



# Skjuvspänningsfördelning i limfogarg

Tomi Imppola

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Process och materialteknik
Identifikationsnummer:	
Författare:	Tomi Alexander Imppola
ÄrArbetets namn:	Skjuvspänningsfördelning i limfogar
Handledare (Arcada):	Rene Hermann
Uppdragsgivare:	
<p>Sammandrag:</p> <p>Om man jämför en limfog med alternativa fastsättningsmetoder finns det både för- och nackdelar. En stor fördel med användning av limfogar är att materialet har ingen betydelse jämfört med tex svetsning. Däremot om reparationer krävs kan de limmade materialet bli skadat till den grad att det blir oanvändbart. Medan nitade material kan nitas om på nytt. En fördel med limfogar är den slutliga massan av fogen jämförd med totala massan hos hela konstruktionen. Däremot med nitning kommer det extra massa till på grund av nitarna.</p> <p>Detta slutarbete gjordes med målet att med geometriska förändringar av limfogar förbättra skjuvspänningens fördelning längs limfogen på så sätt att fogen skulle bli starkare. Då en limfog utsätts för belastning fördelas inte spänningen konstant längs fogen, utan det blir variationer och spänningen blir mera koncentrerade i punkter vid fogens ändor. För att kunna utföra simulationer med olika variationer av fogar användes FEA. Med FEA kan man få en visualisering på hur fogen beter sig under spänning och de koncentrerade områdena kan lokaliseras. Comsol Multiphysics var FEA programmet som användes.</p> <p>Olika variationer av geometrin testades för att reducera skjuvspänningens maxima vid fogens ändpunkter Enligt testerna visade det sig att med enkla fogar kunde man nå de bästa resultaten med hjälp av små ändringar i limfogen, fogtjocklek och skarvvinkel.</p> <p>En enkel överlappsfog kunde förbättras med 27.9%. Ännu vidare förbättring med förtunning till delarna gav en förbättring på 62.85%. Skarvlimfogens vinkel ändrades för att nå en förbättring på 48.9%.</p>	
Nyckelord:	Skjuvspänning, limfog, skarvfog, skarv-stegfog, skarv vinkel
Sidantal:	49
Språk:	svenska
Datum för godkännande:	

# INNEHÅLL

<b>1</b>	<b>Introduktion.....</b>	<b>7</b>
1.1	Betydelsen av limfogar i dagens industri.....	7
1.2	Test standarder .....	9
1.3	Alternativa metoder, för och nackdelar.....	10
1.4	Limmets historia .....	11
1.5	Dagens limindustri.....	11
<b>2</b>	<b>Olika typer av limfogar .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Olika Typer av lim .....</b>	<b>12</b>
3.1	Torkande .....	12
3.2	Tryckkänsliga.....	13
3.3	Kontakt .....	13
3.4	Heta lim .....	13
3.5	Anaerob .....	13
3.6	Flerkomponentlim .....	13
3.7	Färdigt blandade och frysta lim .....	13
3.8	Enkomponents lim .....	14
3.9	Naturliga .....	14
3.10	Syntetiska .....	14
<b>4</b>	<b>Metod.....</b>	<b>15</b>
4.1	Skjuvspänning .....	15
4.2	Skjuvspänningsmaxima enligt Volkersen .....	16
4.3	Skjuvspänningsfördelning enligt Klein.....	17
4.4	Skjuvspänningsfördelning enligt comsol .....	18
<b>5</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Klein modellen .....</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Förtunning Av enkel överlappsfog.....</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Skarvfog .....</b>	<b>27</b>
8.1.1	<i>Kraft fördelning .....</i>	<i>27</i>
8.1.2	<i>Sektion.....</i>	<i>27</i>
8.1.3	<i>Inverkan på Vinkeln i en skarvfog .....</i>	<i>28</i>
8.1.4	<i>Geometrisk förbättring för skarvfog.....</i>	<i>31</i>
<b>9</b>	<b>skarv-stegfog .....</b>	<b>33</b>

9.1.1	<i>En Skarv-stegfogs geometrisk ändring med påverkan i Comsol .....</i>	<i>34</i>
9.1.2	<i>Geometrisk förbättring för Skarv-stegfog .....</i>	<i>37</i>
<b>10</b>	<b>Skillnad mellan drag och böjningsbelastade limfogar .....</b>	<b>38</b>
10.1	Böjningsbelastad överlappsfog skillnad mellan drag och böjningsbelastning .....	38
10.2	Skarvfog skillnad, mellan drag- och böjningsbelastning .....	40
10.3	Skarv-stegfog, skillnad mellan drag- och böjningsbelastning .....	42
<b>11</b>	<b>Diskussion / slutsats.....</b>	<b>45</b>
<b>12</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>47</b>

## Figurer

Figur 1: Fokker F-27 .....	7
Figur 2: figur som visar "clinchning" [3] .....	8
Figur 3: Olika typer av fogar. ....	12
Figur 4: Skjuvspänning.....	15
Figur 5: Olika sammanfogningsdelar och dess modell på skjuvspänning.....	16
Figur 6: Förenklad bild av fogen och dess dimensioner.....	19
Figur 7: Volkersen och comsol resultat .....	20
Figur 8: Relativt fel visualiserat med en graf .....	21
Figur 9: Graf på skjuvspänningens spridning enligt Klein som är längs limfogens längd. .....	22
Figur 10: Graf på skjuvspänningens spridning gjord med Comsol längs fogens längd..	22
Figur 11: de tidigare graferna på varandra för att se skillnad.....	23
Figur 12: Bild på hur förtunning skulle kunna se ut.....	24
Figur 13: Graf med skjuvspänning med fyra alternativa vinklar av förtunning.....	25
Figur 14: Fog tjocklek, materialförtunning .....	25
Figur 15: distribution av skjuvspänning i en skarvfog .....	28
Figur 16: Skarvfog.....	29
Figur 17: Grafen visar hur skjuvspänningen ökar och sedan minskar då fogens vinkel är manipulerad. ....	30
Figur 18: Förbättrad skarvfog.....	31
Figur 19: en graf som visar skjuvspänningen i skarvfogar med olika vinklar och en med förbättring .....	31
Figur 20: Skarv-stegfog.....	33
Figur 21: Variabler i skarv-stegfog mätningen.....	34
Figur 22: Resultat av simulationer i Comsol med Skarv-stegfog.....	35
Figur 23: Då vinkel $\alpha$ räknas ut. ....	36
Figur 24: Dragbelastning.....	38
Figur 25: böjningsbelastning. ....	38
Figur 26: Enkel överlappsfog .....	39
Figur 27: Modell på hur böj stavarna placerats. ....	39

Figur 28: graf där böjnings belastad överlappsfog jämförs med dragbelastad överlappsfog F = 20N.....	40
Figur 29: Skarvfog.....	40
Figur 30: skarvfogens stavarnas placering för böj belastning. ....	41
Figur 31: Graf på skarvfogs maxspänning jämförelse mellan drag och böjbelastning. .	41
Figur 32: Skarvstegfog stavplacering för böjningsbelastning. ....	42
Figur 33: De inringade resultatens längder användes för mätning av böjnings belastningen.....	42
Figur 34: Böjnings belastad skarv-stegfog i jämförelse med drag belastad.....	44

## Tabeller

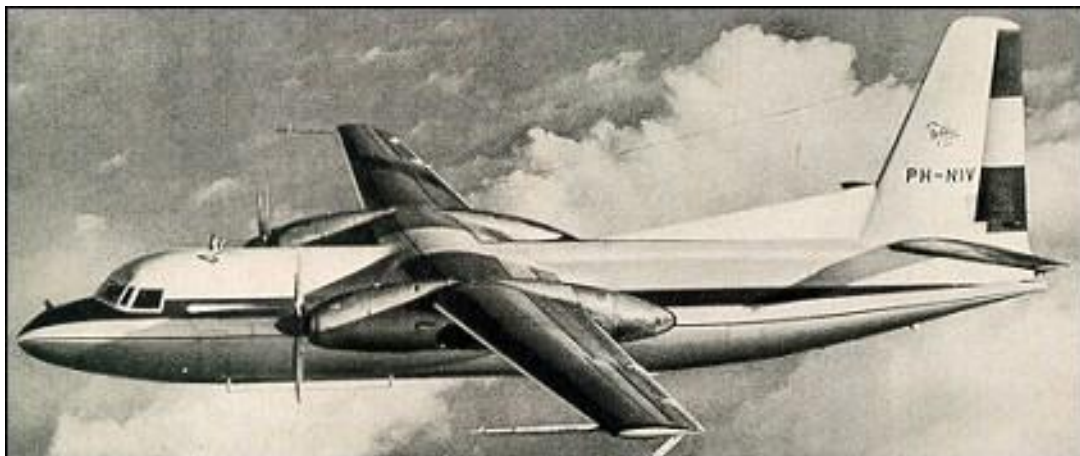
Tabell 1: Tabell som innehåller parametrar som använts.....	18
Tabell 2: Fog tjocklekar överlappsfog Volkersen och FEA.....	19
Tabell 3: Tabell med Absolut fel och relativt fel i mätning mellan analytiskt och comsol .....	20
Tabell 4: Tabell med fog tjocklekar och förtunning.....	24
Tabell 5: Material parametrar. ....	28
Tabell 6: Resultat för skarvfog med respektive vinklar. ....	29
Tabell 7: Förbättrings försök. ....	32
Tabell 8: Resultat av mätning för skarv-stegfog. ....	36
Tabell 9: Resultat av en böjningsbelastad skarv-stegfog. ....	43

# 1 INTRODUKTION

Syftet med detta examensarbete är att beskriva kvantitativ skjuvspänningsfördelning i limfogar och att söka geometriska lösningar för skjuvspänningsvariation och dessas maxima. I arbetet undersöks skjuvspänningsfördelningar antingen analytiskt eller med finita elementmetoden. Målet med studierna är att identifiera skjuvspänningsmaxima vid limfogens ändor och att testa geometriska förändringar i limfogen för att reducera skjuvspänningsmaxima.

## 1.1 Betydelsen av limfogar i dagens industri

Användning av limfogar är inte en ny lösning till utmanande tekniska problem. Tar man en titt bakåt i tiden så kan man se att även de första flygplanen har varit ihop limmade av komponenter av trä och textilmaterial. En annan milstolpe är Fokker F-27 som togs i bruk med säkert ihopbunden aluminiumkonstruktion för över 65 år sedan. [1]



*Figur 1: Fokker F-27*

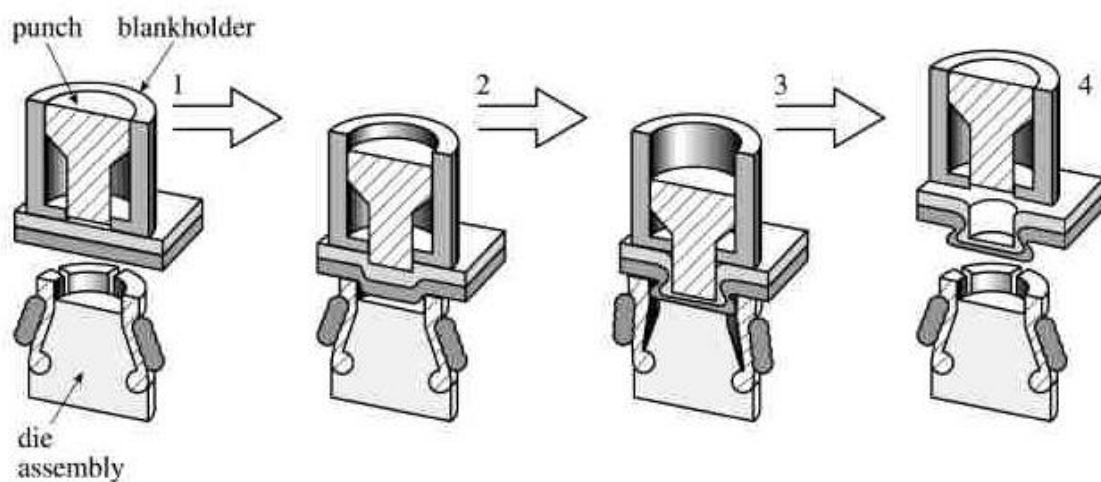
Trots att material och tillverkningsprocessen av avancerade fibrer redan är tillgänglig återstår det ännu en aspekt som hämmar massproduktion, nämligen optimering av hopfogningen. När man kan tillverka nya material och komponenter optimalt för att uppfylla det individuella behovet man ställer på dem, måste de sedan ytterligare kombineras för att skapa den färdiga produkten. [1]

Målsättningen har bibehållits gällande hopfogningarna, att kosteffektiviteten, varaktigheten och hållbarheten måste hållas i balans. De traditionella metoderna för sammanfogning med skruvar, nitar och svetsning har nått sina gränser, eftersom de kombineras dåligt med nya material och formningsprocesser. Till exempel hålen som krävs till nitar framkallar lokala svagheter i metall. När svetsning används utgör hybridfogar ett stort problem. Dessutom kan lokal värme ha en oönskad effekt på materialegenskaperna, vilket ger en annan orsak för ingenjörer att söka alternativa lösningar. [1]

En industri som har sett en stor tillväxt med användning av limfogar i tillverkningsprocessen under de senaste åren är bilindustrin, där man med hjälp av limfogar kan åstadkomma mindre utsläpp på grund av lägre bränslekonsumtion som blir en av fördelarna med att utnyttja limfogar. [2]

De främsta fördelarna med limfogar är designflexibilitet och möjligheten att använda och kombinera olika av olika material som höghållfast stål och aluminiumlegering för att reducera vikt hos produkten. [2]

Bilindustrin börjar mer och mer förlita sig på hybrida kopplingar för att sammanfoga bilens karossdelar till varandra. Detta involverar kombination av lim och koppling med hjälp av formning (clinchning). [3]



Figur 2: figur som visar "clinchning" [3]

Strukturella limfogar och testning av dem (ASTM och ISO standarder för limfogens hållfastighet)

Tester av limmade fogar omfattar en stor grupp av spännings- och kompressions test inom ett brett spektrum av olika branscher och material. Vidhäftningstester fokuserar vanligtvis på bindningsstyrkan mellan två material bundna till varandra med en limfog.

## 1.2 Test standarder

För resultat i skjuvhållfasthet med 3-punkts böjningstest används internationella standarder för lim.

- ISO 4587:2003      Lim – Bestämning av draghållfasthet hos styva till styva bundna enheter. [4]
- ISO 15107:1998      Lim – Bestämning av klyvningshållfastheten för förbundna fogar. [4]
- D5868-01(2014)      Standard testmetod för vidhäftning av varvskjuvning för fiberförstärkt plastbindning. [5]
- D3165-07(2014)      Standardtestmetod för limegenskaper i hållfasthetsegenskaper genom spänningsbelastning av lamellerade lameller med enkel varv. [5]
- D3528-96(2016)      Standardtestmetod för hållfasthetsegenskaper för limfogar med dubbla varv vid spänning. [5]

Dragbelastning /kompressionsbelastning

Standarder för metall bindande lim.

- D1002-08(2019)      Standartestmetod för skenbar skjuvhållfasthet för lim med en varvsled vidhäftande metallprover efter spänningsbelastning (metall mot metall). [5]
- D2295-96(2016)      Standard testmetod för hållfasthetsegenskaper hos lim i skjuvspänning vid förhöjd temperatur (metall till metall). [5]

## Klyvning /Skalning

Internationella standarder för klyvning och skalning är

- ISO 15107:1998      Lim – Bestämning av klyvningshållfastheten för förbundna fogar. [4]
- ISO 11339:2010      Lim – T – skalningstest för flexibla till flexibla bundna enheter. [4]
- D3807-98(2019)      Standardtestmetod för limegenskaper i hållfastegenskaper i klyvskal genom spänningsbelastning (teknikplats till teknikplats). [5]
- D1876-08(2015)      Standardtestmetod för skalmotstånd hos lim (T-skalningstest). [5]

Standarder för fog förberedelse.

Aluminium for förberedelse för att bindas till aluminium.

- D3933-98(2017)      Standard handbok för beredning av aluminiumytor för limning av strukturella lim. [5]

Olika standarder mellan ASTM och ISO används till testning av limfogar o lika former.

### 1.3 Alternativa metoder, för och nackdelar

Alternativa metoder till bindning som används i olika applikationer är bland annat nit-användning, där uppstår nackdelar med att hålen som krävs för att niten skall gå igenom skapar en svag punkt och därmed försvagar bindningen. En fördel med detta är att det går att plocka isär och ändra om eller byta delar. Detta är inte möjligt med limmade kopplingar för det kan skada delarna och därmed göra dem oanvändbara. Ledkopplingarna fördelar är möjlighet till kohesion och adhesion vilket innebär att två likadana material kan bindas till varandra och två olika material kan även bindas till varandra.

## 1.4 Limmets historia

De tidigaste tecknen av limmanvändning som hittats finns i centrala Italien när två stenflingor delvis täckta med nävertjära för cirka 200 000 år sedan, detta tros vara den äldsta upptakten av tjärskaftade stenar. [6]

Fastän växtbaserade lim är tillräckligt klibbig så är den ändå beständig mot väder. 70 000 år gammal sten har hittats i Sydafrika med täcken av användning av sammansatta lim, stenen hade varit en yxa, där skaftet hade haft lim bestående av växtgummi och röd ockra (naturlig järnoxid). Med tillsatsen av ockra till växtmassan åstadkommer man en starkare produkt med skydd mot våta omständigheter. [6]

## 1.5 Dagens limindustri

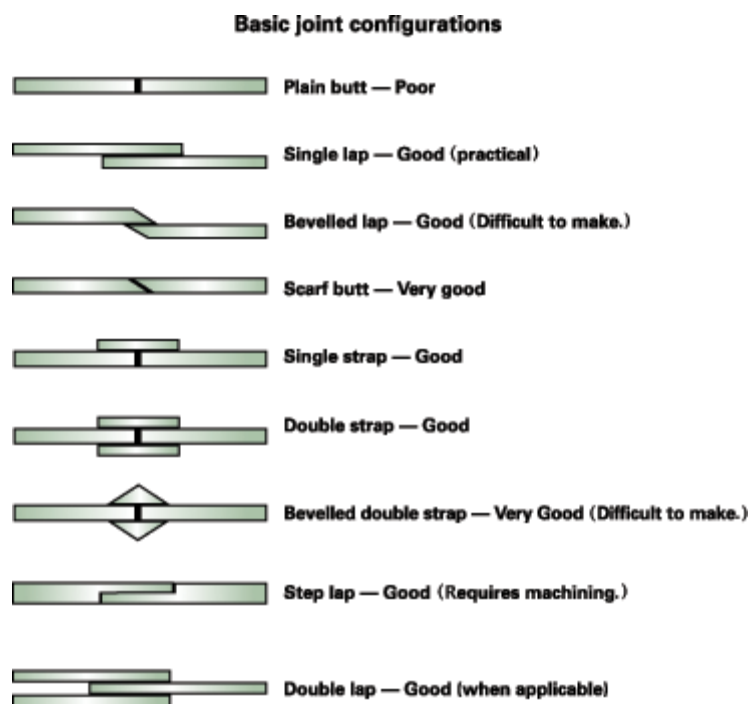
Drivkraften till limindustrins tillväxt är behovet av användning av kompositmaterial och efterfrågan för förpackningsindustrin. Stränga miljöbestämmelser angående VOC (Volatile organic compounds) utsläpp är dock en del av hindret till tillväxten på marknaden som undersökts. [8]

Förpackningssegmentet är marknadsledare och fortsatt efterfrågan på förpackningsmaterial beräknas att bestå för mat, dryck och elektronisk-försäljningsföretag.

Ledande företag i limindustrin med runt 36% av marknaden är Henkel AG & CO, KGaA, 3M, H.B. Fuller, Arkema Group och Sika AG. Med flera andra. [8]

## 2 OLIKA TYPER AV LIMFOGAR

Variationer av olika limfogar existerar, överlappande, skarvfog, skarv-stegfog, vilka av alla kan byggas med enkla eller dubbla skjuvningsarrangemang. Att designa en optimal skarvreparation för kompositstrukturer är komplicerat på grund av material och geometriska parametrar som påverkar fogens prestanda.



Figur 3: Olika typer av fogar.

### 3 OLIKA TYPER AV LIM

Olika typer av lim har olika applikationer och ändamål.

#### 3.1 Torkande

Det finns två typer av lim som stelnar då det torkar, lösningsmedelsbaserade lim.

Lim baserat på lösningsmedel lim är en blandning av vanligen polymerer upplöst i ett lösningsmedel. När lösningsmedlet avdunstar stelnar limmet. [9]

Och polymerdispersionslim är vita limdispersioner som för det mesta är baserade på polyvinylacetat (PVAc). De används i stor utsträckning i träbearbetning och i förpackningsindustrin. [9]

## 3.2 Tryckkänsliga

Pressure-sensitive adhesives (PSA) formar en fästytta då man med lätt tryck placerar föremålet med limmet mot ett annat föremål, det vanligaste exempel är klistermärke. Denna limförmåga är baserad på van der Waals krafter. [9]

## 3.3 Kontakt

Kontaktlim används då man önskar hållbar kontakt mellan ytorna, detta används vid laminering till exempel vid sammanbindningen av Formica till en träbänk, och i skor vid fästning av yttersulor till överdelar. Naturligt gummi och kloroprengummi (neoprene) används vanligen som kontaktlim. [9]

## 3.4 Heta lim

Används i limpistoler, de smälter vid (65–180 C) och när de svalnar stelnar de och formar en hållbar kontaktyta mellan ett brett utbud av material. Heta lim baserade på etylenvinylacetat är populära för hantverk eftersom de är lätta att använda och deras förmåga att sammanbinda ett stort utbud av material. [9]

## 3.5 Anaerob

Anaerobt lim stelnar då det kommer i kontakt med metall, i frånvaro av syre. De fungerar bra i trånga utrymmen som tillexempel skruvlås. [9]

## 3.6 Flerkomponentlim

Flerkomponentslim stelnar då man blandar två eller flera komponenter vilket sedan leder till en kemisk reaktion, denna reaktion leder till en tvärbinding mellan polymererna. [9]

## 3.7 Färdigt blandade och frysta lim

Färdigt blandade frysta lim är lim som namnet säger färdigt blandade för att undvika misstag vid blandningen av användaren och de är nedfrusna i -80 C och skall förvaras i

-40 C. Färdigt blandade frysta lim introducerades för kommersiellt bruk på 1960-talet och används i flygindustri och inom försvaret. [9]

### **3.8 Enkomponents lim**

Enkomponents lim steltnar genom en kemisk reaktion då extern energi som strålning, värme eller fukt tillförs. [9]

### **3.9 Naturliga**

Naturliga lim är tillverkade av organiskt ursprung som vegetabilisk stärkelse, naturliga hartser eller ämnen som härstammar från djur (mjölkproteinkasein och djur skin baserade lim) [9]

### **3.10 Syntetiska**

Syntetiska lim är baserade på elastomerer, termoplaster emulsioner och härdplaster. [9]

## 4 METOD

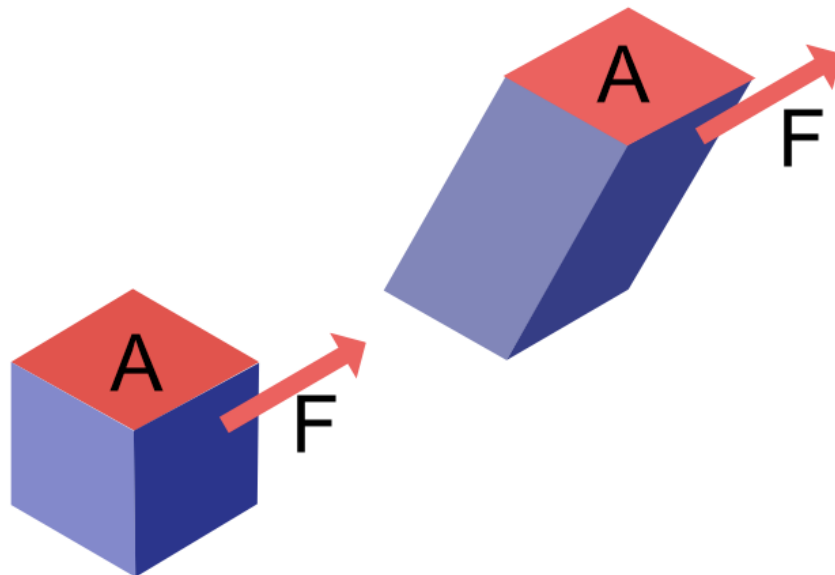
I detta kapitel beskrivs metoder som användes i arbetet.

### 4.1 Skjuvspänning

Skjuvspänningen är definierad [7] som  $\tau = \frac{F}{A}$ . Krafter är  $F$  och anges med enheten Newton [ $N$ ]

arean är  $A$  anges i [ $mm^2$ ]

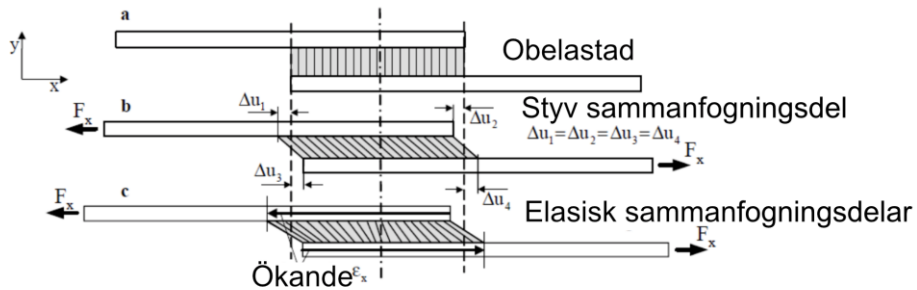
spänningen  $\tau$  anges i [ $\frac{N}{mm^2}$ ] = [ $MPa$ ]



Figur 4: Skjuvspänning

## 4.2 Skjuvspänningsmaxima enligt Volkersen

Förenklad vy enligt Volkersen.



Figur 5: Olika sammanfogningsdelar och dess modell på skjuvspänning

Enligt Volkersen modellen 
$$\tau_{max} = \frac{F}{b} \sqrt{\frac{1}{2} * \frac{1}{Et} * \frac{Gg}{t_g}}$$

$\tau_{max}$  [MPa] = skjuvspännings maxima

F [N] = extern kraft del som förenats

b [mm] = fogens bredd

E [MPa] = Elasticitets modulen

t [mm] = komponenttjocklek

$G_g$  [MPa] = skjuvningsmodul för limmet

$t_g$  [mm] = limfogens tjocklek

### 4.3 Skjuvspänningsfördelning enligt Klein

Enligt Klein modellen kan man erhålla skjuvspännings fördelningen med formeln nedan.

Detta resulterar i spänningsfördelning över längden av en limfog.

$$\tau(x) = \frac{\omega \cdot \tau_m}{(\beta - 1) \cdot (\cosh \omega - 1)} \left[ \sinh \left( \omega \left( 1 - \frac{x}{l_u} \right) \right) + (\beta + 1) \sinh \left( \omega \frac{x}{l_u} \right) \right]$$

$$\omega = \lambda \cdot l_u = \sqrt{\frac{G_{gl}(E_1 \cdot t_1 + E_2 \cdot t_2)l_u^2}{E \cdot t_1 \cdot E_2 \cdot t_2 \cdot d}}$$

$$\beta = \frac{(E_2 \cdot t_2 - E_1 \cdot t_1) \cdot G_{KI} \cdot l_u^2}{E_1 \cdot t_1 (G_{gl} \cdot l_u^2 + E_2 \cdot t_2 \cdot d)}$$

För symmetrisk skarv  $\beta = 0$

$$\tau_m = \frac{F}{l_u^2} \cdot b \leq \tau_{zB}$$

När  $x = 0$ ;

$$\tau_{max}(0) = \omega \cdot \tau_m \cdot \frac{\sinh(\omega)}{(\beta + 2)(\cosh(\omega) - 1)} = k'_\tau \cdot \tau_m$$

När  $x = L$ ;

$$\tau_{max}(L) = \omega \cdot \tau_m \cdot \frac{(\beta + 1)\sinh\omega}{(\beta + 2)(\cosh\omega - 1)} = k''_\tau \cdot \tau_m$$

$$\tau_{max} = \tau_m \cdot k_\tau$$

$\tau_{max}$  [MPa] = skjuvspännings maxima

F [N] = extern kraft

b [mm] = fogens bredd

E [MPa] = Elasticitets modulen

t [mm] = komponenttjocklek

$G_g$  [MPa] = skjuvningsmodul för limmet

$t_g$  [mm] = limfogens tjocklek

$l_u$  [mm] = fogens längd

$\beta$  [mm] = de limmade delarnas skillnad om lika = 0

$\lambda$  [MPa] = lame parameter

## 4.4 Skjuvspänningsfördelning enligt comsol

Volkersen metoden är snabb att använda för att approximera prestandan hos en vidhäftad fog. År 1938 använder Volkersen metoden även känd som ”skjuvfördröjningsmodellen” för mekaniska fogar med fästelement [11]. Denna enkla metod hittade sin väg in i överlappnings fogar. Naturligtvis har metoden sina svagheter beroende på vissa antaganden, som begränsar dess användning.

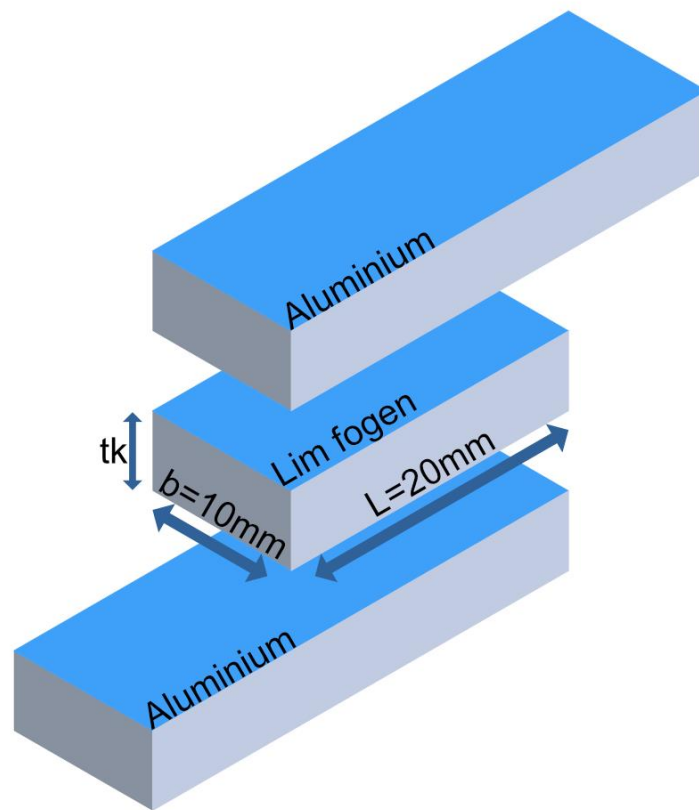
Då man simulerar skjuvspänning i en enkel fog med FEA comsol räknas även fogens överlappnings längd, till skillnad från Volkersen ekvationen ingår inte överlappningslängden och detta leder till att resultaten varierar mellan comsol och Volkersen. Comsol ger automatiskt ut resultatet i ”von misses stress” och volkersen i ”shear stress” i comsol kan funktion ändras till ”shear stress”

Det gjordes en Excel som räknar ut skjuvspänning med hjälp av volkersen modellen i en enkel fog och användes för att jämföra resultatet med comsol.

Parametrar som användes till mätningarna

Tabell 1: Tabell som innehåller parametrar som använts.

$E_1 = E_2$	70000	MPa
$t_1 = t_2$	4	mm
$b$	10	mm
$tk$	0.2 – 0.65	mm
$G_g$	769.231	MPa
$F$	20	N
$L_u$	20	mm

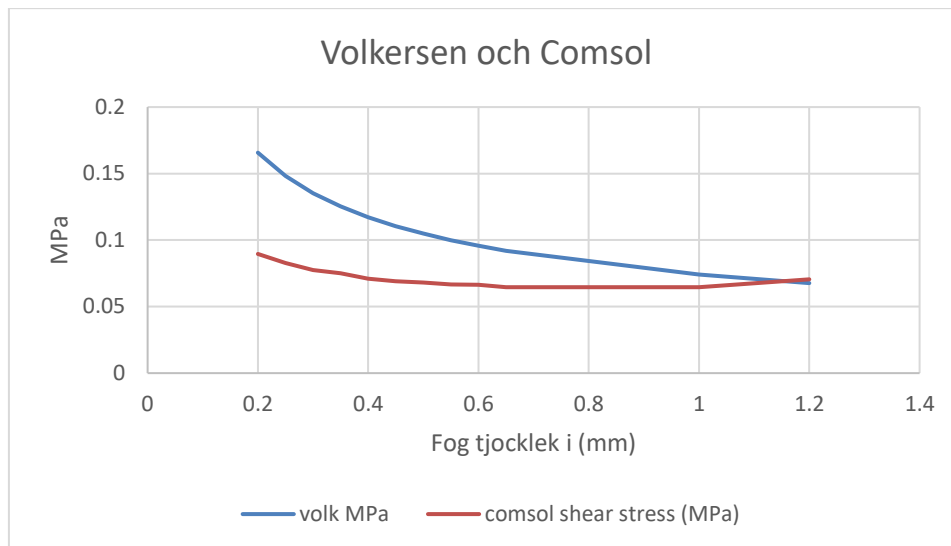


Figur 6: Förenklad bild av fogen och dess dimensioner.

## 5 RESULTAT

Tabell 2: Fog tjocklekar överlappsfog Volkersen och FEA

Fog tjocklek	volkersen (MPa)	FEA Skjuv spänning (MPa)
0.2	0.165748	0.0896
0.25	0.14825	0.0829
0.3	0.135333	0.0775
0.35	0.125294	0.075
0.4	0.117202	0.071
0.45	0.110499	0.069
0.5	0.104828	0.068
0.55	0.09995	0.0666
0.6	0.095695	0.0665
0.65	0.091941	0.0646
1	0.074125	0.0646
1.2	0.067666	0.0706



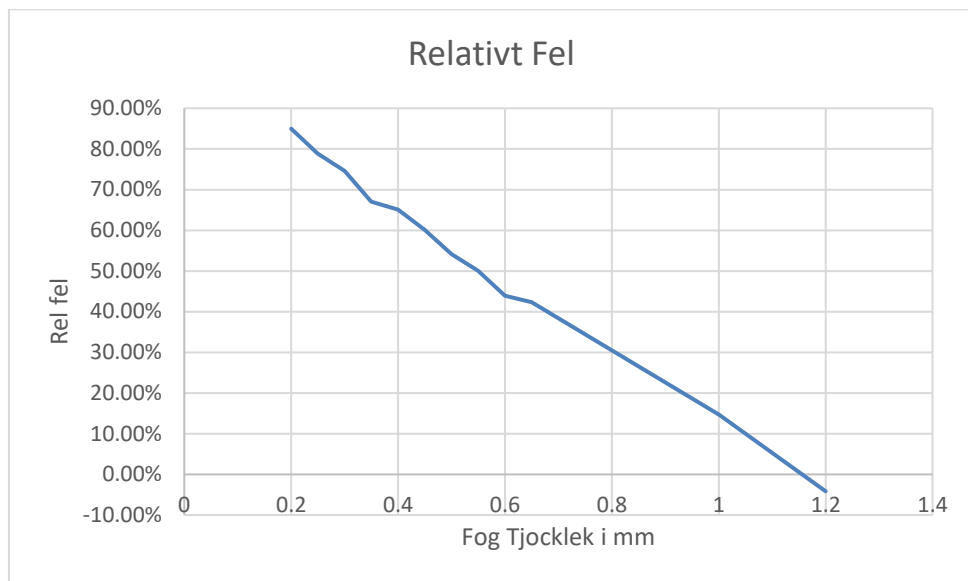
Figur 7: Volkersen och cmsol resultat

I resultatet ser man att stressen minskar då fog tjockleken ökar vilket var förväntat. Då fog tjockleken ökas kommer de två linjerna att mötas vid en punkt.

Mätfel mellan de två metoder som användes definieras i absolut fel och relativt fel

Tabell 3: Tabell med Absolut fel och relativt fel i mätning mellan analytiskt och cmsol

<i>Fog tjocklek</i>	<i>Absolut fel</i>	<i>Relativt fel</i>
0.2mm	0.076148	84.99%
0.25mm	0.06535	78.83%
0.3mm	0.057833	74.62%
0.35mm	0.050294	67.06%
0.4mm	0.046202	65.16%
0.45mm	0.041499	60.14%
0.5mm	0.036828	54.16%
0.55mm	0.03335	50.08%
0.6mm	0.029195	43.90%
0.65mm	0.02734	42.32%
1mm	0.009525	14.74%
1.2mm	-0.00293	-4.16%



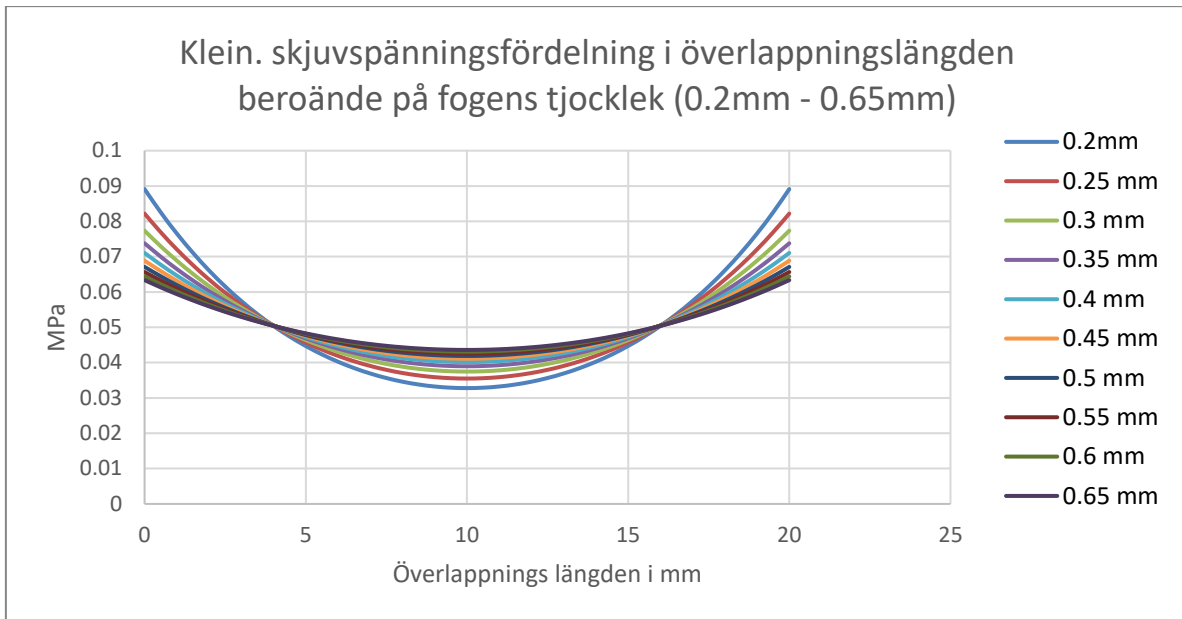
Figur 8: Relativt fel visualiserat med en graf

Mellan de två metoderna kan man observera att skillnaden är större då man har tunnare fog tjocklek. Och då fog tjockleken ökar minskar även skillnaden mellan de två metoderna.

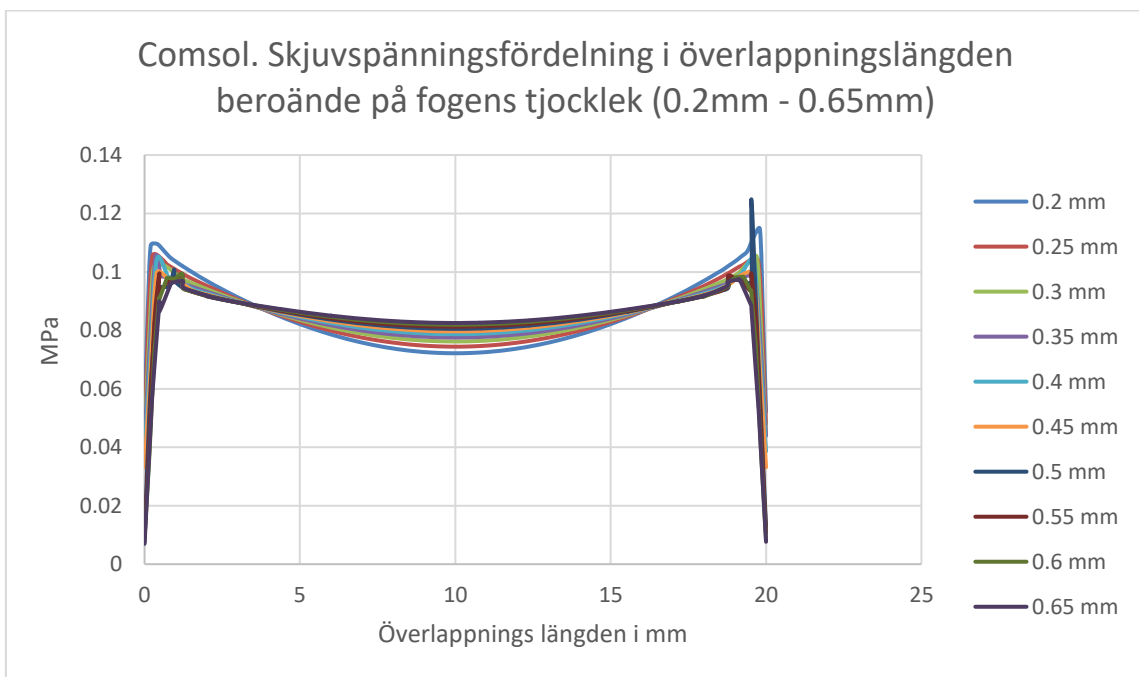
## 6 KLEIN MODELLEN

Med hjälp av Excell gjordes en kalkyl som baserar sig på Klein modellen och räknar ut skjuvspänningen längs fogens längd.

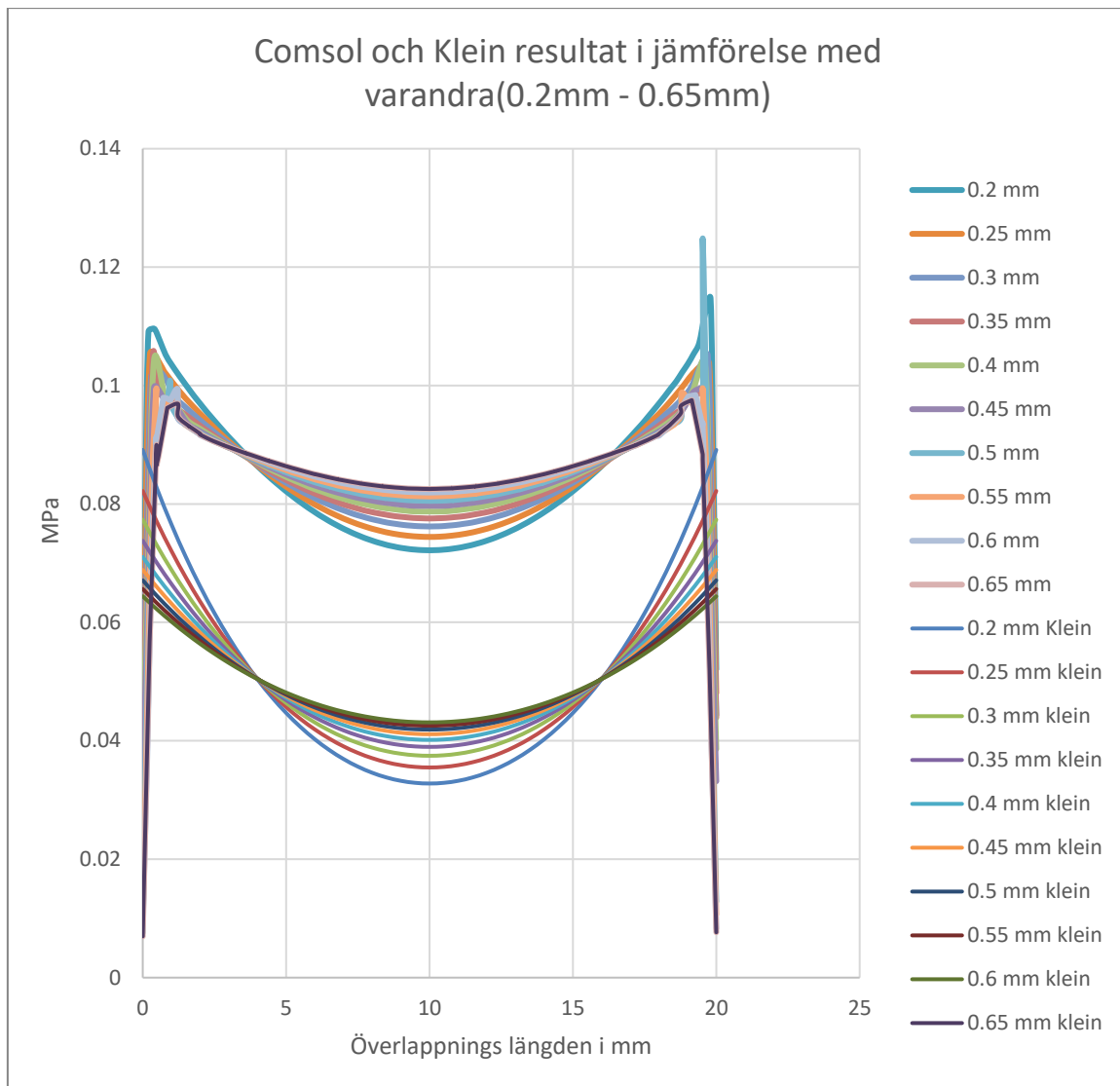
20 mm överlappnings längd användes som utgångsläge för att räkna ut spridningen av skjuvspänningen hos tio olika fog tjocklekar mellan 0.2mm - 0.65mm.



*Figur 9: Graf på skjuvspänningens spridning enligt Klein som är längs limfogens längd.*



*Figur 10: Graf på skjuvspänningens spridning gjord med comsol längs fogens längd*

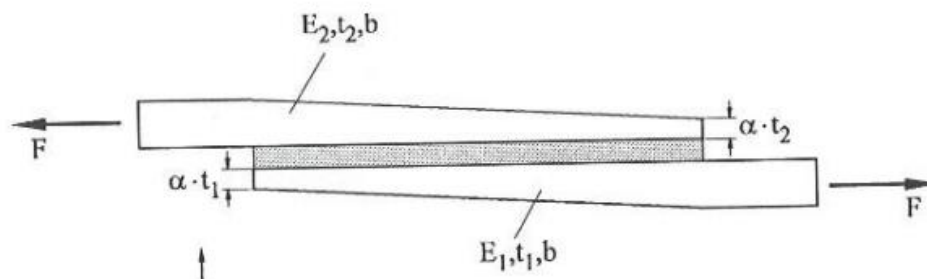


Figur 11: de tidigare graferna på varandra för att se skillnad.

Då man lägger resultaten på varandra ser man skillnaden och likheten mellan de två metoderna.

## 7 FÖRTUNNING AV ENKEL ÖVERLAPPSFOG

För att minska stress på limfogen går det att ändra på geometrin på delarna som limmas ihop. Detta ökar skjuvspännings tolerans i konstruktionen.



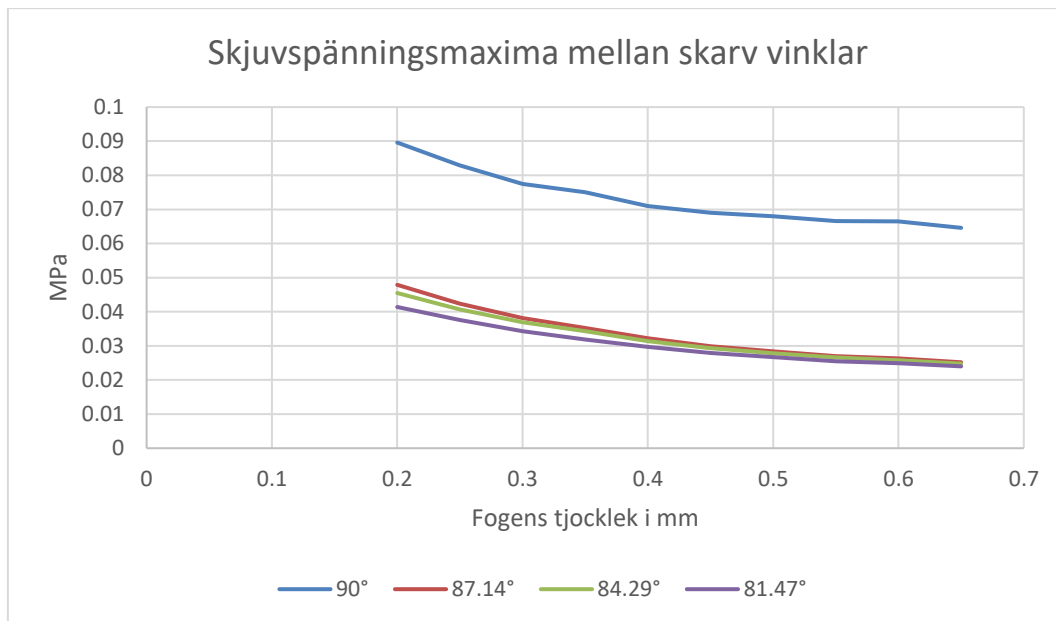
Figur 12: Bild på hur förtunning skulle kunna se ut

Tester utfördes mellan limfogens tjocklek, förtunning och förtunning med tjockare limfog i samarbete för att se vilken av de olika alternativa fog förbättringarna är lönsammast.

Tabell 4: Tabell med fog tjocklekar och förtunning.

$T_k$ (mm)	$\alpha=0\text{mm}$	$\alpha=1\text{mm}$	$\alpha=2\text{mm}$	$\alpha=3\text{mm}$
	90°	87.14°	84.29°	81.47°
0.2	0.0896	0.0479	0.0455	0.0414
0.25	0.0829	0.0424	0.0407	0.0376
0.3	0.0775	0.0382	0.0369	0.0343
0.35	0.075	0.0352	0.0343	0.0319
0.4	0.071	0.0322	0.0314	0.0297
0.45	0.069	0.0299	0.0293	0.0279
0.5	0.068	0.0284	0.0278	0.0267
0.55	0.0666	0.027	0.0266	0.0255
0.6	0.0665	0.0263	0.0258	0.0249
0.65	0.0646	0.0252	0.0248	0.024

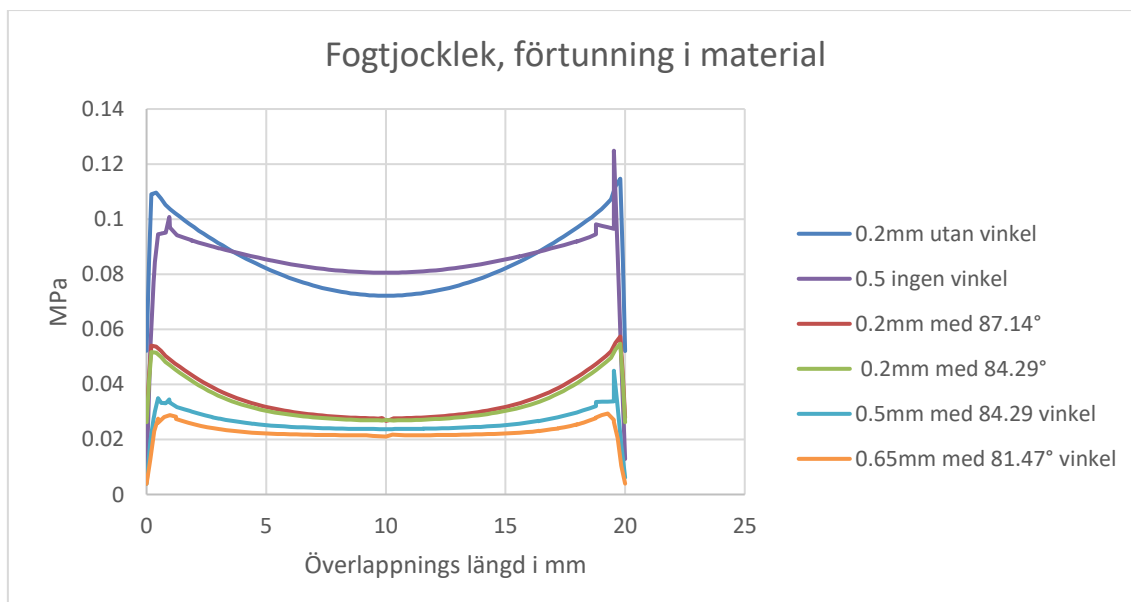
Skillnaden mellan 90° och 81.47° vinkel förtunning då fog tjockleken är 0.65mm är 62.85%



Figur 13: Graf med skjuvspänning med fyra alternativa vinklar av förtunning.

I bilden ovan ser man att förtunningen ger bättre resultat från första förtunningen och blir inte bättre genom att göra vinkeln mindre. Med detta kan man dra slutsatsen att förtunning är lönsam men vinkeln har inte stor påverkan efter att det redan finns förtunning.

Då man slår samman både fog tjocklek och förtunning.



Figur 14: Fog tjocklek, materialförtunning

Användning av båda metoderna för att förbättra uthållighet av en limfog ger optimala resultat och resulterar i en starkare förbindelse mellan materialen som man önskar vidhäfta vid varandra.

## 8 SKARVFOG

### 8.1.1 Kraft fördelning

Krafter som verkar på skarvfogar kan beskrivas av,

$$F_N = F_X \cdot \cos\alpha$$

$$F_T = F_X \cdot \sin\alpha$$

### 8.1.2 Sektion

Tvärsnittsområde ( $A$ ) är funktionen av stress på kontaktvinkeln ( $\alpha$ )

$$A_\alpha = b \frac{t}{\cos\alpha} = \frac{A}{\cos\alpha}$$

Normal spänning

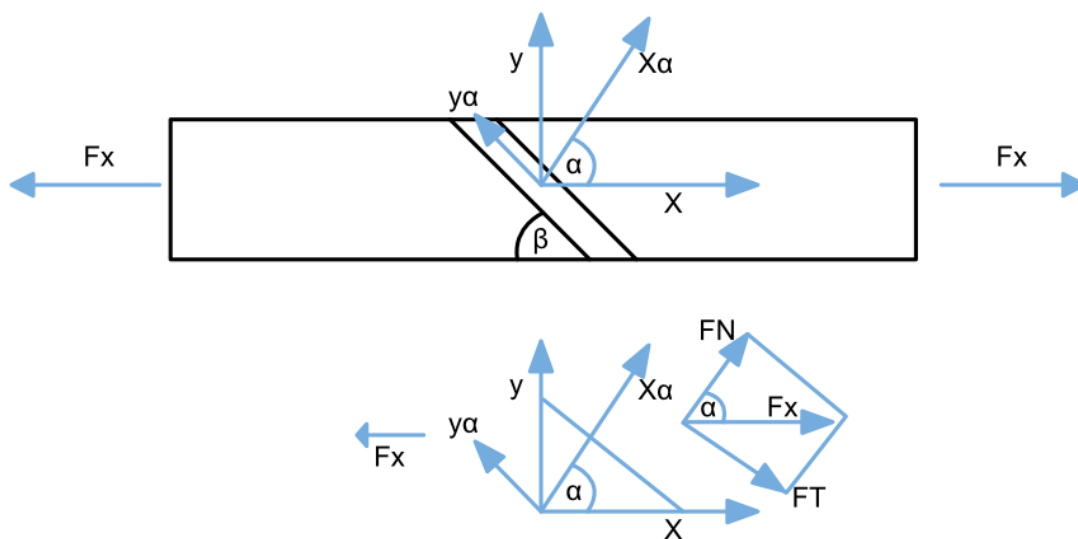
Normal spänning ( $\sigma$ ) agerande längs lim ges som

$$\sigma_\alpha = \sigma_X \cdot \cos^2 \alpha$$

Skjuvspänning

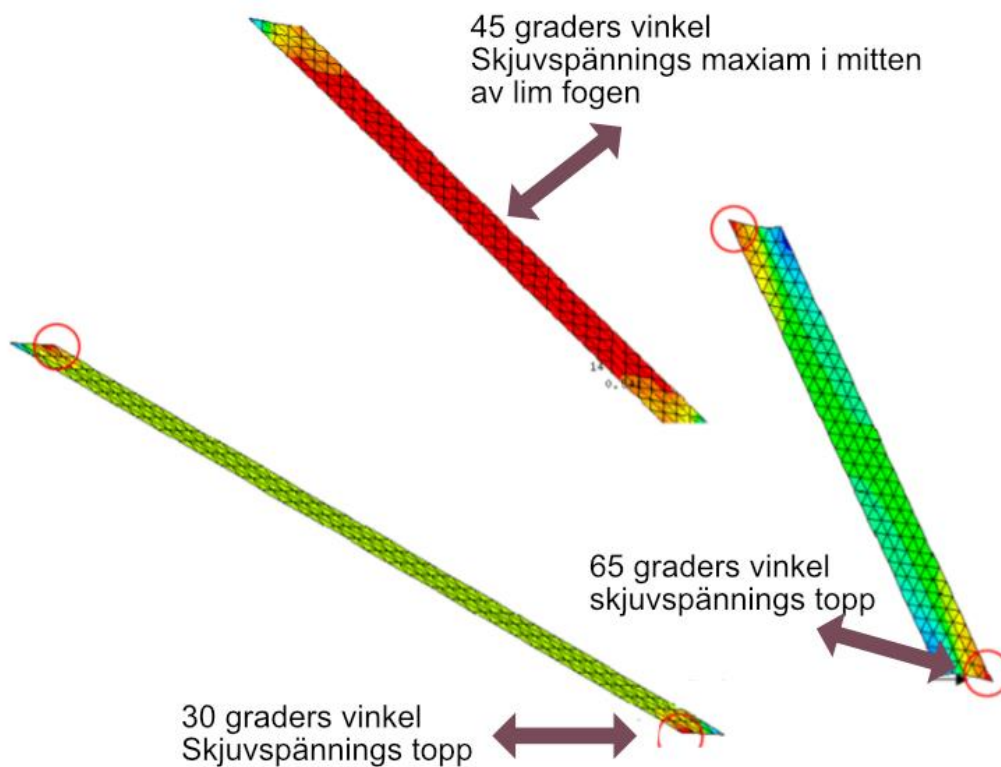
Skjuvspänning ( $\tau_\alpha$ ) agerande längs lim ges av

$$\tau_\alpha = \frac{1}{2} \sigma_X \cdot \sin 2\alpha$$



### 8.1.3 Inverkan på Vinkeln i en skarvfog

När vinkeln i en skarvfog justeras fördelas skjuvspänningen olika beroende på vinkeln.



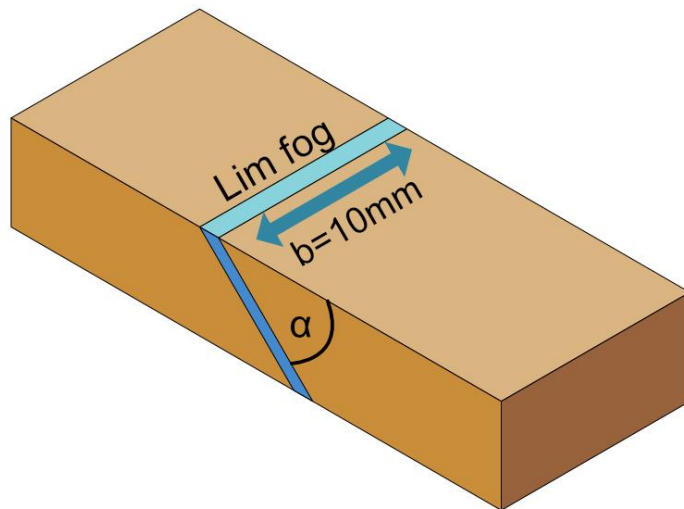
Figur 15: distribution av skjuvspänning i en skarvfog

Med Comsol analyserades ett antal vinklar för skarvfogen för att få en uppfattning om vilken storlek på vinkeln som ger en skarvfog den mest optimala uthålligheten.

Samma materialparametrar användes som i enkel lappningsfog.

Tabell 5: Material parametrar.

$E_1 = E_2$	70000	MPa
$t_1 = t_2$	4	mm
$b$	10	mm
$tg$	0.2	mm
$G_g$	769.231	MPa
$F$	20	N
$\alpha$	$90^\circ - 12.529^\circ$	$^\circ$

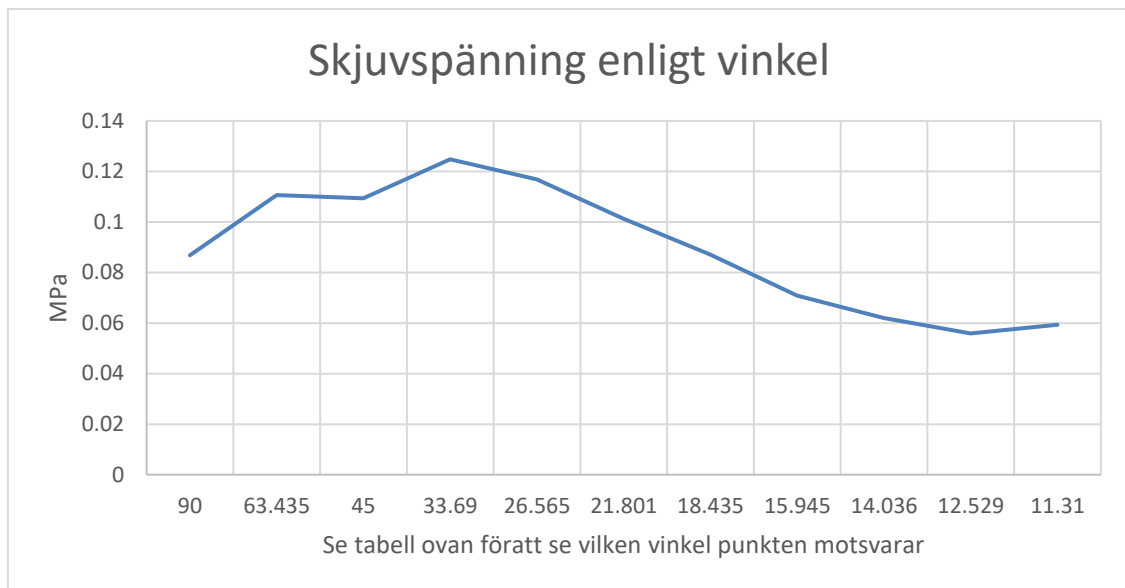


Figur 16: Skarvfog

Tabell 6: Resultat för skarvfog med respektive vinklar.

Fogens vinkel ( $\alpha$ ) Skjuvspänning (Mpa)

1	90°	0.0868
2	63.435°	0.1107
3	45°	0.1094
4	33.69°	0.1248
5	26.565°	0.1169
6	21.801°	0.1013
7	18.435°	0.0871
8	15.945°	0.0709
9	14.036°	0.062
10	12.529°	0.0559
11	11.31°	0.0594



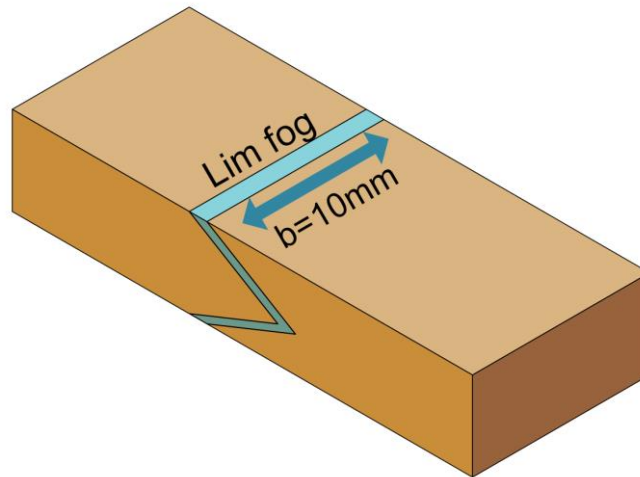
Figur 17: Grafen visar hur skjuvspänningen ökar och sedan minskar då fogens vinkel är manipulerad.

Enligt E. DAVID REEDY Jr., i Adhesion Science and Engineering, 2002 nämns att den mest optimala vinkeln för användning i en skarvfog i y riktning ( $\theta = 90^\circ$ ) är  $12.4^\circ$ .

Vilket visar sig stämma med de utförda testerna. Exakt  $12.4^\circ$  testades inte men vi kan se från resultaten att vid 12,529 går spänningen ner och 11.31 stiger det.

### 8.1.4 Geometrisk förbättring för skarvfog

Genom att geometriskt ändra på limfogens form kan man åstadkomma en förbättring i skjuvspänningens fördelning.



Figur 18: Förbättrad skarvfog

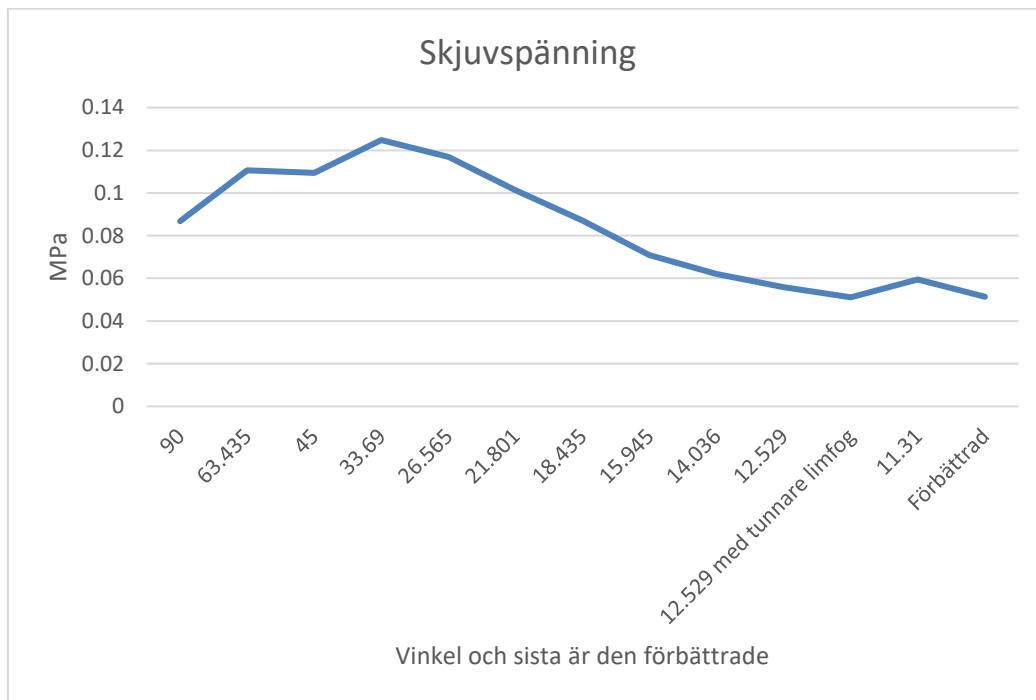
Bilden ovan visar vilken typ av förbättring gjordes till geometrin för att förbättra fogen.



Figur 19: en graf som visar skjuvspänningen i skarvfogar med olika vinklar och en med förbättring

Enligt resultat från dessa test visade det sig att redan vinkel förändring ger mera optimala resultat.

Fogtjocklek testades även och i detta fall med skarvfog visade det sig att tunnare fog är det optimalare för att minska skjuvspänningen i fogen.

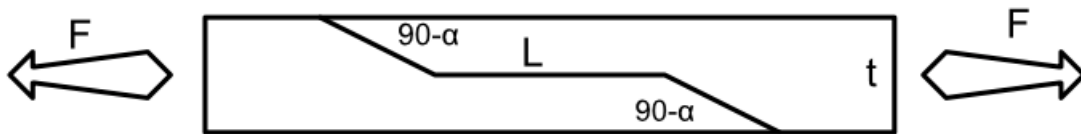


Tabell 7: Förbättrings försök.

<i>vinkel</i>	<i>Fogtjocklek i mm</i>	<i>MPa</i>
12.529	0.2	0.0559
12.529	0.01	0.0511
<i>Förbättrade fogen</i>	Förbättrade fogen	0.0513

## 9 SKARV-STEGFOG

En skarv steg fog är en skarvfog med ett horisontalt steg mellan de 2 skarvarna se figuren nedan.



Figur 20: Skarv-stegfog.

Skjuvspänningen är,

$$\tau = \frac{F_T}{\sum A_{T_i}} = \frac{F \sin(\alpha)}{A_{T_1} + A_{T_2}}$$

Yta 1  $A_{T_1} = \frac{A}{\cos(\alpha)}$  och yta 2  $A_{T_2} = A_1 \sin(\alpha)$ . Yta  $A_1$  är vinklad så att den är i linje med tvärkraften  $F_T$ .

$$p = \frac{A_{T_2}}{A} = \frac{L}{t}$$

Detta ger skjuvspänning ( $\tau$ )

$$\tau_\alpha = \frac{F}{A} \frac{\sin(\alpha)}{A \frac{1}{\cos(\alpha)} + p \sin(\alpha)} = \sigma_x \frac{\sin(\alpha)}{\frac{1}{\cos(\alpha)} + p \sin(\alpha)}$$

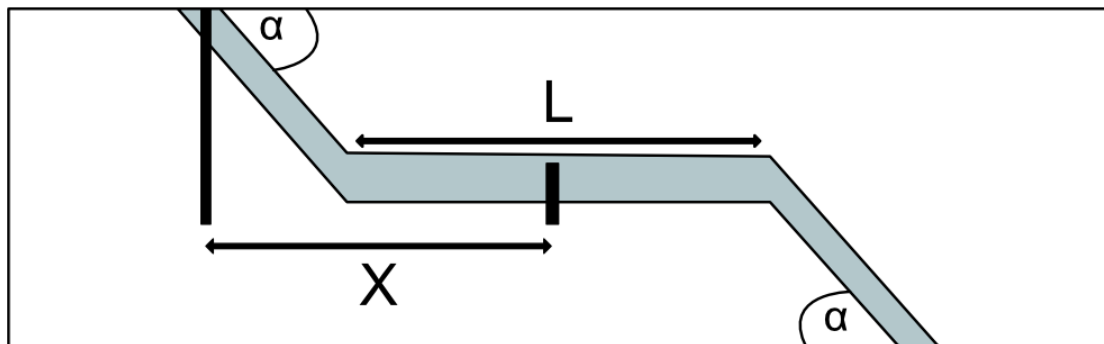
Normalspänningen är på samma sätt som i skarvfogmodellen.

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_x \cdot \cos^2 \alpha$$

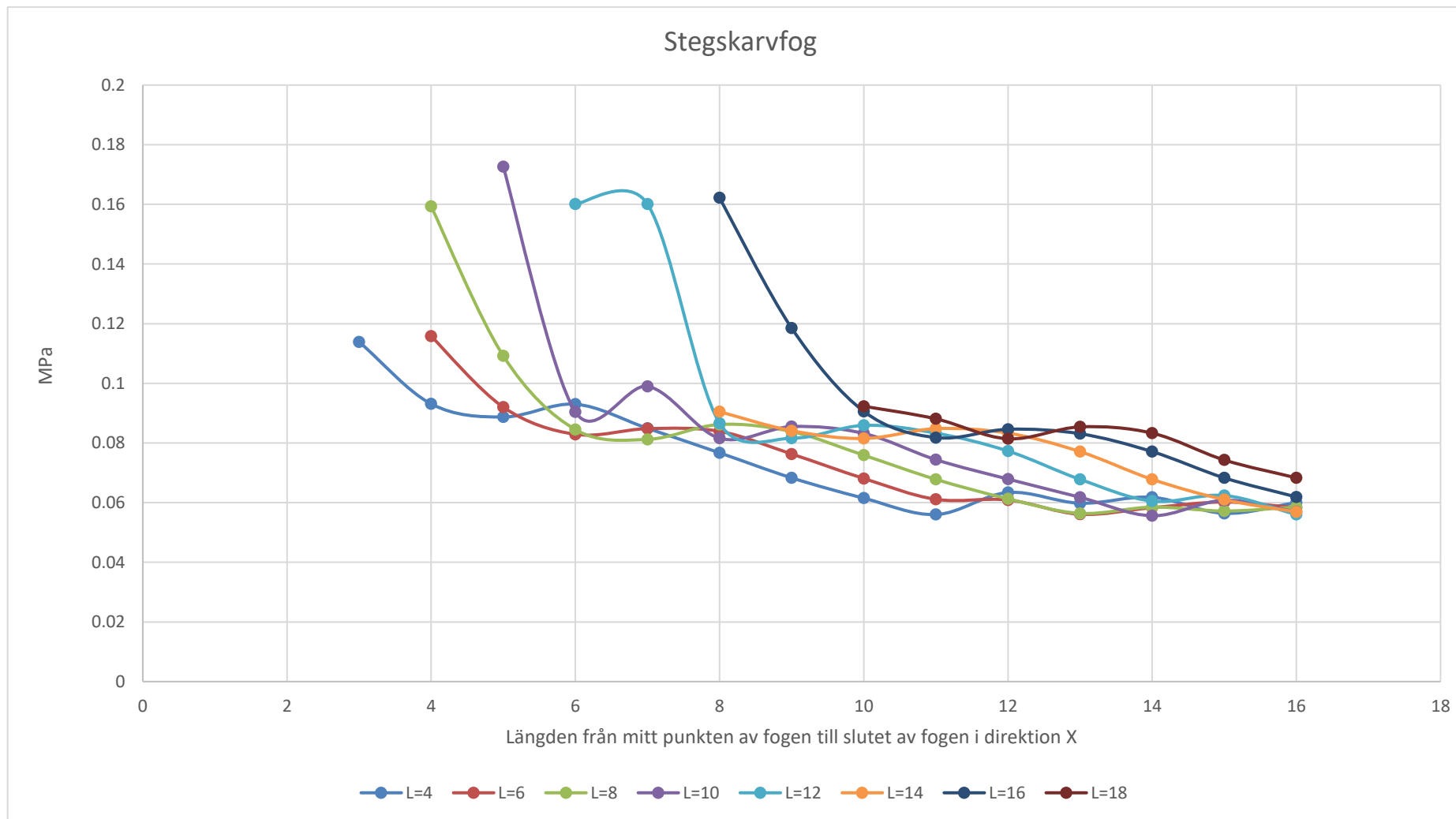
Styrkan av en limfog under skjuvspänning är en funktion av stegets längd (L) till de limmades tjocklek (t) förhållande indikerat med parameter (p). Skjuvspänning på fogen minskar då p stiger, vilket leder till att längre steg ökar fog styrka.

### 9.1.1 En Skarv-stegfogs geometrisk ändring med påverkan i Comsol

De värden som manipulerades då testerna utfördes i Comsol var längden av steget (L) och vinkelns längd i X direktionen mätt från mittpunkten av fogen märkt som (X).



Figur 21: Variabler i skarv-stegfog mätningen.



Figur 22: Resultat av simulationer i Comsol med Skarv-stegfog

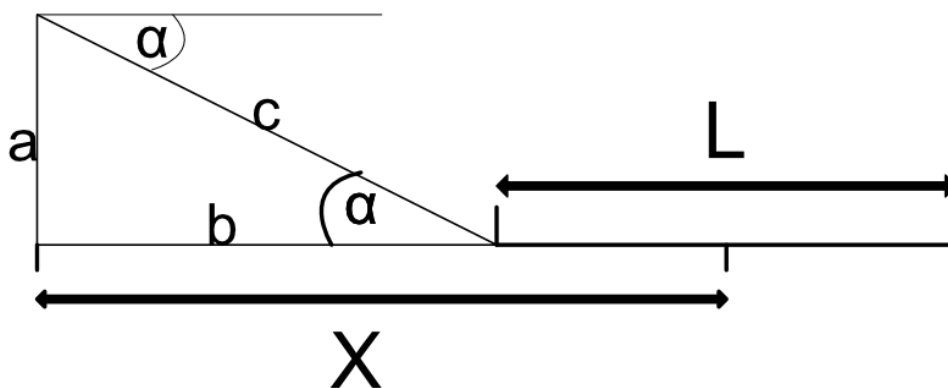
I grafen ovan kan man observera att ett mönster visar sig med de olika längderna av steg i fogen. Runt 0.08 MPa och övergången till och runt ca 0.06 MPa visar det sig att alla längder beter sig på samma sätt.

Det visar sig att det inte bara har med L att göra hur hållbar en skarv-stegfog är, även vinkeln på själva skarven inverka på hållbarheten.

Vinkeln som ger resultat runt 0.06 MPa i de utförda testerna räknades ut.

Tabell 8: Resultat av mätning för skarv-stegfog.

Mitten till skarv ända (mm)	MPa (L4mm)	MPa (L6mm)	MPa (L8mm)	MPa (L10mm)	MPa (L12mm)	MPa (L14mm)	MPa (L16mm)	MPa (L18mm)
3	0.1139							
4	0.0931	0.1158	0.1593					
5	0.0887	0.092	0.1092	0.1726				
6	0.093	0.0829	0.0845	0.0904	0.1601			
7	0.0849	0.0848	0.0812	0.099	0.1601			
8	0.0767	0.0839	0.0862	0.0816	0.0866	0.0905	0.1622	
9	0.0683	0.0763	0.0838	0.0855	0.0816	0.0841	0.1185	
10	0.0615	0.0681	0.0759	0.0832	0.0859	0.0815	0.0906	0.0923
11	0.056	0.0611	0.0678	0.0744	0.0833	0.0848	0.0818	0.0881
12	0.0634	0.0609	0.0613	0.0679	0.0773	0.0833	0.0846	0.0814
13	0.0598	0.0561	0.0564	0.0618	0.0678	0.0771	0.0831	0.0854
14	0.0618	0.0583	0.0585	0.0556	0.0605	0.0678	0.0771	0.0833
15	0.0564	0.0602	0.0572	0.0608	0.0624	0.061	0.0683	0.0743
16	0.06	0.0583	0.0585	0.057	0.056	0.0569	0.0619	0.0683



Figur 23: Då vinkel  $\alpha$  räknas ut.

$$X = 10$$

$$L = 4$$

$$a = 4$$

$$b = X - \left(\frac{L}{2}\right) = 8$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \sqrt{4^2 + 8^2}$$

$$= \sqrt{80}$$

$$= 8.94427 = 4\sqrt{5}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{4}{8.94427}\right)$$

$$= 26.56 \dots$$

$$\alpha = 26.56^\circ$$

Från och med en skarv vinkel på  $26^\circ$  eller mindre når man en skjuvspänning runt 0.06 med alla steglängder (L).

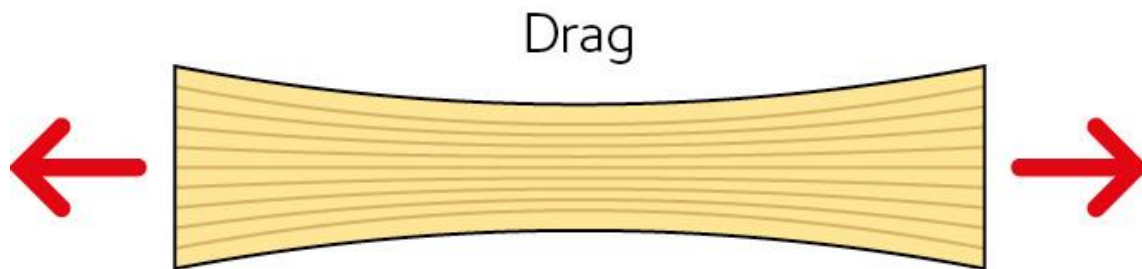
### 9.1.2 Geometrisk förbättring för Skarv-stegfog

Enligt testerna som gjorts nås optimala resultat oavsett av stegets längd, den avgörande faktorn är vinkel på skarven.

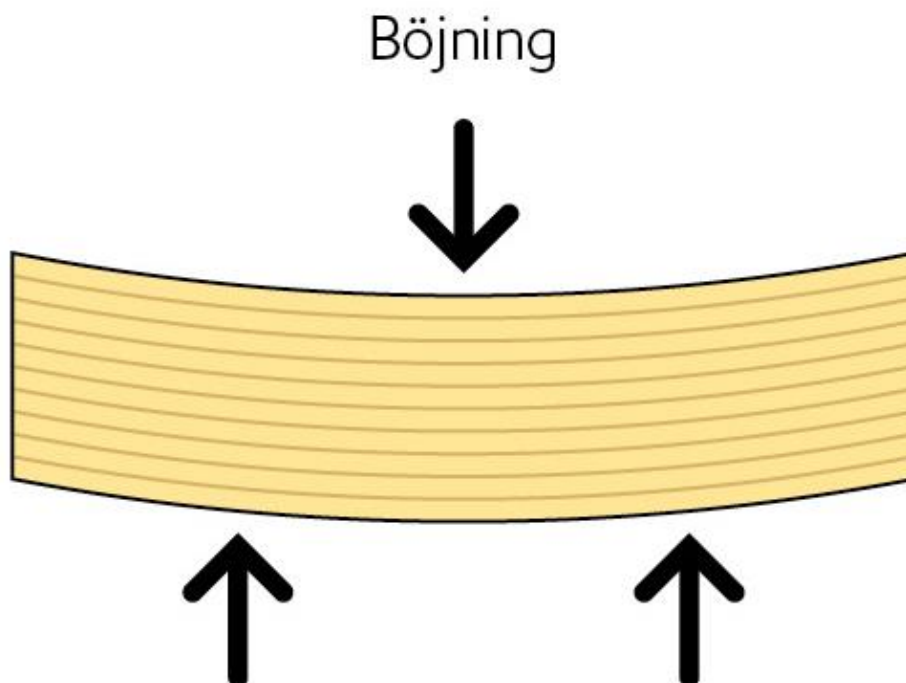
Olika former av ”förbättring” testades i Comsol utan förbättrade resultat, men genom att se på Comsol resultaten mellan skarv-stegfog och skarvfog. Kan man observera att marginellt bättre resultat kan nås av bortlämning av steget i skarvfogen.

En förbättring mellan de olika variationerna på runt 65% kunde uppnås

## 10 SKILLNAD MELLAN DRAG OCH BÖJNINGSBELASTADE LIMFOGAR

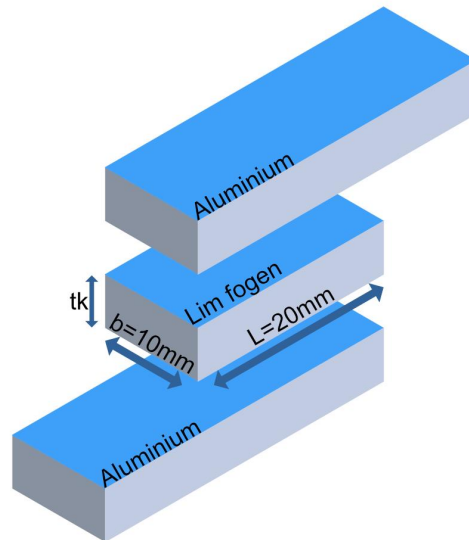


*Figur 24: Dragbelastning.*



*Figur 25: böjningsbelastning.*

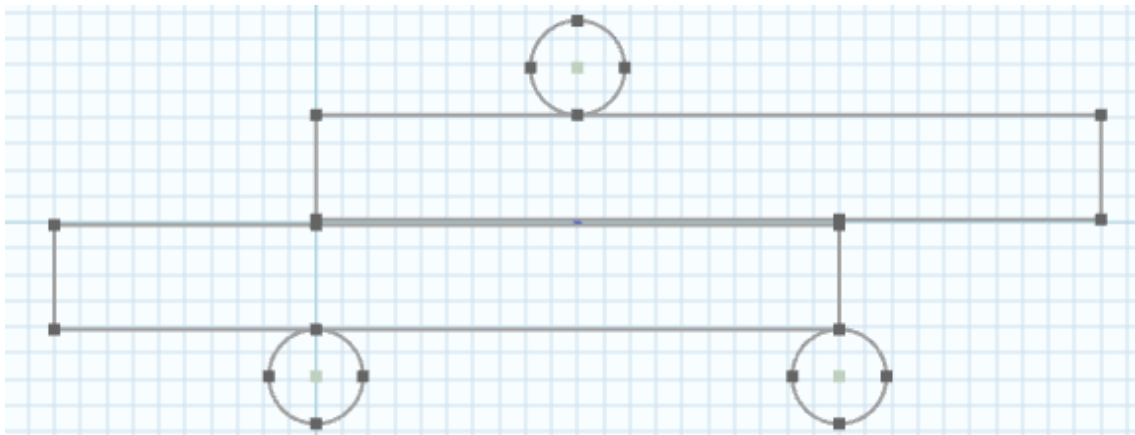
### 10.1 Böjningsbelastad överlappsfogskillnad mellan drag och böjningsbelastning



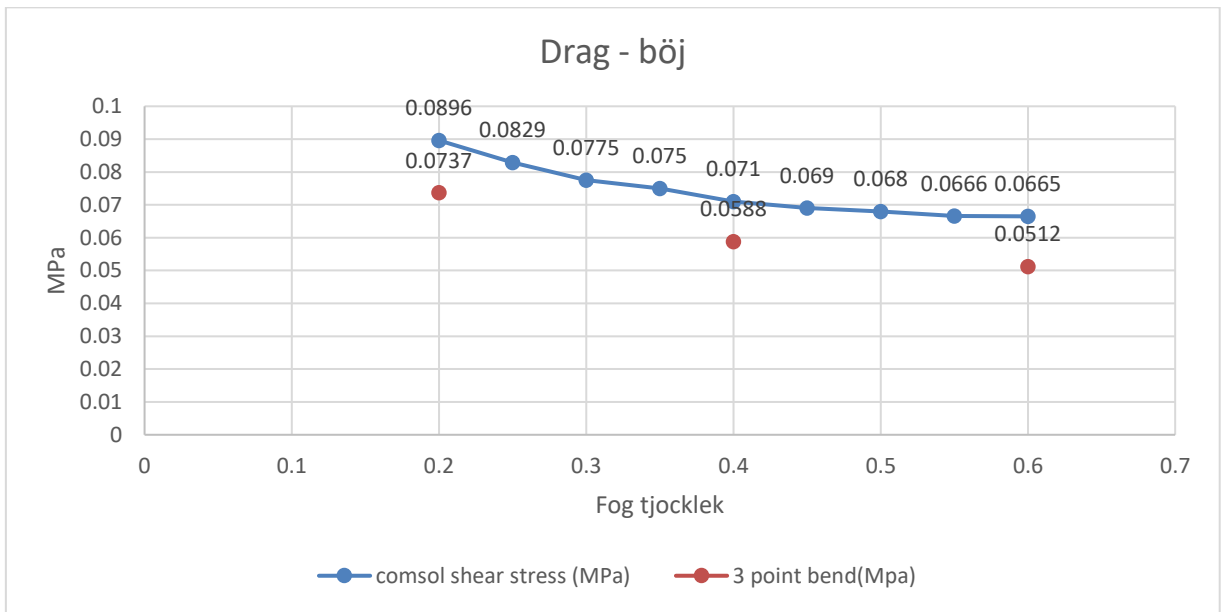
Figur 26: Enkel överlappsfog

För att simulera böjnings belastning modellerades 3 stavar varav de 2 nedre stavarna är stationära och den övre trycks ner med en kraft på  $F = 20\text{N}$

De 2 nedre stavarna är placerade så att de har ett avstånd på 10mm till mittpunkten från vardera hållet.



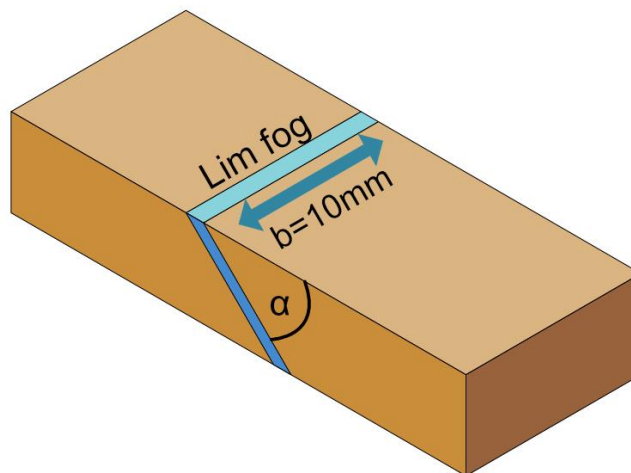
Figur 27: Modell på hur böj stavarna placerats.



Figur 28: graf där böjnings belastad överlappsfog jämförs med dragbelastad överlappsfog  $F = 20N$

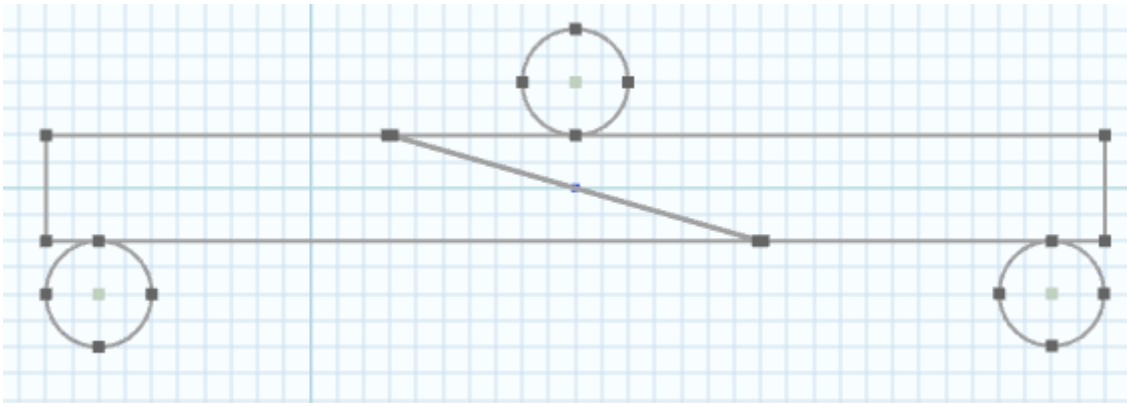
I fallet där en enkel överlappsfog utsätts för böjningsbelastning är den maximala spänningen lägre än när utsatt för drag.

## 10.2 Skarvfog skillnad, mellan drag- och böjningsbelastning

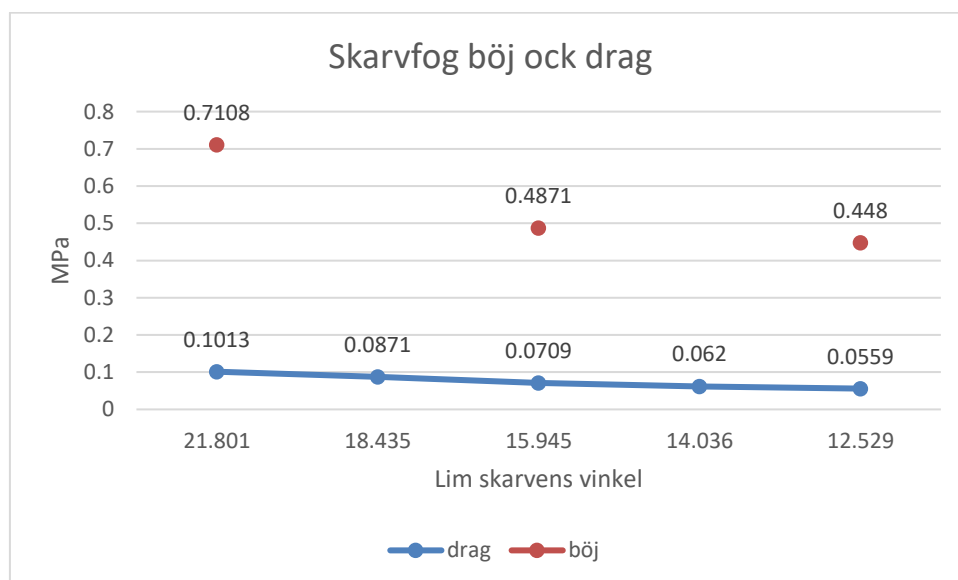


Figur 29: Skarvfog

Skarvfogens böjning modellerades med stavarna med 19mm från mitten åt vardera hållen med böjnings kraften på övre staven,  $F = 20\text{N}$ .



Figur 30: skarvfogens stavarnas placering för böj belastning.

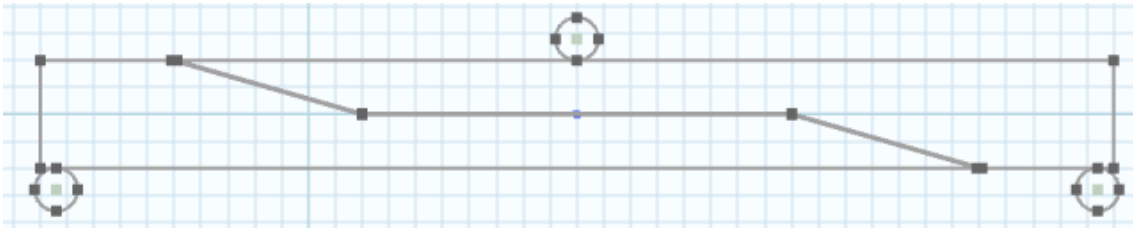


Figur 31: Graf på skarvfogs maxspänning jämförelse mellan drag och böjbelastning.

Då en skarvfog belastas med böjningsbelastning utsätts fogen med större spänning jämfört med dragbelastning.

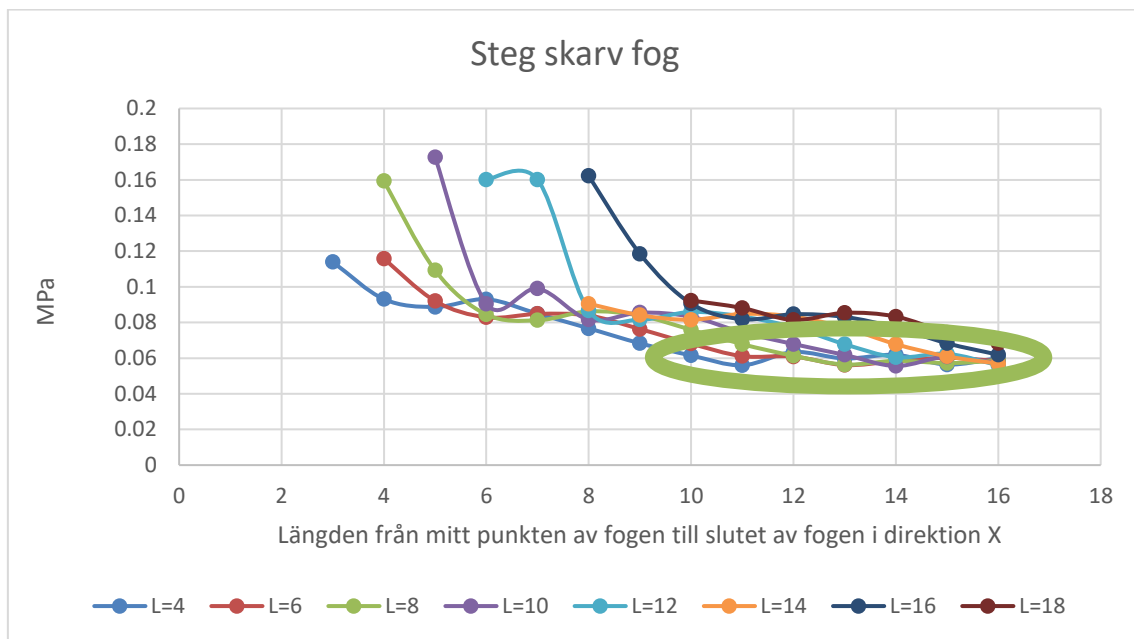
### 10.3 Skarv-stegfog, skillnad mellan drag- och böjningsbelastning

Stavplacering i skarv-stegfog var den samma som i skarvfogen.



Figur 32: Skarvstegfog stavplacering för böjningsbelastning.

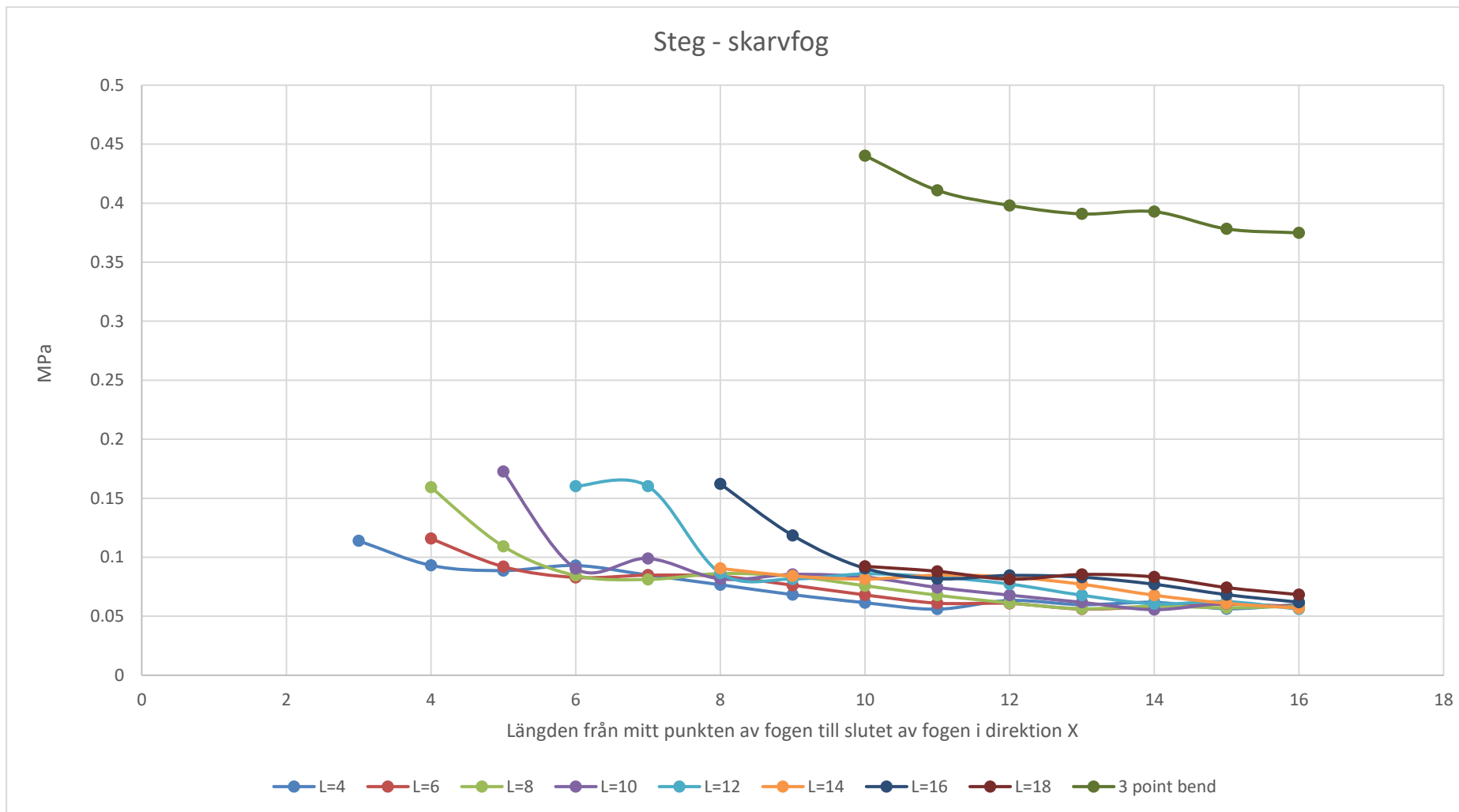
De längder på skarven och steget som uppvisade det bästa resultatet användes för mätningen av böjningsbelastningen. Märk i figuren nedan utmärkta med en ring runt.



Figur 33: De inringade resultatens längder användes för mätning av böjnings belastningen.

Tabell 9: Resultat av en böjningsbelastad skarv-stegfog.

<i>Mitten till skarv ända (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>MPa</i>
10	4	0.4403
11	6	0.4109
12	8	0.3981
13	10	0.3909
14	12	0.3928
15	14	0.3782
16	16	0.3748



Figur 34: Böjnings belastad skarv-stegfog i jämförelse med drag belastad.

## 11 DISKUSSION / SLUTSATS

Syftet med detta slutarbete var att virtuellt simulera olika limfogar och testa variationer i geometrin som skulle ge en limmad fog mera styrka. Drag- och böjbelastade tester utfördes för att se hur limfogen beter sig när den utsätts för en annan form av belastning. Alla tester utfördes med samma parametrar för materialet och limmet. Och den påverkande kraften är  $F = 20 \text{ N}$  i alla test för att kunna jämföra resultaten med varandra.

Slutsatsen baserar sig på resultat från de tester som utförts i comsol multiphysics.

Själva modelleringen av konstruktionen gjordes med positionering av X och Y i ett koordinatsystem vilket gjorde erhållande av vinkeln problematisk. Detta ledde till att vinklarna i skarvfogarna har decimaler.

Då man jämför de analytiska metoderna (Volkersen, Klein) med FEA (Comsol) ser man att de analytiska metoderna som användes är riktgivande metoder. De resultat som Volkersen teorin och Comsol gav, jämfördes med varandra. Det visade sig att med de parametrar som testerna utfördes med var skillnaden 84.99 % med 0.2mm fog tjockleken. Och då fog tjockleken ökades med 0.05 mm minskade skillnaden med runt 5 %.

Skillnaden kommer på grund av att den analytiska metoden inte tar i beaktande de limmade delarnas dimensioner. Detta skulle man kunna i framtiden undersöka.

Enligt testerna visade det sig att av alla de olika typerna av fogar som testats, visade det sig att överlappsfog med förtunning når de bästa resultat. Förtunningen påverkar på så sätt att stressen som skulle påverka på limfogen överförs till materialet där förtunningen gjorts. Detta belastar inte limmet på samma sätt som det skulle om inte förtunningen skulle vara gjord. Då en förtunning gjordes med  $81.47^\circ$  vinkel till en överlappsfog med fog tjocklek på 0.65mm kunde skjuvspännings maxima på 0.024 MPa vilket är en 62.85% förbättring från en  $90^\circ$  vinkel med samma fog tjocklek.

Från en skarvfog med fog tjockleken 0.2mm vid fogens ända och en vinkel på  $45^\circ$  till en skav fog med vinkel på  $12.529^\circ$  visades en förbättring på 48.9%. Dessutom kunde man åstadkomma bättre resultat genom att vid mittpunkten av fogen vända vinkeln spegelvänt.

Detta var en geometrisk förbättring. Denna förbättring utnyttjade den tidigare överlägsna vinkeln på  $12.529^\circ$  och nu med geometrisk förbättring vilket gav en förbättring till skjuvspänningen på 53%

De olika typerna av ”förbättring” som testades och gav förbättrade resultat var variationer i tjocklekar, vinklar och längder. Även ändringar i fogens geometriska form testades för att möjligtvis finna ny en typ av fog. Dessa gav drastiskt sämre resultat jämfört med de originella fogarna med dimension variationer. Det visar sig att det inte lönar sig att försöka göra överkomplicerade fogar. Det visade sig öppna nya luckor för stressen att krypa in i och samla sig i och bygga upp svaga punkter.

## 12 REFERENSER

- [1] Arts.eu, "Adhesive revolutionize manufacturing technologies," 07 06 2018. [Online]. Available: <https://arts.eu/insights/article/adhesive-revolutionizes-manufacturing-technologies/>. [Accessed 03 02 2021].
- [2] C. Dransfeld, "Advanced Composites," 01 02 2016. [Online]. Available: [http://people.arcada.fi/~rene/Clemens\\_Dransfeld/04\\_Arcada\\_adhesive\\_joints\\_FHNW.pdf](http://people.arcada.fi/~rene/Clemens_Dransfeld/04_Arcada_adhesive_joints_FHNW.pdf). [Accessed 04 02 2021].
- [3] M. R. R. J. C. L. d. S. M.D. Banea, "Multi-material adhesive joints for automotive industry," 15 10 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818310072>. [Accessed 04 02 21].
- [4] espclinch, "Joining System," [Online]. Available: <http://www.espclinch.com/joiningsystems.aspx>. [Accessed 05 02 2021].
- [5] iso.org, "Adhesives including adhesive tapes," [Online]. Available: <https://www.iso.org/ics/83.180/x/>. [Accessed 04 02 2021].
- [6] astm.org, "Adhesive Standards," [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/adhesive-standards.html>. [Accessed 04 02 2021].
- [7] L. Wadley, "Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa," 11 05 2009. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2700998/>. [Accessed 03 02 2021].
- [8] R. A. Markets, "Global Adhesives and Sealants Market Insights, 2020-2025 - Shifting Focus Towards Adhesive Bonding for Composite Materials," 23 06 2020. [Online]. Available: <https://www.globenewswire.com/news->

- release/2020/06/23/2051837/0/en/Global-Adhesives-and-Sealants-Market-Insights-2020-2025-Shifting-Focus-Towards-Adhesive-Bonding-for-Composite-Materials.html. [Accessed 04 02 2021].
- [9] "Adhesive," [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Adhesive#cite\\_note-Mazza-4](https://en.wikipedia.org/wiki/Adhesive#cite_note-Mazza-4). [Accessed 04 02 2021].
- [10] Wikipedia, "skjuvspänning wikipedia," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Skjuvsp%C3%A4nning#:~:text=Skjuvning%20av%20ett%20r%C3%A4tblock%3B%20en,h%C3%A5ller%20kroppen%20p%C3%A5%20sin%20plats.&text=Skjuvsp%C3%A4nning%20kan%20%C3%A4ven%20uppst%C3%A5%20mellan,nitade%2C%20spikade%20och%20skrivade%20ma>. [Accessed 29 01 2021].
- [11] J. L. Ee-Hua Wong, "Design Analysis of adhesively bonded structures," *Polymers*, pp. 1-2, 2017.
- [12] P. P. A. Mazza, "A new Palaeolithic discovery: tar-hafted stone tools in a European Mid-Pleistocene bone-bearing bed," 09 09 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305440306000197?via%3Dihub>. [Accessed 05 02 21].
- [13] N. Lamar, "The Volkersen's Metod," 24 dec 2018.
- [14] E. D. REEDUJr, "Adhesion science and Engineering," 2002.

