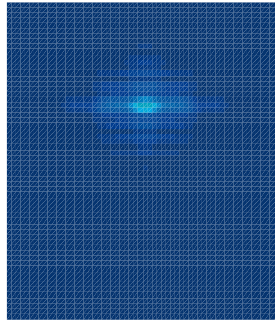
Figur 8-6. Fokusering i radiell ledd, slumpvis variation inom 6 dB för 32 element.

Utan dynamisk fokusering

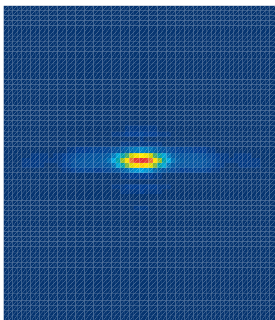
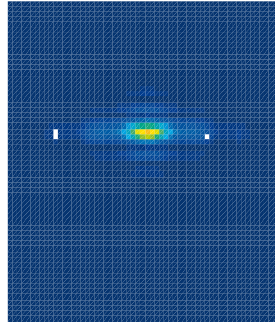


Z = 40 mm

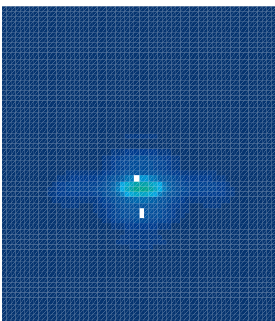
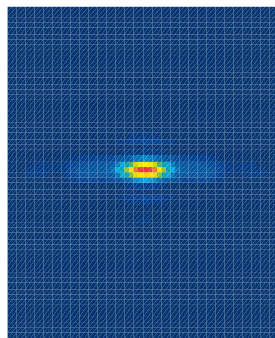
Med dynamisk fokusering



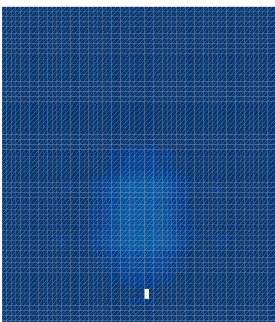
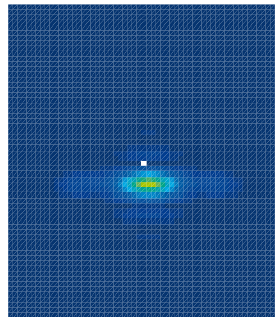
Z = 50 mm



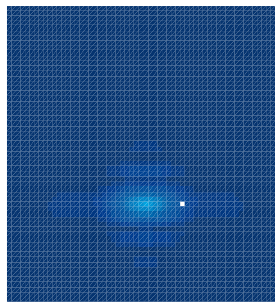
Z = 60 mm



Z = 30 mm



Z = 80 mm



Figur 8-7. Fokusering i radiell ledd (fokus 60 mm, 32 element).

8.2.3 Forskning vid Uppsala Universitet

Vid avdelning signaler och system vid Uppsala universitet bedriver SKB forskning inom ultraljudteknik /Stepinski et al. 2004/.

Syntetisk apertur-fokusering

Algoritmer för syntetisk aperturfokusering (SAFT) har utvecklats och verifierats i syfte att höja den rumsliga upplösningen vid ultraljudprovningen av svetsar med hjälp av arraysökare. Syntetisk apertur bygger på en princip som först utvecklats för radarapplikationer och som sedan har tillämpats inom sonar och ultraljud. Med SAFT metoden kan man fokusera ultraljudstrålar i varje punkt inom det inspekterade området. Detta åstadkoms genom behandling av ultraljudsdata som är insamlade från alla element i en arraysökare.

Den utveckling som har gjorts inom gruppen förbättrar fokuseringsmöjligheter hos SAFT, särskilt i närfältet. Detta sker genom att ta hand om diffraktionsstörningar vilka uppkommer för en sökare med finita dimensioner. Tillämpningen av denna metod vid ultraljudprovningen av svetsar skapar en möjlighet till upplösningsförbättring i både längd- och tvärriktningen av en arraysökare. Den sistnämnda riktningen har normalt betydligt sämre upplösning eftersom fokusering i denna riktning inte är möjlig vid den kontaktprovning som i dag tillämpas vid ultraljudprovning av svetsar i kopparkapslar. Metoden har verifierats både med simulerade och reella ultraljudsdata insamlade vid Kapsellaboratoriet.

De vetenskapliga resultaten har publicerats i en doktorsavhandling /Lingvall 2004/ och på internationella konferenser. Forskningen inom detta område kommer att fortsätta med avsikt att skapa förenklade metoder med reducerad beräkningstid som lämpar sig för SKB:s Kapsellaboratorium.

Icke-linjärt ultraljud

Ett antal försök har genomförts för att undersöka mekanismerna av icke-linjära fenomen vid utbredningen av ultraljudsvågor i solida material. Inledningsvis undersöktes möjligheter att förbättra upplösningen vid ultraljudsprovningen genom att utnyttja en icke-linjär vågutbredning (harmonic imaging), känd från medicinska tillämpningar. Därefter fokuserades arbetet på mätning av icke-linjära effekter vid övergångar mellan två plana ytor i koppar (contact acoustic nonlinearity) med avsikt på att simulera täta diskontinuiteter vilka möjligtvis kan uppstå vid FSW. Mätningen av icke-linjära effekter visade sig vara möjlig men mycket svår, särskilt i en industriell miljö. Därför bedömdes denna inriktning inte vara realiserbar i dagens läge och forskningen avbröts år 2004.

Ultraljudsdämpning i koppar

Ultraljudsdämpning är en viktig faktor vid provningen av solida material. Den avgör indirekt både upplösningen och möjligheterna att detektera små defekter. I kopparmaterialet som används för locken är bakspridningen det största bidraget till dämpningen vid ultraljudsutbredning och därför är dämpningen kopplad till kornstorleken.

En praktisk teknik för att mäta ultraljudsdämpningen som bygger på den så kallade "buffer rod" metoden har utvecklats och verifierats. I denna metod kompenseras effekten av stråldivergens (sökarens diffraktionseffekter) samt förlusten vid övergångar mellan olika media. Metoden har använts för att undersöka ett begränsat antal kopparbitar med olika kornstorlekar (som uppkommit genom termisk behandling).

Man kunde konstatera att korrelationen mellan kornstorleken och ultraljudsdämpningen inte var entydig medan korrelationen mellan defektdetekteringsförmåga och dämpning var mera tydlig. Ett praktiskt provförfarande för mätning av ultraljudsdämpning föreslogs vilket förhoppningsvis kan användas vid SKB:s Kapsellaboratorium. Eftersom ultraljudsdämpningsfrågan är av stor vikt för provningstillförlitligheten bör den undersökas i detalj med större mängd provbitar.

Oförstörande provning av FSW

En översikt av litteraturkällor som avhandlar OFP av FSW har upprättats med syftet att inventera olika diskontinuiteter som kan uppstå i en FSW process samt beskriva möjliga provningstekniker lämpliga för detektering av dessa. Det bör dock nämnas att all tillgänglig litteratur berör FSW av aluminium, huvudsakligen tunn plåt, med tillämpningar inom flygindustrin.

8.3 Induktiv provning

För närvarande pågår ingen aktivitet inom området för induktiv provning i och med att kraven på kapselns yta inte är högre för svetsen än för resten av kapseln. Dessutom visar resultaten från projekt "NDT Reliability" att provning med ultraljud och radiografering har tillräcklig hög tillförlitlighet. Metodik har dock utvecklats /Stepinski 2004/, vilken vid behov kan anpassas för rationell provning av svetsen.

9 Kravhantering

I detta kapitel redovisas i vilken grad de krav som identifierats i kapitel 3 har uppfyllts. Dessutom redovisas en sammanställning av de krav som OFP ställer på angränsande processer i produktionssystemet.

9.1 Kommentarer till ställda krav

De krav som har uppfyllts redovisas i detta avsnitt med hänvisning till de kapitel där kraven behandlas. Angående de krav som ännu ej har uppfyllts redovisas i kapitel 10 fortsatt handlingslinje för hur dessa kommer att uppfyllas.

9.1.1 Krav på en OFP i kapsel fabriken och inkapslingsanläggningen

Kraven på den oförstörande provningen i det framtida produktionssystemet ställs av flera olika intressenter. Dessa krav kommenteras i tabell 9-1.

Tabell 9-1. Uppföljning av krav på system och processer för oförstörande provning av svetsar.

Krav	Kunskapsläge
Teknik	Provmetoder är utvecklade och demonstrerade – ultraljud och digital radiografering.
Kvalitet	Att OFP kan detektera och storleksbestämma möjliga diskontinuiteter svetsen så att konstruktionsförutsättningarna innehålls har visats /Ronneteg et al. 2006/. Provning sker enligt SKB:s instruktioner.
Tillförlitlighet	Detekteringsförmågan och noggrannheten vid storleksbestämning av diskontinuiteter har fastställts / Müller et al. 2006/.
Kapacitet och varaktighet	Tidsåtgången vid provning möter inkapslingsanläggningens kapacitetskrav.
Kärnteknisk tillämpning	Hänvisning till senare skede i projekteringen av inkapslingsanläggningen, se även kapitel 10.
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Program för kvalificering /SKB 2006e/. Tillkommande myndighetskrav kommer att tas om hand.

9.1.2 Krav på återkoppling till svetsutvecklingsprojektet

Studien vid BAM /Müller et al. 2006/ visar att OFP-processerna vid Kapsellaboratoriet har god tillförlitlighet. Samtliga svetsar (avsnitt 6.2) har inspekterats utan att fördröja utvecklingen av svetsprocesserna. OFP har kvalitetssäkrats genom att provning har utförts enligt skriftliga instruktioner (kapitel 5).

9.2 Utgående krav till angränsande processer

På samma sätt som exempelvis ”Konstruktionsförutsättningarna” (kapitel 3) ställer krav på oförstörande provningen av förslutningssvetsen så ställer även provningen krav på andra delar inom systemet för inkapsling. Dessa krav redovisas övergripande i tabell 9-2. De kan däremot i dagsläget inte specificeras utan att vidare undersökningar genomförs, se kapitel 10.

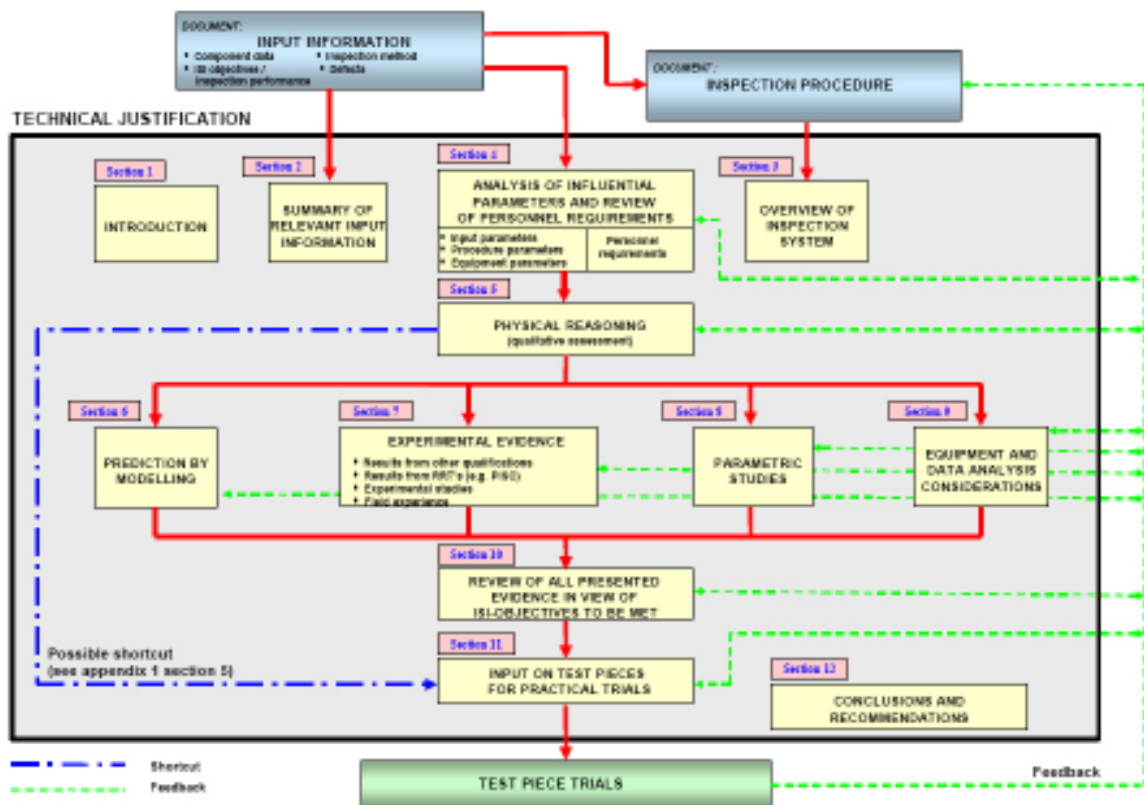
Tabell 9-2. Krav på angränsande processer.

Rubrik	Krav	Ägare
Ytfinhet	För att provningen av kapseln ska kunna utföras med tillräcklig tillförlitlighet krävs att lock och botten har erforderlig ytfinhet i svetsområdet och på ovansidan av den yttre delen av locket. Detta krav är för närvarande under utredning.	Kapsel fabriken Inkapslingsanläggningen
Ljuddämpning	För att provningen av kapseln ska kunna utföras med tillräcklig tillförlitlighet krävs att locket har en väl specificerad ljuddämpning i området ovanför svetsen. Effekten av varierande ljuddämpning som följd av varierande kornstorlek är i dag inom och mellan lock osäker och kommer därmed att utredas vidare.	Kapsel fabriken
Angränsande diskontinuiteter	För att provningen av kapseln ska kunna utföras med tillräcklig tillförlitlighet krävs att förekomst av tillåtna diskontinuiteter i locket ovanför svetsen är begränsad. I dagsläget är effekten av detta inte helt klarlagd och behöver därmed utredas.	Kapsel fabriken
Utformning av botten	Användning av samma provningsförfarande bottensvetsen som för förslutningssvetsen förutsätter att för provningen relevanta utformningsdetaljer är identiska i de båda fallen.	Kapsel fabriken
Kapseltemperatur	För att möjliggöra tillförlitlig ultraljudprovning av förslutningssvetsen krävs att temperaturen på locket specificeras.	Inkapslingsanläggningen
Excentricitet kapsel	För att möjliggöra tillförlitlig radiografering krävs att kapselns excentricitet specificeras.	Kapsel fabriken Inkapslingsanläggningen

9.3 Kvalificering

Svetsning av lock och botten på kopparkapseln är komplicerade processer som kräver omfattande kvalitetsstyrning för att säkerställa kapselns integritet. Detta innebär att svetsprocesserna kommer kvalificeras. För att ytterligare säkerställa processen kommer även OFP av svetsarna att kvalificeras. Den övergripande planen för hur detta kommer att göras redovisas i /SKB 2006f/ medan de detaljerade planerna kommer utarbetas, se kapitel 10.

Det arbete som har utförts och pågår 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/. Exempel på viktiga underlag för kvalificering är de så kallade tekniska motiveringarna, se figur 9-1 /European Commission 1998/. Mycket av det arbete som har utförts vid Kapsellaboratoriet har varit inriktat mot att ta fram underlag som kan användas i de tekniska motiveringarna. Tydliga exempel på detta är den genomförda studien över OFP-processernas tillförlitlighet (kapitel 7) och den modellering av ultraljud (avsnitt 8.2.2) som pågår. Dock bör det nämnas att eftersom svetsarna inte kan komma att inspekteras återkommande, som är normalt vid kvalificering av OFP, kommer innehållet i de tekniska motiveringarna att behöva anpassas för provningen av svetsarna.



Figur 9-1. Schematisk figur över tekniska motiveringar enligt ENIQ (på engelska).

10 Framtida handlingslinje

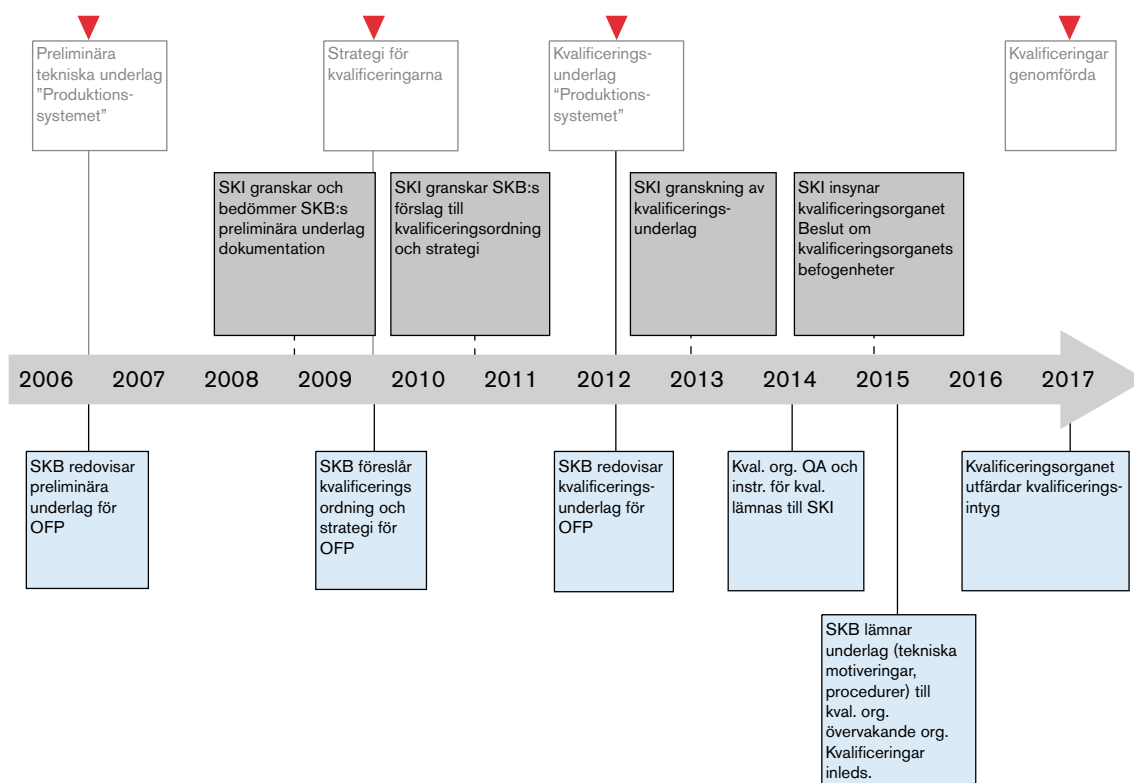
Med utgångspunkt från redovisningen i denna rapport (kapitel 4-8) och den kravbild som definierats i kapitel 9 har ett antal viktiga framtida aktiviteter identifierats. Syftet med kommande arbete är att säkerställa att en tillförlitlig provning av kapselns förslutningssvets finns tillgänglig enligt SKB:s kvalificeringstidplan enligt figur 10-1 /SKB 2006f/. Detta arbete innefattar att OFP-processernas tillförlitlighet ska verifieras. Dessutom ska OFP-systemen anpassas för att möjliggöra kvalificering av framtida processer i kapselfabriken och inkapslingsanläggningen.

Arbetet med oförstörande provning bedrivs med inriktning mot följande milstolpar för kvalificering av processer och projektering av inkapslingsanläggningen och kapselfabriken.

- 2006 – preliminära tekniska underlag ”Produktionssystem”.
- 2012 – kvalificeringsunderlag ”Produktionssystemet”.

De aktiviteter som redovisas i detta kapitel kopplas till ovanstående tidsplan samt till de krav som behandlas i kapitel 9. En detaljerad plan över hur och när dessa aktiviteter ska genomföras kommer att utarbetas under 2006 och 2007.

De identifierade aktiviteterna som krävs för att kraven i avsnitt 9.1 ska uppfyllas redovisas i tabell 10-1 för radiografering och i tabell 10-2 för ultraljudprovning.



Figur 10-1. Handlingsplan för kvalificering av OFP /SKB 2006f/.

Tabell 10-1. Framtida handlingslinjer – oförstörande provning med digital radiografering i kapsel-fabrik och inkapslingsanläggning.

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Teknik, kvalitet och tillförlitlighet	Utvärdera nya tekniker för radiografering av FSW-svetsar samt ta fram slutgiltig principer för OFP-processen.	2006–2009
	Utreda vilka effekter "human factors" har på processens tillförlitlighet.	2007–2011
	Undersöka parametrar som inverkar på provningens tillförlitlighet (application parameter, AP).	2007–2010
Kapacitet och varaktighet	Definiera specifikationer för system för radiografering som underlag för upphandling.	2007–2010
	Definiera innehåll i de dokument som ska användas som underlag för upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2008–2010
Kärnteknisk tillämpning	Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av OFP-systemet i inkapslingsanläggningen.	2008–2010
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Utreda och definiera vilka underlag som krävs vid kvalificering av OFP-processerna.	2006–2008
	Sammanställa underlag för kvalificering.	2007–2012

Tabell 10-2. Framtida handlingslinjer – oförstörande provning med ultraljud i kapsel-fabrik och inkapslingsanläggning.

Krav	Aktivitet	Tidsplan	
Teknik, kvalitet och tillförlitlighet	Utvärdering av möjligheten att använda TOFD (time of flight diffraction) för storleksuppskattning av diskontinuiteter.	2006–2008	
	Modellering av aktuella och alternativa provningskonfigurationer och dess interaktion med identifierade diskontinuiteter.	2006–2008	
	Validering av modeller.	2006–2010	
	Optimering av OFP-process baserat på resultat från aktiviteter inom modellering.	2008–2010	
	Utreda vilka effekter "human factors" har på processens tillförlitlighet.	2007–2011	
	Undersöka parametrar som inverkar på provningens tillförlitlighet (application parameter, AP).	2007–2010	
	Kartläggning av vilken påverkan varierande ljuddämpning i kopparlocket/botten har på ultraljudprovningens tillförlitlighet samt fastställa specifikationer gällande locket.	2006–2008	
	Kartläggning av vilken påverkan för ljudstrålen blockerande diskontinuiteter har. Diskontinuiteter kan förekomma i kopparlocket/botten och reflektera ljudstrålen och därmed störa provningen av svetsarna. Vid behov kommer acceptanskriterier upprättas.	2006–2008	
	Bestämning av krav på ytfinhet i kopparlocket/botten för att säkerställa tillförlitlig ultraljudprovning.	2006–2007	
	Fastställa principerna för användning av kopplingsmedel för ultraljudprovning.	2007–2010	
	Kapacitet och varaktighet	Definiera specifikationer för system för ultraljudprovning som underlag för upphandling.	2007–2010
		Definiera innehåll i de dokument som ska användas som underlag för upprättande av serviceavtal med leverantörer av system.	2008–2010
	Kärnteknisk tillämpning	Ta fram specifikationer för utrustning för fjärrmanövrering av OFP-systemet i inkapslingsanläggningen.	2007–2010
Utreda ultraljudarrayers tålighet för radioaktiv strålning för att fastställa maximal stråldos/dosrat.		2007–2010	

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Uppfylla tillämpbara myndighetskrav	Genomföra programmet för kvalificering /SKB 2006f/.	2006–2017
	Utreda och definiera vilka underlag som krävs vid kvalificering av OFP-processerna.	2006–2009
	Sammanställa underlag för kvalificering.	2007–2012

Det underlag som behöver tas fram för att specificera de utgående kraven i avsnitt 9.2 redovisas i tabell 10-3. Flertalet av dessa aktiviteter påverkar tillförlitligheten vid OFP och redovisas även i tabell 10-2.

Tabell 10-3. Handlingslinje för utgående krav.

Krav	Aktivitet	Tidsplan
Ytfinhet	Bestämning av lämplig ytfinhet i kopparlocket/botten för att säkerställa tillförlitlig ultraljudprovning. Se även tabell 10-2.	2006–2007
Ljuddämpning	Kartläggning av vilken påverkan varierande ljuddämpning i kopparlocket/botten har på ultraljudprovningens tillförlitlighet samt fastställa specifikationer gällande locket. Se även tabell 10-2.	2006–2008
Angränsande diskontinuiteter	Kartläggning av vilken påverkan blockerande diskontinuiteter i kopparlocket/botten har på ultraljudprovningens tillförlitlighet samt fastställa specifikationer för detta. Se även tabell 10-2.	2006–2008
Utformning av botten	Se över möjligheten att modifiera kapselns kopparbotten så att inspektion av botten svetsen kan utföras enligt samma metoder som inspektion av locksvetsen.	2006–2008
Kapseltemperatur	För att definiera eventuella behov av kylning av kapseln ska temperaturligheten för arraysökarna fastställas.	2006–2008
Excentricitet kapsel	Utreda effekten av excentricitet vid kapselrotationen vid radiografering och fastställa krav.	2007–2010

11 Kommentarer

Vid Kapsellaboratoriet har under det senaste året många svetsningar genomförts med efterkommande OFP. Detta har gett värdefulla erfarenheter för de system och processer som används vid OFP. Utvärdering av provningsresultaten har gett god information över möjliga diskontinuiteter i svetsar gjorda med EBW och FSW. Dessutom har även OFP bidragit med viktig information som har använts i utvecklingen av svetsprocesserna.

Då SKB under våren 2005 valde friction stir welding som referensmetod för kapselns förslutningssvets så har arbetet på senare tid fokuserats på aktiviteter som påverkar provningen av FSW. Detta gäller såväl utveckling av OFP-processer, modellering som bestämning av OFP-processernas tillförlitlighet.

Denna redovisning baseras på SKB:s referenskapsel med fem centimeter koppertjocklek. Vid eventuella framtida förändringar i utformningen av referenskapseln måste de underlag och slutsatser som ges i rapporten revideras.

12 Referenser

Anttila M, 2005. Gamma and Neutron Dose Rates on the Outer Surface of Three Types of Final Disposal Canisters, Posiva Working Report 2005-14.

ASTM International. Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology, E1025-5.

Cederqvist L, 2005. Friktionssvetsning av kopparkapslar rapport 1. Statusrapport till 2005-06-31. SKB R-05-73, Svensk Kärnbränslehantering AB.

European Commission, 1998. ENIQ Recommended Practice 2: Recommended Contents For a Technical Justification, Issue 1, ENIQ Report nr. 4 EUR 18099 EN.

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

European Committee for Standardization, 1994a. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1: Image quality indicators (wire type). Determination of image quality value, EN 462-1.

European Committee for Standardization, 1994b. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 2: Image quality indicators (step/hole type). Determination of image quality value, EN 462-2.

European Committee for Standardization, 1994c. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 3: Image quality classes for ferrous metals, EN 462-3.

European Committee for Standardization, 1997. Non-destructive Examination of Welds: Radiographic Examination of Welded Joints, EN1435.

European Committee for Standardization, 2001. Non-destructive testing. Radioscopic testing. General principles of radioscopic testing of metallic materials by X- and gamma rays, EN 13068-3.

Holm S, 1995. Proc. Nordic Symp. In Physical Acoustics, Ustaset, Norway. Simulation of Acoustic Fields from Medical Ultrasound Transducers of Arbitrary Shape, Proc. Nordic Symp. In Physical Acoustics, Ustaset, Norway.

Lingvall F, 2004. Time-domain Reconstruction Methods for Ultrasonic Array Imaging. A statistical Approach, Uppsala University, Signals and Systems, ISBN 91-506-1772-9.

Müller C, Öberg T, 2004. Strategy for verification and demonstration of the sealing process for canisters for spent fuel. SKB R-04-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

R/D Tech inc, 2004. Introduction to Phased Array Ultrasonics Technology Applications.

Ronneteg U, 2000. Radiografering, system P258-1, SKB-instruktion SDKL-009.

Ronneteg U, Moberg B, 2003. Inkapslingsteknik, Lägesrapport 2002, Oförstörande provning. SKB R-03-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Ronneteg U, 2004.** Ultraljudprovning, system P258.2, SKB-instruktion SDKL-010.
- Ronneteg U, 2005a.** SDKL-009 Radiografering, System P258-1, SKB-rutin SDKL-009.
- Ronneteg U, 2005b.** Förstörande prov ur demonstrationsserie FSW, SKB 1046524, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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.
- Rydén H, 2000.** Ultraljudprovning, system P258-2, SKB-rutin SDKL-010, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Samuelsson K-G, 2005.** Dokumentation och uppmätning av skarvens utseende i FSW-prover, Rapport Bodycote CSM AB, PRO05-0487.
- 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, 2005.** 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. Svetsning vid tillverkning och förslutning. SKB R-06-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006e.** Kapsel för använt kärnbränsle. Oförstörande provning av kapselkomponenter. SKB R-06-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006f.** Kapsel för använt kärnbränsle. Program för kvalificering av tillverkning och förslutning. SKB R-06-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stepinski T, 2004.** Deep penetrating eddy current for copper canister inspection. Main results. SKB R-04-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stepinski, T, Ping W, Wennerström, E, 2004.** Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound. Phased arrays, ultrasonic imaging and nonlinear acoustics. SKB TR-04-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- The International Institute of Welding, 1987.** Guidance and recommendations on evaluation of ultrasonic signals in manual weld examination and on defect acceptance/rejection criteria.
- US Department of defense, 1999.** Nondestructive evaluation system. Reliability assessment, Handbook. MIL-HDBK-1823.
- Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle. SKB R-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

13 Förkortningar

AP	Application parameter, applikationsparameter
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung
BIR	Bio-Imaging Research Inc.
EBW	Electron beam welding, Elektronstrålesvetsning
ET	Eddy current testing, Induktiv provning
FSW	Friction stir welding
HECT	High Energy Computed Tomography, Hög energi datortomografi
HF	Human factors, mänskliga faktorer
IC	Intrinsic capability, fysisk förmåga
MTO	Människa-teknik-organisation
NDT	Non-destructive Testing, oförstörande provning
OFP	Oförstörande provning
POD	Probability of Detection, detekteringsförmåga
RT	Radiographic testing, Radiografisk provning
SAFT	Syntetisk apertur-fokusering
SNR	Signal to noise ratio, signal till brus-förhållande
TOFD	Time of flight diffraction
UT	Ultrasonic testing, Ultraljudprovning
μ-CT	Micro-focus Computed Tomography, mikrofokusdatortomografi