

Rapport  
**R-18-11**  
April 2019



# Statistisk värdering av kopparkomponenternas geometriska kvalitet

**Mikael Jonsson**  
**Jan Sarnet**  
**Lars Holst**

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL  
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna  
Phone +46 8 459 84 00  
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING



ISSN 1402-3091

**SKB R-18-11**

ID 1626592

April 2019

## **Statistisk värdering av kopparkomponenternas geometriska kvalitet**

Mikael Jonsson, Jan Sarnet, Lars Holst  
Svensk Kärnbränslehantering AB

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

© 2019 Svensk Kärnbränslehantering AB



# Sammanfattning

Denna rapport har tagits fram med syftet att utvärdera kopparkomponenters geometriska kvalitet.

Studien avgränsas till att omfatta korrosionsbarriären i dornpressade kopparrör och smidda kopparlock. Underlaget är begränsat till 35 lock och 9 dornpressade rör som mätts med mikrometer. Dessutom har tre av rörens tjocklek mätts indirekt med ultraljudprovning.

Väggjockleken varierar mer mellan olika dornpressade rör än inom ett och samma rör. De föreslagna toleranserna på befintliga SKB:s och Posivas ritningar bedöms vara möjliga att uppfylla med avseende på korrosionsbarriärsfunktion. Detta gäller både för lock och dornpressade rör. Det finns möjlighet att justera väggjockleken i de dornpressade rören eftersom den i allmänhet är för tjock i förhållande till den nedre toleransgränsen. Jämförelse mellan mätning med mikrometer och ultraljud visar att mätosäkerheten med ultraljudprovning är låg, men att kalibrering är nödvändig.

Osäkerhet finns på grund av det begränsade dataunderlaget.

## Summary

This report has been put together with the purpose of evaluating the geometric quality of copper components.

The scope of the study is the corrosion barrier thickness of copper tubes and lids manufactured by piercing and drawing and forging respectively. The basic data is limited to 35 lids and 9 tubes measured with micrometer caliper. In addition, the thickness of three of the tubes has also been measured with ultrasonic testing.

The wall thickness varies more between tubes than within one and the same tube. The proposed tolerances on existing SKB's and Posiva's drawings are judged to be possible to comply with in regard to corrosion barrier function. This applies both to lid and tubes. There is a possibility of adjusting the wall thickness or tolerance since the tubes are generally too thick in regards to the lower tolerance limit. Comparisons between measurements with caliper and ultrasonic testing show that measurement variations are low, but that calibration is needed.

Uncertainty exists due to the incomplete basic data.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	7
1.1	Bakgrund	7
<b>2</b>	<b>Analys av 35 smidda kopparlock</b>	9
2.1	Dataunderlag	9
2.2	Analyser av data	10
2.3	Slutsatser om kopparlockstjocklek	11
<b>3</b>	<b>Analys av 9 dornpressade kopparrörs väggstjocklek baserat på mikrometermätningar</b>	13
3.1	Dataunderlag	13
3.2	Analyser av data	14
3.3	Slutsatser om 9 kopparrörs tjocklek mätt med mikrometer	16
<b>4</b>	<b>Analys av 3 dornpressade kopparrörs väggstjocklek baserat på ultraljudsmätningar</b>	17
4.1	Dataunderlag	17
4.2	Analyser av data	18
4.2.1	Rör T81	18
4.2.2	Rör T82	20
4.2.3	Rör T83	20
4.2.4	Jämförelse mellan tjockleksmätning med ultraljud och mikrometer	21
4.3	Slutsatser om 3 kopparrörs tjocklek mätt med ultraljud	22
<b>5</b>	<b>Sammanfattande slutsatser</b>	23
	<b>Referenser</b>	25





# 1 Inledning

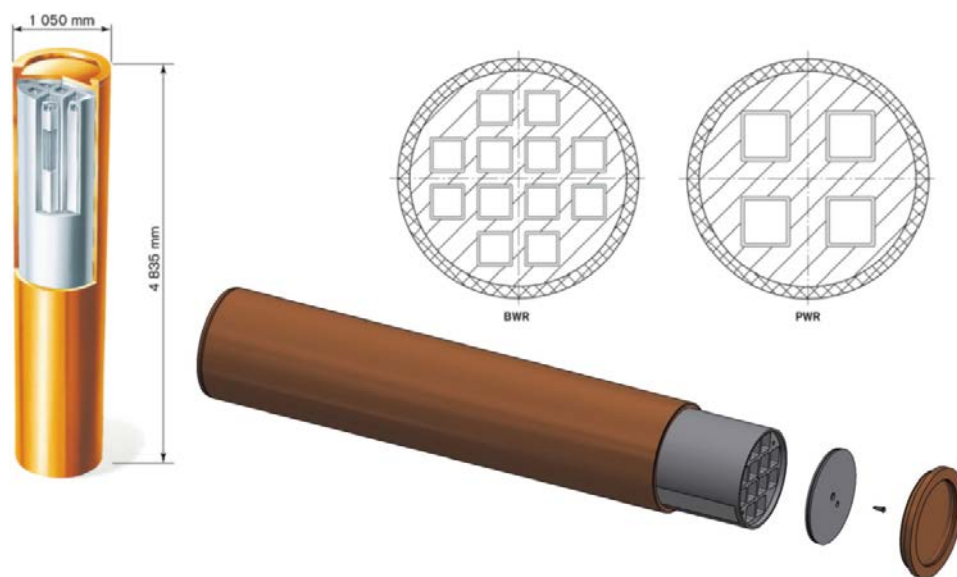
## 1.1 Bakgrund

Kapseln är en av de tekniska barriärerna i KBS-3 förvaret för slutförvaring av använt kärnbränsle i Sverige och Finland. Kapseln är cylindrisk och utgörs av en behållare med ett tätt hölje av koppar, som är motståndskraftigt mot korrosion, och en lastbärande insats av segjärn i vilken använt kärnbränsle placeras för deponering i förvaret, se figur 1-1. Kapseln ska innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radionuklider till omgivningen. Kapseln ska också skydda och bevara barriärsystemets funktioner och vara utformad så att kriticitet inte kan uppstå i det inkapslade använda kärnbränslet.

Segjärnsinsatsen finns i två utformningar för det svenska kärnbränslet, en insats med tolv stycken kanlrör avsedd för Boiling Water Reactor (BWR)-bränsleknippen och en insats med fyra stycken kanlrör avsedd för Pressurized Water Reactor (PWR)-bränsleknippen. Kapseln monteras ihop av följande komponenter: segjärnsinsats med kanlrörskassetten av stål, stållock, kopparrör, kopparlock och kopparbotten.

Nedan visas överskådligt kapselns utformning, vilken har fastlagts baserat på den iterativa process av utvärdering och återkoppling mellan bland annat genomförda analyser av strålsäkerheten efter förslutning och den provtillverkning av kapslar som bedrivits under lång tid av SKB och Posiva som är SKB:s finska motsvarighet. Kapseln beskrivs av en uppsättning av designparametrar med givna nominella värden och tillåtna toleranser, vilket benämns referensutformning. När kapseln slutligt har deponerats i deponeringshålet i Kärnbränsleförvaret ska den överensstämma med denna referensutformning.

Tillverkning av kopparkomponenter till KBS-3 kapseln genomförs genom extrusion eller dornpressning av kopparrör som är varma processer samt varmsmidning av kopparlock. Efter varmföringen maskinbearbetas de färdiga komponenterna fram ur de varmförade arbetsstyckena till mått som anges på komponentritningar. Dessa ritningsmått anges med generella eller specifika toleranser. Under årens lopp har SKB och Posiva tillverkat ett antal kopparrör och ett antal kopparlock för att få erfarenheter. De ritningsmått som använts vid tillverkningen har varit preliminära men har använts för att göra en utvärdering i den här rapporten.



**Figur 1-1.** Till vänster: Skiss av KBS-3-kapseln. Överst: tvärsnitt av kapslar, BWR-insats respektive PWR-insats. Underst: Sprängskiss av kapseln och dess ingående delar. Från vänster: kopparröret med botten, insats av segjärn, stållock för insatsen, en M30-skruv för stållocket och slutligen ett kopparlock.

I figur 1-2 visas översiktligt hur kopparlock framställs, från cylindriskt göt till smitt lockämne och därefter till ett maskinbearbetat lock.

I figur 1-3 visas ett dornpressat kopparrör som maskinbearbetas invändigt, dess längd är cirka 5 meter och diametern ca 1 meter, figuren visar också schematiskt hur ringar sågats loss från röret efter avslutad maskinbearbetning.

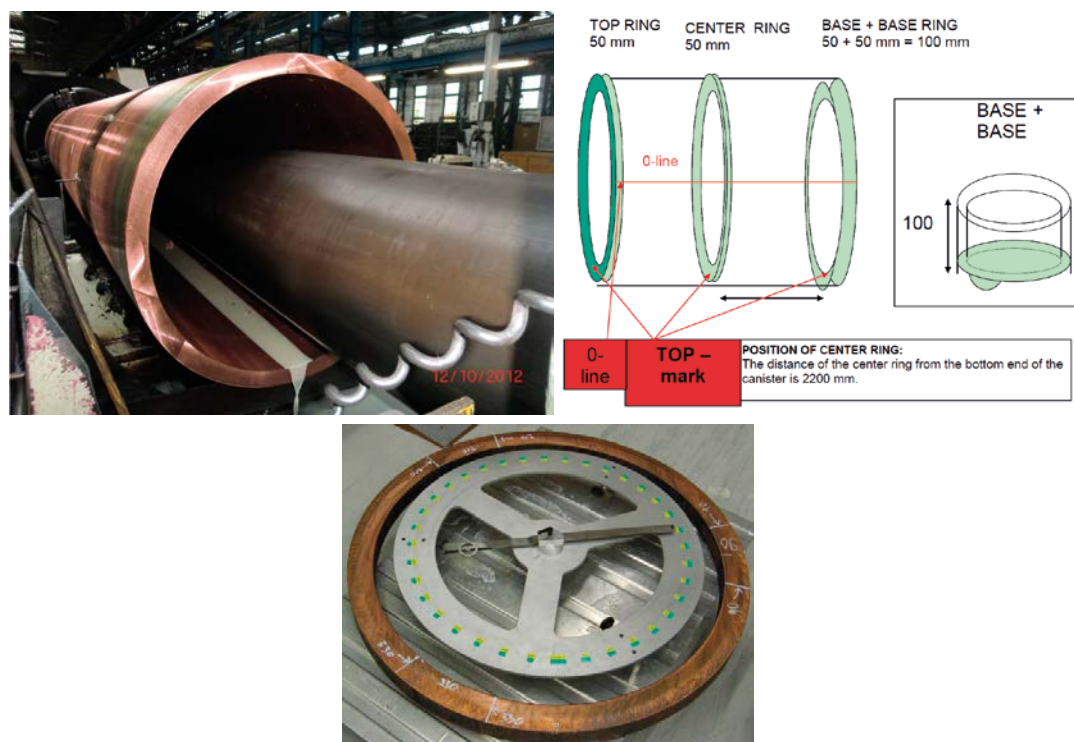
Rapporten har tagits fram med syftet att statistiskt värdera kopparkomponenters geometriska kvalitet samt att uppskatta dugligheten på maskinbearbetningsprocesserna svarvning av rör och fräsning av lock. Ytterligare ett syfte med rapporten är att värdera alternativa geometriska toleranser som ännu inte använts vid tillverkning. Avgränsningen för rapporten är den cylindriska väggjockleken i dornpressade rör och skivan på locket som utgör korrosionsbarriär i den färdiga kapseln enligt SKB:s och Posivas ritningar:

Kopparlock, SKB:s ritning: Copper lid IDE-00015-31 rev D

Kopparrör, Posivas ritning: OL1-2 Copper overpack 271101 rev A



**Figur 1-2.** Bilden till vänster visar ett smidesämne färdig för smidning till ett lockämne, i mitten visas ett smitt lockämne. Bilden till höger visar ett maskinbearbetat lock.



**Figur 1-3.** Bilden till vänster visar maskinbearbetning av ett dornpressat kopparrör. Bilden till höger visar schematiskt hur ringar sågats loss från det dornpressade röret för undersökning av bland annat väggjocklek efter maskinbearbetning. Den undre bilden visar en kopparring som sågats loss från resten av röret.

## 2 Analys av 35 smidda kopparlock

### 2.1 Dataunderlag

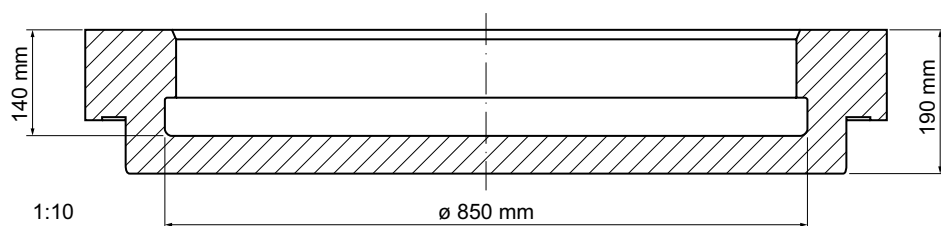
Underlaget till utredningen har tagits ifrån måttprotokoll som skapats då kopparlocken maskinbearbetats till att överensstämma med ritning Copper lid IDE-00015-31 rev D, se figur 2-1.

Mittendelen av locket kallas för skiva och har diametern  $\varnothing$  850 mm. Skivan är en del av kopparhöljet som kommer att utgöra kapselns korrosionsbarriär i slutförvaret.

Som framgår är inte skivans tjocklek explicit angiven på ritningen men tjockleken kan räknas ut genom att ta skillnaden mellan höjderna 190 mm och 140 mm. Dessa höjder har ingen angiven tolerans på ritningen annat än den generella toleransen enligt SS-ISO 2768-1:1990, vilket innebär att toleransen i praktiken är  $190 \pm 0,5$  mm, respektive  $140 \pm 0,5$  mm. Således ges skivans tjocklek av skivtjocklek =  $190 \pm 0,5 - 140 \pm 0,5 = 50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

I rapporten om kapseln (SKB 2010) angavs olika tolerans på skivans tjocklek beroende på om det var skivan i ett lock eller skivan i en svetsad kopparbotten. För locket angavs  $50 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$ . För den svetsade botten angavs  $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Det betyder att tillverkningsritningen för kopparlock Copper lid IDE-00015-31 rev D inte helt stämmer överens med SKB:s ansökan med avseende på tillåten tolerans för skivans tjocklek. För den svetsade botten är dock toleransen  $\pm 1 \text{ mm}$ .

Antalet tillverkade kopparlock är cirka 100. Dock finns det endast 35 måttprotokoll tillgängliga. Från dessa har skivans tjocklek utvärderats och sammanställts i tabell 2-1. Normalt anges måtten 140 mm respektive 190 mm med tre decimalers noggrannhet i måttprotokollen. Detta har därför använts då skivtjockleken redovisats. Locken är maskinbearbetade under åren 2007–2018.



**Figur 2-1.** Ritningen på kopparlock, Copper lid IDE-00015-31 rev D.

**Tabell 2-1. Skivans tjocklek, datumet anger när maskinbearbetningen avslutades.**

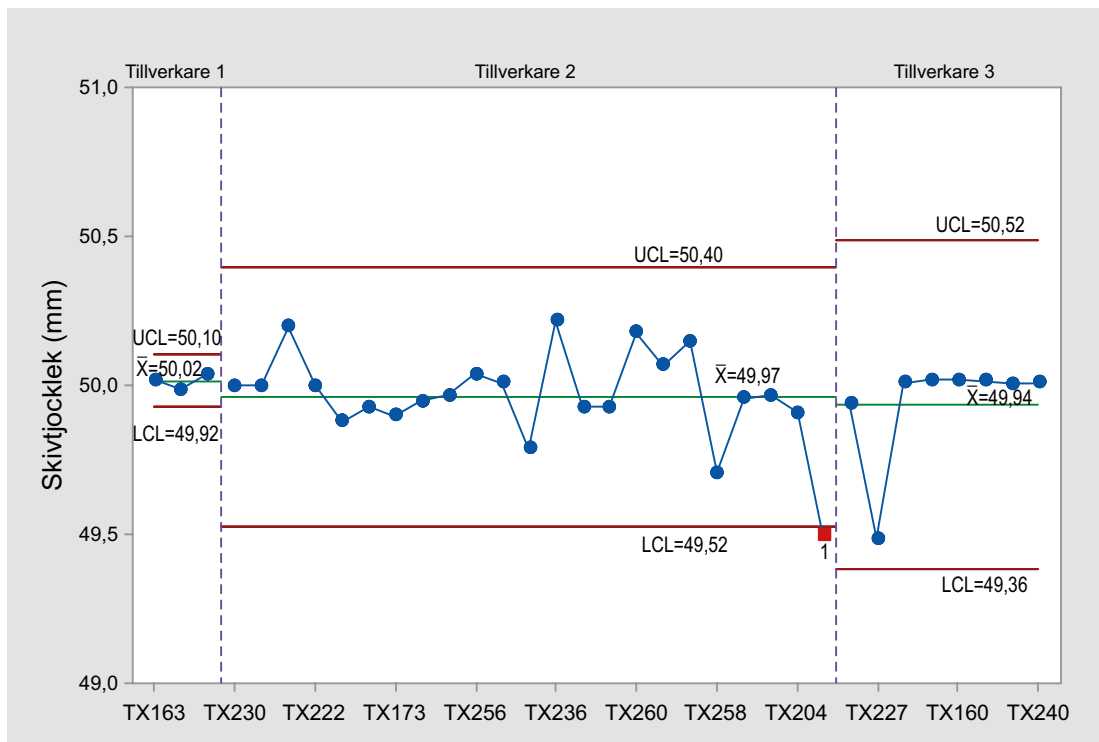
Datum	Tillverkare	Lock	Tjocklek	Kommentar
2007-02-12	1	TX163	50,02	
2007-02-12	1	TX164	49,99	
2007-02-12	1	TX165	50,04	
2011-04-13	2	TX230	50,00	
2011-05-05	2	TX226	50,00	
2011-05-24	2	TX229	50,20	
2012-02-21	2	TX222	50,00	
2012-03-03	2	TX171	49,88	
2012-03-07	2	TX186	49,93	
2012-03-29	3	TX223	49,94	
2012-03-29	3	TX227	49,49	
2012-04-10	3	TX182	50,01	
2012-07-12	3	TX159	50,02	
2012-07-12	3	TX160	50,02	
2012-07-12	3	TX188	50,02	
2012-10-30	2	TX173	49,90	
2013-01-02	2	TX237	49,95	
2013-01-07	2	TX239	49,97	
2013-03-13	3	TX238	50,01	
2013-03-13	3	TX240	50,01	
2013-04-04	2	TX256	50,04	
2013-06-20	2	TX241	50,01	
2013-07-25	2	TX235	49,79	
2015-12-22	2	TX236	50,22	
2016-01-19	2	TX201	49,93	
2016-01-25	2	TX178	49,93	
2018-05-09	2	TX260	50,18	
2018-05-18	2	TX257	50,07	
2018-05-22	2	TX259	50,15	
2018-06-04	2	TX258	49,71	
2018-09-10	2	TX206	49,96	
2018-09-11	2	TX205	49,97	
2018-09-12	2	TX204	49,91	
2018-09-14	2	TX202	49,50	Flänsens höjd är avsiktligt på min-tolerans 189,5 mm för att få renbearbetning, flänshöjden används för att räkna ut skivtjockleken

## 2.2 Analyser av data

Nedanstående figur 2-2 illustrerar lockens tjocklek sorterat på de tre olika tillverkarna och därefter i kronologisk tidsföljd. De 35 lockens skivtjocklek är i medeltal 49,96 mm och med standardavvikelsen 0,156 mm totalt sett. Tillverkningsprocessens övre respektive undre styrgräns definieras som medelvärdet  $\pm 3$  standardavvikelser för respektive tillverkare.

Det framgår ur figur 2-2 med en röd markering och siffran "1" att locket TX202 tillverkat 2018 ligger mer än tre standardavvikelser från medelvärdet. Detta lock kan identifieras som en "outlier". Flänsens höjd tillverkades avsiktligt till min-tolerans 189,5 mm för att få locket renbearbetat så väl som möjligt, skålens djup 140 mm behölls varpå skivtjockleken blev tunnare än vanligt.

Totalt har cirka 100 lock tillverkats från 2003–2018. Dokumentationen finns endast för ovanstående 35 lock. Det är osäkert hur representativa de 35 är för alla tillverkade lock och därmed hur väl toleransen 50 mm  $\pm 1$  mm är uppfylld.



**Figur 2-2.** Diagram för skivtjocklek i tabell 2-1. Sorteringen är per tillverkare och därefter i tidsföljd då locken maskinbearbetats. UCL anger processens övre styrgräns, LCL anger processens undre styrgräns hos respektive tillverkare.

### 2.3 Slutsatser om kopparlockstjocklek

Med hänsyn till ovanstående avvikande värde och oklarhet om representativitet är det vanskligt att uttala sig om locktillverkningsprocessens duglighet, även om alla 35 uppmätta lock ligger väl inom toleransgränserna.



### 3 Analys av 9 dornpressade kopparrörs väggjocklek baserat på mikrometermätningar

#### 3.1 Dataunderlag

Underlaget till utredningen har tagits ifrån måttprotokoll som upprättats då dornpressade kopparrör maskinbearbetats till att överensstämna med ritning OL1-2 Copper overpack 271101 rev A. Rören är tillverkade under åren 2012–2018, maskinbearbetningen har utvecklats internt hos leverantören under årens lopp.

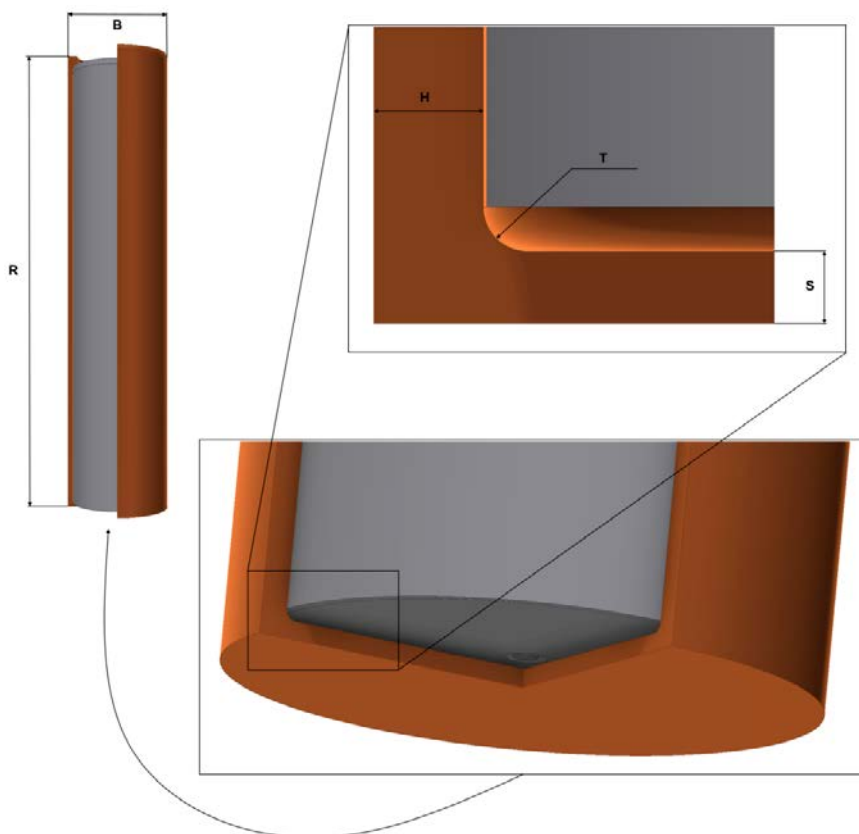
Korrosionsbarriären ges av differensen mellan rörets ytterdiameter  $1050 \pm 0,5$  mm och dess innerdiameter  $952 \pm 0,5$  mm. Nominell väggjocklek med beteckning H i figur 3-1 är således 49 mm, väggjockleken kommer dock att påverkas av excentricitet, det vill säga av att innerdiametern och ytterdiametern inte delar gemensam centrumlinje. Därför har ett tilläggskrav på minsta godtagbara väggjocklek = 48,15 mm införts. Således gäller att

$$\text{väggjocklek} = \text{nominellt } 49 \text{ mm, tolerans } 48,15 \text{ mm} - 50,35 \text{ mm} \quad (3-1)$$

Bakgrunden till att väggjockleken har en övre tolerans är att rörets ytterdiameter och innerdiameter är toleranssatta så att 50,35 mm är maximalt tillåten väggjocklek.

På grund av tillåten excentricitet kan väggjockleken högst vara 50,35 mm.

När ett rör ska användas till att slutförvara kärnbränsle kan väggjockleken mätas med ultraljud längs hela röret eller med mekaniska mätdon endast i toppen på röret där man kan komma åt med en mikrometer. Från provtillverkningen har 5 rör med beteckning ( $T_{xx}$ ) där  $xx$  är ett löpnummer sågats isär. Ett antal ringar har kapats loss från rörens topp ( $TR$ ), botten ( $BR$ ) och centrum ( $CR$ ) för mätning av väggjocklek i respektive ring, se figur 1-3 och nedanstående tabell 3-1.



**Figur 3-1.** Tvärsnitt av en kapsel tillverkad av ett dornpressat kopparrör med integrerad botten samt insats.

För de åtta tillverkade rören har varje ring mätts på tre punkter med 120° delning mellan varje punkt. Totalt finns mätdata från 45 mätpunkter som anges med två decimaler i mätprotokollet. Mätningarna är genomförd hos samma laboratorium, se Välimäki et al. (2012a, b) och Välimäki och Glas (2013a, b, c, 2014, 2017a, b, 2019).

**Tabell 3-1. Uppmätt vägg tjocklek (mm) i ringar från rören T79-T84, T88-T90.**

Rör, år	Bottenring			Centerring			Toppring		
T79, 2012	49,22	49,10	49,26	49,28	49,23	49,18	49,20	48,97	48,95
T80, 2012	49,39	49,19	49,32	49,18	49,25	49,50	49,00	49,23	49,32
T81, 2013	49,49	49,56	49,53	–	–	–	49,40	49,23	49,50
T82, 2013	–	–	–	–	–	–	49,17	49,48	49,30
T83, 2013	49,45	49,40	49,49	49,40	49,33	49,35	49,39	49,24	49,17
T84, 2014	–	–	–	–	–	–	49,17	49,32	49,20
T88, 2017	–	–	–	–	–	–	48,82	48,84	48,81
T89, 2017	–	–	–	–	–	–	49,02	49,00	49,04
T90, 2018	49,20	49,20	49,20	49,20	49,30	49,30	–	–	–

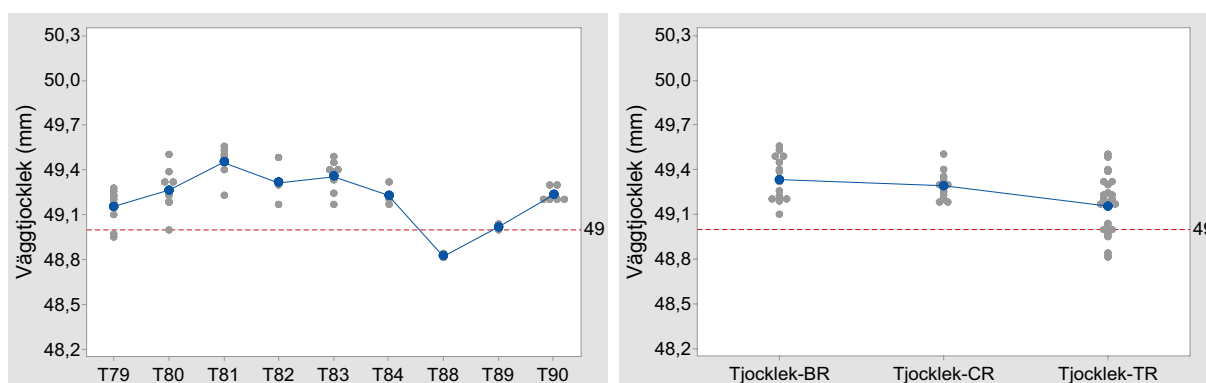
### 3.2 Analys av data

Till vänster i nedanstående figur 3-2 visas datapunkterna i tabell 3-1 för varje rör. Medelvärdet visas i figuren för varje rör och en heldragen linje som går från medelvärde till medelvärde. Till höger i figur 3-2 visar vägg tjockleken för toppringarna, centrumringarna och bottenringarna.

Som framgår av tabell 3-1 finns tjockleksmätningar på alla höjder för rören T79, T80, T83, på botten och toppen för röret T81, på botten och mitten för T90 och endast toppen för övriga 4 rör. Tabell 3-2 innehåller uppmätt vägg tjocklek för rören T79, T80, T81 och T83.

**Tabell 3-2. Uppmätt vägg tjocklek för rören T79, T80, T81 och T83.**

Rör	Bottenring (B)			Medel	STD	Centerring (C)			Medel	STD	Toppring (T)			Medel	STD	Medel T, C, B
T79	49,22	49,10	49,26	49,193	0,083	49,28	49,23	49,18	49,230	0,050	49,20	48,97	48,95	49,040	0,139	49,154
T80	49,39	49,19	49,32	49,300	0,101	49,18	49,25	49,50	49,310	0,168	49,00	49,23	49,32	49,183	0,165	49,264
T81	49,49	49,56	49,53	49,527	0,035						49,40	49,23	49,50	49,377	0,137	49,452
T83	49,45	49,40	49,49	49,447	0,045	49,40	49,33	49,35	49,360	0,036	49,39	49,24	49,17	49,267	0,112	49,358
<b>Medel</b>	<b>49,367</b>					<b>49,300</b>					<b>49,217</b>					<b>49,294</b>



**Figur 3-2.** Vänster bild: Mätningar och medelvärde för vägg tjockleken i tabell 3-1. Höger bild: Mätningar och medelvärde för vägg tjockleken för bottenringarna, centrumringarna och toppringarna. Den streckade linjen i figurerna visar nominella vägg tjockleken 49 mm.



Resultat av en tvåsidig variansanalys av mätresultaten för T79, T80, T81 och T83 ges i nedanstående tabell 3-3.

**Tabell 3-3 Variansschema för väggjockleksmätningarna.**

Faktor	Kvadrat-summa	Frihets-grader	Medelkvadrat-summa	F-kvot	p-värde	Kommentar
Rör	0,369	3	0,1230	10,37	0,000	(***) signifikant
Position	0,158	2	0,0789	6,66	0,005	(**) signifikant
Samspel	0,015	5	0,0031	0,26	0,931	inte signifikant
Rest	0,261	22	0,0119	–		$\sqrt{0,0119} = 0,11$
<b>Total</b>	<b>0,803</b>	<b>32</b>	<b>0,0251</b>			$\sqrt{0,0251} = 0,16$

Eftersom samspelseffekt saknas mellan rör och position blir tolkningen av analysen enkel. Skillnader mellan de fyra rören är statistiskt säkerställd (\*\*\*)-signifikans), likaså mellan de tre positionerna botten, centrum och toppen. Mätresultaten kan betraktas som summan av separata systematiska bidrag från rör och position samt en slumpmässig komponent. Ett 95 % konfidensintervall för den systematiska skillnaden mellan botten och toppen av rören ges därför av

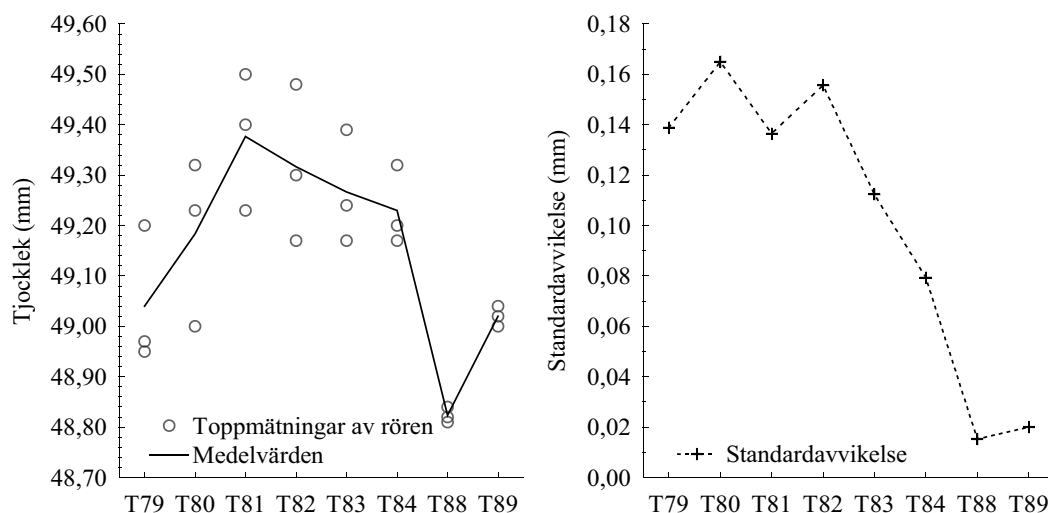
$$49,367 - 49,217 \pm 2,07 \cdot 0,11 \cdot \sqrt{(1/12 + 1/12)} = 0,15 \pm 0,09.$$

Här är faktorn 2,07 2,5 % -percentilen i t(22)-fördelningen. Standardavvikelsen 0,11 kommer ifrån resten i variansanalysens schemat i tabell 3-3. Den systematiska skillnaden är som synes någon tiondels millimeter mellan botten och toppen.

Ytterligare belysning av toppvärdena för åtta av de nio rören ges i tabell 3-4 och figur 3-3.

**Tabell 3-4. Medelvärden och standardavvikelser för tjockleksmätningar i toppen.**

Rör i	T79	T80	T81	T82	T83	T84	T88	T89
Medel $x_i$	49,040	49,183	49,377	49,317	49,267	49,230	48,823	49,020
STD $s_i$	0,139	0,165	0,137	0,156	0,112	0,079	0,015	0,020



**Figur 3-3. Tjockleksmätningar av rörens toppända.**

Som klart framgår av figur 3-3 ligger tjockleksmätningarna för rörens toppända väl inom toleransgränserna 48,15 mm och 50,35 mm.

Ur tabell 3-4 framgår att spridningarna har minskat för de senast tillverkade rören jämfört med de tidigare tillverkade. Detta kan statistiskt säkerställas på följande sätt. Bilda teststorheten

$$\frac{\text{minimum}(s_1^2, \dots, s_8^2)}{s_1^2 + \dots + s_8^2} = \frac{0,015^2}{0,139^2 + \dots + 0,020^2} = 0,002063.$$

Man kan visa, att sannolikheten att få ett sådant litet värde eller mindre om inga systematiska skillnader finns mellan standardavvikelseerna är cirka

$$1 - e^{-\frac{0,002063}{64}} = 0,00003.$$

Därmed gäller att det är statistiskt säkerställt (\*\*\*)-statistisk signifikans) att spridningarna inom rören är olika. Som framgår av tabellen 3-4 har en påtaglig minskning skett för de senast tillverkade rören standardavvikelser.

### 3.3 Slutsatser om 9 kopparrörs tjocklek mätt med mikrometer

Nio tillverkade kopparrörs tjocklek har mätts med mikrometer. Alla 51 tjockleksmätningar av rören ligger väl inom toleransgränserna 48,15 mm och 50,35 mm.

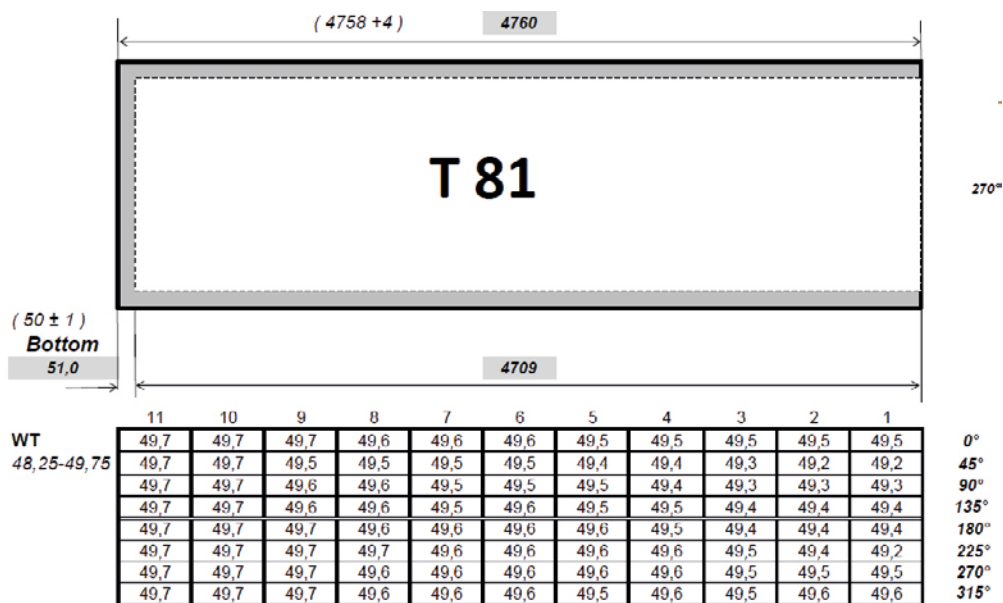
För de fyra rören tillverkade 2012–2013 finns systematiska skillnader mellan väggjocklek för botten och toppen av rören. Toppen är någon tiondels millimeter tunnare än botten. För de två rören T88 och T89 har inga tjockleksmätningar förutom de på toppen kunnat göras eftersom rören har använts till fullskaletester av kapseltillverkning och -deponering och därmed inte kunnat sågas isär.

En påtaglig minskning av rörens tjockleksvariation i toppen har skett för rören tillverkade 2017 jämfört med de tidigare tillverkade från 2012 till 2014. Tjockleksvariationen för de senast tillverkade rören är bara några hundradels millimeter som ska jämföras med rörens diameter på 1050 mm.

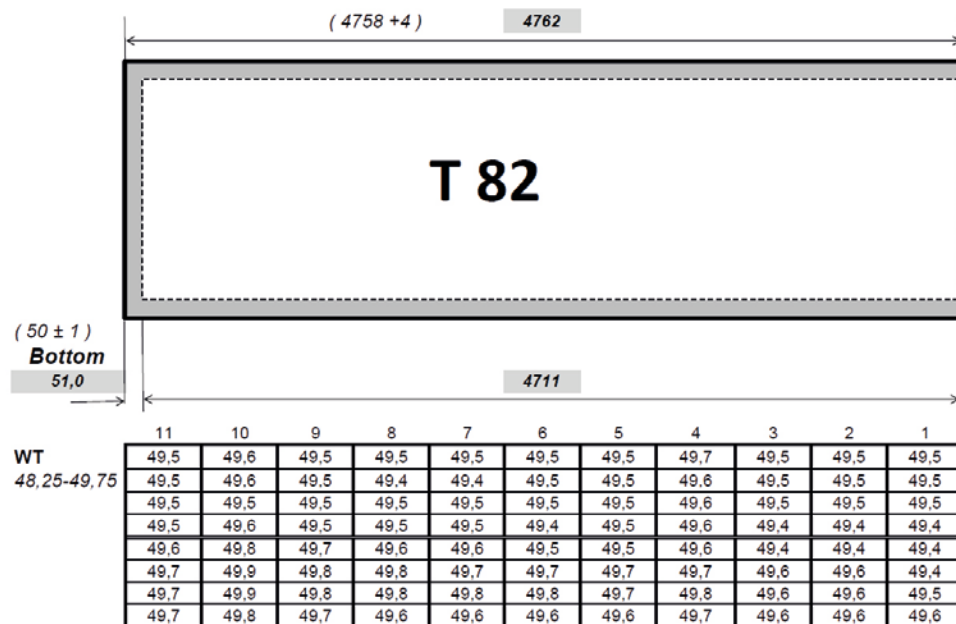
## 4 Analys av 3 dornpressade kopparrörs väggjocklek baserat på ultraljudsmätningar

### 4.1 Dataunderlag

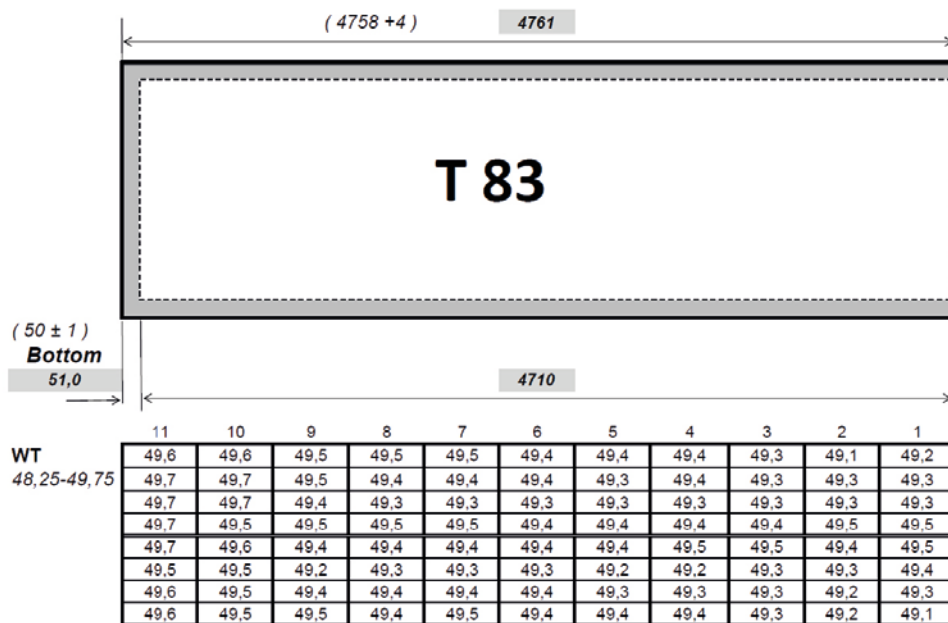
Rörtillverkaren har med ultraljud mätt väggjockleken för de tre rören T81, T82 och T83 tillverkade 2012–2013 och ges i figurerna 4-1 till 4-3. Totalt har rören mätts på 88 punkter i respektive rör baserat på 11 axiella positioner och 8 positioner i ringled. Uppskattad mätosäkerhet anges inte, men varje mätvärde anges med en decimal i protokollet.



Figur 4-1. Måttprotokoll för T81, sammanställt hos rörtillverkaren innan röret kapats isär. Mätmetoden är ultraljud, enheten är millimeter.



Figur 4-2. Måttprotokoll för T82, sammanställt hos rörtillverkaren innan röret kapats isär. Mätmetoden är ultraljud, enheten är millimeter.



Figur 4-3. Måttprotokoll för T83, sammanställt hos rörtillverkaren innan röret kapats isär. Mätmetoden är ultraljud, enheten är millimeter.

## 4.2 Analyser av data

Medelvärden av tjockleksmätningar för de tre rören axiella positioner och vinklar ges i nedanstående figur 4-4.

Tresidig variansanalys av ultraljudsmätningarna med faktorerna rör, axiell position och vinkel ges av nedanstående variansanalysschema, se tabell 4-1.

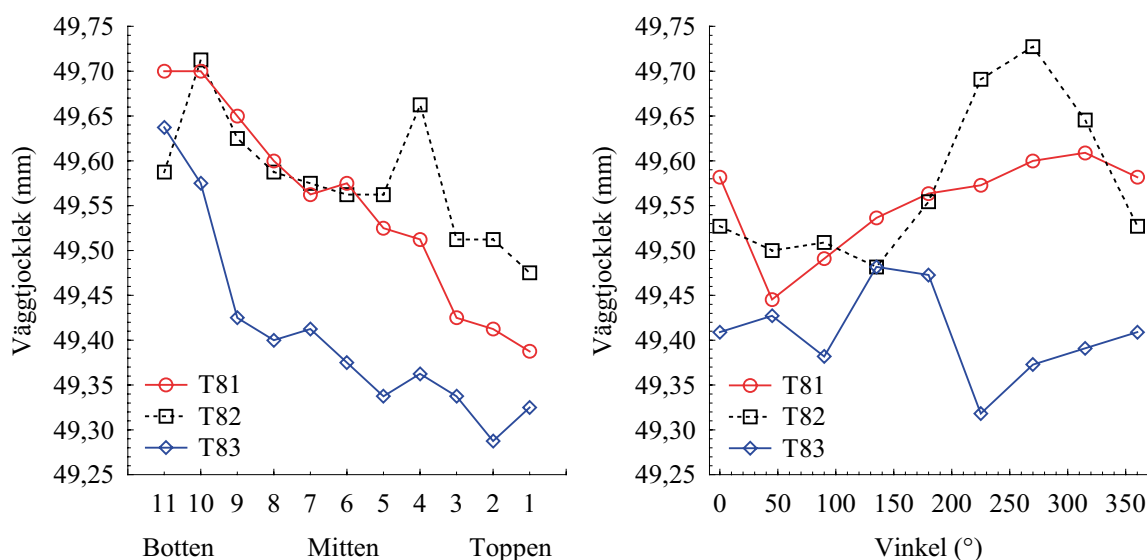
Tabell 4-1. Variansanalysschema för ultraljudsmätningarna.

Faktor	Kvadratsumma	Frihetsgrader	Medelkvadratsumma	F-kvot	p-värde	Kommentar
Rör	1,50	2	0,751	129,59	0,000	(***) signifikant
Axiell	1,85	10	0,185	31,84	0,000	(***) signifikant
Vinkel	0,35	7	0,050	8,68	0,000	(***) signifikant
Rör*Axiell	0,43	20	0,021	3,68	0,000	(***) signifikant
Rör*Vinkel	0,81	14	0,058	9,95	0,000	(***) signifikant
Axiell*Vinkel	0,16	70	0,002	0,39	1,000	inte signifikant
Rest	0,81	140	0,006	–		$\sqrt{0,006} = 0,076$
<b>Total</b>	<b>5,90</b>	<b>263</b>	<b>0,022</b>			$\sqrt{0,022} = 0,150$

Eftersom samspel finns görs lämpligen analys av rören var för sig. För jämförbarhet med mikrometermätningarna för botten, centrum och toppen grupperas i analyserna nedan de axiella positionerna vid ultraljudsmätningar i de fem nivåerna ”11, 10” (botten), ”9, 8”, ”7, 6, 5” (centrum), ”4, 3” och ”3, 2, 1” (toppen).

### 4.2.1 Rör T81

Ultraljudsmätningarna för rör T81 och uträknade medelvärden och standardavvikelser visas i tabell 4-2.



Figur 4-4. Tjockleksmätningar (medel) med ultraljud för T81–T83.

Tabell 4-2. Ultraljudsmätningar av väggjocklek för T81.

T81	Botten		9	8	Centrum			4	3	Toppen		Medel
	11	10			7	6	5			2	1	
0°	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,58
45°	49,7	49,7	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,3	49,2	49,2	49,45
90°	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,3	49,3	49,3	49,49
135°	49,7	49,7	49,6	49,6	49,5	49,6	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,54
140°	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,5	49,4	49,4	49,4	49,56
225°	49,7	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,5	49,4	49,2	49,57
270°	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,60
315°	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,6	49,5	49,6	49,5	49,6	49,6	49,61
<b>Medel</b>	49,70	49,70	49,65	49,60	49,56	49,58	49,53	49,51	49,43	49,41	49,39	49,55
		49,70		49,63					49,47		49,40	
STD		0,00		0,07					0,09		0,13	0,13

Det minsta mätvärdet för rör T81 är 49,2 mm, det största 49,7 mm och medelvärdet av mätningarna är 49,55 mm, variansanalyschema enligt tabell 4-3.

Tabell 4-3. Variansanalyschema.

Faktor	Kvadrat-summa	Frihets-grader	Medelkvadrat-summa	F-kvot	p-värde	Kommentar
Höjd	0,916	4	0,229	108,12	0,000	(***) signifikant
Vinkel	0,245	7	0,035	16,56	0,000	(***) signifikant
Samspel	0,197	28	0,007	3,32	0,000	(***) signifikant
Rest	0,102	48	0,002	–		$\sqrt{0,002} = 0,046$
<b>Total</b>	<b>1,460</b>	<b>87</b>	<b>0,017</b>			$\sqrt{0,017} = 0,130$

Statistiskt \*\*\*-signifikanta skillnader finns för rörets väggjocklek för olika höjder och vinklar.

Som framgår av ovanstående tabeller är de systematiska skillnaderna någon tiondels millimeter för höjd och vinkel inom röret T81. Dessutom finns det samspel mellan höjd och vinkel vilket innebär att höjledningsskillnader är olika stora för olika vinklar. Skillnaderna mellan vinklarna är i medeltal som mest 0,16 mm. Toppen är i medeltal 0,30 mm tunnare än botten.

## 4.2.2 Rör T82

Ultraljudsmätningarna för rör T82 och uträknade medelvärden och standardavvikelser visas i tabell 4-4.

**Tabell 4-4. Ultraljudsmätningar av vägg tjocklek för T82.**

T82	Botten		Centrum						Toppen		Medel	
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2		1
0°	49,5	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,7	49,5	49,5	49,5	49,53
45°	49,5	49,6	49,5	49,4	49,4	49,5	49,5	49,6	49,5	49,5	49,5	49,50
90°	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,6	49,5	49,5	49,5	49,51
135°	49,5	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,5	49,6	49,4	49,4	49,4	49,48
140°	49,6	49,8	49,7	49,6	49,6	49,5	49,5	49,6	49,4	49,4	49,4	49,55
225°	49,7	49,9	49,8	49,8	49,7	49,7	49,7	49,7	49,6	49,6	49,4	49,69
270°	49,7	49,9	49,8	49,8	49,8	49,8	49,7	49,8	49,6	49,6	49,5	49,73
315°	49,7	49,8	49,7	49,6	49,6	49,6	49,6	49,7	49,6	49,6	49,6	49,65
<b>Medel</b>	49,59	49,71	49,63	49,59	49,58	49,56	49,56	49,66	49,51	49,51	49,48	49,58
		49,65		49,61			49,57			49,59		49,49
<b>STD</b>	0,14		0,14		0,11			0,11		0,08		0,13

Det minsta mätvärdet för rör T82 är 49,4 mm, det största 49,9 mm och medelvärdet av mätningarna är 49,58 mm, variansanalyschema enligt tabell 4-5.

**Tabell 4-5. Variansanalyschema.**

Faktor	Kvadrat-summa	Frihets-grader	Medelkvadrat-summa	F-kvot	p-värde	Kommentar
Höjd	0,214	4	0,053	10,39	0,000	(***) signifikant
Vinkel	0,690	7	0,099	19,19	0,000	(***) signifikant
Samspel	0,212	28	0,008	1,48	0,116	inte signifikant
Rest	0,247	48	0,005	–		$\sqrt{0,005} = 0,072$
<b>Total</b>	<b>1,363</b>	<b>87</b>	<b>0,016</b>			$\sqrt{0,016} = 0,125$

Som framgår av ovanstående tabeller finns systematiska skillnader om någon tiondels millimeter för höjd och vinkel inom röret T82. Skillnader mellan vinklarna är i medeltal som mest 0,25 mm. Toppen är i medeltal 0,16 mm tunnare än botten.

## 4.2.3 Rör T83

Ultraljudsmätningarna för rör T83 och uträknade medelvärden och standardavvikelser visas i tabell 4-6.

**Tabell 4-6. Ultraljudsmätningar av vägg tjocklek för T83.**

T83	Botten		9	8	Centrum			4	3	Toppen		Medel
	11	10			7	6	5			2	1	
0°	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,1	49,2	49,41
45°	49,7	49,7	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,4	49,3	49,3	49,3	49,43
90°	49,7	49,7	49,4	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,38
135°	49,7	49,5	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,4	49,4	49,5	49,5	49,48
140°	49,7	49,6	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,5	49,5	49,4	49,5	49,47
225°	49,5	49,5	49,2	49,3	49,3	49,3	49,2	49,2	49,3	49,3	49,4	49,32
270°	49,6	49,5	49,4	49,4	49,4	49,4	49,3	49,3	49,3	49,2	49,3	49,37
315°	49,6	49,5	49,5	49,4	49,5	49,4	49,4	49,4	49,3	49,2	49,1	49,39
<b>Medel</b>	49,64	49,58	49,43	49,40	49,41	49,38	49,34	49,36	49,34	49,29	49,33	49,41
		49,61		49,41		49,38			49,35		49,31	
STD	0,09		0,09		0,07			0,08		0,13		0,13

Det minsta mätvärdet för rör T83 är 49,1 mm, det största 49,7 mm och medelvärdet av mätningarna är 49,41 mm, variansanalysschema enligt tabell 4-7.

**Tabell 4-7. Variansanalysschema.**

Faktor	Kvadrat-summa	Frihets-grader	Medelkvadrat-summa	F-kvot	p-värde	Kommentar
Höjd	0,875	4	0,219	74,97	0,000	(***) signifikant
Vinkel	0,223	7	0,032	10,93	0,000	(***) signifikant
Samspel	0,338	28	0,012	4,14	0,000	(***) signifikant
Rest	0,140	48	0,003	–		$\sqrt{0,003} = 0,054$
<b>Total</b>	<b>1,576</b>	<b>87</b>	<b>0,018</b>			$\sqrt{0,018} = 0,135$

Som framgår av ovanstående tabeller finns systematiska skillnader om någon tiondels millimeter för höjd och vinkel inom röret T83. Skillnader mellan vinklarna är i medeltal som mest 0,16 mm. Toppen är i medeltal 0,30 mm tunnare än botten.

#### 4.2.4 Jämförelse mellan tjockleksmätning med ultraljud och mikrometer

Från tabell 3-1 och tabellerna 4-1, 4-2 och 4-3 beräknas följande tabell 4-8.

**Tabell 4-8. Tjockleksmätningar med ultraljud och mikrometer för T81, T82 och T83.**

	Vägg tjocklek							Medeldifferens
	Rör	Ultraljudprovning			Mikromettermätning			
		Medel	Antal	STD	Medel	Antal	STD	
Toppen höjd 1;2	T81	49,40	16	0,13	49,38	3	0,14	0,02
	T82	49,49	16	0,08	49,32	3	0,16	0,18
	T83	49,31	16	0,13	49,27	3	0,11	0,04
Centrum höjd 5; 6; 7	T81	49,55	24	0,05	–	0	–	–
	T82	49,57	24	0,11	–	0	–	–
	T83	49,38	24	0,07	49,36	3	0,04	0,02
Botten höjd 10;11	T81	49,70	16	0,00	49,53	3	0,04	0,17
	T82	49,65	16	0,14	–	0	–	–
	T83	49,61	16	0,09	49,45	3	0,05	0,16
<b>Medel</b>								0,098
<b>STD</b>								0,079

Som framgår är alla medeldifferenserna mellan ultraljuds- och mikromettermätningarna större än noll. Detta antyder att mätningen med ultraljud ger större mätresultat än mikromettermätningen. Om den systematiska skillnaden mellan mätmetoderna är lika stor för de olika rören och de olika höjderna inom dem, så blir ett 95 % konfidensintervall för den systematiska skillnaden:

$$0,098 \pm 2,57 \cdot 0,079 / \sqrt{6} = 0,10 \pm 0,08 = (0,02 - 0,18).$$

Faktorn 2,57 är 2,5 % percentilen i t(5)-fördelningen. Antalet medeldifferenser i tabell 4-8 är 6, vilket förklarar kvadratroten ur 6 och standardavvikelsen är 0,079. Detta ger en indikation på att ultraljudsmätningen ger någon tiondels millimeter större vägg tjocklek än mikromettermätningen. Observera dock att ovanstående är grundat på ett mycket begränsat underlag nämligen mätningarna på de tre rören T81, T82 och T83 från 2012–2013. Skillnaden kan till exempel förklaras av då gjorda kalibreringar.

Jämförs standardavvikelseerna i tabell 4-8 för varje rör och höjd för sig är de påfallande lika. Observera att i variansanalyserna ovan har det framkommit att vinklarna (mätpositionerna inom ringarna) är systematiskt olika. Av detta följer att standardavvikelsen för varje rör och höjd beror på skillnaderna mellan vinkelpositionerna förutom ”ren” mätvariation.

I variansanalyserna av ultraljudsmätningarna av de tre rören korrigeras för inverkan av höjd och vinkel. Mätspridningarna i tjockleksmätningarna ges av resterna i variansschemana 0,046 mm, 0,072 mm respektive 0,054 mm. Detta indikerar att mätosäkerheten vid ultraljudsmätningarna är mindre än cirka 1/15 mm.

### 4.3 Slutsatser om 3 kopparrörs tjocklek mätt med ultraljud

Vägg tjockleken för de tre kopparrören tillverkade 2012–2013 har mätts med ultraljud på 11 höjder och 8 vinkelpositioner. Alla mätningar ligger mellan 49,1 mm och 49,9 mm och därmed väl inom toleransgränserna 48,15 mm och 50,35 mm.

Systematiska skillnader finns mellan vägg tjock i botten och toppen av de tre rören. Toppen är några tiondels millimeter tunnare än botten. Vägg tjockleken skiljer sig också någon tiondels millimeter mellan vinkelpositionerna.

Mätosäkerheten vid ultraljudsmätningarna av de tre rören uppskattas till mindre än cirka 1/15 mm.

Jämförelse mellan mätning med ultraljud och mikrometer av de tre rören visar cirka en tiondels millimeter större värde för ultraljud. Detta skulle möjligen kunna förklaras av den då gjorda kalibreringen.



## 5 Sammanfattande slutsatser

Kapselkomponenterna dornpressade kopparrör och smidda kopparlock har värderats statistiskt baserat på utfallsdata från provtillverkningar.

Följande slutsatser dras av den utförda studien:

- För alla 35 uppmätta lock ligger mätningarna väl inom toleransgränserna. För cirka 60 tidigare tillverkade lock finns inte mätresultat tillgängliga.
- Alla 51 tjockleksmätningar av de nio rören ligger väl inom toleransgränserna 48,15 mm och 50,35 mm.
- För de fyra rören tillverkade 2012–2013 finns systematiska skillnader mellan vägg tjocklek för botten och toppen av rören. Toppen är några tiondels millimeter tunnare än botten.
- En påtaglig minskning av rörens tjockleksvariation i toppen har skett för rören tillverkade 2017 jämfört med de tidigare tillverkade från 2012 till 2014.
- Tjockleksvariationen för de senast tillverkade rören är bara några hundradels millimeter som ska jämföras med rörens diameter på 1050 mm.
- Alla ultraljudsmätningar av tre rörs tjocklek från 2013 ligger mellan 49,1 mm och 49,9 mm och därmed väl inom toleransgränserna 48,15 mm och 50,35 mm.
- Vägg tjockleken för dessa tre rör skiljer sig någon tiondels millimeter mellan vinkelpositionerna för ultraljudsmätningarna.
- Mätosäkerheten vid ultraljudsmätningarna av tre rör uppskattas till mindre än cirka 1/15 mm.
- Jämförelse mellan mätning med ultraljud och mikrometer av de tre rören visar cirka en tiondels millimeter större värde för ultraljud.



## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer). SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till [dokument@skb.se](mailto:dokument@skb.se).

**SKB, 2010.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SS-ISO 2768-1:1990.** Toleranser – Generella toleranser – Del 1: Toleranser för linjära mått och vinkelmått utan direkta toleransangivelser. Stockholm: Swedish Standards Institute.

**Välimäki T, Glas T, 2013a.** Posive tube T81 structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1401056 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2013b.** Posiva tube T82 structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1401057 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2013c.** Posive tube T83 structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1401061 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2014.** Posiva tube T84 structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1448505 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2017a.** Posiva canister T88 top ring structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1618884 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2017b.** Posiva canister T89 top ring structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1618885 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Glas T, 2019.** Posiva tube T90 structure evaluation. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1696456 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Hernesniemi S, Glas T, 2012a.** Testing of the base and the ring for the T79. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1341354 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Välimäki T, Hernesniemi S, Glas T, 2012b.** Testing of the base and the ring for the T80. Luvata Pori Oy. SKBdoc 1341355 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

**skb.se**