

# CHALMERS



## **Förbättringsstudie av lödningsprocess för en flygmotorkomponent**

Improvement study of a brazing process for an aircraft engine component

*Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Maskiningenjörsprogrammet*

Martin Ljunggren

Daniel Andersson

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik

*Avdelningen för Avancerad oförstörande provning*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sweden, 2014

Examinator: Håkan Wirdelius. Examensarbete No. 108/2014

# FÖRORD

Detta arbete är ett examensarbete motsvarande 15 högskolepoäng. Det har utförts som avslutning på Maskiningenjörsprogrammet vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet har utförts i samarbete med GKN Aerospace i Trollhättan.

*”Vi vill ge ett stort tack till alla på GKN Aerospace i Trollhättan som har bidragit med sin tid och kunskap för att stötta oss under vårt arbete. Utan all er hjälp hade detta projekt aldrig varit möjligt att utföra. Allt positivt bemötande vi stött på har bidragit till att vi har kunnat göra ett så bra arbete som möjligt. Vi vill speciellt tacka vår handledare på GKN Aerospace Sören Knuts, som har varit till stor hjälp med vägledning och feedback. Vi vill också tacka Kenth Wallgren, Rolf Larsson, Marita Salomonson som alltid funnits till hands för att hjälpa oss.*

*Till sist vill vi tacka Håkan Wirdelius, vår handledare på Chalmers Tekniska Högskola, för ett gott samarbete, bra vägledning och goda råd vi fått genom projektets gång.”*

Trollhättan || Maj 2014

Daniel Andersson och Martin Ljunggren || Chalmers Tekniska Högskola

---

Martin Ljunggren

---

Daniel Andersson

## SAMMANFATTNING

Ett sätt att undersöka kvaliteten i en lödfog är att kontrollera dess täckningsgrad med hjälp av ultraljud. Detta är en teknik som GKN Aerospace använder, bland annat för att kontrollera lödfogar på en specifik flygmotorkomponent. För att komponenten skall kunna godkännas krävs det att alla fogar uppnår den önskade täckningsgraden. De fogar som inte uppfyller kraven måste lödas om tills de kan godkännas. GKN önskar öka effektiviteten genom att minska behovet av omlödningar. Detta vill man uppnå genom att säkerställa en ökad täckningsgrad.

Först studerades noggrant de tekniker som används vid tillverkning av komponenten, i syfte att få bättre förståelse för tillverkningsprocessen. Resultat från tidigare tillverkade komponenter sammanställdes för att åskådliggöra hur utfallet blivit för varje komponent de senaste åren. För att se på vilka sätt lödfogarnas täckningsgrad skulle kunna ökas studerades kraven vid ultraljudsmätningen och tillverkningen av komponenten. Detta är två olika sätt att angripa förbättringsarbetet på men båda sätten skulle kunna medföra att lödfogarnas täckningsgrad ökas.

Sammanställningen visade tydliga mönster på vilka fogar som behöver lödas om. En noggrann genomgång av tillverkningsprocessen visade att det är en mycket unik process med många faktorer som kan påverka resultatet av lödningen. Det är många moment som görs manuellt vilket gör att de är svåra att mäta och styra.

Parameterstudier av en komponent visade att det skulle krävas orimliga reduktioner av kraven för att den skulle blivit godkänd efter första lödningen. Detta tyder på att en kombination av ändrade krav och en förbättrad process troligen skulle vara det bästa sättet för att minska antalet omlödningar.

Ultraljudsmätningen visade att det finns alldeles för lite lod i vissa fogar vilket påvisar att mer lod måste tillföras på något sätt. Att genom små designförändringar optimera tillförseln av lod skulle också kunna vara ett sätt att förbättra tillverkningsprocessen.

## **ABSTRACT**

One way to examine the quality of a brazing joint is to check its coverage by using ultrasonic. This is a technique that GKN Aerospace is using to verify the brazing joints on an aircraft engine component. For the component to be approved all its joints has to be of desired ratio. The joints that do not meet the requirements must be re-brazed until they are approved. GKN has identified a need to increase the coverage by the first brazing. The goal is to reduce the amount of re-brazings.

To get an understanding of the manufacturing process the techniques used in the manufacturing were studied. The ultrasonic results from previously manufactured components were compiled to illustrate the outcome for each component the recent years. To see how the brazing joints' coverage could be increased the manufacturing of the component and the requirements for the ultrasonic measurement were studied. These are two ways to tackle the problem but both could result in that the amount of re-brazings could be reduced.

The compiled results showed clear patterns of which joints are in need of re-brazing. A review of the manufacturing process showed that it is a very unique process with many factors that can affect the outcome of the brazing. There are many operations that are done manually, this makes them difficult to measure and control.

Parametric studies of a component showed that it would require unreasonable reductions of the requirements for it to pass after the first brazing. This suggests that a combination of decreased requirements and an improved process would probably be the best way to reduce the amount of re-brazings.

The ultrasound measurement showed that there is too little solder in certain joints which demonstrates that more solder is needed. By optimizing the amount of solder through small design changes could be a way the joints could improve their coverage.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING .....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Om GKN.....	1
1.3 Syfte.....	1
1.4 Avgränsningar .....	2
1.5 Precisering av frågeställningen.....	2
2. TEORETISK REFERENSRAM.....	3
2.1 Haynes 188 .....	3
2.2 Motståndsvetsning .....	3
2.2.1 Punktsvetsning.....	3
2.2.2 Sömsvetsning och rullpunktsvetsning.....	4
2.3 Vätning och kapillärkraft.....	4
2.3.1 Adhesion och kohesion .....	4
2.3.2 Vätning.....	4
2.3.3 Kapillärkraft.....	5
2.4 Lödning.....	6
2.4.1 Vakuumlödning.....	7
2.4.2 Montering.....	7
2.5 Ultraljudsmätning .....	8
2.5.1 Ultraljud som oförstörande provning.....	8
2.6 Fiskbensdiagram.....	8
2.7 Processkarta .....	9
3. METOD.....	9
4. FÖRSTUDIE.....	10
4.1 Laboration med ultraljud .....	10
5. DATAINSAMLING .....	10
5.1 Tabellen.....	11
5.2 Diagram.....	12
6. PROCESSKARTLÄGGNING.....	12
6.1 Monteringsprocess.....	12
6.2 Lödningsprocess .....	13
6.3 Mätprocess.....	14

7. ÅSKÅDLIGGÖRANDE AV FÖRBÄTTNINGSOMRÅDEN I TILLVERKNINGSPROCESSEN .....	15
8. UPPFÖLJNING AV KOMPONENT.....	16
9. KRAVBILD FÖR ULTRALJUDSMÄTNINGEN .....	18
9.1 Krav på överlapp och spaltbredd .....	18
9.2 Ultraljudskrav .....	18
10. PARAMETERSTUDIE AV ULTRALJUDSMÄTNINGEN .....	19
11. PARAMETERSTUDIE AV PLÅTYTORNAS ÖVERLAPP.....	19
11.1 Förutsättningar.....	19
11.2 Genomförande .....	20
12. FEM-ANALYS MED HÅLBILD.....	21
13. SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER.....	23
REFERENSER.....	26
BILAGA 1	
BILAGA 2	
BILAGA 3	
BILAGA 4	
BILAGA 5	
BILAGA 6	
BILAGA 7	
BILAGA 8	
BILAGA 9	
BILAGA 10	

# 1. INLEDNING

Det här examensarbetet syftar till att studera förbättringar kopplat till en lödningsprocess av en flygmotorkomponent på GKN Aerospace i Trollhättan.

## 1.1 Bakgrund

Flygmotorkomponenten byggs idag ihop genom att de ingående delkomponenterna först nästas ihop med hjälp av motståndssvetsning. Därefter löds de resterande kontaktytorna för att på så sätt även där bilda en metallisk vidhäftning. Lödfogen skall framförallt vara tålig mot termiska spänningar och vibrationer. Lodet appliceras manuellt vid varje lödfog innan lödningen sker i en vakuumugn. Lödfogarna kontrolleras till sist med ultraljud för att säkerställa lödfogens täckning. Man vill nu undersöka på vilka sätt processen kan förbättras för att i större utsträckning kunna tillgodose kraven med avseende på lödfogens lodtäckning. Vid en omlödning måste lodet appliceras på andra sidan fogen vilket medför en arbetsställning för operatören som är oönskad ur ergonomisk synpunkt.

Då extraoperationerna ger en ökad kostnad för företaget och tar längre tid att utföra än ordinarie operationer, så skulle företaget spara in onödiga utgifter samt få en kortare tillverkningstid av komponenten om antalet omlödningar kunde reduceras.

## 1.2 Om GKN

GKN:s historia började i södra Wales redan 1759. I september grundades företaget Dowlais Iron Company. Deras satsning låg bland annat i att konstruera en koks-eldad ugn. Företaget GKN bildades i början av 1900-talet genom att de tre företagen Patent Nut & Bolt Company, Dowlais Iron Company och Nettlefolds Ltd gick samman. GKN är en förkortning av "Guest, Keen and Nettlefolds" [1]. GKN är idag uppdelat i fyra divisioner och finns sammanlagt i 33 olika länder. GKN Driveline är den största divisionen och tillverkar komponenter till drivlinesystem för fordonsindustrin medan GKN Aerospace är näst störst och enbart tillverkar komponenter till flygindustrin [2]. Detta projekt har efterfrågats och utförts på GKN Aerospace i Trollhättan. Där har man cirka 2000 anställda och tillverkar i huvudsak komponenter till civila- och militära flygplansmotorer. 90 % av alla nya civila flygplan har idag någon motorkomponent som är tillverkad av GKN Aerospace i Trollhättan. Ett annat affärsområde utgörs av underhåll av flygmotorer [3]. År 2012 tog GKN över verksamheten i Trollhättan efter att ha förvärvat AB Volvos dotterbolag Volvo Aero.

## 1.3 Syfte

Uppdraget syftar till att undersöka vad som skulle behöva göras för att få fler lödfogar godkända redan efter första eller andra lödningen, och på så sätt minska antalet omlödningar. Ett sätt att adressera problematiken är att se över kravbilden för ultraljudsmätningen av lödfogarna på flygmotorkomponenten. GKN vill veta om det finns möjligheter att ändra kravbilden. En ändring av kravbilden kan medföra att antalet omlödningar skulle kunna reduceras. Resultatet av projektet skall främst syfta till att ge GKN rekommendationer om fortsatt arbete för att kunna godkänna lödfogarna efter färre omlödningar. Arbetet skulle i framtiden kunna användas som del i ett underlag för att kunna motivera kravbildens utseende.

## 1.4 Avgränsningar

Problemet har avgränsats till ultraljudsprovade lödfogar i en specifik flygmotorkomponent. Arbetet syftar till att endast studera de fogar som kontrolleras när komponenten är komplett monterad.

## 1.5 Precisering av frågeställningen

Följande frågor har GKN haft som behov att utreda och få svar på i rapporten

- (F1) Hur fungerar den nuvarande provningsmetoden att med ultraljud mäta lödfogens lodtäckning?
- (F2) Hur analyseras idag resultaten av ultraljudsprovning av en lödfog?
- (F3) Vilka osäkerhetskällor kan identifieras vid en ultraljudsanalys av en lödfog?
- (F4) Hur påverkar motståndssvetsen resultatet av utvärderingen?
- (F5) Vilka hållfasthetsberäkningar är kravsättningen för provningen av lödfogen baserad på?
- (F6) Är dagens längd på lödfogen nödvändig eller skulle den kunna minskas, men ändå bli tillräckligt stark?
- (F7) Finns det tillräckligt med teoretiskt underlag för att kunna påvisa att längden på lödfogen kan minskas utan att påverka hållfastheten?



## 2. TEORETISK REFERENSRAM

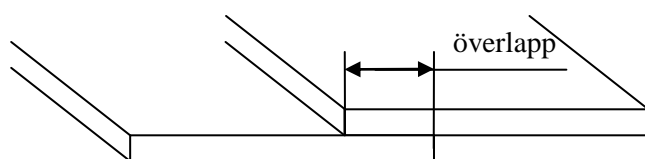
I detta kapitel beskrivs utförligt de olika tekniska delar som är relevanta i projektet.

### 2.1 Haynes 188

Haynes 188 heter materialet som flygmotorkomponenten tillverkas av. Haynes 188 är en så kallad superlegering. Denna superlegering är en legering som kan användas vid mycket höga temperaturer (över 1000°C). Haynes 188 består till största del av kobolt, men innehåller också stora mängder av nickel, krom och volfram. I legeringen finns det även små mängder av järn, mangan, kisel, kol, lantan och bor [4]. Materialets förmåga att stå emot oxidering och korrosion, även vid höga temperaturer, gör att det ofta används vid tillverkning av brännkammarkomponenter till flygmotorer. Det finns vissa svårigheter att utföra skärande bearbetning på Haynes188 eftersom det tenderar att deformationshärda kraftigt [5]. Sträckgränsen för Haynes 188 är 515 MPa och brottgränsen uppnås vid 1296 MPa [4].

### 2.2 Motståndssvetsning

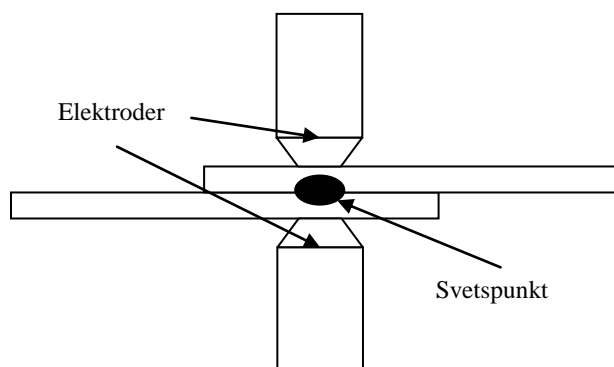
Motståndssvetsning är en typ av svetsning där elektrisk energi omvandlas till värmeenergi. Materialet värms lokalt upp till dess smältpunkt med hjälp av elektroder. Arbetsstyckena pressas samtidigt mot varandra med ett relativt högt tryck för att de skall vara i kontakt under hela svetsningen. Vid motståndssvetsning krävs en hög strömstyrka men en relativt låg strömspanning. Detta på grund av att ledningsmotståndet i materialen ofta är lågt vilket gör att det krävs mycket energi för att uppnå önskad värmetemperatur. Strömstyrkan och trycket kan varieras beroende på materialets tjocklek och egenskaper. Motståndssvetsmetoderna är ofta snabba, effektiva och miljövänliga. Då materialen skall sammanfogas i svetspunkten är det viktigt att ytorna är så fria som möjligt från oxider och orenheter. Rengöring är därmed en förutsättning för att få en bra svetspunkt [6]. Vid motståndssvetsning så använder man överlappsfogar, se figur 2.1 nedan.



Figur 2.1 Överlapp vid motståndssvetsning

#### 2.2.1 Punktsvetsning

Vid punktsvetsning blir bindningen mellan materialen som en punktformig svets. Svetspunkten bildas invändigt i förhållande till verktyget (elektroden) se figur 2.2 nedan. En fördel är att punktsvetsning går att automatisera så att variationer i exempelvis godstjocklek och renhet inte påverkar svetsresultatet [6].



Figur 2.2 Principiell bild motståndssvetsning

## 2.2.2 Sömsvetsning och rullpunktsvetsning

Sömsvetsning är en typ av svetsning då man tillämpar metoden med punktsvetsning för att skapa en hel fog. Sömsvetsning innebär att två ytor sammanfogas genom att punktsvetsar görs kontinuerligt efter varandra längs fogen. Arbetsstyckena som skall sammanfogas placeras mellan två hjul, som då fungerar som elektroder. Båda eller det ena av hjulen är drivande för att kontinuerligt röra arbetsstyckena framåt och hålla en konstant svets hastighet. Elektroderna är hela tiden i kontakt med arbetsstycket, vilket ger mindre förslitning på elektroderna. Sömsvetsning kan göras så att punkterna överlappar varandra eller har ett bestämt avstånd mellan varandra. En fördel med sömsvetsning är att det går att få täta svetsfogar. Om avståndet mellan svetspunkterna skall vara stort tillämpas rullpunktsvetsning. Rullpunktsvetsning är en snabb metod vilket gör att svetspunkterna kan bli något utdragna [6]. Rullpunktsvetsning är den metod som används vid tillverkningen av komponenten i detta projekt.

## 2.3 Vätning och kapillärkraft

### 2.3.1 Adhesion och kohesion

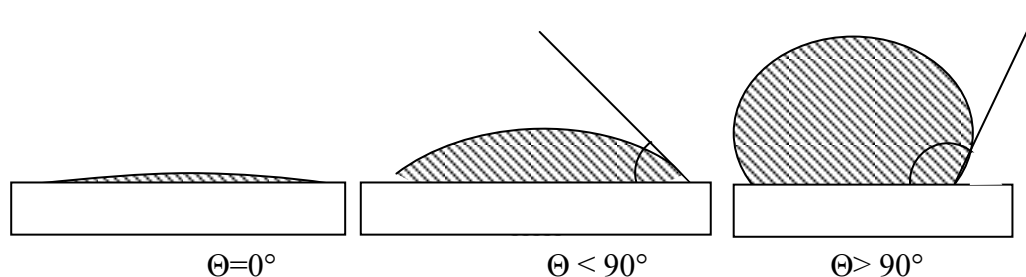
Adhesion är förmågan för olika material att binda sig till varandra. Adhesion kan betraktas som bindningen mellan två partiklar men även bindningen mellan två ytor. Generellt kan man dela upp adhesion i tre olika typer. Specifik adhesion, mekanisk adhesion och effektiv adhesion. Specifik adhesion uppnås då de olika materialytorna binds på molekylär nivå. Mekanisk adhesion kan ses som när två skrovliga ytor hakar i sig i varandra och på så sätt bildar en bindning mellan varandra. Effektiv adhesion är en kombination av specifik och mekanisk adhesion och ses som den optimala bindningen mellan två ytor [7].

Kohesion är den kraft som, på molekylär nivå, håller samman molekyler inom ett och samma material. Kohesion kan ses som den inre styrkan i ett material. Den gör att atomerna i ett material hålls kvar i materialet [8].

### 2.3.2 Vätning

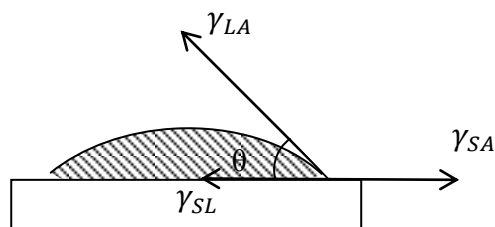
En vätskas förmåga att sprida ut sig över en solid yta kallas för vätning. Vätning är beroende av den relativa ytenergin mellan vätskan och den solida ytan. Graden vätning kan bestämmas utifrån kontaktvinkeln  $\theta$  mellan vätskan och det solida materialet.  $\theta$  bestäms dels av ytspänningen hos vätskan men även renligheten av den solida ytan. En låg ytspänning hos

vätskan ihop med en ren yta ger en låg kontaktvinkel och därmed en bra vätning. Figur 2.3 illustrerar en droppes vätning över en yta med varierande renhet. Blir kontaktvinkeln nära noll sägs vätningen vara mycket bra. Om materialets yta till exempel är lite smutsig kan vinkeln bli mellan 0 och 90 grader. Då kontaktvinkeln överstiger 90 grader erhålls en motsatt effekt av vätning och vätskan behåller då sin droppliknande form på ytan. För att få en så bra vätning som möjligt önskas en stark adhesion på ytan och en svag kohesion i vätskan. Detta förhållande brukar kallas för ett lyofiliskt förhållande. Är det motsatta förutsättningar brukar det däremot kallas för ett lyofobiskt förhållande.



Figur 2.3 Vättningsvinkeln som blir på material med olika renhet

Ett annat sätt att betrakta vätning är att studera gränspänningar. Genom att införa gränspänningarna för luft-vätska  $\gamma_{LA}$ , vätska-solid  $\gamma_{SL}$  samt solid-luft  $\gamma_{SA}$  där de approximeras fås figur 2.4.



Figur 2.4 Gränspänningar

Kontaktvinkeln  $\theta$  fås av Young's formel [9] (ekv. 1):

$$\gamma_{LA} \cdot \cos \theta = \gamma_{SA} - \gamma_{SL} \quad (\text{ekv. 1})$$

### 2.3.3 Kapillärkraft

Om man studerar en bägare med vatten så kan vattenytan i bägaren antingen bilda en konkav eller konvex yta vid bägarens väggar. Detta beror dels av vattnets ytspänning och adhesionen mellan bägaren och vattnet. Den konkava eller konvexa ytan bildar en radie  $r$  vars centrum ligger antingen över eller under vattenytan beroende på vilken av dessa utformningar ytan får. Om ett smalt rör med en diameter mindre än två radier  $r$  placeras i bägaren med vatten ser man att vattnet kommer att stiga i det smala röret något över vattennivån i bägaren (se Figur 2.5, c). Röret kallas då för kapillär och kapillärkraften är den

kraft som får vattnet att dras in i den smala öppningen. Kapillärkraften verkar oavsett hur den smala öppningen är placerad i förhållande till tyngdkraften.

Om kontaktvinkeln mellan kapillären (smala röret) och fluiden är mindre än  $90^\circ$  så väter fluiden mot röret och fluiden kommer att stiga i kapillären. Då kontaktvinkeln är större än  $90^\circ$  kommer istället fluiden att tryckas under vätskenivån i bägaren se figur 2.5. Höjden  $h$  som vattnet rört sig i förhållande till vätskenivån i bägaren är en funktion av ytspänningen och kontaktvinkeln mellan solid och fluid. Genom addition av ytspänningen och tyngdkraften vilket är de krafter som verkar i kapillären så kan höjden bestämmas. Ytspänningen verkar längs kapillärens vägg vilket ger för ett cylindriskt rör en omkrets på  $2\pi r$ . Kraften som drar upp vätskan blir då:

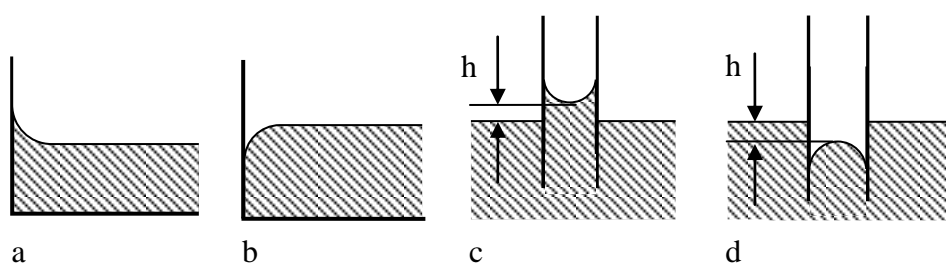
$$(2\pi r)\gamma_{LA} \cdot \cos(\theta) \quad (\text{ekv. 2})$$

Tyngdkraften som motverkar denna kraft blir:

$$(\pi r^2 h)\rho g \quad (\text{ekv. 3})$$

Där  $g$  står för gravitationskonstanten och  $\rho$  för fluidens densitet. Med hjälp av jämviktsekvation mellan dessa krafter kan sedan  $h$  lösas ut till [9]:

$$h = \frac{2\gamma_{LA} \cdot \cos(\theta)}{r\rho g} \quad (\text{ekv. 4})$$



Figur 2.5 Olika sätt som kapillärkraften kan visa sig på

## 2.4 Lödning

Lödning är ett sätt att, permanent, sammanfoga två ytor med varandra. Lödning skapar en metallisk bindning mellan två material genom att ett bindningsmaterial, så kallat lod, tillförs vid ytorna som skall sammanfogas. Delarna värms sedan upp i en ugn så att lodet smälter och fyller fogarna. Temperaturen måste vara så hög att den överstiger lodets smältpunkt men måste dock vara lägre än smältpunkten för de två material som ska sammanfogas. Lödningsprocessen bygger på att kapillärkraften suger in det smälta lodet mellan ytorna som

skall sammanfogas. Det smälta lodet legerar sig med kontaktytorna och när det stelnar bildas det en metallisk bindning [10]

Under lödningen används en skyddande hinna som kan bestå av flux, gas eller vakuum för att undvika oönskade reaktioner från omgivningen. Flux finns som flera olika sammansättningar och kan appliceras på många olika sätt. Det kan till exempel penslas eller sprejas på [11].

Det finns flera olika lödningstekniker, bland annat mjuklödning, hårdlödning och vakuumlödning. Det som främst skiljer dessa åt är arbetstemperaturen under lödningen. Mjuklödning har en arbetstemperatur under 450 grader Celsius. Hårdlödning kan variera mellan 450-800 grader Celsius i arbetstemperatur. Vakuumlödning har generellt en mycket högre arbetstemperatur och är vanligen över 800 grader Celsius.

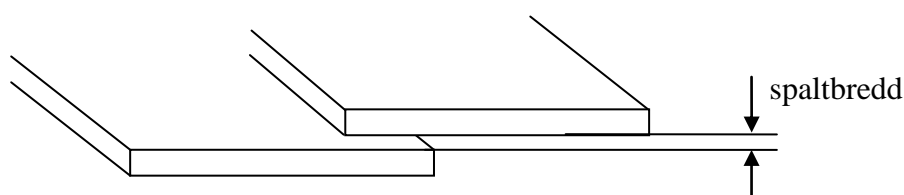
För att få lodet att väta och sprida ut sig i hela fogen krävs att kontaktytorna är noggrant rengjorda [10].

### 2.4.1 Vakuumlödning

När det finns höga krav på hållfasthet och kvalitet används ofta vakuumlödning. Under lödningprocessen pumpas luften ut ur ugnen vilket medför att ett mycket lägre tryck än atmosfärstrycket erhålls. På så sätt finns det väldigt lite luft inne i ugnen under värme- och avkylningssyckeln vilket reducerar möjligheten att luften reagerar med materialet. Lödfogar som vakuumlöds har därmed en mycket hög kvalitet och hållfasthet. Andra fördelar med vakuumlödning är att flera lödfogar kan lödas samtidigt och att inget fluxmedel behöver användas. Detta gör att detaljerna behåller sin renlighet genom hela processen [12].

### 2.4.2 Montering

Lödfogar har bäst hållfasthet mot skjuvspänning vilket gör att man undviker stumfogar och istället använder överlappsfogar. Vid lödning är spaltbredden ett avgörande mått för att få en så bra fog som möjligt, se figur 2.6. Spaltbredden styr hur effektivt kapillärkraften verkar och är avgörande för vilken hållfasthet fogen kan uppnå. De flesta lodtyper ger bäst resultat då spaltbredden är mellan 0,05-0,10 mm [13].



Figur 2.6 Spaltbredd vid lödning

När det gäller överlappets längd brukar man använda sig av tumregeln 3t-6t. Där t:et står för det tunnaste materialets godstjocklek. Det innebär att överlappet ska vara 3-6 gånger så långt som det tunnaste materialets godstjocklek. Regeln har tagits fram med hjälp av hållfasthetstester. Det har konstaterats att vid ungefär 2,3 gånger så långt överlapp som godstjocklek börjar plåten att deformeras innan lödfogen. Med en säkerhetsmarginal på 30 %

kom man fram till att 3t-överlapp skulle vara tillräckligt för att deformation skulle ske i plåten istället för i fogen. Då risk för ihåligheter finns i fogen resonerade man att ett 6t-överlapp med 50 % ihåligheter (utspritt över fogen) skulle ge ungefär samma hållfasthet som 3t-överlapp med inga ihåligheter. I hållfasthetstesterna märkte man dock att vid ett överlapp på 4t eller mer ökade risken för ihåligheter snabbt, detta på grund av att lodet måste röra sig över en längre sträcka [10].

## 2.5 Ultraljudsmätning

Ultraljud definieras som ljudvågor med frekvens över 20 000 Hertz. Det innebär att ultraljud är över det hörbara frekvensområdet för människor. I allmänhet har ljudvågor egenskapen att de har högst hastighet i solida medium följt av vätskor och rör sig långsammast i luft. Energiförlusterna för ljudvågorna är också minst i solida material och vätskor.

### 2.5.1 Ultraljud som oförstörande provning

Oförstörande provning (OFP) innebär att man undersöker en detalj, utan att förstöra eller påverka materialet. Man skiljer OFP från förstörande provning (FP) där man förstör detaljen. Detta kan till exempel innebära att man sågar sönder detaljen för att se hur en svetsfog har blivit. FP kan man alltså inte göra på detaljer som man skall använda eftersom detaljen förstörs vid provningen. Några exempel på OFP-tekniker är provning med penetrant, ultraljudsprovning, magnetpulverprovning, röntgen och virvelströmsteknik.

Grundtekniken för ultraljudsmätning vid oförstörande provning bygger på att en ljudvåg skickas ut av en sändare och sedan fångas upp av en mottagare. Ljudvågen skall studsas mot ett objekts geometri innan den fångas upp av mottagaren. Antingen används sändaren även som mottagare och fångar då upp det ljud som studsas mot ytan eller så placeras en mottagare på andra sidan objektet, som då fångar upp det ljud som passerat genom objektet. Förutsatt att ljudets hastighet genom materialet är känd, kan tiden det tar för varje ljudvåg att nå mottagaren mätas och ge objektets geometri. Då felaktigheter finns i materialet reflekteras ljudvågen mot dessa och ger en tidsförskjutning från det normala. På så sätt kan man upptäcka sprickor, ihåligheter och andra defekter utan att förstöra objektet. Vid immersionsprovning används ultraljudsteknik där både objekt, sändare och mottagare är nedsänkta i ett vattenbad vilket säkerställer att ljudvågorna kan transporteras så bra som möjligt innan och efter att de har träffat materialet i objektet som skall undersökas.

## 2.6 Fiskbensdiagram

Det finns många olika sätt att åskådliggöra de orsaker som kan finnas till ett problem. Ett vanligt sätt är att använda ett så kallat fiskbensdiagram. Det kallas ibland även för orsak-verkan-diagram eller Ishikawadiagram, från dess skapare Kauro Ishikawa. När man gör ett fiskbensdiagram så börjar man med att grovt beskriva vilka huvudorsaker som kan finnas till det definierade problemet. Sedan riktar man in sig på dessa punkter en efter en och undersöker dem noggrannare. Varje orsak skall sedan få underorsaker till sig, som beskriver vad som kan tänkas ligga bakom denna orsak. Till slut skall man ha ett diagram med några huvudorsaker direkt till problemet, där varje huvudorsak också har en mängd underorsaker. Ett sätt att välja huvudorsakerna är att utgå från en metod som kallas "sju M". De sju M:en är management, människa, metod, mätning, maskin, material och miljö. Att använda sig av

metoden med sju M:en gör man ofta för att lättare öppna upp sitt tankesätt. Man kan också komma på egna grundorsaker som skall vara kopplat direkt till problemet. Med ett välgjort fiskbensdiagram kan man hitta små delar i processen som kan tänkas vara orsaken till det definierade problemet [14].

## 2.7 Processkarta

En processkarta används för att enkelt kunna åskådliggöra vilka faktorer som har inverkan på resultatet vid varje operationssteg. Genom att visualisera alla ingående och utgående parametrar kan man se vilka faktorer som har stor inverkan på resultatet och därmed kan vara möjliga problemområden. En processkarta kan ha många olika utseenden men ett vanligt sätt är att först lista alla operationer i processen. Före och efter varje operation skrivs vilka ingående och utgående parametrar varje operation har [15].

## 3. METOD

Detta kapitel beskriver i vilka steg projektet har utförts. De olika delarna beskrivs övergripande och varför de har utförts på ett visst sätt. En mer ingående beskrivning av de olika momenten kan ses i senare huvudkapitel.

Detta arbete inleddes med att en litteraturstudie utfördes för att få kunskap om de olika metoder som används i tillverkningsprocessen. Motståndssvetsning, lödning och ultraljudsmätning var de metoder där mest fokus lades. Diskussioner fördes med detaljansvariga, metodägare och andra som arbetar med komponenten för att få en djupare förståelse för tillverkningsprocessen. En laboration med ultraljud som provningsmetod gjordes för att få en förståelse för hur grundprincipen tillämpas i praktiken.

Data samlades in från tidigare komponenter för att få en helhetsbild över hur resultaten från ultraljudsmätningen såg ut i dagsläget men även för att se hur det hade förändrats över tiden. De data som ansågs vara relevanta var resultaten från ultraljudsmätningen. Dessa data sammanställdes i ett Excel-dokument. För att visa på trender och mönster skapades grafer och diagram.

Under den första delen av arbetet studerades produktionen och dess operationer. En processkartläggning genomfördes efter att ha varit med och studerat varje operation. För att tydligare kunna visa eventuella förbättringsområden arbetades ett fiskbensdiagram fram, där det sedan markerades ut vilka områden som ansågs vara mer avgörande. En komponent följdes genom processen där spaltbredder samt avstånd mellan band mättes upp för att senare se hur de påverkade resultatet från ultraljudsmätningen.

I den andra delen av arbetet lades det fokus på kraven vid ultraljudsmätningen. Först studerades ritningar och operationsbeskrivningar för att se hur kraven för ultraljudsmätningen såg ut i dagsläget. Detta gjordes för att få en förståelse för de krav som man utgår från när man utvärderar lödfogarna. En undersökning startades för att se om det var möjligt att ändra kraven men ändå behålla en tillräckligt bra fog. En parameterstudie gjordes för ultraljudsmätningen då utvärderingsområdet minskades. Studiens syfte var att få en bild över hur stor förändring som skulle krävas för att ge ett utfall på antalet godkända fogar. Det

gjordes även en parameterstudie i FEM där syftet var ur ett hållfasthetsperspektiv se vad en minskning av överlappet skulle medföra.

Till sist studerades det med hjälp av en FEM-modell vad som skulle hända om man gjorde designförändringar och istället tillverkade hål i banden för att kunna applicera lod även där.

## **4. FÖRSTUDIE**

Projektet inleddes med att införskaffa förkunskaper om de tekniska delar som ingår i tillverkningen av flygmotorkomponenten. I detta projekt handlade det först om att ta reda på vilka moment och tekniker som ingick i tillverkningen av komponenten. Detta gjordes främst med hjälp av detaljansvarig person för komponenten. De tekniker som ansågs finnas anledning att skaffa sig förkunskaper om var motståndssvetsning, lödning och ultraljud. Det ansågs också relevant att närmare studera det material som komponenten tillverkas av. För att få en grundförståelse för hur ultraljudsmätning fungerar genomfördes även en laboration med ultraljudutrustning. I och med att det skapades en förståelse för dessa olika tekniker och material så blev det enklare att skaffa sig en helhetsbild av hur de olika momenten kan påverka varandra. Förstudien låg till stor del i grund för den teoretiska referensramen (se Kapitel 2, Teoretisk referensram).

### **4.1 Laboration med ultraljud**

En laboration genomfördes med manuell ultraljudsutrustning. Detta gjordes för att få en grundförståelse för hur utrustningen fungerar. Laborationen utfördes på Chalmers, Campus Lindholmen. Med en sändare undersöktes olika testbitar. Hål med olika diameter och placering var borrade i testbitarna. Först applicerades en gel på den ytan av testbiten där sändaren sedan placerades. Sändaren skickade ut ultraljudsvågor som transporterades genom materialet tills de stötte på luft. Gelen gjorde att sändaren helt kom i kontakt med testbitens yta, så att det inte blev någon luftspalt mellan. Hålen i testbitarna gjorde att ljudvågorna studsade mot luften och sedan togs emot av sändaren igen. När ljudvågorna kom tillbaka till sändaren så gav det utslag på en display som var kopplad till sändaren. Displayen visade då hur långt från sändaren som hålet var placerat och man kan på detta sätt ta reda på var en defekt finns i en detalj. Detta är ett av de enklaste sätten att använda ultraljudsutrustning på men det skapar en bra förståelse för hur utrustningen fungerar och hur känslig den är. Det finns många olika typer av ultraljudsutrustning där tekniken kan variera men grundprincipen är i stort sett den samma. Den teknik som användes i detta test är till exempel dålig om man vill finna sprickor i ett material eftersom ljudvågorna genereras vertikalt ner i materialet. En spricka skulle kunna ligga i samma riktning som ljudvågorna och skulle eventuellt inte ge något utslag. Därför finns det tekniker som gör att ljudvågorna istället genereras diagonalt, vilket skulle kunna göra att dessa sprickor upptäcks.

## **5. DATAINSAMLING**

Först var det viktigt att få en klar förståelse för var fokus skulle läggas på förbättringsarbetet. För att på ett tydligt sätt kunna visa var förbättringsarbetet skulle göras var det viktigt att ta fram och sammanställa data på hur lödfogarna har sett ut och eventuellt förändrats över tid.



Tidigare identifierades att mätresultaten från ultraljudsmätningen var viktiga att kartlägga över tid. Dessa data visar, i procent, vilken täckning lodet har haft för varje enskild fog. Dessa data visar också antalet omlödningar för varje komponent. Eftersom varje fog kontrolleras efter varje lödning, inklusive omlödning, så finns alla lödningar dokumenterade i dessa data. Data samlades in från och med år 2007, vilket innebar resultat från 30 komponenter, med 22 fogar på varje komponent. Efter år 2007 har det inte skett några förändringar i ultraljudsmätningen. Detta ansågs dock vara tillräckligt med data för att kunna påvisa någon trend. Efter att ha sammanställt dessa mätresultat (Bilaga 1) ansågs det ge en tillräckligt bra bild över hur lödfogarna historiskt har sett ut och förändrats över tid. Ett utdrag ur denna tabell kan ses i figur 5.1 nedan. Eftersom kravet är att lodtäckningen skall vara minst 80 % så markerades dessa fogar med grönt medan fogar med täckning under 80 % markerades med rött. Med hjälp av dessa data kan man tydligt se trender på vilka fogar som ofta eller alltid behöver lödas om och vilka som sällan eller aldrig behöver lödas om.

Op.nr.	AY20	AY19	CD3	BA3	AY17	AY16	AY15	CL	CA	AY13	AY12	AY11	CD2	BA2	AY9	AY8	AY7	AY6	CD1	BA1	AY4	AY3
1000	77	65	89	93	90	66	78	82	90	90	53	87	92	94	92	70	57	72	87	70	81	81
1050	92	71	89	90	85	86	84	81	88	93	89	90	91	92	94	92	84	90	90	94	97	99

Tabell 5.1 Utdrag ur tabellen över lodtäckning på tidigare tillverkade komponenter

## 5.1 Tabellen

Längst till vänster i tabellen står ordernumret som är det specifika numret för varje detalj. Följande kolumner talar om vilken lödningsgång som avses och vilket datum lödningen har blivit utförd. Första lödning betecknas som operation 1000. Omlödningarna betecknas i ordning enligt operation 1050, 1055, 1060 och så vidare. De 22 stycken lödfogarna är sedan uppräddade i ordning från ultraljudsprotokollet. Här kan man se vilken procentuell lodtäckning som varje lödfog har fått. Det är även noterat i tabellen vilken operatör som monterat lodet och vilken som har utfört ultraljudskontrollen. Slutligen noteras, i tabellen, hur många lödfogar per lödning som är underkända. För att lätt kunna se vilka lödfogar som är godkända respektive underkända färgades alla godkända lödfogar med grönt och alla underkända lödfogar med rött. På så sätt är det enkelt att snabbt få en uppfattning om mönster och hur det ändrats under tid.

Då man studerar ritningen (Bilaga 5, sida 3) ser man att detaljen består av band och stödband. Samtliga band och stödband löds på samma gång. BA- fogar och CD- fogar kallas de lödfogar som är mellan stödband och de intilliggande banden. Ett stödband har en annan utformning men de närmsta lödfogarna får samma utseende som vid de andra stödbanden. Dessa lödfogar kallas CL- och CA-fogar. CA- och CD-fogar skiljer sig från samtliga lödfogar genom att dessa fogar har en hålbild som medför att lod kan appliceras även i dessa hål. AY- fogar är mellan band och band.

Då man endast studerar första lödningen (operation 1000) kan man se att vissa lödfogar nästan alltid underkänds och att andra alltid godkänds. Man ser att alla BA-fogar och CD-fogar oftast blir godkända. De AY- fogar som kommer före en CD- fog är i stor utsträckning

dåliga. Även AY-3 vilket är en lödfog mellan ett tjockare och ett tunnare material är också generellt dåligt. Resterande AY- fogar har generellt blivit sämre med tiden (se Bilaga 1).

## 5.2 Diagram

Alla första lödningar (operation 1000) sammanställdes i ett diagram som visar hur antal underkända fogar har förändrats under den dokumenterade tiden. En trendlinje infördes för att tydligt kunna visa vilken trend lödfogarna har. Man kan tydligt se att antal underkända fogar successivt har ökat från 2007 och framåt. (Bilaga 2). Man kan också se att det är stor spridning på antalet underkända fogar som en komponent får.

## 6. PROCESSKARTLÄGGNING

En processkartläggning gör man för att få en uppfattning om hur varje del i processen går till. Detta innebar att en komponent följdes genom hela den process som skulle kartläggas. Vid varje steg i processen hölls även en diskussion med operatören för att även få dennes tankar och erfarenheter kring det specifika momentet i processen. I detta projekt delas hela processen in i tre delar, monteringsprocess, lödningsprocess och mätprocess. De steg som komponenten går igenom i hela processen som undersöks i detta projekt är:

### Monteringsprocess:

- Montering
- Punktsvetsning
- Trimning av spaltbredd
- Kontroll

### Lödningsprocess:

- Tvätt
- Lodmontering
- Lödning
- Kontroll och puts av lodrinn efter behov

### Mätprocess:

- Ultraljud

### 6.1 Monteringsprocess

Komponenten består i stort sett av två olika typer av delkomponenter. Delkomponenterna kallas för band och stödband. Delkomponenterna beställer GKN från en underleverantör. Ett stödband monteras och löds ihop av andra komponenter innan det monteras i denna komponent. Flygmotorkomponenten monteras ihop av ett flertal band och stödband. Eftersom detta projekt endast avser att undersöka de fogar som kontrolleras när komponenten är komplett monterad så anses monteringen av den fullständiga komponenten utgöra det första steget i processen.

Komponenten monteras ihop manuellt. Detta görs genom att delarna placeras i en fixtur. Med hjälp av motståndssvetsning nästas delarna ihop tillräckligt så att komponenten skall kunna flyttas. I dagsläget finns det endast en operatör som har kunskap att utföra denna operation. Komponentens skall sedan svetsas noggrannare vilket också görs med motståndssvetsning. Komponentens sätts upp i en rullpunktmaskin, som med jämna mellanrum sätter svetspunkter i skarvarna. Efter att komponenten har motståndssvetsats skall den, manuellt, trimmas innan den kontrolleras. Det är spaltbredderna, som senare skall lödas, som man trimmar i detta moment. Operatören använder sig av en liten hammare för att korrigera spaltbredden till rätt mått. Det är samma operatör som trimmar spaltbredden som monterar ihop detaljen. På ritningen finns det endast ett maximalmått för lodspalterna. Operatören använder sig av ett bladmått och knackar ihop spalterna tills bladmättet inte går att få in i spalten. Detta görs både på in- och på utsidan av komponenten för att spaltbredden skall bli så bra som möjligt innan lödningen.

När komponenten är fullständigt monterad och spalterna är trimmade så skall den kontrolleras. Kontrollmätningen utförs manuellt av en operatör. Operatören kontrollerar då måttet på spaltbredderna där lödfogen skall ske. Även längdmått på detaljen kontrolleras med hjälp av en fixtur för att säkerställa att de ingående komponenterna har monterats korrekt. Operatören gör också en okulär kontroll av hela detaljen och ser att det inte är något ovanligt med den.

## 6.2 Lödningsprocess

Innan komponenten skall lödas är det viktigt att den är rengjord. Därför genomförs en tvättprocess av komponenten innan fogarna skall lödas. På GKN tvättar man komponenten med så kallad ultraljudstvätt. Detta innebär att ultraljudsvågor sprider sig i vätskebadet och gör att vätskan kan tränga in i små utrymmen och håligheter. Ljudvågorna gör också att små partiklar kan slås loss från ytorna. Tvättprocessen för denna komponent går till på följande sätt. Komponentens läggs först i ett ultraljudsbad med lut. Sedan sköljs den av grovt i ett vattenbad innan den sköljs i ett ultraljudsbad enbart fyllt med vatten. Till sist sköljs komponenten i ett bad med hett, avjoniserat vatten för att den skall bli så ren som möjligt och torka snabbt. En operatör blåser av komponenten något innan den läggs i en ugn för att torka. Denna tvättprocess gör att alla fettfläckar, små partiklar och annan smuts försvinner från komponenten. Ultraljudsbaden gör att även de smala spalterna för lödfogarna blir rena.

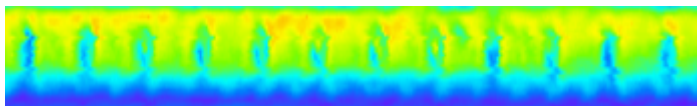
Lodmonteringen görs manuellt av en operatör. Anledningen till att monteringen görs manuellt är för att måtten på varje komponent kommer att variera lite. Idag finns det endast en operatör som har kunskapen att utföra detta arbete. Lodmonteringen går till så att operatören applicerar lod-pastan med hjälp av en spruta. Sprutan styrs av lufttryck, vilket gör att operatören kan lägga en jämn sträng av lod-pasta runt hela komponenten. Lodet appliceras på utsidan av komponenten. Det finns små hål i komponenten som det finns risk att lodet täpper igen när det smälter i ugnen. Dessa hål fyller operatören med så kallat stop-off. Lodet kan inte tränga igenom stop-off beläggningen. Efter att lödningen är genomförd kan stop-off beläggningen blåsas bort med tryckluft.

När lödningen skall ske så placeras komponenten i en vakuumugn. Ugnen har ett förprogrammerat program som startas av en operatör. Programmet gör att ugnen först pumpar ur all luft så att det endast blir vakuum i ugnen. Sedan värms ugnen till en sådan temperatur att lodet smälter och sugas in i spalterna mellan plåtarna. Ugnen slutar sedan värma och låter komponenten svalna så att lodet stelnar och binder ihop ytorna. Ugnen återställer sedan trycket genom att släppa in luft igen varefter komponenten kan plockas ut ur ugnen och lödningen är därmed slutförd.

Efter att lödningen är avslutad så kontrolleras komponenten okulärt. Det som bland annat undersöks är om lodet har runnit ut på fel sida av fogen. Lodet har i så fall brett ut sig på utsidan av komponenten. Detta syns tydligt då det blir en mycket ojämn yta på plåten där lodet runnit ut. Allt lodrinn måste putsas bort, vilket görs med manuellt med ett putsverktyg. Lodet blir mycket hårt när det har stelnat vilket medför att det är en tidskrävande operation att putsa bort lodet. Efter första lödningen brukar det inte bli så mycket lodrinn eftersom det mesta lodet då sugas in i fogarna. Det blir oftast mer lodrinn vid omlödningarna eftersom fogarna då redan är fyllda med lod. När allt lodrinn har putsats bort kan komponenten godkännas och skickas vidare.

### 6.3 Mätprocess

Det sista som sker med komponenten i denna process är att lödfogarna kontrolleras med hjälp av ultraljud. Ultraljudsutrustningen måste först ställas in så att sändaren och mottagaren är riktade mot varandra, vilket är en förutsättning för att mätningen skall kunna utföras på ett korrekt sätt. För att kontrollera att utrustningen är rätt inställd gör man först en provmätning med hjälp av en kalibreringskropp, en så kallad master. Det är en detalj som används som referens för att ställa in utrustningen. Den master som används innan denna mätning är en detalj med en lödfog som innehåller några kända defekter. Först görs en mätning på masterns lödfog och kontrollerar att mätresultatet innehåller de kända defekterna och är bra för övrigt. Om mätresultatet ser rätt ut så placeras istället flygmotorkomponenten i fixturen för ultraljudsmätningen. Komponentens sänks ner i ett vattenkar, där mätningen sedan utförs. Maskinen som utför mätningen är helt automatiserad. Operatören startar därför bara ett program när komponenten är nedsänkt i vattenkaret. Komponentens börjar rotera och maskinen mäter sedan de 22 lödfogarna nerifrån och upp. Varje lödfog kan variera någon millimeter från det givna basmättet. För att försäkra sig om att man ändå mäter hela fogen så är maskinen programmerad att börja mäta någon millimeter före fogen och sluta lite efter fogen. Maskinen är inställd att flytta sig 0,455 mm uppåt för varje varv som komponenten roterar. När mätningen är klar så översätts mätningen till en digital bild. Bilden visar, med olika färger, hur bra ultraljudet har kunnat passera genom lödfogen. Ett exempel på hur en sådan bild kan se ut kan ses i figur 6.1 nedan. Den mörkblå färgen innebär att inget ljud har gått igenom. Alltså är det ingen lodtäckning vid mörkblått. Ljusblått och turkos innebär något bättre täckning. Gult innebär mycket bra täckning. Där motståndssvetsningen görs blir det 100 % bindning vilket gör att det kommer att synas ett tydligt, gult, prickigt mönster i varje bild, som alltså motsvarar punkterna från motståndssvetsningen.



Figur 6.1 Exempel på färgbild efter ultraljudsmätningen

Färgen avslöjar hur bra bindning lödfogen har i varje punkt. Bilden konverteras, i datorn, till en svartvit bild. När bilden skall konverteras så görs en förenkling. Överallt där lodet har en täckning på 50 % eller mer så räknas det som att täckningen är 100 %. Där täckningen är mindre än 50 % så räknas det som att täckningen är 0 %. Man får då en svartvit bild som visar att lodet har fullständig bildning eller ingen bildning alls, se figur 6.2 nedan. I denna bild så motsvaras alltså svetspunkterna av svarta prickar (100 % bindning). Det är sedan denna bild som används för att avgöra om lödfogen kan godkännas. En operatör placerar en 8,9 mm lång rektangel över bilden, där lodets täckning är som bäst. 8,9 mm är det undre kravet på lödfogens längd. Datorn beräknar vilken procentuell täckning lodet har inom detta område.



Figur 6.2 Exempel på svartvit bild efter ultraljudsmätningen

I de så kallade stödbanden som är en typ av delkomponent som den fullständiga komponenten byggs ihop av så är det hål längs hela fogen. Hålen är till för att lod skall kunna monteras även där. Detta lod sugas in i spalten runt hålet men kommer även fylla ut hålet och stelna som en ojämn yta över hela hålet. Eftersom ytan blir ojämn så kommer ultraljudet att studsas bort när det träffar den ytan. Det gör att dessa ytor kommer att synas tydligt som vita prickar efter ultraljudsmätningen. Eftersom det endast är en plåt i tjocklek på dessa ställen så är det sant att det inte blir någon bindning i hålen. Från och med 2007, det vill säga från och med då data har samlats in, har det inte skett någon förändring i ultraljudsmätningen. Detta avsnitt ger svar på frågorna F1, F2 och F4.

Det som kan variera vid ultraljudsmätningen av lödfogarna är på vilket sätt komponenten placeras. Efteråt körs ett automatiserat program och utvärderingen sker på ett operatörsberoende sätt, vilket ger svar på fråga F3.

För att få en bild över hur detaljen förändras genom tillverkningsprocessen skapades en processkarta där alla operationer fram till första lödning fanns med. I processkartan fanns alla ingående samt utgående delar för vardera operationen utritade för att enkelt kunna se vad som tillkommer i varje operation, se bilaga 4.

## 7. ÅSKÅDLIGGÖRANDE AV FÖRBÄTTNINGSOMRÅDEN I TILLVERKNINGSPROCESSEN

Efter att ha gjort processgenomgången konstaterades att det fanns osäkerhetsfaktorer i processen som kan leda till att lödfogarnas kvalitet varierar. För att kunna arbeta vidare med dessa osäkerhetsfaktorer var det viktigt att visualisera dem. För att få en bild över eventuella områden som kan förbättras konstruerades ett fiskbensdiagram. För att få in alla aspekter

tillfrågades ett flertal operatörer från olika operationer i processen för att se vad de ansåg att det kunde finnas för förbättringsområden. Process- och detaljansvariga var även de med och diskuterade kring förbättringsområden. Resultatet samlades in och sammanställdes i ett fiskbensdiagram (Bilaga 3) enligt metoden 7M (se kapitel 2.6 Fiskbensdiagram). Ett extra ben lades till med ”tekniska krav”. Det är dessa krav från ultraljudsmätningen som säger vad som är en tillräckligt bra fog. De problemorsaker som ansågs vara extra avgörande rödmarkerades i fiskbensdiagramet.

De förbättringsområden som ansågs vara extra avgörande i fiskbensdiagramet (Bilaga 3) var lagringstider, nya operatörer, renlighet och kvalitet på band. Langringstider och en ren miljö ansågs extra avgörande då långa lagringstider och orena miljöer för delkompletter samt detaljen efter rengöring ökar risker för oxidationer och orenheter. Då många moment i tillverkningen är hantverkskrävande operationer ansågs upplärning av nya operatörer som väldigt viktigt. Lodspalter, det vill säga både spaltbredd och mellanrum, mellan band ansågs vara extra avgörande då dessa styr hur bra kapillärkraften verkar samt hur mycket lod som kan appliceras till varje fog. Rengöring under tillverkningens gång är väldigt viktigt då det avgör hur bra lodet senare kan väta mot ytorna i fogarna. Stop-off:en ses som en extra avgörande problemorsak då det visats att i dagsläget inte lyckas stoppa lodet helt. Kvaliten på ingående band ansågs ha stor betydelse då bandens geometri påverkar vissa mått på komponenten.

## 8. UPPFÖLJNING AV KOMPONENT

Den dokumentation som finns från tidigare tillverkade komponenter säger ingenting om vad spalterna och överlappen vid fogarna hade för mått innan lödningen. För att se om det går att koppla ihop olika tillverkningsmått med resultat från ultraljudsmätningen följdes och dokumenterades en komponent genom hela processen. Det enda som finns dokumenterat är att måtten är godkända inom tolerans på ritningen. För att kunna se vad tillverkningsmåtten har för inverkan på resultatet skulle man behöva veta vad måtten är vid fogarna. Alltså vad det finns för förutsättningar att applicera lod, samt lodets möjligheter att breda ut sig. Därför valdes det att göra en uppföljning av en komponent. En komponent följdes och dokumenterades genom hela processen, från montering till ultraljudskontroll. När komponenten var fullständigt monterad, alltså innan det skulle tvättas och lödas (se Kapitel 5, Processgenomgång) så genomfördes en mer omfattande mätning. Det var två mått som ansågs påverka lödningen. Det ena måttet är spaltbredden mellan plåtytorna, alltså de ytor som lodet skall sugas in mellan. Det andra måttet är ytan att applicera lod på. Vid de fogar som appliceringsytan mäts går det inte att mäta spaltbredden eftersom utrymmet är begränsat. Vid de fogar som spaltbredden kan mätas är det aldrig en begränsad appliceringsyta för lod. Det var alltså bara aktuellt att mäta ett av måtten vid varje fog. Spalten, mellan plåtytorna, som lodet skall sugas in i har ett mått på ritningen som den inte får överstiga. Det finns dock inget undre mått. Skulle plåtytorna ligga mot varandra, helt utan spalt, skulle fogen alltså bli godkänd. Om fallet skulle vara så att ingen spalt alls fanns så skulle inte något lod kunna sugas in. Man vill alltså undvika att ytorna ligger mot varandra, helt utan mellanrum. Det andra måttet som skulle mätas, det som blir mellan fogarna vid monteringen, finns inte med

på ritningen. Dessa mått styrs endast av andra mått på ritningen, vilket gör att de tillåts variera en aning. En referenspunkt valdes på komponenten. Sedan gjordes tolv mätningar, jämt fördelade, runt om komponenten för varje fog. Mätningen utfördes med skjutmått och bladmått, beroende på vilket av måtten som skulle mätas. Fullständiga mätresultat finns i Bilaga 6. När komponenten mäts med ultraljud så placeras komponenten i en fixtur. Komponentens kan roteras när man placerar den i fixturen och alltså kommer mätningen att kunna starta vart som helst i radiellt led på komponenten. För att kunna jämföra resultatet med de tidigare mätningarna var det nödvändigt att komponenten placerades på så sätt att mätningen startade i den tidigare bestämda referenspunkten. När ultraljudsmätningen var utförd kunde resultatet enkelt och tydligt jämföras med måtten som blivit när komponenten tillverkades. Bilaga 7 visar, på ultraljudsresultaten, var de tidigare mätningarna utförts och vilka mått som dokumenterats. Bilder från ultraljudet på hur vardera fog såg ut samlades in och markeringar ritades ut för att se på ett ungefär vart måtten hade tagits. Detta gjordes för att lättare kunna jämföra bilderna med måtten.

När man studerar mätningarna innan ultraljudet, Bilaga 6, ser man att samtliga fogar har väldigt smala spaltbredder med undantag för AY20 som har något större. Generellt är spaltbredden mindre eller lika med 0,05 mm för fogarna men för AY20 är den mellan 0,10–0,15 mm. Förändringen längs varvet för spaltbredden är relativt låg för samtliga fogar. I de områden där mellanrummet mättes konstaterades det att ytan där lod appliceras för lödning var väldigt liten. Men ser att mellanrummen varierar väldigt mycket över ett varv. Om mellanrummen jämförs med varandra så ser man att mellanrummet mellan AY11 och CD-2 är större i förhållande till resterande.

Då Ultraljudsresultatet, Bilaga 7, studeras kan man se att sju fogar hade under 80 % i total lodtäckning. Om man jämför ultraljudsresultatet med det resultat som uppmättes innan kan man se om dessa mått har någon inverkan på hur bra fogen blir. Då det är endast en detalj som har följts under en lödning kan man inte dra några säkra slutsatser. Man kan eventuellt se vissa tendenser men vidare studier krävs för att fastställa det exakt. De underkända lödfogarna AY7 och AY12 är de lödfogar med flest mätvärden som är mindre än 0,05 mm utav alla AY-fogarna. En annan observation är dock att fogarna AY16 och AY9 vilka är de fogar som följer med flest mätvärden som är mindre än 0,05 mm har höga lodtäckningar, 84 % respektive 94 %. Om man studerar mellanrummen så ser man att det är endast på ett ställe där bägge fogarna blir godkända, AY11 och CD-2, för de resterande mellanrummen så blir alltid AY fogen underkänd. Om man tar fram ett medelvärde för mätvärdena på mellanrummet ser man att AY11/CD-2 har högst medelvärde med 1,50 mm medan AY19/CD-3 har 0,71 mm, AY15/CL har 0,95 mm och AY6/CD-1 har 1,00 mm.

Ultraljudsbilderna visar att de underkända fogarna skiljer sig från varandra. BA-3 fogen har ett jämnt men smalt utseende medan AY fogarna är breda men har fläckvisa områden med väldigt liten lodtäckning. Variationen för spaltbredden över ett varv är så liten att man inte kan se någon samhörighet på en liten eller stor spaltbredd med en låg eller hög lodtäckning. Om man studerar variationen för mellanrummen längs ett varv tillsammans med ultraljudsbilderna så ses inget mönster att ett stort mellanrum skulle ge en hög lodtäckning eller tvärt om.

## 9. KRAVBILD FÖR ULTRALJUDSMÄTNINGEN

För att se om det finns en möjlighet att ändra kraven för ultraljudsmätningen är det viktigt att förstå hur kravbilden ser ut i dagsläget. GKN har tidigare tillverkat komponenten på beställning från en kund. I dagsläget ansvarar dock GKN själva för komponenten. När GKN tog över ansvaret för komponenten så fortsatte man att tillverka komponenten enligt de krav som kunden tidigare ställt på komponenten. Det enda underlaget som finns för de krav som ställs på komponenten är utifrån den ritning som kunden tidigare gett till GKN. Detta betyder att själva orsaken till hur kravbilden ser ut inte går att få fram. Detta stycke ger svar på fråga F5.

### 9.1 Krav på överlapp och spaltbredd

De krav som finns gällande lödfogens överlapp samt spaltbredd har stor betydelse på hur bra lödfogens hållfasthet och kvalitet blir.

Lödfogens överlapp styrs helt av vart i toleransområdet de ingående detaljerna ligger. Man antar att lödfogen kommer att sprida ut sig över hela detaljernas överlapp. I och med det blir lödfogens bredd samma som detaljernas överlapp. Enligt ritning ligger toleransen för detaljernas överlapp mellan 8,9 mm – 10,6 mm. Vid ultraljudskontroll mäts minimimåttet som är 8,9 mm. Enligt kravspecifikationen som tidigare kom från kunden så är överlappen på 9,65 mm, nominellt mått, på grund av motståndssvetsningen. Man har sedan utgått från att lödfogen skall täcka hela överlappet.

Då spaltbredden har stor betydelse på hur bra kapillärkraften verkar har man enligt ritning satt ett maximimått på 0,25 mm.

### 9.2 Ultraljudskrav

Det finns två stycken krav på lödfogen som kontrolleras okulärt och med ultraljud.

Det första kravet är att det inte får finnas några genomgående defekter i lödfogen. En genomgående defekt betyder att fogen inte är tät. Detta krav kontrolleras okulärt. Kravet finns på grund av att flygmotorkomponenten ska ha ett kontrollerat kylningssystem.

Det andra kravet som lödfogen behöver uppfylla kontrolleras med ultraljud. Ritningen ger utrymme att utvärdera detta krav på två olika sätt för att fogen skall kunna godkännas:

Alternativ 1 säger att lödfogen måste bestå av minst 80 % bindning. Om det finns mindre än 50 % bindning i ett område får utbredning inte vara större än 25,4 mm per område. De sammanlagda områdena under 50 % får tillsammans inte ha större utbredning än 203,2 mm per fog.

Alternativ 2 säger att lödfogen måste bestå av minst 80 % bindning. Om det finns mindre än 75 % bindning i ett område får utbredning inte vara större än 50,8 mm per område. De sammanlagda områdena under 75 % får tillsammans inte ha större utbredning än 203,2 mm per fog. Se Bilaga 5.



## 10. PARAMETERSTUDIE AV ULTRALJUDSMÄTNINGEN

För att se vad det skulle ge för resultat att minska lödfogens bredd utfördes en parameterstudie av mätresultatet. Den gick till på så sätt att bredden av rektangeln som markerades över mätresultatet successivt minskades. Det gick då att utläsa vilken procentuell täckning lodet hade inom det reducerade området. Detta skulle ge indikationer på vilken procentuell ökning det skulle medföra att minska lödfogens bredd. Detaljen som studien utfördes på var samma detalj som har följts genom hela processen, se kap 7. När parameterstudien skulle genomföras diskuterades det med operatören för att se hur stor studie som var rimligt att genomföra ur ett tidsperspektiv. Gemensamt konstaterades att en studie med fyra olika bredder på utvärderingsområdet skulle vara rimligt. Att ta fram fler värden skulle ta lång tid. Parameterstudien utgick från den nuvarande bredd som används och valdes att stegvis minskas till hälften. De fyra mått som bredderna valdes till var 8,9 mm, 7,565 mm, 6,23 mm och 4,895 mm. Resultatet sammanställdes i en tabell där man kan se för vardera fogen vad en successiv minskning av överlappets område som utvärderas skulle ge för påverkan av procentsatsen, se Bilaga 7.

Resultatet visar att en minskning av bredden generellt ökar procentsatsen på samtliga fogar genom hela studien. Även om procentsatsen ökar är det endast två underkända fogar som blir godkända genom studien. Om man studerar bilderna på lödfogarna från ultraljudet kan man se att de fogar som förblir underkända har fläckvisa områden med väldigt låg procentsats vilket gör att även den totala procentsatsen blir låg. Av de fyra fogar som förblir underkända är det tre av dessa som ligger intill en CD fog.

Parameterstudien har en tendens att visa att en minskning av bredden på den yta som utvärderas ger ett bättre resultat. Dock visar studien att endast en minskning av bredden inte ger fler godkända detaljer. I studien har en detalj utvärderats vid första lödning. För att se hur stor inverkan en minskning av bredden har skulle en större studie behöva göras med flera detaljer samt samtliga lödningar för varje detalj.

## 11. PARAMETERSTUDIE AV PLÅTYTORNAS ÖVERLAPP

För att se vad en minskning av plåtyornas överlapp skulle kunna få för konsekvenser på komponentens egenskaper gjordes en parameterstudie där överlappet vid varje fog successivt minskades. För att förenkla parameterstudien valdes endast en liten del av komponenten ut att genomföra studien på.

### 11.1 Förutsättningar

För att genomföra en studie av plåtyornas överlapp användes en 2-dimensionell modell av en liten del av komponenten som GKN tillhandahöll uppritad i ANSYS. I denna modell är lödfogarna ritade som solitt material, se figur 11.1 nedan. Man har approximerat att lödningen skulle ge 100 % bindning i hela överlappet. Eftersom lodet ger en mycket stark metallisk bindning med arbetsmaterialet så är det rimligt att approximera fogarna som solitt material. Det överlappet man har ritat i modellen är det nominella måttet enligt ritning.

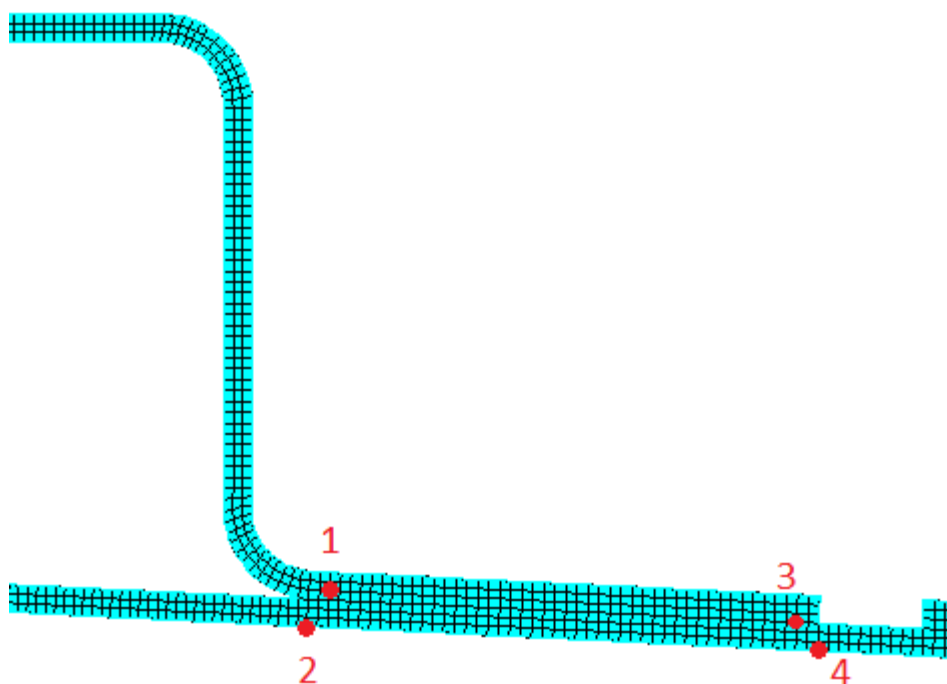


*Figur 11.1 En 2-dimensionell del av komponenten i ANSYS*

Eftersom kravet är att bindningen skall vara minst 80 % så bör man dock inte approximera att det är 100 % bindning i hela överlappet. Det vore mer rimligt att approximera att 80 % av överlappet har full bindning. Det man utvärderar vid ultraljudsmätningen är minsta tillåtna måttet och inte det nominella. Att successivt minska överlappet i modellen men ha kvar samma kraftpåläggning skulle visa hur bland annat spänningar och förskjutningar skulle förändras. Att minska överlappet i modellen skulle kunna innebära olika saker i praktiken. Det skulle kunna innebära att det faktiska överlappet minskas. Men det skulle också kunna innebära att samma överlapp bibehålls men att man tillät lodet att ha en smalare utbredningsyta. Det skulle innebära att ytan som utvärderas vid ultraljudsmätningen minskades. Eftersom modellen antar att bindningen är 100 % skulle det ge en mer realistisk bild om överlappet minskades. Detta på grund av att lödfogarna oftast har en högre bindningsgrad om mätområdet minskas.

## 11.2 Genomförande

De krafter som var pålagda på modellen i ANSYS kommer dels från de termiska spänningarna som uppstår vid stora temperaturdifferenser och dels från tryckskillnaden som blir mellan inner- och yttersidan. De termiska spänningarna kommer att bidra med störst kraft. Modellen med de pålagda bulktemperaturer och övergångstal kan ses i Bilaga 8 sida 2. Den modell som parameterstudien genomfördes på innehöll fem lödfogar. Först skapades 12 stycken nya modeller genom att varje gång minska överlappet vid alla fem fogarna med 2 element motsvarande 0,4 mm. I första modellen så sattes överlappet till 9 mm vilket gjorde att överlappet i den tolfte modellen blev 4,6 mm. Bulktemperaturer och övergångstal fick sedan flyttas i varje modell så att de var definierade mot de nya ytor som blivit synliga i varje modell. En ny beräkning fick köras i ANSYS för varje reducerad modell för att få fram hur komponenten deformerades och vad det blir för spänningar i den. För att få en tydligare bild över hur de olika modellerna varierade i spänningar och förskjutningar togs bilder på en inzoomad fog (bilaga 8 sida 3-6). Bilder på temperaturer, spänningar samt förskjutningar togs på hela detaljen för första och sista modellen se bilaga 8 sida 7-9. För att kunna jämföra resultaten från de olika modellerna valdes fyra punkter vid en av de fem fogarna (se figur 11.2). Dessa punkter valdes då de var i områden som var intressanta ur spänningssynpunkt. Spänningarna vid de fyra punkterna antecknades för alla de tolv modellerna. Då fanns alltså tolv spänningvärden för varje punkt, vid olika lång lödfog. Dessa spänningvärden kunde sedan jämföras för att se hur värdet förändrats i varje punkt när lödfogen minskats. Se Bilaga 9.



*Figur 11.2 De punkter som användes i parameterstudien*

Från bilaga 8 sida 3-6 så ser man att modellerna förhåller sig relativt lika gällande 1:a huvudspänningen samt förskjutningar genom hela studien. Diagrammet visar hur spänningarna varierade i de punkter som studerades. Man kan se att förändringarna inte är stora med undantag för punkt 4 som nästan tredubblas. Spänningarna över lödfogen är dock låga i förhållande till den maximala spänningen över hela modellen.

Om man studerar den första och den sista modellen i bilaga 8 sida 7-9 så ser man att skillnaderna är relativt små. Temperaturerna är stort sett samma för första och sista fallet. Den enda temperaturskillnaden som kan ses mellan modellerna är att området vid lödfog 2 har en något högre temperatur. För 1:a huvudspänningarna kan man inte så någon skillnad ur bilderna från första till sista modellen dock kan man se att högsta tryckspänningen samt högsta dragspänningen minskar i den sista modellen. Högsta tryckspänning är precis där båda banden går ihop till en solid yta vilket gör att värdet kan ses som en felaktighet i modellen då onaturligt skarpa vinklar sker i denna punkt. Skillnaden i förskjutning för första och sista modellen är väldigt små. I området kring lödfog 4 så ökar förskjutningen något. Maxvärdet för förskjutningen ligger på randen i modellen vilket gör att värdet kan vara felaktigt. Detta kapitel ger svar på fråga F6.

## 12. FEM-ANALYS MED HÅLBILD

En FEM-studie genomfördes för att se vilka skillnader spänningar och förskjutningar det skulle bli om samtliga fogar hade hålbild. I dagsläget är det endast 4 av de 22 lödfogarna som har hålbild. Studien utgick ifrån samma 2D-modell i ANSYS som i föregående kapitel. I

studien jämfördes en modell som motsvarar hur detaljen ser ut idag med en modell då samtliga lödfogar hade hålbild.

Från datainsamlingen som gjordes (Kapitel 2) framgick det att de fogar som har hål längs hela fogen aldrig har behövts lödas om. Hålen fyller ingen praktisk funktion mer än att det blir ytterligare ett ställe att applicera lod på. I och med den höga lodtäckning som alltid uppnås på de lödfogar med hål i, vore det intressant att undersöka om det var möjligt att även införa hål på fler lödfogar. En FEM-studie gjordes för att jämföra spänningar och förskjutningar mellan en detalj med samtliga lödfogar innehållande hål och en detalj med solida lödfogar. Det spänningsförhållande som användes kallas ”max släckt” och uppkommer då motorn körs på högsta hastighet. FEM-modellen är en 2D-modell som är den nedre delen av hela detaljen. I FEM-modellen har en varierande bulktemperatur samt värmeövergångstal applicerats längs ytelementen i modellen. Även ett deltetryck har lagts på. För de hål som finns i konstruktionen har man ändrat materialdata för att simulera de rotationssymmetriska hålen. För att veta vilken materialdata som ska användas för de olika hålen har man studerat arean längs ett varv och tagit fram procentandelen solid material respektive hål. Den procentandel solid material har man sedan multiplicerat med sträckgränsen för att få en ny sträckgräns gällande hålbilden. I studien studerades först spänningskoncentrationerna samt förskjutningen för detaljen med solida lödfogar. Nya elementgrupper infördes sedan på samtliga lödfogar och materialdatan byttes ut för att simulera en hålbild över lödfogen. Spänningskoncentrationerna och förskjutningen togs sedan även fram för detaljen med hålbild längs lödfogarna.

Att ändra materialparametrarna motsvarande hålbild i fogarna resulterade inte i några större förändringar med avseende på spänningar och förskjutningar. I denna modell så blev både spänningarna och förskjutningarna mindre när materialparametrarna var ändrade. Eftersom detta är en mycket förenklad modell så är det orimligt att använda några siffervärden från FEM-resultaten. Det man dock kan reflektera över är att förändringarna i spänning och förskjutning är mycket små. Detta tyder på att det vore rimligt att komponenten fortfarande är tillräckligt styv även om alla fogar skulle ha en hålbild. För att få en något bättre bild så skulle samma FEM-studie behöva utföras på en modell av hela komponenten.

### 13. SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER

Efter projektets genomförande är slutsatsen att det i stort sett finns två olika sätt att ta sig an den förbättring som GKN skulle behöva genomföra. Tanken från början var att man ville ändra kravbilderna för ultraljudsmätningen, för att på så sätt minska antalet omlödningar. Det skulle kunna vara det ena sättet att angripa förbättringsarbetet på. Efter att ha sammanställt data från tidigare komponenter och kartlagt tillverkningsprocessen har vi kunnat konstatera att tillverkningen är något opålitlig, vilket gör att det finns andra sätt att angripa förbättringsarbetet på. Att försöka förbättra och göra tillverkningsprocessen mer pålitlig är det andra sättet att angripa förbättringsarbetet på. Vi har sett en trend som tyder på att lödfogarna ständigt har blivit sämre de senaste åren. Eftersom vi har kunnat konstatera att ingen förändring har skett vid ultraljudskontrollen så är det alltså inte mätningen som ligger bakom förändringen. Med dessa kunskaper anser vi inte att det skulle räcka att fokusera på ett av tillvägagångssätten. Det krävs en kombination av dem för att fullständigt kunna genomföra förbättringsarbetet. En förändrad kravbild vid ultraljudsmätningen ihop med en pålitligare tillverkningsprocess skulle göra att antalet omlödningar skulle kunna minskas.

För tillverkningsprocessen har vi åskådliggjort och sammanställt vad det kan finnas för orsaker i processen som kan påverka resultatet av lödfogarna. I fiskbensdiagrammet och processkartan kan man tydligt se vad det finns för orsaker som kan påverka resultatet.

Grundförutsättningar som krävs för att få en så bra lödfog som möjligt är att ytorna är rena, spaltbredderna är optimerade för att få en så bra kapillärkraft som möjligt och att tillräckligt mycket lod finns tillgängligt för att fylla lödfogen. Utifrån de förhållanden som krävs för att få en så bra fog som möjligt identifierades några orsaker ur fiskbensdiagrammet som ansågs påverka resultatet mest. Dessa orsaker var lagringstider, nya operatörer, renlighet och kvalitet på band. Lagringstider och renlighet nämns då under tid samt orena förhållanden kan oxider och orenheter bildas vid komponentens ytor som motverka kapillärkraften. Nya operatörer och kvalitet på band ansågs också var viktiga då spaltbreddernas utseende och mängden lod som är tillgänglig för lödfogen beroende dels på skickligheten hos operatören och de ingående detaljernas kvalitet. För att förbättra resultatet för utgående komponenter rekommenderas GKN att se över tillverkningsprocessen med åtanke på de ovannämnda orsakerna som anses ge störst påverkan på resultatet.

För tillverkningsprocessen har vi åskådliggjort och sammanställt, utan att värdera, vad det kan finnas för orsaker i processen som kan påverka resultatet av lödfogarna. I fiskbensdiagrammet och processkartan kan man tydligt se vad det finns för orsaker som kan påverka resultatet. Skulle GKN gå vidare med detta arbete så borde nästa steg vara att värdera hur stor inverkan de olika orsakerna har på resultatet av lödningen. De saker som har störst inverkan skulle man sedan utreda hur de skulle kunna förbättras och säkras. Detta skulle förhoppningsvis leda till en mer pålitlig process.

Ultraljudsmätningen verkar vara ett säkert steg i processen. Eftersom komponenten endast placeras i fixturen och mätprogrammet är helt automatiserat så anses mätresultaten därför vara pålitliga. Vi anser därför inte att någonting skulle behöva ändras med själva mätningen av

komponenten. Det som skulle kunna ändras är vilka krav som finns på lödfogarna när de mäts med ultraljud.

Ett tydligt mönster vi har kunnat se är att de lödfogar där lod även kan appliceras i hål alltid blir bra. Vi har därför undersökt möjligheterna att göra likadana hål i alla delkomponenter så att lod kan appliceras på samma sätt vid alla fogar. Eftersom hålen inte fyller någon mer funktion än att vara ett extra ställe att applicera lod på så skulle inte komponentens praktiska funktion förändras något om denna ändring gjordes. Vi skapade en förenklad 2D-modell av komponenten och ändrade materialparametrar på plåtytorna vid fogen för att det skulle motsvara att det var hål i delkomponenterna. Denna studie visade att det inte skulle bli några större förändringar i spänning eller förskjutning på komponenten om man valde att göra hål vid alla fogar. Det går inte att säga någon exakt siffra på hur mycket bättre lodtäckning det skulle bli vid fogarna om man kunde tillföra lod genom hålen. Våra slutsatser tyder dock på att lodtäckningen sannolikt skulle öka om man tillförde lod även från hålen. Att göra hål i alla delkomponenter skulle alltså kunna vara ett alternativ för att nå en högre lodtäckning för fogarna. Detta är en rekommendation för fortsatt arbete på GKN.

Efter att ha följt en komponent genom hela processen kunde vissa teorier styrkas med avseende på resultatet av lödningen i förhållande till tillverkningsmått. På ena sidan av varje stödband är det två fogar som hamnar mycket nära varandra vilket gör att ytan att applicera lod på är begränsad. Denna yta tillåts variera eftersom den inte är måttsatt på ritningen utan endast styrs av andra mått. Teorierna innan var att lodtäckningen blev sämre om appliceringsytan var mindre. Detta på grund av att det inte går att applicera tillräckligt mycket lod i mellanrummet. Lodet kommer då inte räcka till för att fylla upp bägge fogarna. På den komponent som följdes upp så var det ett mellanrum som blev något större än de andra tre. Det var endast fogen vid det stora mellanrummet som blev godkänd. För att se om detta är ett återkommande samband så skulle fler komponenter behöva mätas och följas upp på samma sätt. Skulle man sedan tydligt kunna se ett samband mellan appliceringsyta för lod och lodtäckning så skulle man kunna gå vidare med att försöka öka ytan mellan fogarna, för att på så sätt kunna applicera mer lod.

Det finns ett antal krav på lödfogarna vid ultraljudskontrollen. Det är framförallt två av kraven som vi har undersökt om man skulle kunna ändra. Det ena kravet är den procentuella lodtäckningen. Det är ett krav som är satt av en tidigare kund. GKN har sedan fortsatt att följa detta krav. Eftersom kravet kommer från en kund så går det inte att hitta någon information om hur kravet är framtaget. Det är därför svårt att veta om det går att ändra på kravet utan att utföra hållfasthetstester och liknande. Vi har inte haft möjlighet i detta projekt att gå vidare med att undersöka möjligheterna att ändra detta krav. Ett annat krav är bredden på lödfogen. Lödfogen måste vara minst 8,9 mm bred. Vi gjorde en parameterstudie för att se vad det skulle bli för skillnad om man minskade lödfogens bredd. Resultatet visade att spänningarna i materialet skulle minska men att förskjutningarna skulle öka. Att förskjutningarna ökar skulle kunna påverka komponenten på andra ställen så detta skulle man behöva undersöka noggrannare för att veta bättre vad konsekvenserna skulle bli. Vi gjorde även en parameterstudie i ultraljudskontrollen för att se vad det skulle få för konsekvenser om kravet på lödfogens bredd minskades. På den komponent som undersöktes efter första lödningen, så

hade den sju stycken underkända fogar. Att minska kravet på lödfogens bredd till hälften skulle inneburit att endast två lödfogar till blivit godkända. Alltså att fem fortfarande skulle blivit underkända. Efter att ha tittat på bilderna från ultraljudskontrollen så konstaterades att de fogar som fortfarande skulle blivit underkända var väldigt ihåliga och hade alldeles för lite lod i fogen. Detta tyder på att man skulle behöva göra något för att öka mängden lod i fogen. Att minska kravet på lodbredden är ingen lösning för att få dessa fogar godkända.

Kapitel 11 visar en tendens på vad en minskning av överlappet vid fogarna skulle få för konsekvens men för att få tillräckligt med teoretisk bakgrund för att kunna besvara fråga F7 så krävs vidare studier, vilket inte har hunnits med i denna rapport.

## REFERENSER

- [1] GKN Aerospace, *Our Heritage*. [Online]. <http://www.gkn.com/aboutus/ourheritage/Pages/default.aspx> [Hämtad: 2014-05-18].
- [2] GKN Aerospace. [Online] [www.gkn.com](http://www.gkn.com) [Hämtad: 2014-03-09].
- [3] GKN Aerospace, *Engine Systems: DR990 Engine services that keep the flow*. [Online]. [http://www.gkn.com/aerospace/media/resources/Brochures/Product\\_Sheet\\_DR990.pdf](http://www.gkn.com/aerospace/media/resources/Brochures/Product_Sheet_DR990.pdf) [Hämtad: 2014-03-09].
- [4] Haynes International. (2008-05-20). *Haynes 188 Alloy*. [Online]. <http://www.haynesintl.com/pdf/h3001.pdf> [Hämtad: 2014-02-07].
- [5] SECO, *Material background: The essential material characteristics of Haynes 188*. [Online]. <http://www.secotools.com/sv/Global/Segment-Solutions/Aerospace-Solutions/AS-Material-main/Heat-resistant-super-alloys/Inconel-71879/> [Hämtad: 2014-03-05].
- [6] Svetskommisionen (1987). *Motståndssvetsning*. Kungälv: Goterna.
- [7] J. Anthony von Fraunhofer. (2012). *Adhesion and Cohesion*. [Online]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3296218/pdf/IJD2012-951324.pdf> [Hämtad: 2014-05-19].
- [8] Encyclopaedia Britannica, *Cohesion*. [Online]. <http://www.britannica.com.proxy.lib.chalmers.se/EBchecked/topic/124597/cohesion> [Hämtad: 2014-05-18].
- [9] Shull, P.J. (2002). *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*, New York City, NY, USA: Marcel Dekker.
- [10] Kay, D. *Brazing Questions Part-1*. [Online]. <http://vacaero.com/information-resources/vacuum-brazing-with-dan-kay/1139-brazing-questions-part-1.html> [Hämtad: 2014-05-18].
- [11] Carbide Processors Incorporation, *Brazing Flux*. [Online]. <http://www.carbideprocessors.com/pages/brazing-carbide/brazing-flux.html> [Hämtad: 2014-05-20].
- [12] TTI, *Advantages of Vacuum Brazing*. [Online]. <http://ttigroup.org.uk/vacuum-brazing> [Hämtad: 2014-05-20].
- [13] Schwartz, M. (2003). *Brazing*. 2. uppl, Ohio, USA: ASM International. [Online]. <http://site.ebrary.com.proxy.lib.chalmers.se/lib/chalmers/docDetail.action?docID=10320354> [Hämtad: 2014-05-18].



- [14] Bergman, b., & Klefsjö B. (2007). *Kvalitet: från behov till användning*. 4. uppl, Lund: Studentlitteratur AB.
- [15] Process map format taget ifrån kursmaterial Chalmers Six Sigma Black Belt kurs

# BILAGA 1

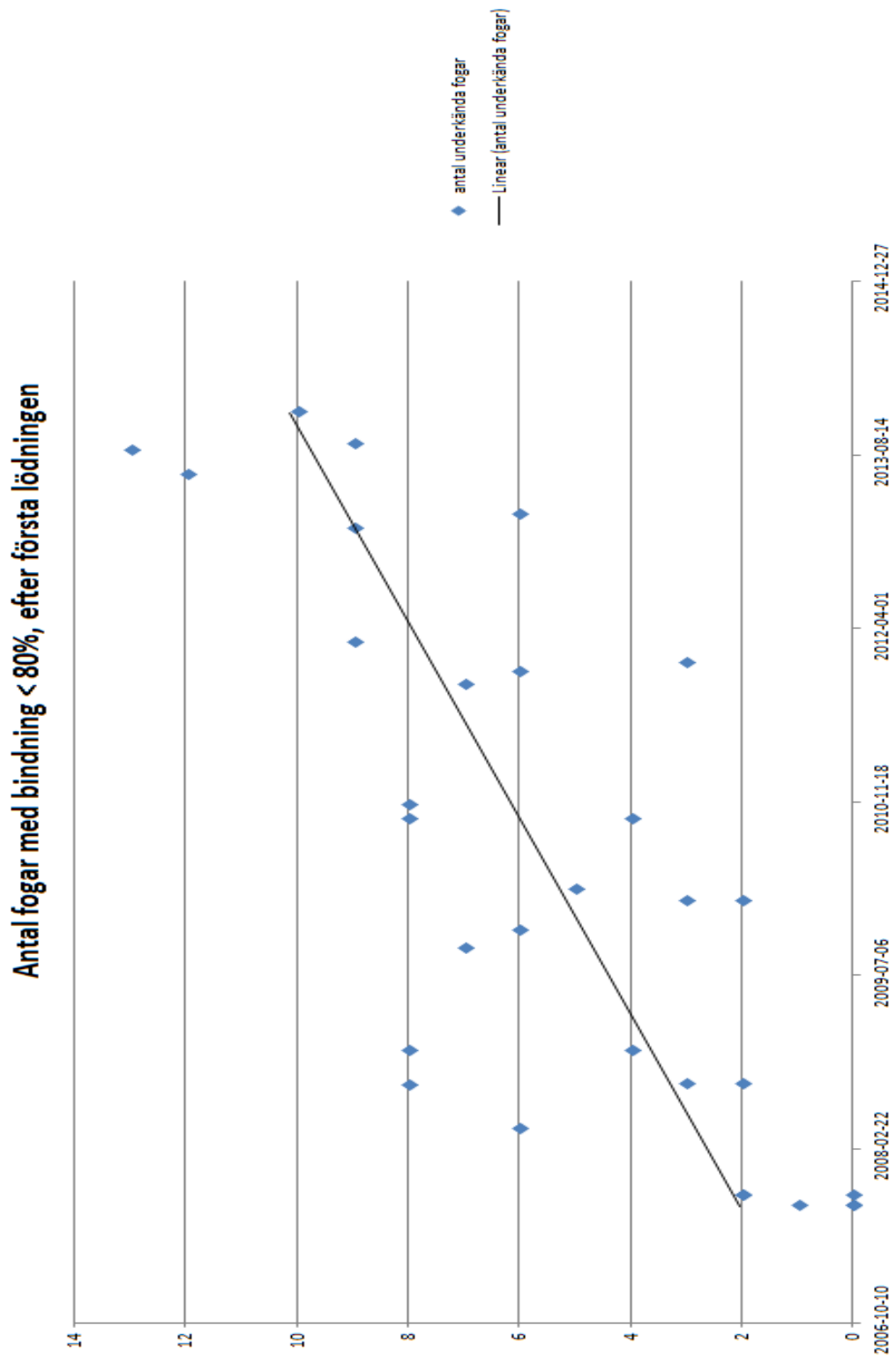
## Sammanställning av mätresultat från ultraljudskontroll

Order	Serienummer	Operation	Datum	AY20	AY19	CD-3	BA-3	AY17	AY16	AY15	CL	CA	AY13	AY12	AY11	CD-2	BA-2	AY9	AY8	AY7	AY6	CD-1	BA-1	AY4	AY3	Operatör ultraljud	Operatör lödning	Ant. UK. fogar
7088924	VOL92905	1000	2007-10-10	98	77	92	87	93	90	83	94	93	92	88	92	92	93	99	90	93	95	90	81	96	74	2695	3181	2
7088924	VOL92905	1050	2007-11-01	98	87	92	88	97	93	85	92	90	92	86	93	91	94	98	91	98	94	89	84	99	99	2695	3181	0
7088925	VOL92906	1000	2007-09-11	94	91	92	93	91	87	91	93	89	90	91	90	91	95	86	87	81	91	91	94	99	72	1143	3181	1
7088925	VOL92906	1050	2007-10-09	95	92	92	91	92	90	93	92	90	92	92	92	91	92	95	95	93	93	90	90	99	99	2695	3181	0
7089405	VOL92915	1000	2007-09-10	91	89	91	83	99	91	89	92	89	92	84	91	90	83	98	88	86	91	85	88	90	84	1143	3181	0
7089406	VOL92916	1000	2007-09-11	96	88	92	90	97	92	86	94	92	90	91	80	91	92	98	89	88	95	88	91	95	80	2704	3181	0
7089407	VOL92917	1000	2007-10-10	89	93	93	91	93	90	83	95	90	89	90	83	91	92	91	91	88	81	90	89	91	81	2695	3181	0
7089408	VOL92918	1000	2007-10-10	91	85	92	84	93	85	78	94	92	96	86	89	91	96	96	90	89	87	92	92	91	78	2695	3181	2
7089408	VOL92918	1050	2007-11-01	88	85	91	83	92	86	86	92	91	96	87	89	88	95	97	89	71	60	91	92	90	99	2695	3181	2
7089408	VOL92918	1055	2008-01-03	92	86	90	80	95	87	85	91	90	96	90	90	88	92	99	92	96	93	89	91	93	99	2704	3181	0
7090717	VOL92919	1000	2008-08-27	90	87	86	85	94	88	73	85	83	88	87	78	83	80	95	89	93	81	84	80	96	73	2704	3024	3
7090717	VOL92919	1050	2008-09-29	85	86	86	82	90	88	83	83	81	85	82	87	83	84	92	86	89	93	83	80	95	96	1143	3024	0
7090718	VOL92920	1000	2008-08-27	94	87	91	84	96	91	83	88	86	96	93	87	83	85	97	95	94	75	88	87	90	74	2704	3024	2
7090718	VOL92920	1050	2008-09-29	88	85	92	80	93	88	81	88	82	93	90	86	83	83	97	90	92	92	88	84	86	97	1143	3024	0
7091854	VOL92921	1000	2008-04-18	81	86	93	89	85	77	74	90	90	88	80	60	90	91	88	82	71	74	90	92	86	66	2695	3181	6
7091854	VOL92921	1050	2008-05-09	82	84	89	85	85	87	90	88	89	86	78	95	89	88	87	84	73	94	88	87	86	95	2695	3181	2
7091854	VOL92921	1055	2008-05-23	85	83	87	81	86	86	89	84	86	85	98	92	86	84	86	85	95	93	85	84	85	95	2704	3024	0
7091855	VOL92922	1000	2008-08-23	85	65	87	80	81	93	58	84	86	77	89	47	83	83	75	80	46	71	83	86	81	75	1143	3024	8
7091855	VOL92922	1050	2008-08-28	86	88	89	81	97	94	84	86	85	96	92	92	84	83	96	97	95	86	83	85	98	96	2704	3024	0
7103034	VOL92929	1000	2008-11-30	80	77	92	88	92	77	67	92	92	94	91	84	90	89	98	95	86	90	90	85	97	71	2695	3024	4
7103034	VOL92929	1050	2009-01-12	98	88	94	86	91	84	80	93	91	96	93	85	91	87	97	96	92	91	90	85	98	98	2695	3024	0

7103035	VOL92930	1000	2008-11-30	83	82	93	86	78	45	40	92	90	75	80	60	91	88	82	71	58	65	92	89	84	81	2695	3024	8
7103035	VOL92930	1050	2009-01-12	82	81	94	85	94	81	81	93	89	97	95	87	92	87	96	97	94	90	92	85	84	98	2695	3024	0
7110906	VOL92952	1000	2009-09-21	78	76	91	80	87	79	63	86	90	91	89	70	88	85	90	85	81	65	90	87	95	66	2695	3024	7
7110906	VOL92952	1050	2009-09-28	95	88	89	84	89	92	82	86	90	81	92	83	88	83	93	92	93	83	90	85	90	97	2704	3024	0
7111945	VOL92956	1000	2009-11-10	86	74	92	83	91	77	65	86	91	90	86	73	89	84	94	93	91	48	90	91	84	73	2704	3024	6
7111945	VOL92956	1050	2009-11-22	87	85	90	80	92	87	77	86	87	92	89	82	87	81	93	95	74	83	91	88	85	97	2695	3024	2
7111945	VOL92956	1055	2009-11-30	90	88	92	86	93	90	80	87	92	95	89	84	88	87	94	96	96	86	91	92	86	97	2704	3024	0
7114236	VOL92957	1000	2010-02-03	86	88	91	81	90	82	63	87	91	94	87	72	90	86	92	87	90	78	94	95	98	80	2704	3024	3
7114236	VOL92957	1050	2010-02-18	86	90	87	86	88	85	85	85	89	94	84	84	87	84	91	88	89	87	92	91	97	98	2704	3024	0
7114238	VOL92958	1000	2010-02-03	91	87	87	83	92	87	64	81	90	95	91	83	87	87	97	97	92	91	91	91	99	74	2704	3024	2
7114238	VOL92958	1050	2010-02-23	92	89	89	85	90	84	90	81	89	91	89	85	87	87	96	93	88	92	90	91	99	98	2704	3024	0
7115279	VOL92959	1000	2010-03-08	81	68	89	76	90	89	75	85	90	91	94	90	90	87	97	78	90	89	92	93	97	74	2704	3024	5
7115279	VOL92959	1050	2010-03-16	99	83	89	90	94	91	87	86	92	92	95	92	90	89	98	96	82	91	94	94	98	97	2704	3024	0
7121254	VOL92987	1000	2010-09-26	91	82	85	79	91	77	73	84	93	96	81	87	86	85	95	71	65	70	90	79	98	75	2695	3024	8
7121254	VOL92987	1050	2010-09-30	85	83	84	84	90	85	85	84	92	96	92	87	86	85	96	95	94	94	90	95	98	98	2695	3126	0
7121254	VOL92987	1878	2011-03-16	87	83	83	85	87	87	85	83	90	98	94	88	83	83	98	98	97	94	87	90	99	ok	special		0
7121256	VOL92988	1000	2010-09-27	86	80	87	82	87	73	66	86	89	86	85	87	88	86	95	82	75	70	85	92	89	80	2695	3024	4
7121256	VOL92988	1050	2010-09-30	85	83	88	86	87	83	83	88	89	86	86	87	89	86	96	89	95	89	90	94	93	94	2695	3024	0
7124085	VOL92989	1000	2010-11-07	88	85	90	79	89	78	62	89	92	92	95	90	94	91	93	79	72	69	94	87	75	72	2704	3024	8
7124085	VOL92989	1050	2010-11-09	86	82	92	88	91	91	75	89	94	88	95	87	95	92	90	95	96	87	94	88	99	98	2695	3024	1
7137430	VOL24846	1000	2011-10-18	88	78	94	85	91	79	67	90	92	94	90	94	93	95	95	46	49	71	94	87	89	76	2695	3024	7
7137430	VOL24846	1050	2011-11-03	91	86	90	78	92	92	76	87	87	88	92	91	88	95	97	88	96	91	95	89	90	98	2695	3024	2
7137430	VOL24846	1055	2011-11-17	91	89	93	87	92	91	80	90	94	95	94	93	93	95	97	91	95	91	96	87	90	98	2704	3024	0

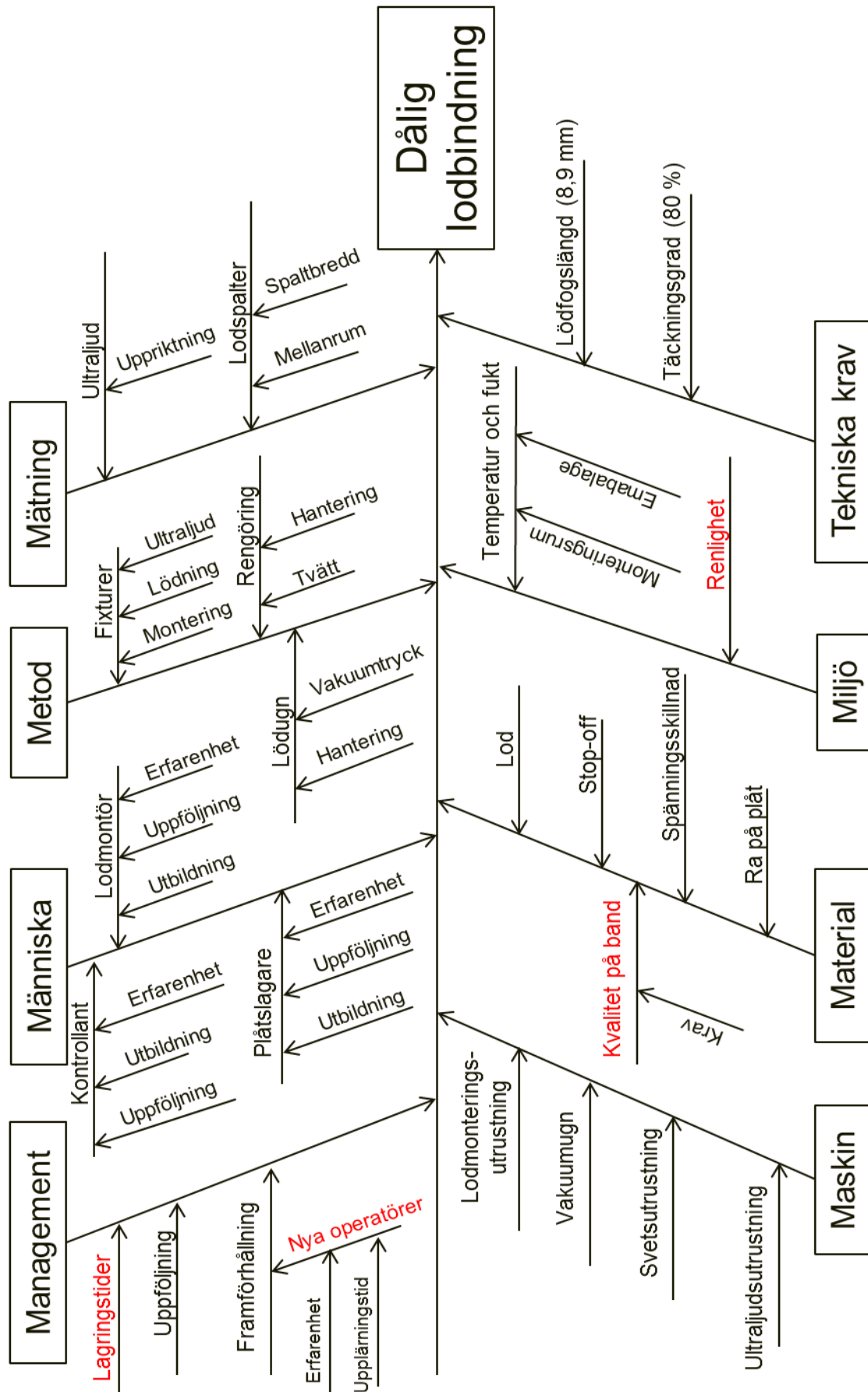
## BILAGA 2

### Hur antalet underkända fogar har förändrats



### BILAGA 3

### Fiskbensdiagram med problemorsaker inom tillverkningsprocessen



**BILAGA 4****Processkarta**

<b>Processkarta</b>		
<b>Projekttitel</b>	<b>Åskådliggörande av problemorsaker i tillverkningsprocessen</b>	
<b>Input</b>	<b>Step</b>	<b>Output</b>
Fixtur Plåtslagare Kvalitet på ingående detaljer (yta och geometri)	OP 200 - SVPU	Ihopsatt komponent mha svetspunkter
Plåtslagare med hammare Ihopsatt komponent mha svetspunkter	OP 300 - TRIM	Komponent med lodspalter inom tolerans
Kontollant Mätutrustning Komponent med lodspalter inom tolerans	OP 400 - KON MÄ	Komponent med kontrollerade mått inom tolerans
Operatör Komponent med kontrollerade mått inom tolerans	OP 500 - TVÄLU	Ren komponent i emballage
Lodmontör Ren komponent i emballage	OP 600 - M	Ren komponent i emballage med monterat lod
Lödugn: vakuumtryck Ren komponent i emballage med monterat lod	OP 700 - LÖVAH	Komponent med färdiga lödfogar
Komponent med färdiga lödfogar Operatör med putsverktyg	OP 800 - PU	Komponent fri från stop-off och lodrinn
Kontrollant Komponent fri från stop-off och	OP 900 - KON	Kontrollerad komponent fri från stop-off och lodrinn

lodrinn																						
Kontrollerad komponent fri från stop-off och lodrinn	OP 1000 - PROUL	Komponent med ultraljudkontrollerade lödfogar																				
UI-utrustning och fixtur																						
Operatör																						
<table border="1"> <tr> <td>SVPU</td> <td>Svetsning</td> </tr> <tr> <td>TRIM</td> <td>Trimmning</td> </tr> <tr> <td>KON MÅ</td> <td>Kontroll</td> </tr> <tr> <td>TVÄLU</td> <td>Tvätt</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>Montering av lod</td> </tr> <tr> <td>LÖVAH</td> <td>Lödning i vakuumugn</td> </tr> <tr> <td>PU</td> <td>Putsa bort stop-off och defekter</td> </tr> <tr> <td>KON</td> <td>Kontroll</td> </tr> <tr> <td>PROUL</td> <td>Ultraljudsmätning</td> </tr> <tr> <td>UL</td> <td>Ultraljud</td> </tr> </table>			SVPU	Svetsning	TRIM	Trimmning	KON MÅ	Kontroll	TVÄLU	Tvätt	M	Montering av lod	LÖVAH	Lödning i vakuumugn	PU	Putsa bort stop-off och defekter	KON	Kontroll	PROUL	Ultraljudsmätning	UL	Ultraljud
SVPU	Svetsning																					
TRIM	Trimmning																					
KON MÅ	Kontroll																					
TVÄLU	Tvätt																					
M	Montering av lod																					
LÖVAH	Lödning i vakuumugn																					
PU	Putsa bort stop-off och defekter																					
KON	Kontroll																					
PROUL	Ultraljudsmätning																					
UL	Ultraljud																					

## **BILAGA 5**

### **Operationsbeskrivning för ultraljudskontroll**

**SEKRETESS**



# BILAGA 6

## Mätresultat från 7177746

nollnivå	mellan						mellan						mellan									
	AY20	AY19	CD-3	BA-3	AY17	AY16	AY15	CL	CA	AY13	AY12	AY11	CD-2	BA-2	AY9	AY8	AY7	AY6	CD-1	BA-1	AY4	AY3
0,10	0,85	0,05	0,05	0,05	0,10	1,00	1,00	<0,05	<0,05	0,10	<0,05	1,16	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	1,00	<0,05	<0,05	0,05	<0,05
0,15	0,25	0,05	0,05	<0,05	0,05	0,80	0,80	<0,05	0,05	0,05	<0,05	1,22	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	1,00	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05
0,10	0,80	0,05	0,05	<0,05	0,10	1,00	1,00	<0,05	0,10	<0,05	1,50	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	0,87	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	0,05
0,15	0,60	0,05	0,05	0,05	0,05	1,50	1,50	<0,05	0,05	0,05	1,62	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	1,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
0,10	0,80	0,05	0,05	<0,05	0,05	0,70	0,70	<0,05	0,05	0,05	1,40	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	1,10	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	0,05
0,15	0,90	0,05	0,05	<0,05	0,05	1,00	1,00	<0,05	0,05	0,05	1,43	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	0,95	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05
0,15	0,50	0,05	0,05	<0,05	0,05	1,40	1,40	<0,05	<0,05	<0,05	1,20	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	0,80	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
0,10	0,70	<0,05	<0,05	0,05	0,10	0,75	0,75	<0,05	0,10	<0,05	1,60	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,00	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,10
0,15	0,80	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,90	0,90	<0,05	<0,05	<0,05	2,00	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,80	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05
0,15	1,00	0,05	0,05	<0,05	0,10	0,80	0,80	<0,05	0,10	<0,05	1,80	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	1,10	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
0,20	0,40	<0,05	<0,05	0,05	0,10	0,80	0,80	<0,05	0,10	<0,05	1,40	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,40	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
0,15	0,90	0,05	0,05	<0,05	<0,05	0,80	0,80	<0,05	<0,05	<0,05	1,66	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	0,90	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

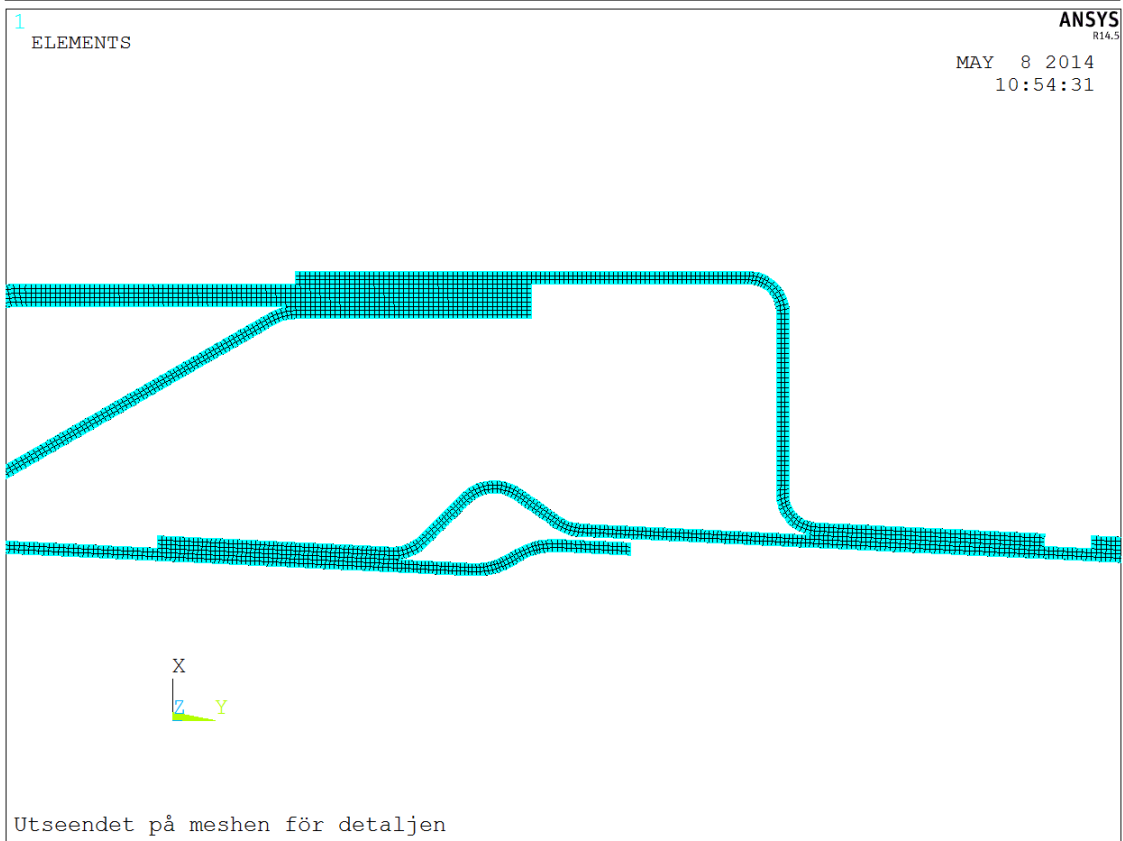
**BILAGA 7****Parameterstudie med minskad bredd på lödfog**

längd i mm	AY20	AY19	CD-3	BA-3	AY17	AY16	AY15	CL	CA	AY13	AY12
8,9 mm	80	67	84	78	80	84	64	85	81	84	65
7,565 mm	87	70	87	87	82	88	69	88	91	89	67
6,23 mm	96	73	87	94	87	88	70	88	97	94	71
4,895 mm	99	75	89	98	89	88	74	89	98	97	77

längd i mm	AY11	CD-2	BA-2	AY9	AY8	AY7	AY6	CD-1	BA-1	AY4	AY3
8,9 mm	90	85	86	94	88	59	56	88	87	81	72
7,565 mm	93	87	94	95	89	60	61	88	95	86	79
6,23 mm	94	87	97	96	90	66	64	87	99	93	82
4,895 mm	94	89	98	96	89	68	67	89	99	97	84

Ordnr.	7177746
Op.	1000
Datum	2014-05-06

# BILAGA 8



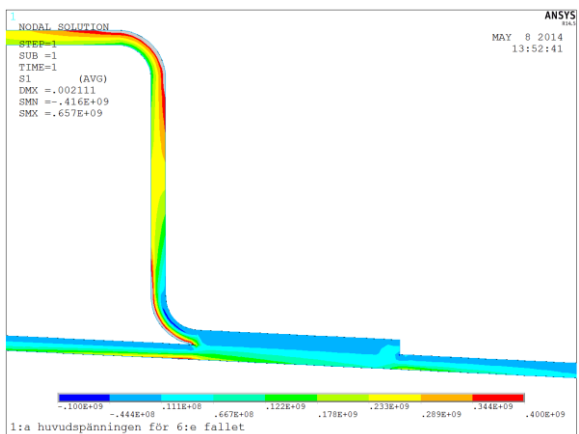
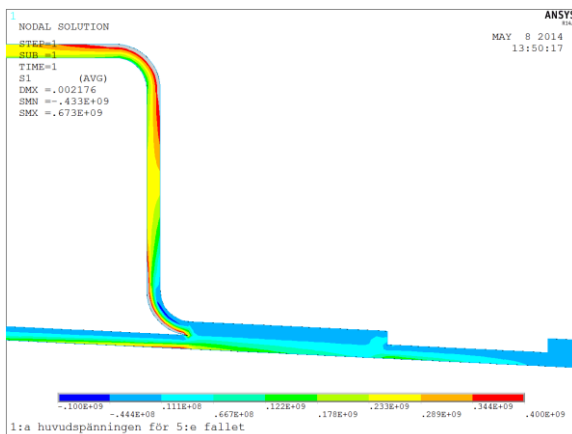
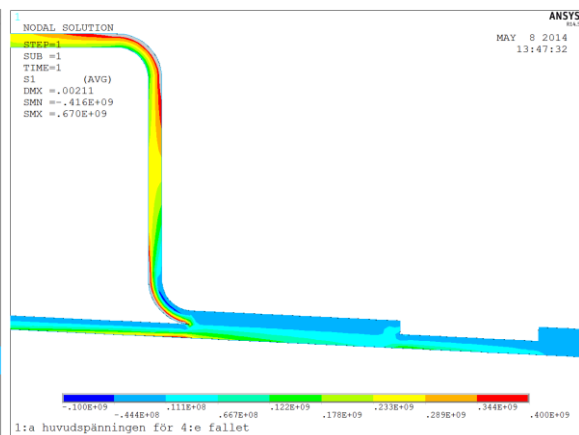
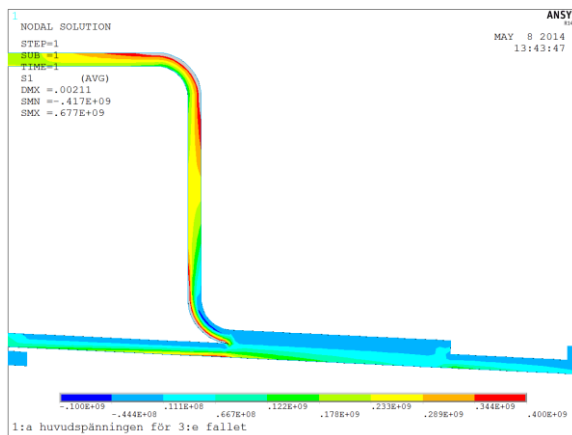
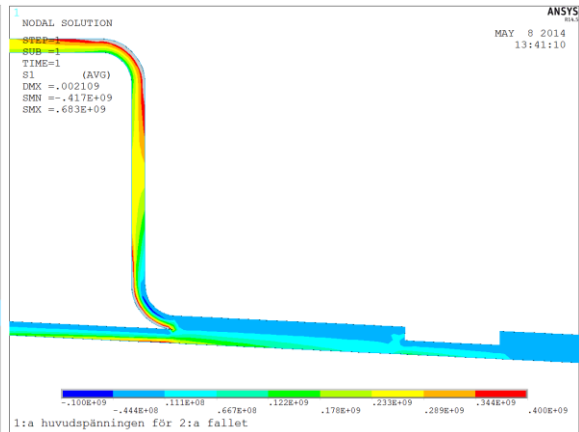
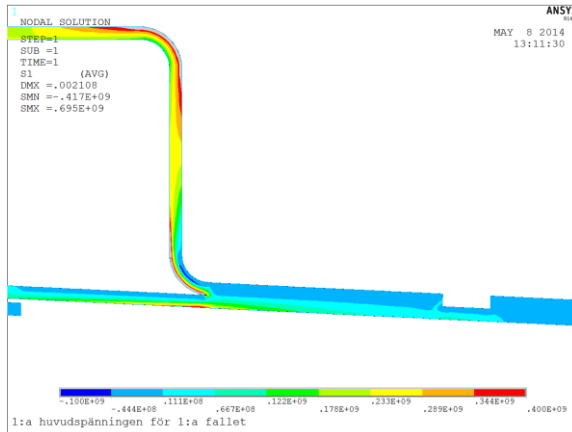
**Bulktemperatur för komponenten**

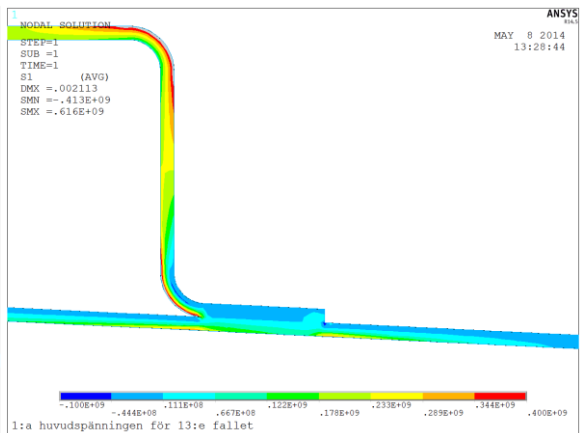
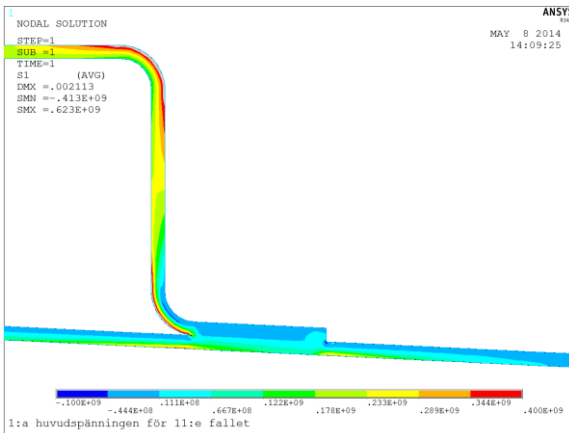
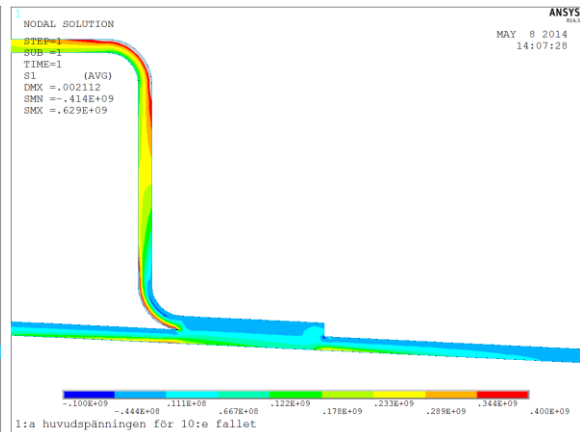
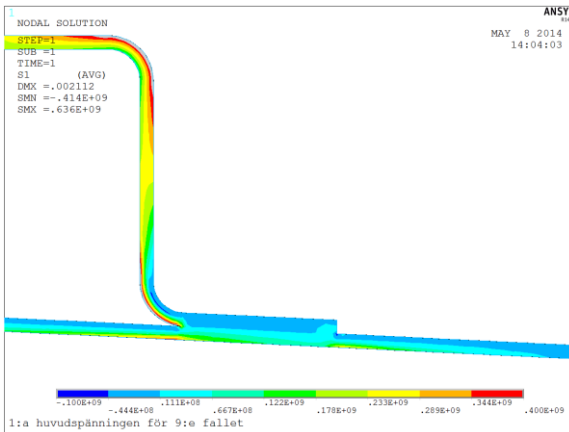
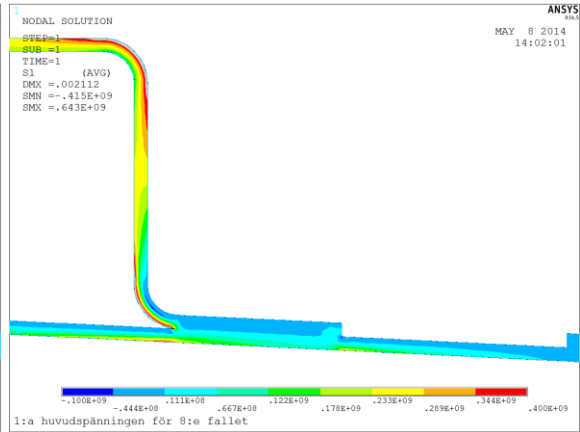
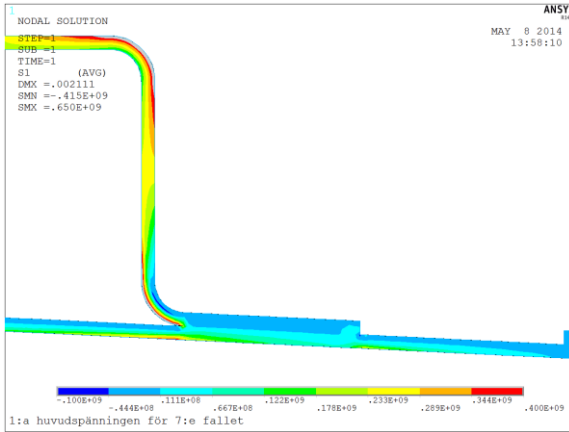
**SEKRETESS**

**Konvektivt värmeövergångstal**

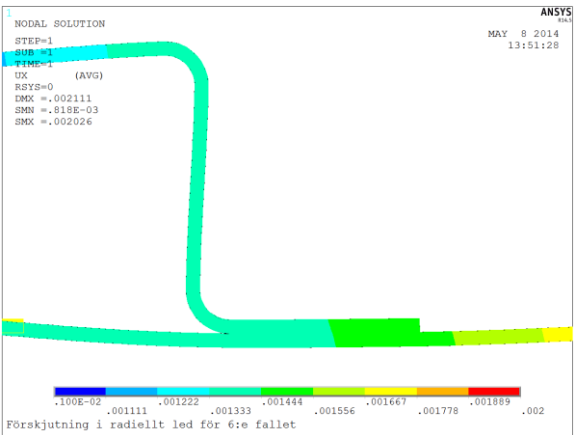
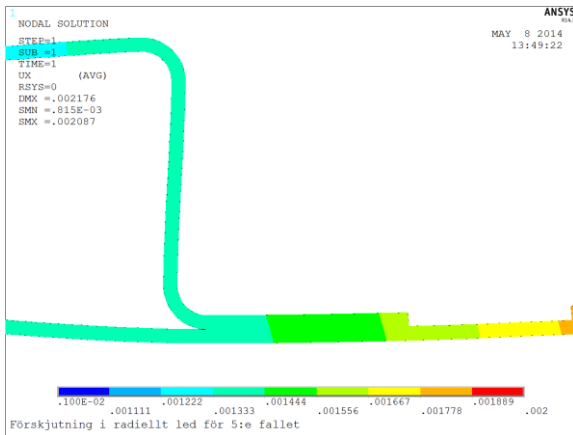
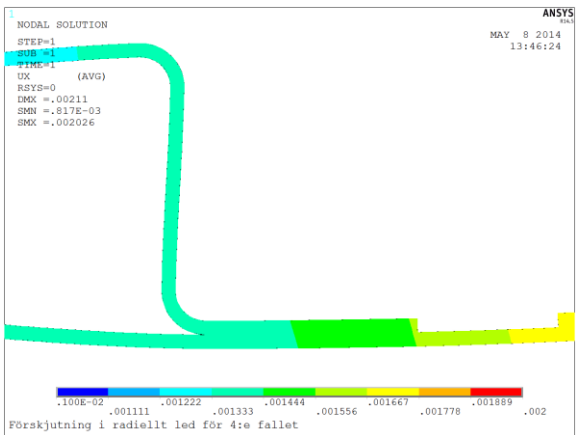
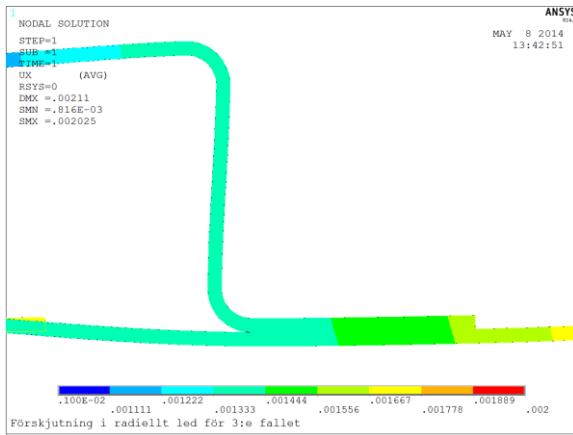
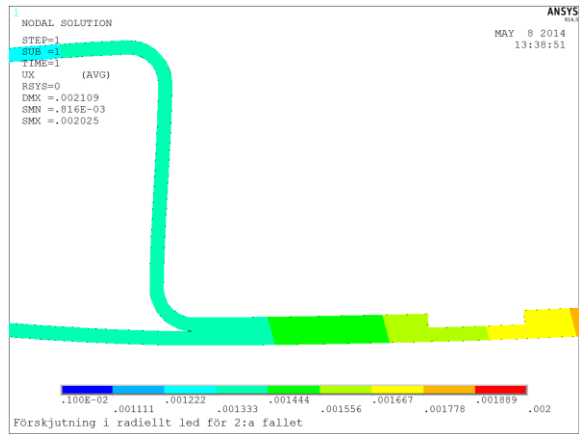
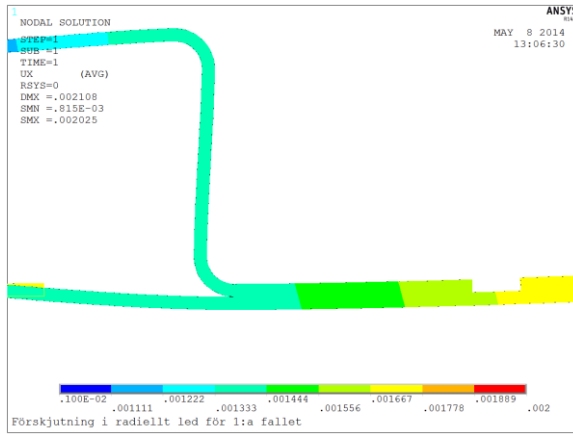
**SEKRETESS**

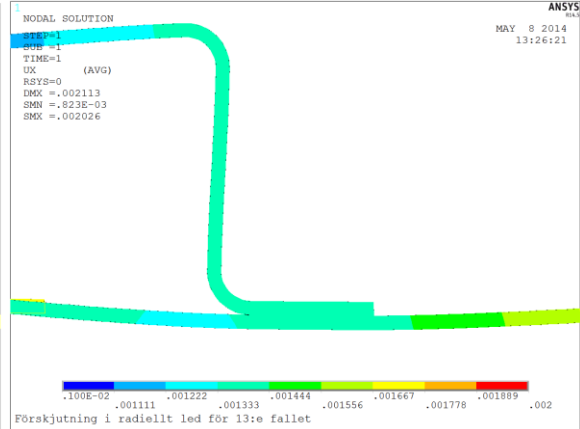
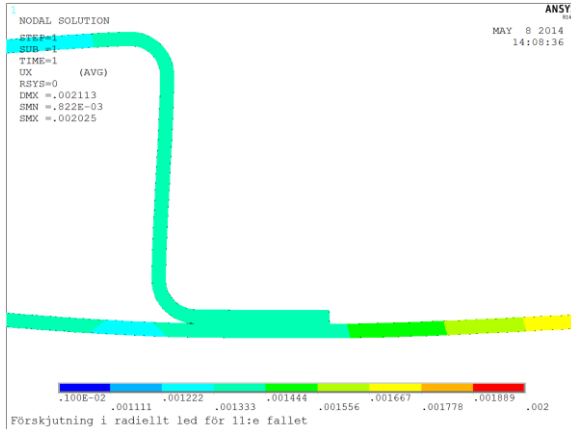
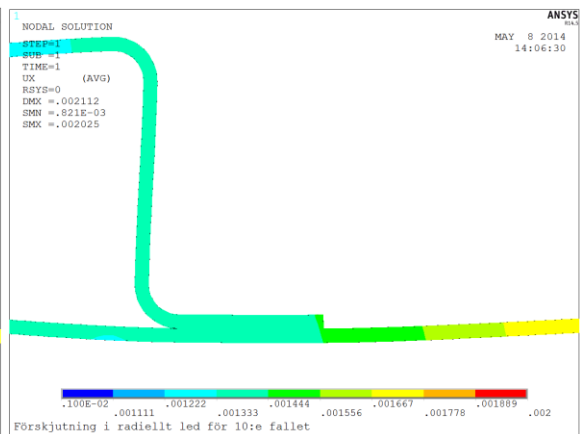
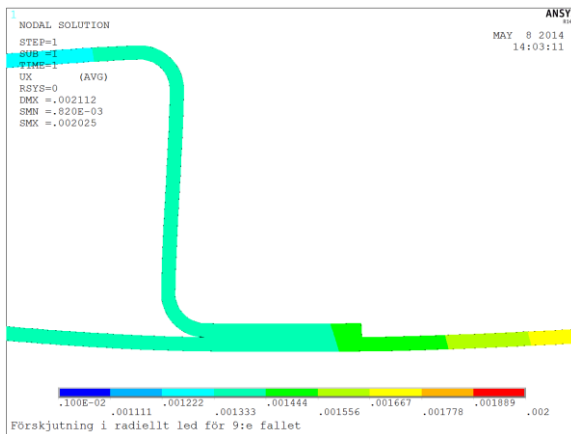
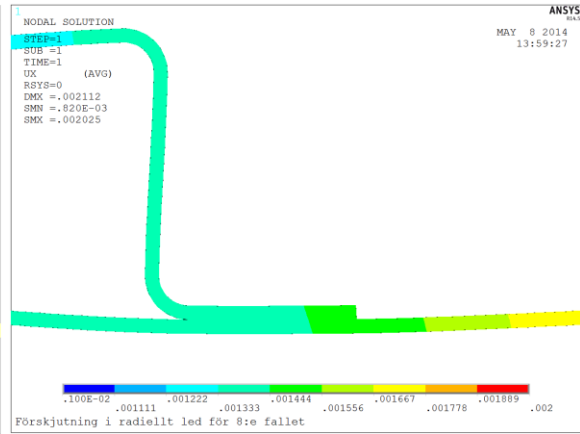
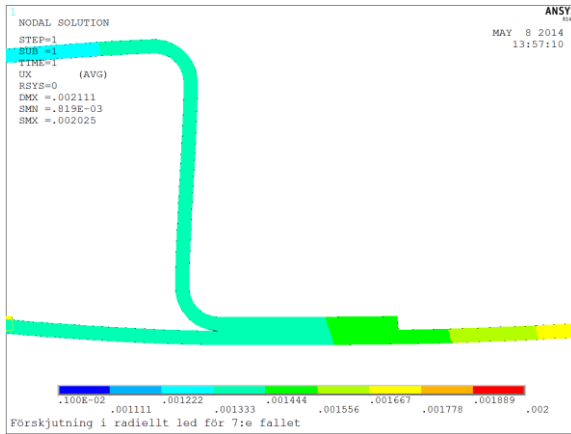
# 1:a huvudspänningen



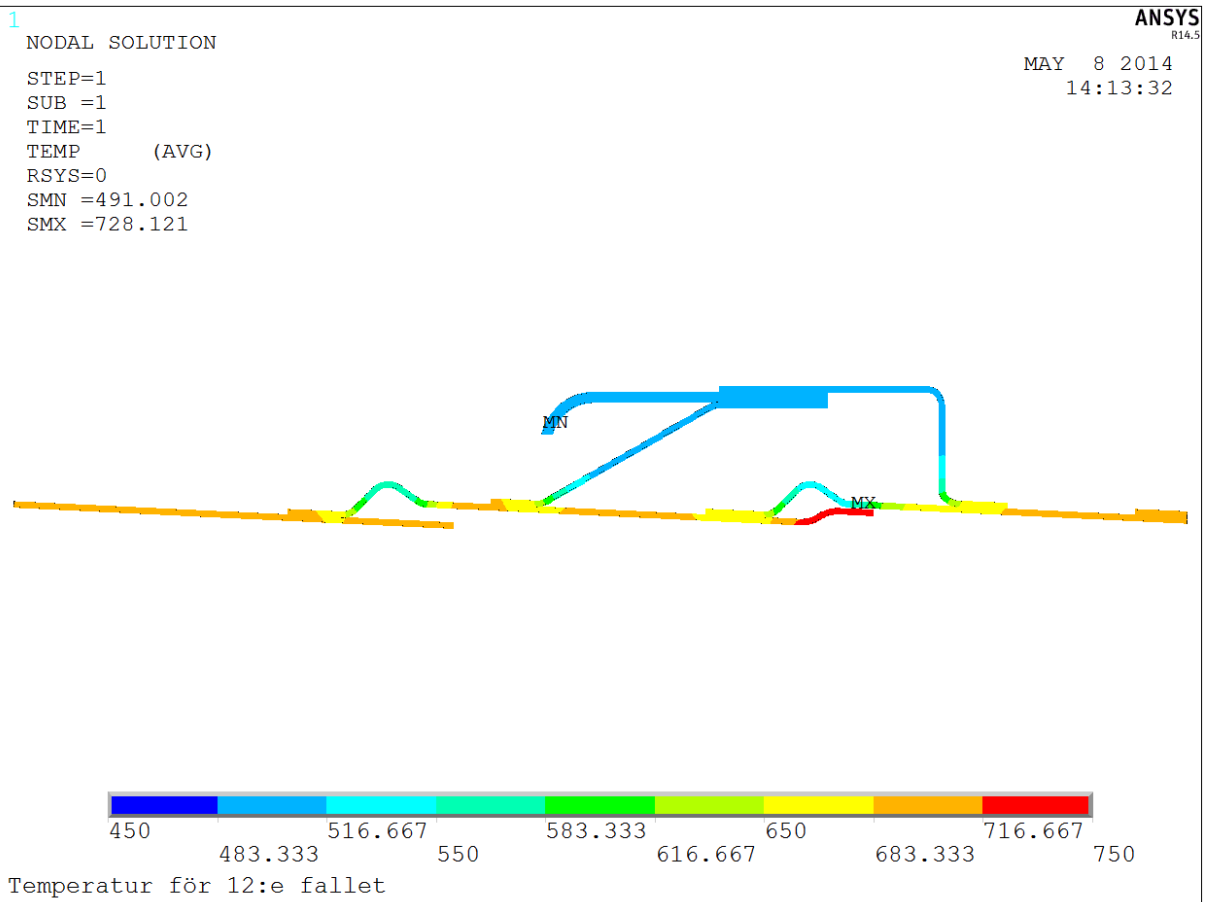
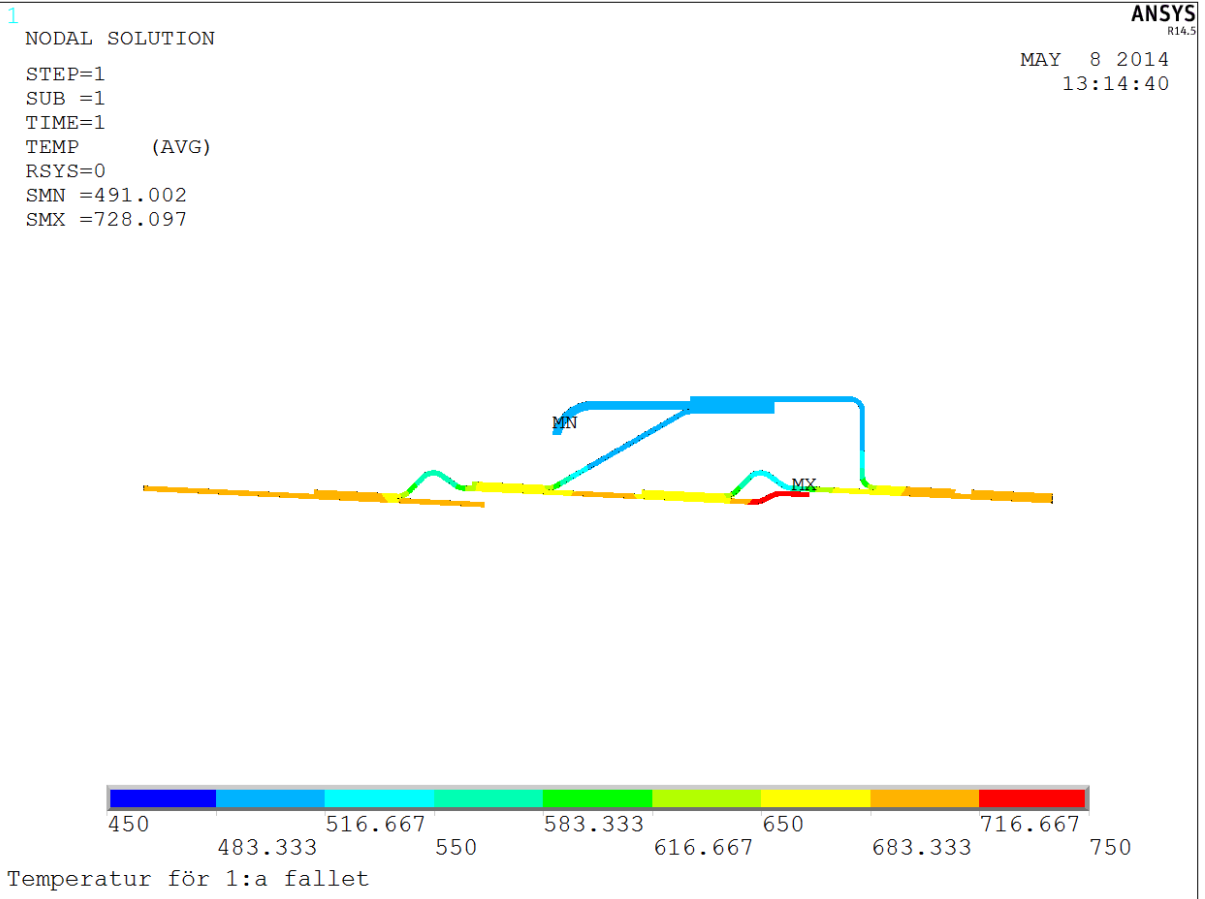


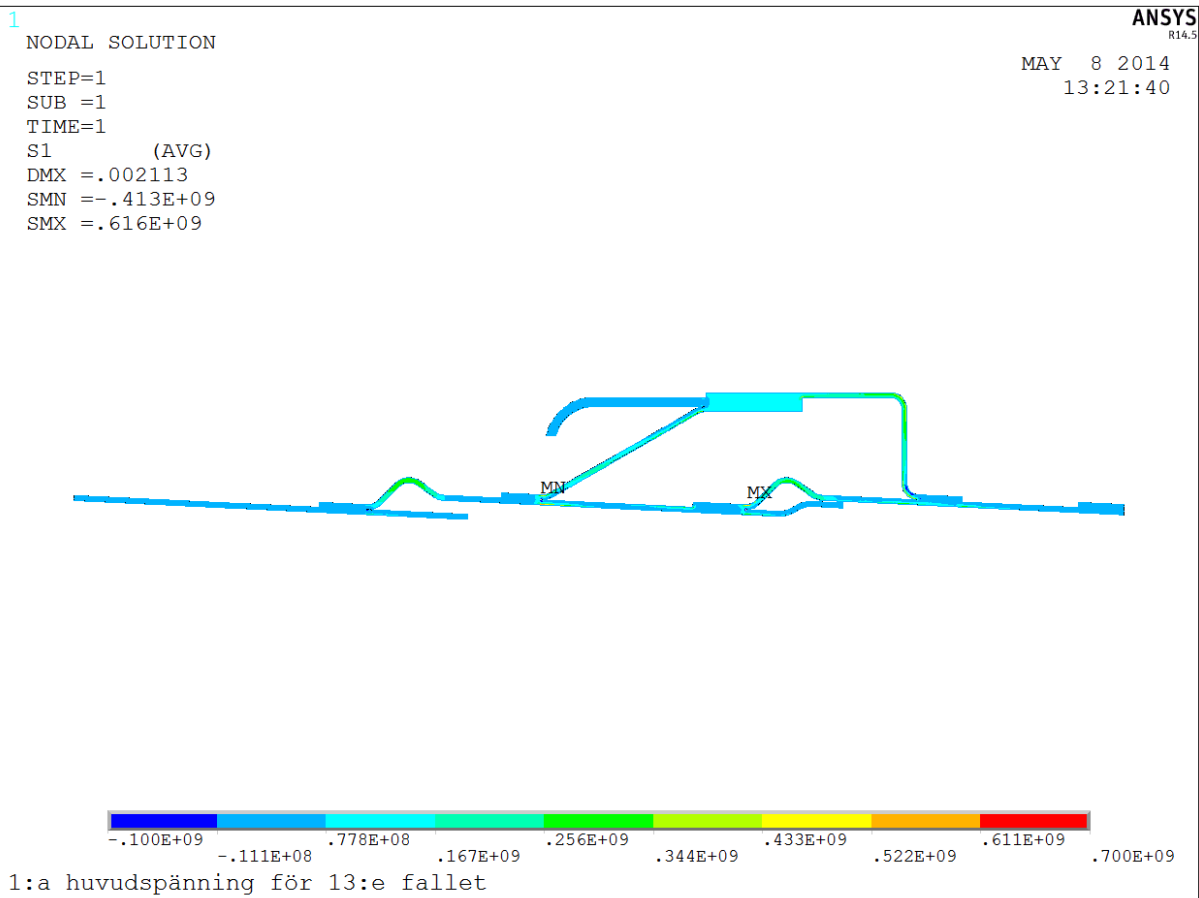
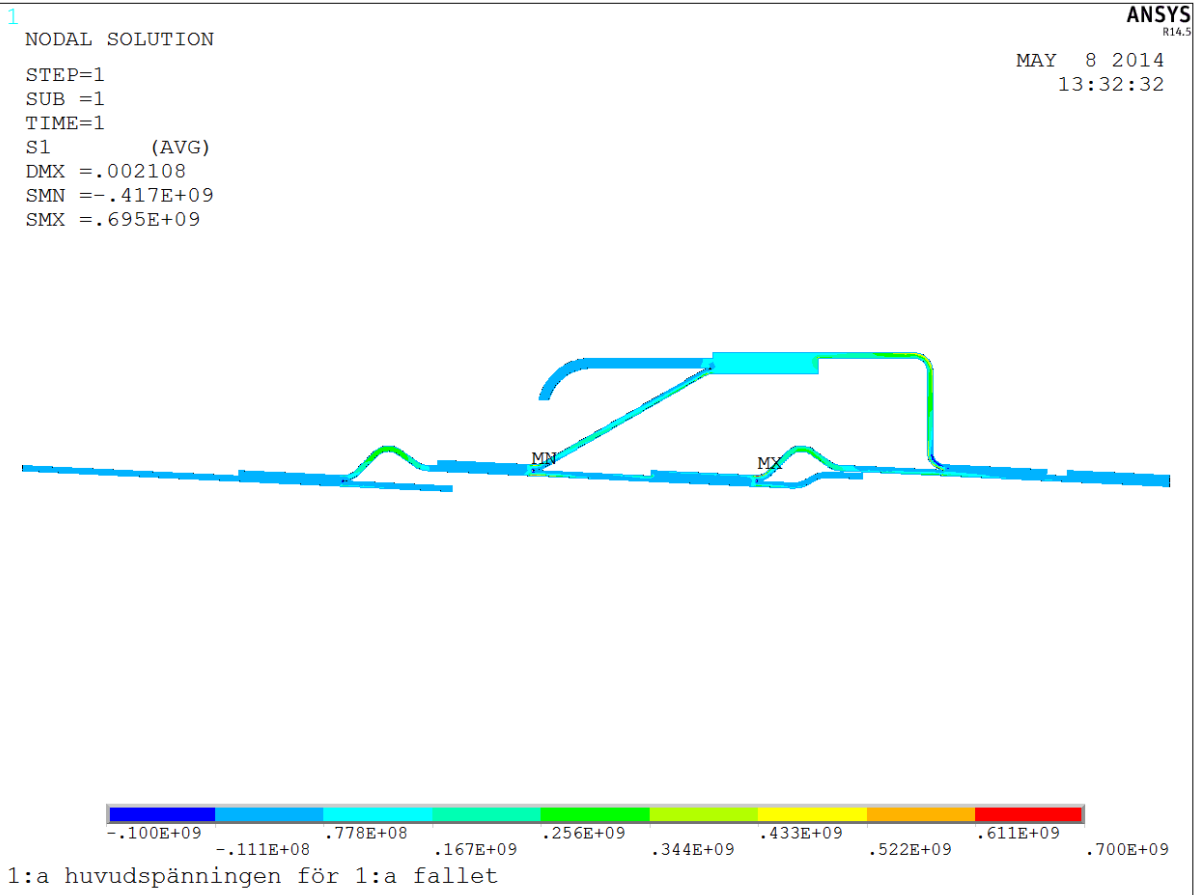
# Förskjutningen

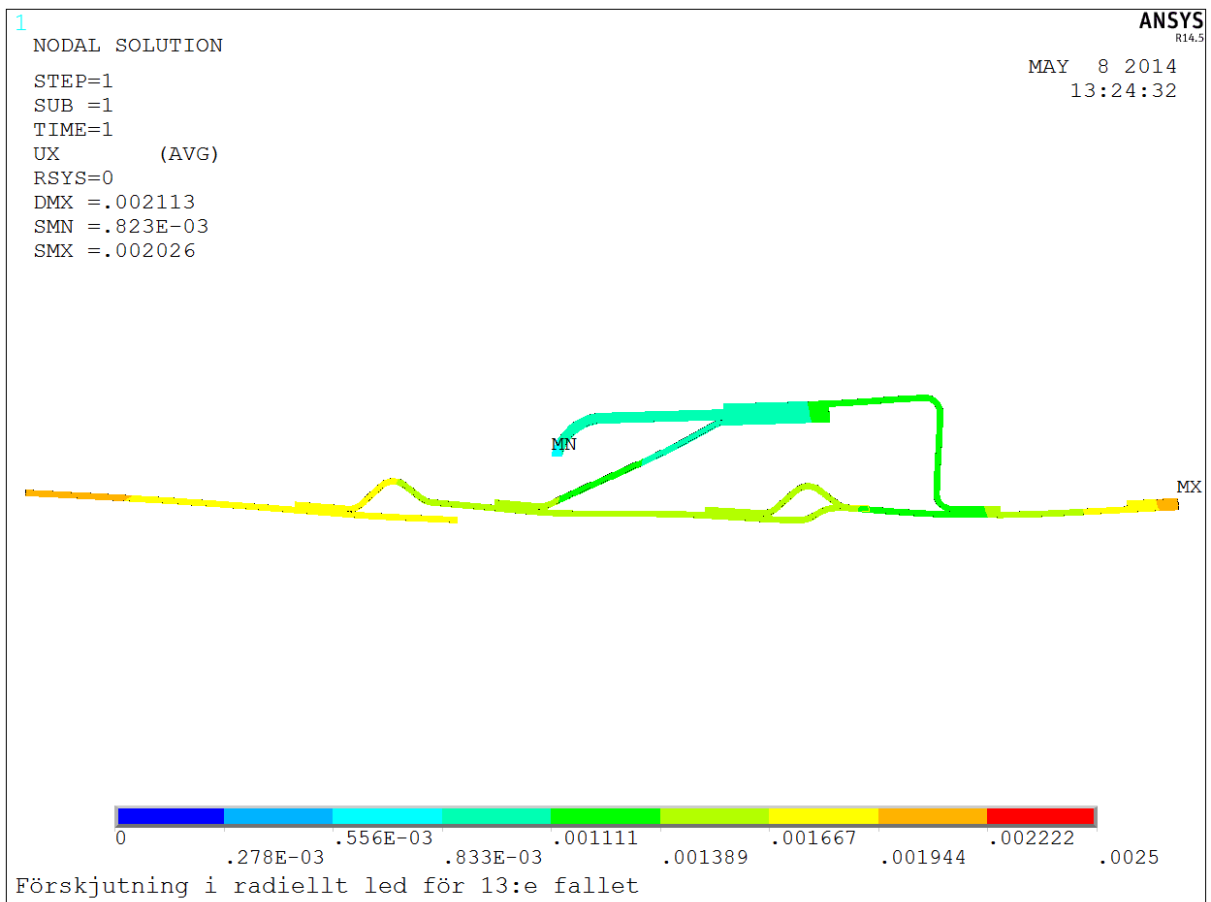
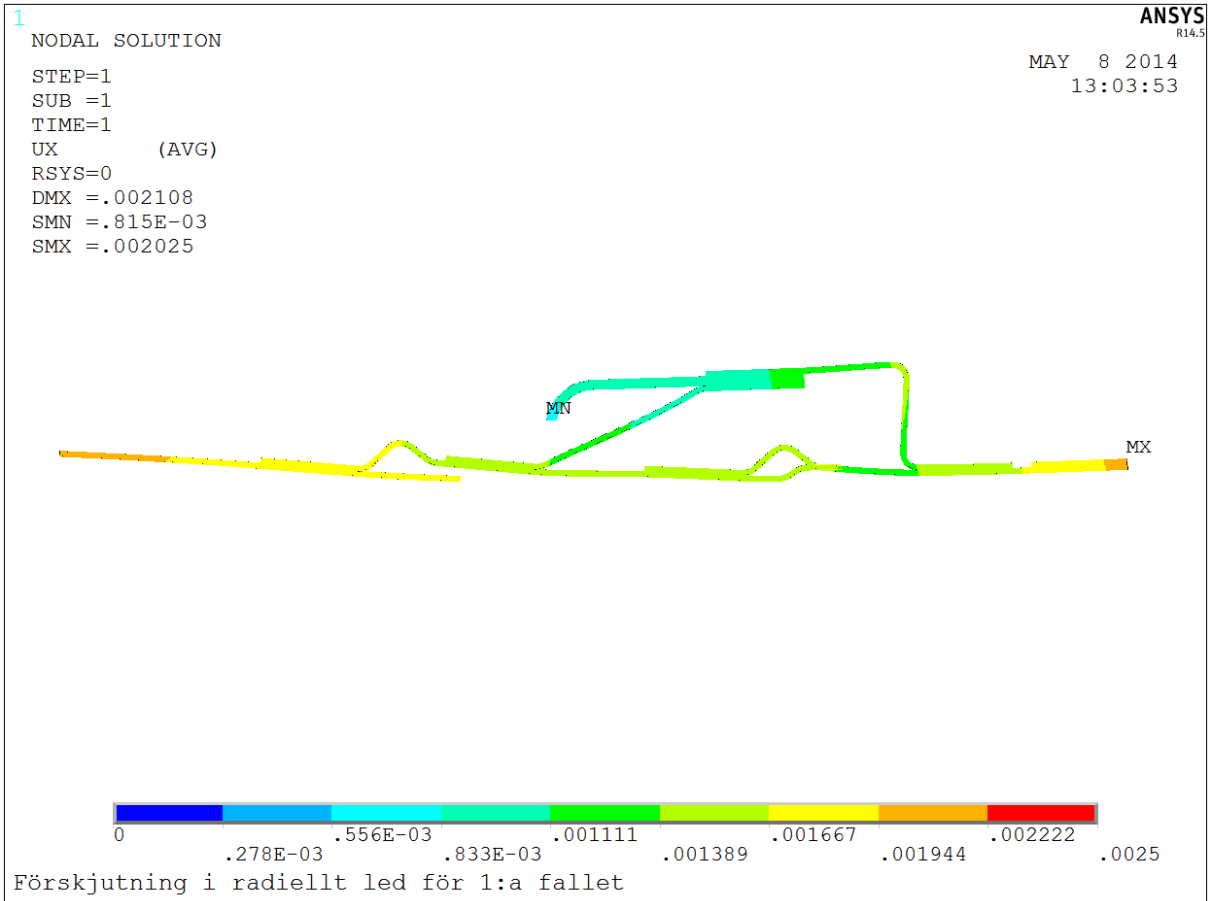








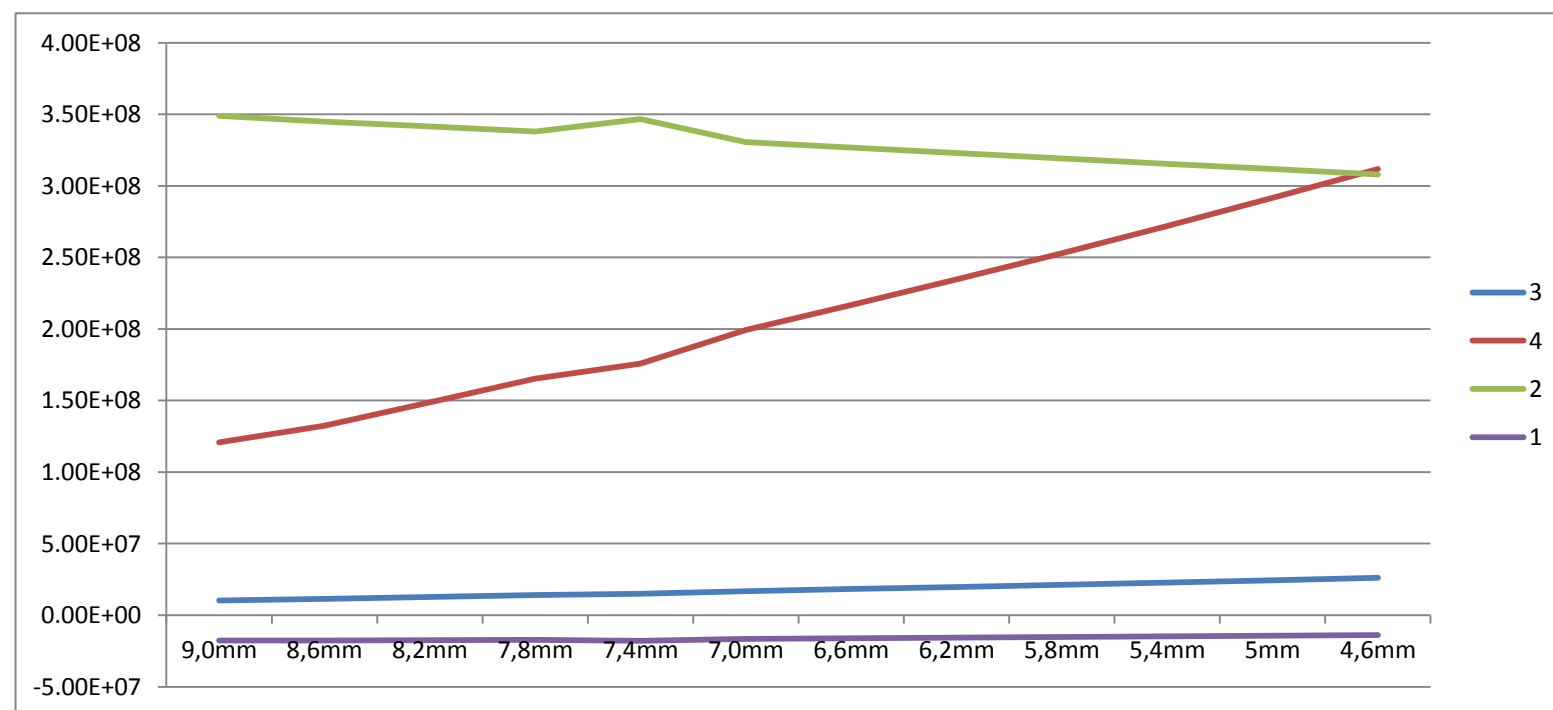




## BILAGA 9

### Utvärdering av punkter i ANSYS

Överlapp	9,0mm	8,6mm	8,2mm	7,8mm	7,4mm	7,0mm	6,6mm	6,2mm	5,8mm	5,4mm	5mm	4,6mm
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1,77E+07	1,77E+07	1,74E+07	1,71E+07	1,80E+07	1,65E+07	1,61E+07	1,57E+07	1,53E+07	1,48E+07	1,43E+07	1,38E+07
3	3,49E+08	3,45E+08	3,41E+08	3,38E+08	3,47E+08	3,31E+08	3,27E+08	3,23E+08	3,19E+08	3,15E+08	3,12E+08	3,08E+08
4	1,03E+07	1,13E+07	1,27E+07	1,40E+07	1,50E+07	1,68E+07	1,83E+07	1,97E+07	2,13E+07	2,28E+07	2,45E+07	2,61E+07
4	1,21E+08	1,32E+08	1,49E+08	1,65E+08	1,76E+08	1,99E+08	2,17E+08	2,35E+08	2,53E+08	2,72E+08	2,92E+08	3,12E+08



## **BILAGA 10**

**Bulktemperatur för komponenten**

**SEKRETESS**

**Konvektivt värmeövergångstal**

**SEKRETESS**

