



# ANALYSE AV ALUMINIUM EKSTRUDERING VED EKSPERIMENTER OG FEA

**Thorbjørn Solvoll Urskog**

Masteroppgave

Innlevert: januar 2014

Hovedveileder: Henry Sigvart Valberg, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produktutvikling og materialer



## FORORD

Denne rapporten viser det arbeidet som er gjennomført i forbindelse med masteroppgave skrevet høsten 2013 ved Institutt for produktutvikling og materialer, NTNU. Arbeidet i denne oppgaven bygger videre på prosjektoppgave fra høst 2012 i emnet TMM4540

Fordypningsprosjekt. Problemstillingen er gitt av instituttet ved NTNU, som også kom med problemstillingen til fordypningsprosjektet. Datasimuleringer er gjennomført ved instituttets lokaler, mens laboratorietestene fra 1994 og 2001 ble utført i Sintefs laboratorier på NTNU.

Informasjon som er innhentet til de ulike deler har blitt funnet ved hjelp av kilder internett, hentet fra lærebøker, samt ved muntlige diskusjoner med veileder. Masterprosjektets veileder har vært Professor Henry Sigvart Valberg ved NTNU.

Jeg ønsker å takke min veileder Professor Henry Sigvart Valberg for god veiledning og støtte i forbindelse med denne oppgaven. I tillegg vil jeg takke Sephinoood Khorasani for assistanse i programvaren DEFORM samt Dirk Nolte fra Hydro Aluminium for å sette masteroppgaven i et industriperspektiv, samt forklare hvordan modeller som benyttet i slike modeller er vesentlige i et industriperspektiv.

Programvarer som er benyttet i denne oppgaven er:

- DEFORM™ 2D/3D, fra Scientific Forming Technologies Corporation
- Siemens NX v8.0 fra Siemens.
- Microsoft Excel®, fra Microsoft Corp.

=====

Sted og dato

---

Thorbjørn Solvoll Urskog

# OPPGAVETEKST

## MASTEROPPGAVE HØST/VÅR 2013 FOR STUD.TECHN. THORBJØRN SOLVOLL URSKOG

### ANALYSE AV ALUMINIUMEKSTRUDERING VED EKSPERIMENTER OG FEA

#### Analysis of aluminium extrusion by experiments and FEM-simulation

I sitt prosjektarbeid forrige høst analyserte studenten aluminiumsekstrudering ved hjelp av programvaren DEFORM®. Han satte seg da inn i hvordan man bygger FEM-modeller og kjører simuleringer ved hjelp av den siste ekstruderingsmodulen i 3D-versjonen av dette programmet. En av modellene som det ble jobbet med var en kompleks porthulls ekstruderingsprosess hvor flere metallstrømmer flyter sammen inne i et sveisekammer. I kammeret pressveises så strømmene sammen slik at en på baksiden av verktøyet får ekstrudert ut en hul profil.

Arbeidet i masteroppgaven skal være en videreføring av arbeidet i prosjektet, men med ny fokus på å bygge optimaliserte modeller av ekstruderingsprosessen, og å bruke programvaren for å ta fram beregningsresultater som beskriver forholdene i prosessen. Dette siste kalles i fagterminologien for å postprosessere.

Aktuelt arbeid i denne sammenheng er:

- Forbedre FE-modeller av ekstrudering laget i prosjektet
- Prøve å få en simulering som tidligere stoppet opp til å gå videre.
- Teste ytterligere ut siste nye variant av DEFORM med tanke på ekstrudering.

I tillegg til dette skal studenten analysere et enklere tilfelle av Al-ekstrudering, nemlig stangeekstrudering. For slik ekstrudering har en tidligere utført en serie eksperimenter ved NTNU, men uten å ta seg tid til å analysere oppnådde resultater i detalj. For stangeekstrudering skal studenten derfor:

- Beskrive de tidligere eksperimentene som ble gjennomført og rapportere resultater som fremkom i disse forsøkene.

- Prøve å reprodusere eksperimentene i enkle to- eller tredimensjonelle FEM-modeller laget ved hjelp av DEFORM.
- Beskrive forholdene i stangekstruderingsprosessen slik som disse modelleres i DEFORM.

Underveis i arbeidet skal kandidaten diskutere med veiledere for å prioritere punktene over, siden det ikke er realistisk å behandle alle grundig nok innen gitt tidsramme.

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, og redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres inn. En mal for dette arket finnes på instituttets hjemmeside under menyen masteroppgave (<http://www.ntnu.no/ipm/masteroppgave>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

Besvarelsen skal leveres i elektronisk format via DAIM, NTNUs system for Digital arkivering og innlevering av masteroppgaver.

Kontaktperson:

Sepinood Khorasani, NTNU

Dirk Nolte, Hydro Aluminium

Torgeir Welo

Instituttleder

Henry Valberg

Faglærer

## SAMMENDRAG

### RAPPORT FRA MASTEROPPGAVE HØSTEN 2013

**Emne:** TMM 4935

**Tittel:** ANALYSE AV ALUMINIUMEKSTRUDERING VED EKSPERIMENTER OG FEA

Denne rapporten er sammensatt av to deler, og starter med et bredt teoretisk fundament om ekstrudering, i sær grad, foroverekstrudering. Det meste av teori er hentet fra boken «APPLIED METAL FORMING» skrevet av Henry Sigvart Valberg

Det er tidligere gjennomført laboratorieeksperimenter ved NTNU, der stangeekstrudering er blitt belyst dersom bærekanalen ikke er parallell. Dessverre eksisterer det ikke grundige eller gode rapporter om disse eksperimentene, slik at en del av denne oppgaven har vært å beskrive, samt rapportere hvilke testresultater som kom frem i disse eksperimentene. Under laboratorieeksperimentene fremkom det for to av fire tester et uventet mønster på ekstrudatet, såkalt bamboosing.

Det ble derfor interessant å se på om dette fenomenet også kom frem ved datasimuleringer. Modeller av matrisene er blitt konstruert og testet i programvaren DEFORM og sammenlignet med de tidligere laboratorieeksperimentene. Etter flere testforsøk var det mulig å se enkelte sammenhenger mellom presskraft og bambusmønsteret. Simuleringene viste at dersom bæreveggen er tilstrekkelig lang oppstår det luftlommer mellom bærevegg og bolt. Dette fører til ujevn friksjon og lugging for stampelet. Slike luftlommer danner sannsynligvis bambusmønster på ekstrudatet

I del to av denne rapporten er modellen fra prosjektoppgaven optimalisert. Siden den ikke kunne gjennomføres i prosjektoppgaven ble modellen endret, etter anbefaling fra SFTC, og retestet.

Resultater fra undersøkelser, prøver og simuleringer er oppsummert og diskutert i eget kapittel. Rapporten er skrevet i Microsoft Word, de mest komplekse figurene er bygd i Microsoft NX 8.0, mens datasimuleringer er gjennomført i DEFORM 2D og DEFORM 3D versjon 10.1.2.





## ABSTRACT

### REPORT FROM MASTER THESIS FALL 2013

**Course:** TMM 4935

This report is composed of two parts, starting with a broad theoretical foundation for extrusion, with main focus on the direct forward extrusion process. Most of the theory is taken from the book “APPLIED METAL FORMING2 written by Henry Sigvard Valberg.

It has previously been conducted laboratory experiments at NTNU on a single rod, whereas the bearing-channel is not parallel. Unfortunately, there exist no rigorous or good reports on these experiments, so this theses has been partly about describe and report the test results that emerged in these experiments. During the laboratory tests an unexpected pattern revealed for some of the test-runs, known as bambooning.

It was therefore interesting to see whether this phenomenon also occurred through computersimulations. Models of the extrusion dies have been designed in the software Deform, and compared with the laboratory experiments. After several tests it was possible to see a connection between load force and the bamboo pattern. Simulation graphics show that in the case of a sufficient length on the die channel air pockets occur between the channel and the billet. This leads to uneven friction which make the top die perform a shock motion instead of even pressure. Air pockets like these are most likely the reason for the unexpected bamboo pattern on the extruded rod.

In part two of this report, the model from the project-report was optimized. Since the model could not be implemented in the project work, the model was modified, on recommendation from SFTC and retested.

Results from study of theory, different samples and simulations are summarized and discussed in a separate chapter. The report is written in Microsoft Word, the most complex animations are built in Microsoft NX 8.0, while computer simulations are implemented in DEFORM 2D and DEORM 3D version 10.1.2



# INNHALDSFORTEGNELSE

<b>FORORD</b>	<b>iii</b>
<b>OPPGAVETEKST</b>	<b>v</b>
<b>SAMMENDRAG</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>ix</b>
<b>1 INNLEDNING</b>	<b>7</b>
<b>2 TEORI</b>	<b>9</b>
2.1 EKSTRUDERING	9
2.1.1 EKSTRUSJONSPROESSEN	9
2.1.2 VARMEKSTRUSJON	11
2.1.2.1 OVER REK. TEMPERATUR	11
2.1.2.2 UNDER REK. TEMPERATUR	11
2.1.3 KALDEKSTRUDERING	11
2.2 MATERIALFLYT I EKSTRUSJONSPROESSEN	11
2.2.1 HASTIGHETSFELT	13
2.2.2 INNSETTING AV KONTRASTPINNER	16
2.2.3 FRIKSJON	18
2.2.4 SKJÆRSPENNINGER	21
2.3 SIMULERING AV EKSTRUDERINGSPROSESSER	23
2.3.1 ULIKE BÆREFLATER	23
2.4 KONTAKTSFORHOLD I BÆREKANAL	24
2.5 FINITE ELEMENT ANALYSE	26

---

2.5.1 FEA-SIMULERING	27
2.5.2 MESH	27
2.6 PROGRAMVARER	28
2.6.1 DEFORM	28
2.6.2 BRUK AV DEFORM	28
2.6.3 SIEMENS NX	29
<b>3 METALLFLYT I REDUSERENDE KANAL</b>	<b>31</b>
3.1 LABOPPGAVE, KONTAKTBETINGELSER MOT BÆREFLATE	31
3.2 DATATESTING 2D	34
3.2.1 OPPSETT AV MODELL	34
3.2.2 EKSTRUDERINGBETINGELSER	35
3.3 DATATESTING 3D	36
3.3.1 MODELLDESIGN	36
3.3.2 SAMMENSETTING AV MODELL I DEFORM 3D	37
3.3.3 EKSTRUDERINGBETINGELSER	38
<b>4 TODIMENSJONAL EKSTRUDERINGSSVEISING</b>	<b>43</b>
4.1 FEM-MODELL AV TODIM. EKSTRUDERINGSSVEISING	43
4.1.1 MODELLDESIGN	43
4.1.2 EKSTRUDERINGBETINGELSER	45
<b>5 RESULTATER</b>	<b>47</b>

---

5.1 LABFORSØK, KONTAKTBETINGELSER MOT BÆREFLATE	47
5.1.1 SKJÆRSPENNINGER	47
5.1.2 GJ. SKJÆRSPENNINGER MOT BÆREFLATE	49
5.2 2-D SIMULERING	49
5.3 3-D SIMULERING	52
5.4 TODIMENSJONAL EKSTRUDERINGSSVEISING	57
<b>6 OPPSUMMERING OG DISKUSJON</b>	<b>61</b>
6.1 LABORATORIETESTER	61
6.2 DATASIMULERING	62
6.2.1 INNLEDENDE TESTING	62
6.2.2 3D-SIMULERINGER FOR STANGEKSTRUDERING	62
6.2.3 3D-SIMULERINGER FOR TODIM. SVEISEKSTR.	63
<b>7 KONKLUSJON</b>	<b>65</b>
7.1 AVSLUTTENDE BEMERKNINGER	65
7.2 VIDERE ARBEID	66
<b>8 REFERANSER</b>	<b>67</b>

**APPENDIKS:**

**A – FE MODELLER**

**B – PRESSKRAFTMÅLINGER**

**C – MATERIALFLYTMÅLINGER**

**D – ANALYSELOGGER LABORORIETESTER**

**FIGURLISTE**

Figur 2.1	Oversikt over en ekstrusjonspresse	9
Figur 2.2	Eksempel på foroverekstrudering	10
Figur 2.3	Eksempel på bakoverekstrudering	10
Figur 2.4	Materialflyt ved plastisk forming	12
Figur 2.5	2D sketsj av hastighetsfelt med parallelle vegger	16
Figur 2.6	Bolt med innsatte kontrastpinner	17
Figur 2.7	Materialflyt med innsatte kontrastpinner	17
Figur 2.8	Skjærspenning i Coulomb og Trescas friksjonsmodell	19
Figur 2.9	Kloss på plant underlag	20
Figur 2.10	Parallell, reduserende og ekspanderende bærekanaler	23
Figur 2.11	Oppdelt innsats med slitemerker	25
Figur 2.12	Innsatser i forsøkssett til Valberg og Malvik	25
Figur 2.13	Animasjon av endestykket til en ekstruder	26
Figur 2.14	Innsats med og uten mesh	27
Figur 3.1	Benyttede innsatser i laboratorietester	30
Figur 3.2	Kontrastpinneoppsett i laboratorietester	31
Figur 3.3	Oppsett av 2D-modell	32
Figur 3.4	Interrelasjoner I 2D-modell	33
Figur 3.5	Deler som utgjør 3D-modell	34
Figur 3.6	Ferdigstilt oppsett i DEFORM	35
Figur 3.7	DEFORM før fylling	37

Masteroppgave	Masteroppgave høst 2013	NTNU
Figur 3.8	DEFORM etterfylling	37
Figur 3.9	Kontaktbetingelser etter fylling	38
Figur 4.1	Komponenter fra prosjektoppgave	41
Figur 4.2	Modell før kjøring i DEFORM	42
Figur 5.1	Bambooingmønster	46
Figur 5.2	Måledata labtest 1	47
Figur 5.3	Fartsfelt 2D-modell	48
Figur 5.4	Skjærspenninger 2D-modell	49
Figur 5.5	Kraftmålinger 2D-modell	49
Figur 5.6	Hulrom mellom bolt og bærevegg	51
Figur 5.7	Begynnende bambooing	51
Figur 5.8	Ekspanderende bolt	54
Figur 5.9	Tøyningshastighet ved steg 49	55
Figur 5.10	Akkumulert tøyningshastighet	55
Figur 5.11	Kraftmålinger simulering nr.1 og nr.3	56
Figur 5.12	Nettverk over materialflyt, simulering nr. 1	57
Figur 5.13	Fylling og generering av sveis	58
Figur 5.14	Kraftmålinger sveiseekstrudering	59
Figur 5.15	Nettverksdiagram, todim. sveiseekstrudering	60



# 1 INNLEDNING

Aluminiumsproduksjon har de siste tiårene vært under stort fokus, spesielt i forbindelse med miljøproblemer. Med relasjon til dette er eneste mulighet å benytte produkter med lavere densitet. Aluminium med sin lave densitet, duktilitet og gode korrosjonsegenskaper er en av de mest benyttede lettmetsallene i dagens industri. Bruk av aluminiumslegeringer fremkommer i nesten alle industrielle områder, for eksempel; transport, pakking, drikkebokser og i byggkonstruksjoner.

Aluminiumsekstrusjon er en prosess som danner profiler med ulike mønstre og egenskaper kombinert med en fantastisk flatekvalitet. Gjennomføringen av prosessen kan utføres på to ulike måter, kjent som, «Fremoverekstrudering» og «Bakoverekstrudering». Fremoverekstrudering, i hovedsak uten glidning og med ulike matriseinnsatser, er den metoden det er valgt å se på i denne oppgaven.

## **DEL 1 – Laborrietester og simulering**

I denne rapporten har teori omkring materialflyt i ekstrusjonsprosessen blitt analysert. Spesielt er det fokusert på hvordan klebingen fra bolt mot bærevegg påvirker det endelige ekstrudatet. Det er blitt konstruert og optimalisert ulike modeller som spesielt skal vise hvordan den indre materialflyten påvirkes av friksjon langs verktøyveggene. Hovedvekten av oppgaven har vært på Aluminiumsekstrudering, der datasimuleringer er gjennomført i DEFORM 2D og DEFORM 3D.

Teorien har blitt belyst med den hensikt å finne informasjon om materialflytens påvirkning av det ekstruderte produktet. Teori fra ulike aluminiumslegeringer, samt matematiske beregninger på bevegelse er gjennomgått for å få en god innsikt på hva som skjer i de indre delene av en ekstrusjon.

**DEL 2 – Videreføring av prosjektoppgave**

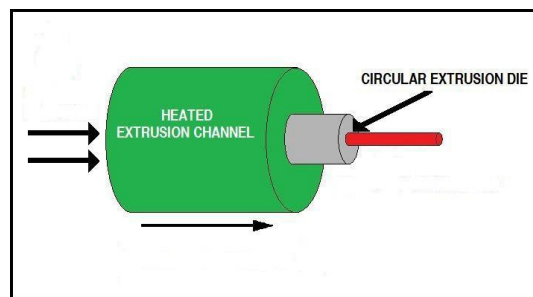
Del 2 av denne rapporten er en fortsettelse av arbeidet til undertegnede i forbindelse med prosjektrapporten som ble ferdigstilt høsten 2012. Prosjektrapporten tok for seg en todimensjonal sveiseekstrudering der sveisebroen ble satt i 90 graders vinkel i forhold til utgangsmatrisen. I senere tid er det gjort nye eksperimenter som forklarer hvorfor resultatene ikke stemte med realiteten i prosjektoppgaven, og ved bruk av mer optimaliserte legeringer og modeller vil det være mulig å se på eventuell rotasjonell materialflyt.

Simuleringene i denne oppgaven vil kunne gi viktig informasjon om materialflyten langs bæreveggene dersom den ikke er teoretisk optimal. I dagens industri er det svært utfordrende å få helt optimale vilkår.

## 2 TEORI

### 2.1 EKSTRUDERING

En ekstruderingsprosess er en prosess for plastisk formgivning av råmateriale til stenger, tråder, rør og forhåndsbestemte profiler. I denne oppgaven er råmaterialet aluminium. I en ekstruderingspresse blir materialet i varm tilstand, eller kald dersom det er snakk om kaldekstrudering presset ut gjennom en matrise som definerer produktets endelige form. Se Figur 2.1.



**Figur 2.1:** Denne figuren viser overflatisk hvordan en ekstrusjonsprosess foregår. Inni en container presses et råmateriale ut gjennom en utgangskanal

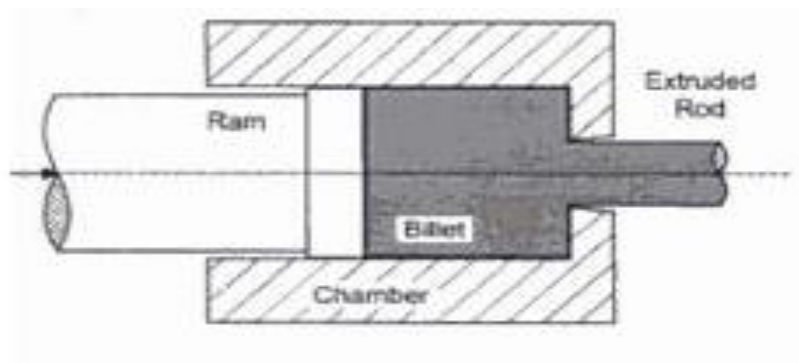
«Ekstruderte profiler i aluminium har hatt betydning for utvikling av sveisede aluminiumskonstruksjoner, der norske konstruktører og norske verksteder har hatt en lederrolle i bygging av boligseksjoner, helikopterdekk og andre offshoreenheter. Aluminiumskonstruksjoner som sveises opp av plater og stivere er sterkt utsatt for termiske kastninger, som imidlertid reduseres når ekstruderte profiler med stort treghetsmoment kan sveises inn som elementer i konstruksjonen» [9].

#### 2.1.1 EKSTRUSJONSPROSESSEN

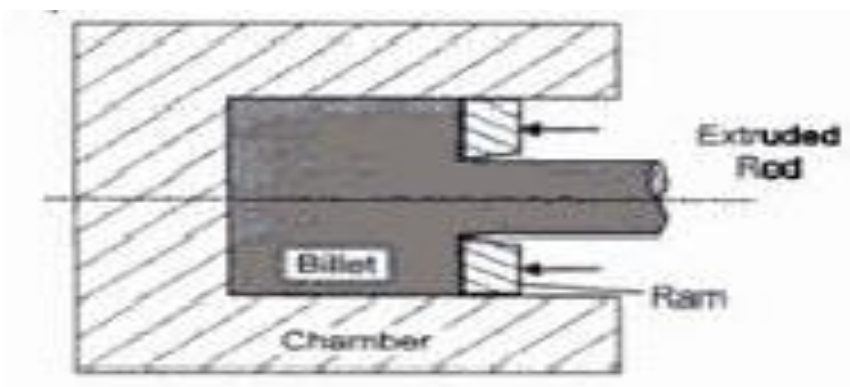
Den generelle gjennomgangen av en aluminiumsprosess er som følgende: En oppvarmet bolt plasseres i en oppvarmet container. Temperaturen til verktøy og råmateriale varierer i forhold til hvilken legering det er snakk om, men varierer som oftest mellom 450 °C og 500 °C. Ved temperaturer i denne regionen har aluminium oppnådd flyt, og ved å legge på press med et

stempel i ene enden av råmaterialet glir massen gjennom et hulrom i den andre enden. Resultatet er en lang profil med form bestemt av geometrien ved utgangen. I etterkant av ekstrusjonen kan ekstrudatet varmebehandlet eller bearbeidet for å utvikle ønskede egenskaper.

Det skilles ofte mellom to ulike typer ekstrudering. Fremoverekstrusjon, også kalt direkte ekstrusjon, er en fremgangsmåte der matrisen holdes statisk og pressen beveger seg dynamisk mot råmaterialet. Bakoverekstrusjon, eller indirekte ekstrusjon, er en prosess der pressen er statisk, og matrisen presses inn i råmaterialet. I denne oppgaven er det direkte ekstrudering som er analysert som fremgangsmåte (se figur 2.2 og 2.3).



**Figur 2.2:** Fremoverekstrudering, der stampelet presser ut en stav der utgangsmatrisen er statisk



**Figur 2.3:** Bakoverekstrudering, der utgangsmatrisen er dynamisk og presser seg inn i emnet

## 2.1.2 VARMEKSTRUSJON

Varmekstrusjon er en prosess der materialet varmes opp før det presses ut av den bestemte matrisen. I den forbindelse er det mulig å se på to ulike typer for varmekstrudering.

### 2.1.2.1 OVER REKRYSTALLISASJONSTEMPERATUR

Sterk varmekstrudering (eng. Hot-extrusion) er prosess der materialer blir deformert med temperaturer over rekrySTALLISASJONSTEMPERATUREN til materialet. Dersom et material har en temperatur over rekrySTALLISASJONPUNKTET vil materialet bli rekrySTALLISERT underveis i ekstruderingen, noe som gjør at materialet ikke blir sprøtt, med andre ord, det får en lav hardhet og flytegrense samt høy duktilitet.

### 2.1.2.2 UNDER REKRYSTALLISASJONSTEMPERATUR

Den andre varianten av varmekstrudering gjennomføres over romtemperatur men under rekrySTALLISASJONSTEMPERATUR, og brukes vanligvis for å oppnå den best egnede balansen av duktilitet og materialeegenskaper til et bestemt produkt [5, side 80]. I denne oppgaven er det varmekstrusjon under rekrySTALLISASJONSTEMPERATUR som er analysert i dybden.

## 2.1.3 KALDEKSTRUSJON

Kaldekstrusjon gjennomføres ved, eller nært, romtemperatur, og har en fordel ovenfor varmekstrusjon i forhold til mangel på oksidasjon, tettere toleranser, fin overflate og rask ekstrusjonshastighet dersom materialet er gjenstand for urenheter, som for eksempel høyt svovelinnhold.

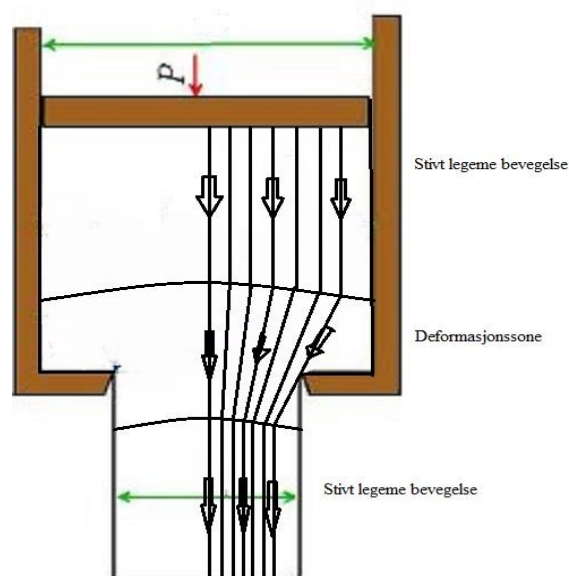
## 2.2 MATERIALFLY I EKSTRUDERINGSPROSESSER

Forståelsen av materialflyt i en ekstruderingsprosess er særdeles viktig for å kunne danne gode ekstrusjonsmatriser. I tidlige ekstruderingsforsøk var det svært vanlig å bruke plastelina som substituttmaterial for å forstå hvordan materialer oppfører seg i en ekstrusjonsprosess,

men i senere tid har flere teknikker blitt utviklet til å studere den aktuelle materialflyten i en bolt som presses ut til en bestemt form. Ved bruk av slike teknikker samt reelle laboratorieeksperimenter er det mulig å optimalisere hver ekstruderingsprosess for sitt bruk.

Når en bolt går gjennom en formeprosess, beveger den seg i ulike retninger. Benevnelsen for dette kalles materialflyt. Å forutsi materialflyten i en gitt ekstrusjonsprosess er svært vanskelig, og for å forstå flyten er det en mulighet å studere hastighetsfeltet. Det vil si å se på hastigheten til materialpartiklene i emnet og hvordan de endres over tid. En formeprosess, i dette tilfellet ekstrudering, deles inn i ikke-stasjonære eller stasjonære prosesser basert på hastighetsfordelingens endring over tid.

Fremoverekstrudering kan betraktes som et enkelt tilfelle av et massivt emne (Figur 2.4). Gjennom deformasjonssonen deformeres materialet plastisk før det strømmer videre som et stivt legeme bakenfor deformasjonssonen. Etter oppstart vil det innstille seg en tilnærmet konstant og tidsuavhengig hastighetsfelt i deformasjonssonen. Dette hastighetsfeltet beholdes gjennom hele formeprosessen når det ses bort fra ikke-stasjonære effekter ved begynnelsen, og eventuelt ved slutten av prosessen. Partikler som flyter inn i deformasjonssonen, i samme avstand fra overflaten på forskjellige tidspunkt under formingen, vil følge samme partikkelbaner. Vi ser dette som piler i figur 2.4.[4]



Figur 2.4: Materialflyt ved plastisk forming, stasjonær flyt

### 2.2.1 HASTIGHETSFELT

Hastighetsfeltet bestemmes ut fra hastighetskomponentene og deres utvikling over tid. Den generelle tøyningstilstanden er beskrevet av ni tøyninger, som på grunn av parvis likhet for skjærtøyningene reduseres til seks ulike tøyningskomponenter. Sann tøyning kan ved en formepprosess da beskrives ved følgende tøyningskomponenter. ( $u_x, u_y, u_z$  er forskyvninger av materialpartikler i x-, y-, og z-retning)[4]:

$$\epsilon_x = \frac{du_x}{dx} \quad \epsilon_y = \frac{du_y}{dy} \quad \epsilon_z = \frac{du_z}{dz} \quad (1)$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} \right), \quad \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left( \frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dy} \right), \quad \epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{du_z}{dx} + \frac{du_x}{dz} \right) \quad (2)$$

Hastighetskomponentene til materialpartikkelen i de tre akseretningene vil også være bestemt ut i fra disse forskyvningene [4]:

$$v_x = \frac{du_x}{dt} \quad v_y = \frac{du_y}{dt} \quad v_z = \frac{du_z}{dt} \quad (3)$$

Normaltøyninger fremkommer da som[4]:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{dv_x}{dx} \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{dv_y}{dy} \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{dv_z}{dz} \quad (4)$$

Skjærtøyninger fremkommer som [4]:

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \dot{\epsilon}_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{dv_x}{dy} + \frac{dv_y}{dx} \right), \quad \dot{\epsilon}_{yz} = \dot{\epsilon}_{zy} = \frac{1}{2} \left( \frac{dv_y}{dz} + \frac{dv_z}{dy} \right), \quad \dot{\epsilon}_{zx} = \dot{\epsilon}_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{dv_z}{dx} + \frac{dv_x}{dz} \right) \quad (5)$$

Fra dette fremgår det at hvis hastighetsfeltet er kjent i en formepprosess, hvilket betyr en kjenner hastighetskomponentene, samt utviklingen av disse over tid for alle materialpartikler i

emnet, vil tøyninger og tøyningshastigheter kunne utledes[4]. I programvaren DEFORM er det mulig i postprosessoren å studere materialflyten til et emne.

### **Spenninger og trykk:**

De konstitutive egenskapene til et material har direkte innflytelse til materialflyten i en ekstrudering. I varmekstrusjon kan flyten bli sett på som en idealisert viskøs ikke-Newtonsk inkompressibel væske, der viskositeten er en funksjon av effektiv deviatorisk spenning og effektiv tøyning. Deviatorisk spenning er typisk gitt som en funksjon av parametere som tøyning, tøyningssrate, temperatur og eksperimentelt bestemte materialkonstanter. En likning som ofte er brukt i denne sammenheng er[6]:

$$\overline{\sigma} = \frac{1}{\alpha} \sinh h \quad -1 \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Hvor  $\alpha$ ,  $n$  og  $A$  er temperatuavhengige parametere og Zener-Hollomonparameteret er gitt som:

$$Z = \overline{\dot{\epsilon}} e^{(Q/RT)} \quad (7)$$

Der  $\overline{\dot{\epsilon}}$  er effektiv tøyning,  $Q$  er aktiviseringsenergi,  $R$  er gasskonstanten og  $T$  er absolutt temperatur [6].

Den effektive deviatoriske spenningen er relatert til den effektive tøyningssraten og temperaturen i den spesifikke materialloven, likning (1). For å forenkle materialflyten er det vanlig å se på en todimensjonal case der med optimale, parallelle, bærevegger. Figur 2.5 [6].

De bestemmende likningene for en viskøs ikke-kompressibel væske kan hentes ut fra masse- og momentbevaringslikningene.



$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \text{ (bevegelseslikningen)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \text{ (innkompressibelbegrensingen)} \quad (8)$$

Der  $\rho$  er densiteten,  $\mathbf{v}$  er fartsvektoren, og  $\boldsymbol{\sigma}$  er spenningen. For en væske kan spenningen skrives som:

$$\boldsymbol{\Sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}' \quad (9)$$

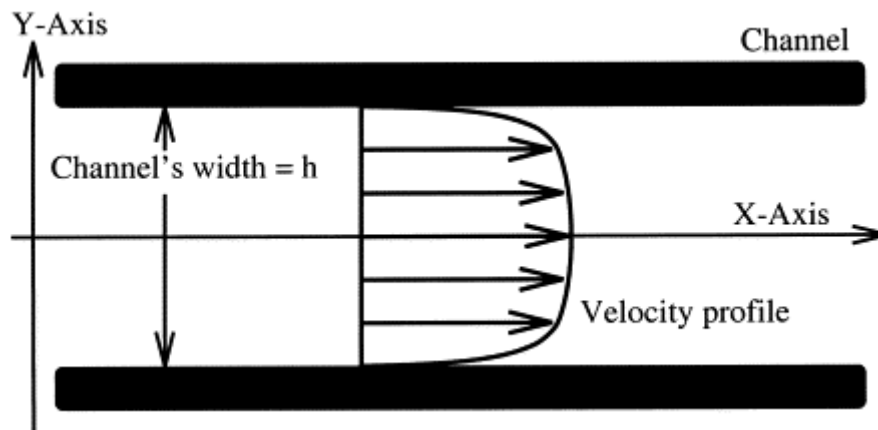
Der  $\boldsymbol{\sigma}'$  er deviatorisk spenning, og  $p$  er trykk [6].

Egenskapene til et material bestemmer forholdet mellom deviatorisk spenning og tøyningssrate, slik at ved bruk av tøyningsslikningene i (4) og (5) får vi:

$$\boldsymbol{\sigma}' = 2\mu(\overline{\dot{\boldsymbol{\epsilon}}}, T) \dot{\boldsymbol{\epsilon}}, \text{ der hvor [6]:} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{1}{3} \frac{\overline{\sigma'}}{\overline{\dot{\boldsymbol{\epsilon}}}} \quad (11)$$

Trond Aukrust har skrevet en artikkel [6], som forklarer at ved bruk likningene (1)-(11) viser det seg at ved store tøyninger oppleves et tilnærmet eksponentielt hastighetsfelt langs veggen. Han kom også frem til at høye tøyningssrater er proporsjonale med inversen til materialparameterne  $n$  og  $\alpha$  i Sellars-Taggartlikningen,(1). Dette betyr at tykkelsen på skjærgrensesnittet er direkte kontrollert av tøyningssrate og temperatur.

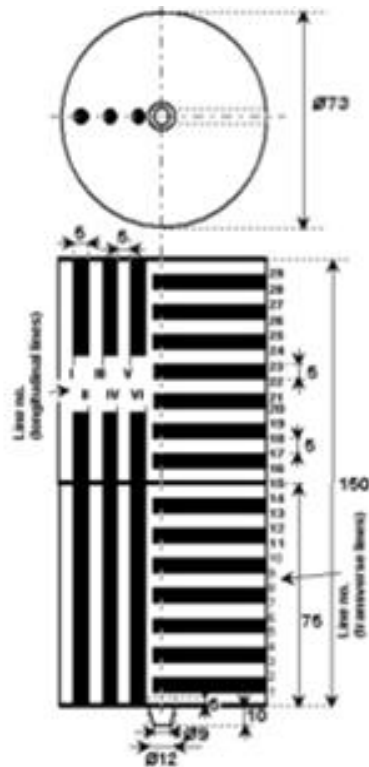


Figur 2.5: 2D sketsj av flyt med parallelle bærevegger [6]

### 2.2.2 INNSETTING AV KONTRASTPINNER

Ved innsetting av kontrastpinner er det mulig å få en visuelt bedre forståelse for hvordan materialet oppfører seg i ekstruderingsprosessen. Fremgangsmåten er slik at det bores små hull med høy presisjon inn i aluminiumsprøven. Geometrisk bores hullene inn slik som vist på figur 2.6. Som vi ser er prøven splittet langs den aksielle retningen, fordi materialets motstand vil føre drillhodet ut av kurs om man prøver å bore hvert hull i en operasjon.

Kontrastmaterialet som settes inn ved hjelp av pinner som tres inn i de borete hullene velges på bakgrunn av flytkriterier, slik at prøven og substituttmaterialet har omtrentlig samme oppførsel. Dette er viktig slik at kontrastpinnene påvirker materialflyten i minst mulig grad og at eksperimentet skal bli realistisk i forhold til det som er tilfelle i virkelig ekstrudering. Etter innsetting av kontrastmateriale legges det på en tynn stålmembran før den settes inn i ekstruderingspressen. Dette for å unngå sveising mot containerveggen som vil gjøre fjerning av ekstrudatet, samt analysen vanskeligere og mindre korrekt.



**Figur 2.6:** Visualisering av en bolt med innsatte kontrastpinner.

Etter endt ekstrusjon blir ekstrusjonsprofilen splittet i lengderetning, omtrentlig ved midten og deretter nøye nedslipt til midtplanet for prøven. Ved bruk av en annen sammensetning av materialer i kontrastpinnene enn hva som er i bolten for øvrig, tilsettes kjemikalier på den nedslippte flaten for å få frem flytmønsteret. Figur 2.7 viser ulike faser i ekstrusjonen.



**Figur 2.7:** Figuren viser ulike faser i en ekstrusjon med innsatte kontrastpinner [2,p.157, fig 12.4]

Generelt karakteriseres ekstrusjon i tre ulike soner; dødsone, deformert sone og skjærsone.

**Dødsone:**

Dødsone er en region der tøyningen er svært lav. I foroverekstrudering, som vi ser eksempel på i figur 2.7 er det to tydelige dødsoner. Den ene ser vi i hjørnet mellom kontainer og innsats, hvor det er svært liten flytaktivitet, mens den andre er lokalisert i midten av bolten inn mot stempelet.

**Deformasjonsone:**

Den mest åpenbare deformasjonssonen er i midten av bolten når den presses ut gjennom innsatsen, og kalles primærdeformasjonsone. Videre kan vi se at den sekundære deformasjonssonen ligger omtrentlig i midten av bolten der det fortsatt er store deformasjoner, men likevel mye mindre enn den primære deformasjonssonen.

**Skjærsoner:**

Skjærsonene omringer bolten og ligger i området inntil containerveggen, og som karakteristikk ser vi at det er svært lite bevegelse på grunn av mye friksjon inn mot veggen.

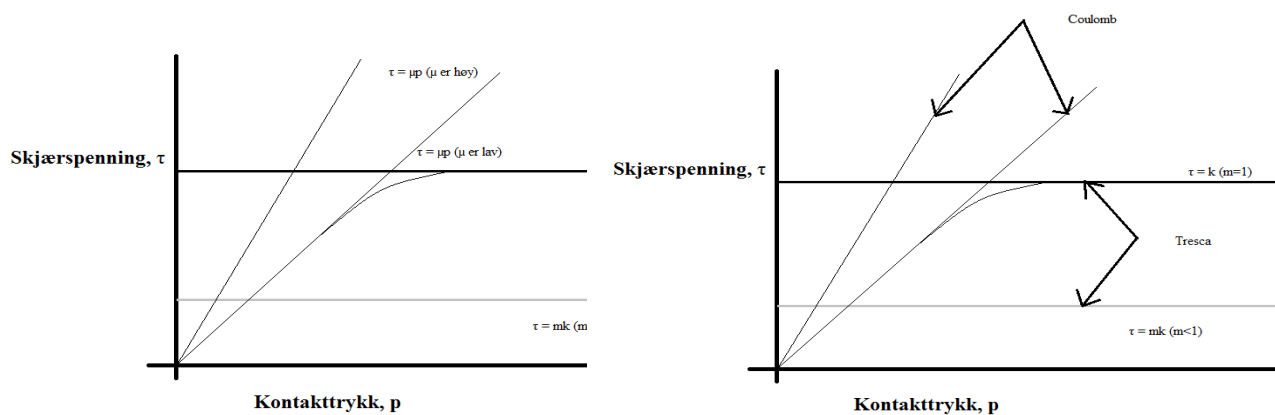
Denne metoden for å analysere ekstruderingsprøver er å foretrekke fremfor mange av de andre analysemetodene, spesielt når det kommer til kraftige deformasjoner. Metoden viser hvordan prøven glider mot containerveggen, og hvilken del av bolten som kommer ut i hvilken posisjon. Laboratorietester som dette er imidlertid kostbare siden det kreves mye arbeid for hvert resultat.

### 2.2.3 FRIKSJON

Den mest brukte friksjonsmodellen til å beskrive friksjonsforhold mellom legemer i glidekontakt er Coulombs friksjonsmodell. Coulombs modell beskriver situasjoner der midlere normalspenningskomponent er lavere enn, eller av samme størrelse som emnematerialets flytespenning  $\bar{\sigma}_n \leq \bar{\sigma}_0$ . Flatetrykk som dette opptrer ofte i formeprosesser som, valsing, trådtrekking og plateforming [4].

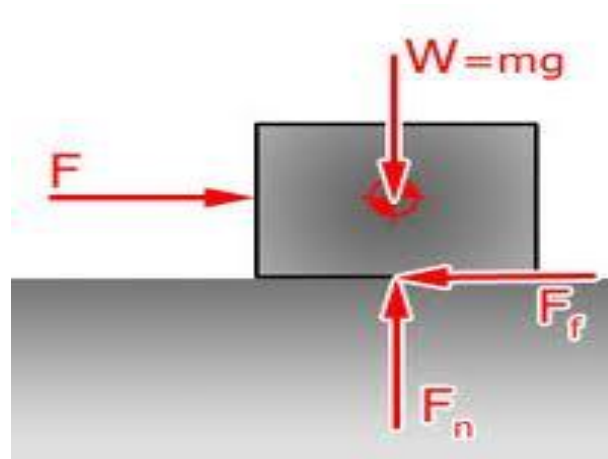
Derimot når det er snakk om ekstrudering er flatetrykket svært høyt. Normalspenningen i grenseflaten mellom emne og verktøy kan for slike prosesser være betydelig høyere enn emnematerialets flytespenning,  $\bar{\sigma}_n \gg \bar{\sigma}_0$  [4].

Under så høye kontaktrykk av denne dimensjonen vil ikke Coulombs modell fungere. En friksjonsmodell som i slike tilfeller gir en bedre beskrivelse av friksjonsforholdene i grenseflaten er derimot Trescas friksjonsmodell. Figuren 2.8 viser skjærspenningen som funksjon av kontaktrykk.



**Figur 2.8:** Skjærspenning som funksjon av kontaktrykk for Coulomb og Trescas friksjonsmodell

Coulombs friksjonsmodell presenteres her for en kloss med masse,  $m$ , som dyttes langs et plant underlag. Vi vil da få en normalkraft som trykker klossen inn mot underlaget (12). I grenseflaten mellom kloss og underlag vil det overføres et midlere trykk (13). For å trekke klossen bortover underlaget med konstant hastighet trengs en kraft  $F$ . Denne er lik men rettet motsatt av friksjonskraften. Friksjonskraften forsøker å hindre klossens bevegelse i  $F$ -retning. Trekkraften som kreves for å få klossen til å bevege seg kan uttrykkes ved friksjonsskjærspenningen,  $\tau_i$ , (14a og 14b). Coulombs friksjonskoeffisient defineres da som forholdet mellom friksjonskraft og normalkraft (15). Dette uttrykket viser derfor at friksjonskoeffisienten er lik forholdet mellom skjærspenning og normalspenning overført i grenseflaten mellom de to kontaktlegemene.



**Figur 2.9:** Et legeme dyttes på et plant underlag. Figuren viser kreftene som virker tegnet som fritt legeme diagram.

$g$ = tyngdens akselerasjon

$A$ = kontaktareal mellom kloss og underlag

$\sigma_n$ = midlere normalspenningskoeffisient overført i grenseflaten mellom kloss og underlag

$F$ = kraft

$\tau_i$ = friksjonsskjærspenning

$\mu$ = friksjonskoeffisient

$$F_N = mg \quad (12)$$

$$P(= -\sigma_n) = \frac{F_N}{A} \quad (13)$$

$$F = \tau_i A \quad (14a)$$

$$\tau_i = \frac{F}{A} \quad (14b)$$

$$\mu = \frac{F}{F_N} = \frac{\tau_i A}{pA} = \frac{\tau_i}{p} = \left| \frac{\tau_i}{-\sigma_n} \right| = \frac{\tau_i}{-\sigma_n} \quad (15)$$

Den høyeste skjærspenning som kan overføres i grenseflaten til emnet kontra verktøy er emnematerialets skjærflytespenning. På bakgrunn av dette formulerte Tresca en friksjonsmodell (16). Trescas friksjonsmodell kan også formuleres ved å innføre materialets

flytespenning i stedet for skjærflytespenningen. Her benyttes ofte Von Mises flytekriterium da dette gir mest samsvar med eksperimentell observasjon av hvilke spenninger som gir begynnende plastisk flyt. Vi kan se dette i (17). Friksjonsspenningen er uavhengig av kontaktrykket i grenseflaten, og kun relatert til emnematerialets flytespenning gjennom friksjonsfaktoren,  $m$ .

$k$  = skjærflytespenningen

$m$  = friksjonsfaktoren

$$\tau = \tau_i = mk \quad (16)$$

$$\tau = \tau_i = mk = \frac{m}{\sqrt{3}} \sigma_0 \quad (17)$$

#### 2.2.4 SKJÆRSPENNINGER

Skjærspenning i materialer oppstår når skjærkraften går parallelt med den aktuelle flaten. I ekstruderingsverden vil dette være blant annet når råemnet går nedover kontainerveggen eller bæreveggen i innsatsen på matrisen. Symbolet for skjærspenning er i denne oppgaven vist som den greske bokstaven tau,  $\tau$ .

$$\tau = F_s/A \quad (18)$$

Der  $F_s$  er skjærkraften som går parallelt med flaten  $A$ .

Presskraften mellom to flater i en ekstrusjon er gitt ved:

$$P_{tot} = Pfd + Pds Pdn + Pfc + Pdh \quad (19)$$

Der Pfd er friksjon mot matrise, Pfc er friksjon mot kontainer, Pdh er kraft mot homogen deformasjon og Pds er kraft til skjærdeformasjon.

Skjærspenningen i kontainerveggen er dermed gitt ved:

$$Pfc = Pmax - P50mm = \tau \times Akont = 2\pi r_0 \tau \quad (20)$$

Som ved litt omskrivning gir:

$$\tau = \frac{Pfc}{2\pi r_0 L} \quad (21)$$

Her er L angitt som bæreflatelengde mens  $r_0$  er radiusen i råemnet.

### **Gjennomsnittlig skjærspenning:**

$$\text{Vi har at } \Delta P_{bk} = P_{bk2} - P_{bk1} \quad (22)$$

Videre er pressforholdet:

$$R = \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2 \quad (23)$$

Fra likning (21) får vi derfor gjennomsnittlig skjærspenning gitt som:

$$\tau_{bk} = \frac{\Delta P_{bk}}{2\pi r_1 l_{bk} \left(\frac{A_0}{A_1}\right) \left(\frac{A_0}{A_1}\right)} \quad (24)$$

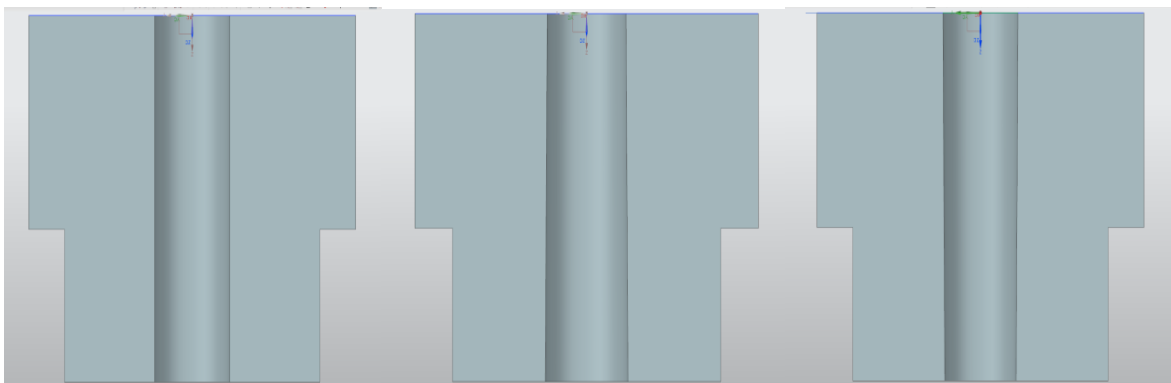


## 2.3 SIMULERING AV EKSTRUDERINGSPROSESSER

De senere årene har det blitt gjennomført flere simuleringer av forskjellige ekstruderingsprosesser, gjerne ved bruk av ulike Aluminiumslegeringer. Spesielt har vektleggelsen av tribomekaniske betingelser på bæreflaten vært studert i stor grad. Dimensjonen, formen og egenskapene til ekstrudatet er i stor grad påvirket av betingelsene på bæreflaten til matrisen. Vanlig praksis i dagens industri er at matrisen gradvis endres til den tilfredsstillende geometriske kravene til sluttbrukeren. På grunn av tribomekaniske forhold, samt interaksjon mellom verktøystålet, luft og råmaterialet vil det oppstå slitasje. Dette gjør at verktøy med jevne mellomrom må skiftes ut. Videre vil det også utvikles varme da råmaterialet presses mot verktøystålet. Med økende ekstrusjonshastighet vil også temperaturen i systemet øke frem til et punkt hvor spesifikke materialbetingelser oppnås. Dersom ekstrusjonshastigheten økes videre utover begrensningene kan det medføre uønsket kvalitet og form på ekstrudatet.

### 2.3.1 ULIKE BÆREFLATER – REDUSERENDE, PARALLELL SYLINDRISK ELLER EKSPANDERENDE BÆRINGSKANAL

I dagens industri samt i det meste av den publiserte informasjonen refereres det til parallelle bæreflater. I realiteten er dette en optimal situasjon som er svært vanskelig å oppnå. Verktøyet kan under stort press og høy temperatur endre formen, som igjen fører til endret kvalitet på ekstrudatet. Det skilles mellom tre ulike bæreflater. Reduserende betyr at størrelsen på utgangen av matrisen er mindre enn inngangen til råemnet. Ekspanderende betyr at utgangen av matrisen er større enn inngangen til råemnet, mens parallell henviser til ingen endring langs bæreveggen.



**Figur 2.10:** Figuren viser ulike bærekanaler. fv. Parallell, ekspanderende og reducerende

Det er viden kjent at kontaktvilkår på bæreflatene er i stor grad avgjørende av vinkelen på bæreflatene. I en artikkel skrevet av H. Valberg og T. Malvik henvises det til R. Akerets bok «Influence of the angle of inclination and the length of the bearing surface on the friction in the extrusion channel» som gjennom laboratorieeksperiment viste at ved en gradvis vinkelendring på bærematrisen fra  $-0,5^\circ$  (redusering) til  $+0,5^\circ$  (ekspandering) oppstår en plutselig endring i kontaktvilkårene. Ved en redusering i bæreflaten vil det være stor kontakt mellom bæreflate og ekstrusjonsmateriale, som fører svært høy spenning. Ved ekspandering vil spenningen mellom material og bæreflate dette ned til null, som indikerer ingen kontakt i det hele tatt. I området  $-0,5^\circ$  til  $0,5^\circ$  forandres kontaktvilkårene svært hurtig [2, side 2].

## 2.4 KONTAKTFORHOLD I BÆREKANAL

Per dags dato eksisterer det lite informasjon og få publikasjoner som beviser hvilken effekt små justeringer av bæreveggene har på materialflyt i en ekstrudering. Henry Valberg og Terje Malvik gjorde likevel noen eksperimenter i den hensikt å se på denne situasjonen.

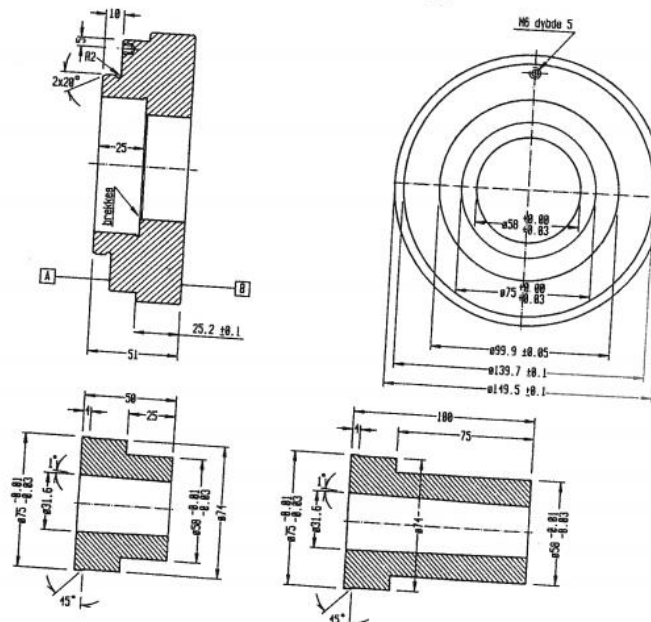
Malvik og Valberg benyttet aksesymmetrisk ekstrudering med 1 grads reduserende kanaler og ulike lengder. Restmateriale som tas ut av slike tester er lette å tolke da bitene av restmetall fra kanalene er forholdsvis store. Konstrastpinner ble satt inn i prøvene slik at også materialflyten skulle bli lettere å dokumentere, og tre ulike forsøksserier ble satt opp.

I det første forsøkssettet gjennomført av Malvik og Valberg, ble en AA6063-legering ekstrudert med stempelhastighet på  $10\text{mms}^{-1}$ . Etter endt ekstrusjon ble matrisene kuttet opp slik at det var mulig å inspisere bæreveggene. Resultatet viste at bæreflaten kan visuelt deles inn i tre ulike deler. I nærheten av utløpet kan man observere to regioner med ulik struktur. Et blankt, fint og skinnende lag som strakk seg 8-15 mm fra utgangen og oppover i matrisen. Videre overtok et område som lignet men som hverken var like blank eller polert som den nederste delen. Helt oppe ved inngangen av matrise viste det seg et tredje lag, som var svart med klare skraper og riller etter ekstrusjonsprosessen [2]. Figur 2.11 viser hvordan innsiden av en matrise ser ut etter en slik type ekstrusjon. Det er mulig å se klare forskjeller mellom

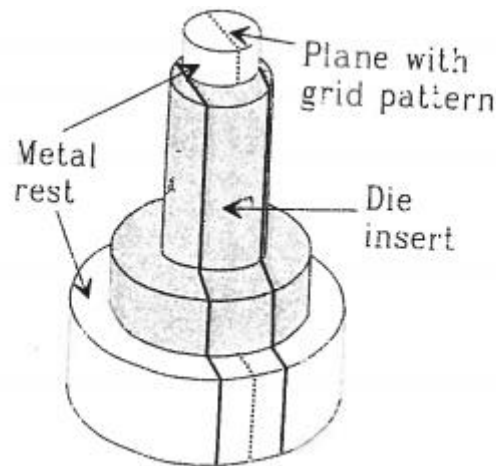
inngangspartiet og utgangspartiet. Figurene 2.12 og 2.13 er hentet fra Malvik og Valbergs egne studier hvor vi ser hvordan innsatsene ser ut, samt oppsettet inklusive metallrest.



**Figur 2.11** En oppdelt del av en innsats viser at det er tre ulike soner langs bæreveggen. En blank og fin flate nederst ved utgangen, en noe grovere del i midten, og et sort område øverst. Tallet på prøven angir vinkelen på bæreveggen



**Figur 2.12:** Figuren viser tegninger over innsatsene i forsøkssettet til Valberg og Malvik. Øverst til venstre ser vi en matrise som kan holde ulike innsatser, for eksempel de to innsatsene med ulik bæreflate nederst i bildet. [2, p15, fig 3]



**Figur 2.13:** Figuren viser en animasjon av endestykket til en ekstruder der noe av materialet er på tur ut av endestykket [2, p17, fig 5]

En annen studie som også tidligere er blitt gjennomført er Steinar Tverlids doktorgrad fra 1997 [7], der kontaktforholdene langs bærekanalen ses på i lys av ulike hastigheter og hva som fører til ulik friksjon. I denne studien, som er en fortsettelse på Abtahi oppgave [8], oppdaget han at ved ekstrudering dannes det et klebende lag på grunn av oksidasjon slik at friksjonen langs bærekanalene ikke er konstant hele tiden [8].

Tverlid satte opp flere tester for å observere utfallet av ulik friksjon langs bærekanalen, og i hvilken grad friksjonsmodellene kan brukes. Det han kom frem til var at Coulombs friksjonsmodell fungerte tilfredsstillende da friksjonskoeffisienten synker ved økende utgangshastighet. I tillegg kommer oksygen fra luften trolig inn mellom verktøysdelene, som gjør at dette klebende laget dannes [7].

## 2.5 FINITE ELEMENT ANALYSE

Finite Element Analysis er en spesifikk problemrelatert implementasjon av endelige elementers metode (eng. Finite Element Method, FEM), der metoden er en generell metode for problemløsning. Endelige elementers metode er en numerisk fremgangsmåte som brukes for å finne en tilnærmet løsning på et gitt sett av likninger. Den grunnleggende måten til FEM bygger på prosessen av å transformere kontinuerlige modeller og likninger til matematisk

diskrete motparter og består da av 5 spesifikke steg [3]: 1) identifisering av problemet, 2) definisjon av problemet, 3) etablering av elementligningen, 4) sammensetting av elementligninger, og 5) numerisk løsning av globale likninger.

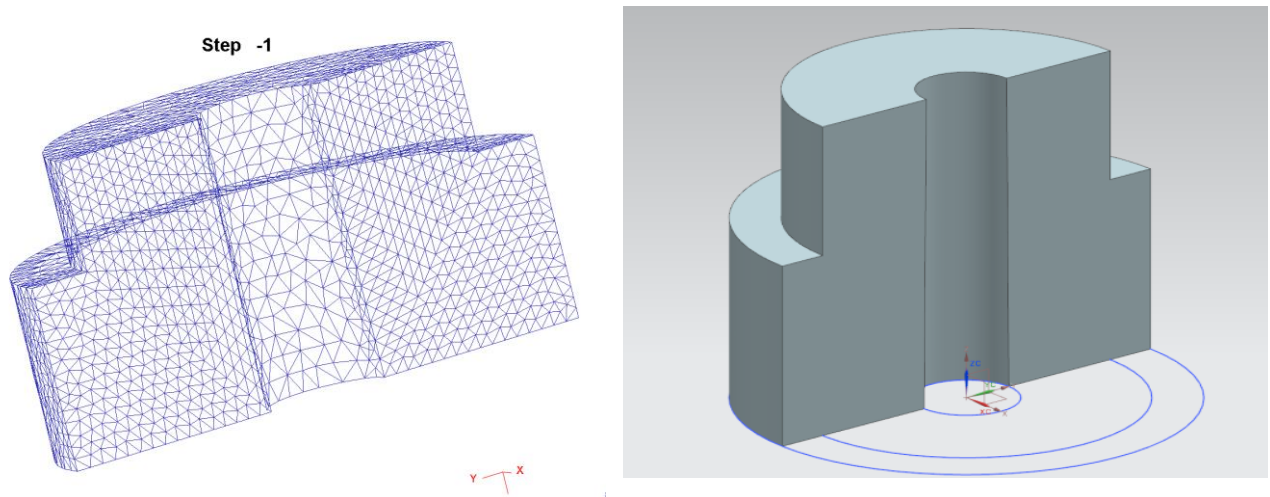
### 2.5.1 FEA-SIMULERING

I starten av 90-tallet oppsto en ny æra for hva som kommer til visualisering av design innen produktutvikling. Med programvarer som; DEFORM, Forge og Abaqus ble arbeidsmetodene stort påvirket, både innen akademika og i industrien. Spesielt innen feltene, forming av materialer og sveiseprosesser. Dessverre for ekstrusjonsindustrien var det liten fremgang med praktiske 3D-modeller i denne perioden.

Selv om de tidligste FEM-simuleringspakkene er svært annerledes både hva gjelder utseende og beregningsmetoder i forhold til dagens versjoner, har de alle en felles karakteristikk: meshet. Et mesh er en rutelignende struktur som modellen bygges opp av. En rute er kalt et element. I en modell er antall elementer avgjørende for hvor nøyaktig den beregnede løsningen er virkeligheten. Med en kontinuerlig utvikling av innen programvarer, sterkere datamaskiner samt mer avanserte algoritmer kan vi i dag løse svært avanserte problemer med bare noen få enkle tastetrykk.

### 2.5.2 MESH

Ekstrusjonsprosesser der emnet har relativt stor masse, kjennetegnes generelt ved stor plastisk deformasjon. Med dette fører det til signifikant reell bevegelse mellom det deformerte materialet og verktøyflatene. Meshet i et verktøy starter med å være velformet og veldefinert, men underveis i ekstrusjonsprosessen blir det forvrengt. Dette kompenseres med at et nytt mesh genereres med hensyn på den oppdaterte geometrien av råemnet. DEFORM, som er det benyttede programmet i denne masteroppgaven, bruker en prosedyre kalt AMG, som kort forklart bestemmer optimal fordeling av tetthet, og generer meshet basert på den gitte tettheten. Figur 2.14 viser en geometri med og uten mesh.



Figur 2.14: Figuren viser eksempel på en innsats brukt i denne oppgaven med og uten mesh. Ved bruk av mesh deles modellen inn i svært mange små elementer som løses hver for seg, før de restruktureres til den oppdaterte formen.

## 2.6 PROGRAMVARER

### 2.6.1 DEFORM

DEFORM er en dataprogramvare som brukes til å designe, samt å analysere forming-, varmebehandling-, maskinering- og mekanisk sammenføring av metaller. Ved bruk av gode modeller i programvare kan dyre «prøve-og-feile»-tester på gulvet minimaliseres, som igjen fører til lavere kostnader. Programvarepakken DEFORM har allerede vært i bruk i to tiår blant verdens ledende selskaper og er svært godt egnet som CAD-programvare. Spesielt hvor store deformasjoner oppstår. I denne oppgaven benyttes modulene DEFORM 2D og DEFORM 3D fra programvarepakken DEFORM v10.1.2

### 2.6.2 BRUK AV DEFORM

Programvarepakken DEFORM består av tre ulike enheter; en pre-prosessor, en simulator, og en post-prosessor. I pre-prosessen defineres modellen, enten ved de enkle tegneverktøy som allerede eksisterer eller ved importering fra andre programvarer. Det bestemmes og alle inn-data som kreves, samt generering av nettverk. I simulatoren foregår alle kalkuleringer, mens i post-prosessen eksisterer det en rekke verktøy som lar brukeren analysere hendelsesforløpet fra råemne til ferdig ekstrudat.

### 2.6.3 SIEMENS NX

Programvaren Siemens NX er en designprogramvare som er svært godt egnet til å tegne og utvikle figurer i 3D. Den høye brukervennligheten samt dens allsidighet gjør at Siemens NX er blant markedets mest brukte CAD/CAM/CAE programvarepakker i dag. I denne oppgaven er modellene konstruert og designet i NX versjon 8.0. Deretter er det brukt en integrert modul i programvaren som gjør det mulig å lagre modellene som; STL-fil. Dette er en filtype som DEFORM også bruker slik at modellene er mulig å overføres mellom de ulike programvarene.





## **3 METALLFLYTT I REDUSERENDE KANAL – EKSPERIMENT MED TILSVARENDE FEM-MODELL**

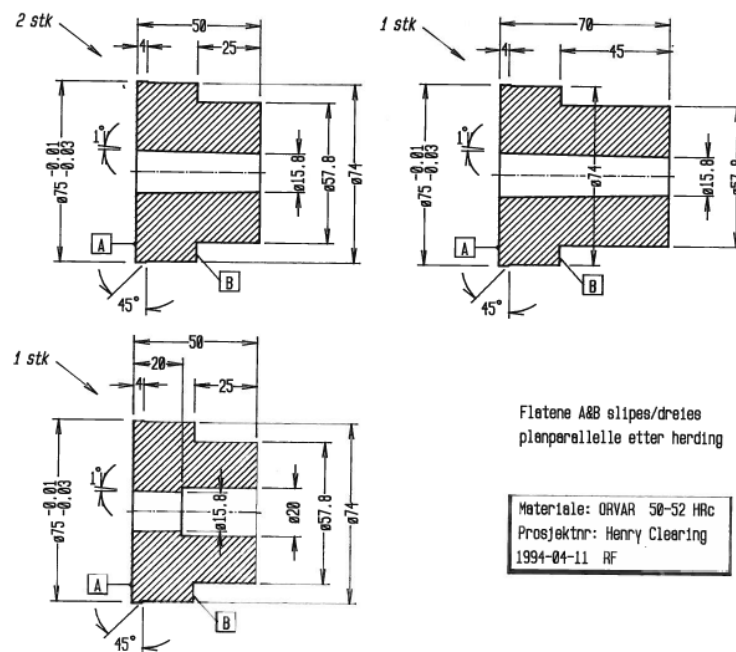
Tidligere har det blitt gjennomført flere laborietester med stangeekstrudering ved NTNU, men dokumentasjonen er svært mangelfull. I 1994 ble to aluminiumslegeringer, ekstrudert for å undersøke kontakt mot bæreflaten. Samme test ble gjort om igjen i 2001.

### **3.1 LABUNDERSØKELSE, KONTAKTBETINGELSER MOT BÆREFLATE**

Hensikten med denne laboratorieoppgaven er å beregne de ulike kreftene som virker mot bæreflaten ved ekstrudering av en aluminiumstang. Ved å måle presskreftene som kreves for å ekstrudere bolten om til et ferdig ekstrudat, er det mulig å beregne skjærkraftens mellom bolten og kontainerveggen, mellom bolten og bæreveggen samt materialflyten i grensesjiktet. Denne beregnes som forklart i 2.2.1 ved å bestemme hastighetsfeltet. Det utføres fire eksperimenter hvor alle er bæreveggene har likheter med hverandre, men på grunn ulike lengder kan dette føre til ulike resultater.

Testen utføres i en 800 tonn vertikal presse (8MN), der kontainerdiameteren er 100mm. Verktøyet som benyttes er en matrise med utskiftbare innsatser der bæreflatelengden varieres. De fire innsatsene som benyttes har alle en innsnevring,  $\text{choke} = 1^0$ , og har lengdene 20mm, 50mm (2 stk.) og 70mm (Figur 3.1).

Det blir testet med to ulike emnematerialer, henholdsvis legeringene AA6082.5 og AA7108.5. Der AA6082.5 har mye lavere flytespenning enn AA7108.5. For å bedømme hastighetsforholdene i grensesjiktet er boltene forsynt med kontrastmateriale, se avsnitt 2.2, der indikator materialet består av Al2.2 % Cu som ved bruk av egnet etsereagens vil etse svart i forhold til boltens grunnmateriale (Figur 3.2). Tabellene 3.1 og 3.2 viser faste og varierende ekstruderingsbetingelser.



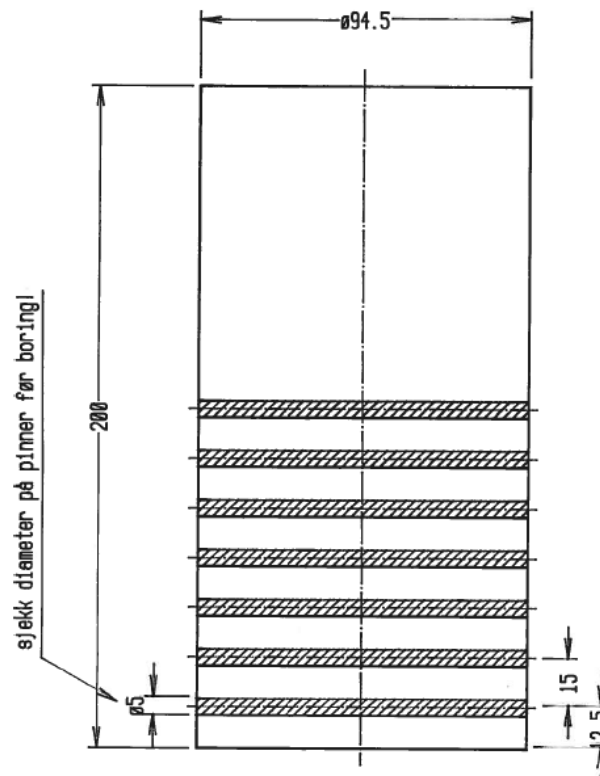
**Figur 3.1:** Figuren viser de tre ulike innsatsene som brukes i bæreveggs-testen. Innsatsen til høyre er lengre enn de to til venstre. Alle innsatsene har en innsnevring på  $1^{\circ}$

<b>Stempelhastighet</b>	<b><math>5\text{ms}^{-1}</math></b>
<b>Bolt.temp</b>	<b><math>515^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Konteinertemp</b>	<b><math>450^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Forvarmingstemp. innsatser</b>	<b><math>200^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Pressrestlengde</b>	<b>50mm</b>

**Tabell 3.1:**Oversikt over de faste ekstruderingsbetingelsene

Forsøk nr.	Bolt nr.	Legering	Bæreflate(mm)
1	1	AA6082.5	50
2	2	AA7108.5	20
3	3	AA7108.5	50
4	4	AA7108.5	70

Tabell 3.2: Oversikt over de varierende ekstruderingsbetingelsene



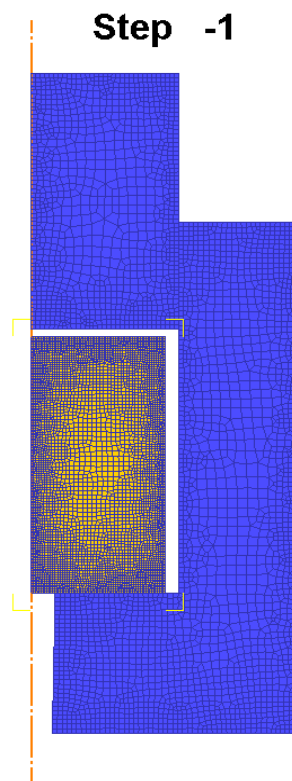
Figur 3.2: Oversikt over hvordan kontrastpinnene fremstår i prøveemnet. Som vist på figuren er det 15mm mellom sentrene på kontraststavene

## 3.2 DATATESTING – 2D

Som innledende forsøk og testing genereres en 2D- modell direkte i DEFORM. Det velges bare 1 av forsøkene til laboratorieundersøkelsene, da det mest interessante fra modellen vil være å observere hastighetsfeltet. Eksperimentet som lages i 2D er fra forsøk nr. 1 av laboratorietestingen med 50 mm bæreflate og reduserende bærevegg tilsvarende 1<sup>0</sup>.

### 3.2.1 OPPSETT AV MODELL

Siden koordinatsystemet kun virker i x- og y- retning, er det tilstrekkelig å sette opp tre ulike komponenter. Innsats, bunnmatrise og kontainer settes sammen til en komponent, bolten den andre, mens presseverktøyet utgjør siste del. Figur 3.3 viser modellen satt sammen i DEFORM 2D.



**Figur 3.3:** 2D-modellen satt sammen DEFORM. Innsats, kontainer og matrise er satt sammen til en enkelt komponent.

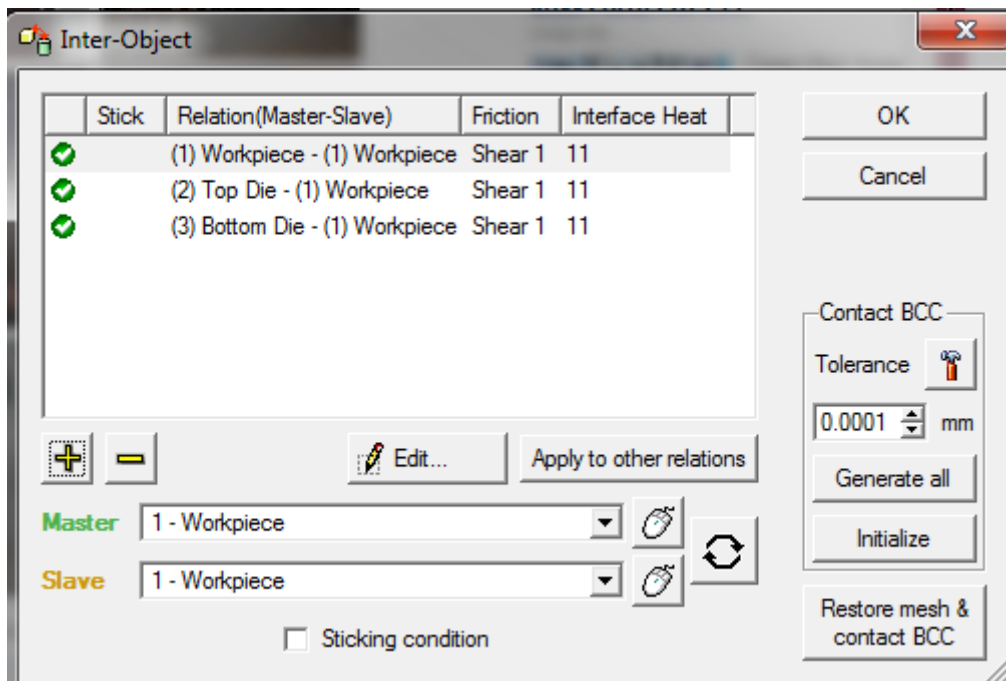
### 3.2.2 EKSTRUDERINGSBETINGELSER

For sammenlikningen sin del er det valgt omtrentlig samme verdier som ved laboratorieeksperimentet. Ekstruderingsbetingelsene er satt opp i tabell 3.3.

<b>Stempelhastighet</b>	<b>5ms<sup>-1</sup></b>
<b>Bolt.temp</b>	<b>450<sup>0</sup>C</b>
<b>Konteinertemp</b>	<b>200<sup>0</sup>C</b>
<b>Verktøymateriale</b>	<b>AISI-13</b>
<b>Boltmateriale</b>	<b>AL7075</b>

Tabell 3.3:Oversikt over ekstruderingsbetingelsene

Inter-relasjon mellom verktøyene blir satt til høy friksjon,  $m=1$ , og i samråd med veileder blir varmeoverføringskonstanten satt til 11.



Figur 3.4: Inter-relasjon mellom verktøysdelene i 2D-modellen

### 3.3 DATATESTING - 3D

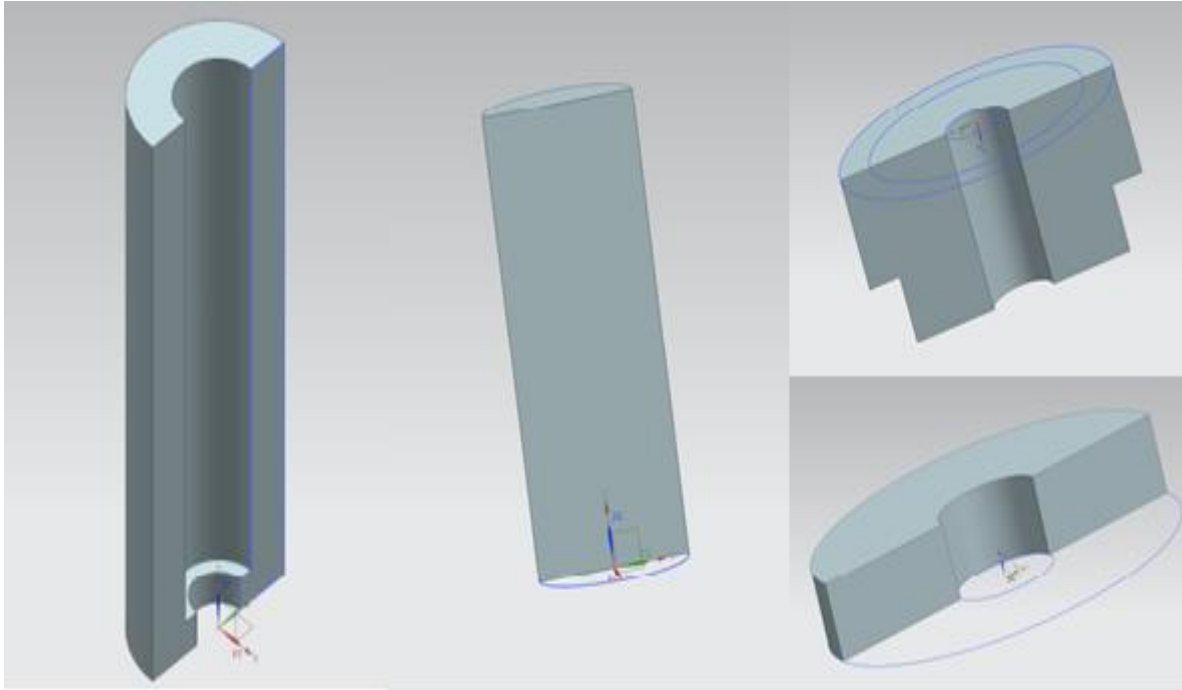
Det er interessant å kunne se på om en programvare, i dette tilfellet, DEFORM vil kunne gi liknende verdier som de som oppstår i laboratorieforsøkene. Postprosessoren til programvarepakken DEFORM, inneholder en rekke funksjoner der det blant annet er mulig å observere materialflyt og presskrefter gjennom hele ekstrusjonsprosessen. Det er satt opp 4 tester, og to ulike legeringer vil bli brukt.

#### 3.3.1 MODELLDESIGN

DEFORM er en glimrende programvare til å teste materialer som gjennomgår store deformasjoner, men som tegne- og designprogram, spesielt i 3D er det i mindre grad egnet. På grunn av studentens tidligere erfaring med Siemens NX ble komponentene utformet i denne programvaren. Ved å lagre og eksportere geometriene som STL-filer er det mulig i neste steg å importere delene hver for seg inn i DEFORM.

Med hensyn til verktøyets kompleksitet og utforming er noen av delene fra laboratorietesten forenklet. Etter samtale med veileder er det bestemt hvordan modellen kan designes uten at det teoretisk skal få store innvirkninger på resultatene.

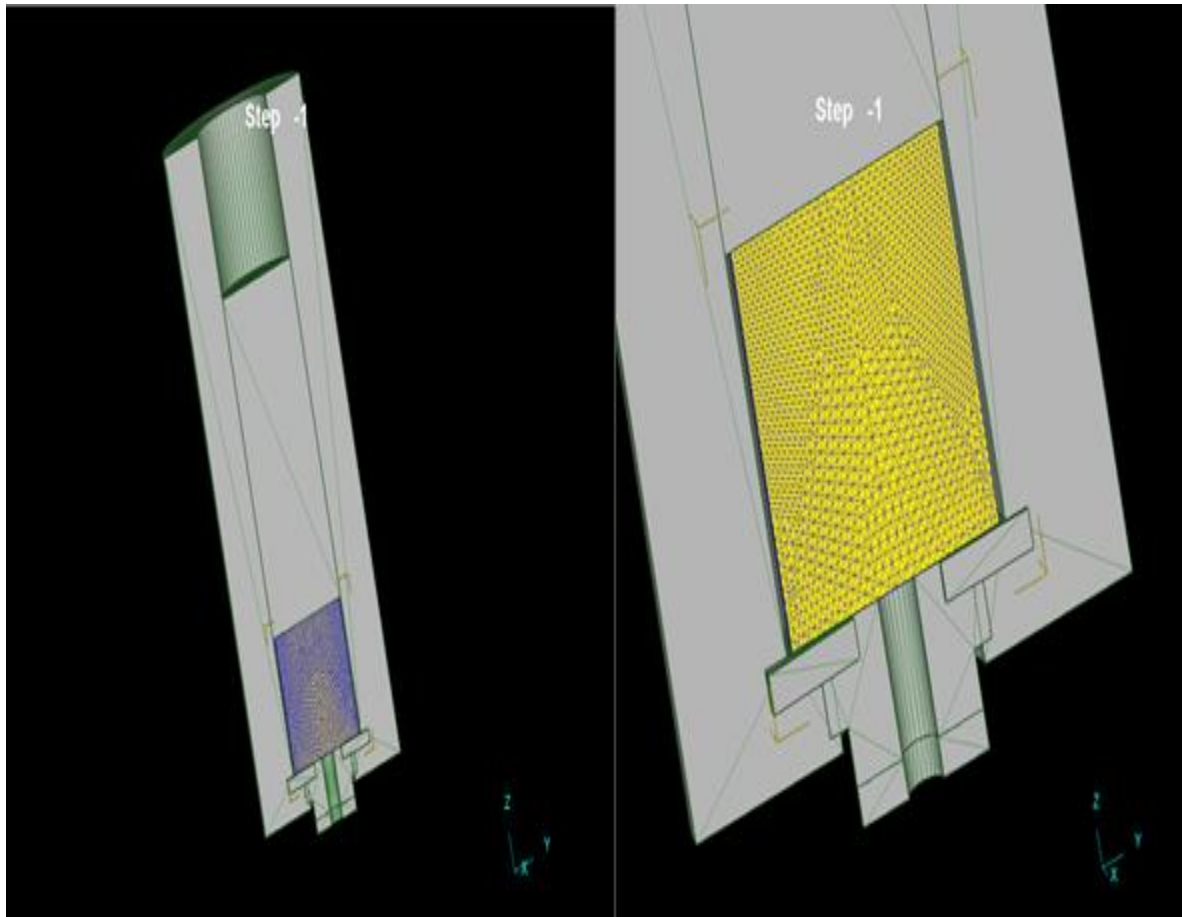
I laboratorietesten plasseres en bunnmatrise inn i kontainerenden, som skal fungere som et universalstøpsel for innsatsene. Siden dette ikke har vesentlig betydning i forhold til materialflyt, er bunnmatrisen slått sammen med kontaineren, se figur 3.3. Modellen består av fire individuelle deler; kontainer, stempel samt to deler som til sammen utgjør innsatsen. Som Valberg og Malvik henviste til i artikkelen, «Metal flow in die channels of extrusion», oppstår det glidning i nederste del av innsatsen. Nederste delen av innsatsen ble derfor konstruert slik at det er mulig å skille kontaktvilkårene til bæreveggene i ulike deler av innsatsen. Modellene er snittet opp i y-retning, det vil si at y-retningen kommer ut av den snittede flaten. Oppdeling i halv-modeller er gunstig da Deform benytter seg av symmetri, og samtlige komponenter er symmetriske om symmetriaksene. Ved halv-modeller vil simuleringene gå raskere, samt at det er enklere å analysere resultatene til slutt da det ikke er behov for å kutte tverrsnitt av delene.



**Figur 3.5:** Figuren viser de fire ulike delene som utgjør verktøyet. Fv. Kontainer, stempel, innsats, glidedel av innsats. Verktøyet er snittet i y-retning for raskere iterasjoner, og enkel visuell fremstilling

### 3.3.2 SAMMENSETTING AV MODELL I DEFORM 3D

Geometriene som ble konstruert i NX, importeres i DEFORM-3D ver. 10.1.2, og settes sammen som vist på figur 3.4. For å unngå at noder faller ut gjennom verktøydelen, genereres bolten direkte i DEFORM. Geometrien til emnet er litt mindre enn kontainerdimensjonene slik at emnet fyller kontaineren i starten av ekstrusjonen.

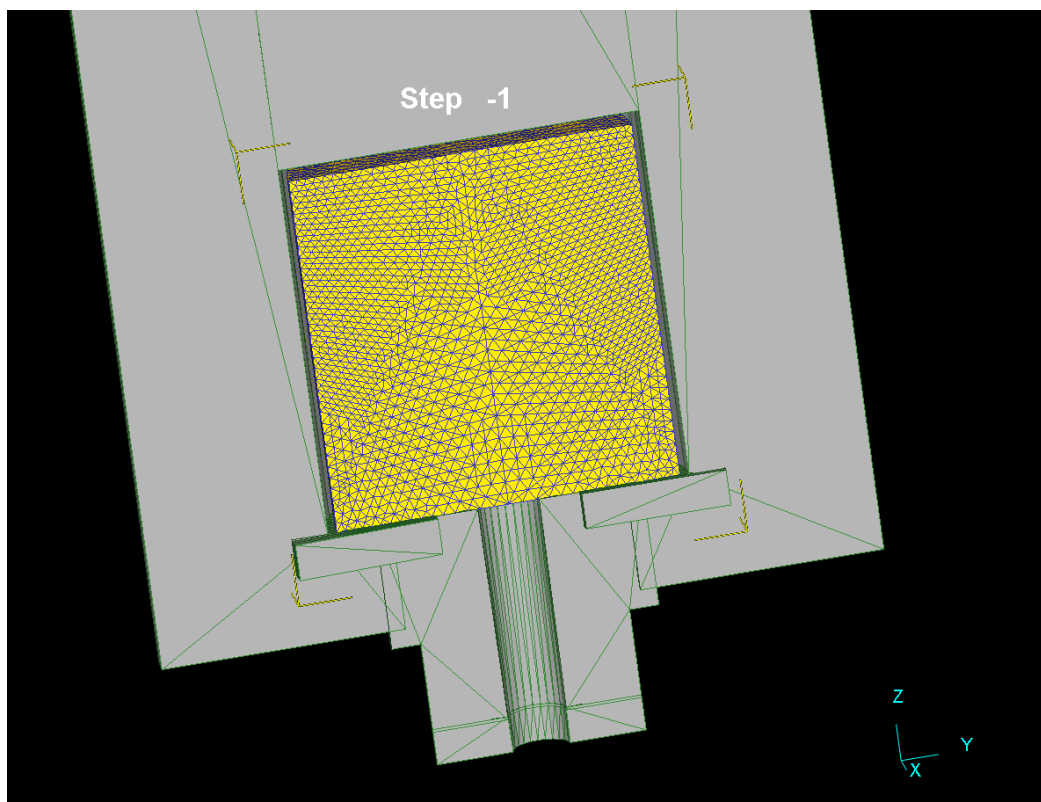


**Figur 3.6:** Oppsettet av verktøy i DEFORM. Til venstre oversikt over hele modellen, til høyre en forstørret modell.

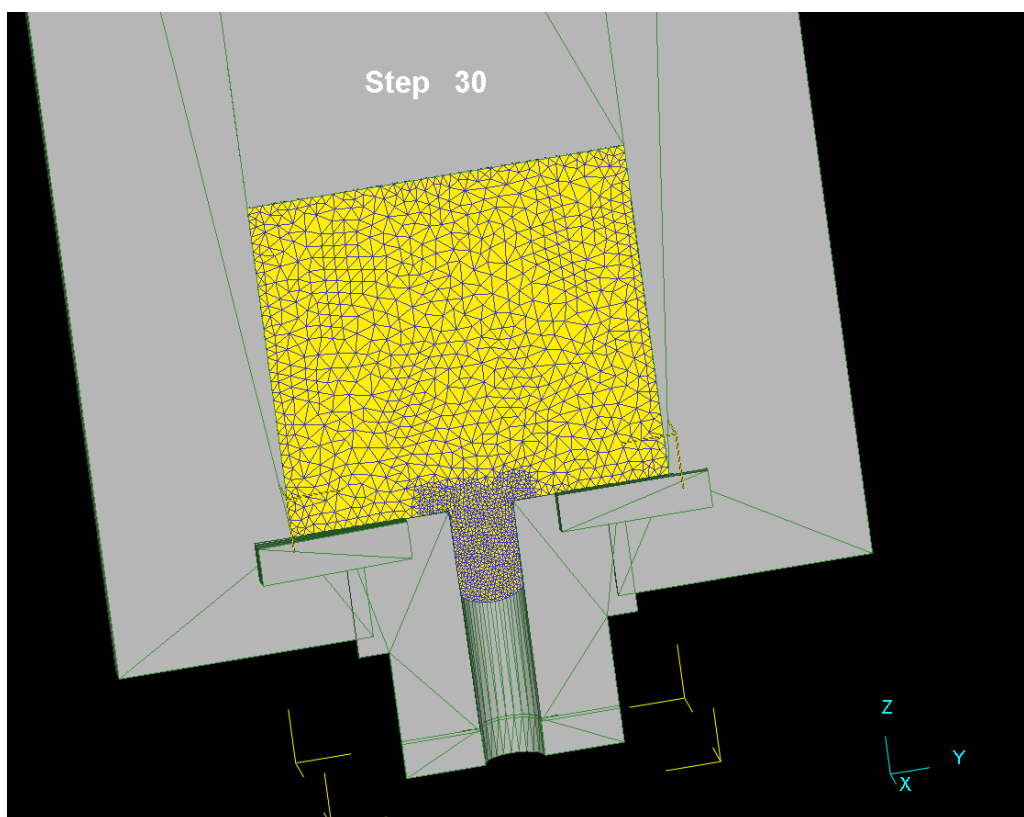
### 3.3.3 EKSTRUDERINGSBETINGELSER

Ekstrusjonstesten inneholder fire ulike innsatser, som forklart og vist i 3.1. De to legeringene som benyttes er AA6005 og AA7108. Siden gode flytedata til AA6082 ikke eksisterer i DEFORMs database, er det valgt en annen legering i AA6XXX serien som har lignende egenskaper. Denne legeringen er manuelt lagt inn i DEFORM av veileder, og har gode flytedata da den ved flere anledninger er testet ved NTNU. Verktøymaterialet som benyttes er stållegeringen AISI-H-13. Med andre legeringer enn laboratorietestene vil man ikke få eksakte sammenlignbare resultater hva angår trykk- og skjærspenninger men med man burde kunne se liknende flytoppførsel på legeringen. Testen kjøres i første omgang noen steg slik at alle tomrom er fylt uten friksjon. Deretter velges det  $m=1$  som skjærfriksjon i den gjenværende ekstruderingen.

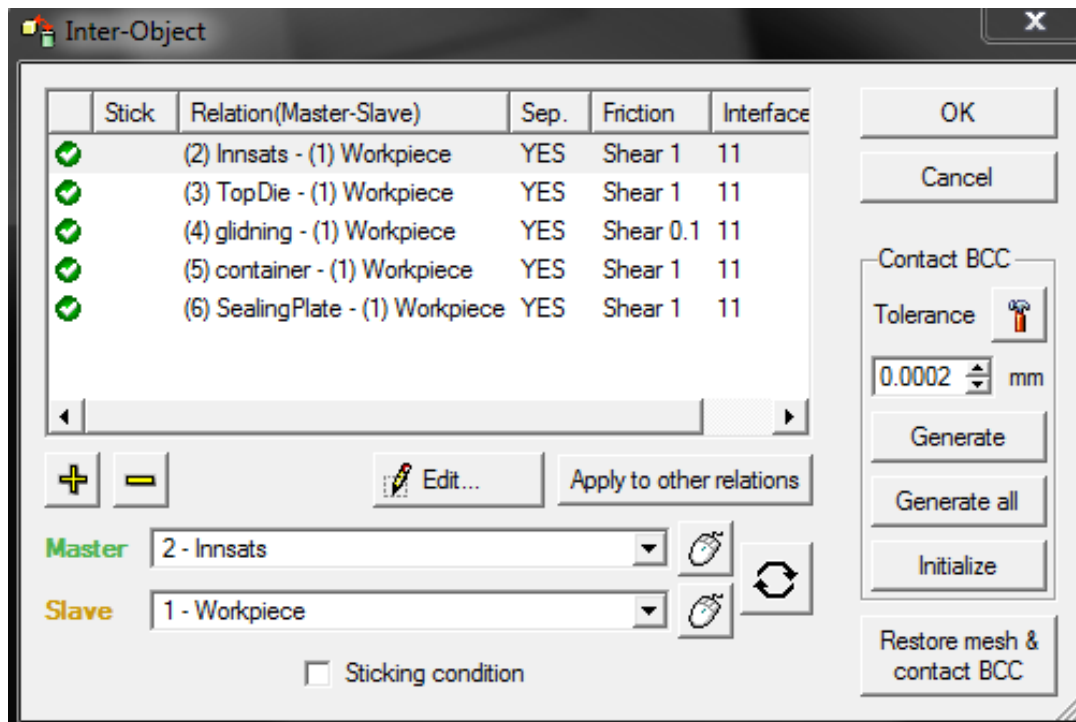




**Figur 3.7:** Første del av prosessen kjøres uten friksjon. Etter tomrom er fylt settes skjærfriksjonen til  $m=1$



**Figur 3.8:** Etter fylling langs kanteveggen, endres kontaktbetingelsene.



Figur 3.9: Kontaktbetingelsene settes til 1, med unntak av glidestykket nederst på innsatsen.

Forsøk nr.	Bolt nr.	Legering	Bæreflate(mm)
1	1	AA6082	50
2	2	AA7075	20
3	3	AA7075	50
4	4	AA7075	70

Tabell 3.4: Oversikt over de varierende ekstruderingsbetingelsene

---

<b>Stempelhastighet</b>	<b>5ms<sup>-1</sup></b>
<b>Bolt.temp</b>	<b>515<sup>0</sup>C</b>
<b>Konteinertemp</b>	<b>450<sup>0</sup>C</b>
<b>Verktøymateriale</b>	<b>AISI-H-13</b>
<b>Innsatstemperatur</b>	<b>200<sup>0</sup>C</b>
<b>Kontainermesh</b>	<b>30000</b>
<b>Emnesh</b>	<b>50000</b>
<b>Innsatmesh</b>	<b>25000</b>
<b>Glidestykkemesh</b>	<b>20000</b>
<b>Varmeoverføringstall</b>	<b>11</b>

---

**Tabell 3.5:**Oversikt over de faste ekstruderingsbetingelsene



## 4 TODIMENSJONAL EKSTRUDERINGSSVEISING

### 4.1 FEM-MODELL AV TODIMENSJONAL EKSTRUDEINGSSVEISING

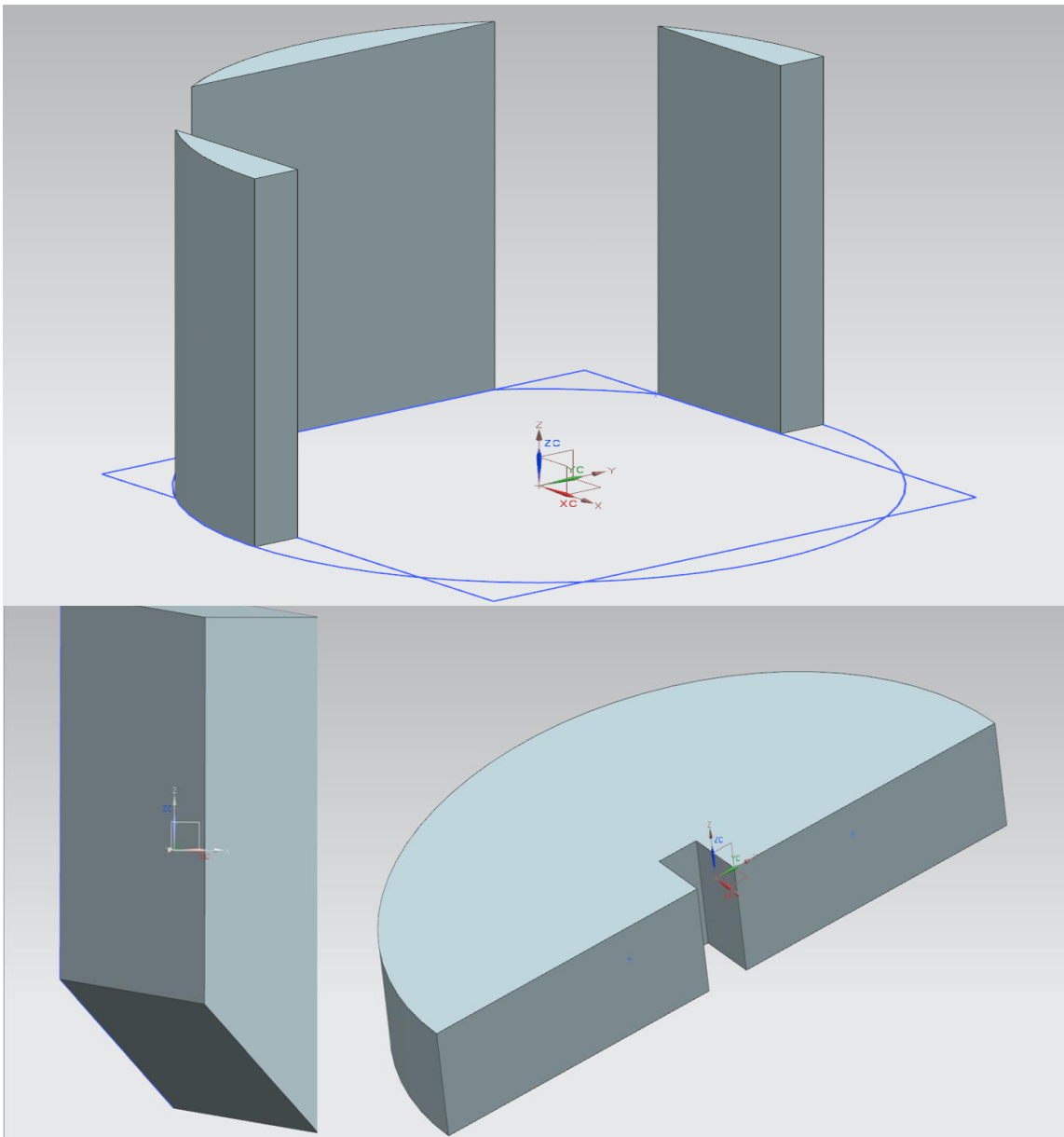
I arbeid gjennomført i prosjektoppgaven var deler av oppgaven å se på en foroverekstrudering med innsatt bro. Dette er i fagterminologien kalt for en todimensjonal ekstruderingsssveising hvor bolten først blir splittet av broen før den sammenføres og presses ut gjennom bunnmatrisen. I tidligere gjennomført prosjektoppgave var det ønskelig å se på hvilke effekter en slik prosess fikk dersom broen ble satt på tvers av ekstrudatet, som var en enkel skinne. Den tiden som var avsatt var ikke tilstrekkelig til å gjennomføre grundige analyser. Modellen ble ferdig konstruert og forsøkt ekstrudert i DEFORM men dessverre uten hell. Ekstruderingen ville ikke starte.

I denne oppgaven er det gjort et forsøk på å forenkle den originale modellen, ved å neglisjere noen av delene som skapte vanskeligheter i prosjektoppgaven, samt optimalisere formen på matrise og bro. I tidligere modell ble det for kort avstand mellom broen i matrisen og ekstrusjonsåpningen, dette er da endret på slik at materialet får tid til å flyte, sveises sammen før den presses gjennom åpningen.

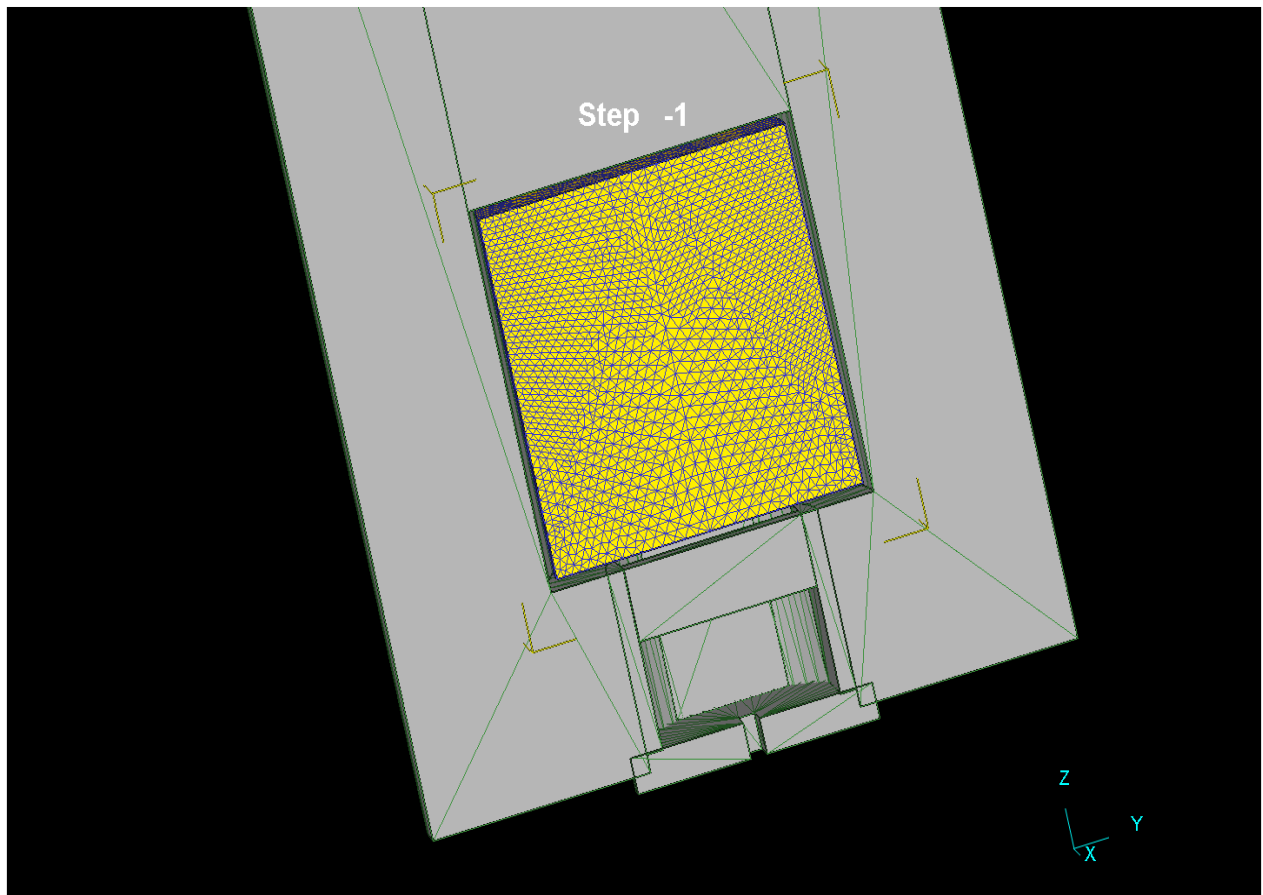
#### 4.1.1 MODELLDESIGN

Modellen består av 6 komponenter, hvor matrisen er implementert i konteineren. Bakgrunn er at ekstruderingen ikke kunne gjennomføres i prosjektoppgaven på grunn av for høy kompleksitet på geometri. I løpet av den tidligere oppgaven ble SFTC kontaktet (produsent av programvaren DEFORM) angående feilkilder for ekstrusjonen, men svaret kom for sent til å være med i oppgaven da. I ettertid er det mottatt svar om at det trolig er avstanden mellom bro og utgang som gjør at modellen ikke kunne ferdigekstruderes. Etter suksess med oppbygging av modell i del 1 av denne oppgaven, er det forsøkt å gjenbruke så mye som mulig av design, dog tilpasset den nye modellen. Som tidligere er modellen snittet opp i y-retning slik at det er enklere å visualisere materialflyten. I tillegg til stempel og konteiner som vist i figur 3.3, består modellen av en innsats, en bro samt et utgangsstykke. Se figur 4.1.

Innsatsen benyttet i stangekstruderingen er rund av geometri. For å gjenbruke så mye av geometrien som mulig er det konstruert en overgang fra sirkulære flater til rette flater. Det gjør det mulig å sette inn broen i innsatsen. Blant forenklingene som er gjort er at det ikke eksisterer noen spor å sette broen inn i. den er «limt» fast i veggen og definert i DEFORM at den er ubevegelig. Komponentene til modellen er, som i foregående test, konstruert i Siemens NX, deretter eksportert som STL-fil, før den til slutt importeres og defineres i Deform. Figur 4.2 viser en oversikt over modellen før ekstrudering i Deform.



**Figur 4.1:** i tillegg til konteiner og stempel, inneholder den andre simuleringmodellen, en bro innsats fra sirkel til kvadrat, samt et endestykke. Modellen er snittet i ZY-planet.



Figur 4.2: Slik ser modellen ut før ekstrudering i programvare Deform

#### 4.1.2 EKSTRUDERINGSBETINGELSER

Under prosjektoppgaven ble det benyttet en aluminiumslegering i AL3XXX-serien, det mistenkes at legeringene i denne serien er for sprø til å kunne gå gjennom så store deformasjoner som det kreves i en sveiseekstrudering med  $90^0$  rotasjon. Det er derfor valgt den sterkere AL7XXX-serien. Da det allerede eksisterer gode flytdata på legering AA7108 etter laborietestene i del 1 av denne oppgaven, er det valgt å bruke denne som legering. Øvrige ekstruderingsbetingelser kan observeres i tabell 4.1. Som andre modeller kjøres de første stegene, frem til fylling av første hulrom, uten friksjon. Deretter settes friksjonstallet,  $m$ , til verdien 1. Varmeovergangstallet er valgt til 11.

<b>Verktøymateriale</b>	<b>AISI-H13</b>
<b>Bolt temp.</b>	<b>515<sup>0</sup></b>
<b>Konteinertemp.</b>	<b>450<sup>0</sup></b>
<b>Øvrige verktøytemp.</b>	<b>200<sup>0</sup></b>
<b>Stempelhastighet</b>	<b>5 ms<sup>-1</sup></b>
<b>Varmeoverføringstall</b>	<b>11</b>
<b>Boltmateriale</b>	<b>AL7108</b>

**Tabell 4.1:** Ekstruderingsbetingelser for todimensjonal sveiseekstrudering



## 5 RESULTATER

### 5.1 LABFORSØK, KONTAKTBETINGELSER MOT BÆREFLATE

#### 5.1.1 SKJÆRSPENNINGER

I forsøk nummer 1 og 3 oppsto det et spesielt mønster. Den ekstruderte stangen var vekselvis matt og blank som vanligvis følger av støtvis ekstrudering. Fenomenet kalles bamboosing etter sin similaritet med bambusstangens mønster. Som analyseloggen viser, skjedde dette for begge de ulike legeringene.

Test nr. 4 kunne ikke gjennomføres da pressen stoppet etter ett stort støt. Presskreftene gikk over maksgrensen på 7000kN. Ved redusering av bolttemperatur er det likevel mulig å beregne skjærspenningene. (rødt felt i tabell)

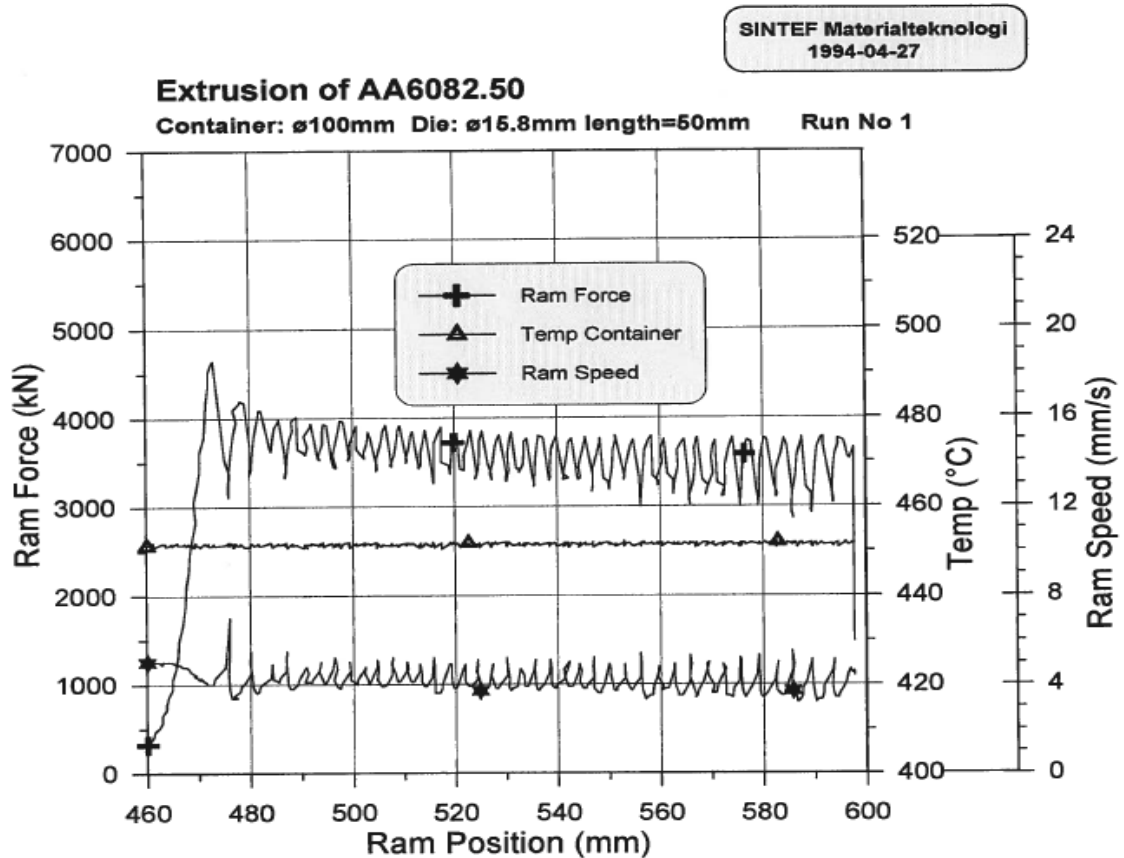
Figur 4.1 viser ekstrudatet av test nr.1. Stangen viser soner der stangen har klebet mot bæreflatten og fått vekselvis matte og røye soner. Presskraften for hver prosess ble lest av analyseloggen for ekstruderingen, som sammen med likning (15) og (16) gir beregningsdata for skjærspenninger. Resultatene er satt inn i tabell 5.1. For enkelthetsskyld er kun analyseloggen for testkjøring 1 tatt med. Øvrige testlogger kan undersøkes i Appendiks

Forsøk nr.	Bolt nr.	Legering	Bæreflatelengde [mm]	Presskraft ved 50 mm presslengde [mm]	Maks presskraft [kN]	Skjærspenninger [MPa]
1	1	AA6082.5	50	3590	4641	70.8
2	2	AA7108.5	20	2743	3439	46.9
3	3	AA7108.5	50	3042	4821	72.2
4	4	AA7108.5	70	4469	7068	175.1

Tabell 5.1: Skjærspenninger langs kontainervegg under stangekstrudering



Figur 5.1: Stangekstrusjon med uventet mønster, bamboing.



Figur 5.2: Måledata for forsøk nr. 1

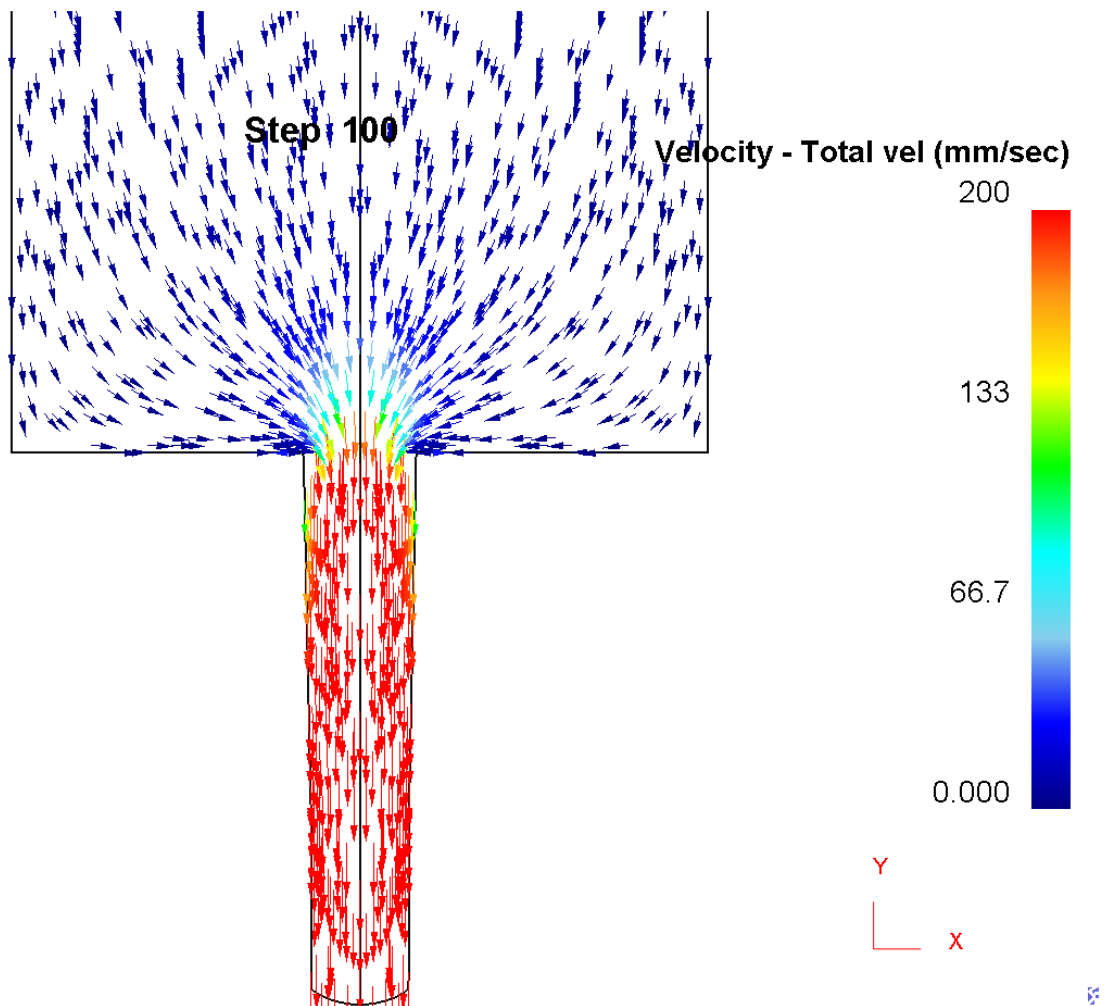
### 5.1.2 GJENNOMSNIITTLIG SKJÆRSPENNING MOT BÆREFLATE

Leser av verdiene for legering AA7108.5 med bæreflate 20 og 50 mm. Velger stempelposisjon 520mm. Ved bruk av likning (17), (18) og (19) blir den gjennomsnittlige skjærspenningen mot bæreflaten 26,8 MPa.

## 5.2 2D-SIMULERING

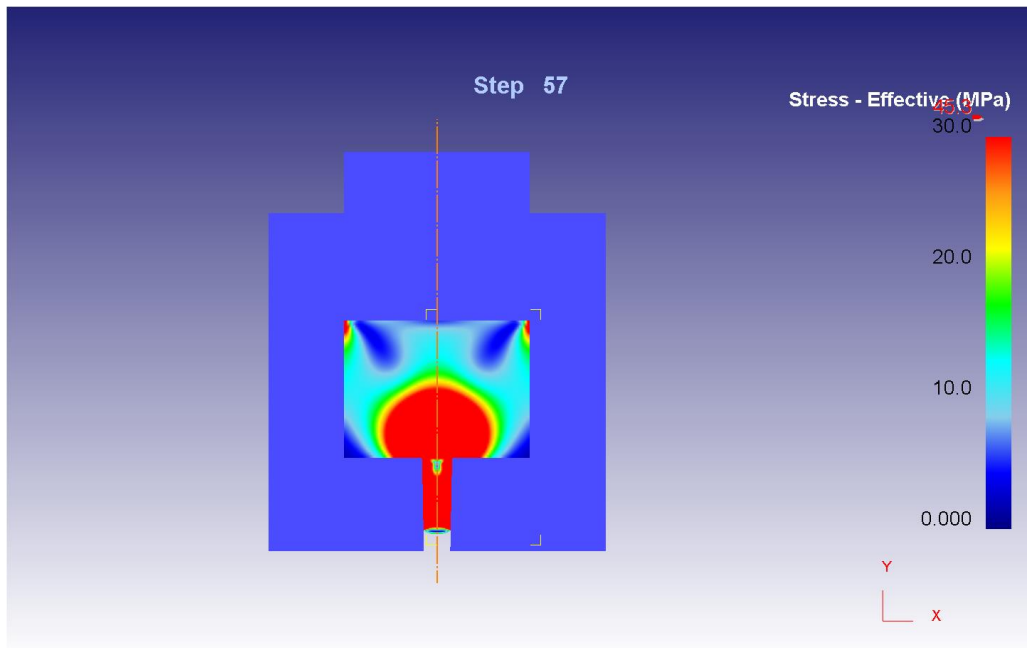
I det innledende 2D-forsøket vil det ikke være mulig å observere de eksakt samme resultatene som i laboratorietestene, men da det er valgt en aksesymmetrisk struktur vil programvaren anta at dette er en rund form.

Hastighetsfeltet gir en oversikt over hvordan materialflyten i modellen fremstår.



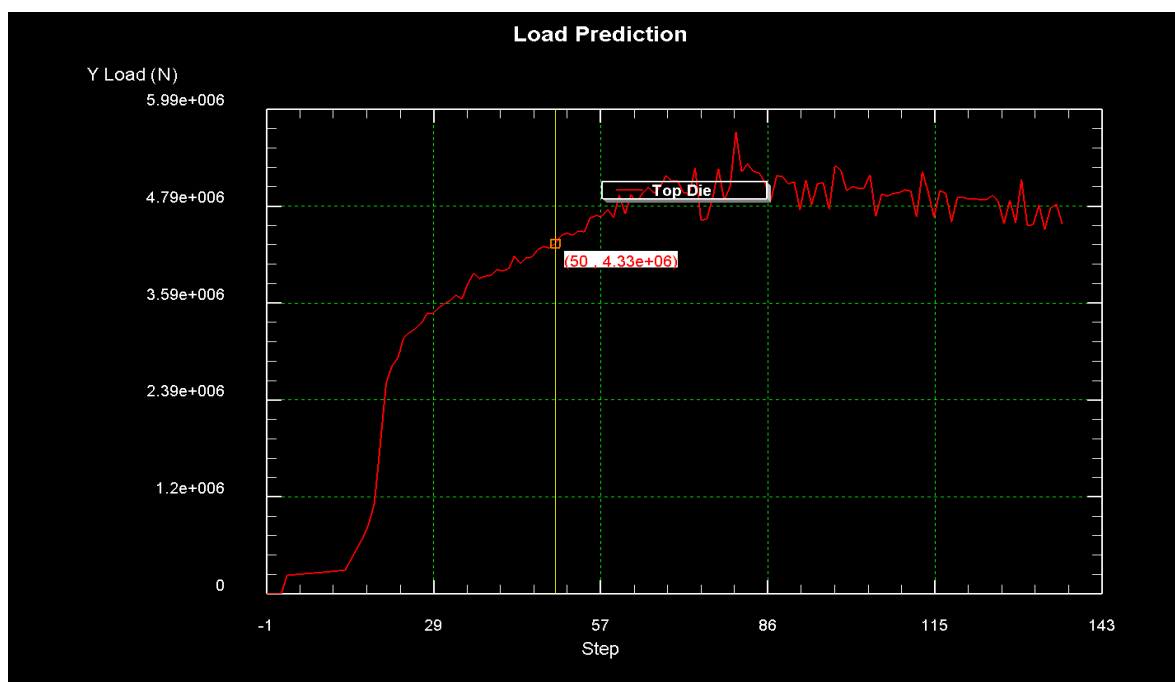
Figur 5.3: Vektorielt hastighetsfelt.

Dødsoner fremkommer i de områdene der hastigheten er lav, eller stillestående. Figur 5.3 er hentet fra ekstruderingen i DEFORM 2D ved steg 100 og det vises tydelige dødsoner nede i hjørnene av containeren. En annen dødzone, dog mye mindre, ligger inn mot midten av bolten ved pressen. Figuren er speilet om symmetriaksen.



Figur 5.4: Effektive skjærspenninger i 2D-modell

Skjærfeltet i forsøkssimuleringen viser som forventet at friksjonen øker frem til ekstrusjonsåpningen samt de forventede dødsonene i hjørnene. Spenningen og trykket øker frem til munningen av ekstrusjonen. Dette kommer av den reduserende bærevæggen som gjør at trykket blir større jo lengre bærevæggen er.



Figur 5.5: Kraftmålinger ved 2D testekstrusjon

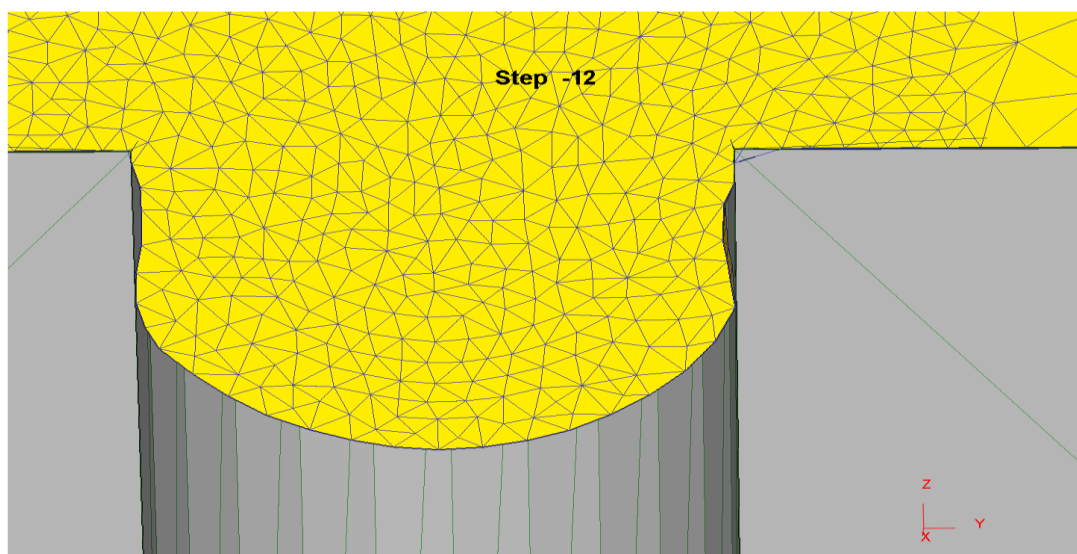
Ved den todimensjonale testen ble det registrert større kraftmålinger enn de aktuelle fra laborietesten. Ved 50mm presslengde er kraftmålingen 4330kN, og maks kraftmåling 5800kN. Benyttelse av likning (20) og (21) gir dette en skjærspenning på 93.6 MPa.

### 5.3 3D-SIMULERING

DEFORMs database inneholder ikke flytdata for legeringene AA6082,5 og AA7108,5 men det er benyttet legeringer i samme serie som har liknende egenskaper. Legeringene som er benyttet er manuelt lagt inn i DEFORM, med navn AA6005 og AA7108, og flytdata er satt inn av veileder. Det er ønskelig at Deformmodellen gir samme struktur og form som laborieforsøkene der modellen kleber mot bæreveggen.

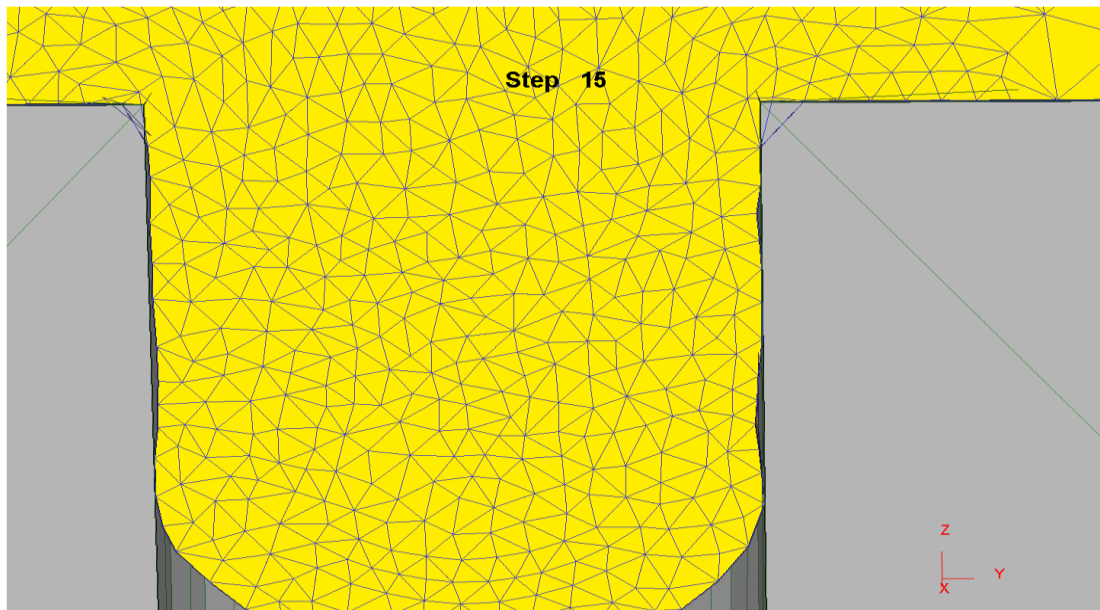
På grunn av meget fint mesh på bolten under ekstrudering, oppstod det problemer med noder som forsvant i åpningene mellom konteiner og innsats, det ble derfor konstruert en virtuell forseglingsplate for å unngå for store tap av masse fra bolten.

Det var ønskelig at bambusmønsteret som oppsto i laborieforsøk nr. 1 og 3 også skulle komme til syne i simuleringsekstrudatet. Som figur 5.6 viser dannes det små hulrom mellom innsatsen og bolten på grunn av den skarpe kanten inn mot bæringsflaten.



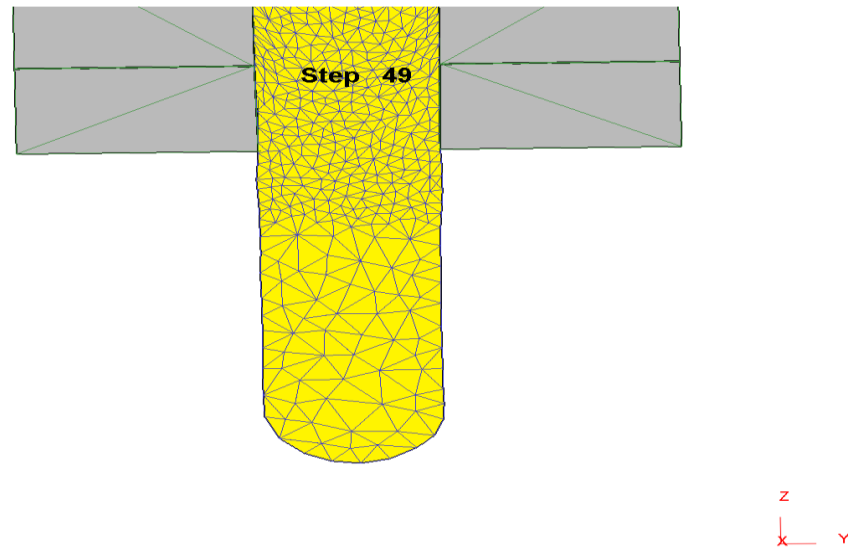
**Figur 5.6:** Hulrom mellom bæreflate og bolt

Hulrom som ble dannet fortsatte å følge langs bæreflaten mot utgangen, og mens bolten beveger seg mot utgangsdelen blir det dannet flere og flere slike hulrom ved inngangen til bæreflaten. Siden bæreflaten har en reduserende struktur øker trykket for hvert steg mot utgangen, hvorav bolten på grunn av ruhet overnevnte hulrom slipes ujevnt langs kanalen, se Figur 5.7



**Figur 5.7:** Dannelse av flere hulrom gjennom ekstruderingen

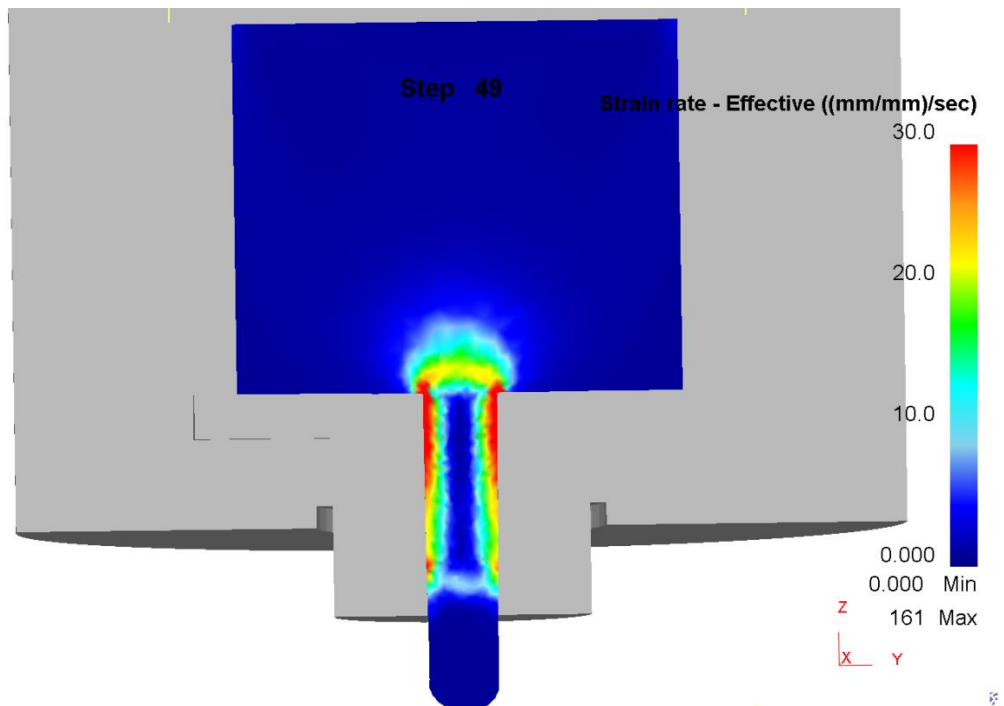
Ved utgangen oppstår det med ujevne mellomrom en ekspansjon av bolten i det den treffer «vanlig» luft. Gjennom videre analyse, og kjøring av flere steg, fremkommer det et mønster med similaritet i laboratorietest nr. 1.



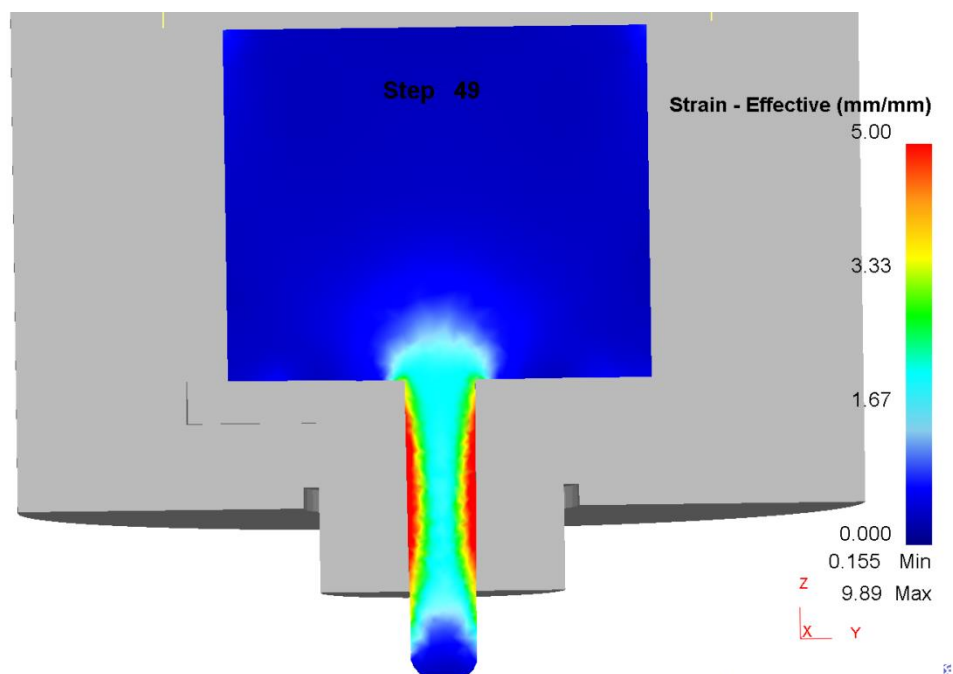
**Figur 5.8:** Ekspansjon av bolt ved ujevne mellomrom fører til en bambusstruktur av ekstrudatet

Presskrefter og skjærkrefter er hentet ut fra DEFORMs postprocessor og ført inn i tabell 5.1. Siden testundersøkelse 1 og 3 var identiske, med unntak av legeringen er de begge satt inn i et kraftdiagram for sammenlikning. Figur 5.9 Det observeres at begge legeringene ekstruderes med ujevn presskraft etter fylling, og resultatet ligger under kraftmålingene fra laboratorieundersøkelsene.





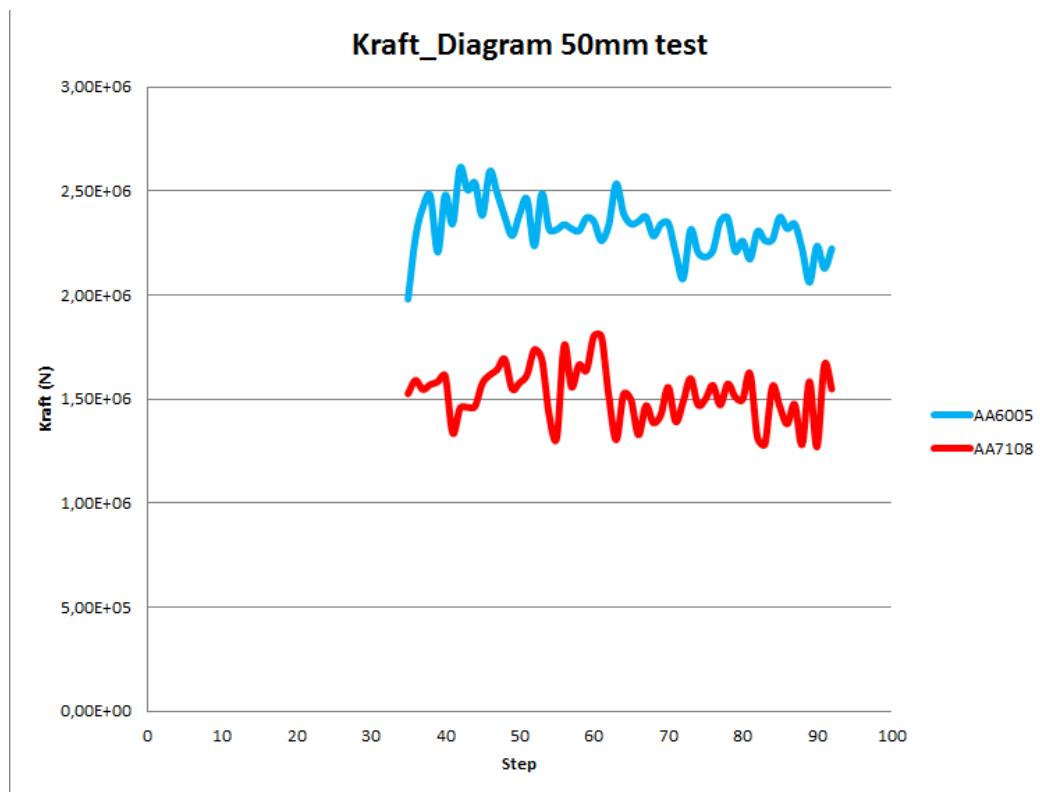
Figur 5.9: Tøyningshastighet under steg 49.



Figur 5.10: Akkumulert tøyningshastighet, figuren viser fra steg 49.

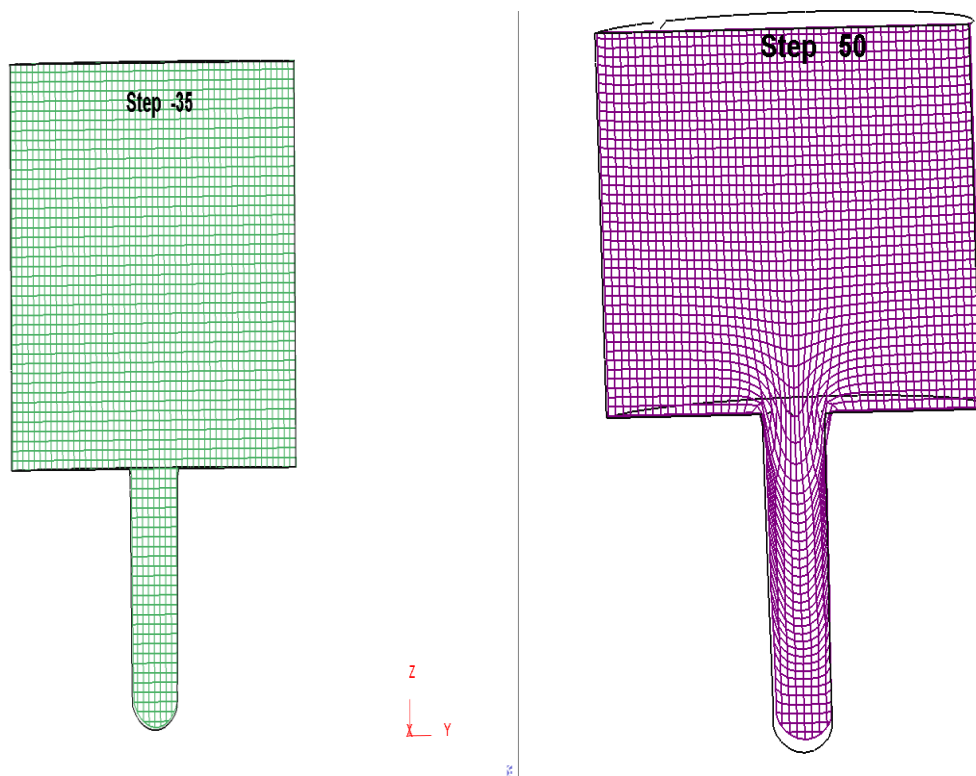
Ved Forsøk nr.	Bolt nr.	Legering	Bæreflatelengde [mm]	Presskraft ved 50 mm presslengde [kN]	Maks presskraft [kN]	Skjærspenninger [MPa]
1	1	AA6005	50	2340	3450	74.8
2	2	AA7108	20	1950	2120	11.5
3	3	AA7108	50	1580	1800	14.8
4	4	AA7108	70	2210	2550	29.7

Tabell 5.2: Simulerte skjærspenninger



Figur 5.11: Presskrefter for de ulike legeringene i test 1 og 3

Ved benyttelse av nettverk i post-prosessoren er det mulig å se på materialflyten i ekstruderingen. Nettverksfiguren viser at bolten i stor grad henger igjen langs konteinerveggen mens den midtre delen ekstruderes i høyere hastighet. Nettverket er satt inn og prosessert etter fylling av kanal for å fremheve den høye friksjonen langs bæreveggen.

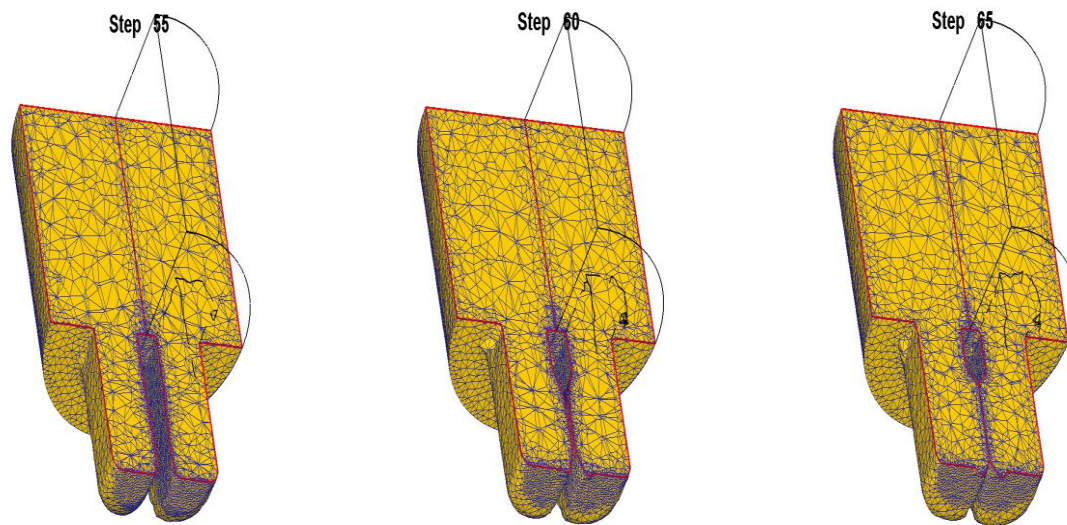


**Figur 5.12:** Nettverk over materialflyten. Friksjon fører til klebing mot bærekanalen. Fra vestre ser vi nettverket før start, til høyre etter 15 steg ekstrudering.

Figurene 5.9 og 5.10 viser på samme måte som nettverket, at høy friksjon oppstår langs den reduserende bæreveggen. Figur 5.9 viser at under steg 49 går midtre del av bolten rett gjennom kanalen. Dette kalles pluggflyt, der randsjiktet går i skjær/ holdes igjen og midtre del av bolten går rett gjennom uten deformasjon.

#### 5.4 TODIMENSJONAL EKSTRUDEINGSSVEISING

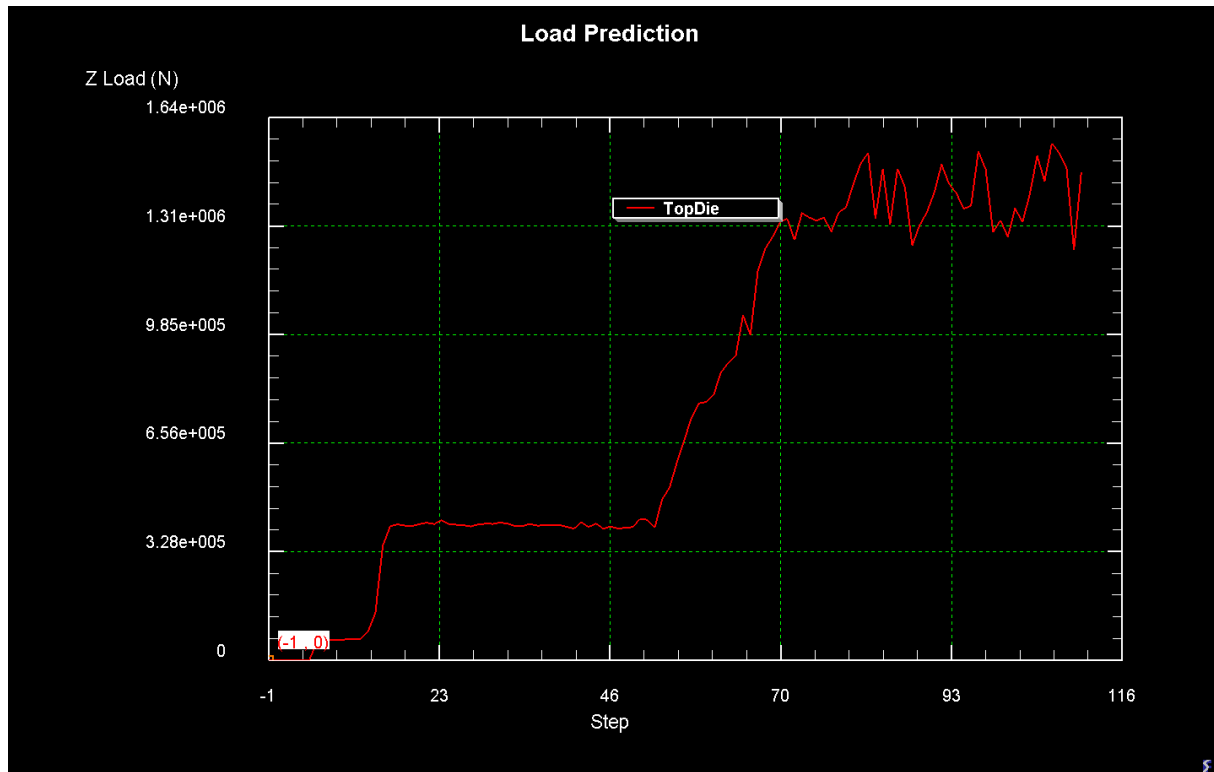
I prosjektoppgaven kunne ikke ekstruderingen gjennomføres på grunn av for kort distanse mellom bro og endestykke, med den forbedrede modellen er det nå mulig å gjennomføre en ekstrudering. Figur 5.13 viser at første del av ekstruderingen splittes materialet av broen, mens når rommet mellom bro og utgang begynner å oppnå fylling, vil materialkanalene presses mot hverandre og sveis oppstår.



**Figur 5.13:** Todimensjonal sveiseekstrudering ekstrudert med  $90^0$  rotasjon mellom bro og utgang. Broen er usynliggjort for å fremheve materialflyten i denne figuren.

Ved lengre avstand mellom utgangspartiet og broen, som i figur 5.13 er fjernet, oppstår stabil flyt. Dette gjør det mulig å sveiseekstrudere med  $90^0$  rotasjon. Av figuren observeres det at maksimale skjærspenninger oppstår langs grensen til broen, samt der hvor skinna skal formes. Likevel vises det at noen noder slipper gjennom inn mot innsatsstykket, som fører til ujevn form der broen skal være. Disse nodene anses ikke som relevant for materialflyten.

Selv om bærevæggen er kort og parallell (optimalisert), kreves det store krefter for å gjennomføre en ekstrudering der materialet gjennomgår deformasjoner av dette kaliberet. Som figur 5.10 viser er maksimal presskraft når materialet entrer bærevæggen til utgangspartiet. Flere måledata er mulig å undersøke i Appendiks.

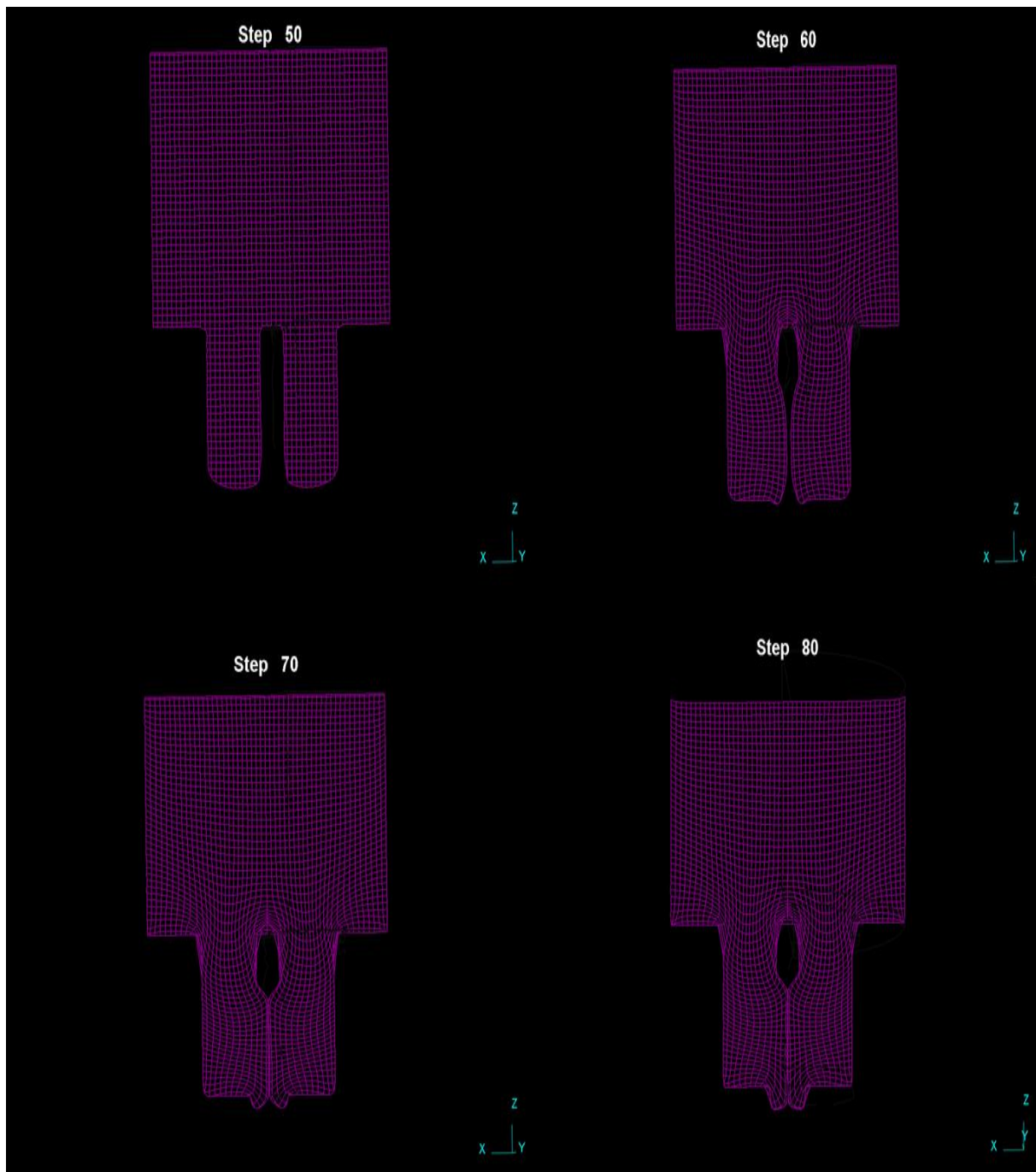


Figur 5.14: Kraftmålinger ved ekstrusjon av todimensjonal sveiseekstrudering.

Ved Forsøk nr.	Bolt nr.	Legering	Bæreflatelengde [mm]	Presskraft ved 50 mm presslengde [kN]	Maks presskraft [kN]	Skjærspenninger [MPa]
5	5	AL7108	10	397	1540	61.6

Tabell 5.3: Simulerte skjærspenninger

Figur 5.15 viser at hvordan materialet beveger seg under fylling av kammer mellom bro og utgang. Det observeres at det ikke oppstår samme type klebing langs veggen på denne modellen som det gjorde i stangeekstruderingen.



**Figur 5.15:** Nettverk som viser materialflyten gjennom fylling og ekstrudering.

## 6 OPPSUMMERING OG DISKUSJON

### 6.1 LABORATORIETESTER

I testforsøk nr. 1 og nr. 3 foregikk ekstruderingen støtvis, dette til tross for at ekstruderingspressen var innstilt til jevnt trykk, hvilket var et uforventet resultat. Den ekstruderte stangen fikk et jevnt mønster, figur 5.1, der de mørke delene sannsynligvis skyldes ujevn klebing mot bæreveggen. Fenomenet kalles bamboosing etter sin similaritet med bambusstrangen og kan skyldes at bæreflaten er for stor i forhold til friksjonen. I testforsøk nr. 2 ble bæreflaten redusert til 20mm, og den støtvide ekstruderingen og bambusmønsteret forsvant på den ekstruderte stangen.

I forsøk nr. 4 ville ikke ekstruderingen la seg gjennomføre, og etter ett stort støt stoppet hele ekstruderingspressen. I dette forsøket var også bæreflaten lengre enn ved forsøk 1 og 3 hvilket underbygger teorien om at bæreflatelengde var for stor i forholdt til friksjonskraften. Presskraften overgikk maks grense på 7000kN, hvilket trolig kommer av at trykket ved åpningen ble for høyt. Senere ble temperaturen på bolten senket fra 515<sup>0</sup>C hvilket medførte at ekstruderingen kunne gjennomføres.

Materialflyten ved ekstrudering er avhengig av materialet, friksjon i grensesjiktet mot bæreflaten og matrisens design. Når det er friksjon både i grensesjiktet mellom bolt og verktøy, samt mellom bolt og kontainervegg, det vil si at både  $\tau_C$  og  $\tau_D$ , eksisterer vises det at overflaten av ekstrudatet blir mer deformert enn senteret på grunn av skjærspenningene som dannes ved friksjon.

Det er likevel vanskelig å forklare hvorfor bambusmønsteret kommer så tydelig frem og at pressen ekstruderer støtvis selv etter fylling. En mulighet for dette fenomenet er at det dannes hulrom med luft mellom bærevegg og bolt som igjen fører til at enkelte områder ikke har friksjon. Dette kommer trolig av at vinkelen mellom kontainer og innsats er så skarp at det er

områder der det ikke er kontakt mellom bolt og bærevegg. Boltene vil da gli friksjonsfritt et stykke før de kontakter bæreveggen, og igjen krever mer presskraft for å ekstrudere. I en laboratorietest kan ikke materialflyt som dette observeres på grunn av geometri og temperatur.

## 6.2 DATASIMULERING

### 6.2.1 INNLEDENDE TESTING

Den innledende testen ble konstruert som 2-dimensjonal variant av stangeekstrudering med reduserende bærevegg. Selv om dette bare vises i to dimensjoner er det valgt aksesymmetri slik at DEFORM tar høyde at det er en stang som skal presses ut. Vi ser av figur 5.3 og 5.4 at det er dødsoner langs bæreveggen. Som figur 5.5 viser, kreves det større presskraft under denne ekstrusjonen enn hva som er tilfellet både under laboratorieundersøkelse og 3D simulering. Det kommer trolig av at legeringen som ble brukt, AA7075, har andre egenskaper enn hva som er brukt videre i oppgaven, AA7108. Modellene som videre er brukt inneholder egendefinerte flytdata, men disse var ikke mulig å benytte i 2D utgaven. Maksimal presskraft for 2D ekstruderingen viste en forskjell fra laboratorieforsøk på hele 1152kN, som tilsvarer en ekstra kraft på 117 tonn.

### 6.2.2 3D-SIMULERINGER FOR STANGEKSTRUDERING

I simuleringsforsøk nr.1 ble det gjort flere gjennomkjøringer for å gjenskape strukturen til laboratorieforsøk 1. Som figurene 5.6-5.8 viser, oppstår det luftlommer under fylling på grunn av den skarpe vinkelen i overgangen mellom kontainerbunn og bærevegg. Dette fører til ulik friksjon langs bærevegg slik at selv om stampelet har jevnt press, vil den oppleve vekselvis lugging og glidning under fyllingsprosessen. Det er trolig dette som fører til den ujevne pressgrafene som oppstår både i laboratorie- og simuleringsforsøket. En annen årsak til ujevn kraft i stampelet kan være at ved dannelsen av store lommer langs bærekanalen, vil det være mer oksygen i dette området, som igjen gir større tykkere klebende lag og større friksjon.

Videre i ekstruderingen fører den reduserende bærekanalen til stort trykk mot slutten av ekstruderingen slik at materialet ekspanderer rett etter det går ut av innsatsen. Det antas at det



er denne type hulrom langs bæreveggen som fører til bambuseffekten. I DEFORM var det ikke mulig å finne denne effekten tydelig etter fylling, med unntak av enkelte ganger da stangen ekspanderte like utenfor åpningen. Årsak til at en slik bambuseffekt ikke kom tydelig til syne er mest sannsynlig at under prosessering må det settes en fast friksjon mens programvaren beregner numerisk. I virkeligheten varierer friksjonen hele tiden på bakgrunn av hulrom og tynne belegg i bærekanalen. En løsning på dette kunne ha vært å lage et virtuelt stempel som dytter med jevne mellomrom på bolten i horisontalplanet. Bolten vil da tvinges vekk fra bæreveggen og oppleve områder der friksjonen varierer. På grunn av tidsbegrensingen på denne oppgaven ble ikke dette gjennomført.

I de videre testforsøkene ble det brukt en annen legering, AA7108. Testforsøk 2 hadde en mye kortere bærevegg enn test 1,3 og 4. Også denne testen viste små hulrom mellom bærevegg og bolt under fylling, dog i mye mindre grad enn de andre testene. Dette gir utslag i kraftmålingene for testen som varierer mellom hvert steg. En forskjell derimot er at det ikke er noen områder der bolten ekspanderer i utgangen. Dette skyldes trolig at det ikke dannes så høyt trykk da bæreveggen er kort.

Et overraskende resultat for samtlige simuleringer med unntak av 2D testen var at det er store avvik mellom laboreimålte presskrefter og simulerte presskrefter. For alle simuleringsforsøk gjort i DEFORM kreves det mye mindre kraft for å presse ut stangen. Det virker som at flytdataene til materialet er mer viskøse og flytende enn hva som er realiteten. Dette fører igjen til at den brukte flere hundre tonn mindre kraft enn hva som var forventet. Den største forskjellen mellom simulering og laborieforsøk var i test nr. 4, der i laboriet bolten måtte redusere temperatur for å kunne komme innenfor pressens kapasitet på 800MN, og endte på 7068kN, viste simuleringen bare 2550kN. Denne forskjellen er for stor til å kunne neglisjeres og kan bare forklares ved feil i modell, simulering eller flytdata.

### 6.2.3 3D-SIMULERING FOR TODIMENSJONAL SVEISEEKSTRUDERING

Modellen som ikke kunne gjennomføres i undertegnedes prosjektoppgave fungerte tilfredsstillende med de forenklingene som ble foreslått fra produsenten av DEFORM. På

grunn av den store deformasjonen samt tverrsveising trenger programvaren avstand mellom sveisebro og bunnmatrise for å rekke å sveise materialet sammen før det presses ut matriseåpningen. Som figur 5.14 viser, er det to signifikante krafthopp i ekstruderingen. Den første oppstår når bolten presses mot sveisebroen. Deretter øker presskraften delvis lineært frem til hulrommet mellom bro og utgang er fylt og sveis er etablert. Etter fylling av rommet mellom bro og matrise kreves det en stor kraftøkning da reduksjonsraten fra bolt til ekstrudert skinne er så stor. Forholdet mellom første pressnivå og andre pressnivå virker å være naturlig sett i lys av de andre simuleringene gjort i denne oppgaven. Derimot ser vi samme tendens på kurven som de andre ekstruderingsene der AA7108 serien er brukt, med liten registrert presskraft.

Det er ikke gjennomført noen laboratorieundersøkelser for å sammenlikne resultatene, og det kan tenkes at en årsak for lav presskraft er at bæreveggen er optimal, parallell, og svært kort. Det vil derfor ikke oppstå stort skjær i randsjiktet som det gjør i de andre simuleringene der bærekanalen er lengre og reduserende. Nettverksfiguren av sveiseekstruderingen viser at til tross for at det er satt til klebende forhold og høy friksjon mellom bolt og verktøysdeler glir materialet lettere gjennom ekstrusjonen. Da materialet glir lettere vil presskraften være lavere.

## 7 KONKLUSJON

Hensikten med denne oppgaven var å undersøke hva som forårsaket bambuseffekten for noen av de tidligere laboratorieeksperimentene samt redegjøre for hva som har blitt gjort i underveis i eksperimenter ved NTNU. I henhold til oppgaveformuleringen, er det i denne rapporten omtalt tidligere eksperimentelle forsøk samt analyse av FE-simuleringer.

### 7.1 AVSLUTTENDE BEMERKNINGER

Arbeidet har i hovedsak bestått av å undersøke mulige årsaker til bambusmønster ved ekstrudering, samt å gjenskape tidligere utførte laboratorietester ved simuleringer. Fra dette arbeidet kan følgende konklusjoner bli satt opp:

- Ved laboratorieundersøkelsene fikk 2 av 4 ekstruderingsprosesser et bambusmønster, noe som ikke kan være på bakgrunn av materiale, da to ulike legeringer med ulike egenskaper dannet samme effekt.
- Gjennom første del av simuleringen, oppstår det hulrom mellom bærevegg og bolt, som igjen fører til ulik kontakt og ujevn presskraft fra stempelet.
- Etter flere forsøk var det ikke mulig å observere tydelige bambusmønstre i simuleringen slik som de fremkom i laboratorietestene. Dette kommer av at friksjonen er konstant i simuleringene. I virkeligheten varierer den.
- Dersom en todimensjonal sveiseekstrudering med 90-graders vinkelendring skal gjennomføres må det være nok avstand mellom bro og utgang til at materialflyten får fylt hulrom mellom delene.

## 7.2 VIDERE ARBEID

Flere problemer i denne oppgaven krever analyser med dypere detaljer enn det som er tatt med i denne rapporten for å videreføre utviklingen innenfor feltet for aluminiumsekstrusjon.

- På grunn av stor forskjell mellom kraftresultat i laboratorietest og simulering er det stor sannsynlighet for at flytdata for legeringen ikke er korrekt i DEFORM.
- Den ønskede bambuseffekten kom ikke tilfredsstillende til syne. Dette kunne vært løst ved å implementere et stempel som dytter vertikalt i bærekanalen. Da ville friksjonsbetingelsene vært endret på i tillegg til at det hadde blitt dannet større luftlommer mellom bærevegg og bolt
- Det kunne vært interessant å undersøke hvilke effekter som beholdes og endres ved 90-graders sveiseekstrudering.

Alle de fremtidige utfordringene som er nevnt ovenfor representerer forbedringer til modeller og simuleringer som allerede er bevist med relativt gode resultater. Spørsmålet videre blir derfor om slike forbedringer er nødvendige. Undertegnede mener at videre utvikling av flytdata vil gi en stor fordel i fremtidens aluminiumsekstrudering da viten om nødvendig kraft og energitilførsel vil være gunstig i et økonomisk øyemed.



## 8 REFERANSER

- [1] Valberg, H.S., Applied Metal Forming, Including FEM analysis 2010, Cambridge University Press.
- [2] 18 Metal flow in die channels of extrusion Malvik ET.pdf
- [3] T.Altan, G. Ngaile, G. Shen, Cold and Hot Forging: Fundamentals and Application, ASM International, 2005
- [4] Valberg, H.S., Formgivning av metaller ved smiing, valsing, ekstrudering, trekking, klipping og plateforming – kompendium i faget TMM4155: Puma 8
- [5] Avitzur, B, Metal Forming, 1987, San Diego Academic Press
- [6] Aukrust, T. , Thin shear boundary layers in flow of hot aluminium, International Journal of Plasticity
- [7] Tverlid, S. , Modelling of friction in the bearing channel of dies for extrusion of aluminium sections, doctoral thesis at NTNU, Trondheim, 1997
- [8] Abtahi S., Friction and interface reactions on the die land in thin-walled extrusion, doctoral thesis at NTNU, Trondheim, 1995
- [9] [www.snl.no/ekstrudering](http://www.snl.no/ekstrudering), 28.09.2013

**TABELLISTE**

Tabell 3.1	Faste ekstruderingsbetingelser, laboratorieundersøk	32
Tabell 3.2	Variierende ekstruderingsbetingelser, laboratorieundersøk	33
Tabell 3.3	2D ekstruderingsbetingelser	35
Tabell 3.4	Variierende ekstruderingsbetingelser, simulering	40
Tabell 3.5	Faste ekstruderingsbetingelser, simulering	41
Tabell 4.1	Ekstruderingsbetingelser, todim- sveis	46
Tabell 5.1	Skjærspenninger, konteinervegg, laboratorieundersøkelse	48
Tabell 5.2	Skjærspenninger, konteinervegg, simulering	56
Tabell 5.3	Skjærspenninger, konteinervegg, sveiseekstrudering	59

## **APPENDIKS**

**APPENDIKS A – FE MODELLER**

**APPENDIKS B - PRESSKRAFTMÅLINGER**

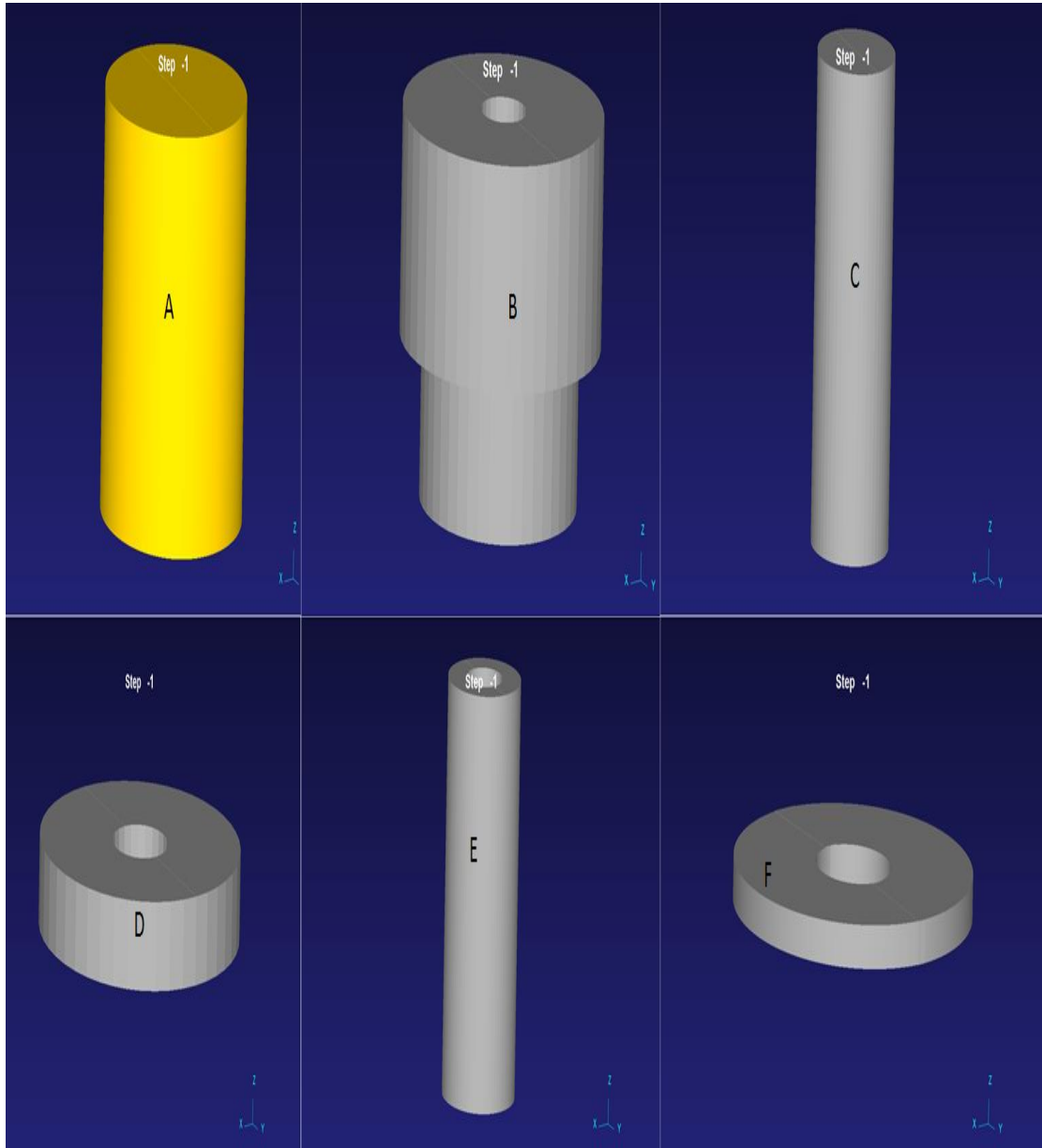
**APPENDIKS C - MATERIALFLYTMÅLINGER**

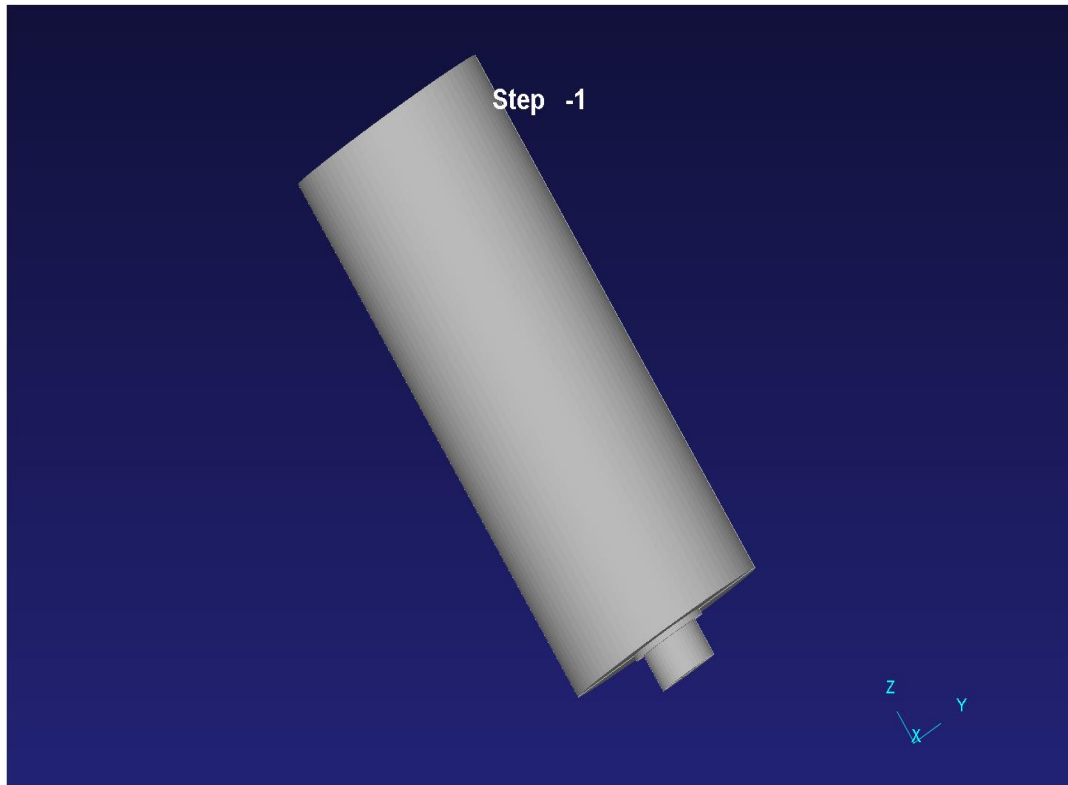
**APPENDIKS D – ANALYSELOGGER LABORATORIETESTER**



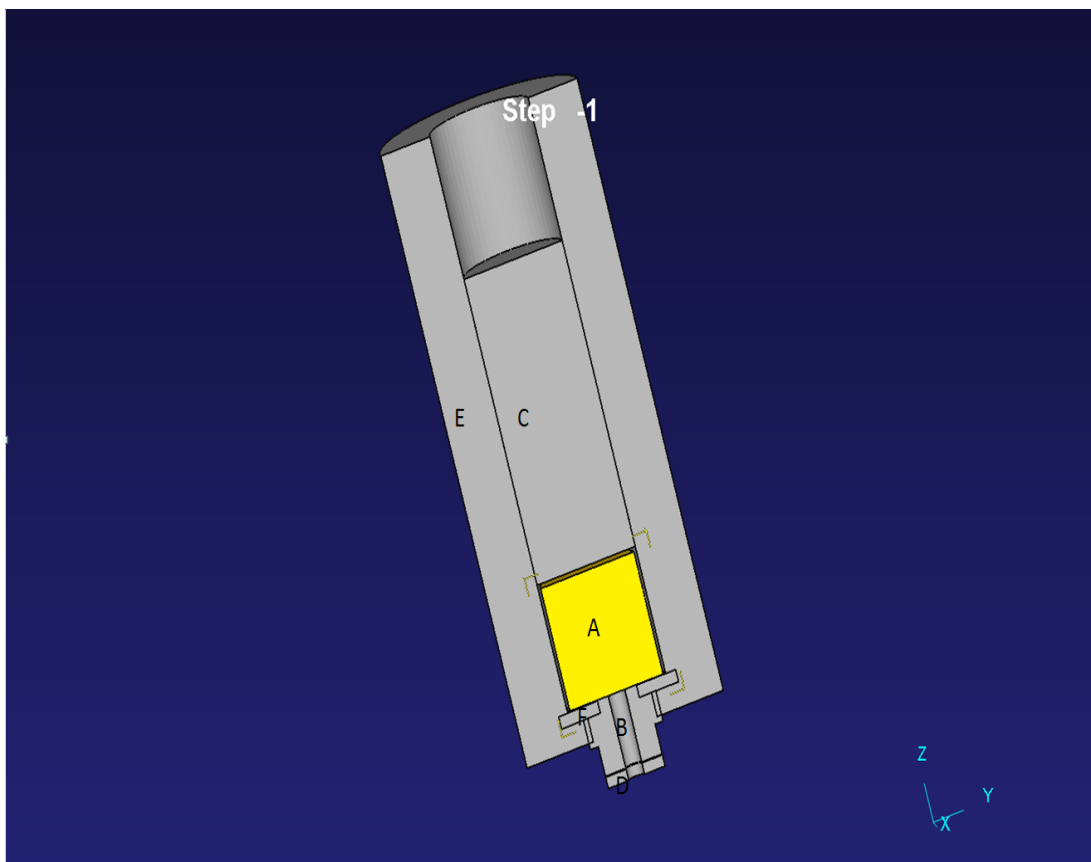
## APPENDIKS A – FE MODELLER

**Figur A1:** Bolt, innsats, stempel, glidedel, konteiner og forseglingsplate før ekstrudering.

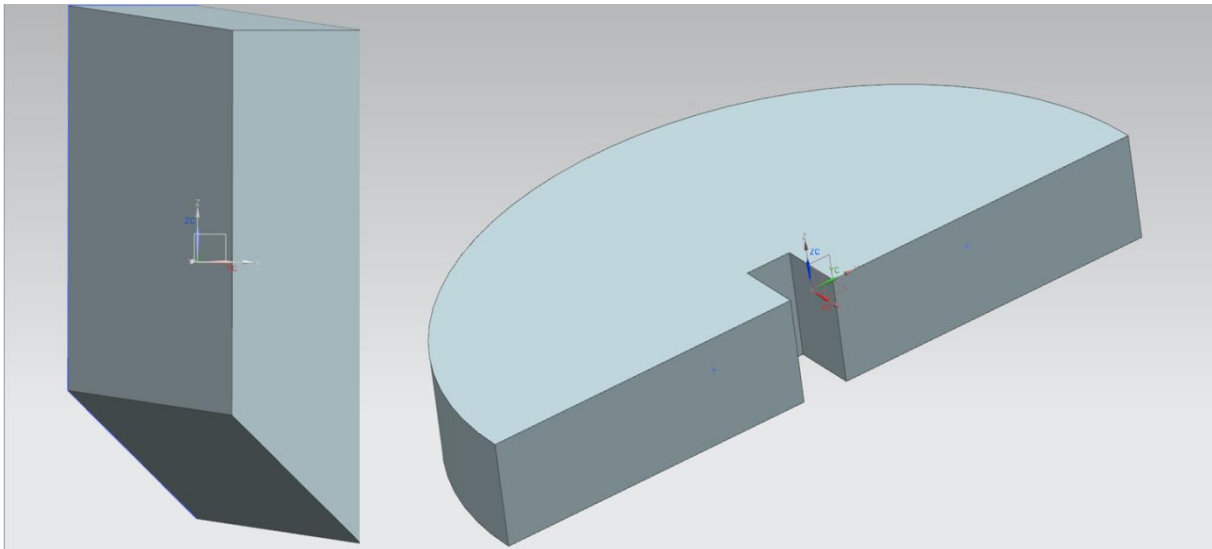




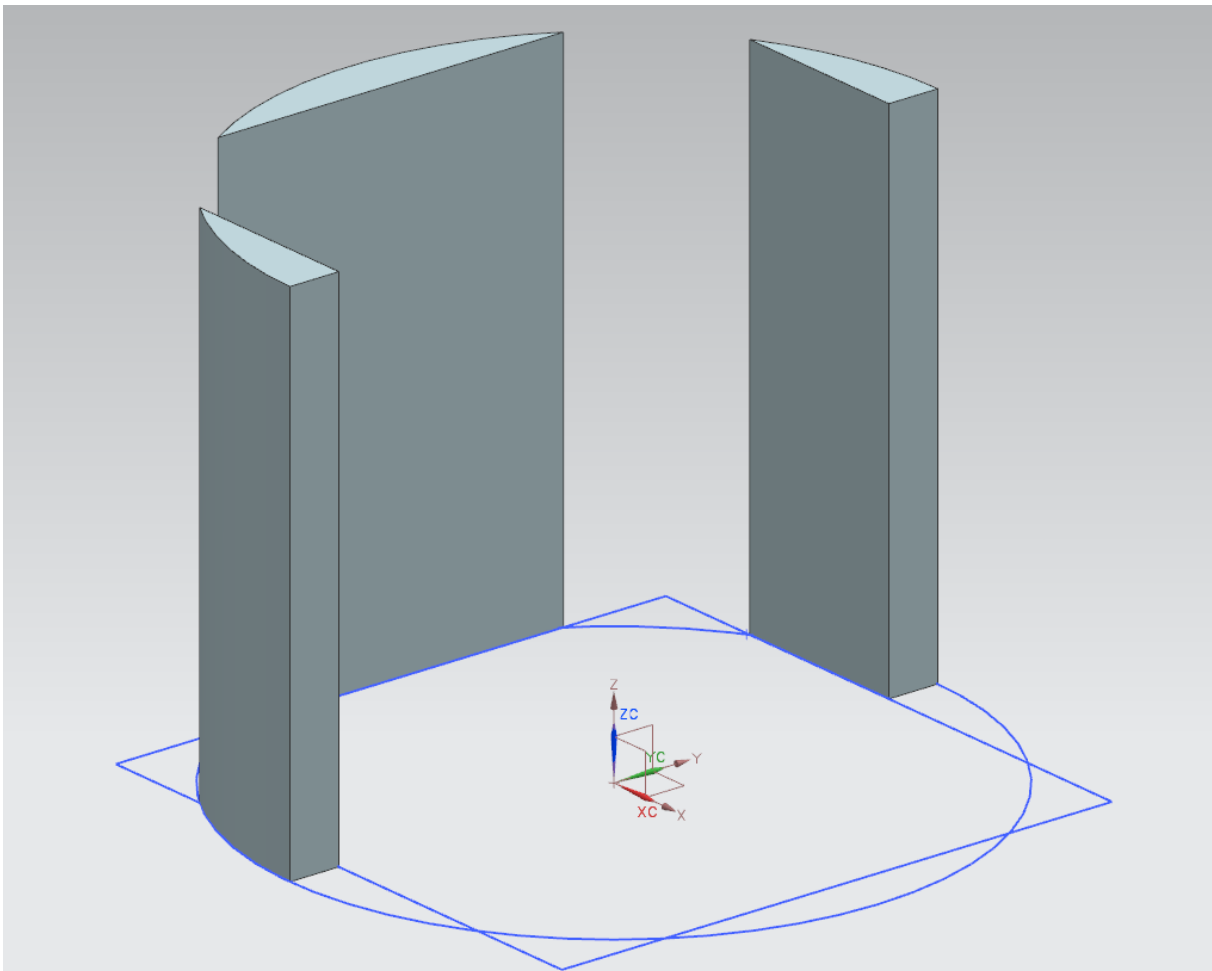
**Figur A2:** Oppsett av modell før simulering.



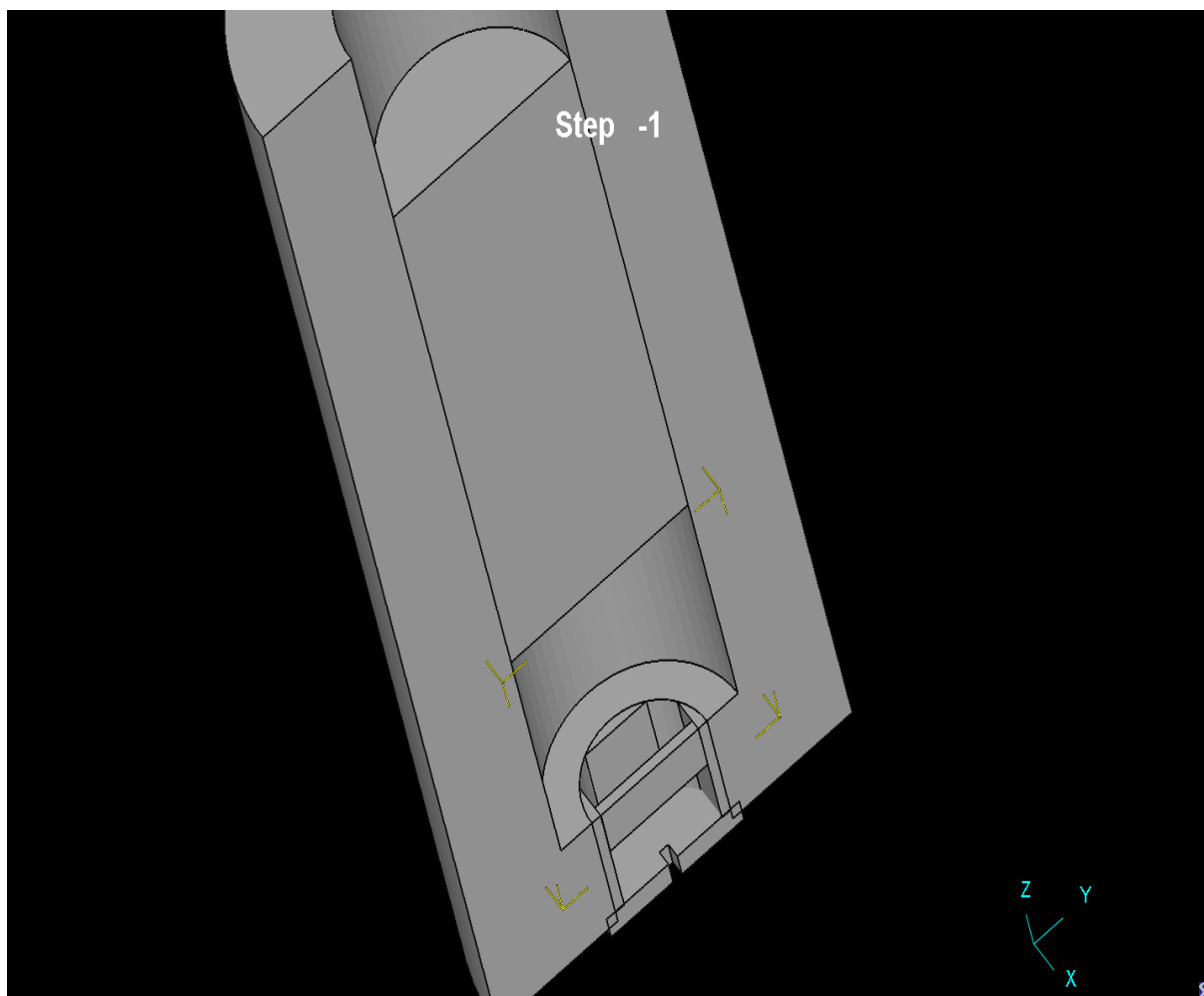
**Figur A3:** Oppsett av modell før simulering, tverrsnitt.



**Figur A4:** Bro- og utgangskomponent til sveiseekstrudering



**Figur A5:** Innsats for brostøtte i sveiseekstrudering

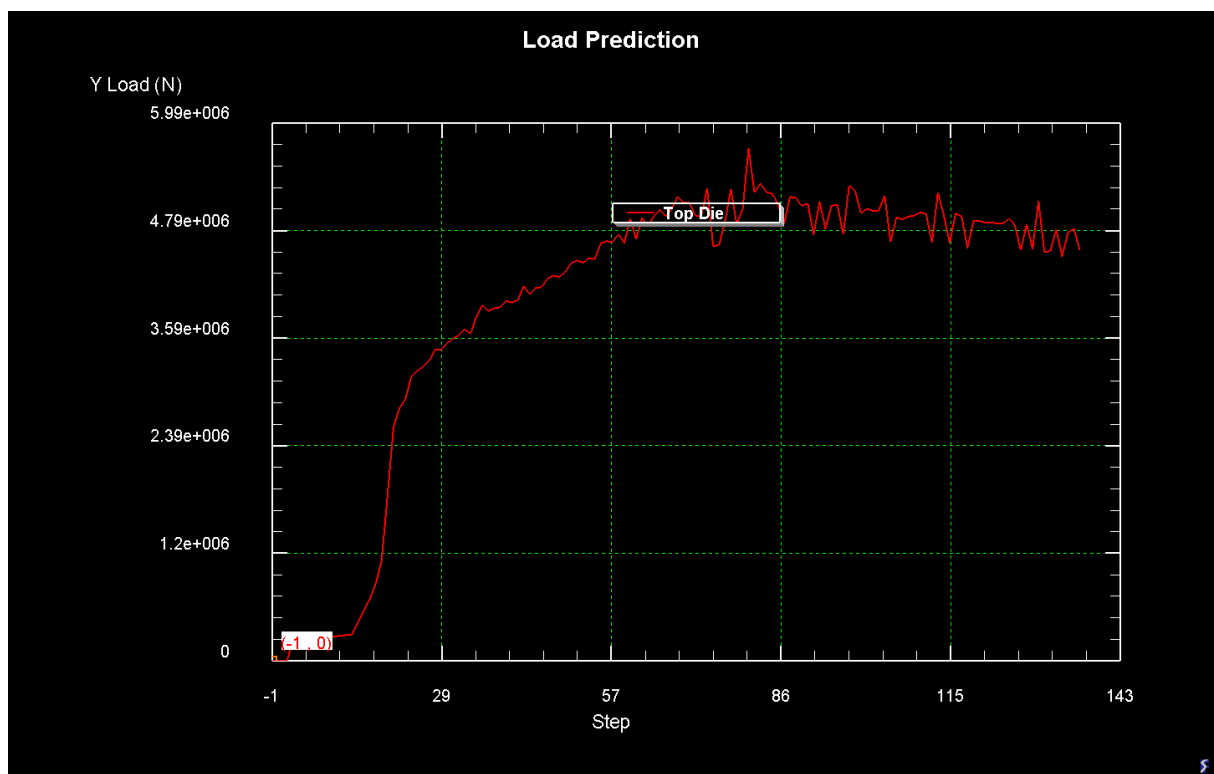


**Figur A6:** Sveiseekstruderingsmodell uten bolt.

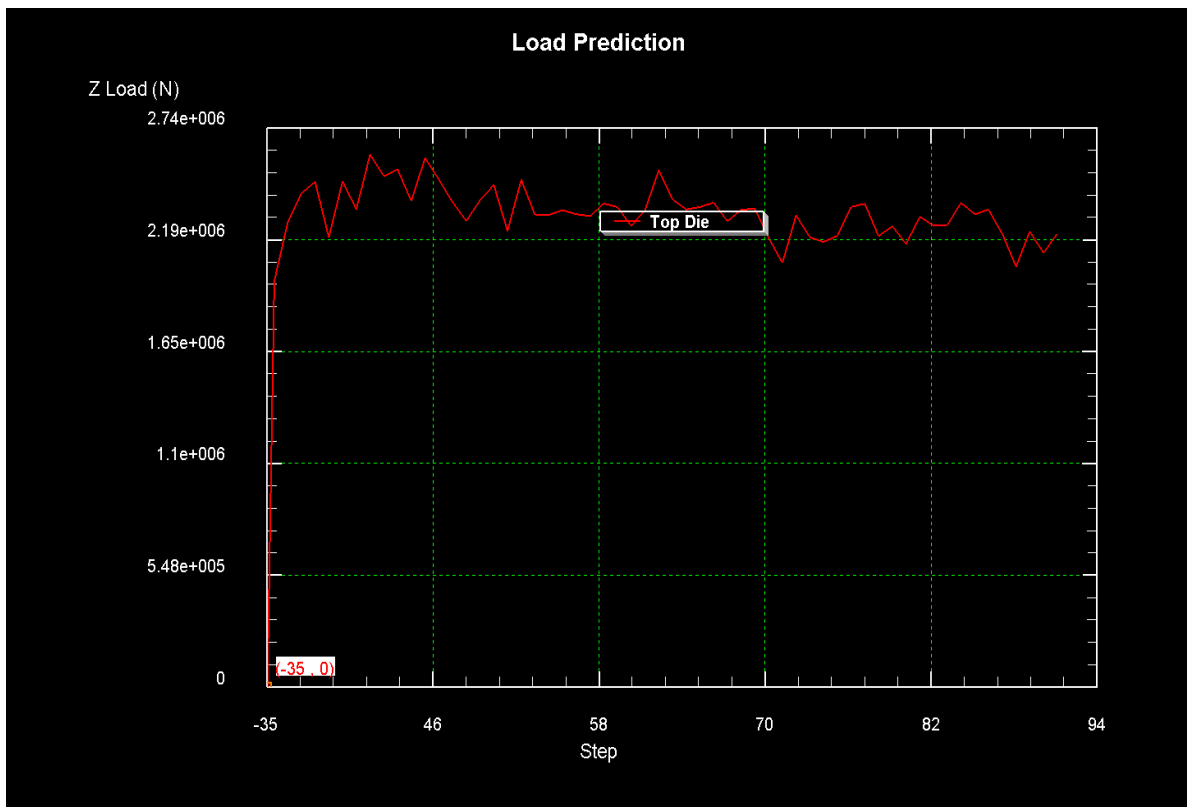
## APPENDIKS B – PRESSKRAFTMÅLINGER

Presskraftmålingene er hentet fra Deforms postprocessor. Verdiene som ble satt i under ekstrudering var at hvert steg tilsvarer 1 mm forflytting av bolten. Presskraftmålinger som er valgt etter 50mm er derfor tilsvarende steg 50 i kurven.

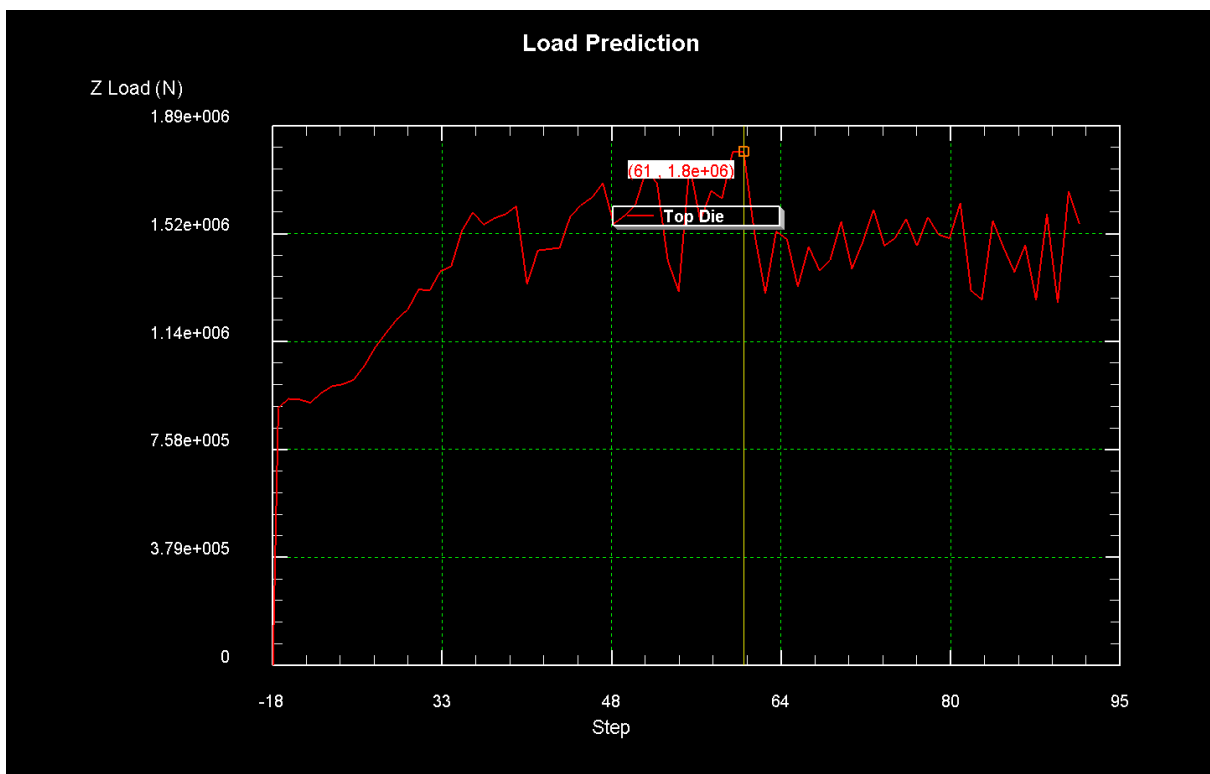
**Figur B1:** Test run 2D, bæreflate 50 mm, reduserende bærekanal 1 grad, AA7075:



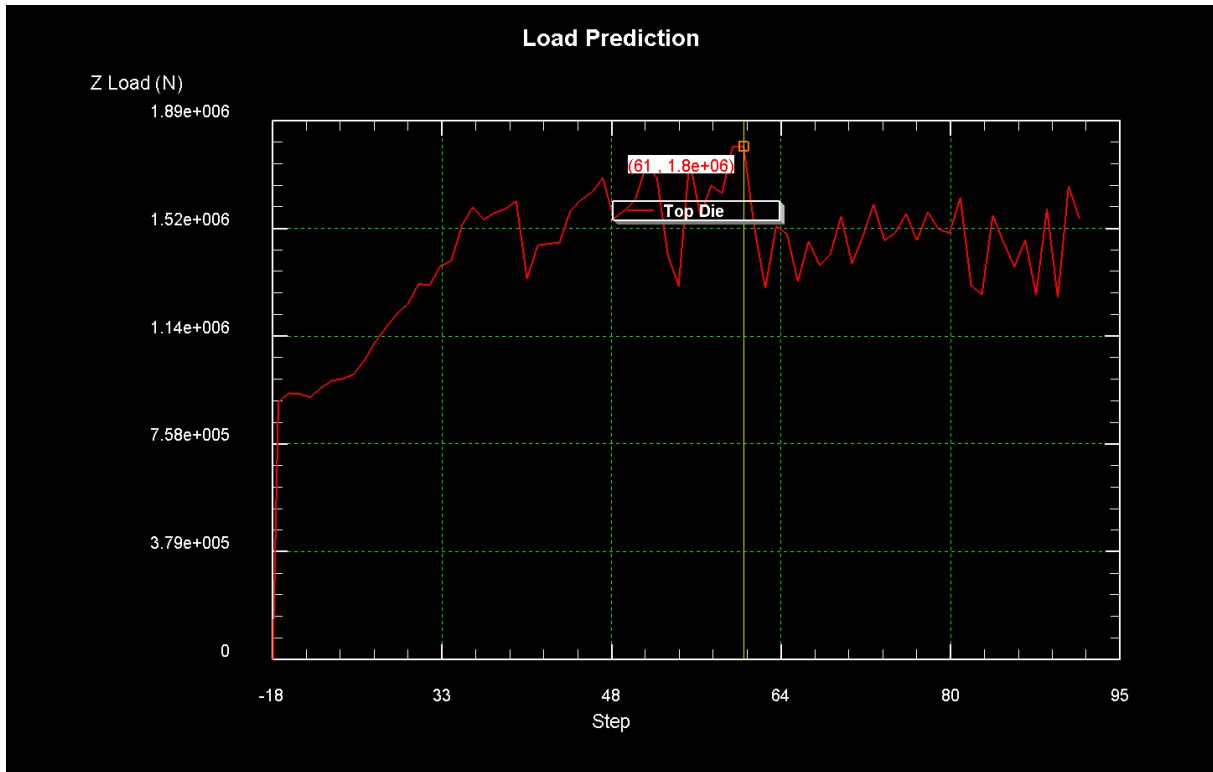
**Figur B2:** Test run 1, bæreflate 50 mm, reduserende bærekanal 1 grad, AA6005:



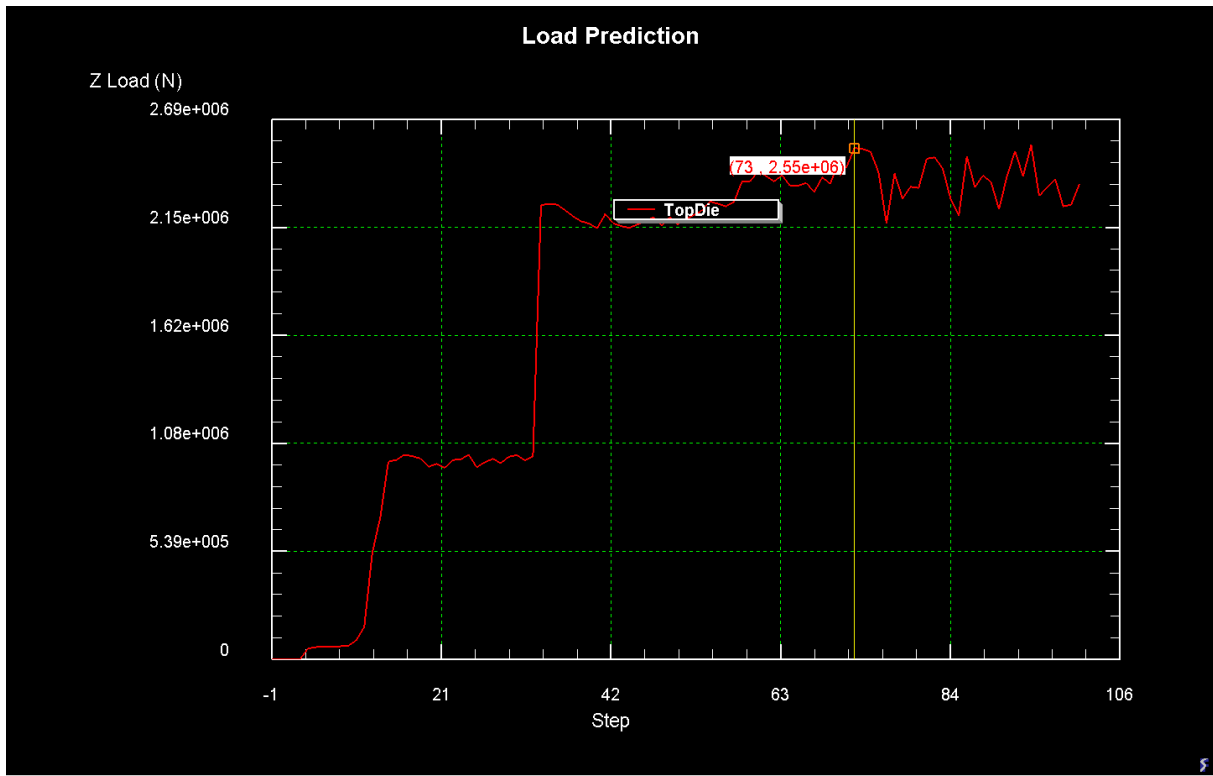
**Figur B3:** Test run 2, bæreflate 20mm, reduserende bærekanal 1 grad, AA7108:

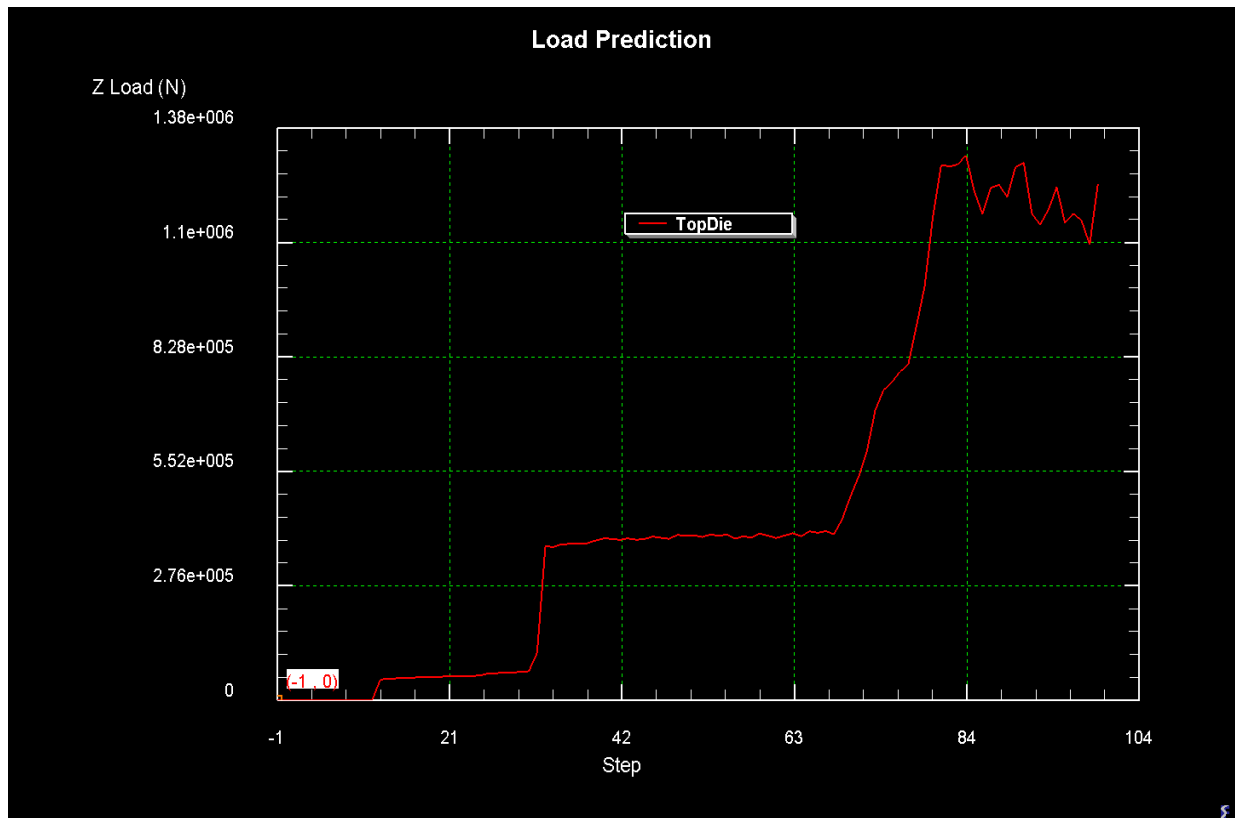


**Figur B4:** Test run 3, bæreflate 50mm, reduserende bærekanal 1 grad, AA7108:



**Figur B5:** Test run 4, bæreflate 70mm, reduserende bærekanal 1 grad, AA7108:

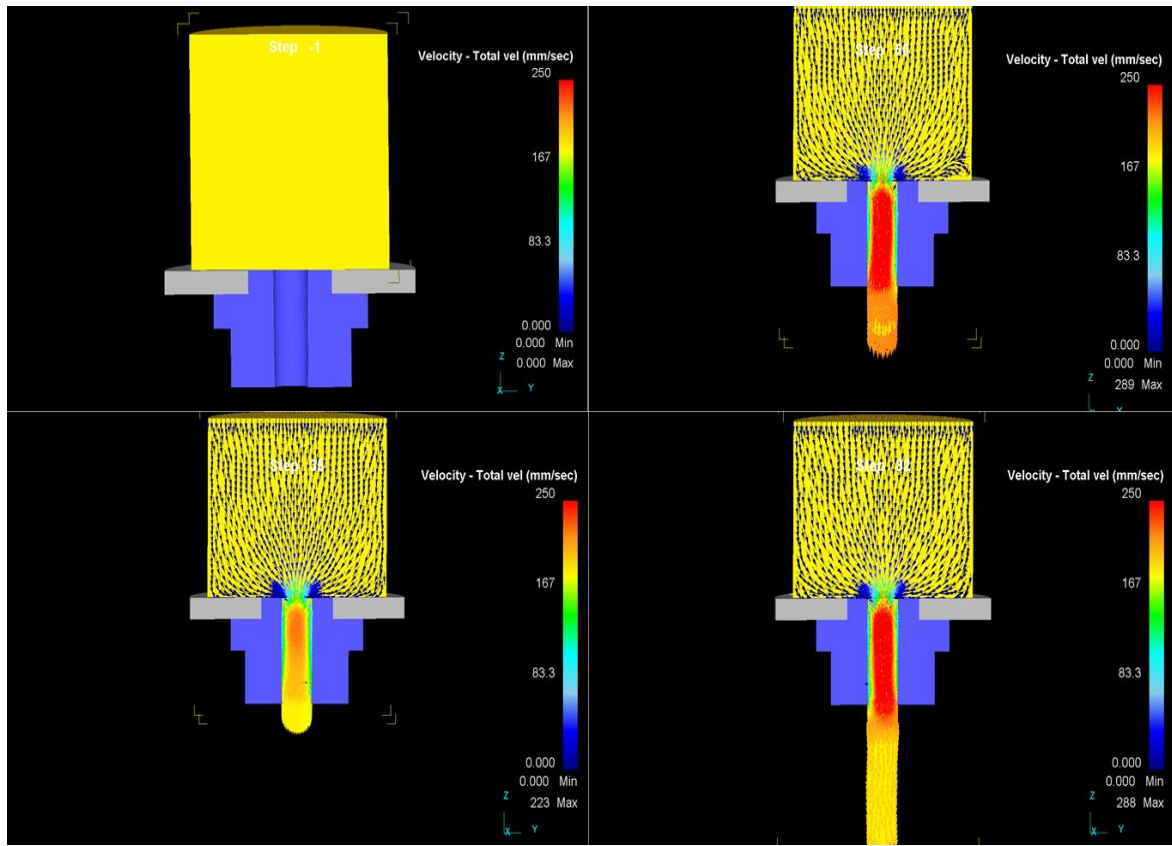


**Figur B6:** Test run sveiseekstrudering, bæreflate 10mm, parallell bærekanal, AA7108:

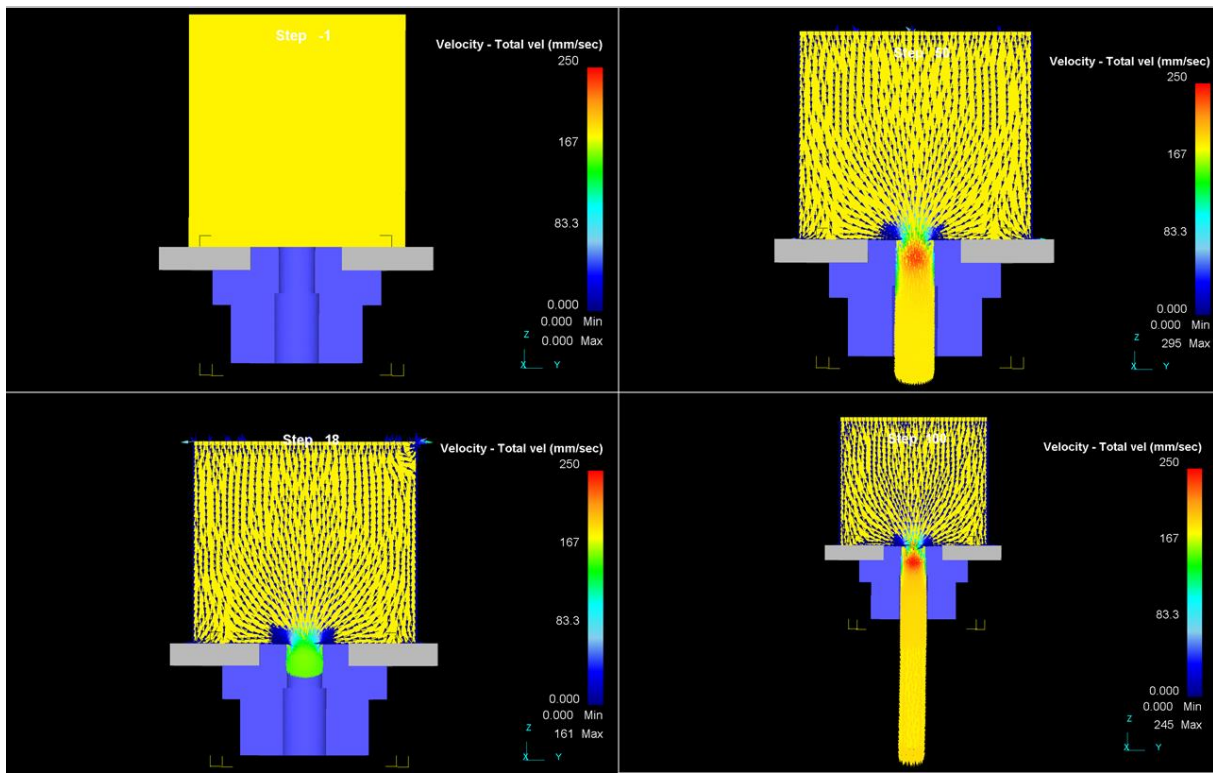


# APPENDIKS C – MATERIALFLYTMÅLINGER

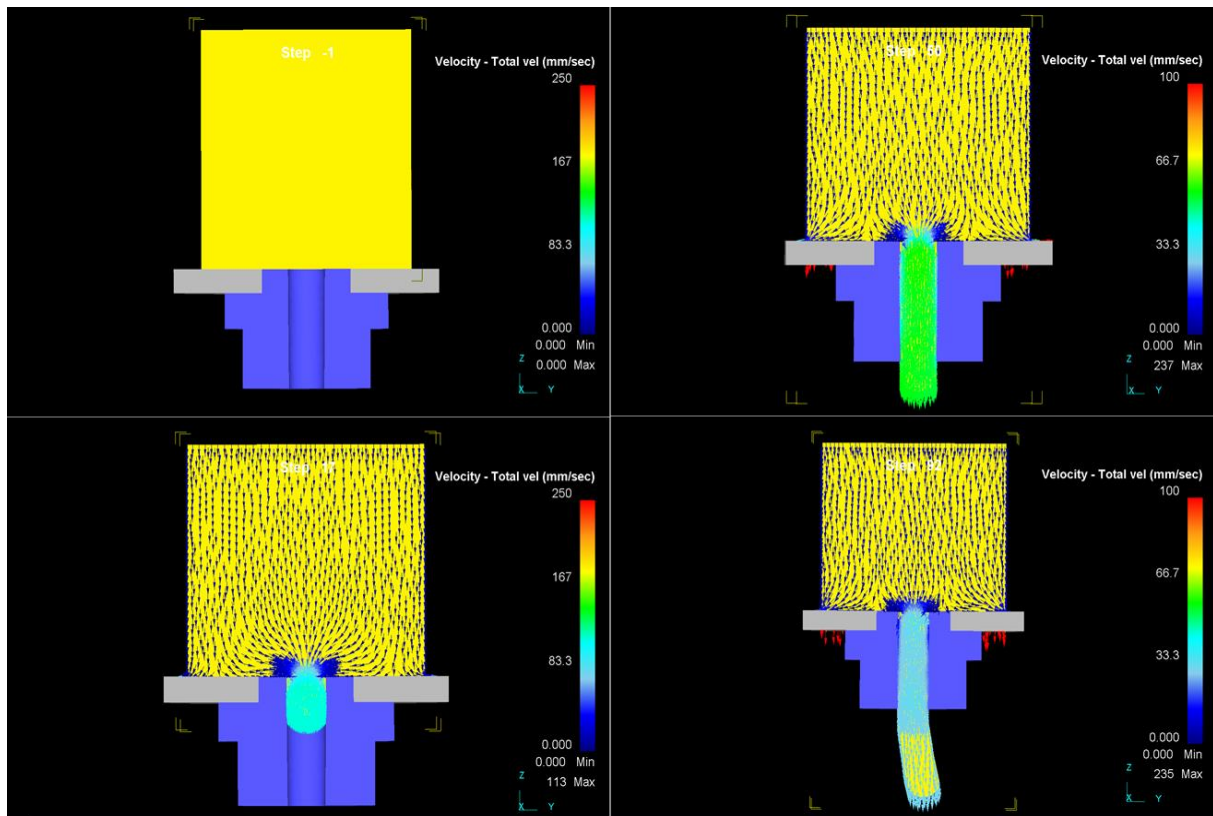
Figur C1: Materialflyt, test run 1



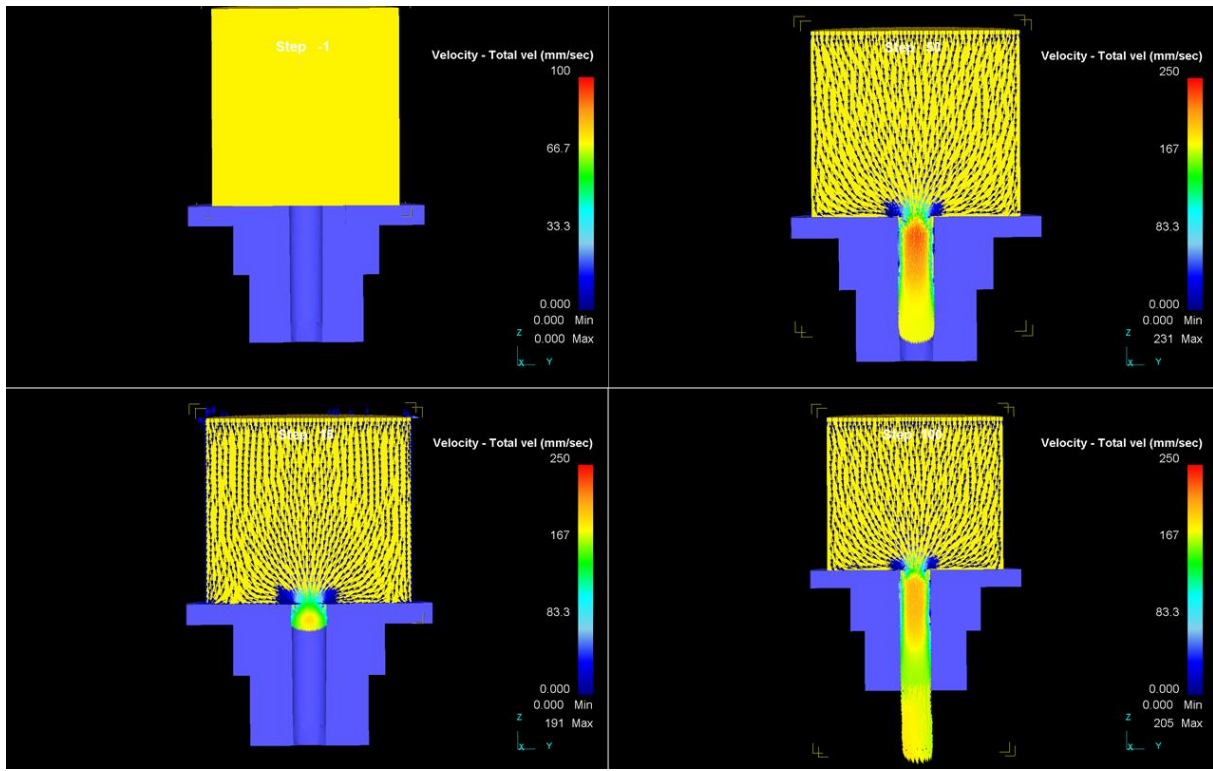
**Figur C2: Materialflyt, test run 2**



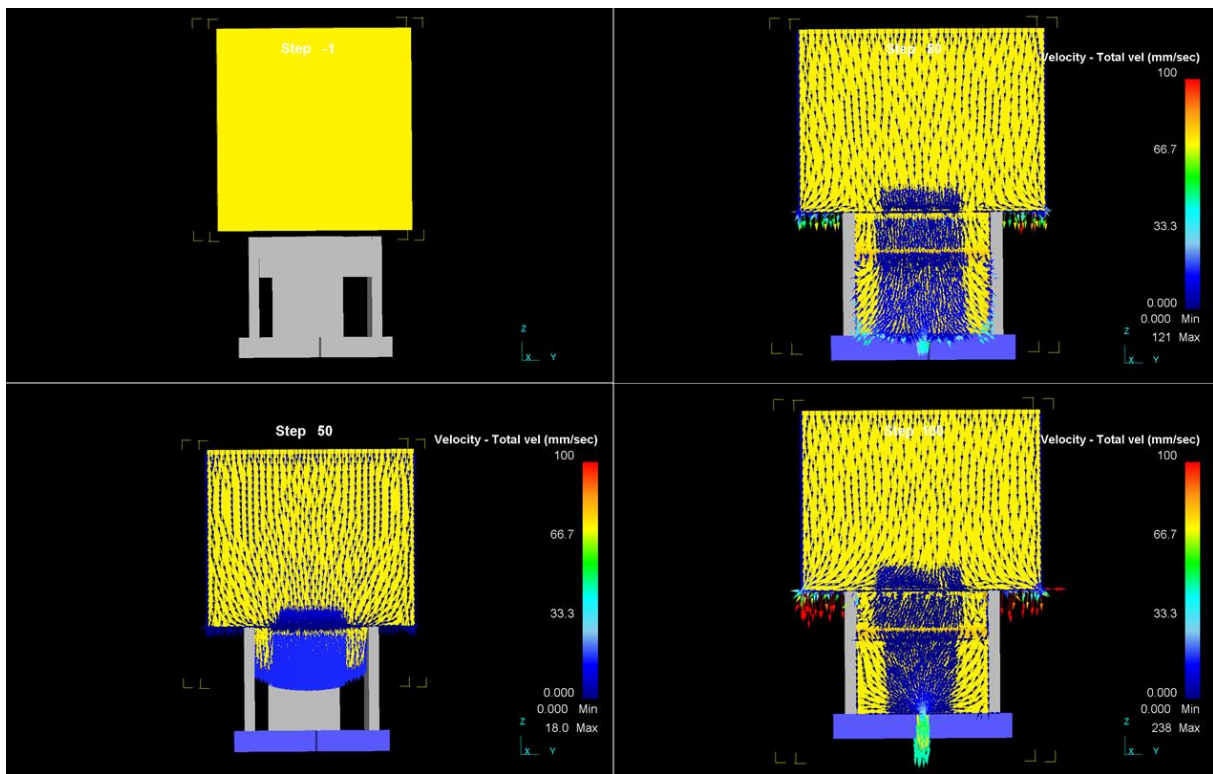
**Figur C3: Materialflyt, test run 3**



**Figur C4: Materialflyt, test run 4**

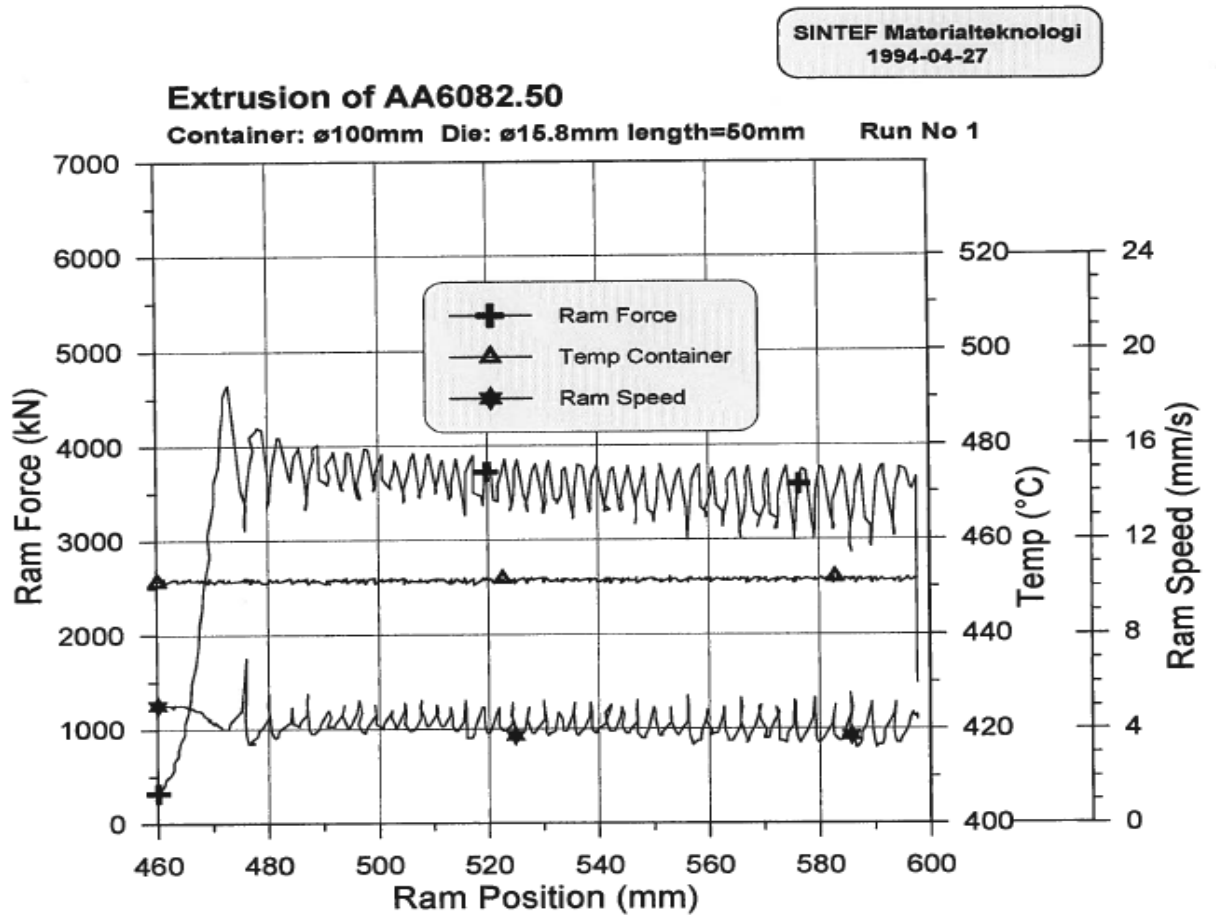


**Figur C5: Materialflyt, Todimensjonal sveiseekstrudering**

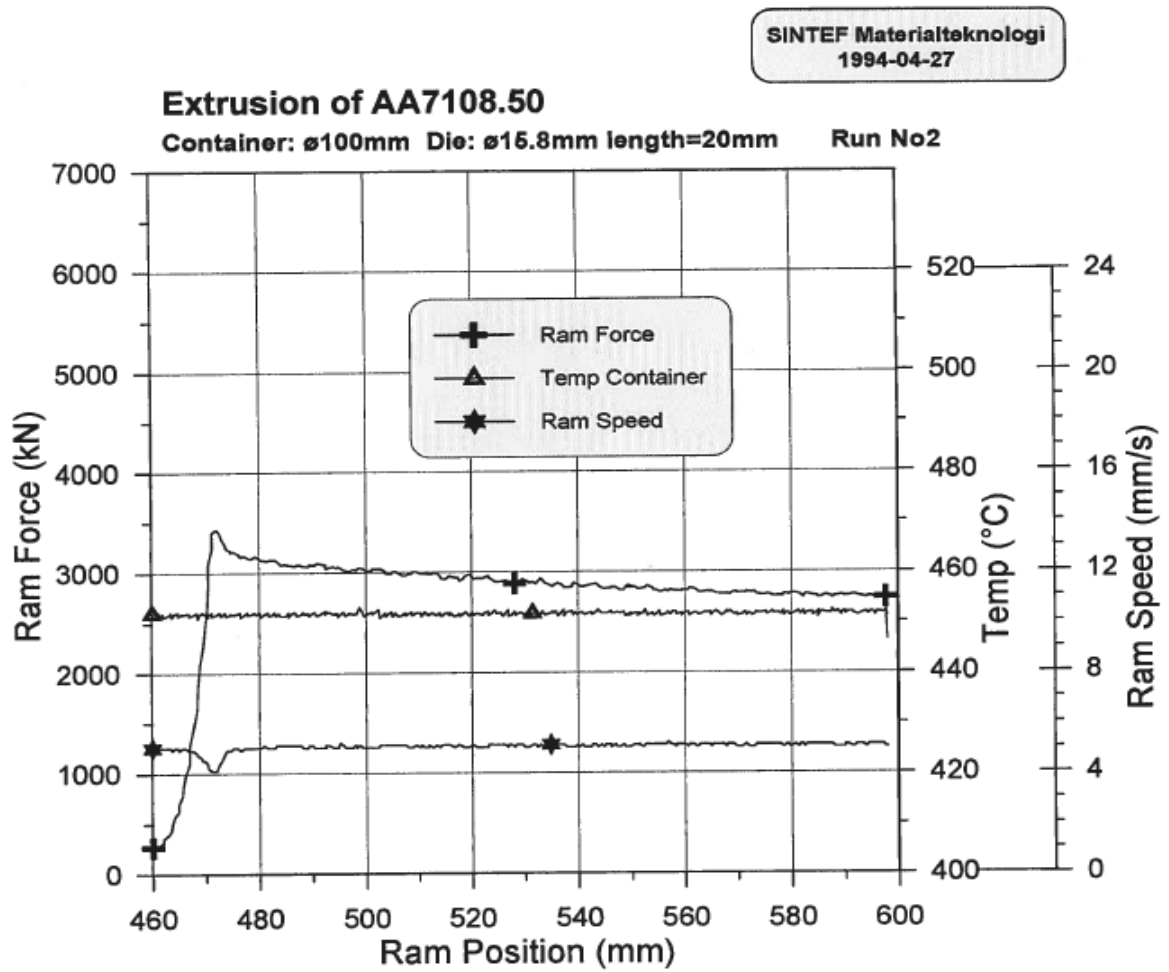


## APPENDIKS D – ANALYSELOGGER FOR LABORATORIETESTER

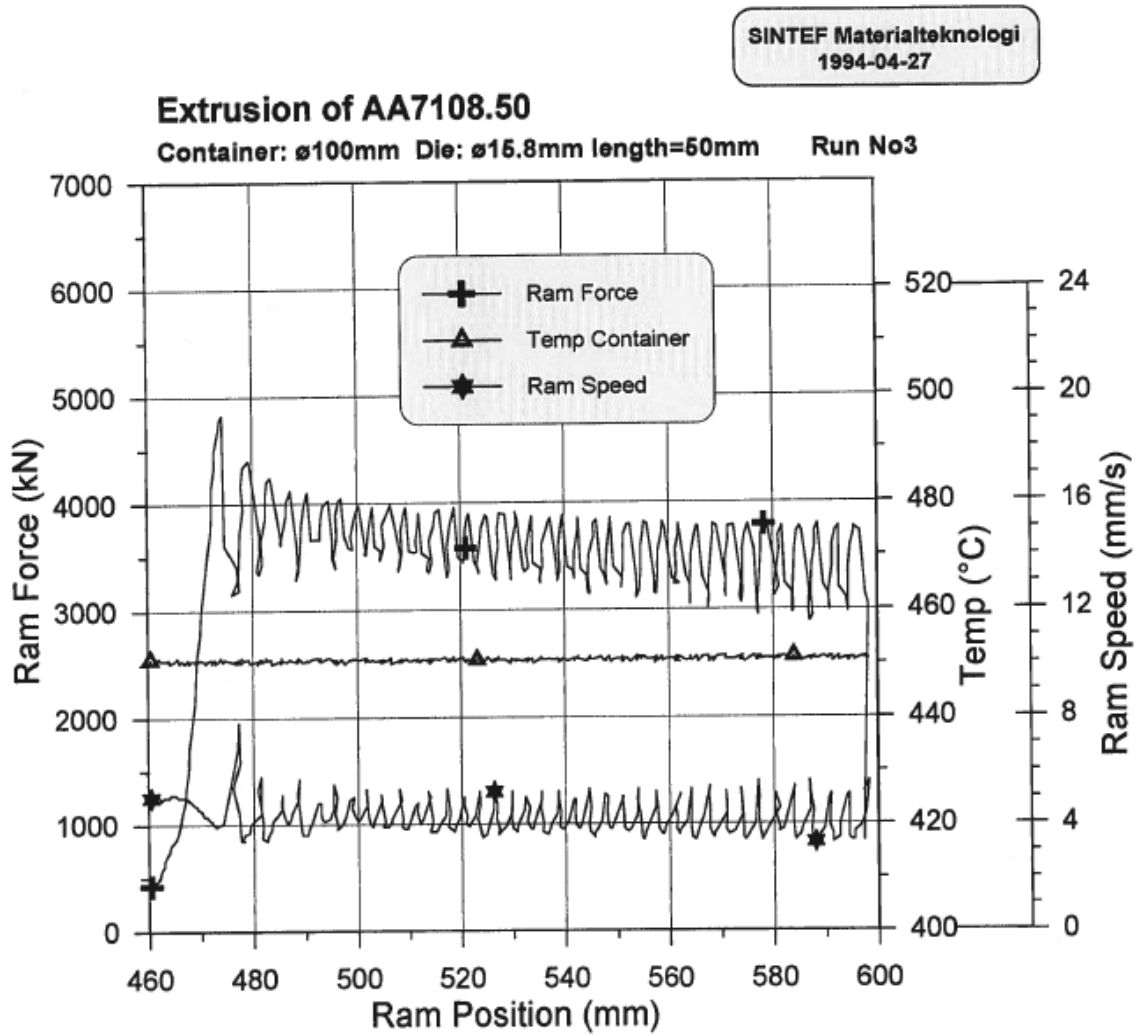
Figur D1: Analyselogg test run 1



Figur D2: Analyselogg test run 2



**Figur D3:** Analyselogg test run 3



**Figur D4:** Analyselogg test run 4

