

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

**Simulering av
kallpressvetsning**

av

Haris Hastor

LITH-IKP-EX--04/2198--SE



INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LINKÖPINGS UNIVERSITET

Linköping, Augusti 2004



TEKNISKA HÖGSKOLAN
LINKÖPING UNIVERSITET

Avdelning, institution

Division, Department

Div of Solid Mechanics
Dept of Mechanical Engineering
SE-581 83 LINKÖPING

Datum

Date

2004-10-25

Språk

Language

☒ Svenska/Swedish
☐ Engelska/English

Rapporttyp

Report category

☐ Licentiatavhandling
☒ Examensarbete
☐ C-uppsats
☐ D-uppsats
☐ Övrig rapport

ISBN**ISRN****Serietitel och serienummer**

Title of series, numbering

LiTH-IKP-EX--04/2198--SE

USR för elektronisk version**Titel**

Title

Simulation of cold pressure welding

Författare

Author

Haris Hastor

Sammanfattning

Kallpresssvetsning är en metod där komponenter sammanfogas genom tryck, utan tillförsel av värme eller tillsatsmaterial. ProfilGruppen AB använder sig av metoden vid sammanfogning av tex. profiler och vinkelkopplingar.

FE-programmet LS-DYNA har använts för att simulera en typisk kallpressoperation. Resultat åstadkomna med LS-DYNA har jämförts med experimentella resultat för att kunna avgöra om den framtagna simuleringsmodellen kan beskriva kallpressoperationen. Det framgår att tendensen hos de numeriska resultaten liknar tendensen hos de experimentella resultaten. Olika geometriparametrar har också varierats för att undersöka hur de påverkar hållfastheten i det kallpressade förbandet.

Även en ny modell, där hanprofilen har ett koniskt utseende, har studerats för att undersöka hur förutsättningarna för svetsbildning påverkas.

Abstract

Cold pressure welding is a method in which the parts are joined together by pressure, without any contribution from heat or additional material. ProfilGruppen AB uses this method to join for example profiles and angle couplings. The FE-program LS-DYNA has been used for simulation of a typical cold pressure operation. Results achieved with LS-DYNA have been compared to experimental results to see if the developed simulation model is able to describe the cold pressure operation. It is clear that the tendency in the numerical results is similar to the tendency in the experimental results. Different parameters have also been varied to analyse if they affect the strength in the cold pressed unit.

A new model, where the male profile has a conical form, has also been studied in order to examine how the conditions for weld forming are affected.

Nyckelord: Kallpresssvetsning, FE-teknik, handel, hondel, utdragningskraft, inpressningskraft,

Keyword kontaktkraft

Förord

Detta examensarbete är det avslutande momentet i civilingenjörsutbildningen i maskinteknik vid Linköpings Tekniska Högskola, med hållfasthetslära som inriktning. Arbetet har utförts vid avdelningen Hållfasthetslära, Institutionen för Konstruktions och Produktionsteknik, i samarbete med ProfilGruppen AB, Åseda, och har bedrivits under perioden mars-juli, 2004.

Först och främst vill jag tacka mina handledare, professor Larsgunnar Nilsson och docent Kjell Simonsson, som funnits till hjälp under arbetet. Jag vill även tacka:

Mikael Jansson och Tomas Jansson, som har lärt mig använda programmet LS-DYNA och ägnat mycket tid åt lärorika diskussioner samt gett förslag på diverse problemlösningar.

Alla anställda vid ERAB, framför allt Daniel Hilding, vid lösning av uppstådda problem i LS-DYNA.

Karl Hedberg och Gunnar Bilén från ProfilGruppen AB, som har försett mig med allt material och besvarat mina frågor angående kallpressvetsning.

Slutligen vill jag tacka alla på avdelningen för Hållfasthetslära som har visat sitt intresse och hjälpt mig med mitt arbete.

Haris Hastor

Linköping, Augusti 2004

Sammanfattning

Kallpresssvetsning är en metod där komponenter sammanfogas genom tryck, utan tillförsel av värme eller tillsatsmaterial. ProfilGruppen AB använder sig av metoden vid sammanfogning av tex. profiler och vinkelkopplingar.

FE-programmet LS-DYNA har använts för att simulera en typisk kallpressoperation. Resultat åstadkomna med LS-DYNA har jämförts med experimentella resultat för att kunna avgöra om den framtagna simuleringsmodellen kan beskriva kallpressoperationen. Det framgår att tendensen hos de numeriska resultaten liknar tendensen hos de experimentella resultaten. Olika geometriparametrar har också varierats för att undersöka hur de påverkar hållfastheten i det kallpressade förbandet.

Även en ny modell, där hanprofilen har ett koniskt utseende, har studerats för att undersöka hur förutsättningarna för svetsbildning påverkas.

Abstract

Cold pressure welding is a method in which the parts are joined together by pressure, without any contribution from heat or additional material.

ProfilGruppen AB uses this method to join for example profiles and angle couplings. The FE-program LS-DYNA has been used for simulation of a typical cold pressure operation. Results achieved with LS-DYNA have been compared to experimental results to see if the developed simulation model is able to describe the cold pressure operation. It is clear that the tendency in the numerical results is similar to the tendency in the experimental results.

Different parameters have also been varied to analyse if they affect the strength in the cold pressed unit.

A new model, where the male profile has a conical form, has also been studied in order to examine how the conditions for weld forming are affected.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	<i>i</i>
Abstract	<i>i</i>
1 Inledning	1
1.1 Företagsinformation	1
1.2 Vad är Cold Pressure Welding/CPW?	1
1.3 Syfte och mål	2
2 Programbeskrivning	3
2.1 Förenklingar och antagande	3
2.2 Finit elementanalys (FEA)	3
2.3 Elementtyp	4
2.4 Formfunktioner	5
2.5 Numerisk integration	5
2.6 Deformationshårdnande	6
2.7 Centrala differensmetoden, CDM	7
2.7.1 Kritiskt tidsteg	8
2.8 Simuleringstid	9
3 Modellbeskrivning	11
4 Utvärderingsstudie	13
4.1 Övergripande deformation	13
4.2 Inre energi	14
4.3 Kontaktkraft	14
4.4 Inpressningskraft	14
5 Lösningmetoder	15
5.1 Lagrange formulering	15
5.2 ALE formulering	15
5.3 Metodutvärdering	16
5.3.1 Övergripande deformation	16
5.3.2 Inre energi	17
5.3.3 Kontaktkraft	17
5.3.4 Inpressningskraft	18
5.4 Val av metod	18
6 Jämförelse mellan numeriska och experimentella resultat	21
6.1 Utdragningskraft	21
6.2 Inpressningskraft	22
6.3 Svetsområde	22
6.4 Provserie 1	23
6.4.1 Prov 1	24

6.4.2	Prov 2	25
6.4.3	Prov 3	27
6.5	Provserie 5	29
6.5.1	Prov 1	29
6.5.2	Prov 2	31
6.6	Diskussion	32
7	Parameterstudie	35
7.1	Studie av hondelen	35
7.1.1	Simuleringsresultat	36
7.1.2	Diskussion	38
7.2	Studie av handelen	39
7.2.1	Simuleringsresultat	40
7.2.2	Diskussion	41
8	Konisk modell	43
8.1	Övergripande deformation	43
8.2	Inre energi	44
8.3	Kontaktkraft	45
8.4	Inpressningskraft	45
8.5	Diskussion	46
9	Slutsatser och vidareutveckling	47
	Referenser	49

1 Inledning

Detta avsnitt innehåller information om ProfilGruppen AB, beskrivning av kallpresssvetsning samt syftet med arbetet.

1.1 Företagsinformation

ProfilGruppen AB [1] bildades 1981 och utvecklar, tillverkar och levererar förädlade komponenter och kundanpassade profiler i aluminium. Verksamheten finns i småländska Åseda där konstruktion och produktutveckling, tillverkning samt merparten av försäljningen sker i dotterbolaget ProfilGruppen Extrusions AB. Övrig försäljning sker genom säljbolag i Danmark, England, Norge och Tyskland.

Förädling till komponenter sker genom samarbete med olika förädlingsbolag i regionen som är specialiserade på olika områden såsom skärande bearbetning, bockning, svetsning, kortbitsanodisering, lackering och montering.

ProfilGruppen är ett kunskapsföretag som fungerar som uppdragstillverkare och underleverantör till företag inom branscherna bygg, fordon, elektronik/telekom, inredning samt en rad andra produktområden. All tillverkning är kundorderstyrd.

ProfilGruppens marknadsdel i Sverige är ca 16 procent och exporten uppgår till 43 procent av koncernens leveransvolym. De största exportmarknaderna är Tyskland, Norge, Danmark och Storbritannien.

ProfilGruppen vill säkerställa fortsatt snabb tillväxt och god lönsamhet genom vidgat samarbete med välutvecklade kunder i tillväxtbranscher, ökad förädling samt förvärv.

1.2 Vad är Cold Pressure Welding/CPW?

Kallpresssvetsning (CPW) är en metod där komponenter sammanfogas genom tryck, utan tillförsel av värme eller tillsatsmaterial. Högt tryck och relativ rörelse mellan fogytorna bryter upp ytornas oxidskikt och ger kontakt mellan de yttersta atomerna vilket resulterar i en svetsprocess. Kallpresssvetsning är en gammal metod som åter börjat användas under senare år [2] [3].

De flesta icke-järnaktiga material, framförallt aluminium och koppar, kan kallpresssvetsas [3].

ProfilGruppen AB använder sig av kallpresssvetsning vid sammanfogning av profiler, vinkelkopplingar, skivformiga element osv.

Fördelen med CPW är att det är en billig, enkel, snabb och effektiv metod, som inte kräver någon efterbehandling. Rätt utförd har metoden stor konkurrenskraft jämfört med konventionell svetsning och andra liknande metoder.

En nackdel med metoden är att sammanfogningshastigheten måste ligga inom ett givet intervall. Utformningen av profilerna och dess toleranser är viktiga faktorer då fogen annars kan få sämre hållfasthet [2].

1.3 Syfte och mål

Målet med examensarbetet är att lägga grunden till en bättre förståelse av hur olika geometriparametrar påverkar hållfastheten i ett kallpresssvetsat förband.

Följande skall undersökas:

- Typiska kallpressningsoperationer simuleras med hjälp av Finit Element (FE) teknik (mjukvara: LS-DYNA [4]). Profilgeometrier väljs för vilka experimentella data finns att tillgå. Det mekaniska beteendet simuleras utan hänsyn tagen till att kallpresssvetsning sker. Resultande kallpresssvetsning predikteras från resulterande tryckkraftsfördelningar i förbanden.
- Ovanstående beräkningars kvalité verifieras genom jämförelse med deformationsmönster i uppsågade förband samt den experimentellt uppmätta hållfastheten hos förbanden.
- Om ett tydligt mönster mellan utseendet hos tryckfördelningen och förbandshållfastheten återfinnes, kan de förstnämnda resultaten användas som målfunktion vid optimering av kallpresssvetsade förband. Målet blir då att utföra ett enklare studium av hur vissa geometriparametrar påverkar styrkan i förbandet.

2 Programbeskrivning

Kallpressningsoperationen simuleras med hjälp av FE-systemet LS-DYNA. Programsystemet består av tre olika program.

1. Preprocessorn TrueGrid [5]: Med hjälp av TrueGrid definieras geometri, materialegenskaper, kontakter, laster, randvillkor, elementnät osv.
2. Numeriska beräkningsdelen LS-DYNA [6]: Programvara som läser de kontinuumsmekaniska ekvationerna. Fältvariablernas rums- och tidsberoende separeras. Variablernas rumsberoende diskretiseras med Finit ElementMetod (FEM). De tidsberoende ekvationerna integreras genom explicit eller implicit tidsintegrering.
3. Postprocessorn LS-POST [7]: Olika resultat från FE-analysen (spänningar, förskjutningar, energier i systemet, töjningar osv.) kan här studeras. De flesta resultat kan visas grafiskt.

2.1 Förenklingar och antagande

Följande förenklingar och antaganden har gjorts:

- Profiler som används vid kallpressvetsningen är ofta långa. Utifrån detta kan antas att ett tvådimensionellt (2D) plant deformationstillstånd råder, dvs. med z-axeln i längdriktningen gäller $\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0$.
- Symmetri utnyttjas i det att endast ena halvan av verktyg och profil modelleras, vilket gör att simuleringstiden kan halveras.
- Geometriförenklingar har gjorts för att begränsa beräkningstiden. Radien på rillornas toppar har tex. försumrats.

2.2 Finit elementanalys (FEA)

Finit elementanalys [8], eller också kallad finit elementmetod (FEM), är en metod för numerisk beräkning av fältproblem, där den rums- (spatiella) och/eller tidsberoende (temporära) variationen av en eller fler variabler söks. Ett enskilt finit element kan visualiseras som en liten del av en struktur, där en fältstorhet, tex. förskjutning, ges en enkel spatiell variation. Den rådande variationen i regionen som ett element täcker är oftast mer komplicerad än den gjorda ansatsen och FE-resultatet utgör därför en approximativ lösning. Elementen är förenade i punkter som kallas noder. Elementassamblering ger en finit elementstruktur, vilken kallas elementnät. Ett FE-nät representeras

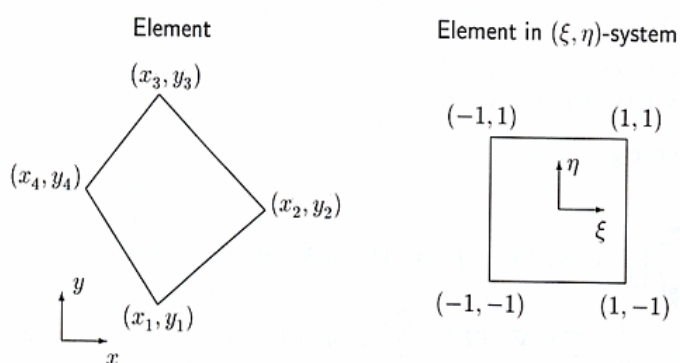
numeriskt med ett system av algebraiska eller differentialekvationer. Lösningen, i termer av nodstorheter, bestämmer den spatiella variationen av fältet i detta element. Således blir fältstorheter i hela strukturen approximerade element för element. Även om FE-lösning inte är exakt kan lösningen förbättras genom att använda fler eller bättre element i strukturen.

FEA har fördelar jämfört med andra numeriska analysmetoder.

- FEA är passande för alla fältproblem: värmeöverföring, spänningsanalyser, magnetiska fältanalyser osv.
- Det finns inga geometriska begränsningar. Analyserade kroppar eller områden kan inta vilken form som helst.
- Randvillkor och laster är inte begränsade.
- Materialegenskaper behöver vare sig vara homogena eller isotropa.
- En FE-struktur är mycket lik den aktuella kroppen eller området som ska analyseras.

2.3 Elementtyp

Den elementtyp som använts i detta arbete är bilinjära fyrnodiga element (2D plant töjningselement). Elementen är isoparametiska, vilket tillåter dem att ha en icke-rektangulär form. Detta möjliggörs genom användning av ett 2D-referenskoordinatsystem. Referenskoordinaterna, som i ett 2D-fall vanligtvis betecknas $\xi\eta$, avbildar elementet på ett kvadratisk referenselement [8]. Se Figur 1.



Figur 1: Avbildning av ett element till $\xi\eta$ -system (från [9])

2.4 Formfunktioner

Varje element har formfunktioner [8], vilka används till att interpolera såväl förskjutningsfält som elementgeometri (därav namnet isoparametri). För ett 2D bilinjärt element gäller

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \quad (2)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \quad (3)$$

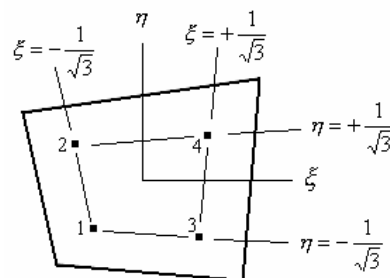
$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \quad (4)$$

Dessa formfunktionerna skall uppfylla följande kriterier:

- Formfunktionens värde måste vara lika med 1 för motsvarande nod och lika med 0 för alla andra noder
- Summan av alla formfunktioners värden måste vara lika med 1 för varje ξ och η
- Summan av alla formfunktionernas derivators värden måste vara lika med 0 för varje ξ och η

2.5 Numerisk integration

Avbildningen till (ξ, η) -systemet skapar analytiska uttryck vilka är svåra att integrera exakt. Därför används numerisk integration istället och då framförallt Gauss-kvadratur. För ett fullt integrerat bilinjärt element innebär detta att fyra Gausspunkter används för att integrera en funktion $\phi(\xi_i, \eta_j)$ över elementarean, se Figur 2.



Figur 2: Gauss punkter

$$\begin{aligned}
\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \phi(\xi, \eta) d\xi d\eta &= \int_{-1}^1 \left[\sum_i w_i \phi(\xi_i, \eta) \right] d\eta = \\
&= \sum_j w_j \left[\sum_i w_i \phi(\xi_i, \eta_j) \right] = \sum_i \sum_j w_i \cdot w_j \phi(\xi_i, \eta_j)
\end{aligned} \tag{5}$$

där w_i och w_j är viktsfaktorer vilka uppfyller $w_i \cdot w_j = 1$.

Fördelen med full integration är att noggrannare resultat erhålls än vid användning av en Gausspunkt, medan nackdelen är att beräkningarna tar längre tid samt att elementen har en tendens att bli för styva [8].

2.6 Deformationshårdnande

ProfilGruppen AB använder sig av aluminiumlegeringen 606045-T6 i sin kallpresstillverkning. Materialet är elastiskt-plastiskt med ett olinjärt deformationshårdnande, se Diagram 1 [10]. Som ett enklaste antagande antas von Mises flytkriterium med isotropt hårdnande. Vid isotropt hårdnande behåller flytytan sin form och position medan dess storlek ändras med plastisk deformation [11].

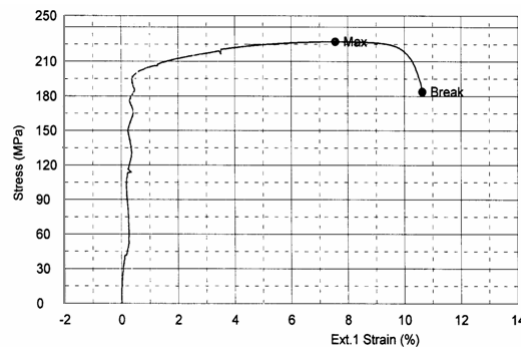


Diagram 1: Dragprovkurva

Om några punkter väljs mellan sträckgränsen och midjebildningspunkten på ingenjörsspännings - ingenjörstöjningskurvan kan den sanna spänningen och töjningen beräknas med Ekvation 6 och 7 [12]. Vad som händer efter midjebildningspunkten är inte möjligt att uttala sig om utan en approximation görs genom en tangentiell extrapolering.

$$\begin{aligned}
\sigma &= s \cdot (e + 1) \\
\varepsilon &= \ln(e + 1)
\end{aligned} \tag{6), (7)}$$

där

σ – sann spänning

s – teknologisk spänning

e – teknologisk töjning

ε – logaritmisk töjning

Den plastiska töjningen är skillnaden mellan total töjning och elastisk töjning, se Ekvation 8.

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

Detta samband, illustrerat i Diagram 2 nedan, används i LS-DYNA för att beskriva det plastiska hårdnandet i materialet.

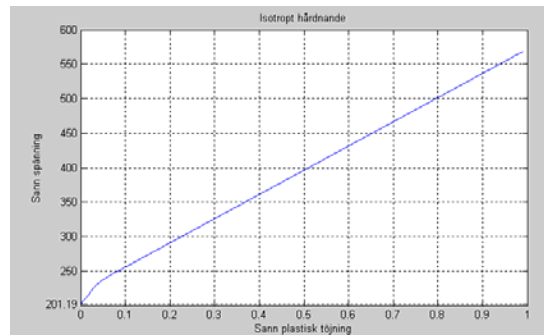


Diagram 2: Isotropt hårdnande

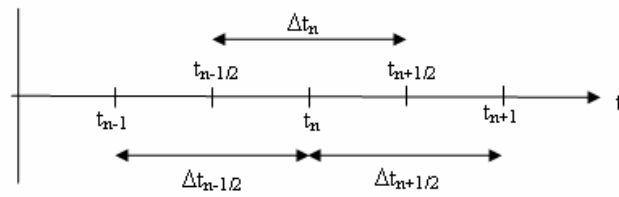
2.7 Centrala differensmetoden, CDM

Vid beräkningar i LS-DYNA uppdateras resultatet vid varje tidssteg Δt enligt Centrala DifferensMetoden (CDM).

$$\dot{D}_{n+1/2} = \frac{D_{n+1} - D_n}{\Delta t_{n+1/2}} \quad (9)$$

$$\ddot{D}_n = \frac{\dot{D}_{n+1/2} - \dot{D}_{n-1/2}}{\Delta t_n} \quad (10)$$

där tidssteget Δt_n är lika med $\left(\frac{\Delta t_{n-1/2} + \Delta t_{n+1/2}}{2} \right) = \left(\frac{t_{n+1} - t_{n-1}}{2} \right)$, se Figur 3.



Figur 3: Centrala differensmetoden

CDM är en explicit metod där följande loop upprepas vid varje tidssteg:

$$\text{Rörelseekvationen} \Rightarrow \ddot{D}_n \Rightarrow \dot{D}_{n+1/2} \Rightarrow D_{n+1}.$$

Metoden är villkorligt stabil, vilket betyder att tidssteget inte får bli större än det kritiska tidssteget Δt_e [13].

2.7.1 Kritiskt tidssteg

För ett 2D plant töjningsselement bestäms det kritiska tidssteget genom sambandet [4],

$$\Delta t_e = \frac{L_s}{c} \quad (11)$$

där L_s är karakteristiska elementlängden och c är ljudhastigheten i materialet:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (12)$$

där

E = E-modul

ρ = densitet

ν = Poisson tal

Den karakteristiska elementlängden fås ur följande samband:

$$L_s = \frac{(1+\beta)A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, (1-\beta)L_4)}. \quad (13)$$

där

$\beta = 0$ för fyrnodiga element

A_s = elementarea

$L_1, \dots, L_4$ är längden av de sidor som definierar elementet.

Det minsta tidsteget bestämmer således tiden som behövs för beräkningen. Tidsteget beror på materialegenskaper (se Ekvation 12), dvs. hur snabbt ljudet tar sig igenom elementet och elementets storlek och form. Ju mindre element desto mindre tidsteg och således längre beräkningstid [4].

2.8 Simuleringstid

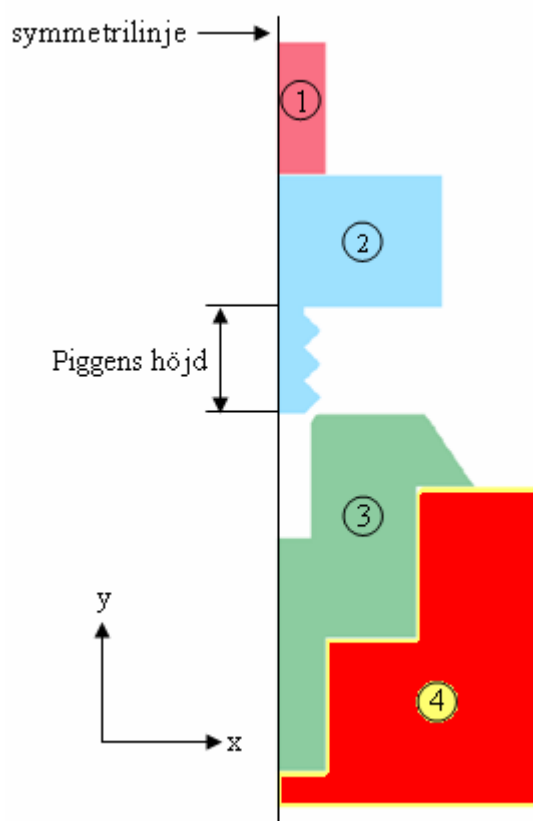
Beräkningstiden beror på tidsteget och totala tiden för förloppet. Att använda samma belastningshastighet som vid verkliga experiment är inget alternativ då detta skulle leda till alltför långa beräkningstider. Däremot kan en förhöjd belastningshastighet accepteras under förutsättning att kinetiska energin inte blir större än ett par procent av den totala energin. Datortiderna för de i detta arbete gjorda simuleringarna har typiskt legat i storleksordningen några timmar på en ordinär persondator.

3 Modellbeskrivning

Modellen som skall användas i LS-DYNA beskrivs i Figur 4. Längs symmetrilinjen är all rörelse i x-led låst. Storlek på de element som använts i modellen är minst 0.1 mm^2 . Friktionskoefficient är 0.1. Termination time¹ är satt till 0.002 s. Belastningshastigheten fås då av Ekvation 14:

$$v_{last} = \frac{\text{inpressningsdjup}}{\text{termination time}} \quad (14)$$

där inpressningsdjupet är höjden på piggen.



Figur 4: Den framtagna modellen består av följande delar:
1) fasthållningsdel med föreskriven belastningshastighet,
2) handel, 3) hondel, 4) dyna som håller fast hondelen

¹ Tidsintervall under vilket processen studeras.

4 Utvärderingsstudie

Enligt teknisk litteratur [14] gäller följande villkor för att kallpressvetsning av aluminium skall uppstå:

- Kontakttrycket måste vara större än 200 N/mm^2 (200 MPa)
- Den plastiska töjningen ska vara minst 40 %

Den här presenterade FE-simuleringen av kallpressningen beskriver inte vad som händer på atomnivå, tar inte hänsyn till värme som uppstår vid inpressningen eller att kallpressvetsning sker. Istället skall det mekaniska beteendet studeras och utifrån detta vissa slutsatser dras. Målet är att förstå tendenser som visar vilka förhållanden som är gynnsamma för bildandet av kallpressvets. Vid utvärdering av simuleringarna studeras följande storheter:

- 1) Övergripande deformation
- 2) Inre energi
- 3) Kontaktkraft
- 4) Inpressningskraft

Redovisning av alla storheter förutom övergripande deformation sker i diagramform, där abskissan visar tiden och ordinatan anger storleken på storheterna. Abskissan visar inte sluttiden utan tiden fram till att undersidan på handelen kommer i kontakt med ovansidan på hondelen. Anledningen till detta är att undvika orimliga resultat, framförallt på inpressningskraften, som annars blir oerhört stor.

4.1 Övergripande deformation

Med övergripande deformation menas en kvalitativ utvärdering av deformationen i hela modellen efter att inpressningsprocessen avslutats. Kallpressvetsen kan uppstå om deformationen är minst 40 % [14]. Trots att plastiska deformationer är större än 40 % i simuleringen skall övergripande deformationen utvärderas pga. att deformationshårdnandekurvan som används för att beskriva plastiska flödet i materialet är approximativ. Man vet vad som händer i materialet upp till ca 7 % plastisk deformation (delen av kurvan som erhållits mha. Diagram 1) medan de plastiska deformationer som är intressanta ligger över 40 % och har erhållits mha. den approximerade delen av hårdnandekurvan.

4.2 Inre energi

Med inre energin avses inre krafter, dvs. spänningarnas, arbete, vilket motsvarar det tillförda arbetet till handelen. Den inre energin har ett direkt samband med plastiska deformationer, dvs. ju större deformationer som är närvarande i materialet desto högre inre energi erhålls.

4.3 Kontaktkraft

Kontaktkraften definieras som tryckkraften mellan han- och hondelen vid inpressningen. Det antas att större kontaktkraft ger gynnsammare förhållanden för att kallpresssvetsning skall ske.

4.4 Inpressningskraft

Inpressningskraften är kraften som behövs för att trycka handelen in i hondelen vid kallpressningsoperationen.

5 Lösningsmetoder

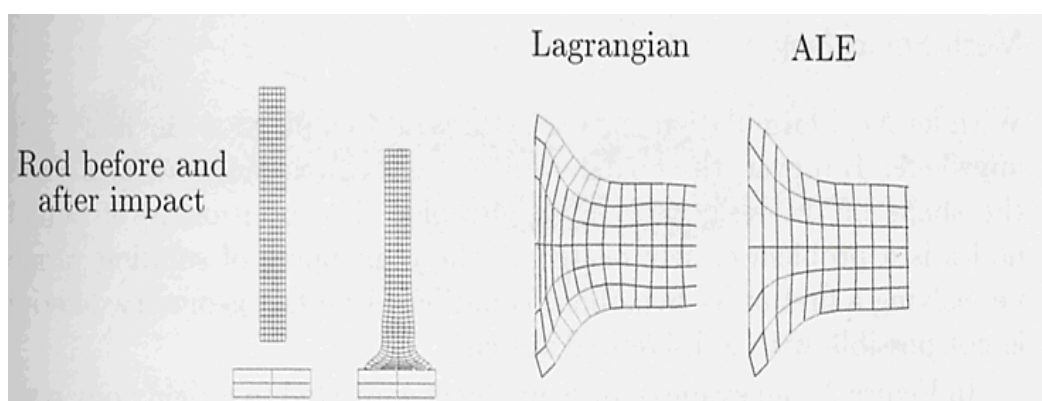
Kallpressningsoperationen är en process i vilken stora deformationer äger rum. Två metoder studeras i syfte att se vilken av dem som är effektivast.

5.1 Lagrange formulering

Denna ordinära FE-metod innebär att elementen följer materialet, dvs. att varje nodpunkt också är en materialfix punkt.

5.2 ALE formulering

ALE (The Arbitrary Lagrangian-Eulerian) formuleringen är en teknik där FE-nätet är fritt att röra på sig oberoende av materialflödet, dvs. noder följer inte nödvändigtvis materialflödet, utan placeras på ett sådant sätt att elementdistorsion undviks.



Figur 5: Skillnaden mellan ALE och Lagrange formulering.
Bilden visar en balk som slår in i ett stelt hinder [9]

ALE formuleringen består av ett Lagrange tidsteg som följs upp av ett ommappnings- eller advektionssteg. Under advektionssteget utförs en inkrementell omplacering av elementen, där noder typiskt flyttas en bråkdel av de karakteristiska elementlängder som närliggande element har. Hur ofta advektionssteget upprepas bestäms av användaren. Efter att noderna omplacerats, sker en ommappning av resultat från den tidigare till det nya elementnätet. Algoritmen som används i LS-DYNA för att göra detta är av andra ordningens noggrannhet.

Det generella flödet i ett ALE tidsteg är följande (från [4]):

1. utförande av ett Lagrange steg
2. eventuellt utförande av ett advektionssteg
 - a) bestämning av vilka noder som ska flyttas
 - b) flyttning av gränsnoder
 - c) flyttning av inre noder
 - d) beräkning av transporten av elementcentrerade variabler
 - e) beräkning av rörelsemängdstransporten (the momentum transport) och hastighetsuppdatering

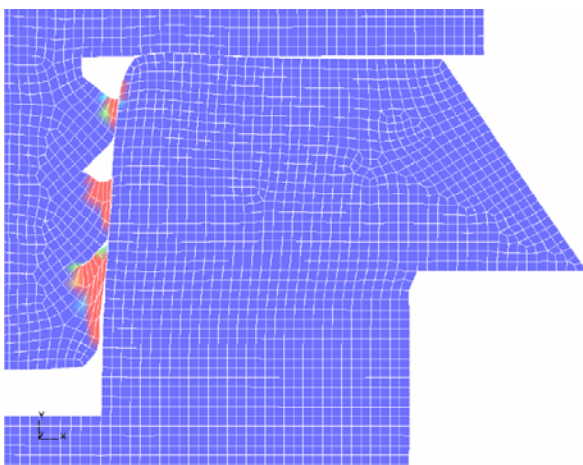
Det enklaste sättet att minimera kostnader vid ALE beräkningar är att utföra dem med endast några få advektionssteg, då kostnaden för ett sådant är två till fem gånger större än kostnaden för ett Lagrange tidsteg, [4]. Generellt är det oeffektivt att advektera ett element om inte minst 20 % av dess volym kommer att transporteras eftersom ökning av tidstegsstorlek inte uppväger kostnaden av advektionsberäkningarna, se [4].

5.3 Metodutvärdering

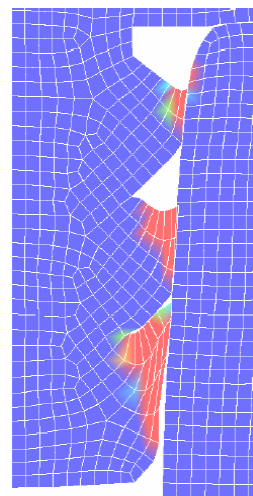
Vid jämförelse mellan Lagrange och ALE formuleringarna skall de storheter som beskrivits i Kap 4 Utvärderingsstudien beaktas.

5.3.1 Övergripande deformation

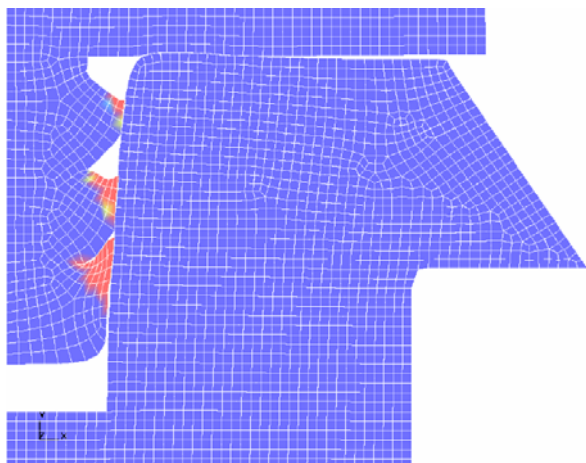
Vid jämförelse av dessa två modeller blir det tydligt att deformationen är i stort sett likartad. Se Figur 6-9.



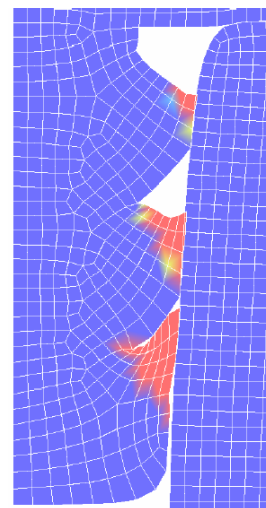
Figur 6: Lagrange modell



Figur 7: Lagrange modell
(förstorad bild)



Figur 8: ALE modell

Figur 9: ALE modell
(förstorad bild)

5.3.2 Inre energi

Genom att studera diagram för respektive metod, konstateras att de inre energierna är så gott som identiska, se Diagram 3 och 4.

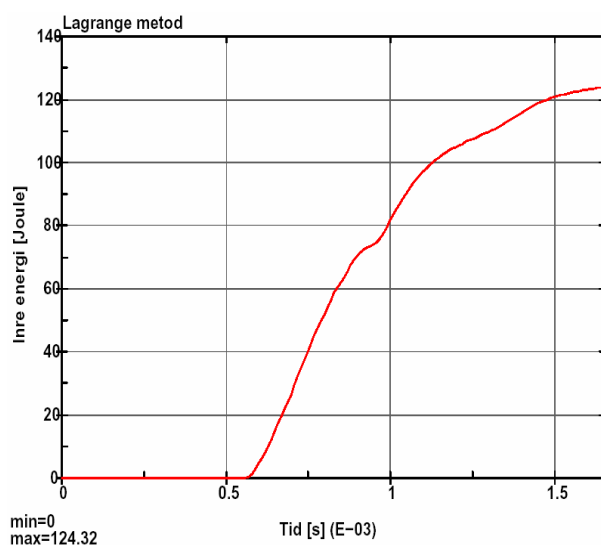


Diagram 3: Inre energi; Lagrange metod

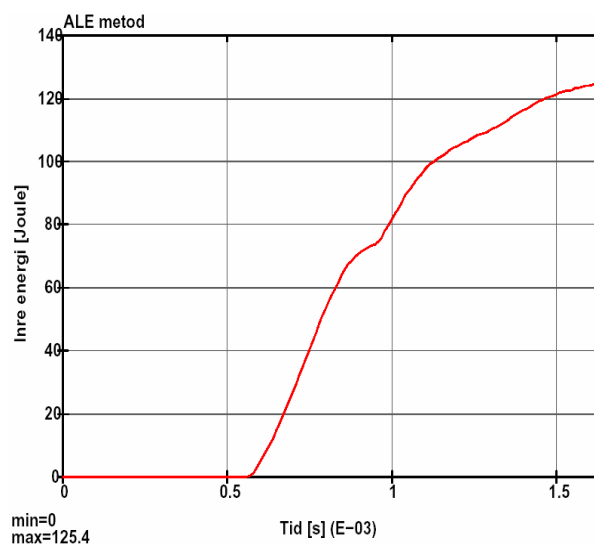


Diagram 4: Inre energi; ALE metod

5.3.3 Kontaktkraft

Kontaktkraften, eller tryckkraften, är kraften i x-led mellan han- och hondelen vid inpressningen. Det antas att tryckkraften har koppling till svetsbildandet, dvs. ju högre tryckkraft desto mer gynnsamt blir det för att kallsvetsning skall uppstå. Kurvornas utseenden är likartade. Skillnaderna beror sannolikt på ommappningarna vid ALE-simuleringen och på ett något försämrade beteende hos de deformerade Lagrange elementen, se Diagram 5 och 6.

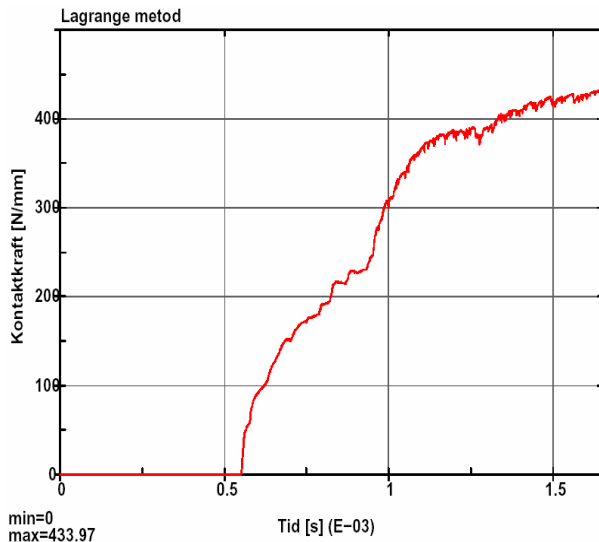


Diagram 5: Kontaktkraft; Lagrange metod

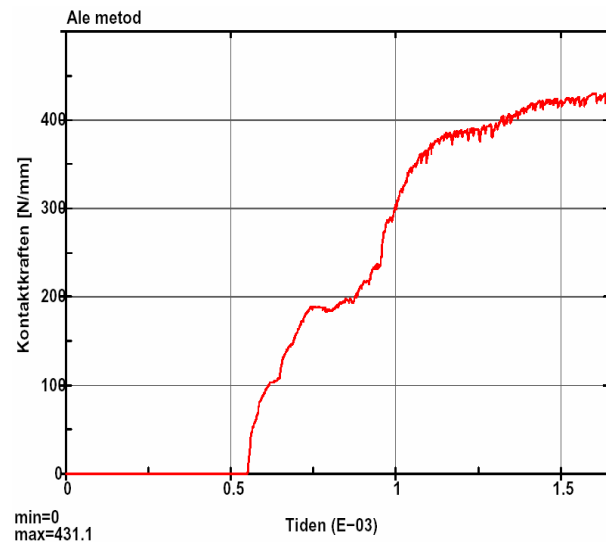
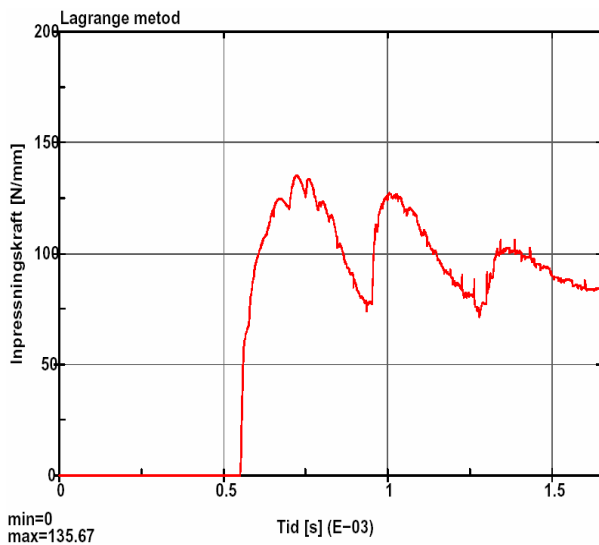
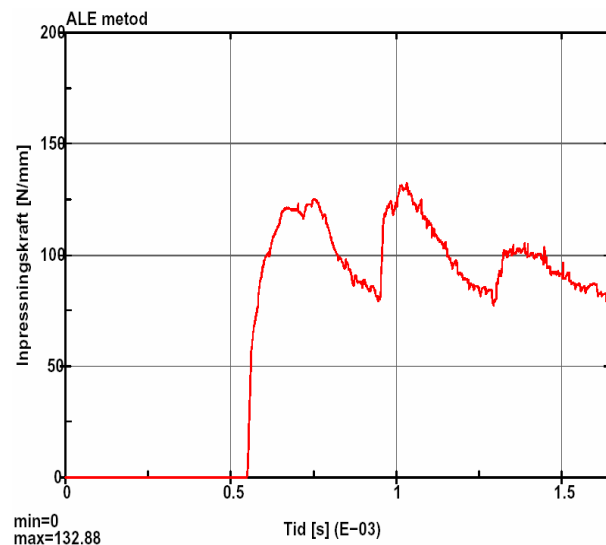


Diagram 6: Kontaktkraft; ALE metod

5.3.4 Inpressningskraft

Det konstateras att inpressningskraftens variation under inpressningsförloppet är likartad för metoderna. Man lägger märke till att kurvorna har tre toppar, där varje topp motsvarar kraften som behövs för att övervinna respektive rilla, se Diagram 7 och 8.

Diagram 7: Inpressningskraft;
Lagrange metodDiagram 8: Inpressningskraft;
ALE metod

5.4 Val av metod

Vid jämförelse av metoderna kan konstateras att resultaten inte skiljer sig märkvärt. Slutsatsen blir därför att båda metoderna är likvärdiga vid simulering

av kallpressningsoperationen. Om deformationerna är så pass stora att Lagrange metoden inte klarar simuleringen, dvs. om elementen blir distorderade, är ALE metoden ett bättre alternativ, eftersom advektionsstegen gör att elementnätet förfinas och resultaten mappas om. Om inte, som i föreliggande fall, är Lagrange metoden att föredra, då den leder till kortare beräkningstider.

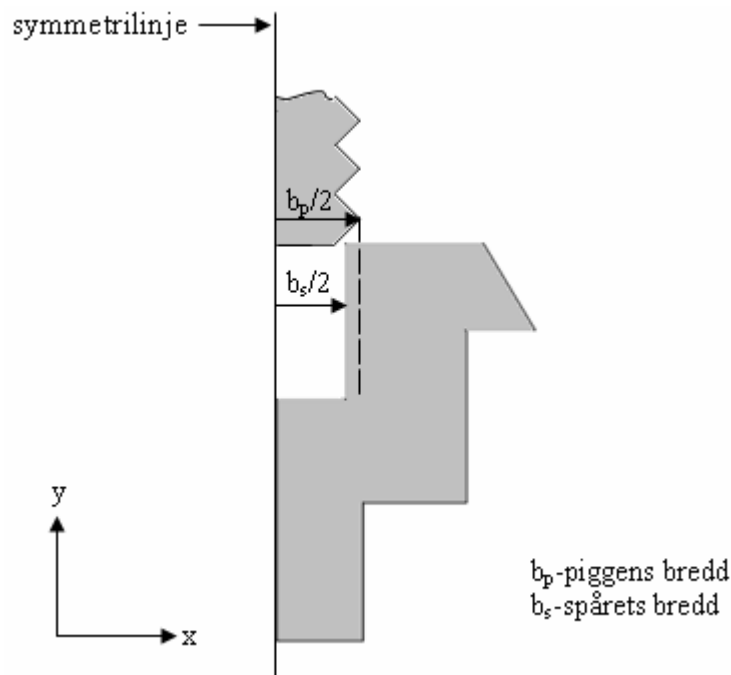
6 Jämförelse mellan numeriska och experimentella resultat

För att utvärdera den här framtagna simuleringsmodellen görs jämförelse med erhållna experimentella resultat [15] [16]. Mer specifikt kommer utdragningskraft, inpressningskraft, samt svetsområde att studeras.

6.1 Utdragningskraft

Enligt genomförda experiment [15] har det visat sig att mer kallsvets bildas vid större passning. Passningen definieras enligt Ekvation 15 (från [15]):

$$Passning = \frac{Piggens_bredd - Spårets_bredd}{2} \quad (15)$$



Figur 10: Passning

Ju större passning desto mer material pressas in i hondelen, vilket i sin tur leder till att tryckkraften mellan han- och hondelen ökar. Det har förutsatts att kontaktkraften har koppling till svetsbildandet, vilket i sin tur har koppling till utdragningskraften, dvs. ju mer svets som bildas desto högre blir utdragningskraften. Vid utvärdering jämförs förhållandet mellan de experimentellt erhållna utdragningskrafterna och de numeriskt erhållna kontaktkrafterna. Förhållandet mellan utdragningskraften vid mellersta/minsta

passningen och utdragningskraften vid största passningen fås enligt Ekvation 16:

$$Kvot_{Utkraft} = \frac{Utdragningskraft_{mellersta/minsta\ passning}}{Utdragningskraft_{största\ passning}} \quad (16)$$

På samma sätt erhålls förhållandet mellan kontaktkrafter, se Ekvation 17.

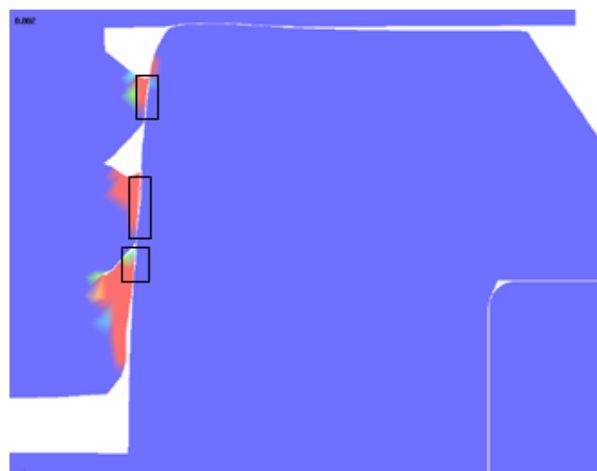
$$Kvot_{Kontaktkraft} = \frac{Kontaktkraft_{mellersta/minsta\ passning}}{Kontaktkraft_{största\ passning}} \quad (17)$$

6.2 Inpressningskraft

Värdena på de experimentellt uppmätta inpressningskrafterna är inte tillförlitliga enligt [19]. Inga jämförelser med experimentella resultat utan enbart en redovisning och kvalitativ bedömning av erhållna numeriska värden på inpressningskraften görs därför.

6.3 Svetsområde

Initiellt planerades jämförelse av potentiella svetsområden i simuleringarna med svetsområden från experiment. Om man studerar resultat från simuleringen av Prov 1 i Provserie 1 (Figur 11), lägger man märke till att de potentiella svetsområdena skiljer sig något från de experimentella.

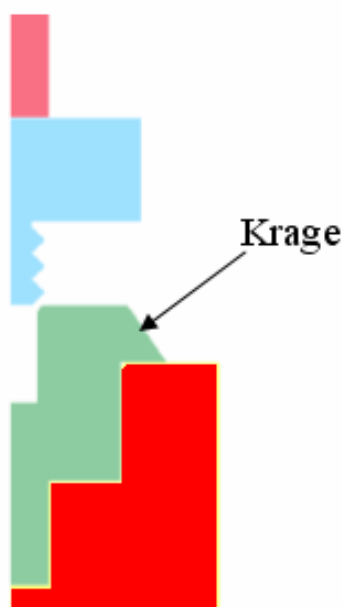


Figur 11: Övergripande deformation i prov 1. De markerade rutorna föreställer potentiella svetsområden

I experimentet har det visat sig att de nedre rillorna går av vid inpressningen samt att svetslängden är något större [15]. Anledningen att det inte är så i simuleringen beror på att inget brottkriterium är angivet och att bildandet av kallpresssvetsen inte är definierat. Inga undersökningar om svetsområden kommer därför att göras.

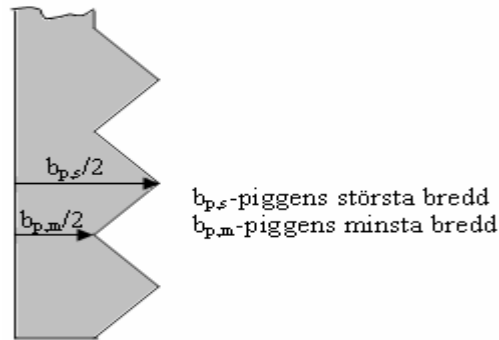
6.4 Provsérie 1

Hondelen är här fastspänd upp till kragen, se Figur 12.



Figur 12: Modell 1

Dimensionerna på hondelen är valda i enlighet med ProfilGruppens standard [17]. Dimensionerna på handelen är dock inte helt enligt standard [18], utan vissa mått har modifierats [19]. Anledningen till detta är att uppmätta, experimentellt använda, värden har visat sig vara mindre än de föreskrivna. Mått som är modifierade är piggens största och minsta bredd, se Figur 13.



Figur 13: Modifierade bredder (konfidentiellt)

Tre prover med olika passningar har utförts experimentellt och dessa jämförs med simuleringsresultat.

6.4.1 Prov 1

Passningen är 0.30 mm. Enligt experiment ger detta prov mest svets och högsta utdragningskraften. Kontaktkraften som erhållits från simuleringen är störst vid denna geometri, vilket tyder på att antagandet om att kontaktkraften har koppling till svetsbildandet stämmer. Den maximala kontaktkraften är uppmätt till ca 434 N/mm. Se Diagram 9.

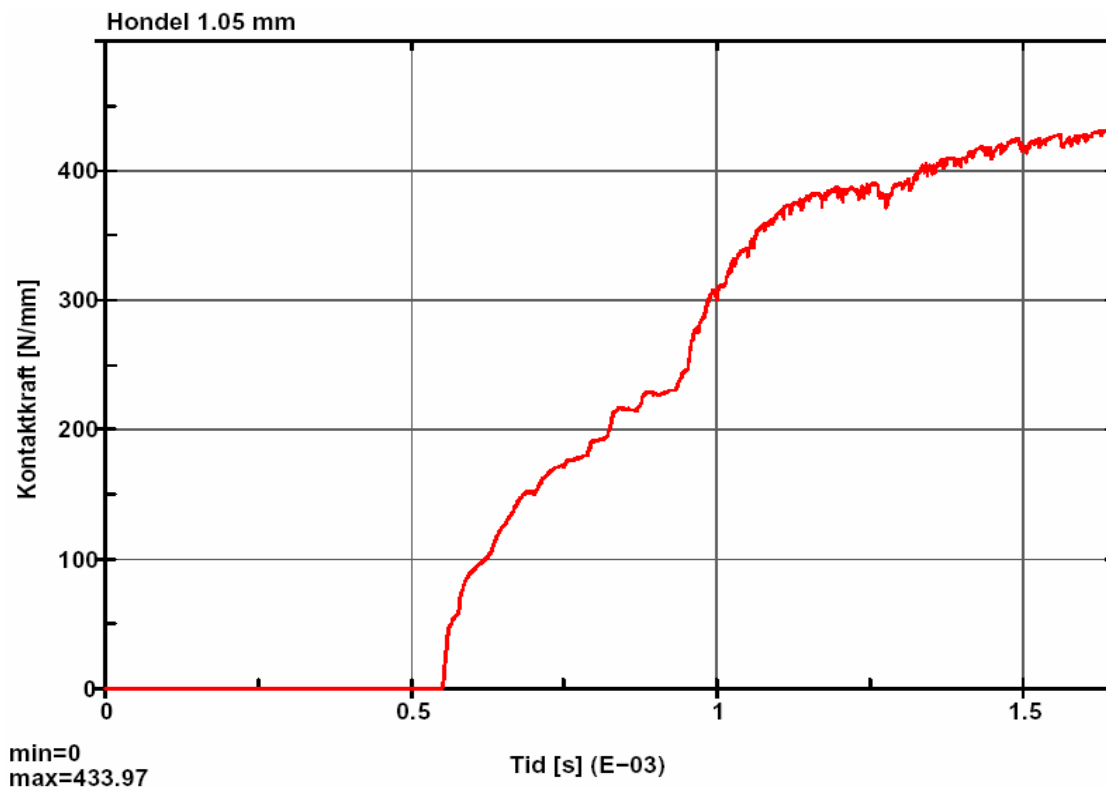


Diagram 9: Kontaktkraft

Det högsta värdet på inpressningskraften är uppmätt till ca 136 N/mm. Detta värde gäller endast för halva modellen. Den totala inpressningskraften vid kallpressoperationen beräknas därför vara 272 N/mm, se Diagram 10.

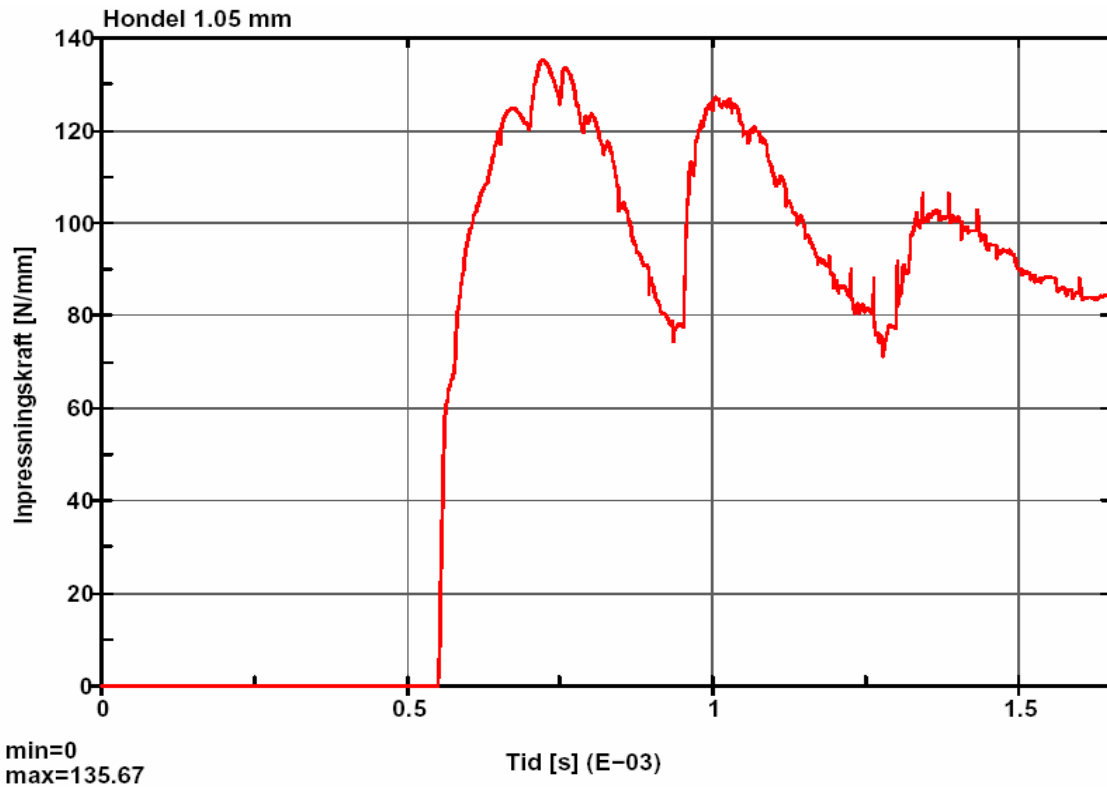


Diagram 10: Inpressningskraft

6.4.2 Prov 2

Passningen är 0.25 mm. Maximala kontaktkraften har bestämts till ca 366 N/mm, se Diagram 11. Förhållandet mellan utdragningskrafter och kontaktkrafter fås genom att använda Ekvation 16 och 17.

$$Kvot_{Utkraft} = \frac{Utdragningskraft_{mellersta\ passning}}{Utdragningskraft_{största\ passning}} = 0.87$$

$$Kvot_{Kontaktkraft} = \frac{Kontaktkraft_{mellersta\ passning}}{Kontaktkraft_{största\ passning}} = \frac{365.76}{433.97} = 0.84$$

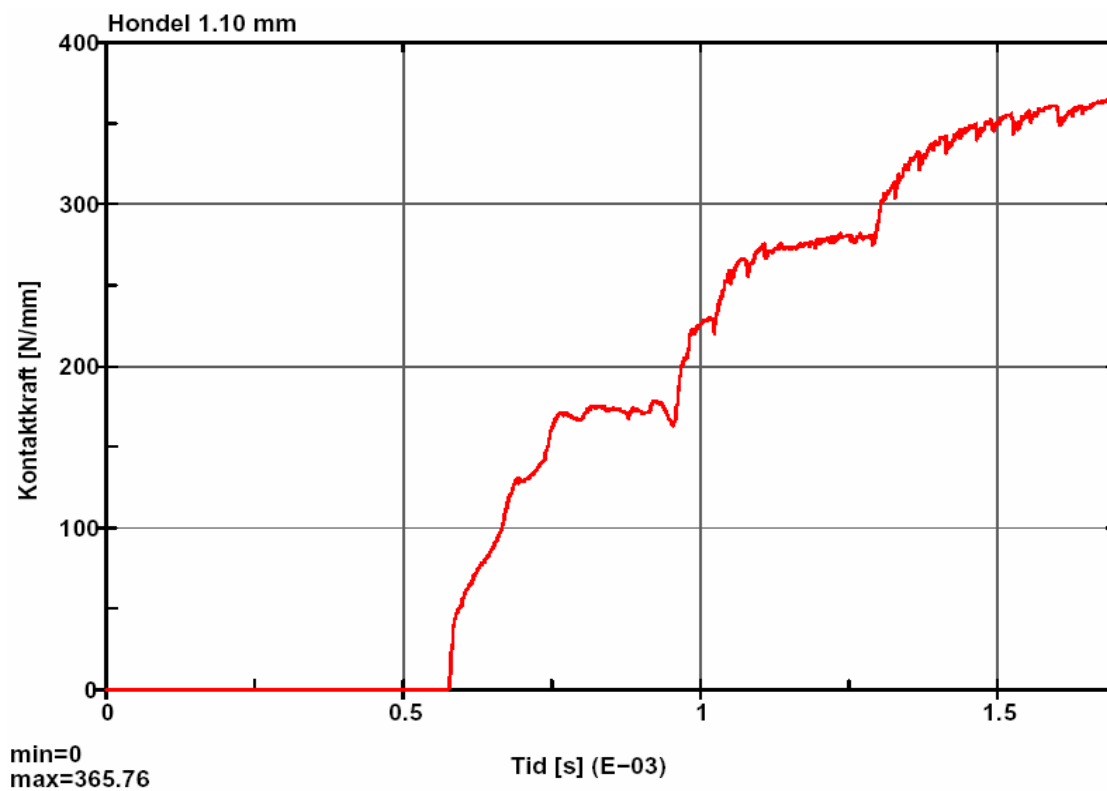


Diagram 11: Kontaktkraft

Inpressningskraften är ca $2 \times 111 \text{ N/mm} = 222 \text{ N/mm}$, se Diagram 12.

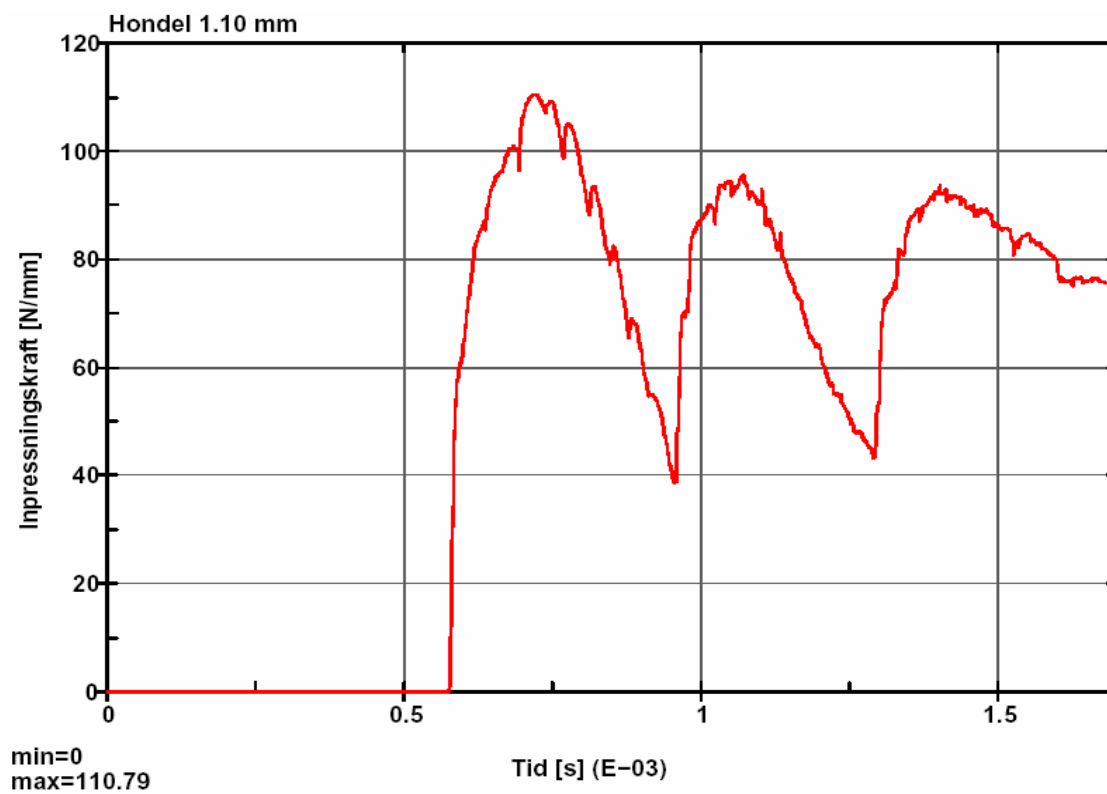
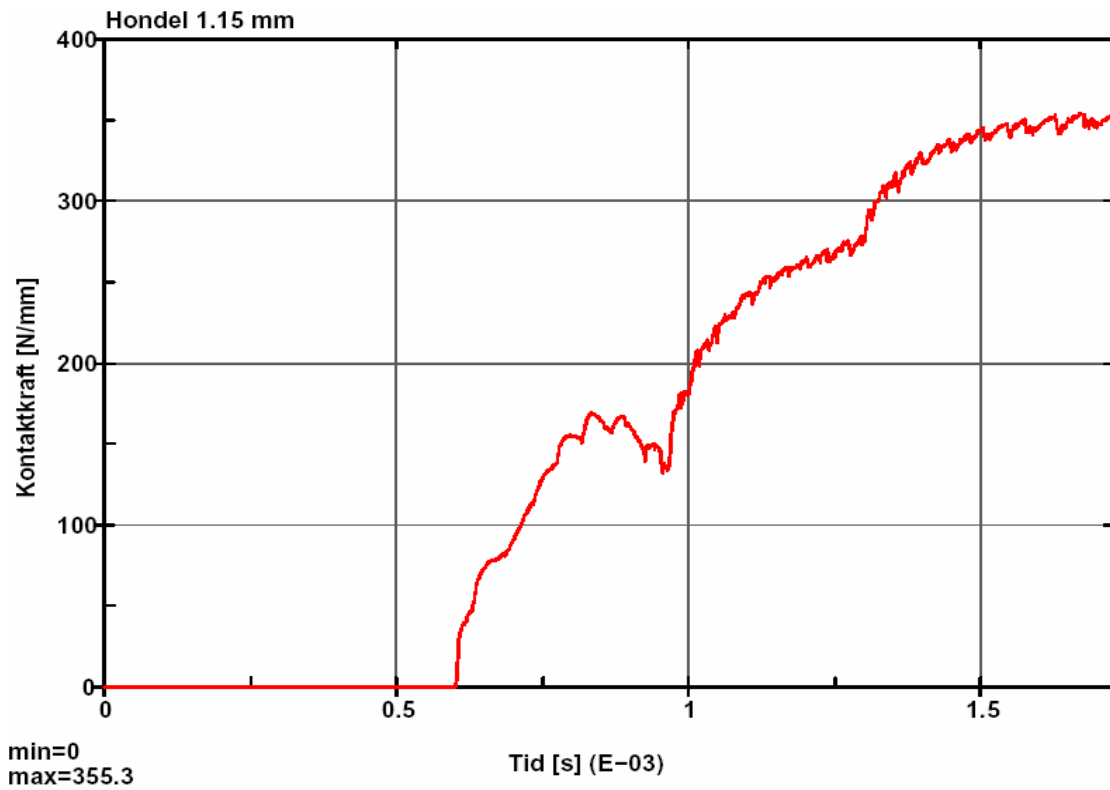


Diagram 12: Inpressningskraft

6.4.3 Prov 3

Passningen är 0.20 mm. Den maximala kontaktkraften är ca 355 N/mm, se Diagram 13. Enligt experimentella resultat [16], har det här provet gett minst svets och lägsta utdragningskraften. Genom tillämpning av Ekvation 16 och 17 erhålls $Kvot_{Utkraft} = 0.83$ och $Kvot_{Kontaktkraft} = 0.82$.



Den avlästa inpressningskraften multiplicerad med 2 blir ca 169 N/mm, se Diagram 14.

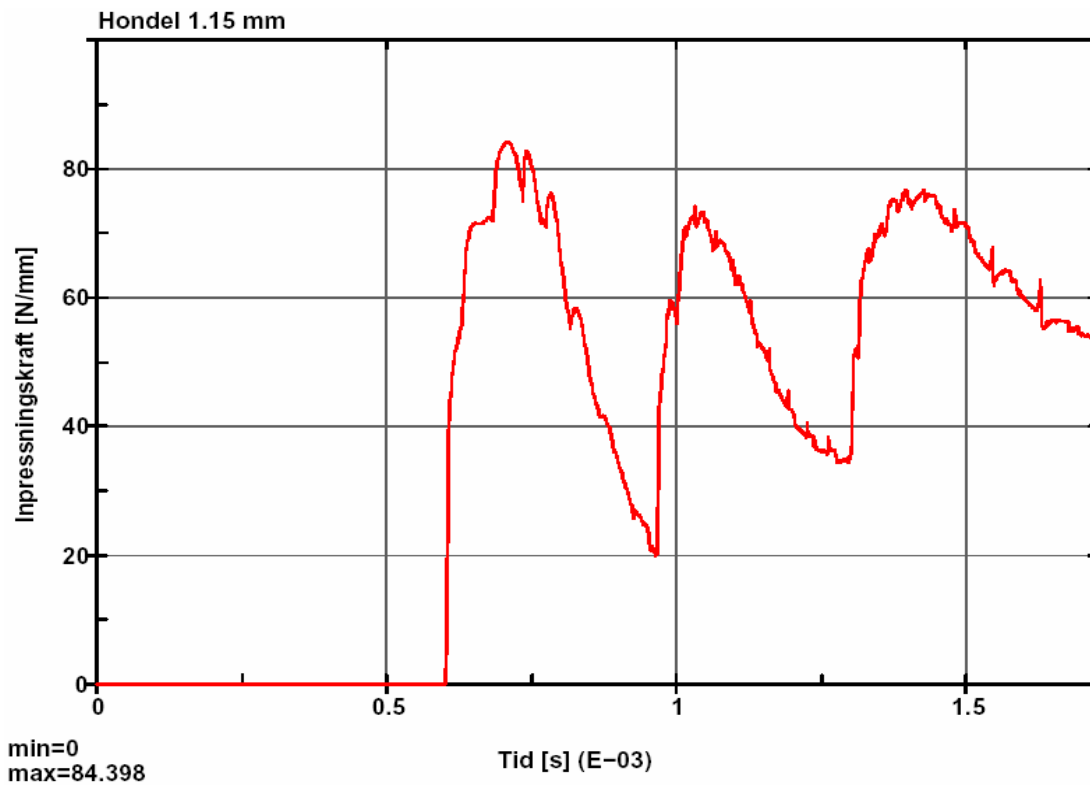


Diagram 14: Inpressningskraft

Tabell 1: Sammanställning av resultat från provserie 1

Prov	Passning [mm]	Kontaktkraft [N/mm]	Inpressningskraft [N/mm]	Experimentell utdragningskraft
1	0.30	434	272	Högst
2	0.25	366	222	
3	0.20	355	169	Lägst

I Diagram 15 och 16 visas hur kontakt- respektive inpressningskraften varierar i provserie 1. I Diagram 17 på nästa sida ses hur kvoter ligger i förhållande till varandra.

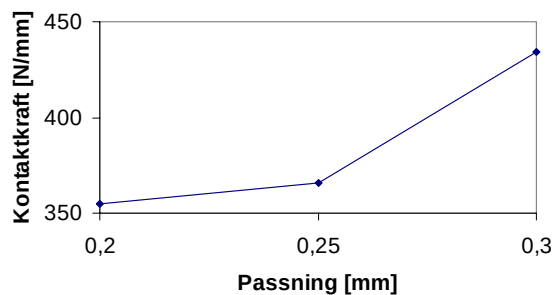


Diagram 15: Kontaktkraftens variation i provserie 1

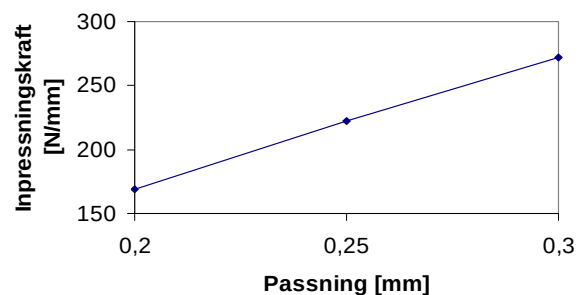


Diagram 16: Inpressningskraftens variation i provserie 1

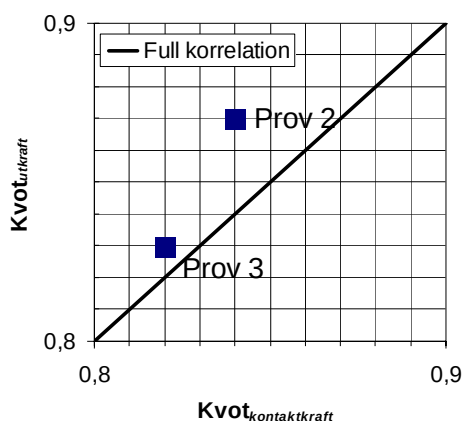
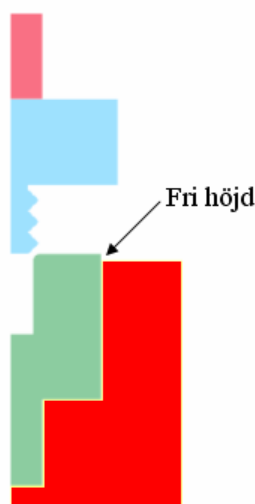


Diagram 17: Förhållande mellan $kquot_{utkraft}$ och $kquot_{kontaktkraft}$

6.5 Provsérie 5

Kragen på hondelen har avlägsnats och ytan har spänts fast upp till en liten bit under ovansidan. Exakta värdet på den fria höjden vid experimentet har inte kunnat erhållas utan motsvarande höjd har antagits i simuleringarna. En liten skillnad i höjden bör dock vara oväsentlig för den sökta tendensen, se Figur 14.



Figur 14: Modell 5

Två prover med olika passning har undersökts experimentellt och dessa resultat skall jämföras med simuleringresultaten.

6.5.1 Prov 1

Passningen är 0.30 mm. Kontaktkraften läses av till ca 656 N/mm, se Diagram 18.

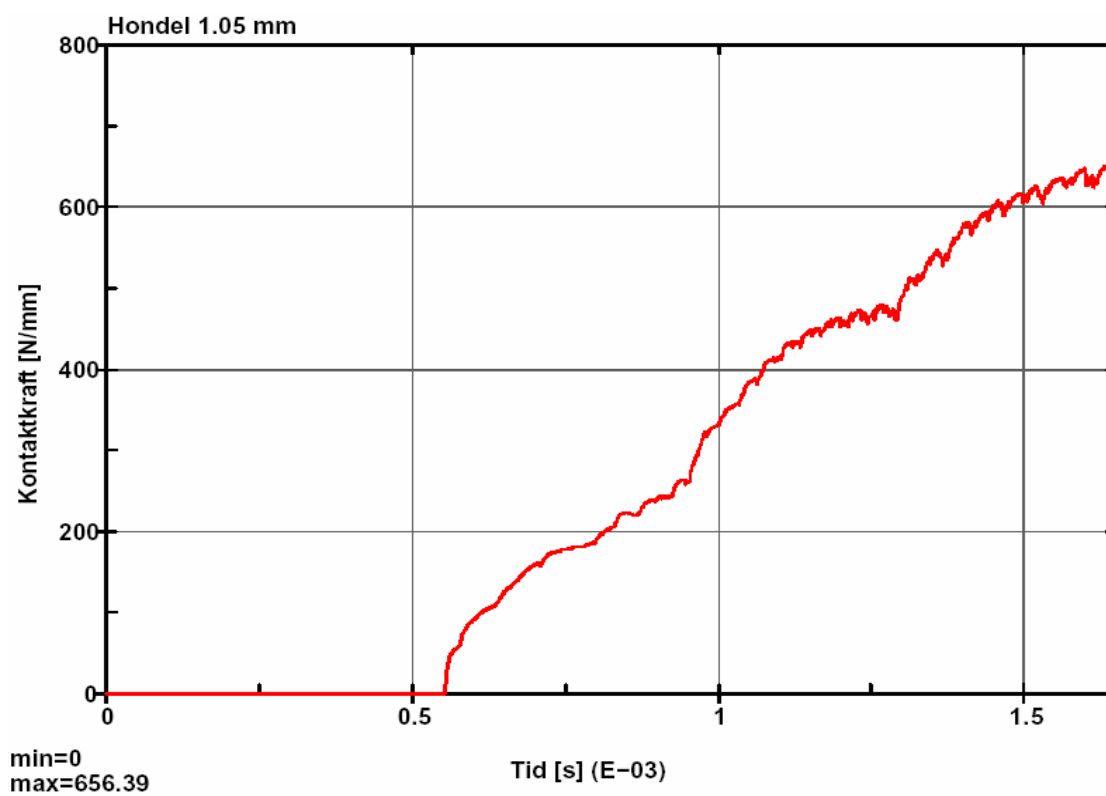


Diagram 18: Kontaktkraft

Inpressningskraften för hela modellen är ca 318 N/mm, se Diagram 19.

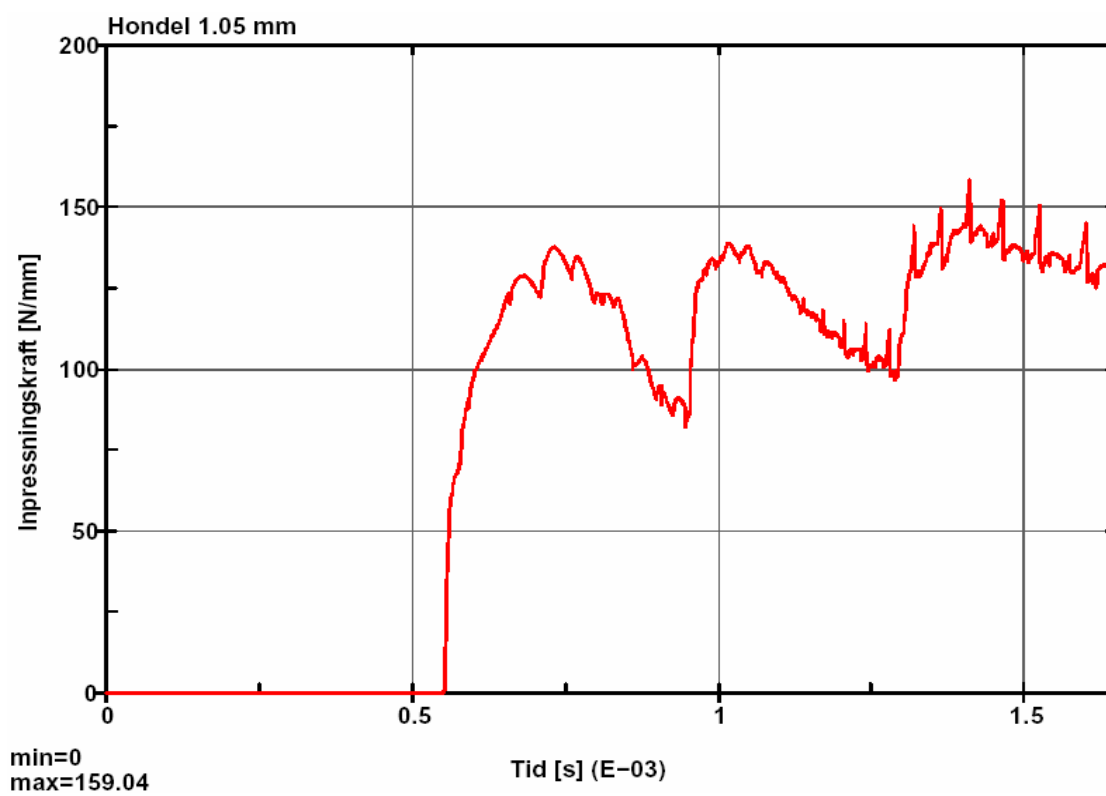
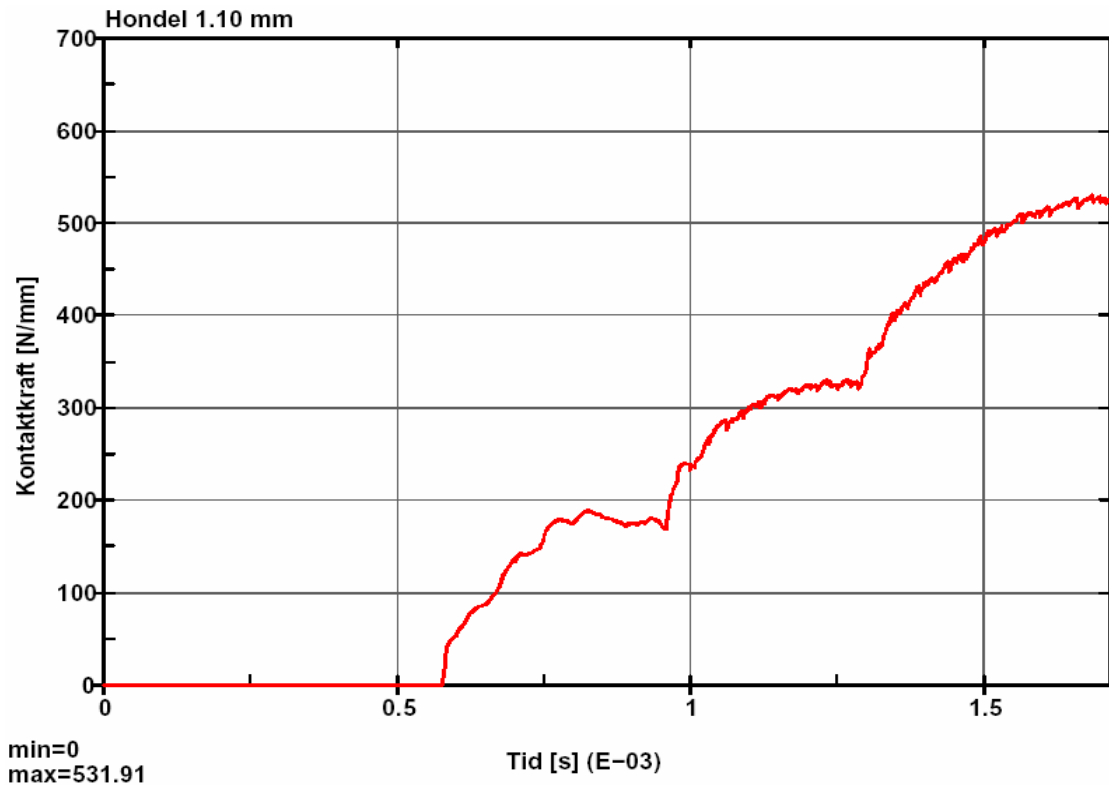


Diagram 19: Inpressningskraft

6.5.2 Prov 2

Passningen är 0.25 mm. Kontaktkraften, enligt Diagram 20, blir ca 532 N/mm. Kvoten mellan utdragnings- respektive kontaktkrafter räknas ut till

$Kvot_{Utkraft} = 0.88$ och $Kvot_{Kontaktkraft} = 0.81$.



Inpressningskraften för halva modellen läses ur Diagram 21 till ca 113.5 N/mm, dvs. inpressningskraften för hela modellen är 227 N/mm.

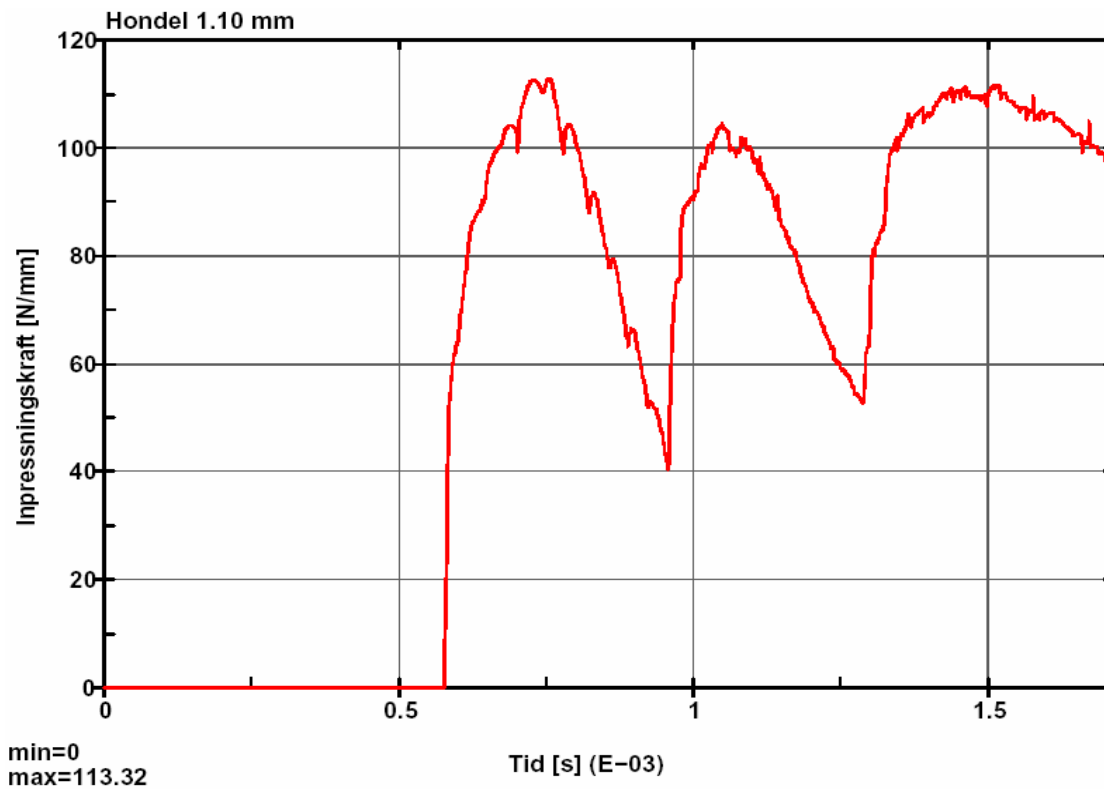


Diagram 21: Inpressningskraft

6.6 Diskussion

Man kan konstatera att resultaten från LS-DYNA ger samma tendenser som resultaten från experiment. Genom att jämföra förhållanden mellan experimentellt funna utdragningskrafter med förhållanden mellan kontaktkrafter ser man vissa skillnader i kvoter. Detta kan bero på att utdragningskraften inte enbart påverkas av svetsen, utan att även han- och hondelen låser fast varandra (clinchingeffect), vilket försvårar utdragandet [15]. En annan förklaring kan vara att geometrin hos den modifierade hanprofilen skiljer sig något från geometrin vid experimentutförandet. Att skillnaden är större i Provserie 5 kan också bero på den antagna fria höjden. Trots allt detta kan man säga att simuleringarna visar en tendens som liknar tendensen från experimenten, dvs. kontaktkraften är som störst där svetsfogen har störst hållfasthet och tvärtom. Det framgår också att hållfastheten är större i provserie 5 än i Provserie 1, vilket överensstämmer med experimentella resultat. När det gäller inpressningskraften kan det konstateras att tendensen är den samma, dvs. inpressningskraften är som störst där passningen är som störst och därmed hållfastheten i svetsfogen. Gynnsamma förhållanden för svetsbildning uppstår under hela kallpressningsprocessen vilket kan försvåra inpressningen. Eftersom simuleringen med LS-DYNA inte tar hänsyn till svetsbildning kan det vara orsak till att storleken på inpressningskraften är något mindre än den förväntade [20]. En annan förklaring kan vara att inpressningskraften enbart

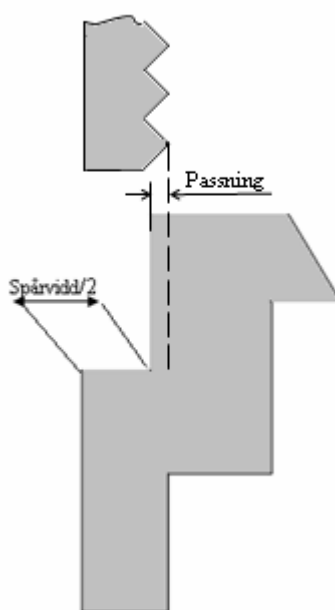
avläses fram till det att undersidan på handelen kommer i kontakt med ovansidan på hondelen.

7 Parameterstudie

En studie av variationer i geometrin presenteras här. De parametrar som betraktas är spårvidd på hondelen och rillornas bredd på handelen. Först studeras spårviddsvariationen och utifrån dessa resultat väljs en profil på hondelen som ger det bästa resultatet, vilken sedan används vid studien av variationen hos handelen. Vid utvärdering skall storheter som beskrivits i Kap 4 Utvärderingsstudie betraktas.

7.1 Studie av hondelen

Modellen är uppbyggd på samma sätt som enligt Kap 3 Modellbeskrivning. Honprofilerna har dimensioner enligt [17], dvs. 9 olika profiler med spårvidder i intervallet 2.1-2.9 mm, se Figur 15. Dimensioner på handelen är enligt [18].



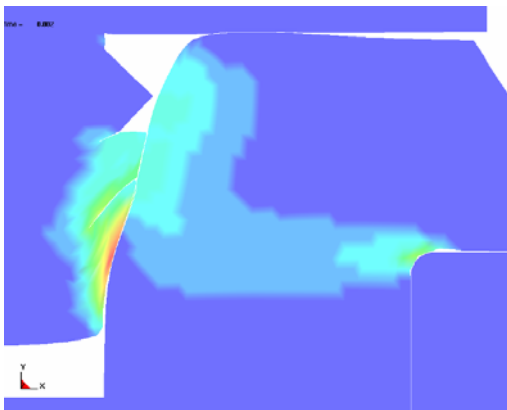
Figur 15: Spårvidd hos honprofil.
Mindre spårvidd ger större passning

Det har tidigare konstaterats att större passning ger större kontaktkraft samt ökad deformation hos de nedre rillorna och hondelen. Deformationen hos hondelen bör hålla sig inom rimliga gränser då hållfasthetsegenskaperna annars försämras och risken för materialbrott ökar. Detta betyder att den första

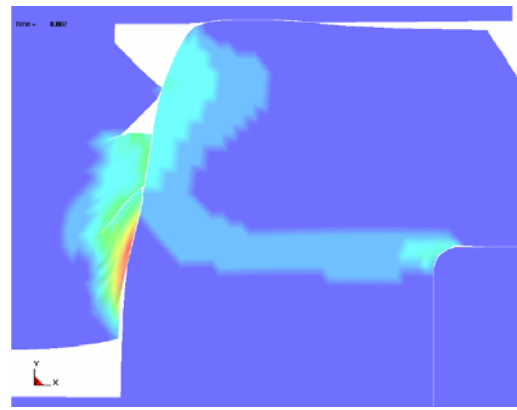
honprofilen, där deformationen är inom rimliga gränser, skall ge bästa förutsättningar för svetsbildandet.

7.1.1 Simuleringsresultat

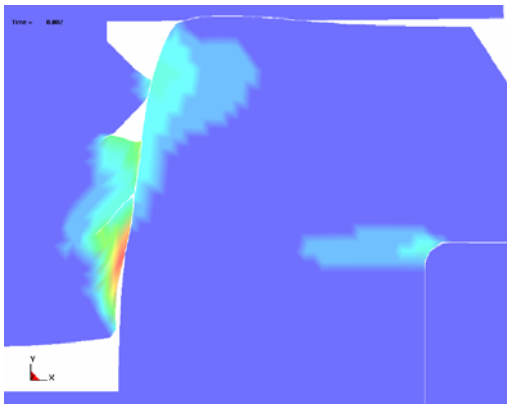
De första tre honprofilerna, med minsta spårvidder, sällas bort pga. kraftiga deformationer hos hondelen samt att översta rillan inte eller knappt kommer i kontakt med hondelen, se Figurer 16-18. Även honprofil med spårvidd 2.4 mm väljs bort pga. svag kontakt mellan översta rillan och hondelen, se Figur 19.



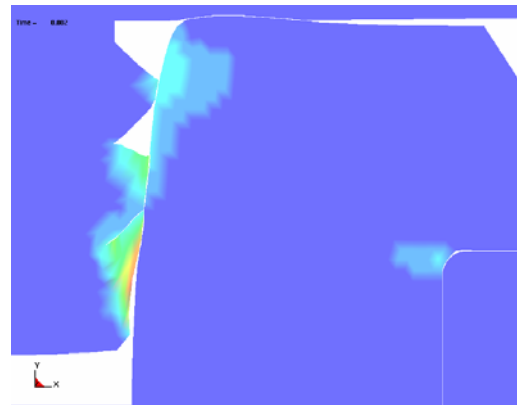
Figur 16: Honprofil (spårvidd 2.1 mm, passning 0.49 mm)



Figur 17: Honprofil (spårvidd 2.2 mm, passning 0.44 mm)



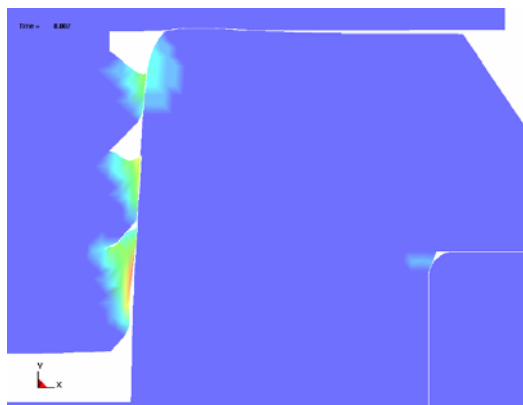
Figur 18: Honprofil (spårvidd 2.3 mm, passning 0.39 mm)



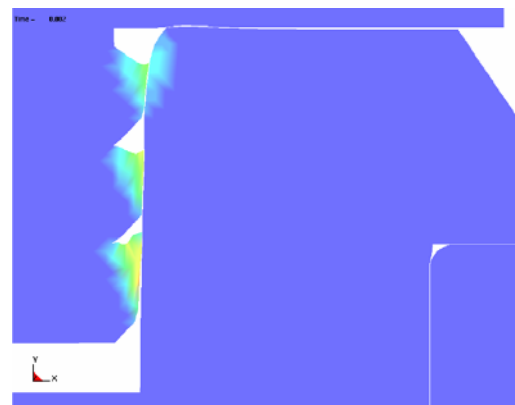
Figur 19: Honprofil med spårvidd 2.4 mm och passning 0.34 mm. Översta rillan är enbart svagt i kontakt med hondelen och därmed knappt deformationerad, vilket ger sämre förutsättning för svetsning

Vid betraktelse av simuleringar där hondelar med spårvidder 2.5 och 2.6 mm (passning 0.29 och 0.24 mm) ingår konstateras att deformationer ligger inom

rimliga gränser, se Figur 20 och 21. Detta innebär att honprofilen med spårvidden 2.5 mm (passning 0.29 mm) bör ge mest gynnsamma förhållanden för svetsbildning.



Figur 20: Övergripande deformation (spårvidd 2.5 mm, passning 0.29 mm)



Figur 21: Övergripande deformation (spårvidd 2.6 mm, passning 0.24 mm)

I Diagram 22-27 visas simuleringsresultat vilka bekräftar det ovan nämnda.

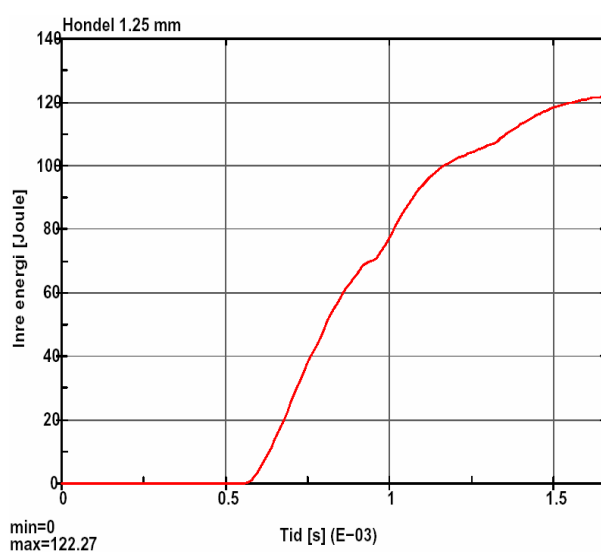


Diagram 22: Inre energi i modell där honprofil med spårvidd 2.5 mm ingår

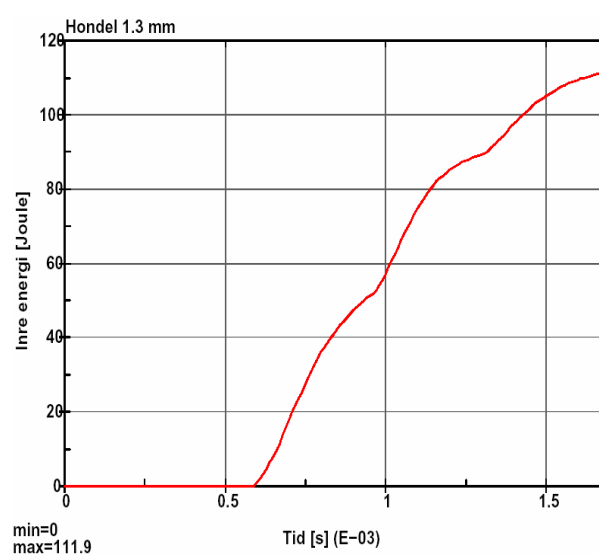


Diagram 23: Inre energi i modell där honprofil med spårvidd 2.6 mm ingår

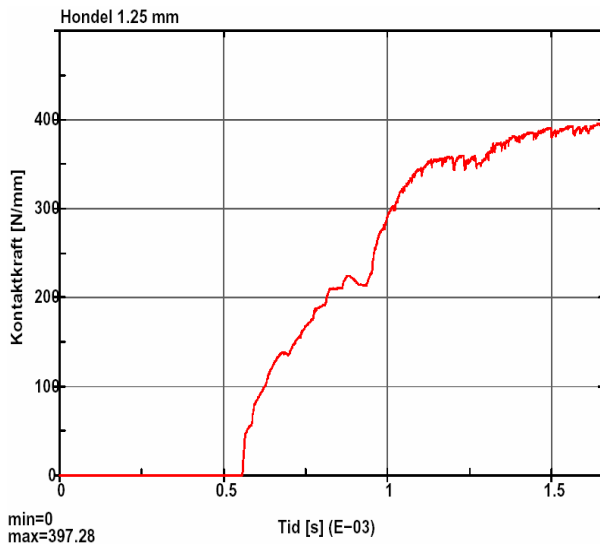


Diagram 24: Kontaktkraft i modell där honprofil med spårvidd 2.5 mm ingår

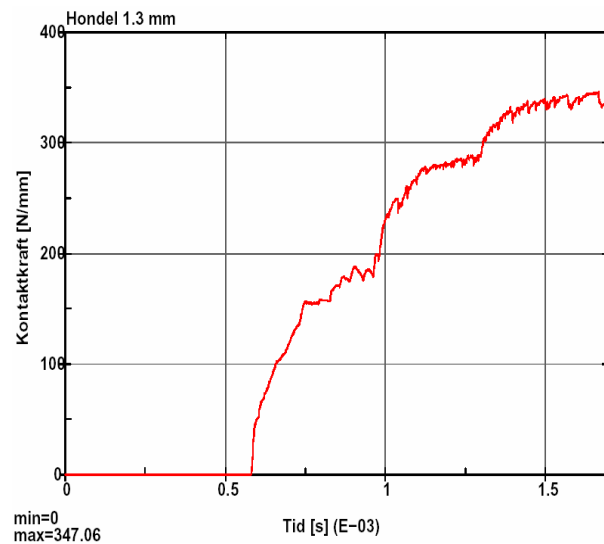


Diagram 25: Kontaktkraft i modell där honprofil med spårvidd 2.6 mm ingår

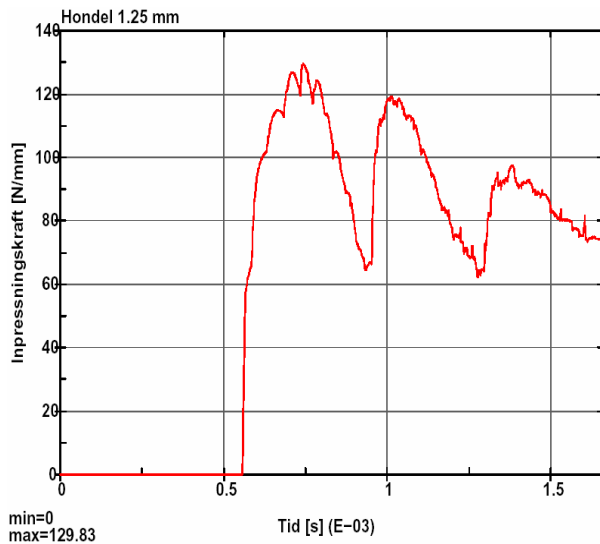


Diagram 26: Inpressningskraft i modell där honprofil (spårvidd 2.5 mm) ingår

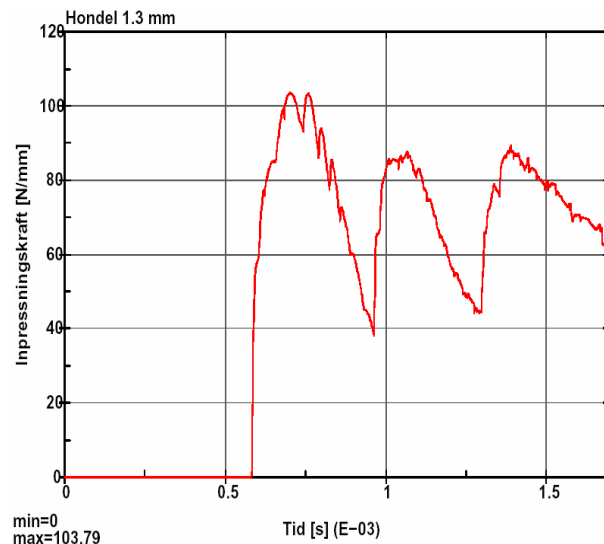


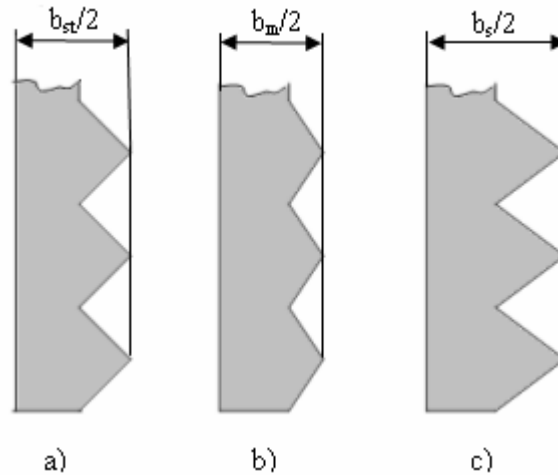
Diagram 27: Inpressningskraft i modell där honprofil (spårvidd 2.6 mm) ingår

7.1.2 Diskussion

Simuleringsresultat visar att modellen där honprofil med spårvidd 2.5 mm (passning 0.29 mm) ingår ger bästa förutsättningar för svetsbildande. Den enda iakttagelse som motsäger detta är att översta rillan inte är lika mycket deformerad som vid en honprofil med spårvidd 2.6 mm (passning 0.24 mm). Trots detta kan konstateras att den förstnämnda modellen är ett alternativ som ger gynnsammare förhållande för svetsbildande vid kallpressningen. Denna modell kallas därför framöver för standardmodellen.

7.2 Studie av handelen

I det här avsnittet undersöks hur en variation av piggarnas bredd påverkar hållfastheten i förbandet. Hanprofiler med två olika bredder på piggarna skall jämföras med en hanprofil enligt ProfilGruppens standard [18], se Figur 22.



Figur 22: Här visas tre olika bredder på piggar: a) Hanprofil med standardiserad bredd (b_{st}) [18], b) Hanprofil med mindre bredd (b_m), c) Hanprofil med större bredd (b_s). Alla mått är fasta förutom totalbredden på piggarna. Observera att bilderna endast visar högra sidan av hanprofilen

Bredderna hos hanprofilerna i Figur 22 b) och 22 c) bestäms av Ekvation 22 och 23:

$$\frac{bredd_{mindre}}{2} = \frac{bredd_{standard} - 0.1mm}{2} \quad (22)$$

$$\frac{bredd_{större}}{2} = \frac{bredd_{standard} + 0.1mm}{2} \quad (23)$$

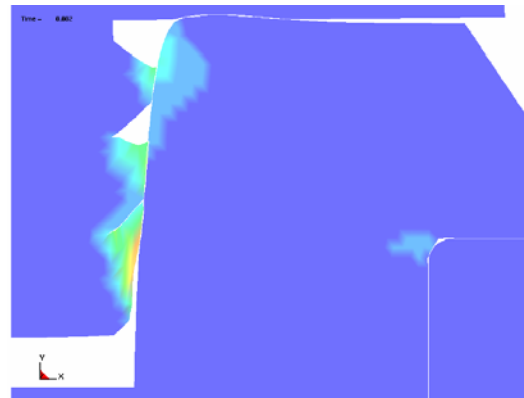
Modellen, där hanprofilen med mindre bredd ingår, kallas Modell 1 och modellen, där hanprofilen med större bredd ingår, kallas Modell 2. Hanprofilen är standardmodellen som diskuterats i Avsnitt 7.1. Resultat från simuleringar av ovan nämnda modeller skall jämföras med resultat från simuleringen av standardmodellen (se Avsnittet 7.1 Studie av hondelen).

7.2.1 Simuleringsresultat

Vid betraktelse av dessa modeller konstateras större deformation i Modell 2 medan rillorna är något jämnare deformerade i Modell 1, se Figur 23 och 24. Modell 2 har även mer deformation jämfört med standardmodellen (Figur 20), vilket kan förklaras med att det pressas in mer material i Modell 2, vilket leder till större deformation. Detta innebär att man sannolikt kommer att se samma tendens i resultat som tidigare konstaterats, dvs. större passning medför bättre förutsättningar för svetsbildande.



Figur 23: Deformationen hos Modell 1



Figur 24: Deformationen hos Modell 2

Vid jämförelse av inre energier (Diagram 22, 28 och 29) visar det sig att det utvecklas mest inre energi i Modell 2, vilket tyder på att de plastiska deformationerna är störst för detta fall.

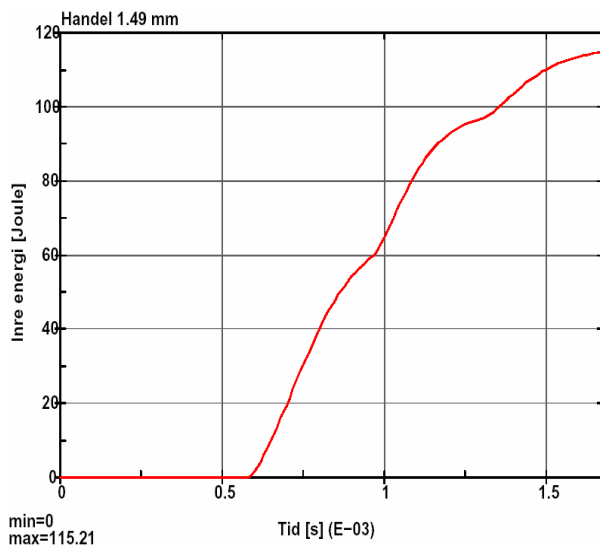


Diagram 28: Inre energi i Modell 1

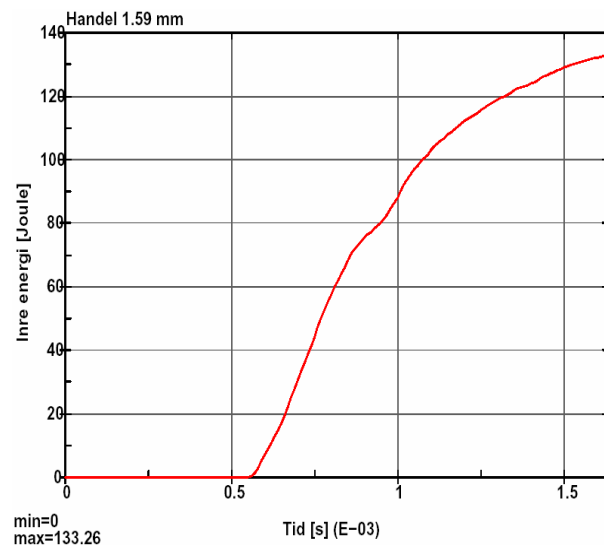


Diagram 29: Inre energi i Modell 2

Samma tendens konstateras för kontakt- och inpressningskrafter, se Diagram 30-33 samt Diagram 24 och 26.

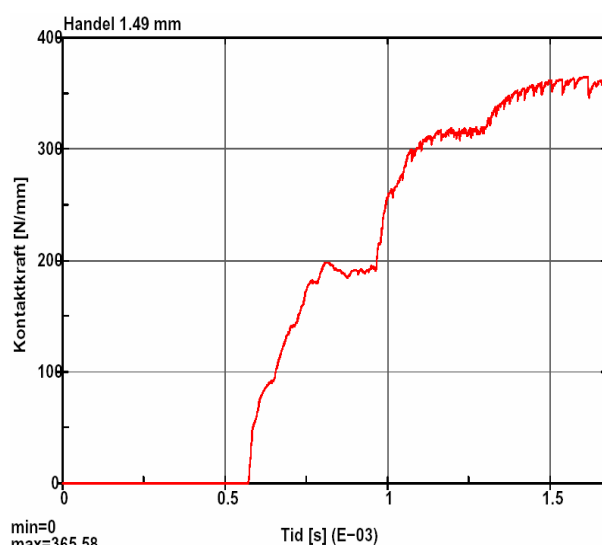


Diagram 30: Kontaktkraft i Modell 1

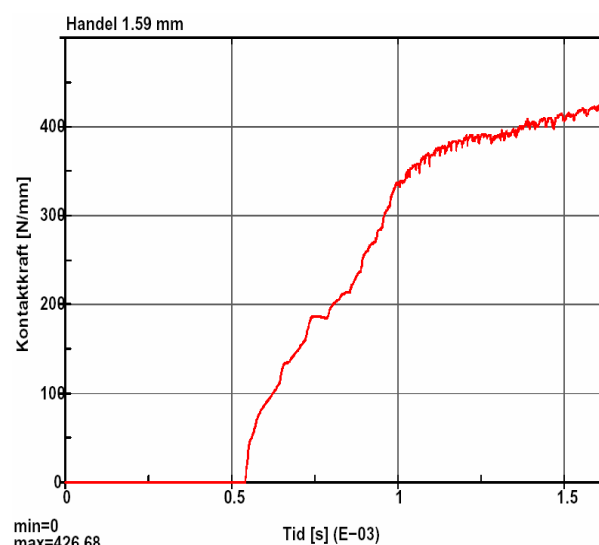


Diagram 31: Kontaktkraft i Modell 2

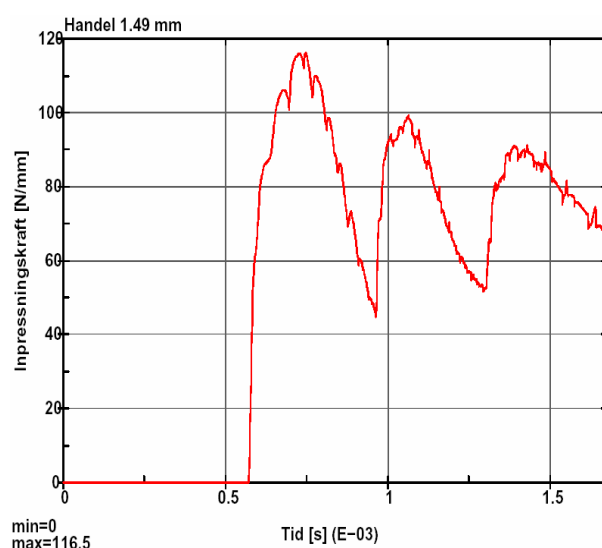


Diagram 32: Inpressningskraft i Modell 1

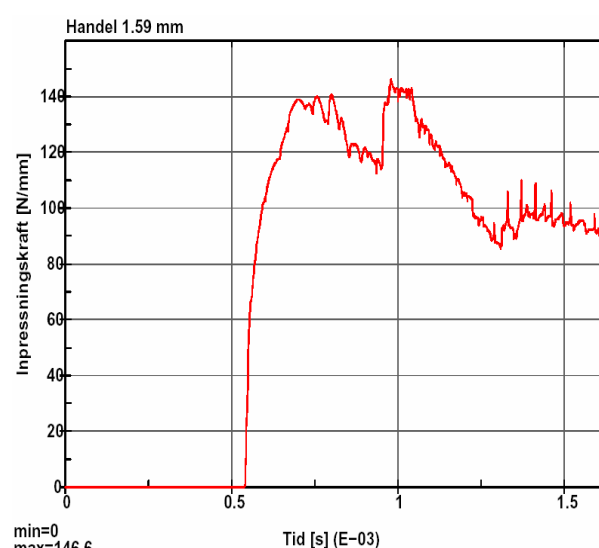


Diagram 33: Inpressningskraft i Modell 2

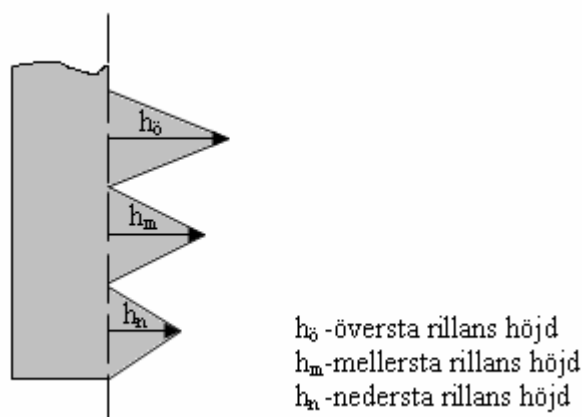
7.2.2 Diskussion

Det har visat sig att en minskning av piggens bredd inte ger bättre förutsättningar för svetsbildande, dvs. alla resultat är sämre jämfört med resultaten från standardmodellen. Däremot framgår det att en ökning av piggens bredd leder till förhållanden som är gynnsammare för svetsbildande. Breddökningen innebär också att kontakten mellan översta rillan och hondelen

minskar, vilket försämrar förutsättningar för svetsbildande i det området. Man kan dra slutsatsen att en viss breddökning kan vara gynnsam för kallsvetsning under förutsättning att plastiska deformationer i hondelen inte blir så stora att hållfastheten sjunker.

8 Konisk modell

Det har observerats i tidigare simuleringar att översta rillan inte deformeras lika mycket som övriga rillor. En modifierad hanprofil undersöks därför för att åstadkomma bättre förhållanden för svetsbildande. Den nya hanprofilen har ett koniskt utseende, där nedersta rillan har minst höjd och översta rillan har störst höjd, se Figur 25.

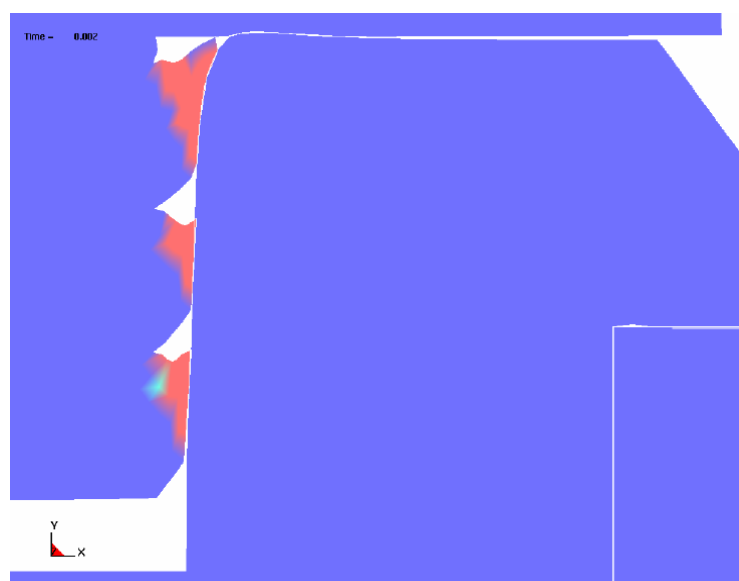


Figur 25: Konisk modell. Alla mått är enligt standard [18] förutom rillornas höjder

Tanken är att geometrin hos den nya hanprofilen skall skapa bättre förutsättningar för svetsbildande, framförallt i området där översta rillan är i kontakt med hondelen, dvs. översta rillan bör deformeras. Geometrin hos den modifierade handelen är framtagen så att den innehåller lika mycket material som den standardiserade hanprofilen [18]. För att kunna utvärdera resultatet jämförs dessa med standardmodellen från Avsnittet 7.1, vilket innebär att samma hanprofil används för simuleringarna av den koniska modellen.

8.1 Övergripande deformation

När resultaten med den koniska hanprofilen jämförs med deformationen hos standardmodellen, se Figur 20, lägger man märke till att översta rillan är mycket mer deformerad i den koniska modellen (Figur 26), vilket visar att förutnämnda antagande stämmer.



Figur 26: Övergripande deformation hos konisk modell

8.2 Inre energi

Inre energin hos den koniska modellen (Diagram 34) är större än hos standardmodellen (Diagram 22), vilket tyder på att större plastiska deformationer äger rum.

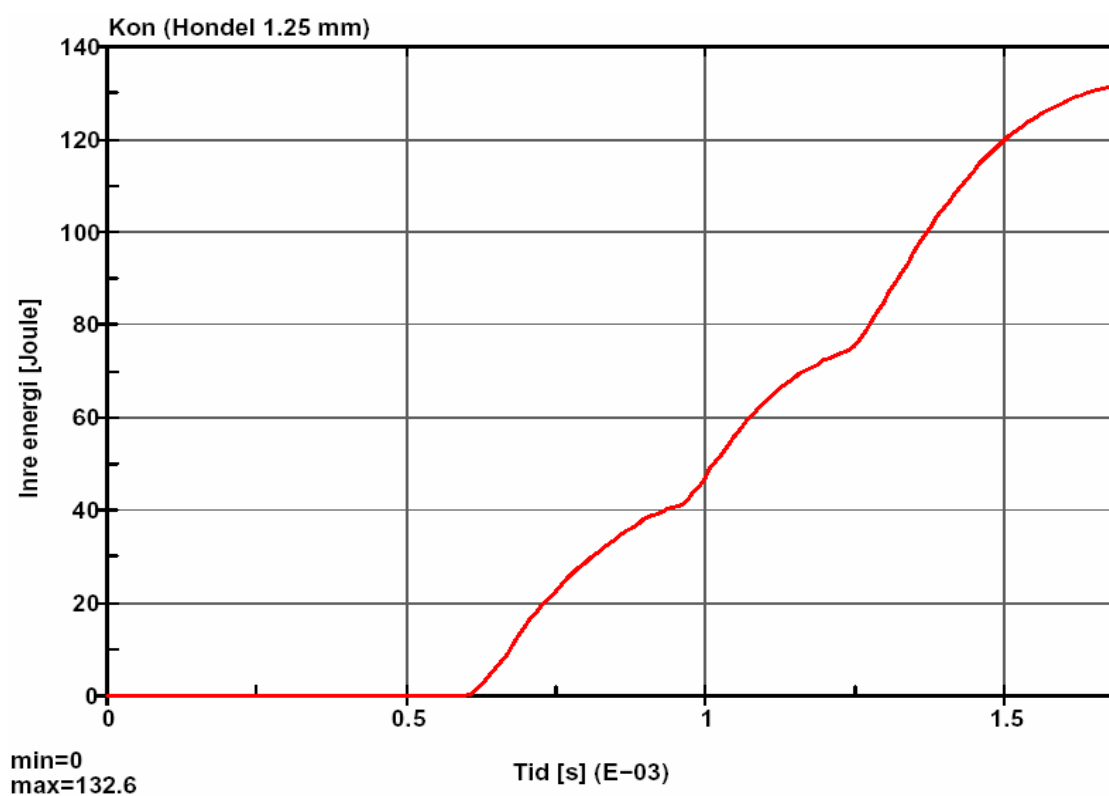


Diagram 34: Inre energi hos konisk modell

8.3 Kontaktkraft

Vid jämförelse mellan Diagram 24 och 35 noteras att kontaktkraften är större hos den koniska modellen, vilket ger bättre förutsättningar för svetsbildande.

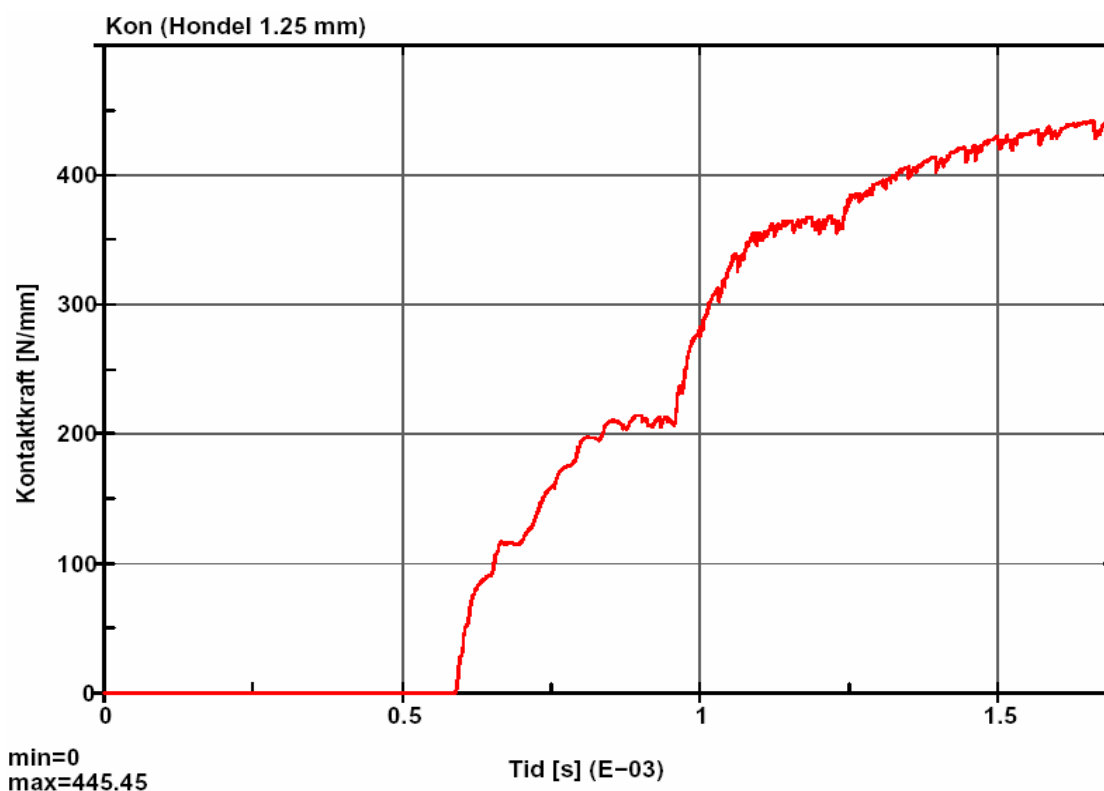


Diagram 35: Kontaktkraft i konisk modell

8.4 Inpressningskraft

Kraften som behövs för att pressa in handelen är större hos den koniska modellen, jämför Diagram 23 och 33. Man lägger märke till att kurvornas utseende skiljer sig. Största toppen ligger vid deformationen av nedersta rillan i standardmodellen, medan hos den koniska modellen ligger största toppen vid deformationen av den översta rillan. Detta kan bero på att översta rillan har större höjd, mer material och därför deformeras mer.

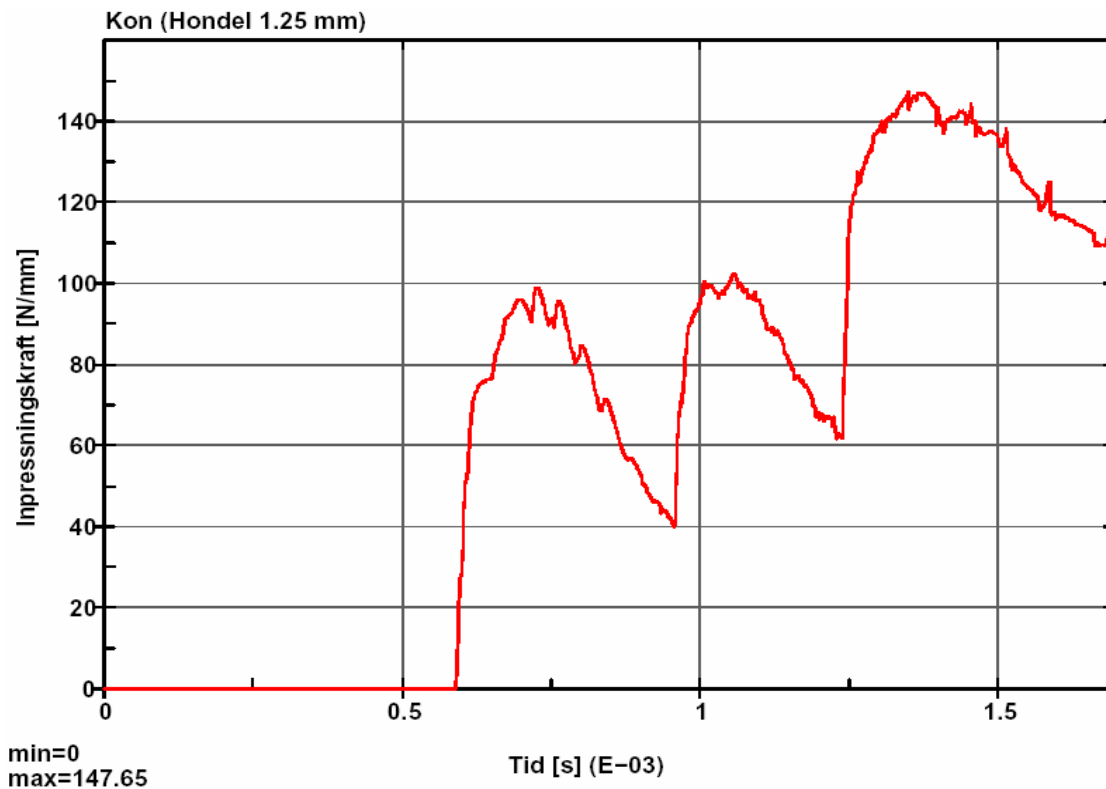


Diagram 36: Inpressningskraft i konisk modell

8.5 Diskussion

Vid jämförelse mellan resultat från simuleringar med den koniska modellen och standardmodellen framgår det att den förstnämnda modellen ger bättre förutsättningar för svetsbildande. Detta beror på att den översta rillan deformeras mer, vilket ger bättre möjligheter för svetsbildning i den delen. Geometrin hos den koniska modellen är inte optimal utan den är främst vald så att handelen har lika mycket material som en hanprofil enligt standard. Vid en eventuell vidareutveckling av denna modell kan man bortse från detta villkor och utföra flera varianter av rillornas höjder i syfte att få fram den optimala geometrin.

9 Slutsatser och vidareutveckling

Det här presenterade arbetet kan betraktas som ett första försök att simulera kallpressoperationen. Trots att enbart det mekaniska beteendet beaktas kan det konstateras att simuleringarna ger en bra fingervisning om vad som händer under kallpressoperationen, dvs. genom parametervariationer kan tendenser i resultaten visa om förutsättningarna för svetsbildning blir bättre eller sämre. För vidare studier föreslås och noteras:

- Deformationshårdnandekurvan är till stor del approximativ. För att plastiska töjningar i materialet skall vara tillförlitliga måste en mer noggrann kurva tas fram. Ett förslag är att utgå från prov där inte någon midjebildning finnes, tex. vridprov, och tillämpa inversanalys. Detta innebär att man simulerar själva provet och jämför FE-resultat med experimentella resultat (tex. vridmoment och vridvinkel). Om resultaten skiljer sig anpassar man hårdnandekurvan och gör ny simulering.
- Brottkriterium saknas. Det har visats vid experimentellt utförande av kallpresssvetsningen att nedersta rillan ofta går av vid inpressningen. För att kunna återskapa detta i simuleringarna måste ett brottkriterium införas.
- En kontaktalgoritm som beskriver svetsbildandet bör utvecklas så att simuleringen kan visa en mer realistisk bild av kallpressoperationen.
- Värmeutvecklingen vid inpressningen saknas. Trots att värmeutveckling i teorin inte påverkar svetsbildandet, är det önskvärt att få med dess koppling till det mekaniska beteendet.
- En vidare utveckling av en konisk handel är intressant.

Om ovan nämnda förslag beaktas kan en noggrann studie av kallpresssvetsningen utföras i syfte att uppnå en optimal geometri för varje specifik fogningssituation.

Referenser

- [1] www.profilgruppen.se/Koncern/kortafakta.asp
- [2] Gunnar Bilén, Svetskonferensen, Linköping, april 2004
- [3] www.read-wca.com/pwm.htm
- [4] Hallquist, John O (1998). *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore
- [5] TrueGrid (2001). *TrueGrid Manual Version 2.1.0*. XYZ Scientific Applications Inc, Livermore
- [6] Hallquist, John O (2003). *LS-DYNA Keyword User's Manual*, Version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore
- [7] LS-POST (1988). *User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore
- [8] Cook R.D, Malkus D.S, Plesha M.E., Witt R.J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Fourth edition*. John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-35605-0
- [9] Olovsson, Lars (2000). *On the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method*. Division of Solid Mechanics Department of Mechanical Engineering, Linköpings universitet, Linköping, ISBN 91-7219-730-7
- [10] Dragprovkurva enligt PGnr: 238-20, ProfilGruppen AB, Åseda
- [11] Ottosen N.S, Ristinmaa M. (1999): *The Mechanics of Constitutive Modelling, Volume 1*. Division of Solid Mechanics, Lunds universitet, Lund
- [12] Dieter E.G. (1988). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Book, Singapore, ISBN 0-07-100406-8
- [13] <http://iamlasun8.mathematik.uni-karlsruhe.de/parallel/skript/node145.html>
- [14] HONSEL, *Cold-Pressure-Welding*, Leichtmetalle, Honsel Werke, Meschede

- [15] Karlsson, Anna (2004). *Kallpresssvetsning-Hållfastheten i svetsfogen*. LiTH-IKP-Ing-Ex-04/02, Institutionen för Konstruktions- och Produktionsteknik, Linköpings universitet, Linköping
- [16] Karlsson, Anna (2004). Resultat från hållfasthetsundersökningar, Intern skrift, ProfilGruppen AB, Åseda
- [17] Handel enligt profil nr: 314261, ProfilGruppen AB, Åseda
- [18] Handel enligt profil nr: 314260, ProfilGruppen AB, Åseda
- [19] Privat diskussion med Anna Karlsson (se [15])
- [20] Privat diskussion med Gunnar Bilén, ProfilGruppen AB, Åseda

