



DokumentID 1179633	Version 3.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (47)
Författare Ulf Ronneteg			Datum 2009-02-27	
Granskad av			Granskad datum	
Godkänd av Håkan Rydén			Godkänd datum 2011-02-22	

Oförstörande provning av kapselkomponenter och svetsar

Sammanfattning

Denna rapport är en referens till **Canister production report** som ingår i ansökan enligt Kärntekniklagen (KTL) för att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle.

Rapporten redovisar arbetet med de metoder för oförstörande provning (OFP) av kapselns komponenter och svetsar, friction stir welding (FSW), som SKB avser att implementera i egna anläggningar. **Canister production report** redogör för förutsättningarna för provningen avseende referenskapselns utformning och referensmetoder för tillverkning.

Vid Kapsellaboratoriet har successivt resurser för OFP av kapseln byggts upp. Till en början var arbetet inriktat mot OFP av kapselns svetsar men har under senare år även inkluderat OFP av kapselns komponenter. SKB har installerat utrustning för provning av samtliga komponenter.

Rapporten visar på de parametrar i respektive komponent/svets som behöver kontrolleras med OFP och de referensmetoder som för närvarande testas och utvärderas. För både kapselns komponenter och svetsar är ultraljud den primära provningstekniken. I dagsläget anses även radiografering som ett viktigt komplement för kontroll av kapselns svetsar.

Nya modeller för bestämning av tillförlitlighet vid OFP, POD (probability of detection), har utvecklats. Dessa modeller möjliggör analys av flera olika variablers påverkan på detekteringsförmågan. Detekteringsförmågan har sedan analyserats för samtliga referensmetoder. För FSW har verkliga defekter analyserats medan artificiella defekter analyserats för kapselns komponenter.

Resultat från provning av komponenter och svetsar används som ett hjälpmedel vid utveckling av tillverknings- och svetsprocesser. Erfarenheter från praktisk användning av utrustning och metoder, verkligt utfall från provningar visar att metoderna kan användas för kontroll av kapselns komponenter och svetsar men att optimeringar krävs för att säkerställa tillförlitligheten.

Ver	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Granskad	Godkänd
1.0	2009-02-27	Ny rapport.	U Ronneteg	Enligt SKBdoc id nr 1192023 ver 2.0	H Rydén
2.0	2009-10-30	Avsnitt 5.1 har text angående dokumentation av provning förtydligats. Avsnitt 6.3.2, tabell 6.3 är justerad. Avsnitt 7.3.1, 7.3.2, 7.4.1, 7.5.1, 7.5.2 Lagt till komponentidentitet. Avsnitt 7.6 Lagt till svetsidentitet. Avsnitt 8 versionsnummer för referenser inlagt.	U Ronneteg	Redaktionella ändringar, ingen ny sakgranskning krävs.	H Rydén
3.0	2010-04-15	Avsnitt 7.5.2 har text angående indikerade defekter i kopparlock uppdaterats. Disposition av referenslistan är uppdaterad. Diverse redaktionella ändringar.	U Ronneteg	Enligt SKBdoc id nr 1192023 ver 3.0	Se sidhuvud

Innehåll

1	Inledning	5
1.1	Syfte	5
1.2	Förutsättningar och avgränsningar	5
1.3	Strategi och arbetssätt.....	5
2	Krav på oförstörande provning	7
3	Förutsättningar för OFP av referenskapseln	8
3.1	Segjärnsinsats	8
3.1.1	Gjutning	9
3.1.2	Parametrar som kontrolleras med OFP	9
3.2	Kopparrör	10
3.2.1	Extrusion	11
3.2.2	Parametrar som kontrolleras med OFP	11
3.3	Kopparlock/botten.....	11
3.3.1	Smide	12
3.3.2	Parametrar som kontrolleras med OFP	12
3.4	Svetsar	12
3.4.1	Svetsning.....	12
3.4.2	Parametrar som kontrolleras med OFP	13
4	Utveckling av OFP-utrustning	14
4.1	Historik.....	14
4.2	Utrustning.....	14
4.2.1	Utrustning för ultraljudprovning av komponenter	14
4.2.2	Utrustning för ultraljudprovning av svetsar	17
4.2.3	Utrustning för radiografering av svetsar	18
5	Referensmetoder för OFP.....	20
5.1	Kvalitetssäkring.....	20
5.2	Segjärnsinsats	20
5.2.1	Vinkelavsökning av insats	21
5.2.2	Normalavsökning av insats	22
5.2.3	Transmissionsprovning av insats	22
5.3	Kopparrör	23
5.3.1	Normalavsökning av kopparrör	23
5.3.2	Vinkelavsökning av kopparrör.....	24
5.4	Kopparlock och –botten	25
5.4.1	Provning av lockets inre del.....	25
5.4.2	Provning av lockets yttre del.....	25
5.5	Botten- och förslutningssvets	26
5.5.1	Ultraljudprovning av svetsar	26
5.5.2	Radiografering av svetsar	27
6	Tillförlitlighet i OFP-metoder	28
6.1	Strategi	28
6.2	Metodik för bestämning av tillförlitlighet	29
6.2.1	POD, signal respons analys (â vs a).....	29
6.2.2	Multi-parameter POD	30
6.2.3	Volym-POD	30
6.3	Resultat.....	30
6.3.1	Tillförlitlighet vid OFP av svetsar	30

6.3.2	Tillförlitlighet vid OFP av segjärnsinsats	31
6.3.3	Tillförlitlighet vid OFP av kopparrör	33
6.3.4	Tillförlitlighet vid OFP av kopparlock och kopparbotten.....	34
7	Erfarenheter	37
7.1	Generellt.....	37
7.2	Utrustning.....	37
7.2.1	Ultraljudutrustning.....	37
7.2.2	Röntgenutrustning.....	37
7.2.3	Kringutrustning.....	37
7.3	Provning av segjärnsinsats	38
7.3.1	Normalavsökning.....	38
7.3.2	Vinkelavsökning.....	39
7.3.3	Transmissionsprovning.....	41
7.4	Kopparrör	42
7.4.1	Normalavsökning.....	42
7.4.2	Vinkelavsökning.....	43
7.5	Kopparlock och –botten	43
7.5.1	Lockets inre del.....	43
7.5.2	Lockets yttre del.....	43
7.6	Botten- och förslutningssvets	43
7.6.1	Ultraljudprovning.....	44
7.6.2	Radiografering	44
8	Referenser	46
 Bilaga Förkortningar		

1 Inledning

Denna rapport beskriver de metoder för oförstörande provning, som SKB utvecklar för kvalitetskontroll av kapselkomponenter och svetsar. Arbetet med att utveckla lämpliga metoder bedrivs vid Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Utvecklingsarbetets mål är att få fram kontrollmetoder som kan verifiera att tillverkade kapslar uppfyller kraven på referenskapseln.

Rapporten är en referens till **Canister production report** som ingår i ansökan enligt Kärntekniklagen (KTL) för att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle.

1.1 Syfte

Rapportens syfte är att avseende oförstörande provning (OFP) av kapselns komponenter och svetsar:

- Visa på strategi för utveckling av metoder.
- Visa på de parametrar som kontrolleras med OFP.
- Beskriva referensmetoder.
- Visa tillförlitligheten för referensmetoderna.
- Visa resultat och erfarenheter.

1.2 Förutsättningar och avgränsningar

Rapporterna Oförstörande provning av kapselkomponenter och Oförstörande provning av svetsar har legat till grund för denna rapport /SKB2006a, SKB2006b/.

Senast tillverkad kapselkomponent och utförd svets som finns med i redovisningen är från maj 2008.

Rapporten redovisar utveckling av den OFP som SKB avser att göra i egen regi i Kapsel fabriken och Inkapslingsanläggningen. I rapporten redovisas det utvecklingsarbetet som genomförts vid Kapsellaboratoriet fram till och med september 2008.

1.3 Strategi och arbetssätt

Kapsellaboratoriet i Oskarshamn utgör SKB:s centrum för utveckling av inkapslingsteknik. Huvudsaklig verksamhet består av att testa, utveckla och demonstrera metoder och utrustning för hantering, svetsning och oförstörande provning. För oförstörande provning finns utrustning för radiografering, ultraljudprovning samt induktiv provning.

Huvudområden för verksamheten inom oförstörande provning är:

- Provning och utvärdering av provsvetsar och provtillverkade kapselkomponenter.
- Utveckling av provningsmetoder.
- Utvärdering av provningsmetodernas tillförlitlighet.
- Framtagning av provningsprocedurer och specifikationer för provningssystem.

Utvecklingsarbetet innebär att kunskap successivt byggs upp. Den strategi som arbetet utförs enligt, kan beskrivas med som ett antal faser. Dessa faser överlappar varandra i verkligheten och kan beskrivas enligt följande:

Initiering

- Identifiering av lämplig metod för provning, exempelvis ultraljud för en specifik geometri.
- Anskaffning av grundläggande provningsutrustning.
- Initiala tester.

Primär utveckling

- Komplettering av provningsutrustning.
- Preliminära referensobjekt och fixturer för sökare/prober tillverkas.
- Preliminära parameterinställningar för provningsutrustning och utvärderingskriterier fastställs.
- Utprovning av metoder genom att ett flertal objekt provas.

Utvärdering av metoder

- Undersökning av metodernas tillförlitlighet, robusthet och effektivitet.
- Eventuella behov av kompletterande metoder identifieras.

Sekundär utveckling

- Modifiering av valda metoder avseende parameterinställningar, provningsomfattning, referensobjekt, fixturer, provningsprocedurer och utvärderingskriterier.
- Utveckling av kompletterande metoder.

Efter dessa faser anses metoderna vara tillräckligt färdigutvecklade så att arbetet med kvalificering kan påbörjas.

2 Krav på oförstörande provning

De krav som ställs på oförstörande provning av kapselns komponenter och svetsar har härletts i **Canister production report** och kan sammanfattas:

- Metoder och system för att kontrollera kapseln ska finnas.
- OFP ska kunna detektera samt storleks- och lägesbestämma möjliga defekter så att referenskapselns krav innehålls.
- Detekteringssannolikheten och noggrannheten vid storleksbestämning ska vara tillräcklig för att säkerställa att referenskapselns krav innehålls.
- Processerna för OFP ska möta slutförvarssystemets krav om deponering av en kapsel per dag under lång tid.
- Systemet för provning av förslutningssvetsen ska uppfylla kraven för kärnteknisk verksamhet. Detta innebär att provningen ska kunna ske fjärrmanövrerat samt att utrustningen dimensioneras för att tåla radioaktiv strålning.
- Processer och system ska kvalificeras enligt SKB:s ledningssystem för miljö- och kvalitet vari tillämpbara myndighetskrav kommer att ingå.

3 Förutsättningar för OFP av referenskapseln

I detta kapitel beskrivs kapselns komponenter och svetsar med hänsyn till vad som kan påverka den oförstörande provningen. Aktuell referensutförning för kapseln och referensmetoderna för tillverkning beskrivs i **Canister production report** och sammanfattas i Tabell 3-1.

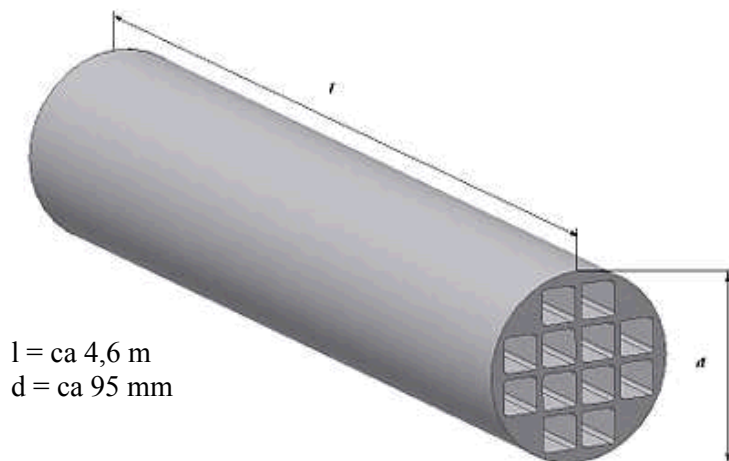
Tabell 3-1. Referensmetoder för tillverkning av referenskapsel.

Komponent	Referensmetod
Segjärnsinsats	Gjutning
Kopparrör	Extrusion
Kopparlock	Smide
Kopparbotten	Smide
Bottensvets	Friction stir welding (FSW)
Förslutningssvets	Friction stir welding (FSW)

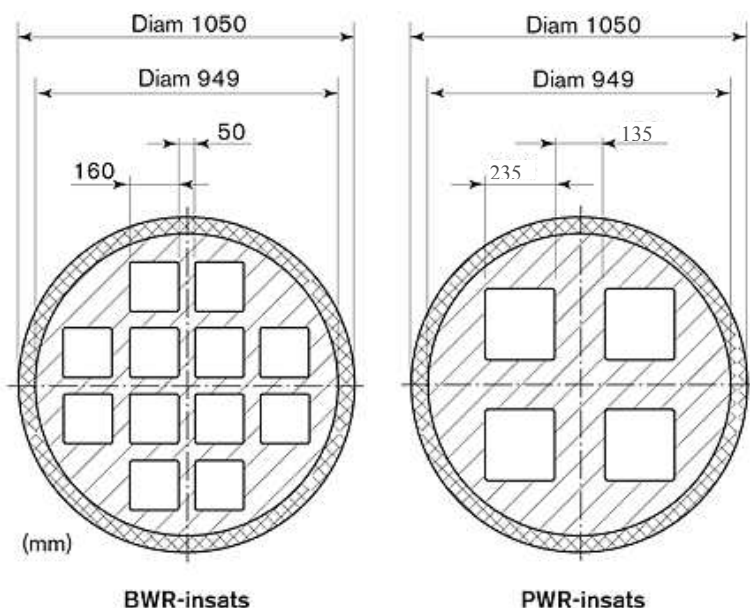
Kapselns konstruktion är styrande för val av provningsmetoder. Som en följd av att maskinbearbetning kommer att göras i samma anläggningar som den oförstörande provningen, finns möjlighet att anpassa utformningen vid provningstillfället för att möjliggöra optimal provning. Material, dimensioner och de parametrar som ska kontrolleras med OFP beskrivs i kommande avsnitt.

3.1 Segjärnsinsats

Insatsen (Figur 3-1) är kapselns lastbärande komponent och består av en stålkassett och segjärn. Insatsen tillverkas i två olika utföranden, en som rymmer tolv BWR-element och en som rymmer fyra PWR-element, se Figur 3-2.



Figur 3-1. Principskiss av den gjutna insatsen.



Figur 3-2. Tvärsnitt för BWR- respektive PWR-insats med fem centimeter kopparhölje.

3.1.1 Gjutning

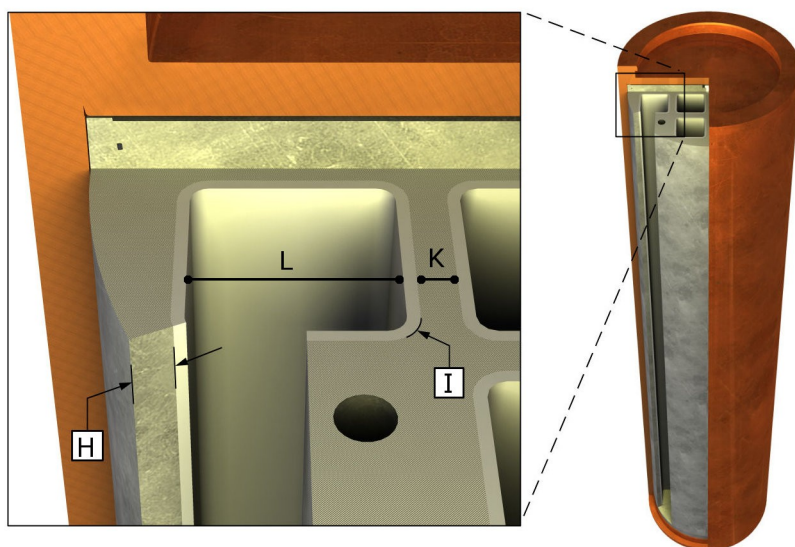
Insatsen tillverkas genom att varmformade kanlrör av stål svetsas samman till en kassett som sedan gjuts in i insatsen. Gjuttekniken som används varierar mellan olika leverantörer. Efter gjutningen kapas insatsen och bearbetas till dimensioner nära de fastställda dimensionerna. I dagsläget tillverkas insatsen med överlängd och dessutom med fem mms övermått på radien eftersom området närmast ytan är svårt att prova med ultraljud.

3.1.2 Parametrar som kontrolleras med OFP

De parametrar som för närvarande kontrolleras med oförstörande provning är dels makroskopiska defekter och dels det så kallade kantavståndet mellan de yttre hörnen på kanlrören och insatsens mantelyta, se Figur 3-3. De möjliga defekterna i segjärnsinsatsen /SKBdoc 1175208/ är främst volumetriska:

- Sugningar.
- Sugningsporer/porositet.
- Kärnstödsblåsor.
- Ytblåsor.
- Sand/slagg/oxid-inneslutningar.

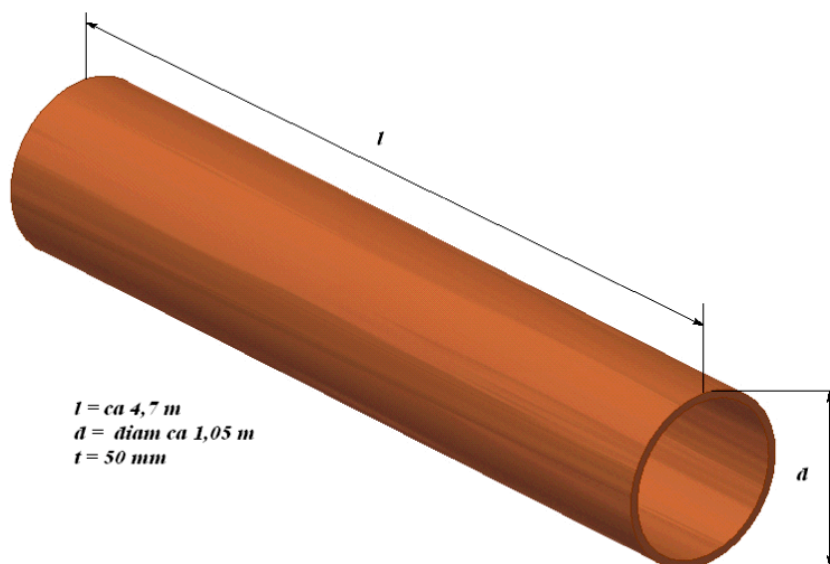
Utöver ovan nämnda volumetriska defekter finns viss risk att sprickliknande defekter kan uppkomma.



Figur 3-3. Kantavstånd mellan yttre kanalrör och mantelyta i BWR-insats.

3.2 Kopparrör

Kopparröret är en del av kapselns hölje, vilket har som funktion att innesluta bränslet, dvs vara tät under en lång tidsrymd. Röret (Figur 3-4) består av ren syrefri koppar.



Figur 3-4. Principskiss av extruderat kopparrör.

3.2.1 Extrusion

Kopparröret tillverkas genom extrusion av ett koppargöt. Extrusionen ger ett homogent finkornigt material. Tillverkningen görs i två steg där det första innefattar stukning och hålning av götet medan extrusionen därefter görs i ett steg. Efter extrusionen kapas röret och bearbetas till nära de fastställda dimensionerna som i dagsläget innebär viss överlängd och dessutom fem mms övermått på radien eftersom detta område är svårt att prova med ultraljud. Efter provningen färdigbearbetas röret till rätt dimensioner.

3.2.2 Parametrar som kontrolleras med OFP

De parametrar som för närvarande kontroll med oförstörande provning är makroskopiska defekter. De möjliga defekterna som beskrivs i /SKBdoc 1175208/ är:

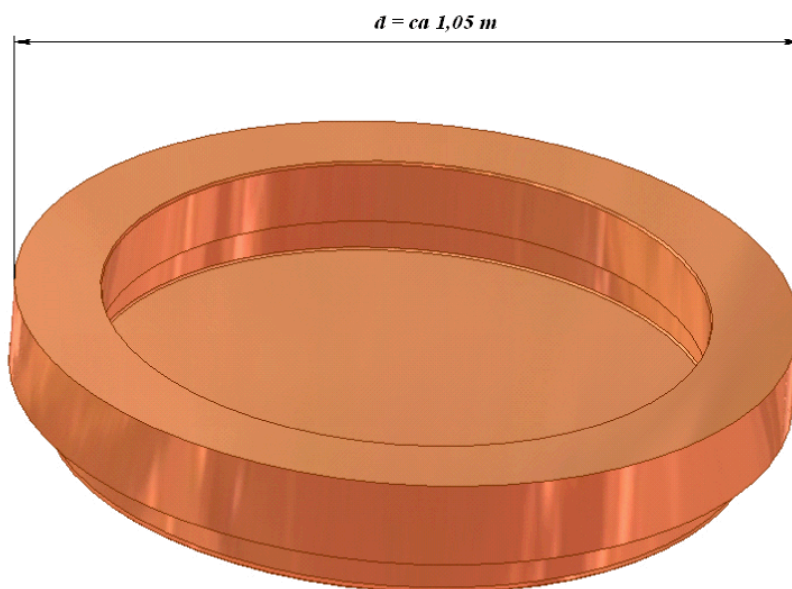
- Oxidslingor med huvudsakligen laminär (axiell-tangentiell) utbredning.
- Slagginneslutningar.
- Ytrepor.

Förutom kraven på att detektera eventuell förekomst av defekter kontrolleras även materialets ljuddämpning. Detta görs för att säkerställa att ultraljudprovningen kan anses uppfylla kraven på detekteringsförmåga.

Eventuellt kommer oförstörande provning även att användas för att säkerställa kopparrörets godstjocklek.

3.3 Kopparlock/botten

Kopparlock och -botten har som funktion att innesluta bränslet, dvs vara täta under en lång tidsrymd. Locket och botten (Figur 3-5) tillverkas av ren syrefri koppar.



Figur 3-5. Principskiss av smitt kopparlock.

3.3.1 Smide

Kopparlock och -botten tillverkas i dagsläget på samma sätt där den enda skillnaden är slutliga dimensioner efter färdigbearbetning. Locket i referenskapseln tillverkas genom smide som vid en optimerad process ger ett homogent finkornigt material. Tillverkningen görs genom att götet stukas innan den slutliga formen erhålls genom räcksmede. Efter smidet maskinbearbetas ämnet med några mms övermått varefter ultraljudsprovningen genomförs. Orsaken till att provningen utförs på övermått är att området närmast ytan är svårt att prova med ultraljud. Efter provningen färdigbearbetas ämnet till rätt dimensioner.

3.3.2 Parametrar som kontrolleras med OFP

De parametrar som för närvarande verifieras med oförstörande provning gäller makroskopiska defekter. De möjliga defekterna som beskrivs i /SKBdoc 1175208/ är:

- Oxiderade inneslutningar.
- Slagginneslutningar.
- Smidesveck.

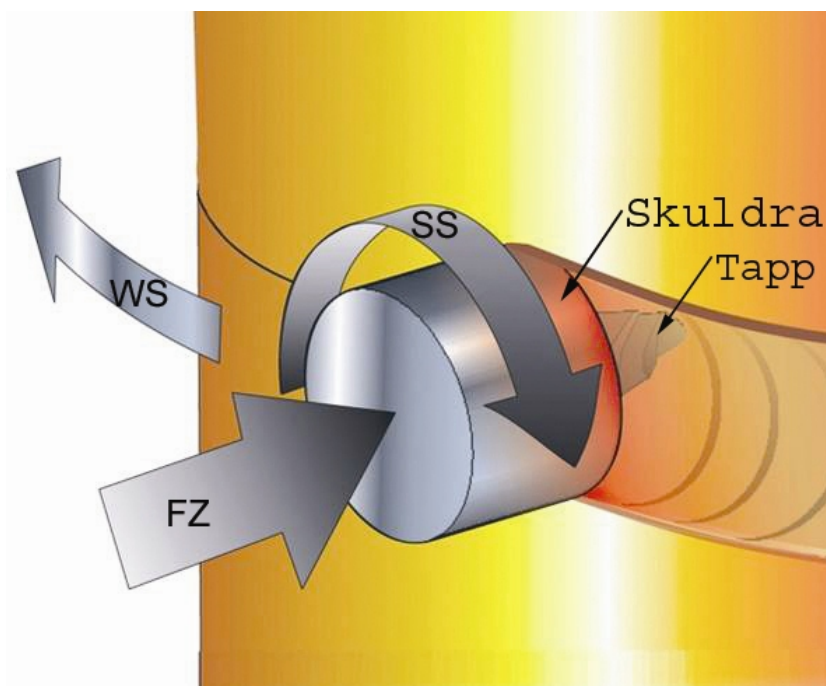
Förutom kraven på att detektera eventuell förekomst av defekter kontrolleras även materialets ljuddämpning. Detta görs för att säkerställa att ultraljudsprovningen kan anses uppfylla kraven på detekteringsförmåga.

3.4 Svetsar

Kopparhöljet består förutom av rör, lock och botten av två svetsar, bottensvets och förslutningssvets (locksvets).

3.4.1 Svetsning

Bottensvetsen görs i kapsel fabriken medan förslutningssvetsen görs i inkapslingsanläggningen. Svetsningen utförs (se Figur 3-6) på samma sätt för båda svetsarna genom friction stir welding (FSW) /SKBdoc 1175162/ som ger ett finkornigt homogent material. Vid provning av svetsarna gäller samma förutsättningar för den oförstörande provningen förutom att förslutningssvetsen görs i kärnteknisk miljö.



Figur 3-6. Principskiss av friction stir welding, FZ=svetskraft, WS=svetshastighet, SS=verktyghastighet.

3.4.2 Parametrar som kontrolleras med OFP

De parametrar som för närvarande verifieras med oförstörande provning gäller makroskopiska defekter. De möjliga defekterna, vilka beskrivs i /SKBdoc 1175236/, är:

- Foglinjeböjning (en effekt av att den vertikala fogen mellan rör och lock böjs av verktygsrotationen).
- Maskhål.

4 Utveckling av OFP-utrustning

SKB har valt att i egen regi utveckla utrustning och metoder för oförstörande provning därför att kapselns material (koppar och segjärn) i kombination med kapselns utformning gör att erfarenheter från konventionell industri är begränsade.

4.1 Historik

Tidigt i teknikutvecklingen bedrev SKB utveckling och forskning utlokaliserat hos olika samarbetspartners som till exempel Uppsala Universitet. Detta resulterade bland annat i den kravspecifikation för de OFP-utrustningar som installerades i Kapsellaboratoriet under 1998 för provning av kopparhöljets förslutningssvets med elektronstrålesvetsning. Detta var startpunkten för mer tillämplig utveckling av digital radiografering och phased array ultraljudprovning av dessa svetsar. Till en början var arbetet fokuserat på att integrera provningssystemen med Kapsellaboratoriets fullskaliga hanteringsutrustning och att ta fram övergripande instruktioner för att säkerställa säker och tillförlitlig provning. Nästa steg innebar framtagning av fixturer, referensobjekt och parameterinställningar.

Som en följd av att SKB under 2002 beställde en specialdesignad svetsutrustning för friction stir welding (FSW) för förslutning av kapseln, påbörjades även utveckling av metoder för provning av FSW.

Provning av kapselkomponenter utfördes till en början av leverantörer av komponenter under övervakning av SKB. Denna provning var långt ifrån heltäckande och framför allt inte anpassad till komponenternas geometri och material. Som en följd av detta togs ett strategiskt beslut att utrustning för provning av kapselns komponenter skulle anskaffas till Kapsellaboratoriet. Denna utrustning installerades under 2006, vilket gjorde att utvecklingen kunde intensifieras. Till en början krävdes mycket arbete med anpassning av bärutrustning för exempelvis ultraljudsökare och referensobjekt samt modifiering av såväl mjuk- som hårdvara i själva scanningsutrustningen. Under 2007 och 2008 har arbetet varit fokuserat mot implementering av utvecklade metoder och fullskalig utprovning av dessa genom att ett stort antal verkliga objekt har provats.

4.2 Utrustning

På Kapsellaboratoriet finns för närvarande tre provningsstationer:

- Ultraljudprovning av kapselkomponenter.
- Ultraljudprovning av svetsar.
- Radiografering av svetsar.

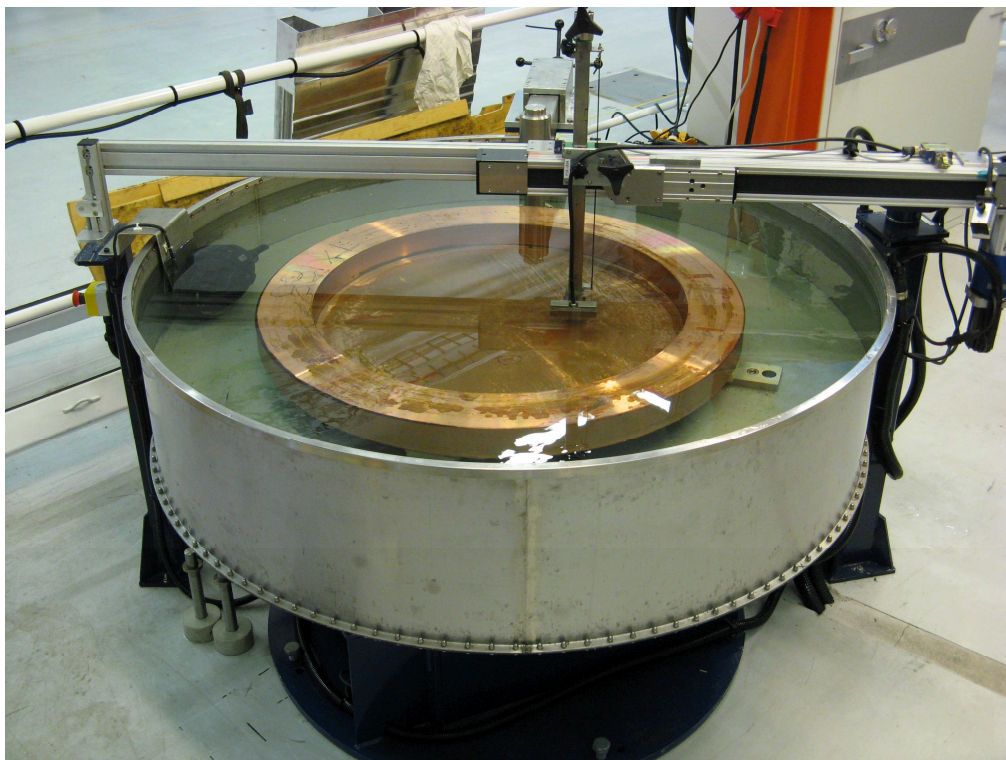
4.2.1 Utrustning för ultraljudprovning av komponenter

Provningsstationen för ultraljudprovning av komponenter består av:

- Ett rotationsbord med tillhörande immersionstank för provning av kopparlock (se Figur 4-1). Rotationsbordet har två scanningsaxlar (tangentiell och radiell) medan ultraljudsökarna fixeras manuellt i axiell ledd.
- En manipulator (rotator) för provning av kopparrör och segjärnsinsatser. Rotatorn (se Figur 4-2) är byggd för att kunna användas för provning av såväl korta delar (0,3 m) som komponenter av fullängd (~5 m). I rotatorn har även en särskild hållare för referensobjekt integrerats (se Figur 4-3). Rotatorn har i dagsläget två scanningsaxlar (tangentiell och axiell) medan ultraljudsökarna fixeras manuellt i radiell ledd.
- Ett styrsystem där alla rörelser i både rotationsbordet och rotatorn hanteras. Systemet är programmerat för såväl manuell avsökning som för automatiska avsökningssekvenser. Vid provning av objekt skickar styrsystemet positionsinformation till ultraljudutrustningen.

- Fixturer för ultraljudsökare för såväl kalibrering som provning. Dessa fixturer består dels av olika hållare för kontaktprovning och dels av en ”immersionstub” (se Figur 4-4) för avsökning med vattenspalt.
- Phased array ultraljudutrustning med tillhörande linjärarrayer och konventionella ultraljudsökare.

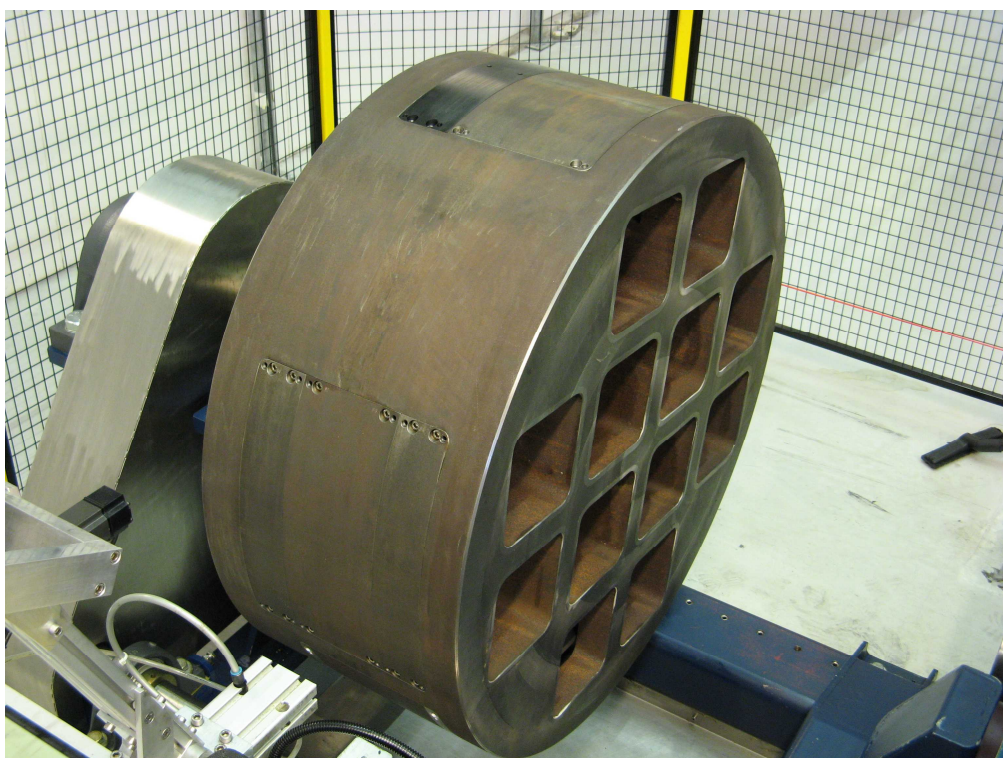
Eftersom stationen består av separata mekaniska system kan även andra OFP-utrustningar användas utan att några större modifieringar krävs.



Figur 4-1. Rotationsbord för provning av kopparlock.



Figur 4-2. Rotator för provning av kopparrör och segjärnsinsats.



Figur 4-3. Hållare för referensobjekt vid provning av kopparrör och segjärnsinsats. Bilden visar en modul som innehåller flera referensobjekt för provning av BWR-insats med ultraljud.



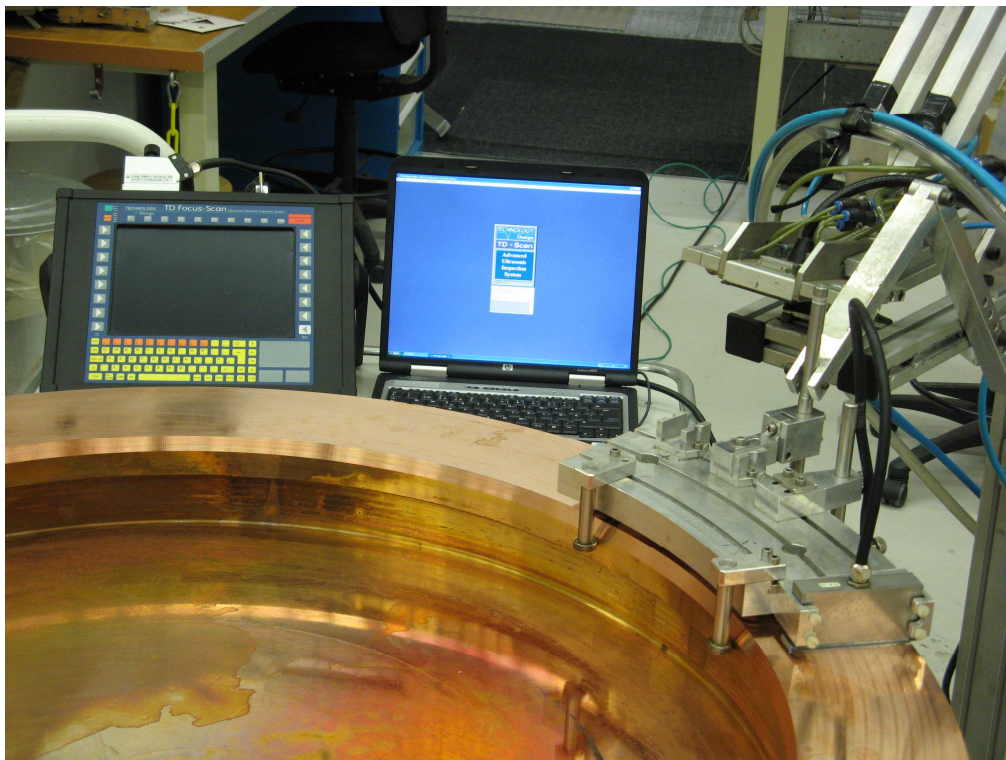
Figur 4-4. Immersionstub för provning av kopparrör och segjärnsinsats.

4.2.2 Utrustning för ultraljudprovning av svetsar

Provningsstationen för ultraljudprovning (se Figur 4-5) av svetsar består av:

- Mekaniska system för provning av svetsar gjorda på såväl fullängds som korta rör.
- Fixturer för ultraljudsökare för såväl kalibrering som provning.
- Phased array ultraljudutrustning (samma som för kapselkomponenter) med tillhörande linjärarrayer.

Eftersom stationen består av separata mekaniska system kan även andra OFP-utrustningar användas utan att några större modifieringar krävs.



Figur 4-5. Ultraljudsystem för inspektion av förslutningssvetsar.

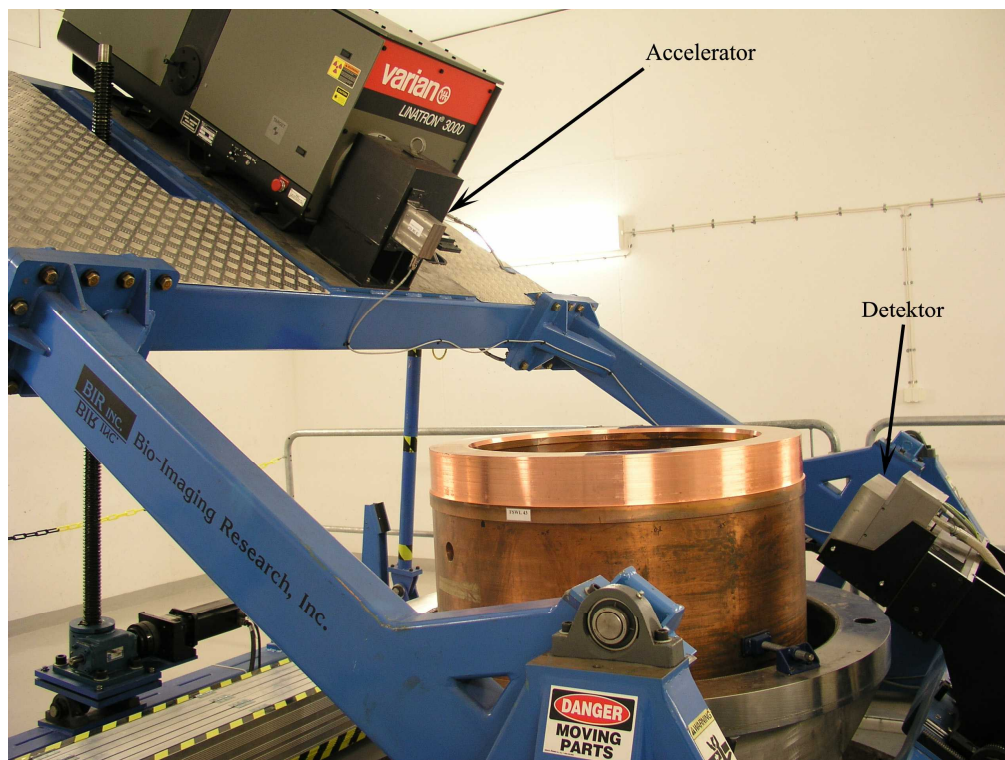
4.2.3 Utrustning för radiografering av svetsar

Kapsellaboratoriets system för digital radiografering består av följande huvudkomponenter, Figur 4-6:

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

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 /SKBdoc 1077122/). 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.



Figur 4-6. Del av röntgensystemet för provning av förslutningssvetsen.

5 Referensmetoder för OFP

Detta avsnitt beskriver den oförstörande provning som SKB avser att göra i egen regi i Kapsel fabriken och i Inkapslingsanläggningen.

De referensmetoder som beskrivs i detta kapitel är de som tagits fram under fasen med primär utveckling och som för närvarande används för provning av tillverkade komponenter och utförda svetsar. I vissa fall redovisas även komplementära metoder som är under utveckling.

Den provning som leverantörerna av kapselkomponenter kommer att utföra syftar främst till att säkerställa deras egen produktionskvalitet och att därmed minimera eventuell kassaktion i kapsel fabriken.

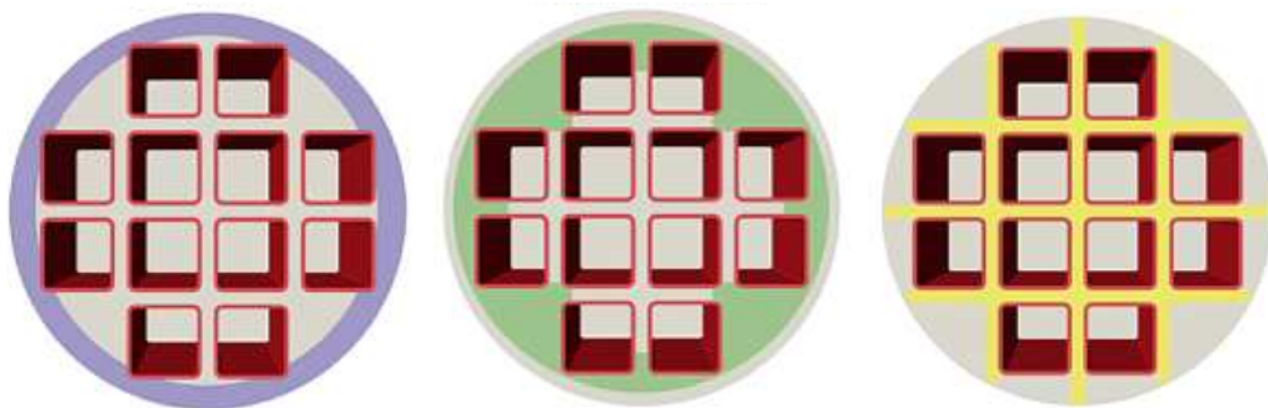
5.1 Kvalitetssäkring

Som ett led i att kvalitetssäkra den provning av provtillverkade kapselkomponenter som görs vid Kapsellaboratoriet finns instruktioner på olika nivåer. I ett första steg har övergripande instruktioner för hantering av utrustning samt checklistor för provning tagits fram. I checklistorna är alla viktiga moment och parametrar noterade för att säkerställa att provningen görs på ett kvalitetssäkrat sätt. Dessa checklistor, som fungerar som ett hjälpmedel vid provning, är inarbetade som bilagor i respektive instruktion som styr provning och utvärdering. Varje provning dokumenteras i en provningsrapport som via ett register är kopplat till objektets identitet och de parametrar som använts vid tillverkning respektive svetsning.

Periodisk kalibrering av provningssystem görs årligen. För att säkerställa att detta är tillräckligt utarbetas utförliga funktionskontroller med avsikt att kontrollera att de viktigaste parametrarna innehålls vid varje provning.

5.2 Segjärnsinsats

För att kunna upptäcka eventuell defektförekomst i insatserna krävs att de inspekteras fullständigt med OFP. För att undersöka hela volymen med tillräcklig tillförlitlighet har tre olika provningsområden definierats. I Figur 5-1 visas de olika provningsområdena med färgerna lila, grönt och gult.



Figur 5-1. Provningsområden BWR-insats. Områden som avsöks med de olika metoderna är vinkelavsökning (lila), normalavsökning (grön), Transmissionsprovning (gul).

För dessa provningsområden utprovas för närvarande följande referensmetoder:

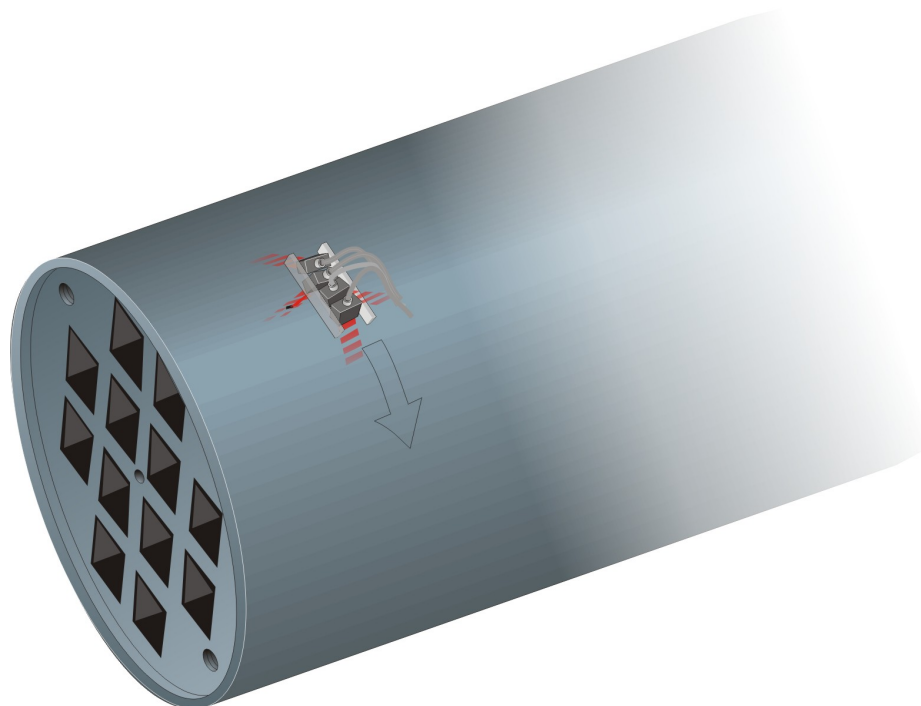
- Vinkelavsökning med ultraljud av insatsens ytterområde (lila) för att detektera volumetriska och sprickliknande defekter.
- Normalavsökning med ultraljud av område mellan insatsens yta och kanalrör (grön) för att detektera volumetriska defekter.
- Transmissionsprovning med ultraljud av området mellan kanalrören (gul) för att detektera volumetriska defekter.

De referensmetoder som beskrivs i detta avsnitt är anpassade för BWR-insatsen eftersom denna har provats mest. För PWR-insatsen görs normal- och vinkelavsökning på samma sätt som för BWR-insatsen. För transmissionsprovningen utvecklas för närvarande teknik som är anpassad till det större avståndet mellan kanalrören. Ultraljudprovningen görs innan insatserna har bearbetats till slutlig dimension så att hela volymen kan kontrolleras trots teknikens begränsningar nära ytan.

För att säkerställa en kvalitetssäkrad provning används referensobjekt med flatbottenhål (FBH), sidoborrade hål (SDH) och notchar i segment från tidigare tillverkade insatser. Dessa segment är placerade i en modul så att samma geometri erhålls vid kalibrering på referensobjekt som vid provning av insatser.

5.2.1 Vinkelavsökning av insats

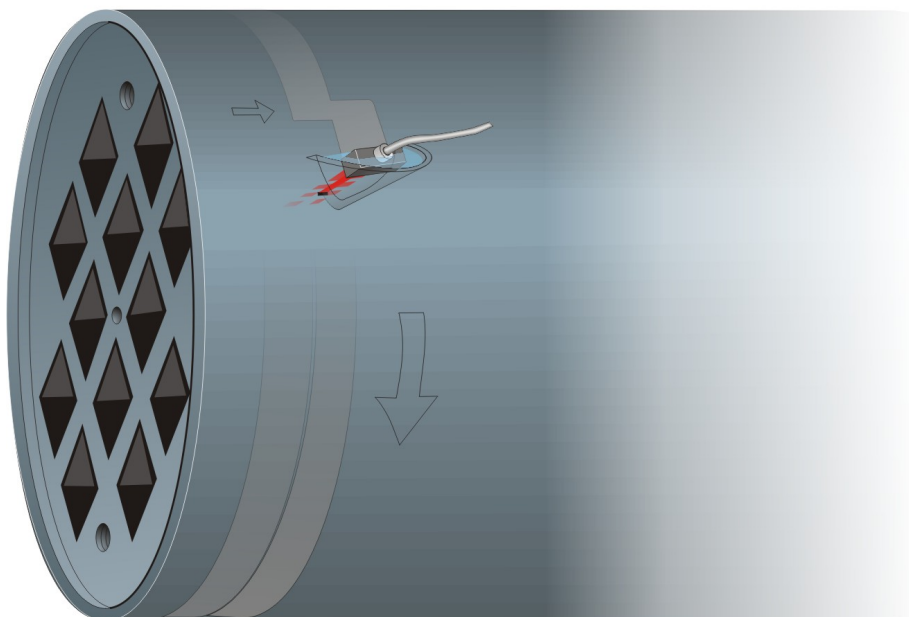
Vinkelavsökningen av ytområdet, ner till kanalrören, görs med så kallad TRL-teknik (Transmitter Receiver Longitudinal, dubbelkristallsökare som sänder longitudinella vågor) med syfte att detektera såväl volumetriska som sprickliknande defekter. För närvarande görs provningen med fyra stycken 2 MHz TRL-sökare med 70° infallsvinkel riktade enligt Figur 5-2. Avsökningen görs sedan i en spiral genom att insatsen roteras samtidigt som sökarpaketet flyttas axiellt. Samma kopplingsmedel som används vid normalavsökning matas till respektive sökare.



Figur 5-2. Vinkelavsökning av BWR-insats

5.2.2 Normalavsökning av insats

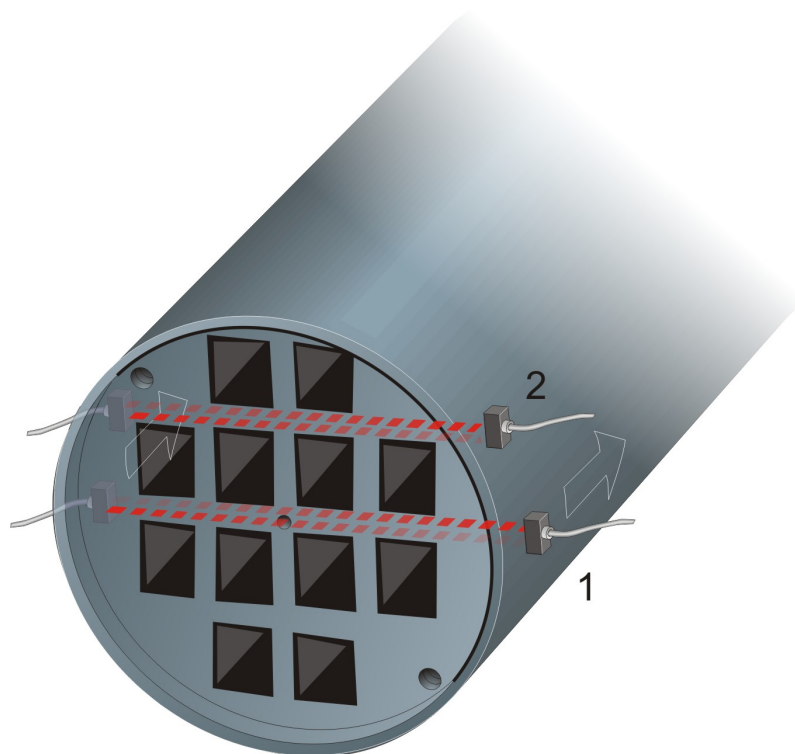
Normalavsökningen görs med phased array teknik med huvudskaligt syfte att detektera volumetriska defekter. Normalavsökningen används även för att mäta kantavståndet, det vill säga avstånden mellan de yttre hörnen på kanalrören och insatsens mantelytan. För närvarande görs provningen med en 2 MHz linjärarray i immersion (som kopplingsmedel används vatten utblandad med låg koncentration av skärvätska) med en vattenspalt på 60-70 mm. Avsökning sker genom att arrayet stegas fram efter varje fullbordat avsökningsvarv, se Figur 5-3.



Figur 5-3. Normalavsökning av BWR-insats.

5.2.3 Transmissionsprovning av insats

Transmissionsprovningen görs med phased array teknik och används för att detektera volumetriska defekter mellan kanalrören. För närvarande görs provningen med två stycken 1 MHz linjärarrayer /SKB 2006b/ anpassade efter insatsens ytterradie. Avsökningen görs sedan med två konfigurationer, se Figur 5-4, där den ena används för avsökning genom insatsens centrum i två riktningar (0 och 90°) medan den andra används för avsökning mellan de yttre kanalrören i fyra riktningar (0, 90, 180 och 270°). Samma kopplingsmedel som används vid normalavsökning matas till respektive array.



Figur 5-4. Transmissionsprovning av BWR-insats (1 avser avsökning genom centrum medan 2 avser avsökning mellan de yttre kanalrören).

5.3 Kopparrör

För att kunna upptäcka eventuell defektförekomst i kopparrören krävs att de inspekteras fullständigt med OFP. Med utgångspunkt från möjliga defekttyper (oxidslingar, slaggar och ytrepor) och erfarenheter från industrin gällande OFP av stora rörkomponenter, har ultraljud valts som huvudteknik för kontroll av kopparröret.

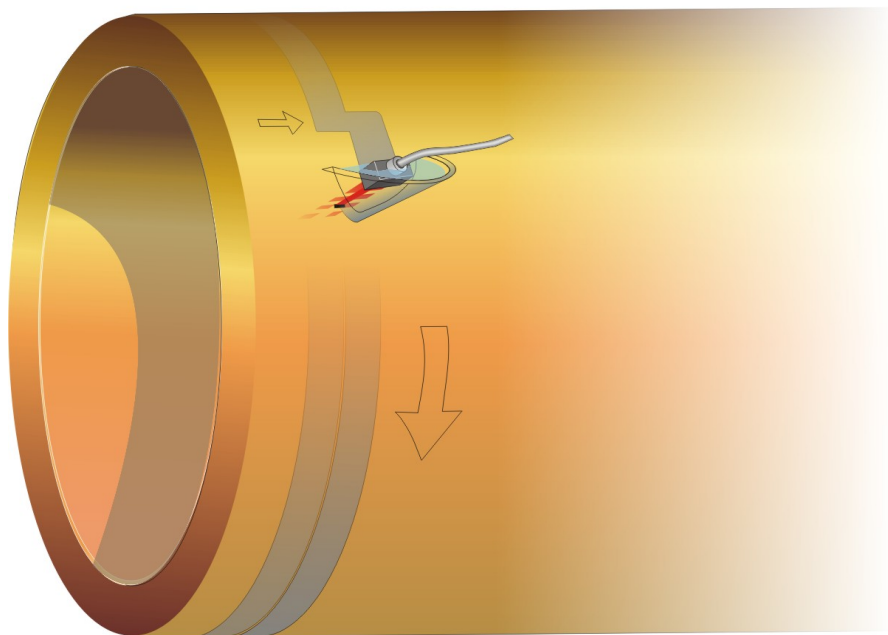
Eftersom det är mest troligt att de defekter som uppkommer vid extrusion har laminär utbredning har normalavsökning med ultraljud valts som en första referensmetod för provning av kopparröret. Dessutom utvecklas teknik för vinkelavsökning för att detektera ytrepor. Ultraljudprovningen görs innan rören har bearbetats till slutlig dimension så att hela volymen kan kontrolleras trots teknikens begränsningar nära ytan.

För att säkerställa en kvalitetssäkrad provning används referensobjekt med FBH, SDH och notchar i segment från tidigare tillverkade kopparrör. Dessa segment är placerade i en modul så att samma geometri erhålls vid kalibrering på referensobjekt som vid provning av kopparrör.

Som komplement till den volumetriska provningen har ett utvecklingsprojekt initierats med avsikt att undersöka behov och utveckla teknik för provning av ytan efter färdigbearbetning.

5.3.1 Normalavsökning av kopparrör

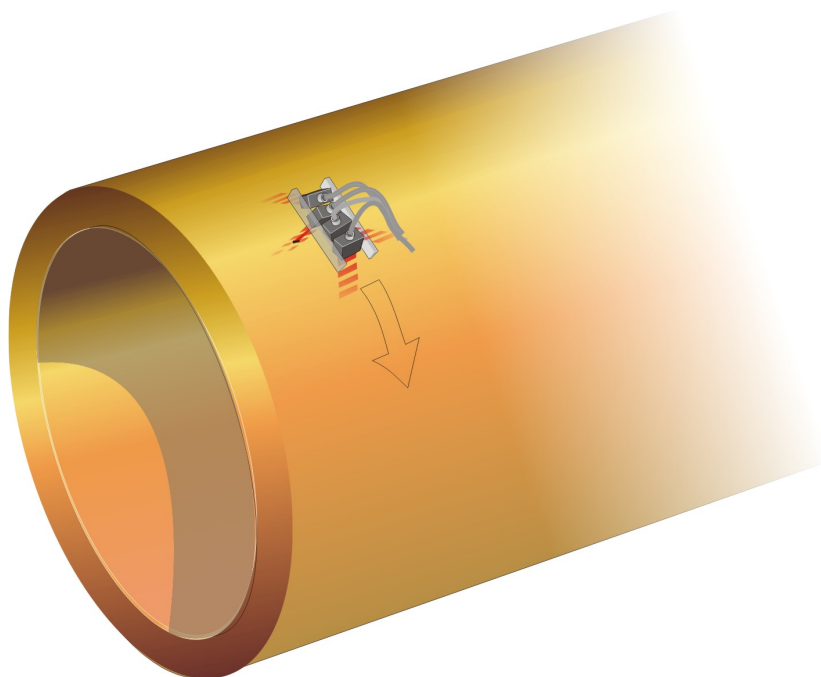
Normalavsökningen görs med phased array teknik med huvudskaligt syfte att detektera laminära defekter men resultaten används även för att indikera variationer i kornstorlek. För närvarande görs provningen med en 5 MHz linjärarray med immersionsteknik med en vattenspalt på cirka 30 mm. I dagsläget används samma kopplingsmedel som för segjärnsinsatsen eftersom provningen av denna görs i samma utrustning. Avsökning sker genom att arrayet stegas fram efter varje fullbordat avsökningsvarv, se Figur 5-5.



Figur 5-5. Normalavsökning av kopparrör

5.3.2 Vinkelavsökning av kopparrör

Syftet med vinkelavsökningen är att detektera ytrepor på in- och utsidan av röret. Den teknik som för närvarande utvecklas baseras på konventionell teknik med fyra 2 MHz transversalsökare (se Figur 5-6), två i axiell riktning och två i tangentiell riktning, som anpassas för provning av 5 centimeter tjock koppar. Samma kopplingsmedel som används vid normalavsökning matas till respektive sökare.



Figur 5-6. Vinkelavsökning av kopparrör

5.4 Kopparlock och -botten

Utvecklingen vid Kapsellaboratoriet bedrivs med utgångspunkt att kopparlocken och -bottarna ska inspekteras fullständigt med OFP med avseende på defekt förekomst. För detta har flera olika provningar med ultraljud specificerats. För att säkerställa att hela volymen kan kontrolleras, trots ultraljudteknikens begränsningar nära ytan, görs provningen innan de smidda ämnena färdigbearbetas. Detta gör det möjligt att bearbeta såväl lock som botten ur dessa ämnen, vilket föranleder att i fortsättningen kommer enbart locket behandlas i denna rapport.

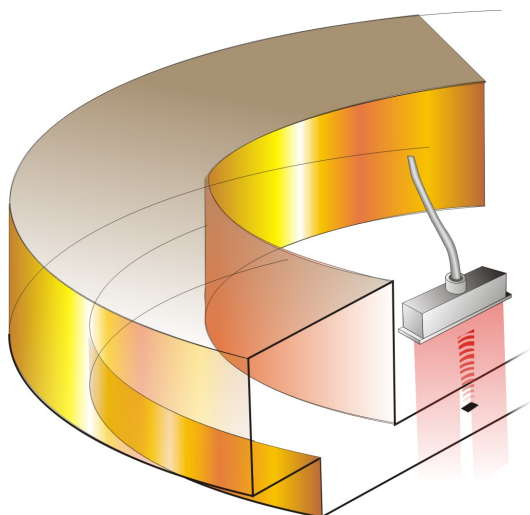
Ur ultraljudsynpunkt kan locket delas in i två delar, det inre tunnare området med liknande geometri som kopparröret och det yttre tjockare området. Med utgångspunkt från detta utprovas referensmetoder som samtliga baseras på normalavsökning med ultraljud med immersionsteknik.

För att säkerställa en kvalitetssäkrad provning används referensobjekt med FBH och SDH tillverkade i segment från tidigare tillverkade kopparlock. Dessa segment placeras ovanpå locket och avsöks i samband provningen.

Som komplement till den volumetriska provningen har ett utvecklingsprojekt initierats med avsikt att undersöka behov och utveckla teknik för provning av ytan efter färdigbearbetning.

5.4.1 Provning av lockets inre del

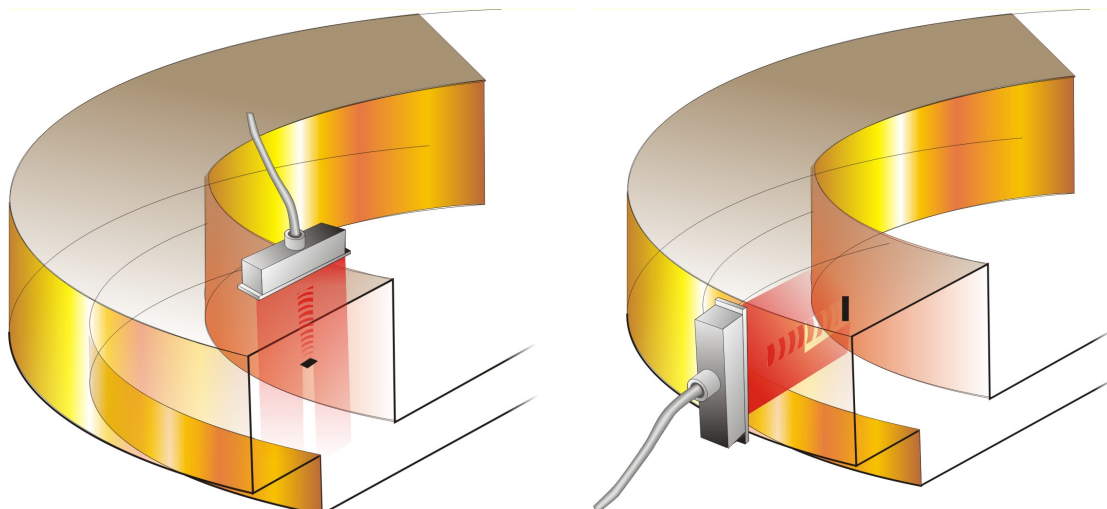
I den inre delen av locket används samma metodik som för kopparröret, det vill säga normalavsökning med phased array ultraljudteknik. Normalavsökningen görs med phased array teknik med syfte att detektera inneslutningar och smidesveck samt indikera på variationer i kornstorlek. För närvarande görs provningen med en 5 MHz linjärarray med immersionsteknik (i vatten) med en vattenspalt på cirka 30 mm. Avsökning sker genom att locket roteras och att arrayet stegas radiellt efter varje fullbordat avsökningsvarv, se Figur 5-7.



Figur 5-7. Normalavsökning av kopparlockets inre del.

5.4.2 Provning av lockets yttre del

I den yttre delen av locket används samma metodik som för den inre delen. Skillnaden är att det görs provning både från lockets ovansida och från mantelytan, se Figur 5-8. För närvarande görs provningen med en 5 MHz linjärarray med immersionsteknik (i vatten) dels med en vattenspalt på cirka 30 mm och dels med arrayet i direkt kontakt med locket. Avsökning sker genom att locket roteras och att arrayet stegas radiellt alternativt axiellt efter varje fullbordat avsökningsvarv.



Figur 5-8. Normalavsökning av kopparlockets yttre del.

5.5 Botten- och förslutningssvets

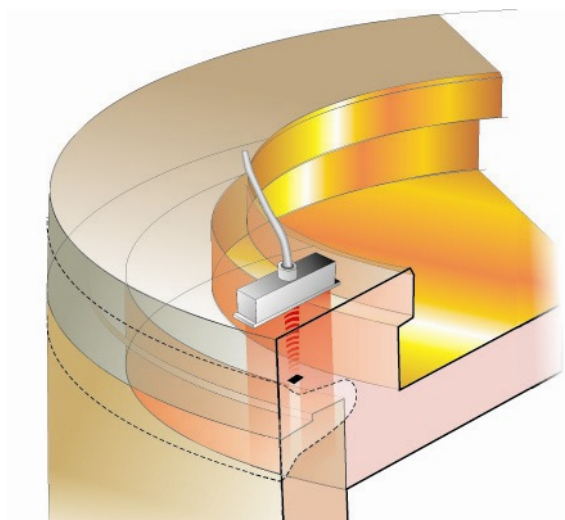
Utvecklingen vid Kapsellaboratoriet bedrivs med utgångspunkt från att kopparhöljets svetsar, botten- och förslutningssvets, ska inspekteras fullständigt med OFP med avseende på förekomst av defekter som foglinjeböjning och maskhål. De referensmetoder som har utprovats och som för närvarande utvärderas är:

- Phased array ultraljudprovning
- Digital radiografering

Som komplement till den volumetriska provningen har ett utvecklingsprojekt initierats med avsikt att undersöka behov och utveckla teknik för provning av ytan efter färdigbearbetning.

5.5.1 Ultraljudprovning av svetsar

Phased array ultraljudprovning görs från lockets ovansida med en 5 MHz linjärarray som elektroniskt sveper ljudstrålen i kapselns radiella ledd, se Figur 5-9, samtidigt som svetsen roteras. För att få koppling av ljudvågorna in i kapseln används en tunn vattenfilm. Provningen görs för närvarande med två konfigurationer, den ena med syfte att göra en generell avsökning av svetsen medan den andra främst används för att detektera foglinjeböjningen. I den generella avsökningen används två sekvenser, vinklat ljudfält mot kapselns mantelyta och fokuserat ljudfält i de inre delarna av svetsen. För inspektion av eventuell foglinjeböjning görs avsökning i flera fasta vinklar.

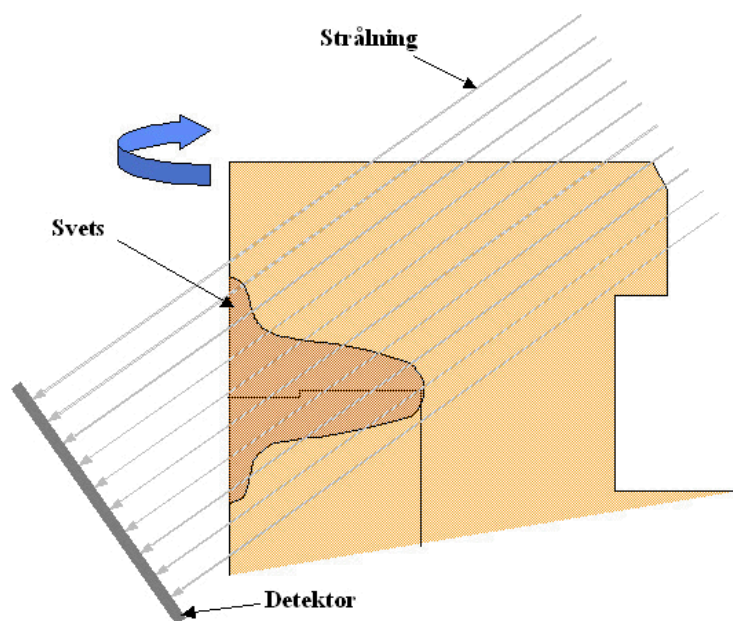


Figur 5-9. Ultraljudprovning av förslutningssvets.

För att säkerställa en kvalitetssäkrad provning används referensobjekt med FBH tillverkade i segment från tidigare svets. Detta segment placeras ovanpå locket och avsöks i samband provningen.

5.5.2 Radiografering av svetsar

Vid provning roteras kapseln medan acceleratoren pulserar röntgenstrålning genom svetsen med 35° infallsvinkel, se Figur 5-10. 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. Resultatet utvärderas sedan med utgångspunkt från kriterier som baseras på kapselns geometri i förhållande till strålningsriktningen samt systemets signal/brus förhållande. För att säkerställa den radiografiska känsligheten vid provningen används 1 och 2 mm kopparspenetratorer tillverkade enligt gällande standard /ASTM International/.



Figur 5-10. Radiografering av förslutningssvets.

6 Tillförlitlighet i OFP-metoder

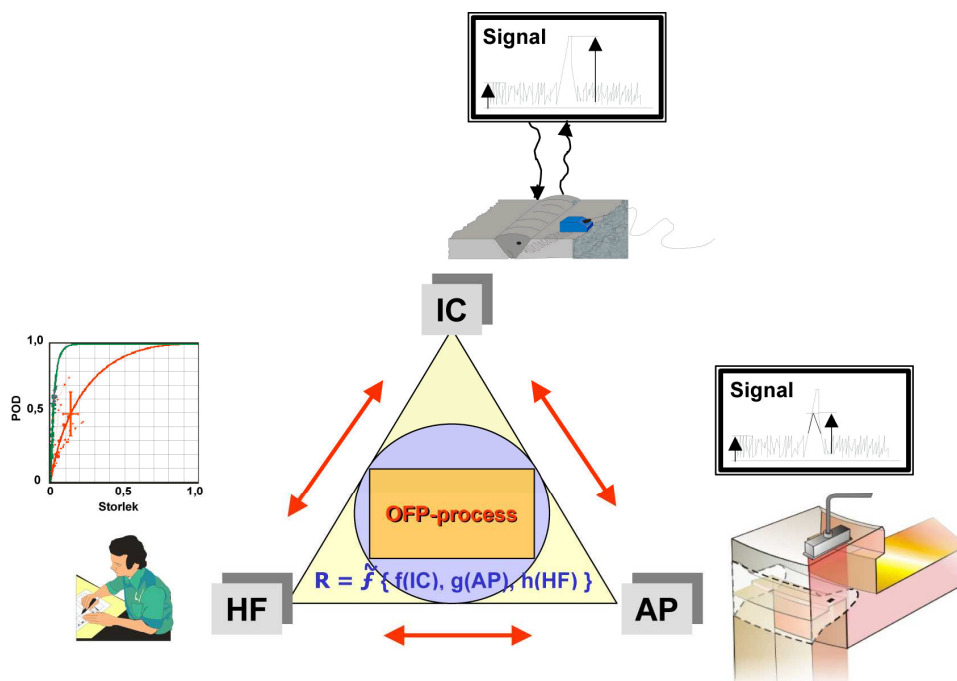
Med tillförlitlighet vid oförstörande provning avses förmågan att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter samt uppskatta risken för falska indikationer. För undersökning av tillförlitligheten vid oförstörande provning har SKB sedan år 2003 drivit ett utvecklingsprojekt (NDT Reliability) vid BAM (Bundesanstalt für Material forschung und –prüfung) i Berlin. Den första etappen av detta projekt /SKBdoc 1175235/ var inriktad mot att bestämma tillförlitligheten vid provning av kapselns svetsar medan etapp två /SKBdoc 1180131/, /SKBdoc 1180132/ fokuserade på tillförlitligheten vid provning av kapselns komponenter. I detta avsnitt redovisas endast förmågan att detektera defekter, medan förmågan att storleksbestämma defekter vid provning av kapselns svetsar även redovisas i /SKBdoc 1175236/.

6.1 Strategi

För att bestämma OFP-processers tillförlitlighet (R) kan dessa indelas i tre delar enligt Figur 6-1, 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 främst att bestämma OFP-processernas förmåga att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter med fokus på de fysiska parametrarna (IC), men som en följd av att provningen görs på verkliga objekt har även vissa av de övriga tekniska faktorerna beaktats. En metodik för en mer komplett bestämning av tillförlitligheten inklusive de mänskliga faktorerna har initierats som SKB planerar att tillämpa i ett senare skede när mer slutgiltiga tekniska lösningar finns framme. Målet med denna metodik är att minimera dessa faktorer vid utformning av processer och system.



Figur 6-1. Tillförlitlighet vid OFP.

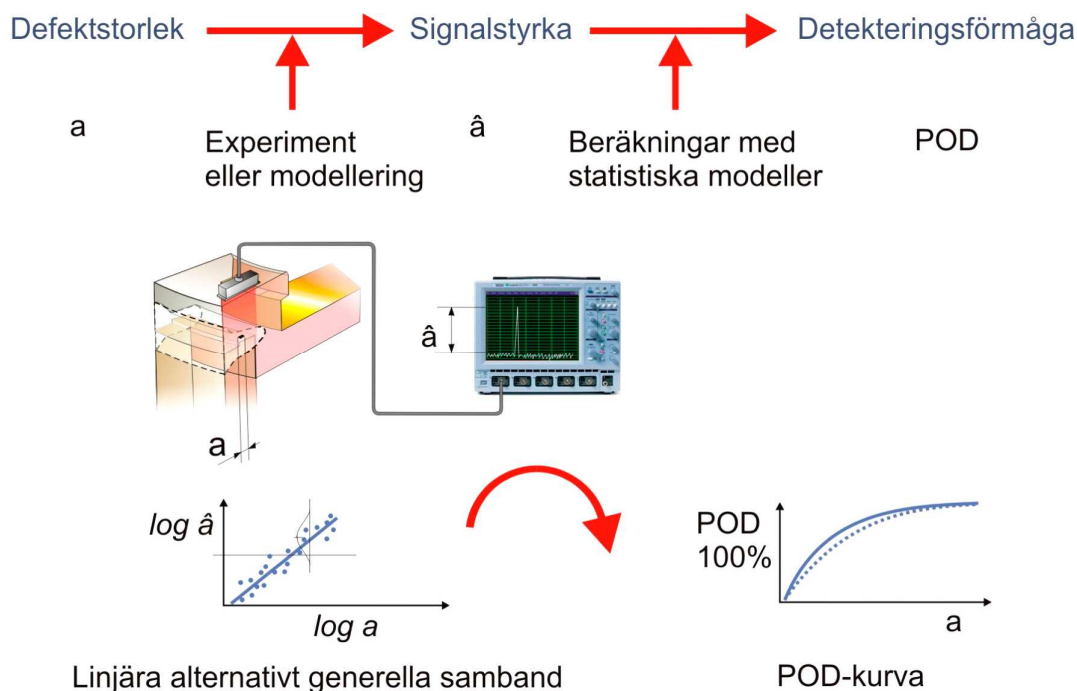
6.2 Metodik för bestämning av tillförlitlighet

NDT Reliability är ett utvecklingsprojekt vilket innebär att metodik för bestämning av detekteringsförmåga förfinas och anpassas till de olika provningsfallen allt eftersom. Till en början var fokus på att anpassa tidigare utvecklad metodik, signal respons analys (\hat{a} vs a), Figur 6.2 /SKBdoc 1175235/ för bestämning av detekteringsförmågan (Probability of Detection, POD). För att kunna använda POD-metodiken för att tydliggöra brister hos olika provningstekniker har förfinad metodik utvecklats. Detta görs med dels en så kallad multi-parameter POD där exempelvis effekten av position och orientering av defekter kan undersökas och dels med en volym-POD där effekten av flera olika provningar av en volym kan studeras.

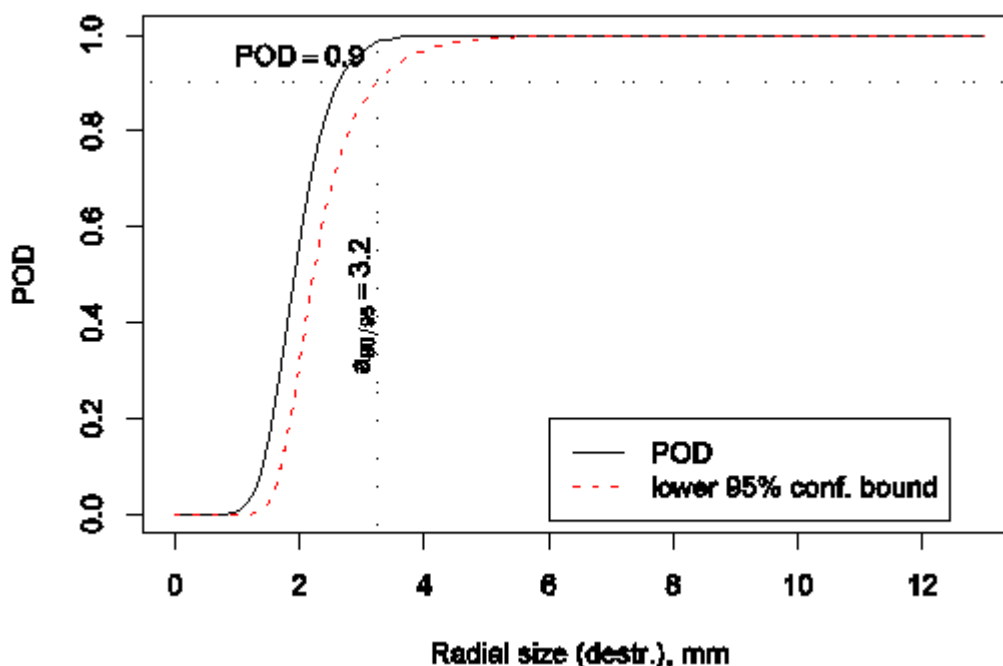
6.2.1 POD, signal respons analys (\hat{a} vs a)

Denna metodik, använder förhållandet mellan signalstyrkan \hat{a} från detekteringssystemet och defektens storlek a enligt

Figur 6-2, är i grunden utvecklad för manuell provning. För att kunna applicera metoden på provningen av kapseln har denna vidareutvecklats. Framför allt som en följd av att metoden är anpassad för OFP-processer där "signalstyrkan" direkt påverkas av storleken på indikationen, vilket dock inte fallet för alla SKB:s OFP-processer. Som mått på detekteringsförmåga anses ett värde av $a_{90/95}$ vara en rimligt hög nivå. Denna nivå innebär det värde då den nedre kurvan för 95 % konfidensgräns når 90 % detekteringsförmåga, se Figur 6-3. Indexeringen (90/95) anger att 90 % av defekterna med storleken a kommer att detekteras inom ett konfidensintervall på 95 %, det vill säga osäkerheten vid bestämning av POD-kurvan.



Figur 6-2. Generell beskrivning av metodik för bestämning av POD.



Figur 6-3. Exempel på POD-kurva med 95 % nedre konfidensgräns korsar 90 % POD.

6.2.2 Multi-parameter POD

För att kunna använda POD-metodiken för att tydliggöra brister hos olika provningstekniker och även utnyttja data för att verifiering av tekniken har en förfinad metodik utvecklats. Denna metodik kallas multi-parameter POD och utnyttjar där det faktum att signalstyrkan från en defekt är beroende av flera olika faktorer. I ett första skede har, variation av defektorientering och var i det modellerade ljudfältet defekten är lokaliserad, implementerats /SKBdoc 1175235/. För närvarande pågår vidareutveckling av denna metodik med syfte att ta fram verktyg för att analysera vilken effekt variation av de så kallade viktiga parametrarna har på förmågan att detektera olika typer av defekter.

6.2.3 Volym-POD

Ett annat område som har varit av intresse är att kunna bestämma tillförlitligheten då samma volym inspekteras med flera provmetoder. Detta har resulterat i att den så kallade volym-POD har utvecklats /SKBdoc 1180132/. Men denna teknik kan det åskådliggöras grafiskt var i volymen eventuella begränsningar i detekteringsförmågan finns. Resultaten används sedan för att identifiera vilken förbättring av provningstekniken som erfordras.

6.3 Resultat

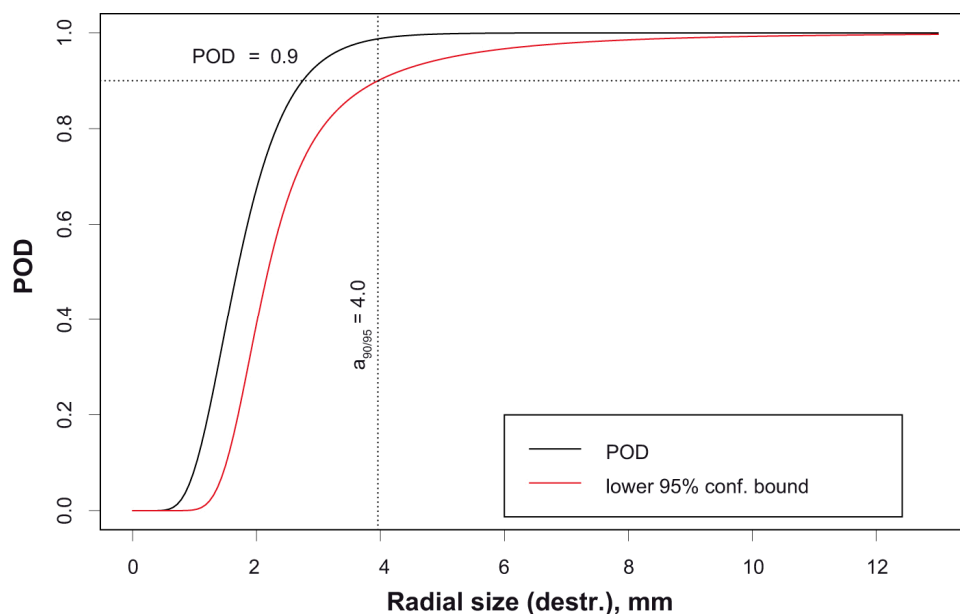
I detta avsnitt redovisas resultat från de studier av tillförlitlighet för de utvecklade OFP-metoderna som genomförts /SKBdoc 1175235/, /SKBdoc 1180131/ och /SKBdoc 1180132/. Bestämning av tillförlitligheten av OFP av svetsar har gjorts med utgångspunkt från verkliga defekter. För komponenterna har antalet verkliga defekter varit begränsade vilket har medfört att bestämning av tillförlitligheten har gjort med utgångspunkt från artificiella defekter som flatbottenhål (FBH), sidoborrade hål (SDH) och notchar.

6.3.1 Tillförlitlighet vid OFP av svetsar

Tillförlitligheten har bestämts vid OFP av svetsar under första etappen av NDT Reliability med å vs a metodik som beskrivs detaljerat i /SKBdoc 1175236/, /SKBdoc 1175235/.

I Figur 6-4 nedan visas POD för ultraljudprovning av foglinjeböjning medan Tabell 6-1 visar en sammanställning över POD för OFP av svetsar.

Ultraljudprovningen har en detekteringsförmåga på i storleksordningen fyra millimeter för foglinjeböjning. Det bör dock noteras att foglinjeböjningen har en gynnsam geometri för ultraljud och att defekter med en mindre radiell utbredning än fyra millimeter ofta kan detekteras. För maskhål visar analyserna på en detekteringsförmåga på cirka sex millimeter för gällande ultraljudteknik och fyra mm för radiografering.



Figur 6-4. POD för ultraljudprovning av foglinjeböjning. Figuren visar på förhållandet mellan detekteringsförmågan (POD) och defektens radiella utbredning.

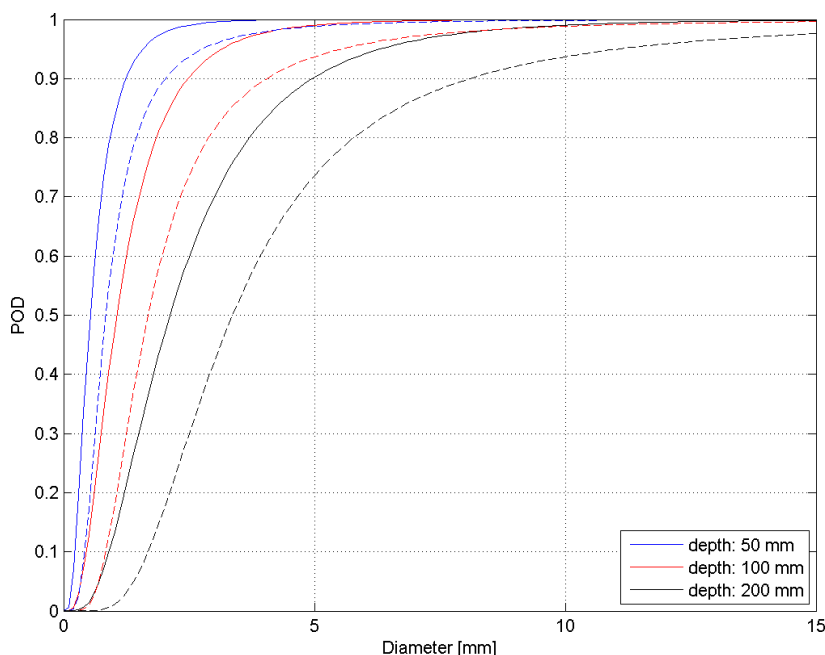
Tabell 6-1. POD $a_{90/95}$ för oförstörande provning av svetsar

	$a_{90/95}$ Ultraljudprovning (mm)	$a_{90/95}$ Radiografering (mm)
Foglinjeböjning	4,0	-
Maskhål	6,3	4,0

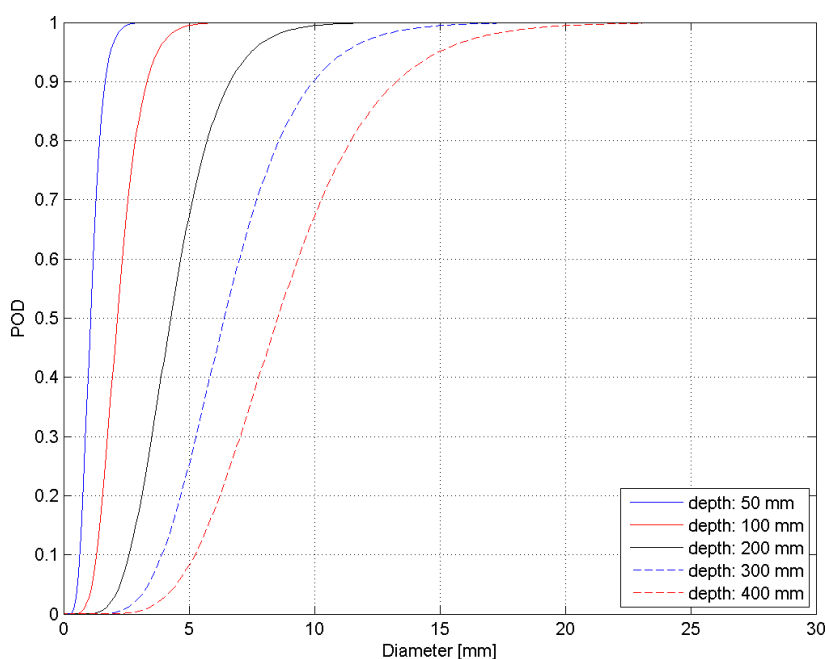
6.3.2 Tillförlitlighet vid OFP av segjärnsinsats

Tillförlitligheten har bestämts vid OFP av segjärnsinsatsen under etapp två av NDT Reliability med \hat{a} vs a metodik som beskrivs detaljerat i /SKBdoc 1180132/. Figur 6-5 och Figur 6-6 visar exempel på POD-kurvor för SDH för ultraljudprovning av BWR-insatsen nedan.

Tabell 6-2, Tabell 6-3 och Tabell 6-4 visar en sammanställning över all undersökt POD för ultraljudprovning av BWR-insatsen. Tabellerna visar tydligt att detekteringsförmågan avtar med inspektionsdjupet, från i storleksordningen 2 mm vid ytan till över 20 mm på större djup mellan kanalerna. Med utgångspunkt från detta kan antas att OFP-metoderna kan detektera defekter av i storleksordningen fem mm ner till 50 mms djup och tio mm på större djup, bortsett från mellan kanalrören där begränsade det krävs en defektstorlek av i storleksordningen 20 mm. Det bör dock nämnas att antalet datapunkter i beräkningarna är begränsade, vilket ger ett brett konfidensband och därmed överskattning av POD.



Figur 6-5. $POD_{a_{90/95}}$ för normalavsökning av BWR-insats vid olika djup (streckade linjer visar 95 % konfidens).



Figur 6-6. $POD_{a_{90/95}}$ för transmissionsprovning av BWR-insats vid olika djup.

Tabell 6-2. Defektstorlek (SDH) vid olika djup där POD $a_{90/95}$ erhålls för normalavsökning av BWR-insats

Djup [mm]	50	100	150	200
$a_{90/95}$, diameter SDH [mm]	2,1	4,1	6,1	8,1

Tabell 6-3. Defektstorlek (nothchar) vid olika djup där POD $a_{90/95}$ erhålls för vinkelavsökning av BWR-insats

Djup [mm]	Tangentiell utbredning		Axiell utbredning	
	0	50	0	50
$a_{90/95}$, diameter notchar [mm]	3,1	8,7	2,2	4,4

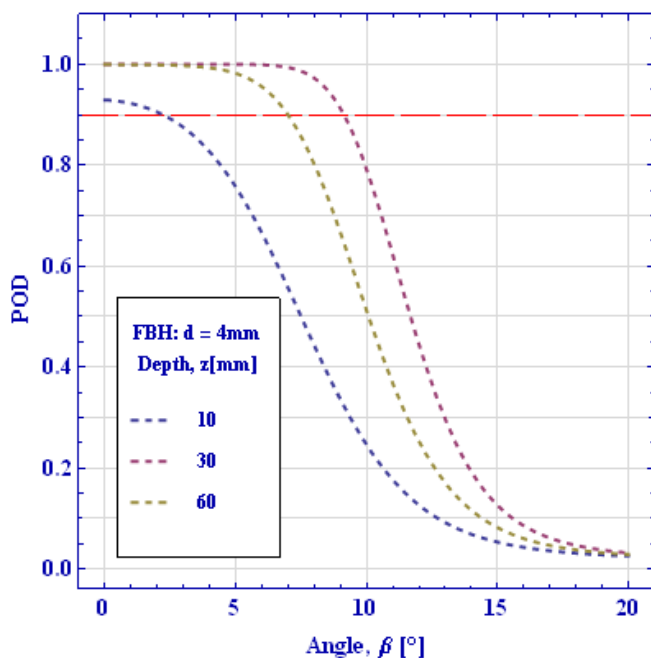
Tabell 6-4. Defektstorlek (SDH) vid olika djup där POD $a_{90/95}$ erhålls för transmissionsprovning av BWR-insats

Djup [mm]	50	100	150	200	250	300	350	400
$a_{90/95}$, diameter SDH [mm]	3,1	6,2	9,3	12,4	15,4	18,5	21,6	24,7

6.3.3 Tillförlitlighet vid OFP av kopparrör

Tillförlitligheten har bestämts vid OFP av kopparrör under etapp två av NDT Reliability /SKBdoc 1180131/ med multi-parameter POD baserat på indikationer från tillverkade FBH. Som en följd av att det går göra ett stort antal POD-kurvor med de olika parametrarna visas här ett exempel, se Figur 6-7. En sammanställning av detekteringsförmågan för ultraljudprovningen visas i Tabell 6-5.

Ur Tabell 6-5 kan utläsas att en 4 mm stor defekt kan detekteras i hela inspektionsområdet för kopparröret om den är parallell mot ytan medan en vinkel på 5° ökar storleken till 5 mm som följd av en lägre känslighet nära ytan. Vid större vinkel minskar detekteringsförmågan ytterligare, vilket dock inte anses kritiskt då materialflödet vid extrusion gör att eventuella defekter i stort sett blir parallella med ytan.

**Figur 6-7. POD $a_{90/95}$ för normalavsökning av kopparrör som funktion av defektorientering vid olika djup för en 4 mm defekt.**

Tabell 6-5. Områden för normalavsökning av kopparrör längs godstjockleken där POD $a_{90/95}$ uppnås för olika storlek och orientering av defekter (provningsområde 3-55 mm).

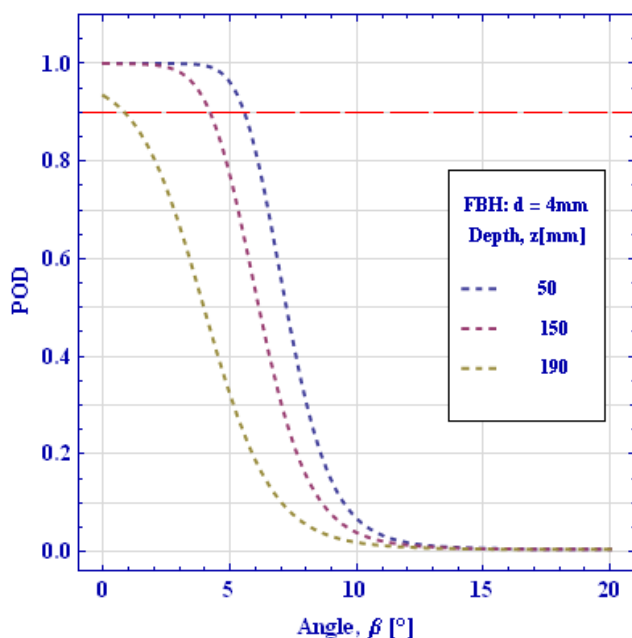
Diameter [mm]	2	3	4	5
Vinkel, β [°]				
0	-	22-55	Hela området	Hela området
5	-	33-37	15-55	Hela området

6.3.4 Tillförlitlighet vid OFP av kopparlock och kopparbotten

Tillförlitligheten har bestämts vid OFP av kopparlock under etapp två av NDT Reliability /SKBdoc 1180131/ med multi-parameter POD baserat på indikationer från tillverkade FBH. Dessutom har även volym-POD studerats på kopparlocket. Som en följd av att det går göra ett stort antal POD-kurvor med de olika parametrarna visas här ett exempel, se Figur 6-8. En sammanställning av POD-värden finns för kopparlocket i Tabell 6-6, Tabell 6-7 och Tabell 6-8.

Ur Tabell 6-6 kan utläsas att en 4 mm defekt kan detekteras i hela inspektionsområdet för inre delen av kopparlocket om den är parallell mot ytan medan en vinkel på 5° ökar storleken till 5 mm som följd av en lägre känslighet nära ytan.

För provning av kopparlockets yttre del kan det ur Tabell 6-7 utläsas att en 4 mm defekt kan detekteras i hela inspektionsområdet om den är parallell mot övre ytan medan en vinkel på 5° ökar storleken till 6 mm som följd av en lägre känslighet på stort djup. Dessutom kan man ur Tabell 6-8 se att provningen från mantelytan har sämre detekteringsförmåga där först en 5 mm defekt kan detekteras i hela inspektionsområdet om den är parallell mot mantelytan medan en vinklad defekt ej är detekterbar i hela djupet förrän den är större än 6 mm. Det finns flera orsaker som kan förklara denna lägre detekteringsförmåga, exempelvis kan lockets radie eller mantelytans ytfinhet påverka signalen. Dessutom finns det variationer i materialstrukturen i kopparlocken där de analyserade referensdefekterna har tillverkats.



Figur 6-8. POD $a_{90/95}$ för ultraljudprovning av kopparlockets yttre tjocka del som funktion av defektorientering vid olika djup.

Tabell 6-6. Områden för ultraljudprovning av inre delen av kopparlocket längs godstjockleken där POD $a_{90/95}$ uppnås för olika storlek och orientering av defekter (provningsområde 3-54 mm).

Diameter [mm]	2	3	4	5
Vinkel, β [°]				
0	28-43	17-54	Hela området	Hela området
5	-	23-54	14-54	Hela området

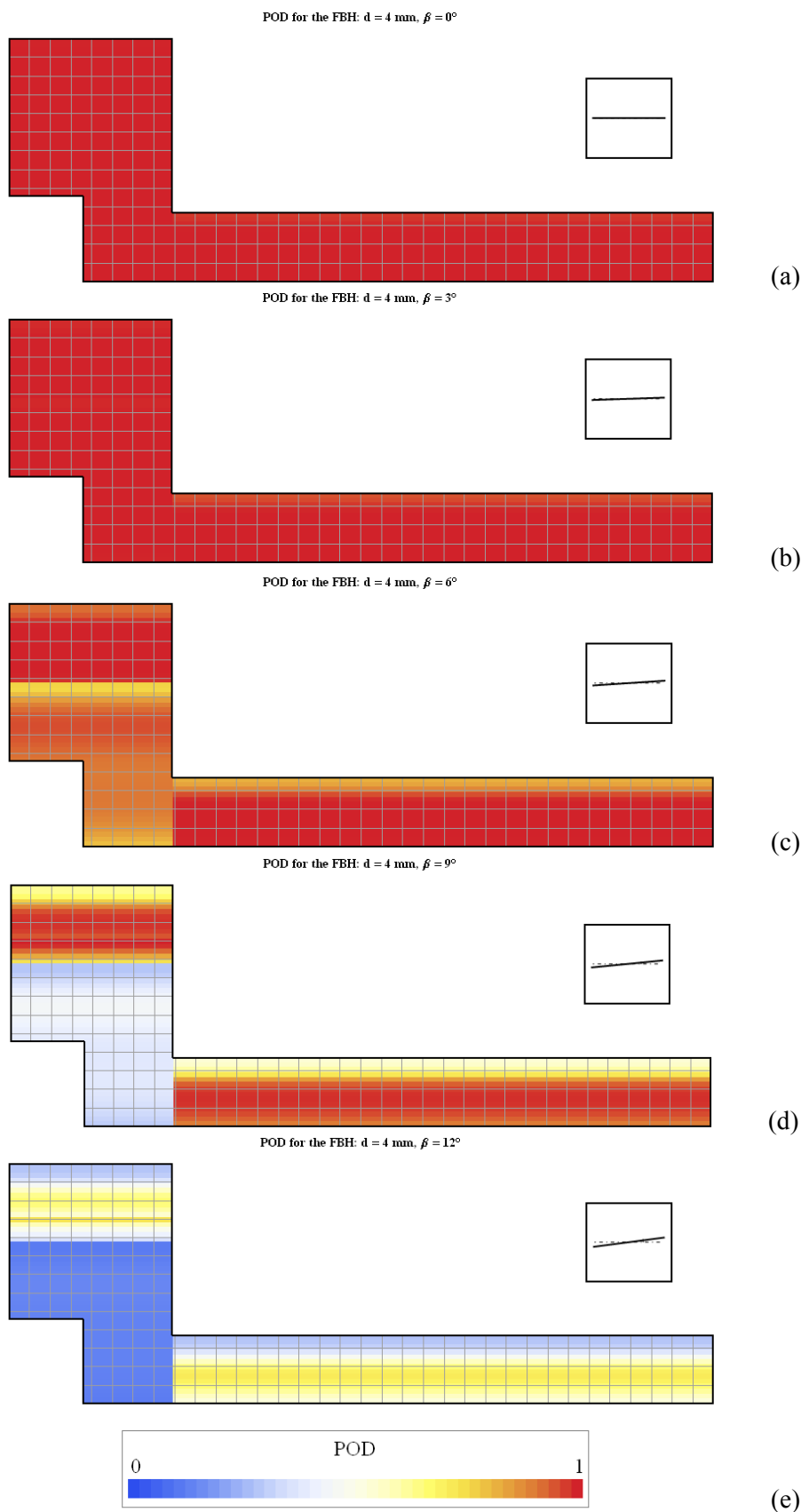
Tabell 6-7. Områden för ultraljudprovning av yttre delen av kopparlocket från ovasidan längs godstjockleken där POD $a_{90/95}$ uppnås för olika storlek och orientering av defekter (provningsområde 3-194 mm).

Diameter [mm]	2	3	4	5	6
Vinkel, β [°]					
0	16-60	3-156	Hela området	Hela området	Hela området
5	19-51	3-60	3-127	3-168	Hela området

Tabell 6-8. Områden för ultraljudprovning av yttre delen av kopparlocket från mantelytan längs godstjockleken där POD $a_{90/95}$ uppnås för olika storlek och orientering av defekter (provningsområde 3-124 mm).

Diameter [mm]	2	3	4	5	6
Vinkel, β [°]					
0	-	45-46	3-116	Hela området	Hela området
5	-	3-54	3-58	3-107	3-117

För att ytterligare visualisera effekten av detekteringsförmågan som en funktion olika parametrar visas ett exempel på volym-POD i Figur 6-9. Figuren illustrerar hur detekteringsförmågan varierar med defektvinkeln vid provning av kopparlocket vid en bestämd defektstorlek som i detta fall motsvarar ett FBH med diameter på 4 mm. Ur figuren kan det utläsas att för en defektorientering av 0° (a) och 3° (b) är detekteringsförmågan hög medan den framförallt minskar, nära ytan och på större djup, för mer vinklade defekter.



Figur 6-9. Förändring av volym-POD för FBH med diameter 4 mm och orientering av (a) 0° , (b) 3° , (c) 6° , (d) 9° och (e) 12° .

7 Erfarenheter

I detta avsnitt sammanfattas de erfarenheter som erhållits vid utveckling och implementering av beskrivna provningsmetoder.

7.1 Generellt

Vid Kapsellaboratoriet har arbetet med oförstörande provning pågått under tio år. Till en början var arbetet enbart inriktat mot OFP av kapselns svetsar medan det under senare tid främst varit fokuserat på OFP av kapselns komponenter. Ett av de viktigaste stegen i arbetet med OFP har varit att samla alla resurser på ett ställe och bygga upp utrustning för att möjliggöra teknikutveckling för provning av fullstora komponenter. Detta har även möjliggjort att omfattningen av det arbete som krävs har kunnat specificeras betydligt bättre. Dessutom har information kunnat samlas in i samband med provning av komponenter som sedan utnyttjats i vidareutveckling av tillverkningsprocesserna.

7.2 Utrustning

I detta avsnitt redovisas erfarenheter kopplade till ultraljudutrustningen, röntgensystemet samt till kringutrustning (rotator, rotationsbord och referensroppar) för kapselkomponenter,.

7.2.1 Ultraljudutrustning

Den ultraljudutrustning som används för provning av såväl svetsar som kapselkomponenter har goda ultraljudprestanda men även begränsningar i:

- Låg scanningshastighet och långsam utvärdering som följd av långsam datahantering.
- Möjlighet att använda avancerade provningskonfigurationer.
- Verktyg för utvärdering av data.

7.2.2 Röntgenutrustning

Röntgensystemet har visat sig vara mycket stabilt med hög reproducerbarhet. De problem med systemet som har uppkommit är en följd av perioder med långa stillestånd för linjäracceleratoren som är byggd för att användas kontinuerligt.

Eftersom systemet är specificerat för en speciell provningskonfiguration begränsas möjligheten för vidareutveckling av alternativa konfigurationer utan att större modifikationer genomförs.

7.2.3 Kringutrustning

Den viktigaste förbättringen som har gjorts på rotatorn sedan den driftsattes var när den modifierades med en speciell enhet för referensobjekt. Detta har visat sig vara mycket värdefullt eftersom samma förutsättningar kunnat användas vid kalibrering som vid den faktiska provningen. Dessutom har den typ av modulbaserat system av referensroppar som används för insatser och kopparrör möjliggjort att en stor variation av artificiella referensfel har kunnat tillverkas på ett rationellt sätt utan att frångå användning av samma geometri som för de verkliga komponenterna.

Identifierade begränsningar i utrustningen är exempelvis:

- Låg provningshastighet. Är inte begränsande för provningen vid Kapsellaboratoriet. Däremot bör utrustningarna i Kapsel fabriken möjliggöra högre provningshastighet.
- Ej möjligt att prova kopparrörens och insatsernas fulla längd vid immersionsprovning som en följd av fixturens geometri. Olika koncept finns för att klara av detta men det anses inte som en prioriterad aktivitet att lösa i dagsläget.

- Som en följd av att rotatorn är flexibelt byggd för provning av både insatser och kopparrör krävs en del manuella justeringar som inte är nödvändiga i de planerade utrustningarna i Kapsel fabriken i och med att separata system kommer att användas.

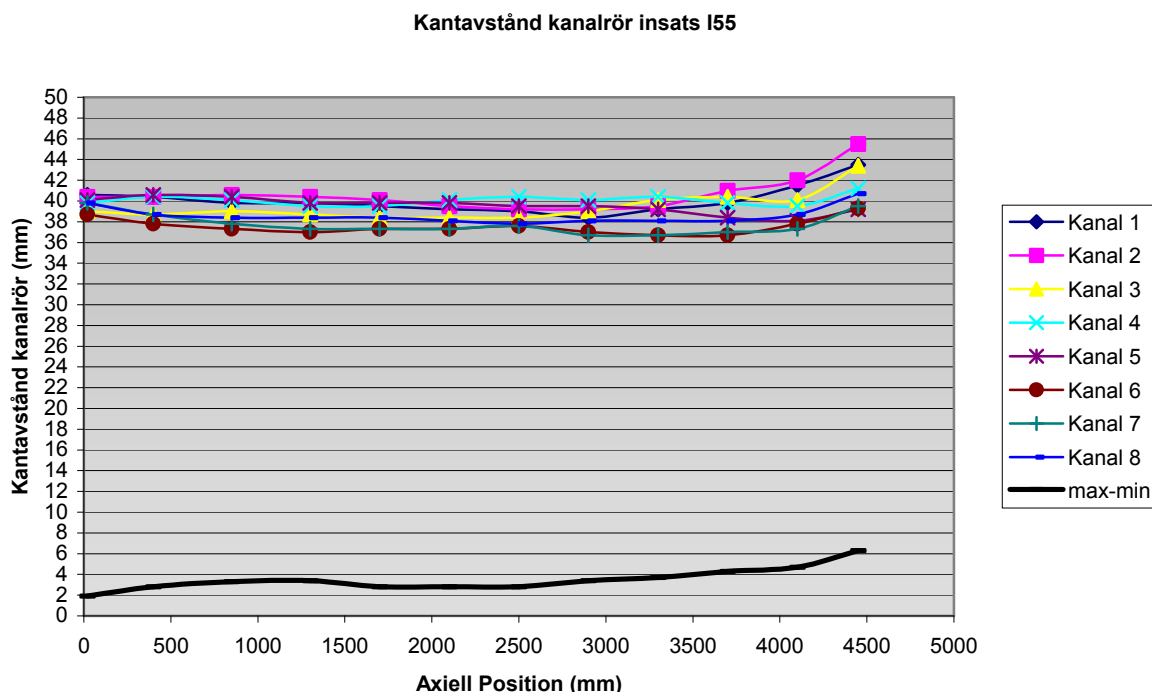
7.3 Provning av segjärnsinsats

Ett tjugotal insatser (varav tre PWR) kontrollerats med oförstörande provning.

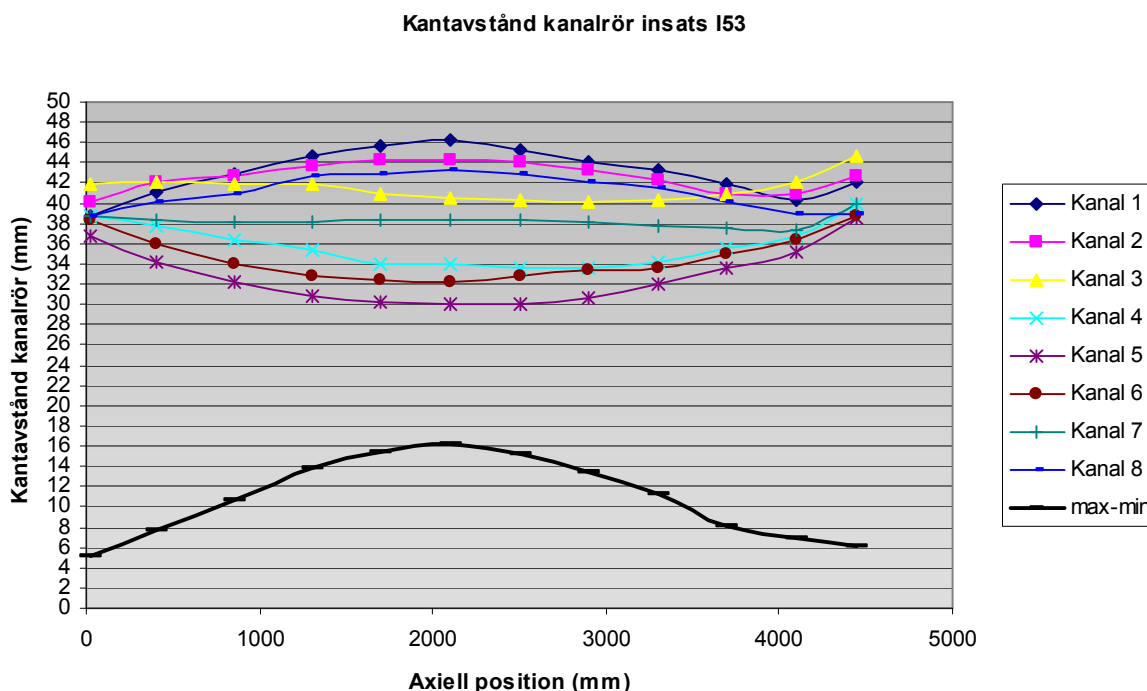
7.3.1 Normalavsökning

Normalavsökningen har gjorts på samtliga tillgängliga insatser och hittills har resultaten från 17 av dessa utvärderats (I49-I57, I59-I62, I64 och IP7-IP9), vilket ger en utvärderad yta av över 200 m². Generellt kan noteras att provningen fungerar väl i praktiken med repeterbara resultat (referensobjektet avsågs såväl före som efter varje provning). Utvärderingen har resulterat i något tiotal indikationer på defekter som uppskattas vara i storleksordningen tio millimeter. Dessa indikationer kan antas ha en oregelbunden form då de ger upphov till relativt låg signalstyrka i förhållande till dess utbredning. För att verifiera defekternas storlek och form kommer områden där indikationer påträffats att undersökas metallografiskt.

Uppmätning av insatsernas variation av kantavstånd har visat sig fungera väl utifrån insamlad data vid normalavsökning. Resultaten, som visar på en relativt stor spridning med totala skillnader inom respektive insats från sex till 16 mm, se Figur 7-1 och Figur 7-2, användes för att identifiera orsaken till uppkomsten av böjda kanalrör, och därmed eliminerat denna effekt vid senare tillverkningar. För att få en uppskattning över metodens noggrannhet kapades fem insatser på två positioner. I dessa positioner samt i toppen av insatserna uppmättes avståndet med skjutmått vilket visade på att metoden har en noggrannhet på bättre än en millimeter. Det som till viss del försvårar utvärderingen är att bindningen mellan kanalrören och segjärnet varierar, vilket resulterar i att signalen i vissa fall kan komma från insidan av kanalrören och kantavståndet då behöver justeras med kanalrörens tjocklek.



Figur 7-1. Uppmätt kantavstånd i BWR-insats I55. De färgade linjerna visar på avståndet för respektive kanalrör, medan den svarta linjen visar på den maximala skillnaden i avstånd längs insatsens längd.



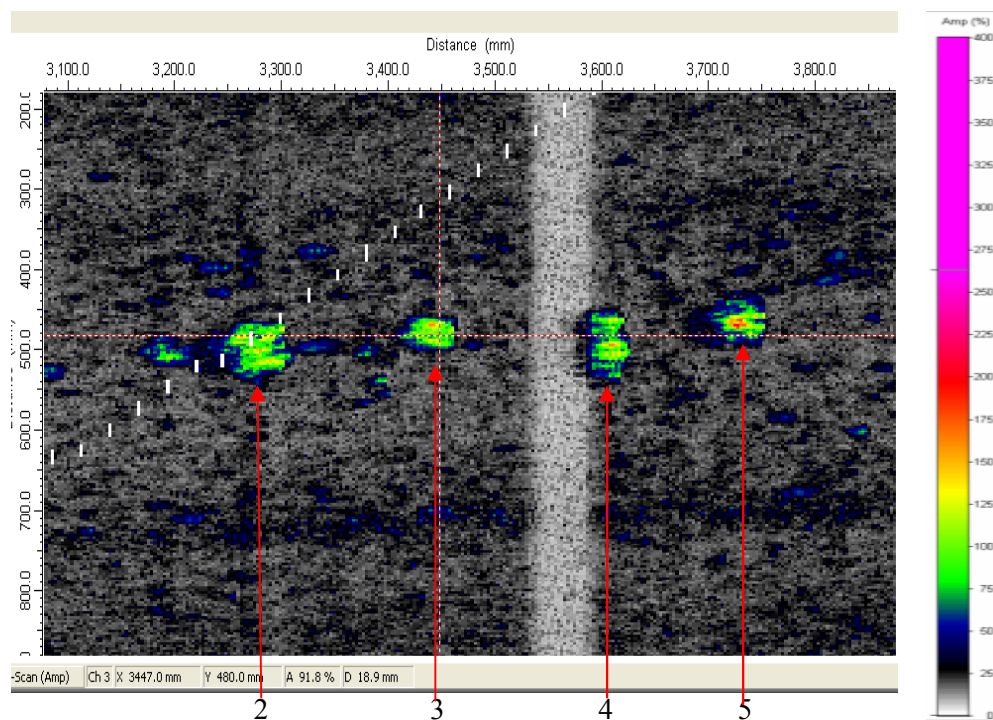
Figur 7-2. Uppmätt kantavstånd i BWR-insats I53. De färgade linjerna visar på avståndet för respektive kanalrör, medan den svarta linjen visar på den maximala skillnaden i avstånd längs insatsens längd.

7.3.2 Vinkelavsökning

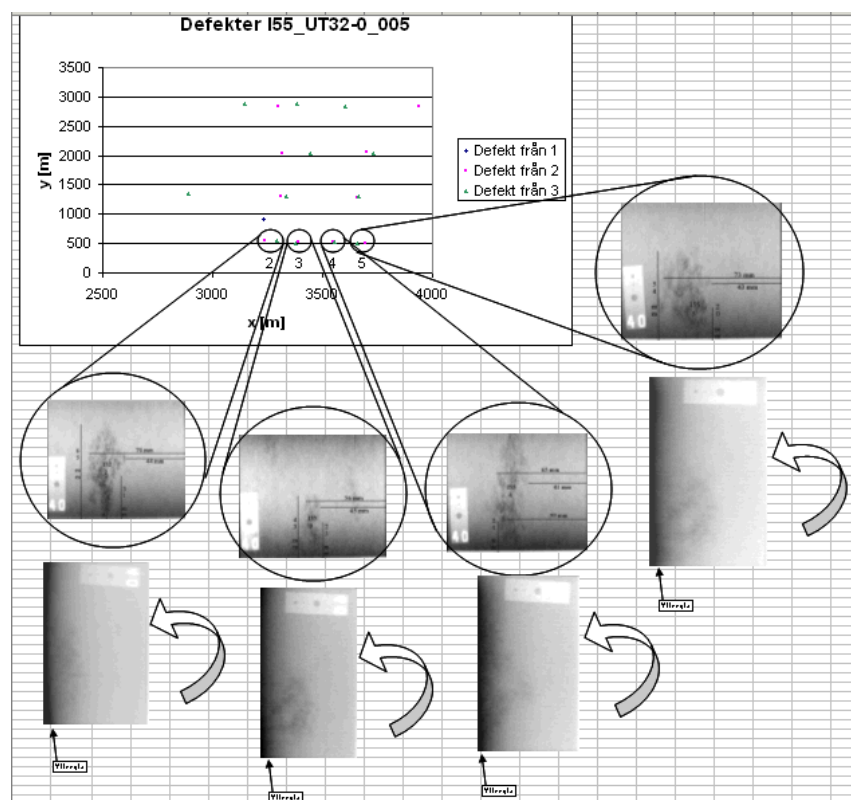
Vinkelavsökningen har gjorts på 14 insatser och hittills har resultaten från sex av dessa utvärderats (I53-I57 och I59), vilket ger en utvärderad yta av 60 m². Generellt kan noteras att provningen fungerar väl i praktiken med repeterbara resultat (referensobjektet avsöks såväl före som efter varje provning) men att den är tidskrävande som följd av begränsning i maximal rotationshastighet.

Utvärdering av dessa provningar försvåras eftersom det krävs en hel del manuella justeringar som följd av begränsningar i mjukvaran. Dessutom innebär insatsens geometri med integrerade kanalrör i kombination med att både longitudinella och transversella vågor en utmaning vid större djup än 25 mm. Ned till detta djup har dock tekniken visat sig fungera bra och indikerat på ett relativt stort antal defekter i provade insatser. Dessa indikationer med en utbredning på någon centimeter i axiell och radiell ledd samt några centimeter i tangentiell ledd har relativt låg signalstyrka.

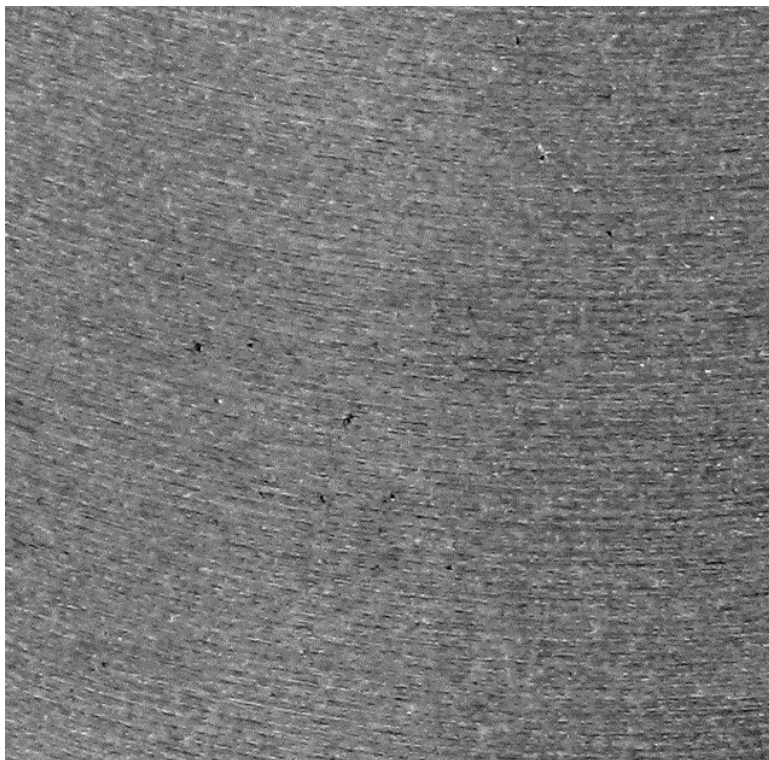
För att vidare undersöka detta kapades några indikerade områden, se Figur 7-3, som sedan först undersöktes med röntgen i flera riktningar, se Figur 7-4, innan de slutligen bearbetades ner under visuell övervakning med kamera. Resultaten visade på mindre ansamlingar av porer på med en storlek av upp till några tiondels millimeter, se Figur 7-5. Sammantaget visade de metallografiska undersökningarna på en porositet på cirka en promille inom en volym på maximalt 100 cm³, se Figur 7-6.



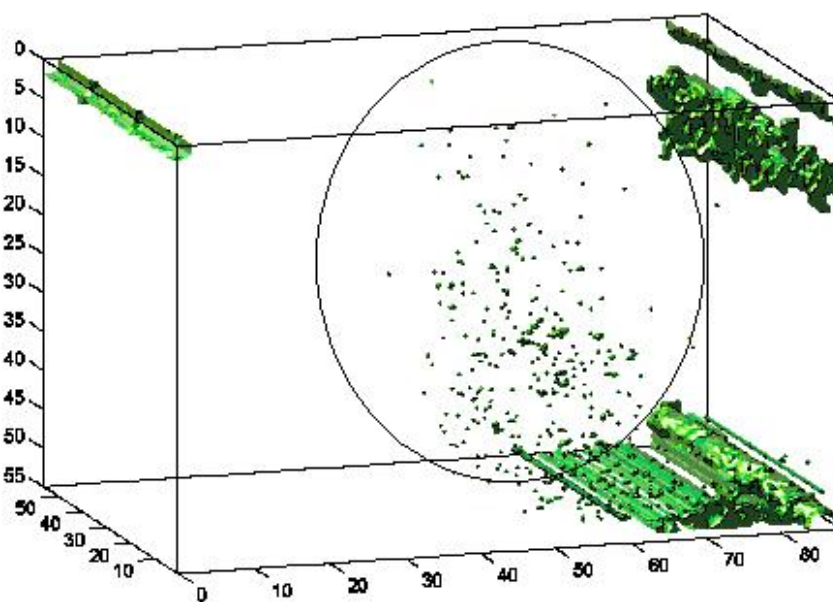
Figur 7-3. Ultraljudresultat (c-scan) från vinkelavsökning av segment av segjärnsinsats (pilarna pekar på fyra indikationer).



Figur 7-4. Röntgenresultat av utkapse bitar från indikation 2-5 i figur 7-3.



Figur 7-5. Foto av bearbetade porer i ett tvärsnitt på tre centimeter.



Figur 7-6. Distribution av porer i ett av de undersökta områdena (inringat område).

7.3.3 Transmissionsprovning

Transmissionsprovningen är den teknik för provning av insatsen som är minst utprovad. Den största bristen är att nuvarande fixtur för arrayerna inte är tillräckligt stabil. Dessutom har det visat sig att provningstekniken är känslig för om kanalrören i insatsens är böjda eftersom ljudet då inte kan passera rakt mellan kanalrören.

7.4 Kopparrör

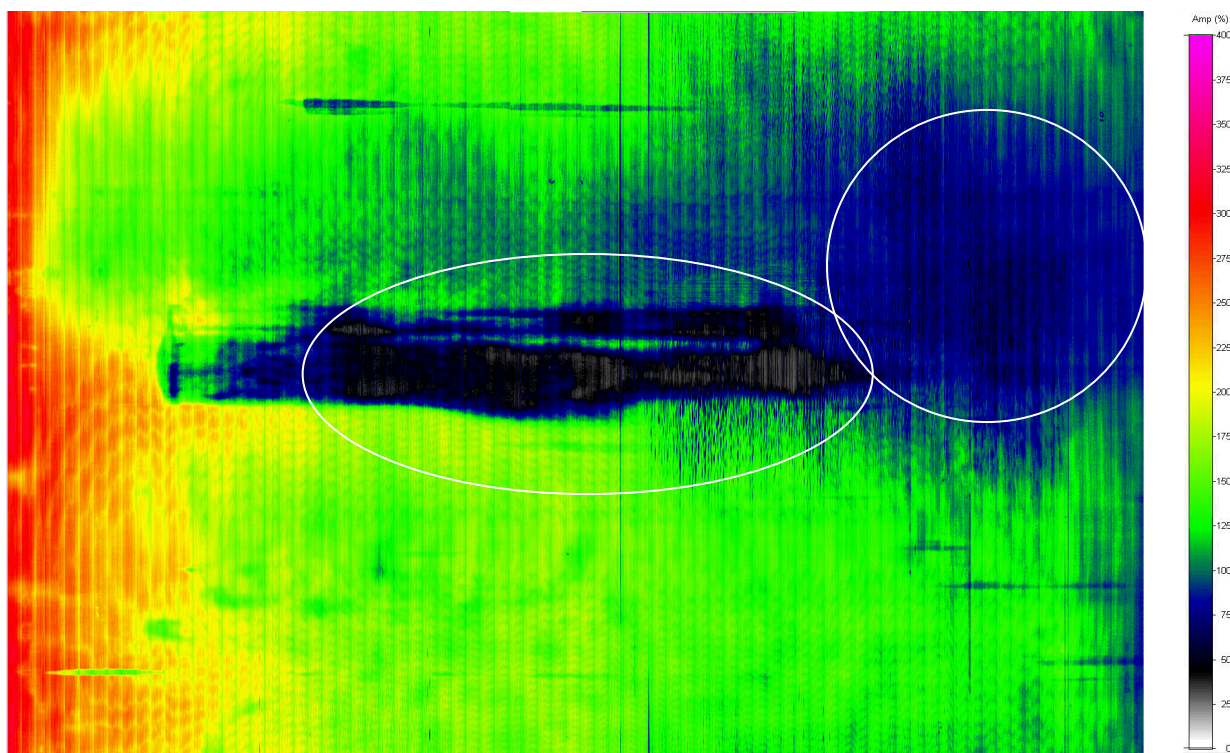
Hittills har åtta kopparrör kontrollerats med oförstörande provning.

7.4.1 Normalavsökning

Normalavsökningen görs löpande på tillgängliga kopparrör. Hittills har åtta rör (T45-T48, T53 och T56-T58) utvärderats fullt ut med avseende på defektförekomst och ljuddämpning. Generellt kan noteras att provningen fungerar väl i praktiken med repeterbara resultat (referensobjektet avsöks såväl före som efter varje provning).

Resultaten från provningarna visar på jämn dämpning mellan olika extruderade rör men att det lokalt kan förekomma stråk där dämpningen är betydligt högre, se Figur 7-7. För att undersöka ett av dessa stråk kapades en provring ut som undersöktes metallografiskt i områden där såväl hög som låg dämpning indikerats. Resultaten av dessa undersökningar, se Figur 7-8, visar att området med hög dämpning har större medelkornstorlek och betydligt större maximal kornstorlek. Det bör dock noteras att medelkornstorleken inte överstiger det preliminära tillverkningskravet på 360 μm . Detta krav kan dock komma att revideras om det visar sig att det medför betydande begränsningar för tillförlitligheten vid ultraljudprovningen

Vid utvärdering av data med avseende på defekter har inga inre fel indikerats. Hittills har, förutom en ytbrytande och visuellt synlig defekt, endast ytbrytande skador som uppkommit vid bearbetning och hantering indikerats. Den ytbrytande defekten har ett djup på 3 mm och avlägsnas därmed vid färdigbearbetning.



Figur 7-7. Ultraljud c-scan av botteneko amplitud av rör T47. Horisontell ledd representerar rørets längd av ~5 meter medan bildens vertikala ledd representerar rørets omkrets. Det inringade området till vänster visar ett stråk med högre dämpning (15 dB lägre botteneko amplitud) medan det högra inringade området är en effekt av att røret är dåligt bearbetad på insidan.



Figur 7-8. Etsade områden från rör T47. Till vänster visas ett område med låg ljuddämpning som har en medelkornstorlek på $60\ \mu\text{m}$ (största korn $170\ \mu\text{m}$) medan till det höger visas ett område med hög ljuddämpning och en medelkornstorlek $172\ \mu\text{m}$ (största korn $1\ 070\ \mu\text{m}$).

7.4.2 Vinkelavsökning

Vinkelavsökningen är i driftsättningsfasen och har därmed inte utprovats.

7.5 Kopparlock och –botten

Hittills har ett tjugotal kopparlock varit tillgängliga för oförstörande provning.

7.5.1 Lockets inre del

Provning av lockets inre del har gjorts på samtliga tillgängliga kopparlock. Hittills har hälften av dessa lock utvärderats fullt ut med avseende på defektförekomst (TX207-TX216) medan samtliga lock har utvärderats med avseende på ljuddämpning (TX180-TX188, TX191 och TX207-TX216). Generellt kan noteras att provningen fungerar väl i praktiken med repeterbara resultat (referensobjektet avsöks såväl före som efter varje provning). Vid utvärderingen har inga tydliga defektindikationer påträffats. Däremot har utvärdering av lockens materialstruktur med hjälp av ultraljud använts som en del i försöksplanen för utveckling av smidesteknik /SKBdoc 1175208/.

7.5.2 Lockets yttre del

Fullständig provning, avseende defektförekomst och ljuddämpning, av lockets yttre del har gjorts på tio kopparlock (TX207-TX216) medan ytterligare tio lock endast provats och utvärderats med avseende på ljuddämpning (TX180-TX188 och TX191). Generellt kan noteras att provningen fungerar väl i praktiken med repeterbara resultat (referensobjektet avsöks såväl före som efter varje provning). Resultat från dessa provningar har endast påvisat en ytlig defekt på undersidan av ett lock. Denna indikation har efter kompletterande undersökningar med induktiv provning och förstörande prov bedömts vara ett smidesveck med en utbredning i omkretsledd av ~ 120 grader och med ett maximalt djup ner till åtta mm. Dessutom har utvärdering av lockens materialstruktur med hjälp av ultraljud använts som en del i försöksplanen för utveckling av smidesteknik /SKBdoc 1175208/. En allmän kommentar är också att provningen i dagsläget är tidskrävande men att detta går att lösa genom att provningstekniken optimeras.

7.6 Botten- och förslutningssvets

Vid Kapsellaboratoriet har mer än 60 FSW-svetsar (FSW5-FSW56 och FSW58-FSW69), varav flertalet både före och efter bearbetning, inspekterats med såväl ultraljud som radiografering.

Som en följd av att demonstrationsserier /SKBdoc 1175236/ bestående av 20 fullvarvsvetsar och 20 kortare svetssekvenser har genomförts har OFP-processernas kapacitet testats. Undersökningen av dessa svetsar har resulterat i att cirka 50 ultraljudprovningar och 30 röntgenundersökningar har utförts under en period av två 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 defekter som kan förekomma i svetsarna.

Eftersom den så kallade foglinjebøjningen är den normalt förekommande defekttypen vid FSW anses ultraljudprovning som primär teknik för kontroll av svetsen. I dagsläget används dock en ny verktygsutformning vid svetsning /SKBdoc 1175162/ för vilken den nedre temperaturgränsen för processfönstret, dvs när maskhål kan produceras, inte är fastställd. Därför undersöks även svetsarna med radiografering som följd av den högre detekteringsförmågan för denna feltyp. För närvarande utvärderas även alternativa tekniker som eventuellt kan ersätta radiografering som referensmetod.

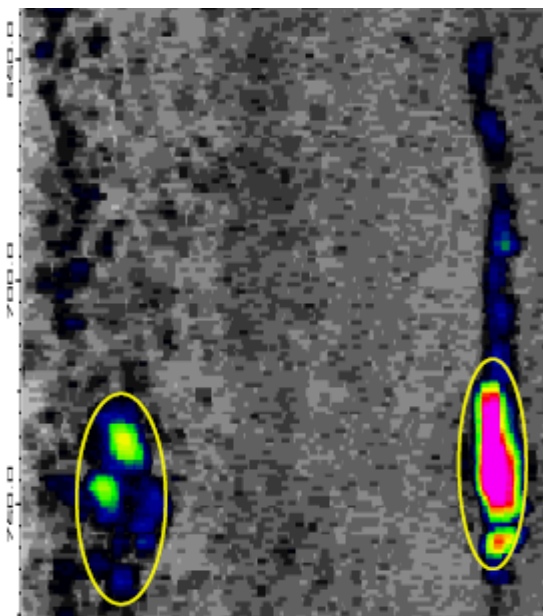
7.6.1 Ultraljudprovning

Ultraljudprovningen har visat sig fungera väl som ett hjälpmedel i utvecklingen av svetsprocessen. Tekniken fungerar mycket väl för att detektera den så kallade foglinjebøjningen, se Figur 7-9, som var den enda indikerade feltypen i demonstrationsserierna /SKBdoc 1175236/. Ultraljudprovningen har även detekterat de så kallade maskhålen som har uppkommit vid provsvetsningar då modifierade svetsparametrar eller modifierade svetsverktyg använts.

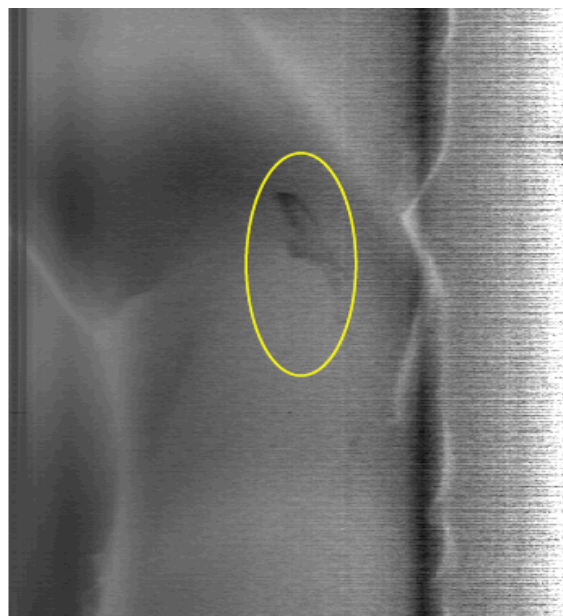
7.6.2 Radiografering

Radiografering har varit ett viktigt hjälpmedel vid utvärdering av de provsvetsningar som utförts. En allmän kommentar är att kapselns centrering är kritisk för röntgenbildernas kvalitet och för lägesbestämning av defekter i kapselns radiella ledd.

För FSW fungerade röntgenmetodikerna 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 volumetriska defekter medan dessa på senare tid endast har indikerats i undantagsfall. Liksom ultraljud har även radiograferingen detekterat de så kallade maskhålen (se Figur 7-10) som har uppkommit vid provsvetsningar då modifierade svetsparametrar eller modifierade svetsverktyg använts.



Figur 7-9. Ultraljud c-scan av maskhål (t.v.) och foglinjeböjning (t.h.). Bilden visar svetsens djup i horisontell ledd och 150 mm av svetsens längd i vertikal ledd.



Figur 7-10. Röntgenbild av maskhål. Bilden visar svetsens djup i horisontell ledd och 150 mm av svetsens längd i vertikal ledd.

8 Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/Publikationer.

Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublicerade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se

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

SKB, 2006a. Kapsel för använt kärnbränsle – Oförstörande provning av kapselkomponenter. SKB R-06-05, Svensk Kärnbränslehantering AB

SKB, 2006b. Kapsel för använt kärnbränsle – Oförstörande provning av svetsar. SKB R-06-06, Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Standards Institute, 2003. Svetsning och besläktade förfaranden – Klassificering av defekter och formavvikelser i metalliska material – Del 2: Trycksvetsning, SS-EN ISO 6520-2

US Department of defense, 1999. Nondestructive evaluation system. Reliability assessment, Handbook. MIL-HDBK-1823

Opublicerade dokument

SKBdoc id version	Titel	Utfärdare, år
1077122 ver 1.0	Strålskärmsberäkningar för kopparkapslar innehållande BWR, MOX och PWR bränsleelement, ALARA Engineering Rapport 07-0014-Rev 1-Final 091119	SKB, 2010
1175162 ver 4.0	Svetsning vid tillverkning och förslutning	SKB, 2008
1175208 ver 5.0	Tillverkning av kapselkomponenter	SKB, 2008
1175235 ver 3.0	NDT Reliability	SKB, 2006
1175236 ver 2.0	Reliability in friction stir welding	SKB, 2008
1180131 ver 1.0	NDT Reliability – Data report copper	SKB, 2008
1180132 ver 1.0	NDT Reliability – Data report insert	SKB, 2008

Bilaga

Förkortningar

OFP	Oförstörande provning
PWR	Pressure wessel reactor
BWR	Boiling wessel reactor
TRL	Transmitter receiver longitudinal
POD	Probability of detection
UT	Ultrasonic testing
RT	Radiographic testing
BAM	Bundesanstalt für Material forschung und –prüfung
EBW	Electron beam welding
FSW	Friction stir welding
a	Defektstorlek
â	Signalstorlek
FBH	Flatbottenhål
SDH	Sidoborrat hål