

FEM-ANALYSE AV INDUSTRIELL ALUMINIUMSPROFILEKSTRUDERING

Wenche Christenssen

Produktutvikling og produksjon
Innlevert: juni 2014
Hovedveileder: Henry Sigvart Valberg, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

Forord

Denne rapporten er skrevet som et produkt av masterarbeidet gjort for Institutt for Produktutvikling og Materialer på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet våren 2014. Masteroppgaven er en videreføring av prosjektarbeidet gjort høsten 2013 og er ment til å øke forståelsen for materialflyt og hvordan en kan avbalansere materialflyten ut av matriseåpningen i en ekstruderingsprosess der det produseres komplekse tynnveggede profiler.

Arbeidet har vært svært givende, og gitt meg muligheten til å studere og tilegne meg kunnskap om ekstrudering som prosess, og hvordan materialflyten avbalanseres. Å jobbe med forskjellige, komplekse profiler og forskjellige programvarer har vært utfordrende og gitt meg en dypere forståelse av viktigheten av FEM-analyse som verktøy innen metallforming.

Undertegnede ønsker å takke professor Henry S. Valberg for hans delaktighet som veileder i denne masteroppgaven, og også Gerda Nubdal i Benteler Aluminium Systems Norway AS for bidrag hvis noe var uklart med resultatene og innspill til diskusjonen. Jonas Engebretsen og William Topper Breien fortjener en takk for deres samvær og nyttige diskusjoner. Sist, men ikke minst vil jeg takke min kjære samboer for kontinuerlig støtte og oppmuntring underveis i arbeidet.

Wenche Christensen
Trondheim, 10. juni, 2014

MASTEROPPGAVE 2014
FOR
STUD.TECHN. WENCHE CHRISTENSSEN

FEM-ANALYSE AV INDUSTRIELL ALUMINIUMSPROFILEKSTRUDERING
FEM-analysis of industrial aluminium profile extrusion

Studenten har i sin prosjektoppgave arbeidet med å analysere en enkel ekstruderingsprosess for varmekstrudering av en skinne fra en rund aluminiumsbolt. I dette arbeidet har hun kartlagt hvilke hastighetsforskjeller men har over skinnebredden i begynnelsen av ekstruderingsprosessen. Det ble i denne oppgaven brukt ulike forkammerer foran matrisen for å redusere hastighetsvariasjoner i flyt over skinnens bredde.

Masteroppgaven som nå skal utføres er å betrakte som en fortsettelse av prosjektarbeidet, men nå skal kandidaten studere variasjoner i materialflyt "rundt" utløpsåpningen når det ekstruderes mer komplekse industrielle profiler.

Studenten skal modellere en eller flere av følgende prosesser:

- ekstrudering av en U-profil med varierende tykkelse over profilets "omkrets" (1)
- flerhullsekstrudering av to skinner etter et prinsipp brukt i en benchmark-test rapportert i litteraturen (2)
- ekstrudering av en industriell hulprofil som case fra en industribedrift (3)

Når arbeidet utføres skal det legges vekt på å modellere verktøy som sammensatt av flere verktøymoduler. Dette for å lage fleksible modeller hvor en raskt kan endre på verktøygeometri for å se på hvordan slike endringer påvirker ekstruderingsbetingelsene.

Videre skal studenten i minst ett av tilfellene som analyseres se på om avbalansering til jevn materialflyt ut av matriseåpningen kan oppnås ved kun en av følgende kalibreringsmetoder:

- gunstig plassering av åpning i forhold til boltsenter
- bruk av forkammer(e)
- bruk av friksjonsflater i matriseåpningen.

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.

Arbeidet i masteroppgaven skal risikovurderes. Hovedaktiviteter som er kjent/planlagt skal risikovurderes ved oppstart og skjema skal leveres innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Alle prosjekt skal vurderes, også de som kun er teoretiske og virtuelle.

Skjemaet må signeres av veileder. Risikovurdering er en løpende dokumentasjon og skal gjøres før oppstart av enhver aktivitet som KAN være forbundet med risiko. Kopi av signert risikovurdering skal være inkludert i vedlegg ved levering av rapport


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.

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

- (1) Ketil Vala; Optimalisering av materialflyt gjennom ekstruderingsverktøy ved optimalt valg av bæreflate lengder, Institutt for Materialer og Bearbeiding, NTNU, 1992.
- (2) International Conference on Extrusion and Benchmark, ICEB 2013, Dortmund.
- (3) Profilgeometri oversendt fra Benteler.

Kontaktperson i industrien: Gerda Nubdal, Benteler, Raufoss


Torgeir Welo
Instituttleder


Henry Valberg
Faglærer

 **NTNU**
Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling
og materialer

Abstract

This thesis is written to increase knowledge and understanding on the topic of material flow during an extrusion process for production of complex, thin-walled aluminum profiles. A part of this thesis is also aiming to show the impact of adding a pocket to the die will have on balancing the material flow out of the die bearing area.

The thesis addresses modeling and simulation of two different types of aluminum profiles. The first profile discussed is a U-profile which has been investigated in a thesis by Kjetil Vala in 1992. In that thesis the experiments were performed with model material to analyze material flow for optimal die bearing lengths. Also a hollow rectangular bumper profile have been investigated, the geometry was given by Benteler Aluminium Systems Norway AS. Two different types of extrusion processes was needed and applied to the different profiles. For the U-profile direct extrusion using a flat die with and without a pocket was assigned, and for the bumper profile a porthole die was chosen. The rapport does not intend to elaborate on aspects of optimal die design, but to show typically material flow characteristics and the principle of balancing material flow by introducing pockets to the die for the U-profile.

The first part of the rapport will elaborate on the basic theory regarding the extrusion process, discussing history, physics of material flow and general workflow when modeling and setting up models in UGS NX 8.0 and DEFORM-3D. In particular the impact of adding a pocket to balancing uneven material flow will be discussed. The thesis further discusses the results obtained during the simulations performed in DEFORM-3D. The results of the simulations of the U-profile shows that using a die with a pocket lowers the relative difference of the average material flow velocity over the profiles cross-section from 26.4 % to 18.6 % compared with using a flat die without a pocket. Also the average exiting velocity at the die bearing is reduced from 368.0 mms^{-1} to 74.6 mms^{-1} at the bottom surface and at the profile wall it's reduced from 479.9 mms^{-1} to 91.7 mms^{-1} . The extrusion load decreased from 8.48 MN to 7.98 MN when adding the pocket.

The simulation results when the bumper profile was investigated using a grid pattern and analyzing the effective strain-rates on different scales uncover that the characteristic dead zone, shear zone and deformation zones during plastic deformation of metal are present and realistically simulated.

The last part of this thesis is an evaluation of the results and the quality of the obtained result, also recommendations for future work is discussed.

Using FEM to analyze material flow is regarded as an efficient way to obtain knowledge on the subject, in comparison of using trial and error, experience and intuition to balance inhomogeneous material flow. Use of FEM-analysis is expected to increase further. This method gives us increased opportunity to investigate possible solutions and realistic results, but simulations of complex thin-walled geometries requires a long calculation time and further development of the software is therefore necessary.

Sammendrag

Avhandlingen er skrevet for å øke forståelsen og kunnskapen rundt materialflyt ved ekstrudering av komplekse og tynnvegde aluminiumprofiler. Det gjennomgås også hvordan ujevn materialflyt ut av en matrise kan avbalanseres ved bruk av forkammer.

Rapporten tar for seg oppbygning av modeller og simulering for to forskjellige profilgeometrier. Det første profilet er et U-profil som det tidligere er gjort analyser av ved bruk av modellmateriale. Dette ble gjort i en Diplomoppgave utført av Kjetil Vala i 1992. Det andre profilet er et rektangulært tynnvegd hulprofil med en midtspalte og to utstikkere. Dette utgjør geometrien til en støtfanger gitt av Benteler Aluminium Systems Norway AS. For å få til simuleringene er det benyttet to forskjellige metoder for ekstrudering av disse profilene. Metodene som er benyttet er direkte ekstrudering ved bruk av flat matrise, med og uten forkammer, og sveiseekstrudering igjennom en porthullmatrise. Rapporten har ikke som hensikt å redegjøre for aspekter ved optimalisering av matrisedesign, men vise til typiske flytfenomener og hvordan forkammer kan brukes til å avbalanserer materialflyten ut av en matrise.

Rapporten begynner med en utdypning av grunnleggende teori vedrørende ekstruderingsprosessen, hvor både historie, matematiske beregninger for materialflyt og generell arbeidsflyt for modellering og oppsett av modeller i programvarene UGS NX 8.0 og DEFORM-3D diskuteres. Spesielt utdypes det for hvordan bruk av forkammer kan brukes for å avbalanseres ujevn materialflyt. Avhandlingen drøfter videre resultater oppnådd fra simuleringene gjort i DEFORM-3D. I resultatene fra simuleringer av U-profilet fremkommer det at bruk av forkammer senker relativ differanse i gjennomsnittlig materialflythastighet over profiltverrsnittets bunnflate og profilvegg fra 26.4 % til 18.6 % ved bruk av forkammer. I tillegg reduseres gjennomsnittlig utløphastighet fra bæreflaten, langs bunnflaten fra 368.0 mms^{-1} til 74.6 mms^{-1} og langs profilveggen reduseres hastighetene fra 479.9 mms^{-1} til 91.7 mms^{-1} . Presskraftmålinger viser at bruken av forkammer senker den forventede presskraften fra 8.48MN til 7.98 MN.

I simuleringsresultatene oppnådd for støtfangerprofilet fremkommer det i nettverksanalysen og studering av effektive tøyingsrater i forskjellige skalaer at karakteristiske soner som dødsoner, skjærsoner og deformasjonssoner gjengis på realistisk måte jamfør teorien om flytforløpet til materialet igjennom en ekstrudering.

Avhandlingen avsluttes med en evaluering og diskusjon av resultatene, samt kvaliteten på disse og forslag til videre arbeid blir også presentert.

Benyttelse av FEM for å analysere materialflyten i en plastisk formeprosess for metall er ansett for å være en effektiv metode fremfor prøving og feiling, og bruk av erfaring for avbalansering av materialflyt. Bruken av FEM-analyse forventes å fortsette å øke. Bruk av FEM gir økte muligheter for å utforske løsninger og realistiske resultater, men simuleringer av komplekse geometrier bruker lang beregningstid, stadig utvikling av programvare er derfor nødvendig.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	1
	1.1 Bakgrunn	1
	1.2 Mål for oppgaven	3
	1.3 Oppgavens begrensninger.....	3
2	Teori	4
	2.1 Historie	4
	2.2 Prinsipper og terminologi.....	5
	2.2.1 Direkte og indirekte ekstrudering.....	5
	2.2.2 Sveiseekstrudering	7
	2.3 Materialflyt.....	8
	2.3.1 Hastighetsfelt	8
	2.3.2 Friksjon	10
	2.3.3 Skjærdeformasjoner og flytsoner.....	11
	2.4 Eksperimentell analyse.....	13
	2.4.1 Nettverksanalyse.....	13
	2.4.2 Kontrastpinner.....	14
	2.4.3 Finite Element.....	15
	2.5 Korrektive metoder ved matrise utforming.....	16
	2.5.1 Gunstig plassering av matriseåpning i forhold til senter av bolt.....	16
	2.5.2 Friksjonsflater.....	16
	2.5.3 Forkammer.....	17
3	Prosess- og designbeskrivelse Unigraphics NX 8.0	18
	3.1 Programvare.....	18
	3.1.1 Unigraphics NX 8.0.....	18
	3.2 U-profil.....	18
	3.2.1 Matrise nr. 0.....	20
	3.2.2 Matrise nr. 1.....	21
	3.3 Støtfangerprofil.....	23
	3.3.1 Porthullmatrise.....	23

4	Prosessbeskrivelse for oppsett av modeller i DEFORM-3D	26
	4.1 Progamvare.....	26
	4.2 Oppsett av modeller: U-profil.....	26
	4.2.1 Felles betingelser.....	26
	4.2.2 Matrise nr. 0.....	27
	4.2.3 Matrise nr. 1.....	30
	4.2 Oppsett av modell: Støtfanger.....	32
	4.3.1 Betingelser.....	32
	4.3.2 Klargjøring av modell.....	33
5	Postprosesserings resultater	35
	5.1 Matrise nr. 0.....	35
	5.1.1 Hastighetsforskjeller.....	37
	5.1.2 Nettverksanalyse.....	39
	5.1.3 Effektiv tøyingsrate.....	40
	5.1.4 Ekstruderingskraft.....	40
	5.1.5 Temperatur.....	42
	5.2. Matrise nr. 1.....	43
	5.2.1 Hastighetsforskjeller.....	43
	5.2.2 Nettverksanalyse.....	46
	5.2.3 Effektiv tøyingsrate.....	47
	5.2.4 Ekstruderingskraft.....	48
	5.2.5 Temperatur.....	49
	5.3 Støtfanger.....	50
	5.3.1 Hastighetsfordeling.....	51
	5.3.2 Nettverksanalyse.....	53
	5.3.3 Effektiv tøyingsrate.....	54
	5.3.4 Ekstruderingskraft.....	55
	5.3.5 Trykk- og temperaturfordelig.....	56
6	Diskusjon	57
	6.1 U-profil.....	57
	6.2 Støtfanger.....	59
7	Konklusjon og videre arbeid	61
	7.1 Konklusjon: U-profil.....	61
	7.2 Konklusjon: støtfanger.....	61
	7.3 Videre arbeid.....	62
	7.3.1 U-profil.....	62
	7.3.2 Støtfangerprofil.....	62

Referanser	63
A Risikovurdering	65
B Nettverksanalysestøtfangerprofil	69
C Effektiv tøyningssrate	70

Figurliste

Figur 1.1. (a) Ekstruder U-profil (b) Ekstrudert støtfanger	2
Figur 2.1. Typer ekstrudering (a) Direkte ekstrudering, (b) Indirekte ekstrudering [7]	5
Figur 2.2. Hulprofil-matriser (a) porthullmatrise (b) spider (c) bro [5]	6
Figur 2.3. Materialflyt sveiseekstrudering igjennom porthullmatrise [6]	6
Figur 2.4. Forskjellige ekstruderte aluminiumsprofiler [8]	7
Figur 2.5. Stasjonær materialflyt [10]	8
Figur 2.6. (a) Forenklet hastighetsfelt (b) inhomogen materialflyt fra prosjektoppgaven	10
Figur 2.7. Friksjonsmodeller [6]	11
Figur 2.8. Deformasjon-, død- og skjærsonene som opptrer under ekstrudering [5]	12
Figur 2.9. Bolt med innrisset nettverk, markert område viser nettverket som er visket ut grunnet store skjærdeformasjoner	13
Figur 2.10. (a) Bolt med innsatte kontrastpinner (b) flytmønster som fremkommer ved bruk av kontrastpinner [6]	14
Figur 2.11. Likhet i materialflyt mellom fysiske eksperimenter og FEM (referanse)	15
Figur 2.12. (a) Ubalansert materialflyt - flat matrise (b) balansert materialflyt - matrise med forkammer	17
Figur 3.1. (a) Målsatt tverrsnittgeometri (b) 3D-modell profil (c) Verktøyskive + bæreflate	19
Figur 3.2. Modelloppsett med ekstrudert profil, snittet i symmetriplanet	20
Figur 3.3. (a) Første forkammertrinn (b) Andre forkammertrinn	21
Figur 3.4. Modelloppsett snittet i symmetriplanet	22
Figur 3.5. (a) Målsatt tverrsnittsgeometri (b) 3D-modell profil (c) verktøyskive + bæreflate med dor for å angi profilets endelige geometri	23
Figur 3.6. (a) Nedre halvdel av matrise (b) Øvre halvdel av matrise (c) Modulbasert porthullsmatrise, øvre og nedre del sammensatt	24
Figur 3.7. Modelloppsett porthullmatrise, snittet i symmetriplanet	25
Figur 4.1. Close- up mesh og "mesh window" (a) bæreflate (b) matrise	28
Figur 4.2. Eksplodert modelloppsett, flat matrise	29
Figur 4.3. (a) Oppsett matrise med forkammer (b) Forkammer sett ovenfra	30
Figur 4.4. Eksplodert modelloppsett og "mesh window" på bolt for matrise nr. 1	31
Figur 4.5. Eksplodert verktøyoppsett for støtfangerprofil	34

Figur 5.1. Flyt forløp igjennom matrise nr. 0 (a) Materialet slipper bæreflate og matrise (b) profilet ekstrudert med klar deformasjon og vridning.	36
Figur 5.2. Datapunkter for lokale hastigheter over U-profilets tverrsnitt	37
Figur 5.3. Lokal hastighetsfordeling over ekstrudatets bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter passering av bæreflate	38
Figur 5.4. Nettverk matrise nr. 0 (a) Profilvegg (b) Bunnflate	39
Figur 5.5. Effektiv tøyingsrate, matrise nr. 0	40
Figur 5.6. Presskraftmåling matrise nr. 0	41
Figur 5.7. Temperaturfordeling i bæreflateområdet, matrise nr. 0	42
Figur 5.8. Temperaturfordeling i senter av bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter bæreflaten	42
Figur 5.9. Fylling av matrise ved ulike step (a) Begynnende flyt (b) Begynnende flyt over i 2. forkammertrinn (c) Begynnende kontakt med bæreflate (d) Begynnende ekstrudering	43
Figur 5.10. Flytforløp igjennom matrise nr. 1 (a) Materialet slipper bæreflate (b) Profilet ekstrudert	44
Figur 5.11. Lokal hastighetsfordeling over ekstrudatets bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter passering av bæreflate	45
Figur 5.12. Nettverk matrise nr. 1 (a) Profilvegg (b) Bunnflate	46
Figur 5.13. Sammenligning av effektiv tøyingsrate mellom matrise nr. 1 og matrise nr. 0	47
Figur 5.14. Presskraftmåling matrise nr. 0 og matrise nr. 1	48
Figur 5.15. Temperaturfordeling (a) matrise nr. 0 (b) matrise nr. 1	49
Figur 5.16. Temperaturfordelingsgraf sammenligning mellom matrise nr. 0 og matrise nr. 1	49
Figur 5.17. Flyt forløp igjennom porthullmatrise (a) Bolt innsatt i kontainer (b) Materialet splittes i porthull (c) Materialet sveises sammen (d) Begynnende flyt igjennom bæreflate området	50
Figur 5.18. Hastighetsfordeling ved forskjellige step, støtfangerprofil	51
Figur 5.19. Hastighetsfordeling 0.5 mm etter bæreflate	52
Figur 5.20. Hastighetsfordeling over midtspalte i overgang mellom sveisekammer og bæreflate	52
Figur 5.21. Nettverk for del 1 og 2 av simulering	53
Figur 5.22. Effektiv tøyingsrate i simulering (a) del 1 (b) del 2	54
Figur 5.23. Presskraftmåling for støtfangerprofil	55
Figur 5.24. (a) Temperaturfordeling i senter av langsgående sveis (b) Trykkfordeling i senter av langsgående sveis	56
Figur 6.1. (a) Effektiv tøyingsrate i profilveggens øvre del (b) Nettverk i profilveggens øvre del	58
Figur 6.2. Begynnende flyt ut av bæreflateområdet i første del av simulering	59
Figur 6.3. Temperaturfordeling (a) første del (b) andre del av simulering	60

Tabelliste

Tabell 3.1. Modellgeometri: U-profil	19
Tabell 4.1. Prosessparametere og bolt dimensjoner brukt i FEM-simuleringene	27
Tabell 4.2. Mesh beskrivelse: Flat matrise	28
Tabell 4.3. Mesh beskrivelse: Matrise nr. 1	30
Tabell 4.4. Prosessparametere og bolt dimensjoner brukt i FE-simuleringene	32
Tabell 4.5. Mesh beskrivelse: Støtfanger	33
Tabell 5.1. Hastighetsforskjeller, matrise nr. 0	37
Tabell 5.2. Koordinater for nettverks plassering	39
Tabell 5.3. Presskraftmålinger	40
Tabell 5.4. Hastighetsforskjeller, matrise nr. 0 og matrise nr. 1	44
Tabell 5.5. Presskraft og skjæspenningsmålinger	48

Kapittel 1

Introduksjon

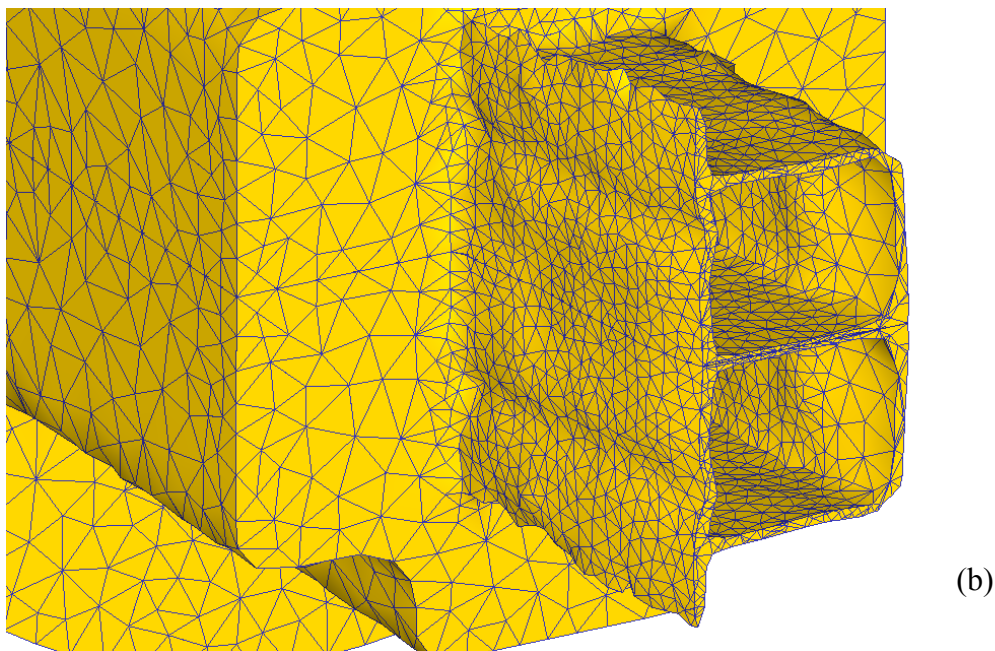
1.1 Bakgrunn

Grunnet hurtig utvikling av datamaskiner og kommersielt tilgjengelige programvarer de siste tiårene har CAD, produktutvikling og produksjon ved bruk av disse hjelpemidlene blitt tilpasset bruk i kommersielle bedrifter og forskning. Bruk av FEM for effektivisering av produksjonsprosesser som ekstrudering av aluminium vokser hurtig i ulike bransjer, dette inkluderer, men er ikke begrenset til bilindustrien, oljeindustrien og elektronikkindustrien. Programvarer som benytter seg av CAD og FEM er spesielt kraftige verktøy for å øke kreativiteten og løsningsrommet til ingeniørene uten å påføre like store kostnader som ved for eksempel laboratorieeksperimenter der det prøves og feiles. FEM-analyser gir unike muligheter til å studere materialflyt og oppdage feil ved verktøy raskere og tidligere i prosessen enn før. Erfaring vil alltid være nødvendig for å kunne evaluere resultatene, men kan komme til kort når det gjelder å finne optimale resultater.

Aluminium har de siste tiårene vært i stort fokus, og spesielt med tanke på miljøproblemer og behovet for å produsere lettvekt produkter. Redusering av vekt til en komponent vil drastisk minke miljøpåvirkningen og redusere kostnadene ved produksjon. Dette gjør aluminium enda mer ønskelig å bruke i produksjon og design av komponenter. Blant egenskapene som gjør at aluminium i dag er et av de mest benyttede metallene i industrien kan det nevnes at det har god korrosjonsmotstand, lav densitet, er resirkulerbart og har høy duktilitet.

Ekstrudering av aluminium er en plastisk formeprosess brukt til å produsere profiler, også kalt ekstrudater. Det kan lages mengder med forskjellige profiler ved å presse varm aluminium igjennom et hull som har svært nær geometri som det ønskede profilet skal ha. I dagens industri er matrisens utforming i stor grad basert på prøving og feiling og designerens erfaring, noe som er med på å redusere effektiviteten til prosessen. For å øke effektiviteten er det viktig å tilegne seg mer kunnskap om materialflyten under ekstrudering. For å tilegne seg slik kunnskap kan numeriske simuleringer være et verdifulle redskap. Disse simuleringene tilfører innsikt og kunnskap om prosessen som på ingen annen, enkel måte kan tilegnes.

I denne avhandlingen blir to profiler ved forskjellige typer ekstrudering simulert for å tilegne bedre forståelse og mer kunnskap om materialflyten. Det vil også bli sett på om avbalansering til jevnmaterialflyt kan oppnås ved bruk av forkammer for et av tilfellene. Tilfellene som simuleres, og



Figur 1.1. (a) Ekstruder U-profil (b) Ekstrudert støtfanger

diskuteres er:

- Et U-profil som det tidligere er gjort eksperimenter på ved bruk av modellmateriale, diplomoppgave utført av Kjetil Vala i 1992.
- Et rektangulært tynnvegd hulprofil med en midtspalte og to utstikkere, som utgjør geometrien til en støtfanger gitt av Benteler Aluminium Systems Norway AS.

1.2 Oppgavens formål

Formålet med avhandlingen er å tilføre leseren økt forståelse og kunnskap om materialflyt ved ekstrudering av komplekse og tynnveggede aluminiumprofiler med bruk av FEM-analyse i DEFORM-3D. En målsetningen er å utføre simuleringer for to de profilene presentert i delkapittel 1.1. Videre skal det vises at man kan avbalansere ujevn materialflyt ved bruk av forkammer for U-profilet. For støtfangerprofilet er målsetningen å tilegne kunnskap om materialflyt ved sveiseekstrudering, for så kommentere brukervennligheten og kvaliteten til resultatene.

1.3 Oppgavens begrensninger

Avhandlingen vil hovedsakelig fokusere på materialflyt med hensyn til grunnleggende teori innen materialflyt i ekstrudering ved bruk av flat matrise med og uten forkammer og porthullmatrise. Bruk av forkammer vil begrenses til å vise at det kan brukes til å avbalansere ujevn materialflyt ut av matrisen, men ikke optimaliseres.

Modellenes utforming er ikke 100 % gjengivelse av verktøy brukt i industrien, men er forenklet. Dette skal ikke ha de største innvirkningen på resultatene, men avvik kan forekomme.

Kapittel 2

Teori

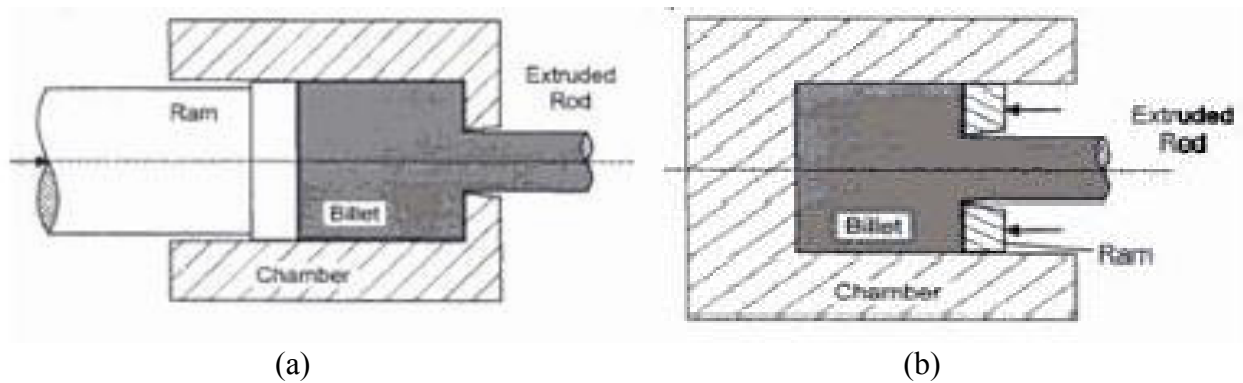
2.1 Historie

Aluminium utgjør en betydelig andel av mineralene i jordoverflaten, men forekommer bare kjemisk bundet som kationisk aluminium, Al^{3+} og oksid. Man antar at aluminium alt i alt utgjør så mye som 8,4 %, noe som gjør at det befinner seg som tredje største mineral på listen over mineralene som utgjør størst del av jordskorpens masse. Aluminium finnes ikke i ren form, og må derfor utvinnes og raffineres før det kan tas i bruk. Nesten all aluminium som produseres i dag, fremstilles fra aluminiumsoksidet bauxitt, som er navngitt etter det første stedet mineralet ble funnet, Les Baux i Sørøst-Frankrike [1].

Bruk av aluminium kan spores så langt tilbake som 300 år f.Kr. [2], men ikke før i 1825 klarte den danske fysikeren H. C. Ørsted å fremstille korn av aluminium, og to år senere oppnådde den tyske kjemikeren F. Wöhler et noe bedre resultat ved fremstilling av aluminiumskorn. Det måtte gå nesten 30 år til før det ble fremstilt en kompakt blokk aluminium, det ble gjort av den franske kjemikeren Henri St.-Claire i 1854. I 1855 ble aluminiumblokken, eller blokken kalt «sølv av leire», en sensasjon på verdensutstillingen i Paris. I 1886 ble det utviklet en økonomisk gjennomførbar prosess for produksjon av aluminium. De to oppfinnerne, Charles Martin Hall i USA og Paul Heroult i Frankrike, oppdaget, helt uavhengig av hverandre, grunnprinsippet for hvordan aluminium produseres i dag. De fant ut at aluminium kunne fremstilles ved hjelp av elektrolyse av en smelte bestående av aluminiumsoksid og mineralet kryolitt, Na_3AlF_6 [1-3].

Aluminium har i løpet av de siste tiårene blitt et av verdens mest brukte metaller, og dette er grunnet dets unike egenskaper. Av de viktigste egenskapene kan det være verdt å nevne dets høye styrke i forhold til vekt, gode korrosjons resistans, gode formbarhet og lave densitet. Det er også resirkulerbart, kostnadseffektivt, har lang levetid og lite vedlikeholdsbehov [2, 4]. Disse egenskapene viser godt hvorfor aluminium spiller en viktig rolle i blant annet produksjon av biler, tog, fly, bygninger, mat- og drikkeforpakninger [4].

Selv om ekstrudering av aluminium, per dags dato har vært i bruk over lengre tid, kan prosessen fortsatt komme til kort, enten det seg være feil i effektiviteten eller kvaliteten på produktene, og dette kan det bli veldig kostbart. Det er derfor viktig at prosessen fortsatt kontinuerlig forbedres [5].



Figur 2.1. Typer ekstrudering (a) Direkte ekstrudering, (b) Indirekte ekstrudering [7]

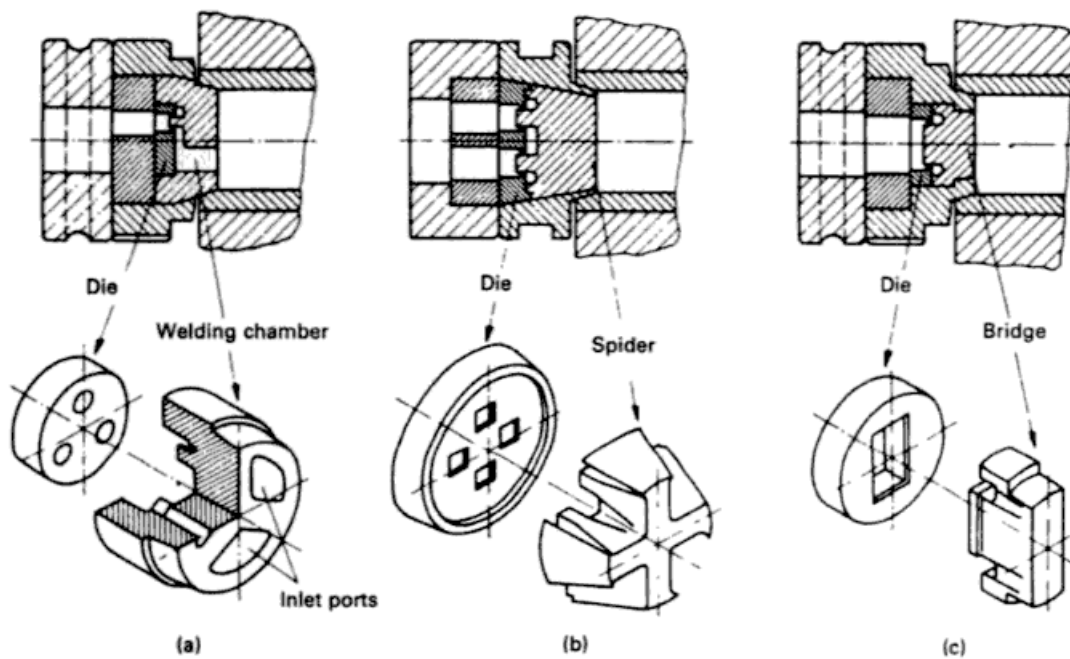
2.2 Prinsipper og terminologi

Ekstrudering av aluminium er en plastisk formgivende prosess. Ved denne formingen har en fire hovedelementer: en rund bolt av støpt aluminium, en kontainer med noe større diameter enn bolten, en matrise og et stempel. Produktene produseres ved at det presses i lengderetningen og kalles for ekstruderte profiler, eller ekstrudater. De ekstruderte profilene som prosessen resulterer i er lange og kontinuerlige, og tverrsnittgeometrien tilnærmet lik matriseåpningen [6]. Ekstrudering av aluminium følger noen enkle, få steg, men aluminium har spesielle egenskaper som gjør at man kan produsere mange forskjellige profiler med komplekse geometrier [5].

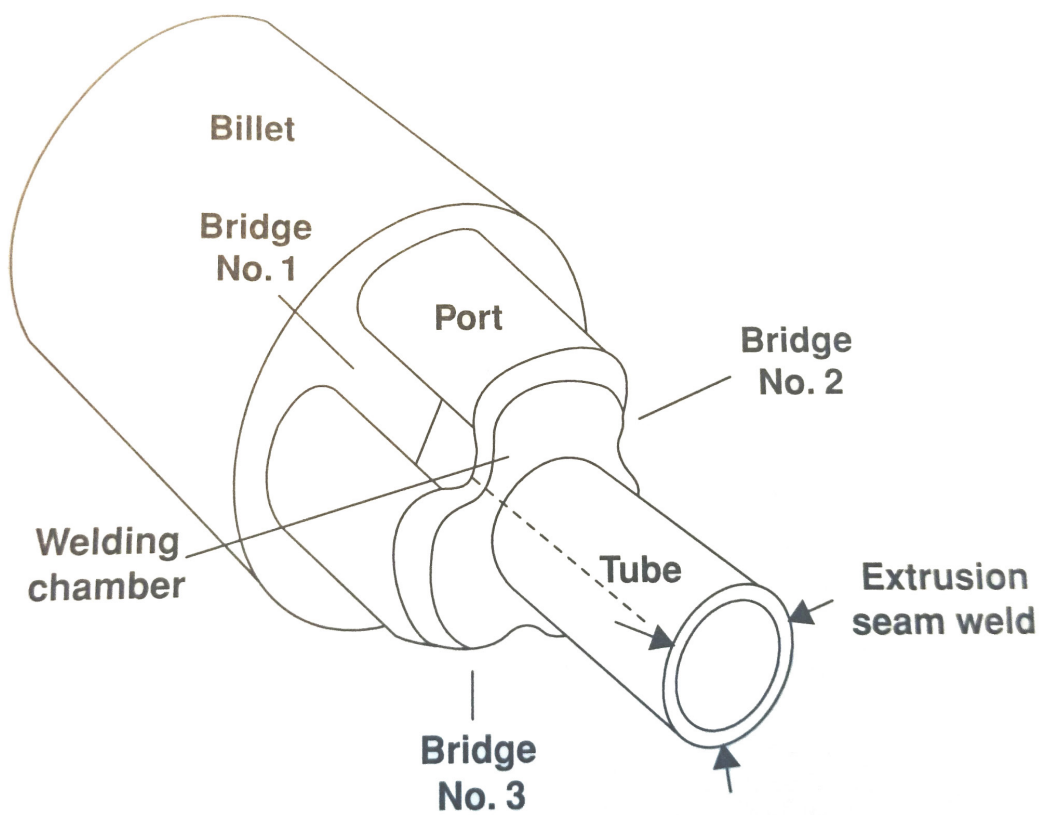
2.2.1 Direkte og indirekte ekstrudering

Ekstruderingsprosessen kan foregå på forskjellige måter, disse karakteriseres hovedsakelig ut fra hvordan verktøyene er satt sammen, og man skiller mellom direkte ekstrudering, også kalt fremover ekstrudering og indirekte ekstrudering, også kalt bakover ekstrudering, se hhv. figur 2.1 (a) og 2.1 (b). Mer konkret skiller metodene fra hverandre ut i fra hvilken vei materialet flyter i forhold til stempellets bevegelse [6].

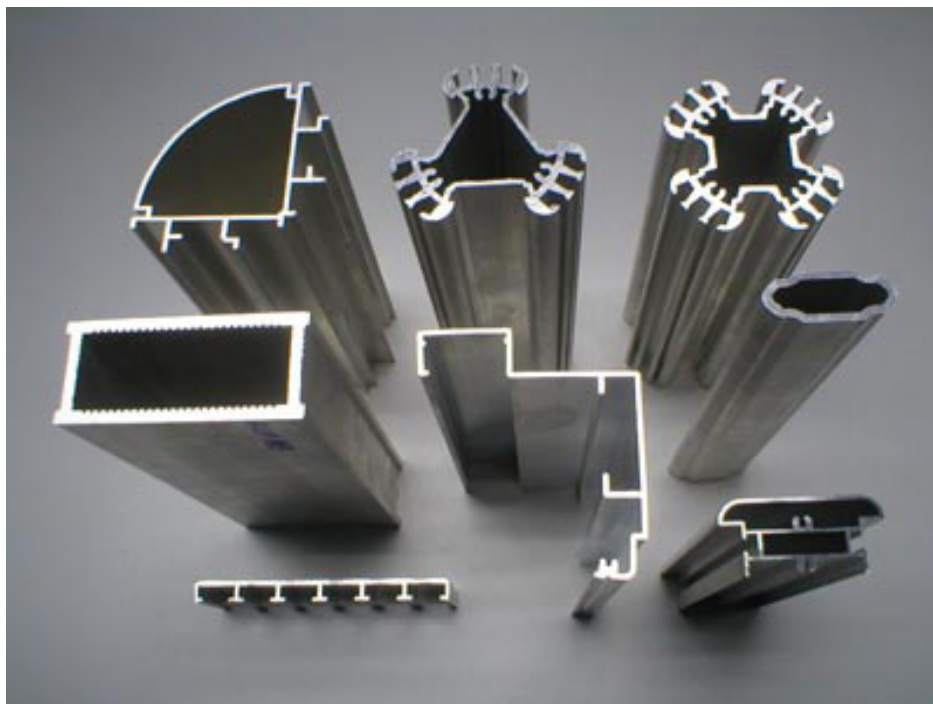
I direkte og indirekte varmeekstrudering av aluminium starter med at en forvarmet bolt som plasseres i en oppvarmet kontainer. Kontaineren er gjerne laget av en stållegering, men den må tåle mye høyere temperaturer enn aluminium. Både temperaturen på bolten og kontaineren varierer, avhengig av hvilken legering bolten består av. Som oftest befinner temperaturen seg i et intervall mellom 400 °C og 500 °C. Dette fordi aluminium i dette temperaturintervallet har lav flytspenning og god formbarhet [6]. Deretter ved hjelp av presskraften fra stempellet vil bolten presses mot matrisen, og når presskraften når et visst nivå vil det initieres deformasjon i materialet som fører til at materialet vil starte å flyte plastisk. Materialet vil først flyte radielt ut mot kontainerveggen, deretter over i eventuelle forkammer, til slutt vil materialet flyte igjennom matrisen. Profilet kan i ettertid varmebehandles eller bearbeides for å oppnå ønskede egenskaper. Forskjellen mellom direkte og indirekte ekstrudering er at matrisen er festet på forskjellige steder. I indirekte er matrisen festet til en stempelstang som presses inn i bolten, mens i direkte ekstrudering er matrisen og stempellet i hver sin ende av kontaineren, som vist i figur 2.1.



Figur 2.2. Hulprofil-matriser (a) porthullmatrise (b) spider (c) bro [5]



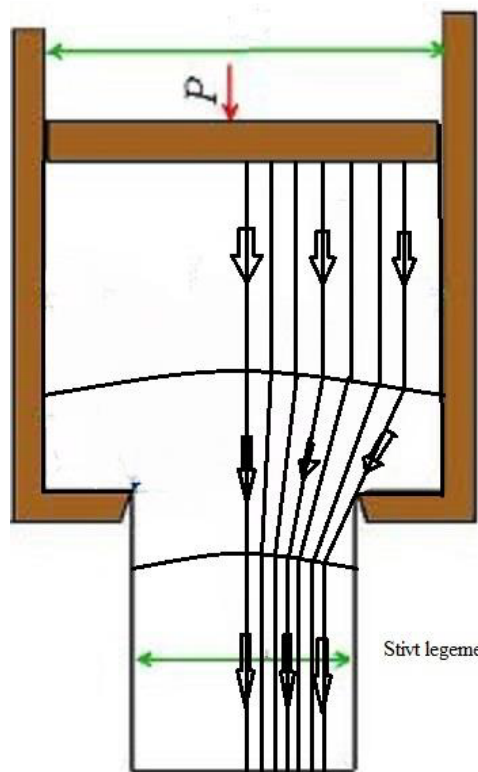
Figur 2.3. Materialflyt sveiseekstrudering igjennom porthullmatrise [6]



Figur 2.4. Forskjellige ekstruderte aluminiumsprofiler [8]

2.2.2 Sveiseekstrudering

Siden aluminium egner seg godt til ekstrudering og har god formbarhet kan man ved en annen form for direkte varmeeekstrudering, kalt sveiseekstrudering, produsere sømløse hulprofiler. Dette blir gjort ved å bruke hule ekstrusjonsmatriser. Tre forskjellige slike matriser vises i figur 2.2 [9]. Felles for matrisene er at de består av en eller flere dorer og broer som holder doren på plass, mens plassering av broene er det som skiller dem fra hverandre. Matrisene er, som man ser i figur 2.2 [9] to-delte. Tilstedeværelse av dor og broer gjør prosessen med å få materialflyten til å flyte igjennom matrisen annerledes enn i direkte ekstrudering beskrevet over. I direkte ekstrudering presses boltene direkte mot matrisen, så kalte flate matriser, men i sveiseekstrudering flyter materialet først over i porthull, hvor materialet splittes inn i materialstrømmer. Materialet strømmer forbi broene som etter passering, møtes i et sveisekammer der de ved trykksveising føyes sammen. Antall sveiser slike hulprofiler har er lik antall porthull i matrisen. Etter sveising flyter materialet ut av mellomrommet mellom matrisen og doren, i figur 2.3 vises materialflyten for en sveiseekstrudering. Her er verktøyet og matrisen fjernet for lettere å kunne visualisere materialflyten [6]. I figur 2.4 vises eksempler på hulprofiler man kan produsere.



Figur 2.5. Stasjonær materialflyt [10]

2.3 Materialflyt

En svært viktig faktor i en ekstruderingsprosess er å ha forståelse for hvordan materialet flyter. Materialflyten legger blant annet grunnlaget for designet til matrisene, men har også stor innvirkning på kvaliteten og egenskapene til det ekstruderte profilet. Partiklene i bolten beveger seg i ulike retninger og det er derfor svært vanskelig å forutsi materialflyten i ekstrudering. Materialflyten kan betraktes på flere forskjellige måter, både ved numeriske simuleringer og eksperimentelt.

2.3.1 Hastighetsfelt

På et grunnleggende nivå kan direkte ekstrudering betraktes som et enkelt tilfelle med et massivt emne, se figur 2.5. Materialet deformeres plastisk i deformasjonssonen før det strømmer videre som et stivt legeme. Det vil etter oppstart dannes et tilnærmet konstant og tidsuavhengig hastighetsfelt i deformasjonssonen. Dette hastighetsfeltet vil bevares igjennom hele prosessen når det sees bort i fra ikke-stasjonære effekter i begynnelsen og slutten av prosessen. Partiklene som har samme avstand fra overflatesjiktet til bolten og som flyter inn i deformasjonssonen vil følge samme partikkelbane [10].

Hastighetsfeltet beskriver dermed hastighetsfordelingen på et gitt punkt i deformasjonsprosessen, og dets endring over tid. [6]. Den generelle tøyningstilstanden er beskrevet av ni tøyningskomponenter, men kan reduseres til seks tøyningskomponenter grunnet parvis likhet for skjærtøyninger.

$$\varepsilon_x = \frac{du_x}{dx} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{du_y}{dy} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{du_z}{dz} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dy} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_z}{dx} + \frac{du_x}{dz} \right) \quad (6)$$

u_x , u_y og u_z er forskyvningskomponentene til materialpartiklene hhv. i x-, y- og z-retningen. Derivering av uttrykkene med hensyn på tid gir oss hastighetskomponentene i de samme retningene:

$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (7)$$

$$v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} \quad (8)$$

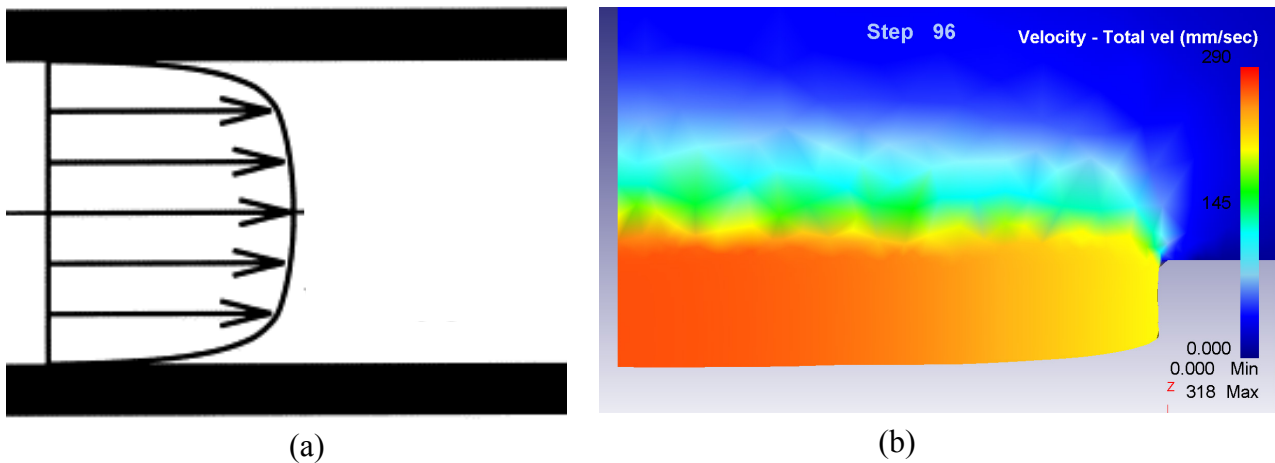
$$v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} \quad (9)$$

Normaltøyningshastigheten blir som følger:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = \frac{1}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (12)$$



Figur 2.6. (a) Forenklet hastighetsfelt (b) inhomogen materialflyt fra prosjektoppgaven

Og skjærtøyningshastigheten:

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \dot{\epsilon}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_{yz} = \dot{\epsilon}_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (14)$$

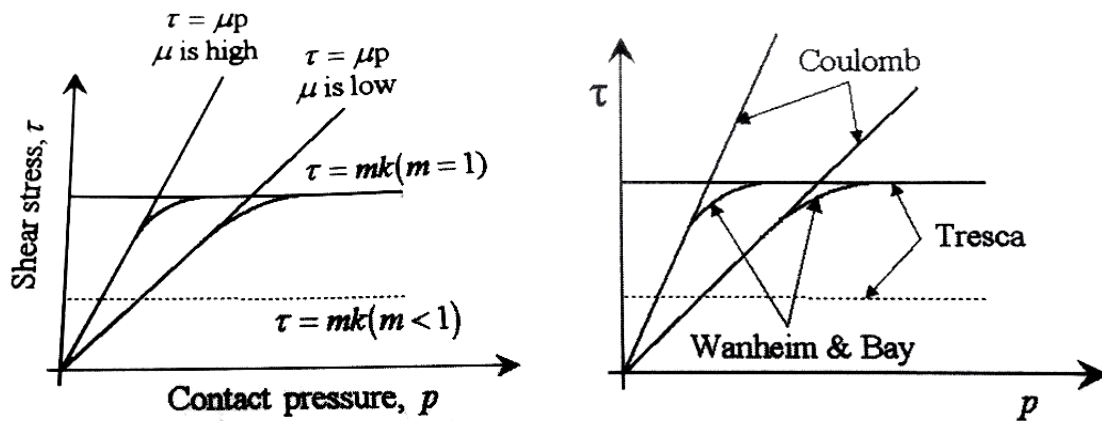
$$\dot{\epsilon}_{xz} = \dot{\epsilon}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Fra disse ligningene fremgår det at i en formeprosess, med kjent hastighetsfelt vil en kunne utlede alle tøyninger og tøyningshastigheter for en materialpartikkel [6].

En simulering av en tynnvegget skinne, med stor bredde i forhold til bolt fra prosjektoppgaven min kan sammenlignes med tilfellet der man har et forenklet og idealisert to-dimensjonalt hastighetsfelt mellom to kanalvegger prosjektoppgave. I figur 2.6 kan man observere at hastigheten nær senteraksen er større enn langs bæreflaten i likhet med kanalveggene. Men grunnet høyt trykk, høy temperatur og store skjærdeformasjoner i materialet er det vanskelig å kvantifisere materialflyt direkte under ekstrudering, profiler med komplekse geometrier har også svært komplekse hastighetsfeltet.

2.3.2 Friksjon

Friksjonen har også stor påvirkning på materialflyten, og kan beskrives ved flere friksjonsmodeller. Blant annet Tresca og Coulomb, se figur 2.7 for modeller. Coulombs friksjonsmodell beskriver hva som skjer mellom to emner når det forekommer glidning, modellen anvendes særlig i prosesser med lavt trykk, det vil si at normaltrykket fra komponenten er mindre eller lik flytespenningen til emnets materiale, $\sigma_n \leq \sigma_0$ [6]. I ekstrudering har man derimot stort trykk, og flytespenningene er mye mindre enn den gjennomsnittlige normalspenningen, $\sigma_0 \ll \sigma_n$, Coulombs friksjonsmodell vil ikke kunne klare å beskrive friksjonen i slike tilfeller, og derfor anvender man Trescas friksjonsmodell i stedet.



Figur 2.7. Friksjonsmodeller [6]

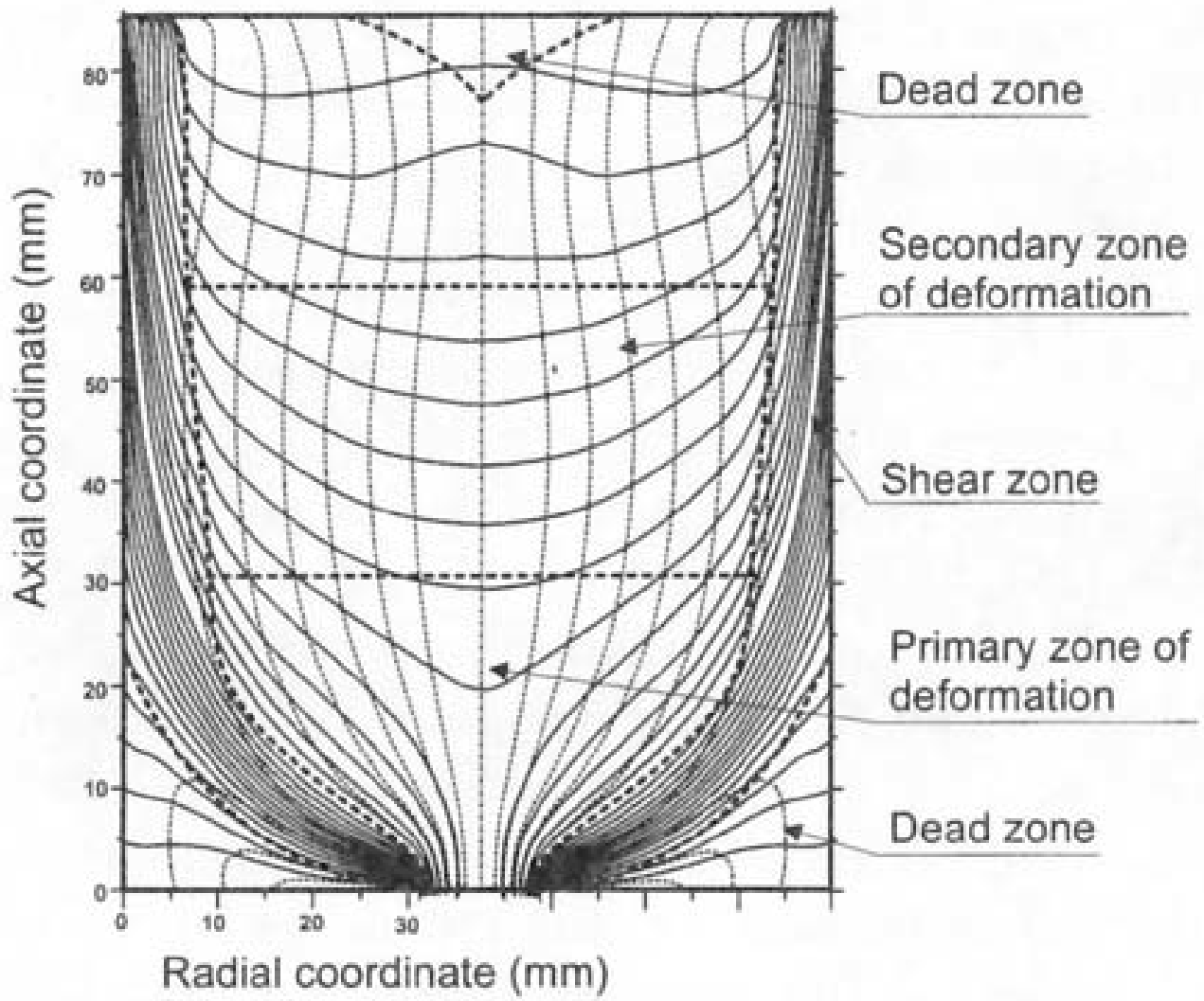
Trescas friksjonsmodell beskriver forholdet mellom to emner der σ_0 er flytespenningen til det bløteste materiale. I varmeeekstrudering er dette boltens, og det er viktig at verktøyet holder seg i elastisk område. Man unngår også å bruke smøremiddel i varmeeekstrudering av aluminium, så når kontaktrykket er like stort som flytespenningen til materialet vil det skape heft langs kontainerveggen[6]. Heftfriksjonen vil være opphav til kraftige skjærdeformasjoner.

Trescas friksjonsmodell uttrykkes på formen:

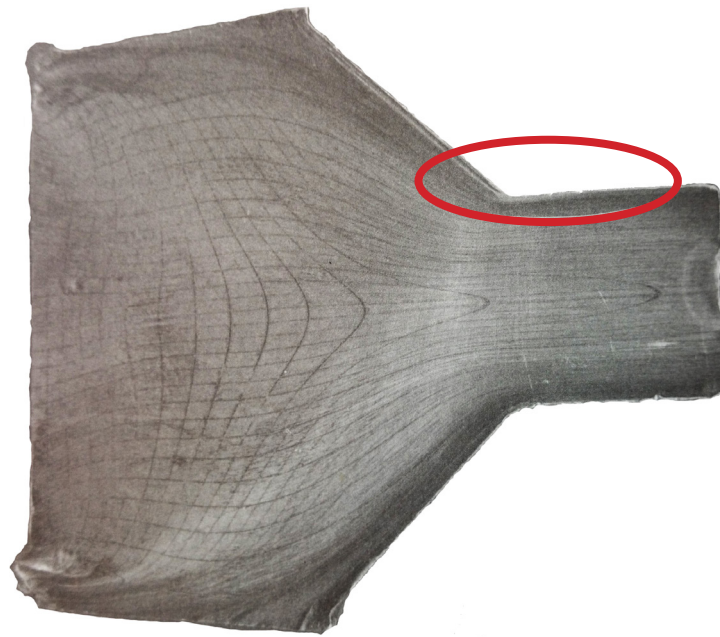
$$\tau = mk, 0 < m < 1 \quad (16)$$

2.3.3 Skjærdeformasjoner og flytsoner

Aluminiumen blir som nevnt utsatt for store skjærdeformasjoner grunnet friksjonen og dette skaper forskjellige deformasjonssoner inne i boltens kjerne vil være det materialet som ekstruderes først, og også hurtigst, grunnet skjærsonene langs kontainerveggen. Skjærsonen dannes grunnet heften i overflatesjiktet, i tillegg til et sub-overflatelag. Skjærkreftene oppstår som følger av heften som gjør at boltmaterialets hastighet bremses ned, og ikke begynner å gli før stampelet er veldig nært. Dette kan også skape dødsoner i området mellom matrisesutløpet og kontaineren. Dødsoner observeres ofte som koniske områder langs stempel og matrise. Materialflythastigheten i dødsonene er lavere enn den hastigheten som er nødvendig for å få materialet til å flyte igjennom matrisen, hvis dette er tilfellet vil materialoppsamlingen i dette området bli værende inne i kontaineren, mens materialet over vil gli forbi dødsonene. Dette er ønsket siden overflatesjiktet i boltens er av dårligere kvalitet enn materialet i senter [6]. I tillegg til dødsoner og skjærsoner opptrer primær- og sekundærdeformasjonssone. Primærdeformasjonssone er området rett over matrisen. Her blir materialet utsatt for store plastiske deformasjoner på veien over i matrisesåpningen, og mens materialet flytter inn igjennom matrisen. Området over primærdeformasjonssone kalles sekundærdeformasjonssone, her er de plastiske deformasjonene mindre, men materialet lengst bort fra senter i sonen er utsatt for noe skjærdeformasjon og man kan se i figur 2.8 at nettverket forlenges i denne sonen.



Figur 2.8. Deformasjon-, død- og skjærsonene som opptrer under ekstrudering [5]



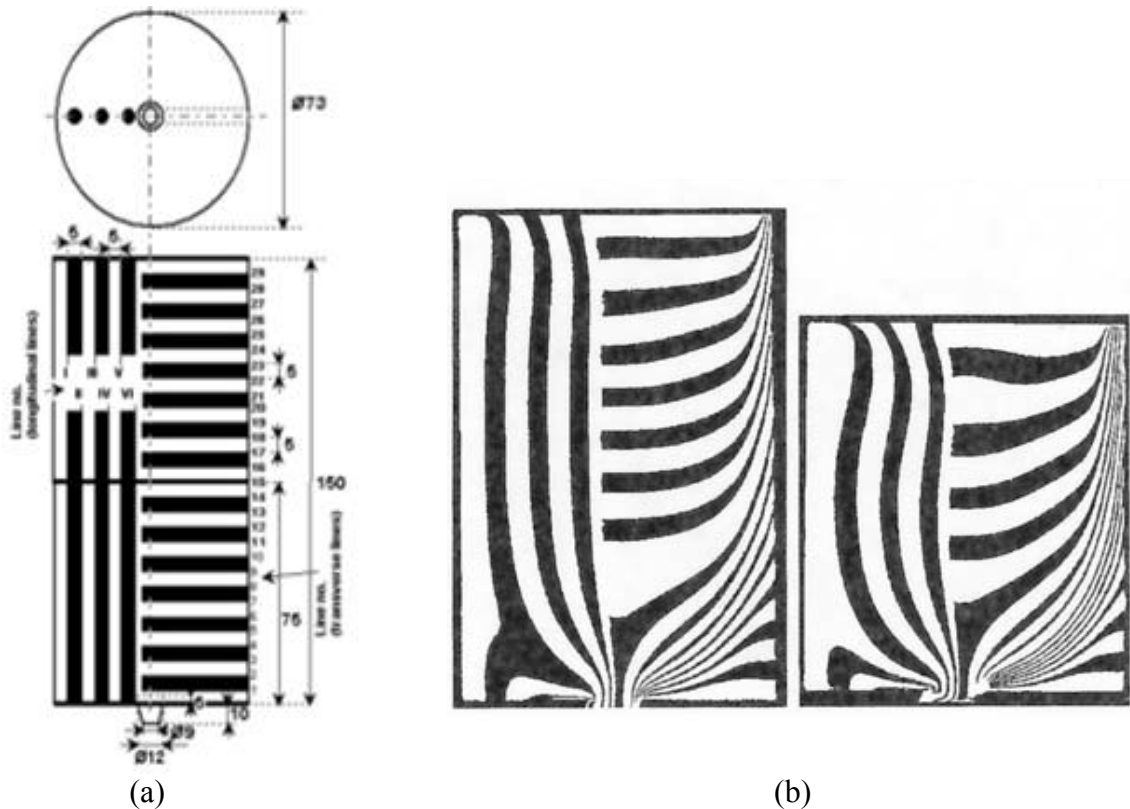
Figur 2.9. Bolt med innrisset nettverk, markert område viser nettverket som er visket ut grunnet store skjærdeformasjoner [6]

2.4 Eksperimentell analyse

Det er utviklet ulike eksperimentelle metoder for å visuelt kunne tilegne kunnskap om materialflyten. Tidligere ble det, i tillegg til laboratorieforsøk, brukt modellmaterialer som plastelina for å se hvordan materialet oppfører seg igjennom prosessen. Aluminium er i likhet som plastelina ikke flytende når det passerer igjennom verktøyet, men grunnet oppvarming er aluminiumen også plastisk formbar [2]. Dette er naturlig nok ikke helt nøyaktig, og viktig å vite at plastelina, voks og lignende modellmaterialer ikke har de samme fysiske egenskapene som aluminium. Spesielt knyttet til effekten temperatur har på flyt karakteristikkene og etter-ekstrudering deformasjon [11].

2.4.1 Nettverksanalyse

En mer nøyaktig måte enn å bruke modellmaterialer for å kartlegge og studere materialflyt i ekstrudering er bruk av nettverksanalyse. I denne metoden benytter man seg av et innrisset nettverk på boltene. Boltene deles først i to i aksesympetriplanet, og et nettverk bestående av kvadratiske elementer risses inn i overflaten til den ene halvdel. Boltene blir så satt sammen igjen, og en delvis eller fullstendig ekstrudering gjennomføres. se figur 2.9. Det brukes gjerne et smøremiddel for å hindre at halvdelene skal sveises sammen, noe som kan gi feilkilder omhandlet materialflyten, da bruk av smøremidler i en ekstruderingsprosess er uønsket. Denne metoden kan også feile ved å gi ikke lesbare resultater da nettverket kan helt eller delvis forsvinne på grunn av de sterke skjærdeformasjonene som virker i skjærsonene, se merket område i figur 2.9[6].



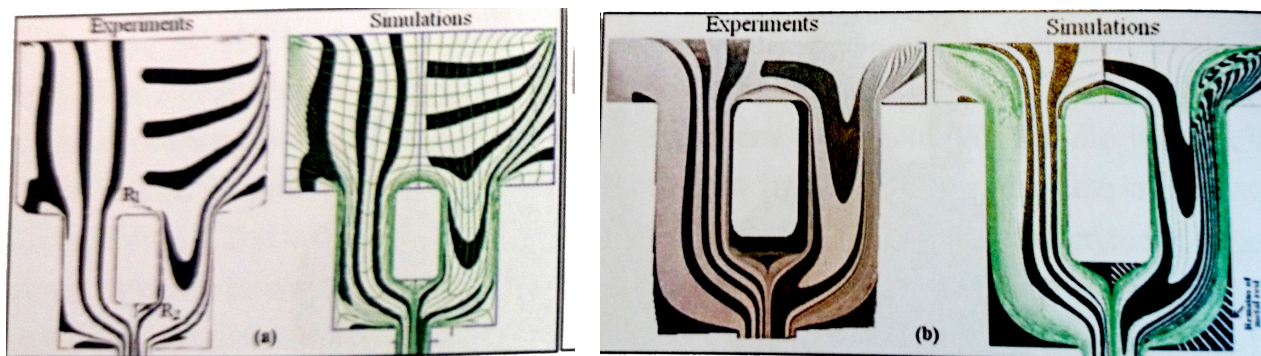
Figur 2.10. (a) Bolt med innsatte kontrastpinner (b) flytmønster som fremkommer ved bruk av kontrastpinner [6]

2.4.2 Kontrastpinner

En annen måte som har bidratt betydelig for forståelsen av materialflyt i direkte ekstrudering er å benytte seg av et stripemønster bestående av innsatte kontrastpinner i bolten. Pinnene er laget av et kontrastmateriale som har lignende fysiske egenskaper som aluminium, men forskjellige kjemiske egenskapet. Kontrastpinnene settes inn både horisontalt og vertikalt i borede hull, se figur 2.10 (a). Ved å gjennomføre en serie ekstruderings, der profilene ekstruderes til varierende lengder, for så å splitte bolten i to, vil illustrerende mønster fremkomme når overflaten etses [12].

Nettverkene som kommer viser hvordan forskjellige deler av materialet i bolten deformeres, dette gir verdifull informasjon om deformasjonenes avhengighet av temperatur og friksjon på vei mot utløpet. I motsetning til innrisset nettverk der deler kan bli helt eller delvis visket ut vil hele nettverket være godt synlig. I figur 2.10 (b) vises hvordan materialet nær matriseutløpet nesten ikke utsettes for deformasjon, hvordan det i midten av bolten hovedsakelig er forlenging, mens materialet mot, og nær kontainerveggen utsettes for kraftige skjærdeformasjoner [6]. Figuren viser også hvordan innrisset nettverk kommer til kort i overflatesjiktet mellom bolt og kontainer.

Simuleringer gjort i DEFORM-2D og 3D har tidligere blitt sammenlignet med nettverk laget på denne måten, og sammenligningene viser at det er godt samsvar mellom eksperimentell og virtuell ekstrudering, se figur 2.11. Nettverksanalyse ved bruk av DEFORM-3D vil bli brukt i denne masteroppgaven for å analysere materialflyten.



Figur 2.11. Likhet i materialflyt mellom fysiske eksperimenter og FEM [13]

2.4.3 Finite Element

Det nyeste innen analyse av metallformingsproblemer er Finite Element Analysis, FEA dvs. bruk av datamaskinverktøyet Finite Element Method, FEM. Denne numeriske beregningsmetoden løser partielle differensiallikninger ved å iterere seg frem til en tilnærmet løsning. En FE-modell består av mange små elementer, også kalt mesh som beskriver hvordan parameterne endres over tid i elementene. Metoden har fått stor anvendelse fordi det stadig kommer sterkere og bedre datamaskiner på markedet, noe som gjør det mulig å simulere forskjellige metallformingsprosesser fra start til slutt. Dette gjør at kostnadene ved testing av et metallformingsproblem går drastisk ned, da man ikke lenger er avhengig av laboratorieeksperimenter. FEA gjør det også mulig å hente ut informasjon om effektiv tøyning, tøyningshastigheter, spenninger, hastighetsvariasjoner, etc. I dette arbeidet har FE-programmet Deform 3D v10.2 er brukt til å sette opp simuleringene for å kunne visualisere en idealisert direkte ekstrudering og sveiseekstrudering. Modellene er prøvd laget så nær til fysiske tester som mulig. Hovedformålet med simuleringene er å se hvordan materialflyten oppfører seg nær, og rundt matriseutløpet. FEA hjelper oss å forstå hvordan materialflyten oppfører seg, og endres over tid.

Aluminium som blir ekstrudert ved høy temperatur har elasto/rigid-viscoplastic oppførsel. De plastiske deformasjonene er mye større enn de elastiske, og deformasjonen igjennom matrisen er essensielt irreversibel. Varm aluminium utsatt for store krefter oppfører seg analogt med et fluid, men responsen er en ikke-lineær funksjon av tøyning, tøyningshastighet og temperatur [5]. Og for å kunne simulere dette, uttrykker man det med Sellars-Tegart hyperbolske sinus lov:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\alpha} \arcsin\left(\frac{Z}{A}\right) = \frac{1}{\alpha} \left(\left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n} + \left(\left(\frac{Z}{A}\right)^{1/n} + 1\right)^{1/2} \right) \quad (17)$$

Der Zener-Hollomon parameteren er gitt av

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (18)$$

$\bar{\sigma}$ er flytspenningen, α og n er temperaturavhengige konstanter, $\dot{\epsilon}$ er effektiv tøyning rate, ΔH er aktiviseringsenergi for deformasjon, R er gasskonstanten og T er absolutt temperatur.

2.5 Korrektive metoder ved matrise utforming

Når materialflytens hastighet varierer over profilets tverrsnitt vil materialet, når det forlater matriseutløpet ha inhomogen, eller ubalansert materialflyt [8, 14]. Faktorer som bidrar til den ubalanserte materialflyten er friksjon i grenseflatene mellom bolt og verktøydeler, materialets flyteegenskaper og stempelets presskraft. Friksjonen mellom kontainer og bolt bidrar til at man har høyere hastighet, v i senter av bolt og lav v langs kontainervegg. Fenomenet kommer spesielt til uttrykk når man ekstruderer et profil med stor bredde i forhold til bolt diameter. I prosjektoppgaven ble dette fenomenet simulert og analysert og i figur 2.12 (a) ser man en tidlig simulering der er godt synlig. Profiler med kompleks tverrsnittgeometri påvirker materialflyten når det er varierende tykkelse over tverrsnittet og hvor utløpet er plassert i forhold til boltsenter. Der profilet er tykkere vil materialet flyte raskere enn områdene der profilet er tynnere.

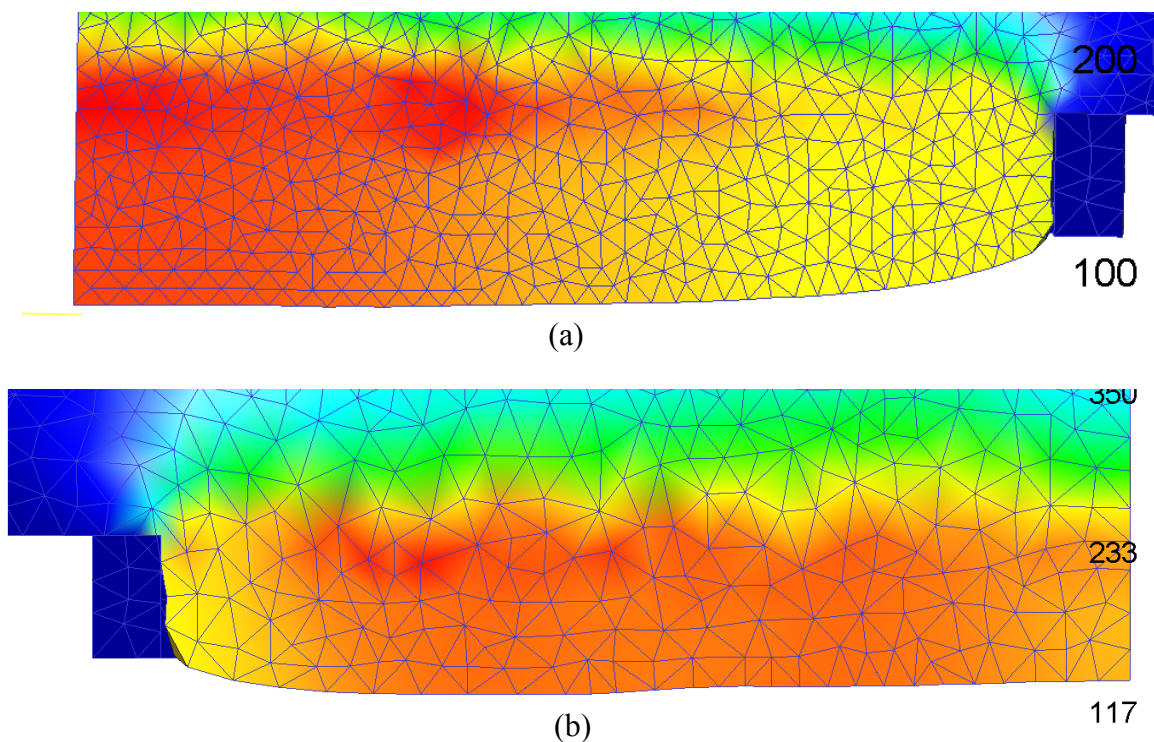
En godt utformet matrise vil forhindre at profilet ender opp vridd eller bøyd. Det vil si at man har et ferdig produsert profil hvor dets geometri er innenfor toleransegrensene. Man oppnår vanligvis dette ved å ekstrudere et profil som har uniform utløpshastighet gjennom hele presset. I praksis oppnår erfarne designere flytkontroll ved bruk av empiriske regler, eller ved prøve og feile metoden [15]. Av metoder relevant for balansering av materialflyten i denne masteroppgaven har man gunstig plassering av åpning i forhold til boltsenter, bruk av forkammer(e) og bruk av friksjonsflater/bæreflater.

2.5.1 Gunstig plassering av åpning i forhold til senter av bolt

Plasseringen av profilets tverrsnittgeometri er viktig for å få en balansert mengde material til å flyte igjennom matrisen. Hvis profilet er symmetrisk, eller har symmetriske partier om en eller to akser bør disse alltid plasseres slik at symmetriaksen går igjennom senter av matrisen. Gravitasjonssenteret til et profil bør plasseres nær matrisens kant da materialet har en tendens til å flyte raskere i dette området [16].

2.5.2 Friksjonsflater

I flate matriser kan man bruke varierende lengde på friksjonsflater, også kalt bæreflater. Ved å variere lengden til bæreflatene i matriseutløpet kan man bremse eller øke materialflythastigheten der hastigheten er for stor eller for lav. Kortere bæreflater i deler av matriseutløpet gir lokalt raskere materialflyt, mens lengre bæreflater gir lokalt redusert materialflyt som følge av friksjon [14, 15]. Dette er en effektiv måte å styre materialflyten, men den økte friksjonen gir større varmeutvikling, noe som reduserer verktøyets levetid og hastigheten på ekstrusjonen. Det er også økt sannsynlighet for at overflatebeskaffenheten ikke blir tilstrekkelig god. Ved bruk av denne måten for å korrigere materialflyten er det mer komplekst å designe matrisen. Det er også vanskeligere å produsere tynnvegget profiler, siden overflatesjiktet mot matrisens bæreflate gir begrenset arbeidsflate [14].



Figur 2.12. (a) Ubalansert materialflyt - flat matrise (b) balansert materialflyt - matrise med forkammer

2.5.3 Bruk av forkammer

Forkammer ble opprinnelig tatt i bruk for produksjon av lange kontinuerlige profiler for å sveise den etterfølgende bolt på tvers mot materialresten fra foregående bolt i forkammeret. På denne måten kunne man kjøre en semi-kontinuerlig ekstrusjon, som førte til at man hadde mindre nedetid i produksjonen og derfor økt produktivitet [14]. I dag brukes forkammeret også til å regulere hastigheten inn mot og ut i matriseutløpet. Når materialet passerer gjennom forkammeret blir det predeformert og materialflythastigheten kommer under kontroll før den når matriseutløpet. For å få en uniform utløpshastighet kan man regulere volumet, vinkel, posisjon og dybde [14].

Matriser med forkammer er spesielt å foretrekke ved ekstrudering av et tynnvegged profil nettopp grunnet pre-deformasjonen, men de er også lettere å maskinere ut, og korrigerer for enn matriser med varierende bæreflater. Denne måten å korrigerer materialflyten er derfor oftest brukt selv om metoden av og til har uheldige effekter. Det brukes av og til en kombinasjon av forkammer og varierende bæreflate i utløpet, spesielt i tilfeller der man har brede, tynnvegget profiler med kompleks geometri. Uansett profil er design av forkammer en svært viktig del for å kunne gjennomføre en vellykket ekstrusjon [14]. I prosjektoppgaven ble denne metoden brukt til å korrigerer materialflyten for å oppnå uniform materialflyt ut av matrisen ved ekstrudering av et skinnprofil. Se figur 2.12 (b).

Design av forkammer er ikke veldokumentert, men svært avhengig av matriseprodusentens eller bedriften som produserer profilene, ekspertise, intuisjon og erfaring. Og systematiske løsninger til design av forkammer er høyt ønsket [14].

Kapittel 3

Prosess- og designbeskrivelse

Unigraphics NX 8.0

3.1 Programvare

I følgende kapittel blir prosessbeskrivelsen for oppbygging og design av modellene gjennomgått, både for U-profilet og støtfangerprofilet. Det vil bli spesielt lagt vekt på design av matrisen og da også bæreflaten. I oppgaveteksten er det uttrykt at modellene fortrinnsvis skal være laget i moduler for enkelt å kunne gjøre geometriske endringer for å se hvordan dette påvirker materialflyten.

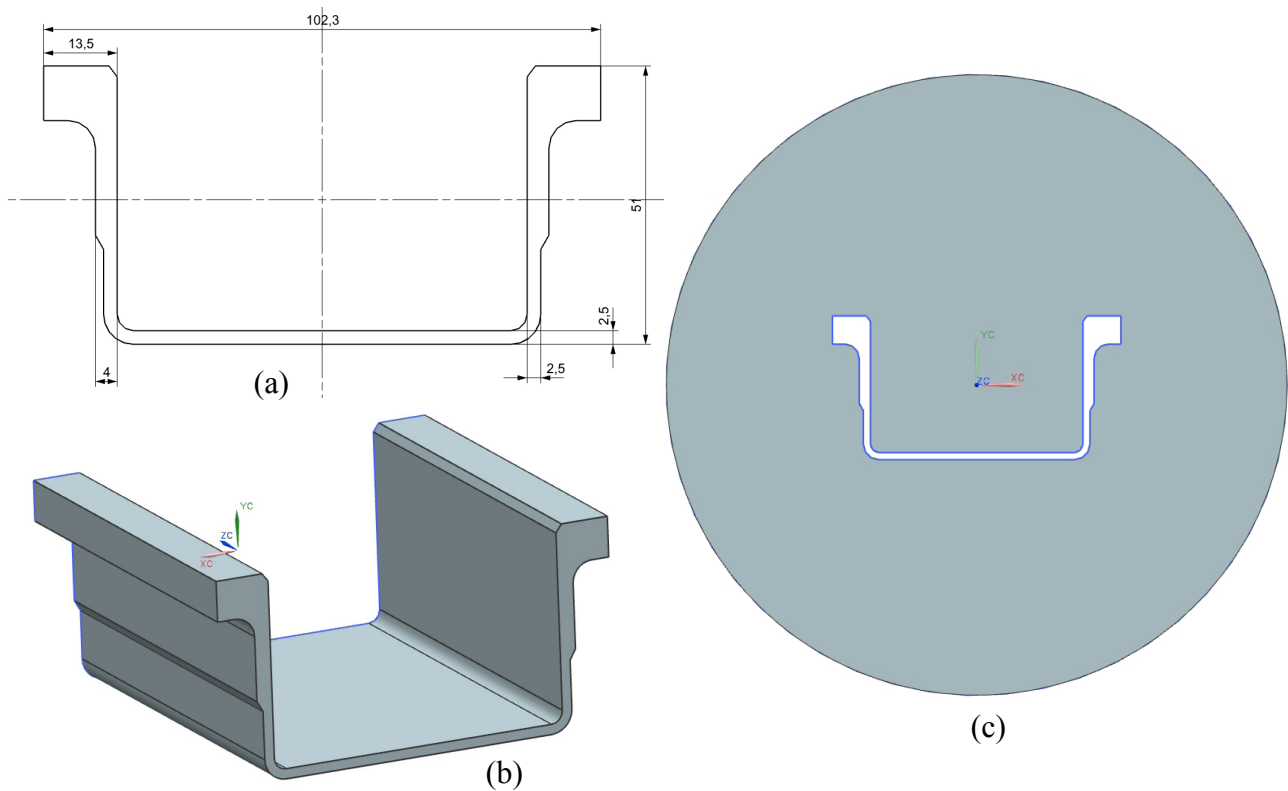
3.1.1 Unigraphics NX 8.0

Unigraphics NX 8.0 er et kraftig verktøy for 3D-modellering og simulering, og i denne oppgaven har programvaren blitt brukt til å designe og konstruere modellene som senere skal gjennomgå FE-analysene. Modellene blir etter oppbygging eksportert til DEFORM-3D som STL-filer.

3.2 U-profil

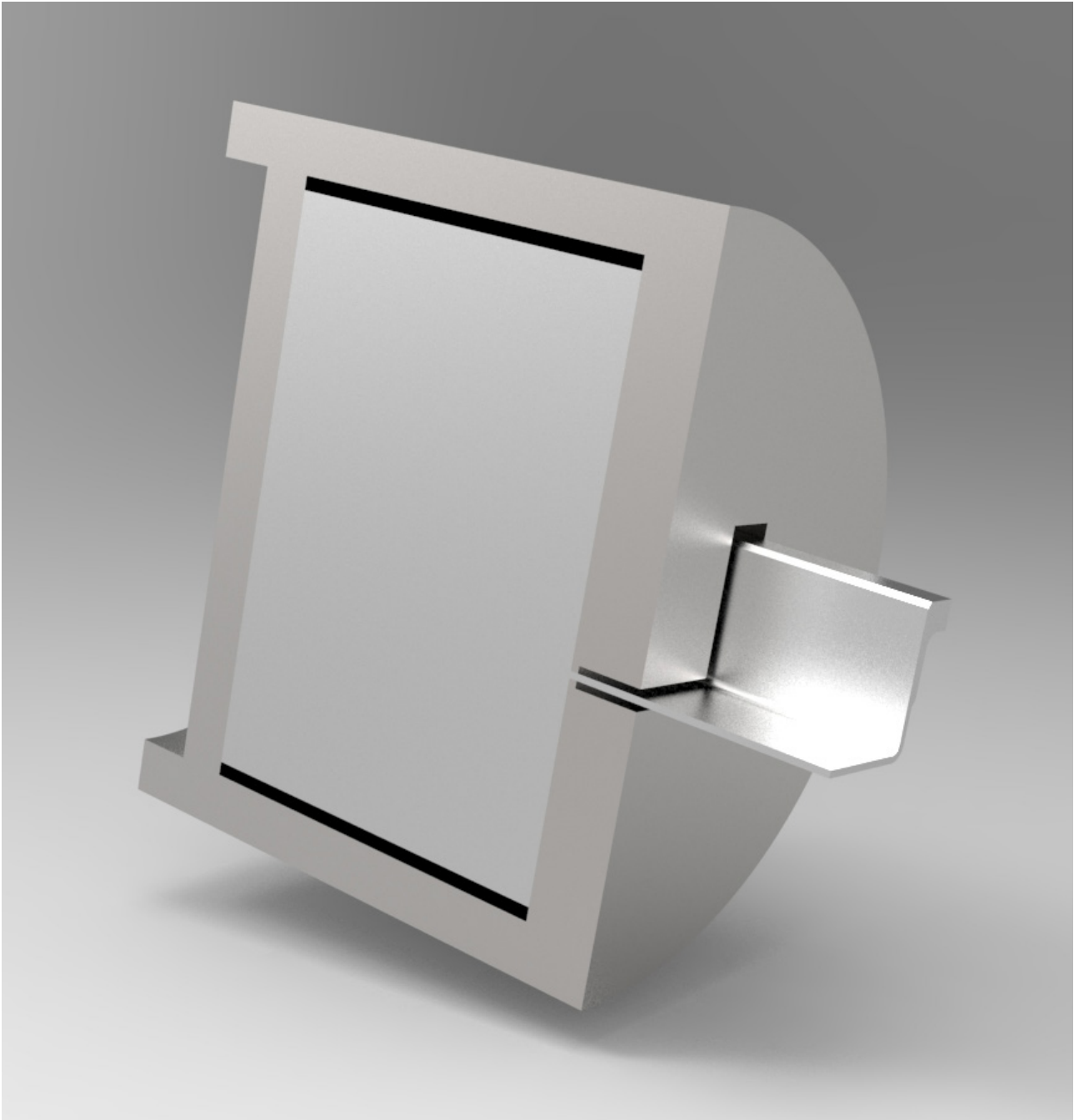
En matrise med forkammer, matrise nr. 1 er modellert for simulering av et U-profil med varierende veggtykkelse over tverrsnittet. U-profilets og forkammertrinnenes geometri er hentet fra en tidligere diplomoppgave skrevet av Kjetil Vala i 1992, "*Optimalisering av materialflyt gjennom ekstruderingsverktøy (aluminium) ved optimalt valg av bæreflatelengder*". For referanse er det laget en flat, matrise nr. 0.

Tynneste veggtykkelse i profilets tverrsnittsgeometri er 2.5 mm og største veggtykkelse er 13.5 mm. Bredden til profilet er 102.3 mm og høyden er 51 mm, profilets geometri er vist i figur 3.1. Begge matrisene har samme verktøyskive som også utgjør bæreflaten med høyde 3 mm, delene er modellert hver for seg, for å gjøre det lettere å legge på og å endre friksjonen i utløpet. Kontainerens ytre og indre diameter er hhv. lik 260 mm og 220 mm, bolt diameter lik 210 mm, se for øvrig tabell 3.1 for skjematisk oppsett av modell geometri. Med tanke på verktøyenes virkelige kompleksitet er de noe forenklet uten at det skal ha for stor innvirkning på resultatene, dette er etter samtale med veileder i forbindelse med prosjektoppgaven. De grunnleggende forskjellene til hver enkelt matrise er beskrevet i følgende delkapitler.



Figur 3.1. (a) Målsatt tverrsnittgeometri (b) 3D-modell profil (c) Verktøyskive + bæreflate

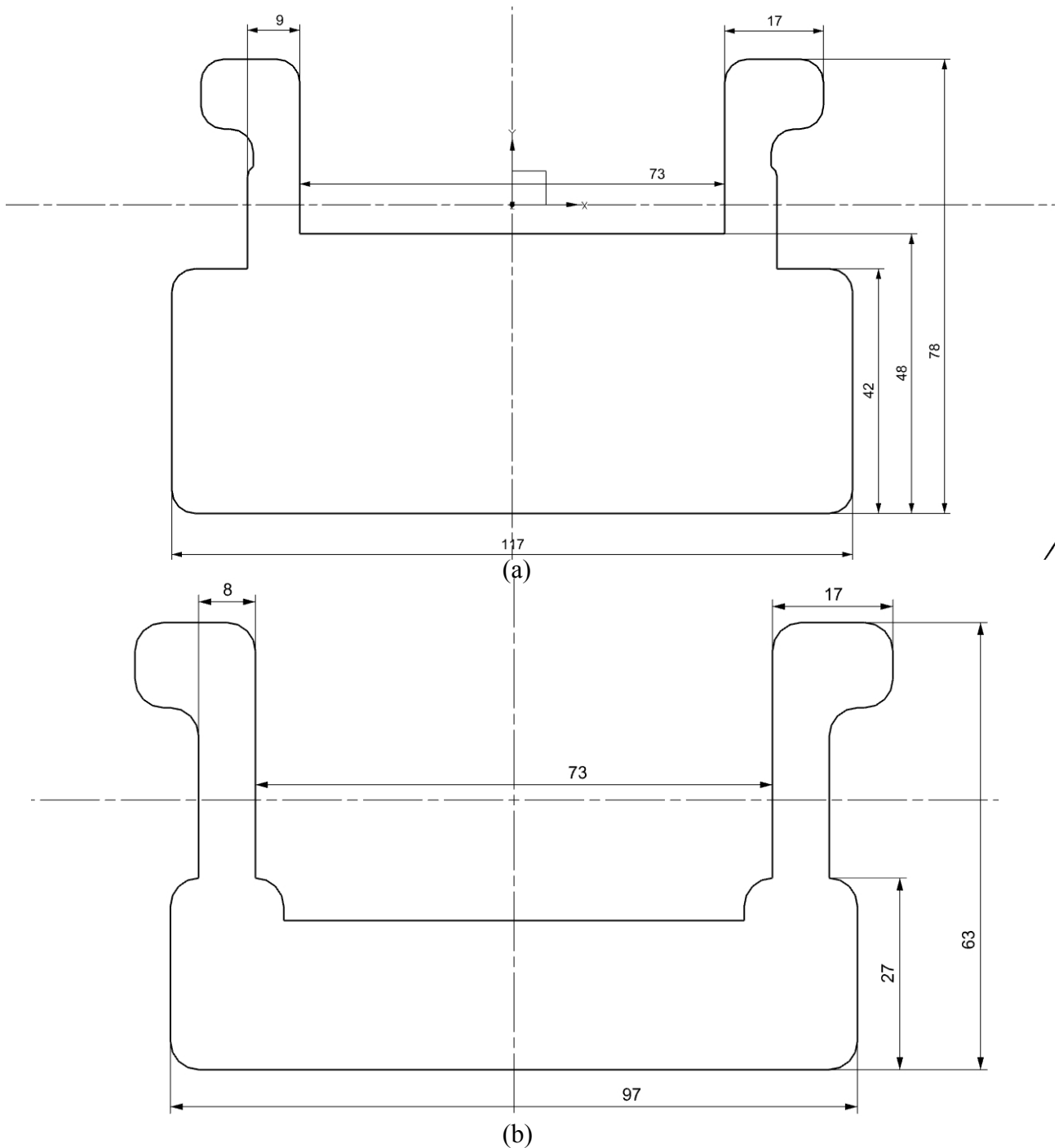
Tabell 3.1. Modellgeometri: U-profil	
Verktøyskive diameter [mm]	220
Verktøyskive/bærflate høyde [mm]	3
Matrise (understøtte) høyde [mm]	25
Forkammertrinn 1 høyde [mm]	6
Forkammertrinn 2 høyde [mm]	6
Boltdiameter [mm]	210
Boltlengde [mm]	150
Kontainer indre diameter [mm]	220
Kontainer ytre diameter [mm]	260
Stempel diameter [mm]	220
Profilbredde [mm]	102.3
Profilhøyde [mm]	51



Figur 3.2. Modelloppsett med ekstrudert profil, snittet i symmetriplanet.

3.2.1 Matrise nr. 0

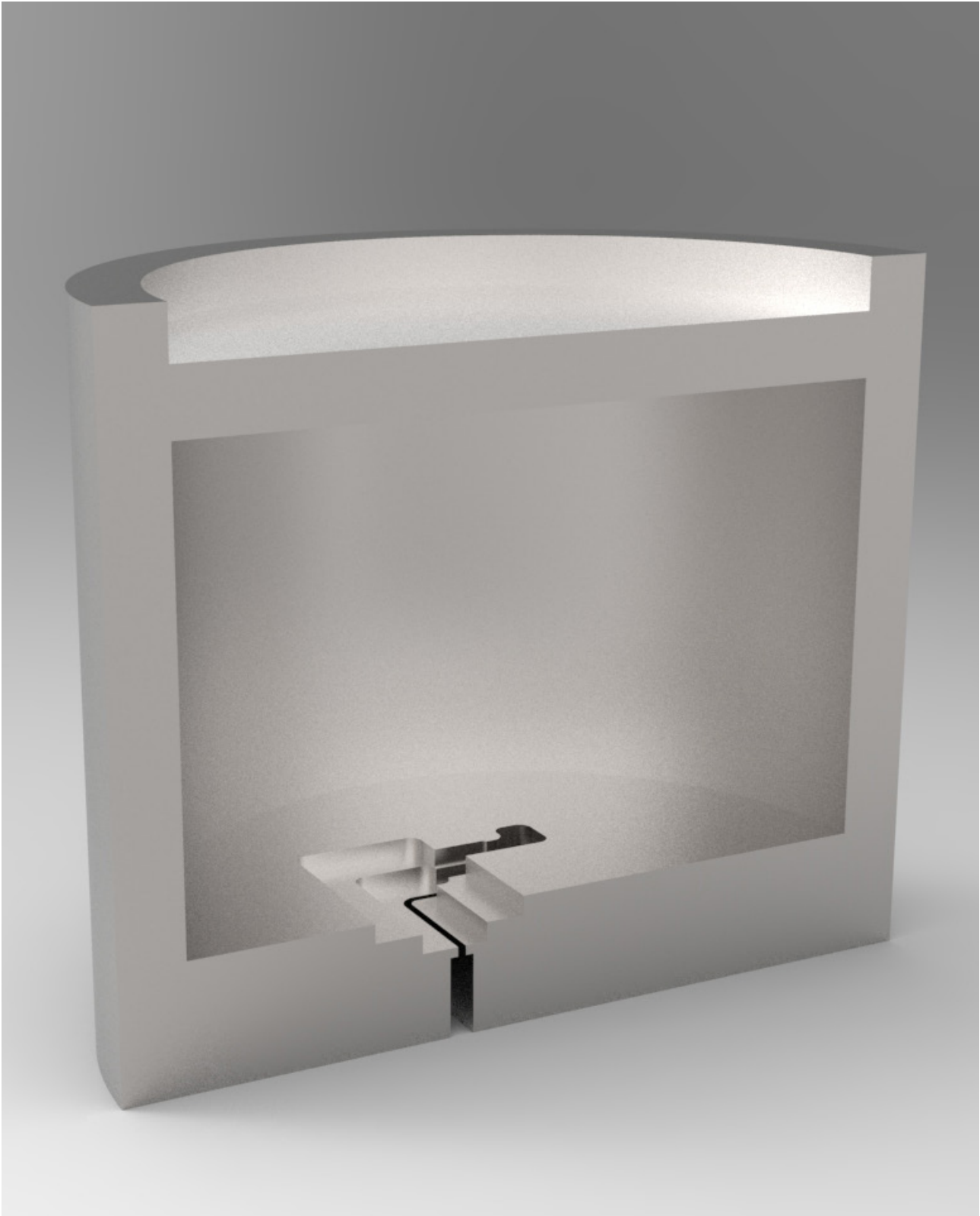
Matrise nr. 0, er en flat matrise uten forkammer, den er ment å vise karakteristikene til materialflyten med inhomogenitet over profilets tverrsnitt. Modellen er derfor enkel og består av stempel, kontainer, bolt og matrise. Matrisen i denne modellen består av verktøskive, understøtte og bæreflate, se figur 3.2 for modelloppsett og ekstrudert profil. Matrisen og bæreflaten utgjør profilets endelige geometri. Resultatene fra simuleringen er forventet å tilføre nyttig informasjon for videre design av matrise med forkammer og diskusjon av resultater.



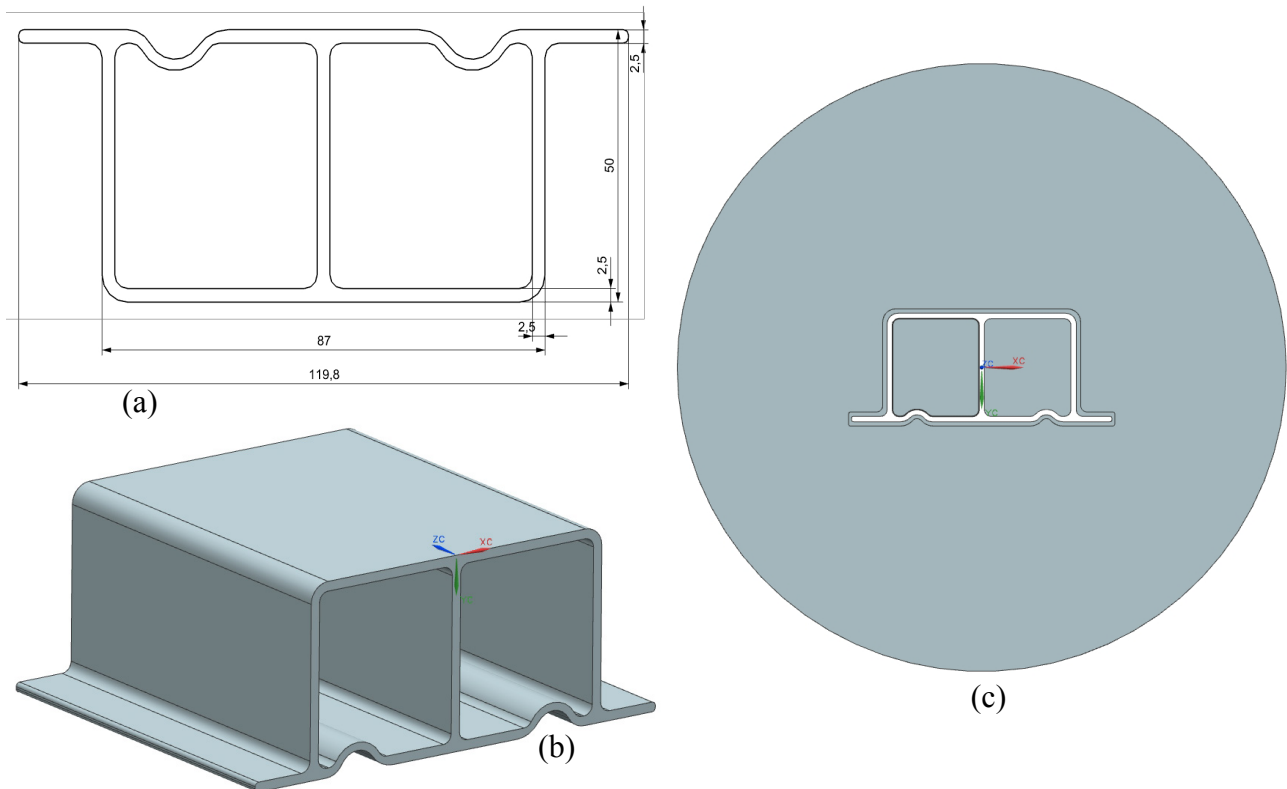
Figur 3.3. (a) Første forkammertrinn (b) Andre forkammertrinn

3.2.2 Matrise nr. 1

Matrise nr. 1 er modellert ut i fra maskintegninger i diplomoppgaven, se figur 3.3 (a) og (b) for målsatte tegninger av forkammertrinn. Forkammerne er designet med utgangspunkt i P. og A. Rodriguez' system for kalkulasjon av forkammergeometri. Et system som skal kunne benyttes for hulprofilverktøy og verktøy for massive profiler [17]. En dypere innføring kan leses mer om i nevnt masteroppgave. I figur 3.4 vises modellen i sin helhet.



Figur 3.4. Modelloppsett snittet i symmetriplanet.



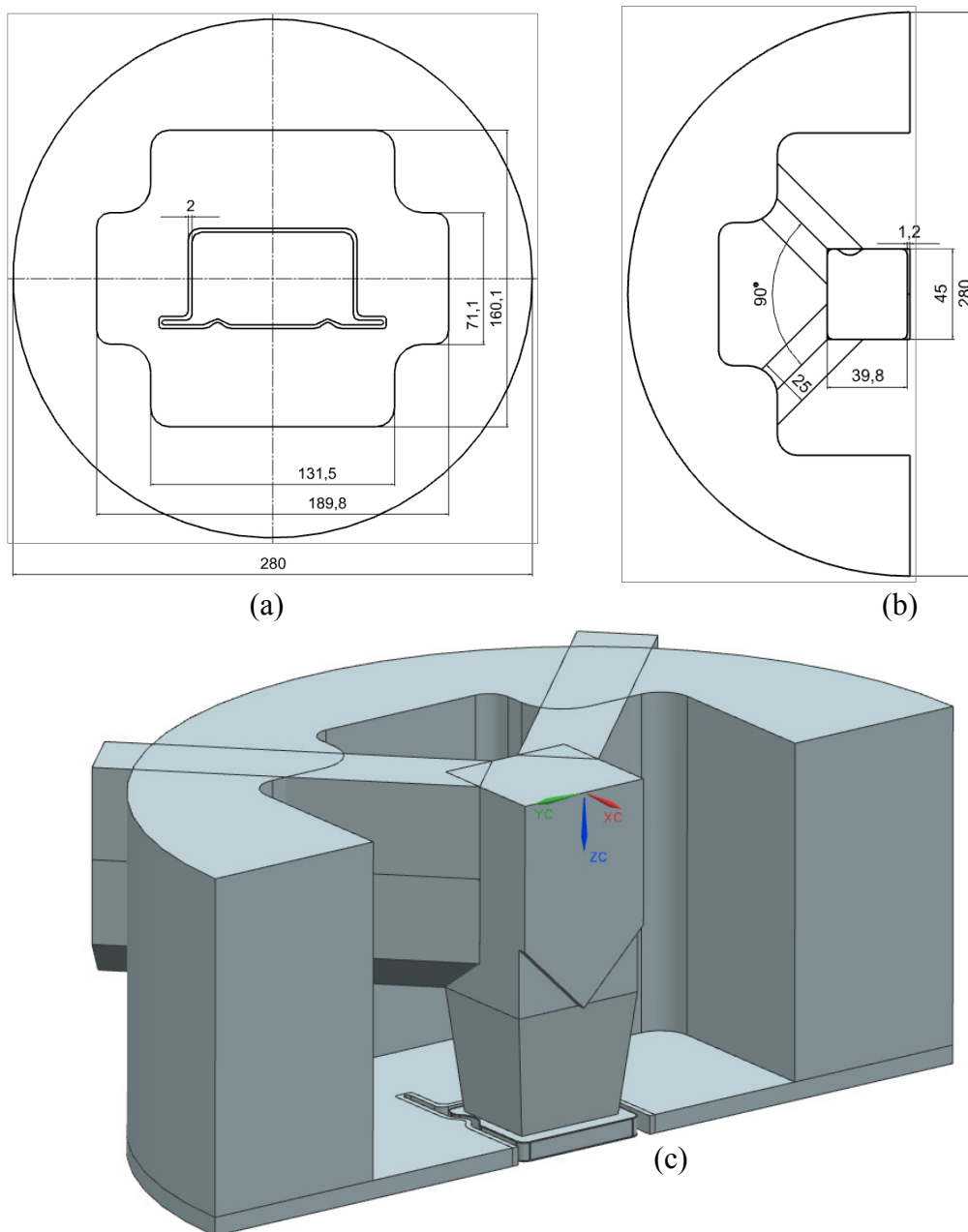
Figur 3.5. (a) Målsatt tverrsnittsgeometri (b) 3D-modell profil (c) verktøyskive + bæreflate med dor for å angi profilets endelige geometri

3.3 Støtfanger

I dette delkapittelet gjennomgås design og oppbygning av matrisen til simulering av ekstrudering av et tynnvegde støtfangerprofil gitt av Benteler Aluminium. I figur 3.5 (a) ses geometrien og dimensjonene til støtfangerprofilen som skal analyseres. Tykkelsen, t er satt til å være lik 2.5 mm over hele tverrsnittet, noe som er en forenkling gjort i samsvar med mailkorrespondanse med kontaktperson, Gerda Nubdal i Benteler. Støtfangerprofilen er i likhet med U-profilen symmetrisk i ZY-planet. I oppgaven er det gitt at det skal legges vekt på at modellen er laget i moduler for å enkelt kunne endre deler for å se hvordan dette påvirker ekstruderingsbetingelsene. Det ble også gitt tilgang til en modell fra en prosjektoppgave i høst for et konkret tilfelle av sveiseekstrudering. Forsøk på å tilpasse den ble gjort, men det ble tidkrevende arbeid og derfor enklere å bygge en ny modell.

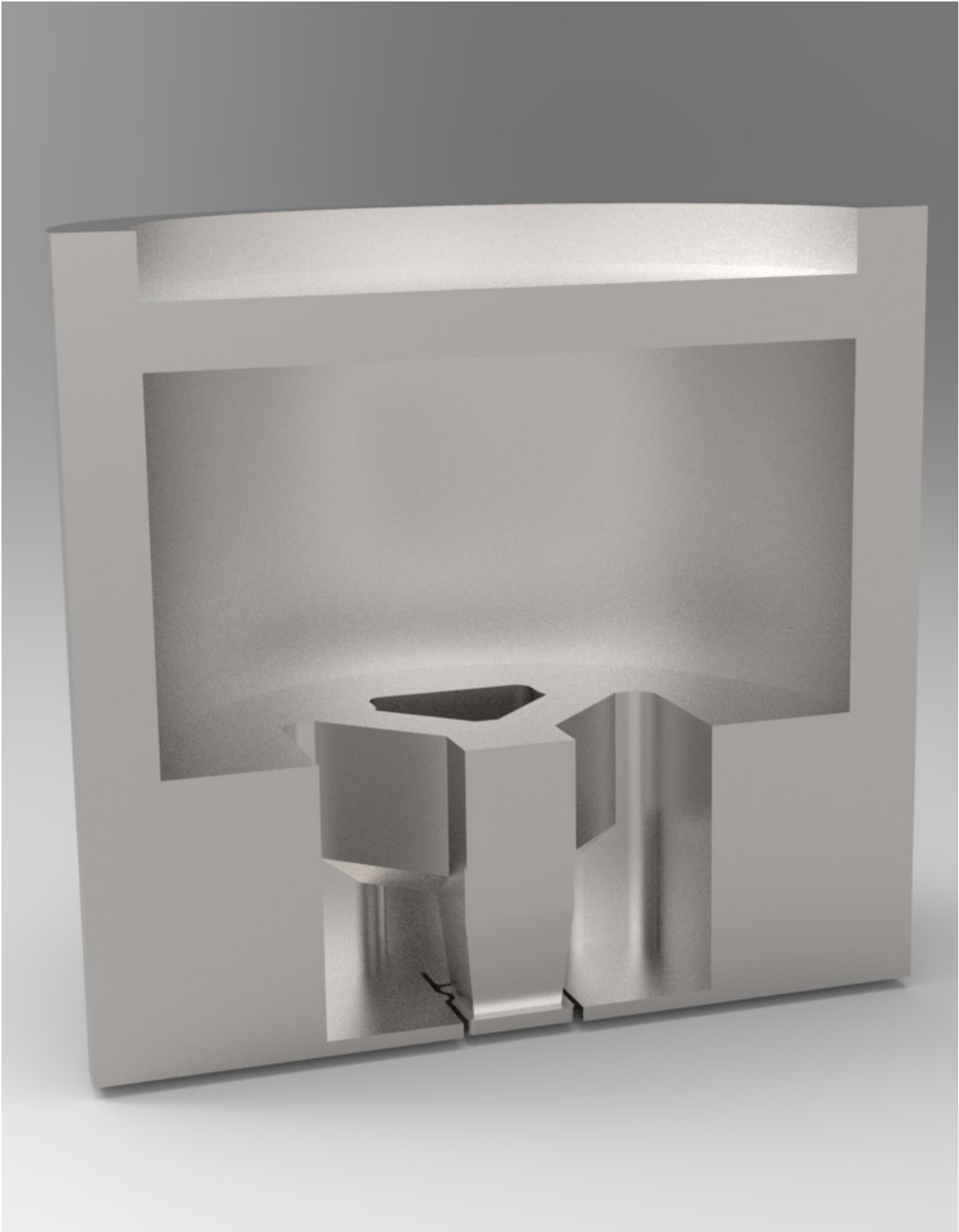
3.3.1 Porthullmatrise

I dagens industri er det vanligst å bruke flate porthullmatriser for ekstrudering av hulprofiler. Porthullmatriser egner seg godt til ekstrudering av bløte aluminiumslegeringer. En flat porthullmatrise består av fire hovedelementer: en nedre matrise, en øvre matrise, lokasjons pinner og bolter. Lokasjonspinnene og boltene brukes for å feste øvre og nedre del av matrisen sammen, og er ikke relevant for simuleringene og er derfor sett bort ifra. Den øvre matrisen består av porthull, portbroer og en dor. Porthullene er hull, eller kanaler som materialet strømmer igjennom, broene er braketter



Figur 3.6. (a) Nedre halvdel av matrise (b) Øvre halvdel av matrise (c) Modulbasert porthullsmatrise, øvre og nedre del sammensatt

som støtter opp og holder doren på plass i senter av matrisen. Doren brukes til å formgi profilets indre form og dimensjoner. Den nedre delen av matrisen består av et sveisekammer og matriseutløpet med bæreflater. Sveisekammeret brukes til å samle og sveise sammen materialstrømmene som har passert porthullene til et materialemne igjen. Ved fylling av matrise vil materialet akkumuleres gradvis i sveisekammeret noe som gjør at det indre trykket øker gradvis, tilslutt har trykket økt såpass at materialet flyter ut av matriseåpningen. Når materialet flyter igjennom åpningen mellom doren og bæreflatene gir bæreflatene profilets ytre dimensjoner og form, samt regulerer materialflythastigheten. I figur 3.x (a) og (b) vises 2D-tegninger av øvre og nedre halvdel og (c) 3D -modell av øvre og nedre halvdel av matrisen sammensatt, og i figur 3.x vises modellen i sin helhet.



Figur 3.7. Modelloppsett porthullmatrise, snittet i symmetriplanet.

Kapittel 4

Prosessbeskrivelse for oppsett av modeller i DEFORM-3D

4.1 Programvare

DEFORM-3D er et kraftig prosess simuleringsverktøy som er designet for å analysere tredimensjonal flyt i komplekse materialformingsprosesser [18]. Programvaren er basert på elementmetoden, og er derfor kapabel til å simulere metallformingsprosesser i ikke-stasjonær tilstand [5]. DEFORM har igjennom to tiår vist seg å være nøyaktig og robust til industriell bruk. Alle simuleringene er gjort i programvaren DEFORM v10.2 3D.

DEFORM-3D består av tre hoveddeler: preprosessor, simulator og postprosessor. I preprosessoren settes modellen sammen, enten ved å tegne dem direkte inn, eller importere filer laget i et annet program, i dette tilfellet er det modellene laget i UGS NX 8.0. Alle betingelser og data som kreves for å kjøre simuleringen defineres her før man genererer databasen som simuleringen kjøres fra. Simulatoren henter data fra databasen og kalkulerer simuleringen. Postprosessoren er der brukeren henter simuleringsresultatene for videre analyse.

4.2 Oppsett av modeller: U-profil

4.2.1 Felles betingelser

FE-simuleringene er kjørt med halve bolten og matrisen grunnet modellens symmetri om z-aksen i ZY-planet, dette sparer RAM og beregningstid. Boltene har plastisk oppførsel. Boltmaterialet er aluminiumslegeringen AA6005 som har optimaliserte flytdata, denne er gitt av veileder da det ikke er gode flytespenningsdata for aluminiumslegeringen Al6082 i DEFORM-3D. Matrisen og andre deler av ekstruderingsverktøyet ble antatt å være stivt og laget i ASIS-H-13 stål. Boltens og verktøyenes temperatur er satt til 430 °C.

I ekstruderingsprosessen er det friksjon mellom kontainer, matrise, stempel og bolt, og Trescas friksjonsmodell er antatt å representere friksjonen, som gjennomgått i avsnitt 2.3. Simuleringene er alle kjørt noen få step uten friksjon, $m=0$ for å få fylling av kontaineren, deretter er det som i praktisk varmeeekstrudering ikke brukt smøremiddel, følgende er friksjonsfaktoren satt til $m=1$. Dette tilsvarer

Tabell 4.1. Prosessparametere og bolt dimensjoner brukt i FEM-simuleringene	
Bolt materiale	AA6005
Matrise- og annet verktøymateriale	H13
Bolt lengde [mm]	150
Bolt diameter [mm]	180
Start temperaturer [°C]	
Matrise	430
Stempel	430
Kontainer	430
Bolt	430
Bæreflate	430
Friksjonsfaktor	
Mellom bolt og bæreflate	0.6
Mellom bolt og annet verktøy	1
Stempel hastighet [mms⁻¹]	
Step inkrement	0.3
Varmeoverføringstall	11

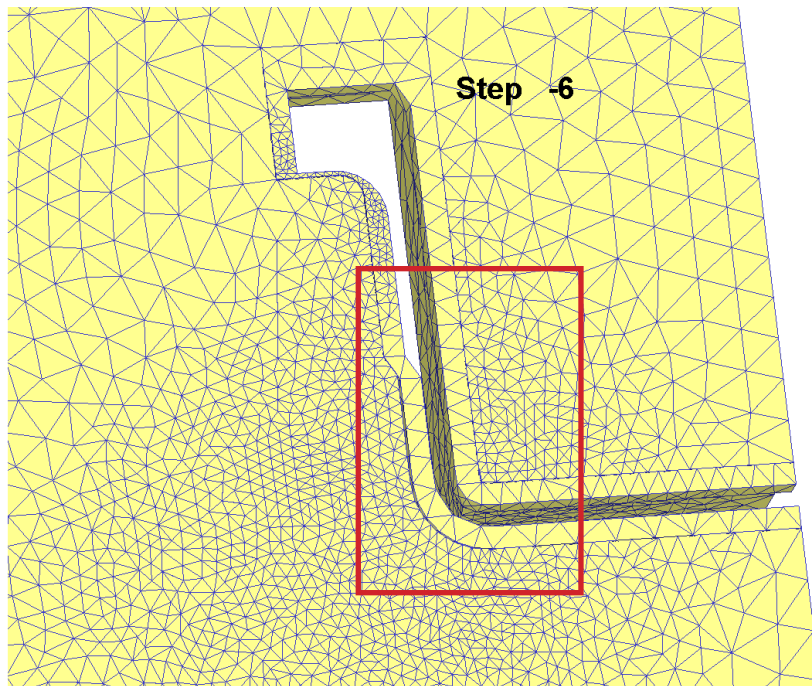
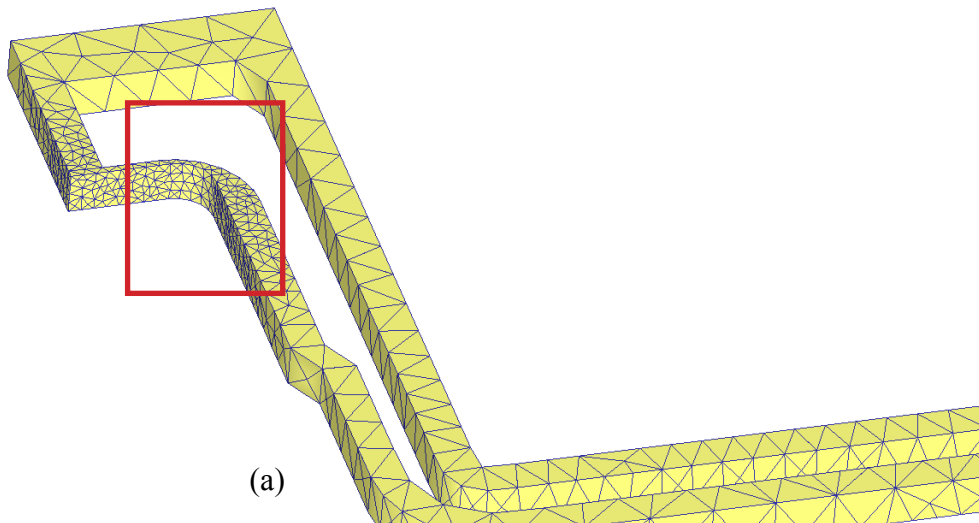
heft mellom bolt, stempel og matrise. På bæreflaten er friksjonsfaktoren satt til $m=0.6$. I samråd med veileder er varmeoverføringstall er satt lik 11. Ekstruderingsbetingelsene brukt i FEM simuleringene, og også friksjonsfaktorene er spesifisert i tabell 4.1.

Ved simulering av et tynnvegget profil er oppsett av bæreflatene mer komplisert. Dette området er mye mindre enn sammenlignet med resten av verktøyet, men deformasjonene og hastighetene er store i dette området. For å få korrekt gjengivelse av bæreflaten det nødvendig med et fint mesh, noe som krever lang beregningstid. Dette er løst ved bruk av funksjonen mesh window i området på og rundt bæreflaten. Mesh window er en funksjon som forfiner meshet i markerte områder, dette reduserer beregningstiden betraktelig enn hvis hele modellen skulle hat like fin mesh. I alle modellene er denne funksjonen også brukt på bolten der den glir over i utløpet og igjennom i matrisen. Nøyere beskrivelse av mesh er gitt under de respektive delkapitlene.

4.2.2 Matrise nr. 0

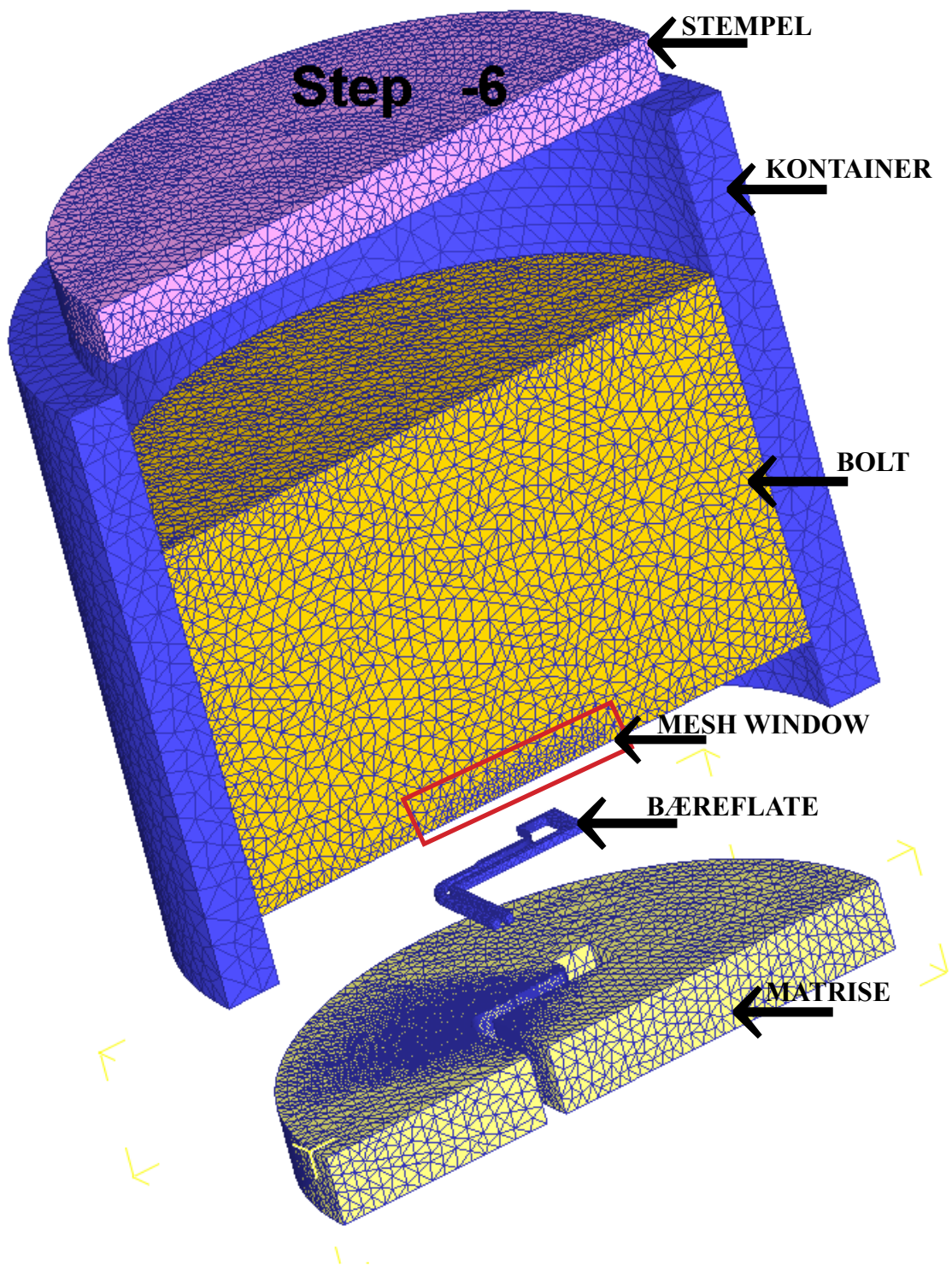
I figur 4.2 viser hvordan modellen er satt sammen og meshet for simuleringen, tabell 4.2 viser hvor stort eller fint meshet til de forskjellige delene er. Det er spesielt brukt fint mesh på bæreflaten og i områder der verktøyskiven er i kontakt med bæreflaten, dette fordi disse områdene har geometrier som er detaljrike i forhold til resten av modellen, se figur 4.1 (a) og (b). Alle modelldelene er importert hver for seg som STL-filer for å enklere kunne endre ekstruderingsbetingelser og sette opp individuelle mesh.

Step -6

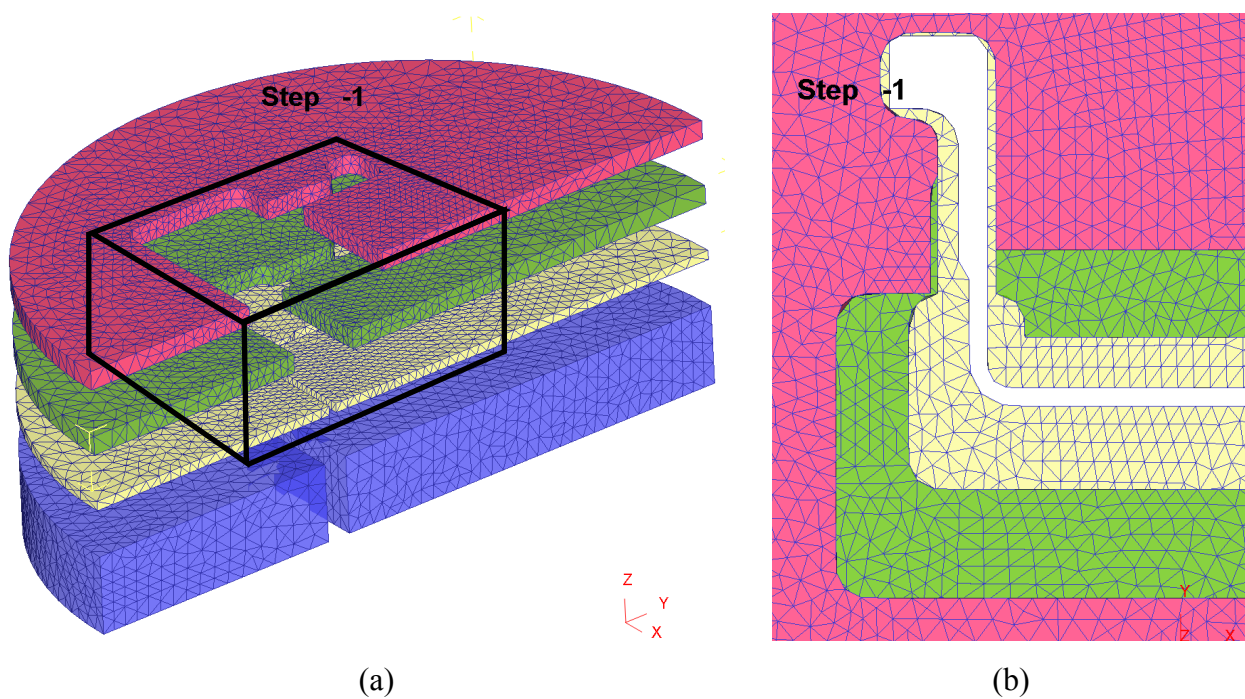


Figur 4.1. Close- up mesh og "mesh window" (a) bæreflate (b) matrise

Tabell 4.2. Mesh beskrivelse: Flat matrise			
Verktøy del	Noder	Surface Polygons	Elementer
Stempel	6223	6376	26936
Kontainer	5902	6598	24953
Matrise	12518	10326	58048
Bæreflate	3606	4932	13405
Bolt	18117	13062	86062



Figur 4.2. Eksplodert modelloppsett, flat matrise

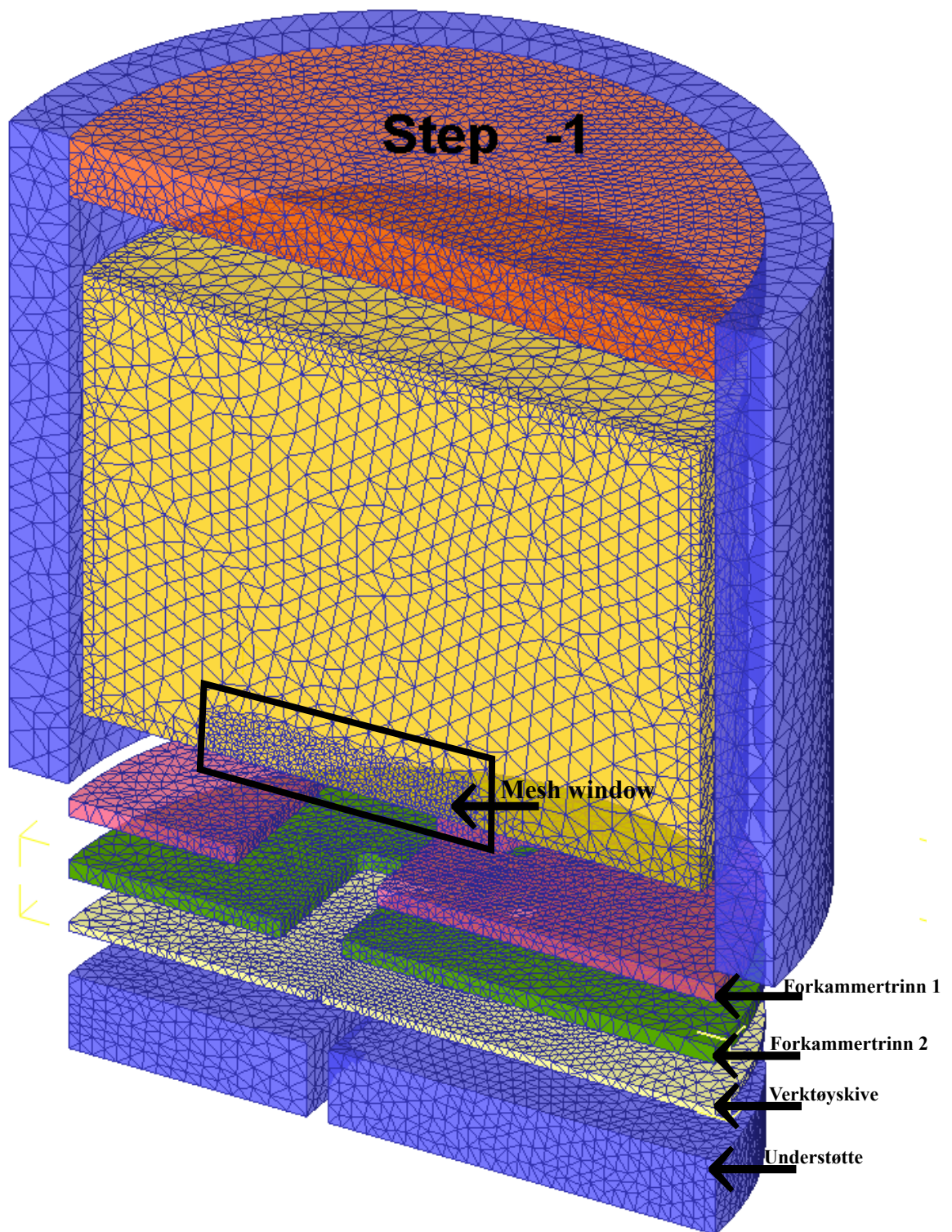


Figur 4.3. (a) Oppsett matrise med forkammer (b) Forkammer sett ovenfra

Tabell 4.3. Mesh beskrivelse: Matrise nr. 1			
Verktøy del	Noder	Surface Polygons	Elementer
Stempel	8003	6376	26936
Kontainer	6474	6598	28262
Forkammertrinn 1	5368	6518	21724
Forkammertrinn 2	5396	6584	21840
Verktøyskive	4084	6712	13744
Understøtte	7749	6372	35986
Bolt	16701	12940	78645

4.2.3 Matrise nr.1

I figur 4.3 (a) og (b) vises oppsett for matrisen og markert område for hvor det er brukt "mesh window", tabell 4.3 viser antall elementer brukt på de forskjellige delene. Figur 4.4 viser eksplodert modelloppsett i DEFORM-3D.



Figur 4.4. Eksplodert modelloppsett og "mesh window" på bolt for matrise nr. 1

Tabell 4.4. Prosessparametere og bolt dimensjoner brukt i FE-simuleringene	
Bolt materiale	AA6005
Matrise- og annet verktøymateriale	H13
Bolt lengde [mm]	150
Bolt diameter [mm]	280
Start temperaturer [°C]	
Verktøydeler	430
Bolt	430
Friksjonsfaktor	
Mellom bolt og bæreflate	0.6
Mellom bolt og dor del 2	0.6
Mellom bolt og annet verktøy	1
Stempel hastighet [mms^{-1}]	
Step increment	0.3
Varmeoverføringskonstant	11

4.3 Oppsett av modell: Støtfanger

Fremgangsmåten for å sette betingelser og simuleringkontroller er lik som for U-profilen, men siden DEFORM-3D ikke kan sveise sammen materialet når det møtes etter å ha passert broene må simuleringen gjøres i en to-gang. Den vanskelige måten å gjøre det på er å fjerne sveisesømmene manuelt og erstatte med materiale som er sveiset sammen. Den lette måten å gjøre det på er å modellere en bolt der materialet er sveiset sammen i sveisekammeret og kjøre simuleringen derfra. Den siste metoden er den som er brukt i denne oppgaven.

4.3.1 Betingelser

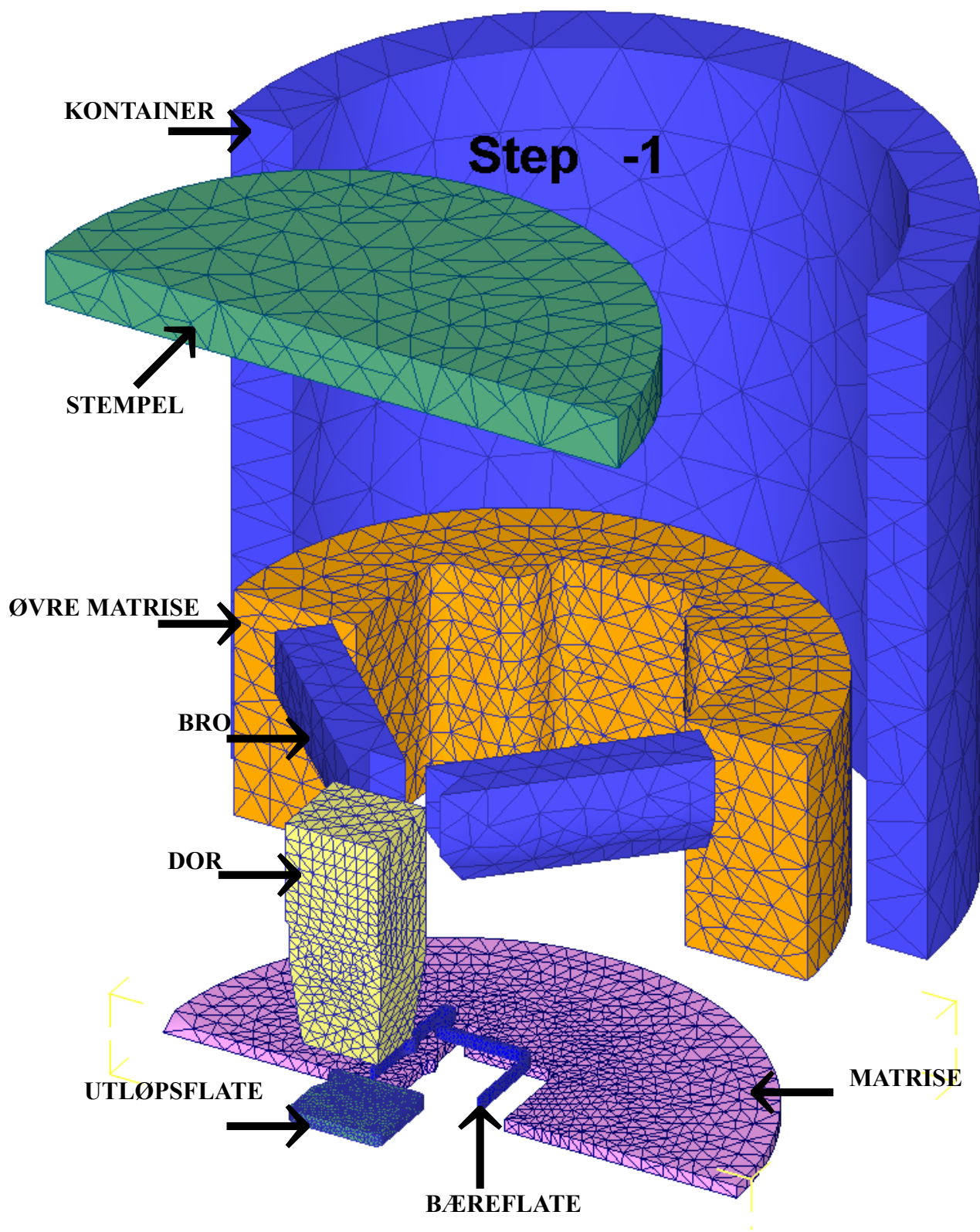
FE-simuleringene er i likhet med simuleringene i avsnitt 4.2 kjørt med halve modelloppsett grunnet symmetri i ZY-planen. I denne simuleringen har også bolten fått plastisk oppførsel og er av samme legering som foregående simuleringer, det samme gjelder materialvalg på ekstruderingsverktøy. Bolt og verktøys temperatur er satt til samme verdi, 430C.

Friksjonsfaktoren, m , mellom de ulike modulene og bolten er satt til 1, med unntak i utløpet der friksjonsfaktoren er satt til 0.6. Varmeoverføringskonstanten er satt til 11, se for øvrig tabell 4.4 for detaljer.

Tabell 4.5. Mesh beskrivelse, støtfanger			
Verktøy del	Noder	Surface Polygons	Elementer
Stempel	361	532	1231
Kontainer	701	1008	2450
Bro 1	128	198	382
Bro 2	133	202	409
Porthull/sveisekammer	1817	2008	7522
Dor del 1	1147	1194	4885
Dor del 2	2248	1926	10162
Verktøyskive	2093	3232	7263
Bæreflate	580	1052	1427
Bolt	8518	8772	36589

4.3.2 Klargjøring av modell

De ulike delene til modellen er av forskjellig kompleksitet, og må derfor ha forskjellig finhetsgrader på mesh. Mens kontainer, stempel og broer ikke trenger fine mesh, er det viktigere på doren, utløpet og bæreflaten. Bolten trenger svært fint mesh i området der det passerer over og igjennom matrisen, grunnet profilets tynne vegger og kompleksitet. Tidlige simuleringer feilet grunnet for grovt mesh, da utstikkerne på profilet tidvis ikke ble med ut av matrisen.



Figur 4.5. Eksplodert verktøyoppsett for støtfangerprofil

Kapittel 5

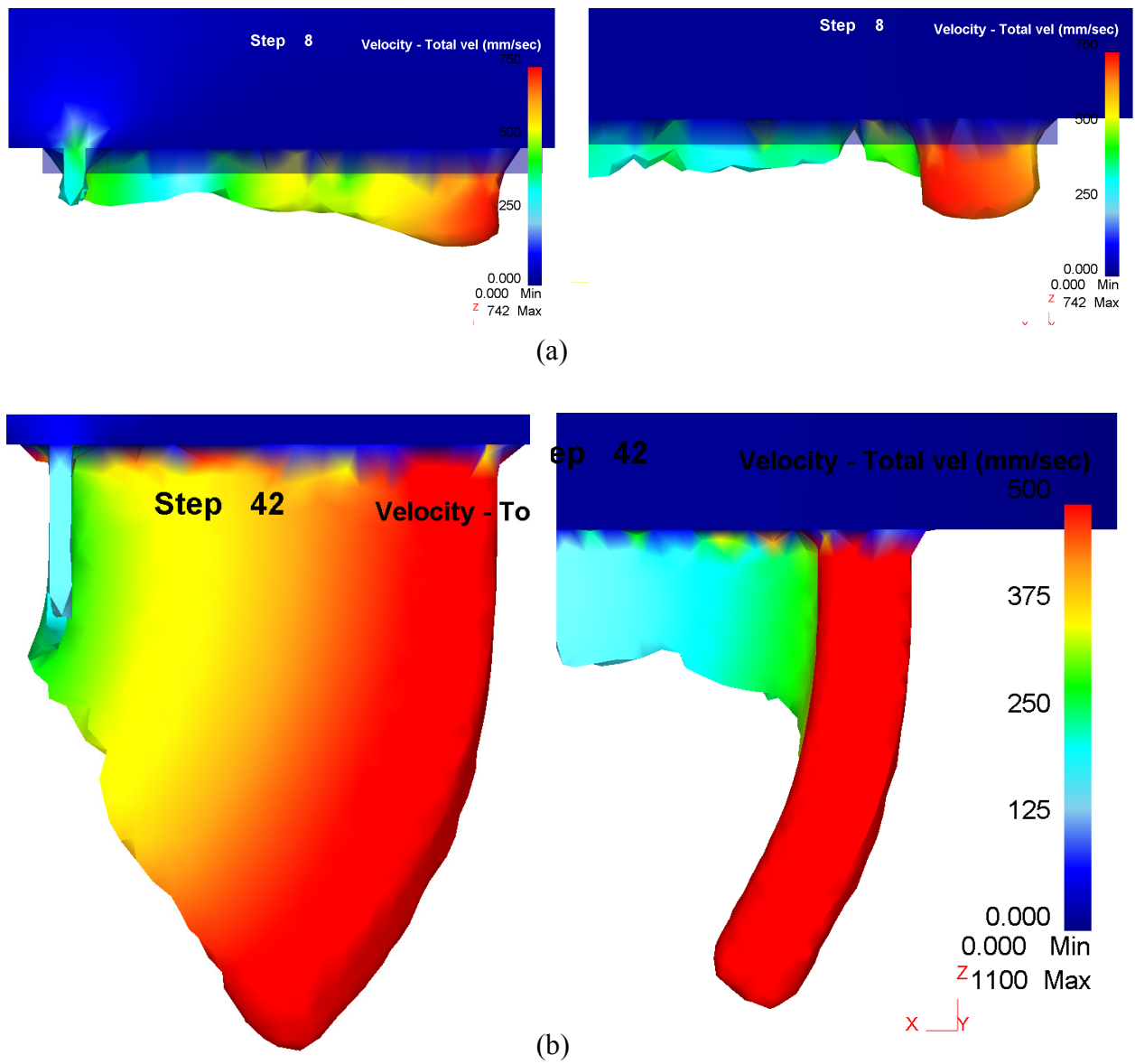
Postprosesserings resultater

Etter at modeller ble laget og prosessparametere satt, ble simuleringer med U-profil og støtfangerprofil gjennomført. Profilenes form etter ekstrudering, spenningstilstander, tøyingsrater, hastighets- og temperaturfordelinger gjennom simuleringen er hentet inn. Presentasjon av simuleringsresultatene i dette kapittelet gjør at matrisedesignet kan bedømmes og materialflyten analyseres.

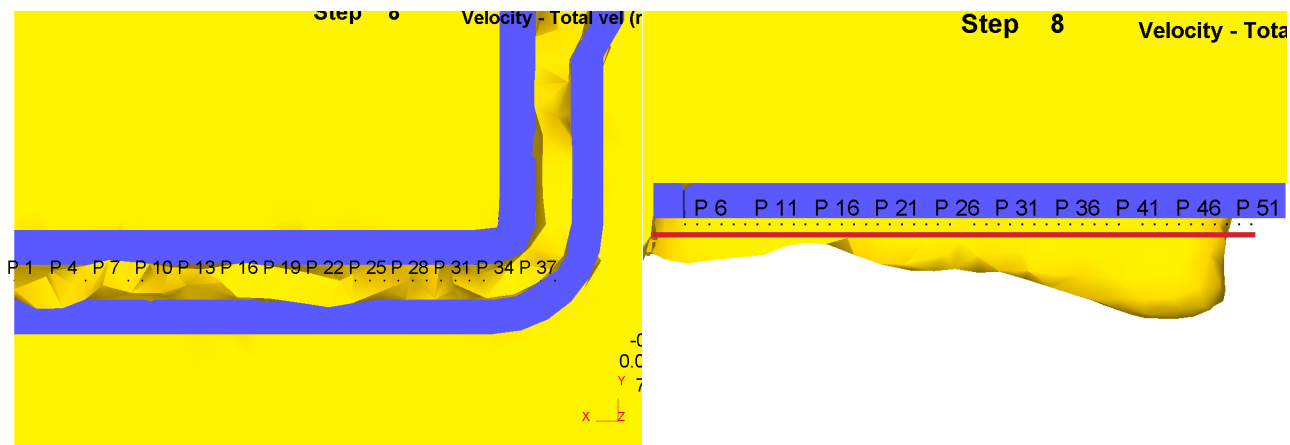
Første del av kapittelet vil ta for seg postprosessering av matrise nr. 0, disse resultatene blir brukt som referanse i andre og tredje del av kapittelet for å se hvilken innvirkning tilførsel av et forkammer har på materialflyten i og rundt matriseutløpet. I fjerde del av kapittelet vil postprosessering av støtfanger profilet bli gjennomgått.

5.1 Matrise nr. 0

Hvordan ekstruderingen forløper igjennom matrise nr. 0 er vist i figur 5.1. Det kommer klart frem at materialet i profilets bredeste del, toppen av profilveggen flyter raskere enn bunnflaten til profilet der tverrsnittet er slankere. I figur 5.1 (a) ser man at materialet som utgjør bunnflaten til profilet, grønn og blå farge, så vidt har begynt å forlate bæreflaten mens materialet til profilveggens øverste del er ekstrudert flere millimeter, rød/gul farge. Dette blir tydeligere etter hvert som profilet ekstruderes og man kan i figur 5.1 (b) observere at forskjellen på antall millimeter ekstrudert materiale har blitt større, og at profilet har begynt å krumme og vris inn mot senteraksen. Et annet fenomen som kommer til uttrykk i figur 5.1 (a) er at materialet nær senteraksen i profilets bunnflate har blitt ekstrudert lenger enn materialet som ligger nærmere kontaineren i begynnelsen av prosessen, dette tyder på at materialet har større flyte-hastighet mot senter. Etter hvert som ekstruderingen fremskrider blir materialet til denne delen av profilet dratt ut av kontaineren av materialet som har større hastighet. Denne delen av bunnflaten flyter derfor raskere på det senere punktet i ekstruderingen vist i figur 5.1 (b). Dette kan være uheldig for overflatekvaliteten, og profilets geometri kan være utenfor toleransegrensene.



Figur 5.1. Flyt forløp igjennom matrise nr. 0 (a) Materialet slipper bæreflate og matrise (b) profilet ekstrudert med klar deformasjon og vridning.



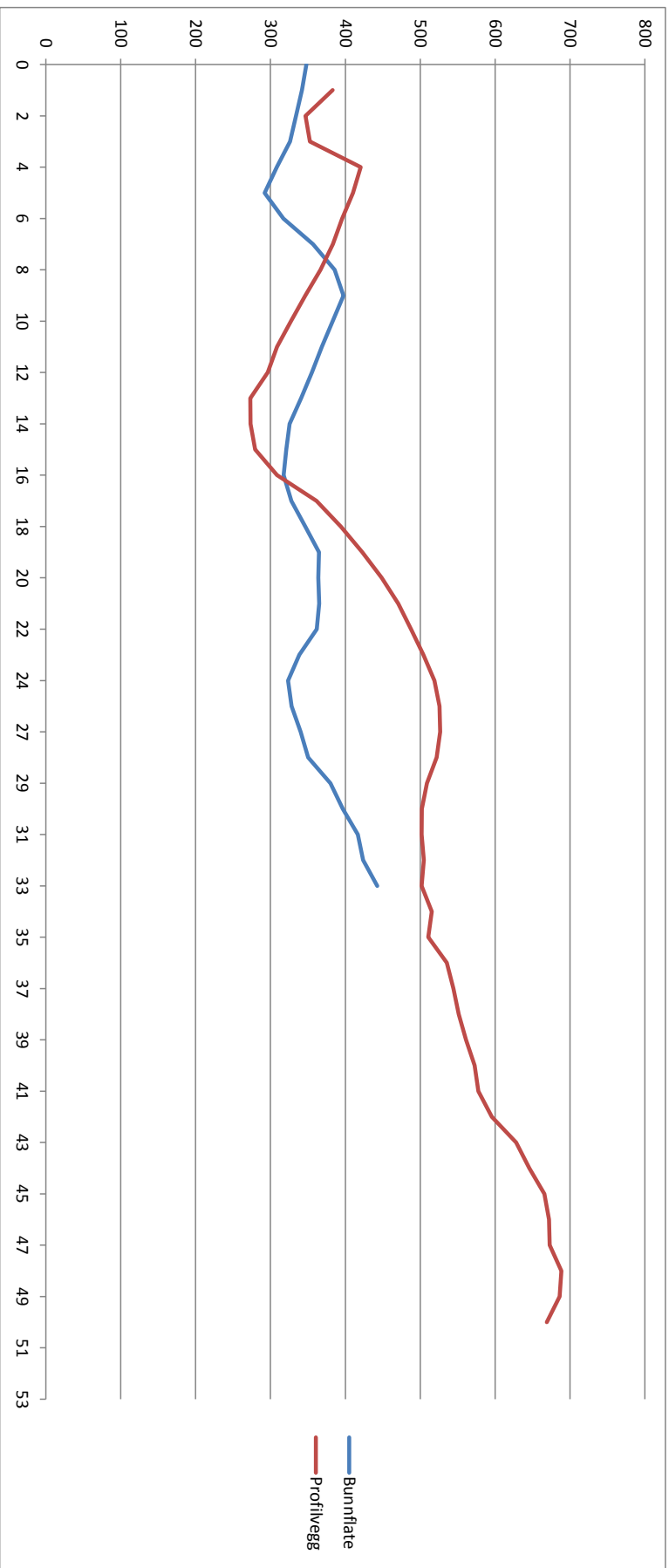
Figur 5.2. Datapunkter for lokale hastigheter over U-profilets tverrsnitt

Tabell 5.1. Hastighetsforskjeller, matrise nr. 0			
	v_{\min} [mms ⁻¹]	v_{\max} [mms ⁻¹]	Relativ differanse [%]
Bunnflate	292.1	466.3	37.4
Profilvegg	273.0	688.6	60.4
Forskjell mellom bunnflate og profilvegg			
	v_{avgb} [mms ⁻¹]	v_{avgpv} [mms ⁻¹]	Relativ differanse [%]
Hastighetsforskjell mellom bunnflate og profilvegg	368.0	479.9	26.4

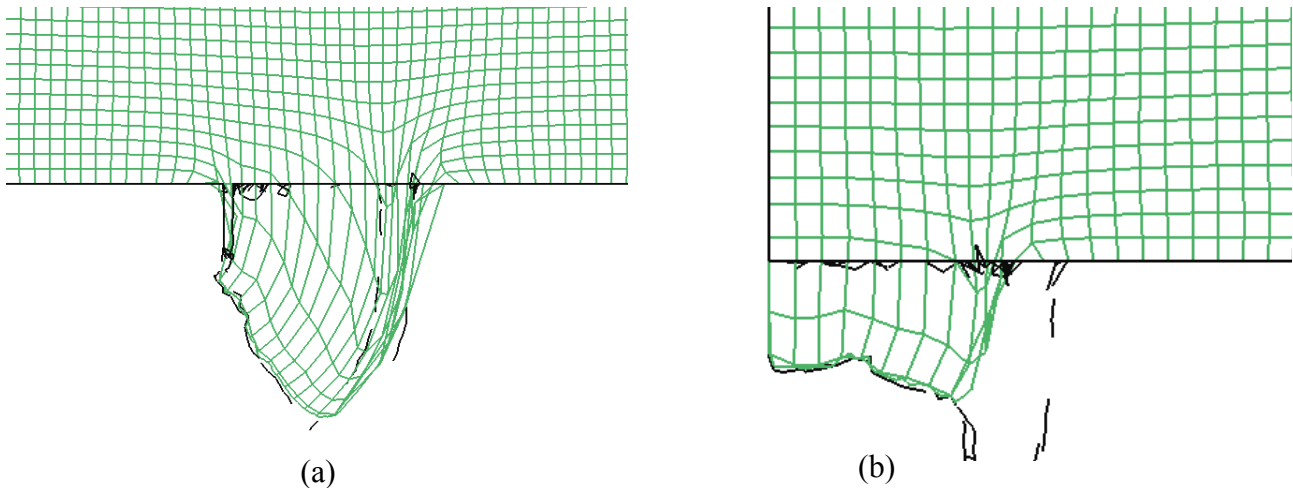
5.1.1 Hastighetsforskjeller

I postprosesseringen av simuleringene kan profilenes lokale hastigheter hentes ut. For å se næyere på hvor store hastighetsforskjeller det er over tverrsnittet etter materialet har forlatt bæreflaten ble et datasett med punkter med 1 mm mellomrom mellom hvert punkt, hentet ut når den delen av profilets material med lavest hastighet nådde et punkt 1 mm etter å ha forlatt bæreflaten. Datapunktene er hentet 0.5 mm fra bæreflaten, se figur 5.2, 1 mm grensen er markert med rød strek.

I tilfellet for matrise nr. 0 er de lokale hastighetsforskjellene veldig store over bunnflaten og profilveggen, dette er vist i figur 5.3, nøkkeltallene er presentert i tabell 5.1. I figur 5.3 ser man de lokale hastighetene langs bunnflaten og profilveggen plottet som en graf. Bunnflatens graf er veldig ujevn, mens profilveggen øker kraftig mot toppen av profilveggen. Laveste og høyeste hastighet langs bunnflaten, 0.5 mm etter bæreflaten er hhv. 292.1 mms⁻¹ og 466.3 mms⁻¹, dette betyr at det er en relativ, lokal hastighetsdifferanse på 37.4 %. Langs profilveggen er det lavest hastighet målt til 273 mms⁻¹ mens høyeste hastighet er målt til 688.6 mms⁻¹, noe som gir en relativ hastighetsdifferanse på 60.3 %. For å se hvor store hastighetsforskjeller bunnflaten og profilveggen har relativt til hverandre er gjennomsnittshastigheten til bunnflaten og profilveggen regnet ut, og det viser seg at den relative differansen mellom bunnflate og profilvegg er 26.4 %.



Figur 5.3. Lokal hastighetsfordeling over ekstrudatets bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter passering av bæreflate



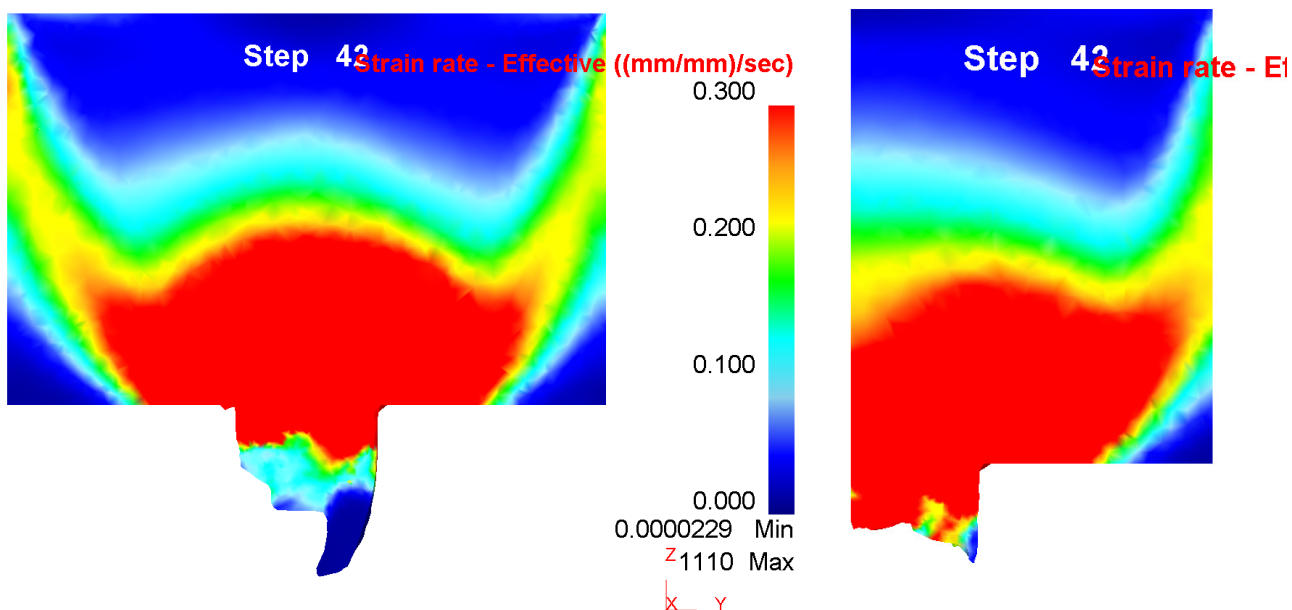
Figur 5.4. Nettverk matrise nr. 0 (a) Profilvegg (b) Bunnflate

Tabell 5.2. Koordinater for nettverks plassering			
Bunnflate			
	X	Y	Z
Koordinat	0	-25.15	0
Normalplan	0	1	0
Profilvegg			
	X	Y	Z
Koordinat	-38.9	0	0
Normalplan	1	0	0

5.1.2 Nettverksanalyse

Nettverksanalyse gjort i postprosesseringen gjør det mulig å studere materialflyten nøyere. For å se hvordan materialet flyter i og rundt matriseåpningen er profilet snittet i x- og y-planet, midt i profilets slankeste del, se tabell 5.2 for koordinater. Nettverksanalyse måtte av begrensninger i programvaren gjøres separat for bunnflaten og profilveggen til ekstrudatet.

I profilveggenes øverste del i figur 5.4 (a) kan man se at materialet ekstruderes direkte fra bolten inn i bæreflateområdet, nettverket deformeres i stor grad ved forlenging. Slik det fremgår av figuren er dette primær deformasjonszone. Det fremgår også tydelig at det omkringliggende materialet trekkes ned av materialet med større hastighet og gjennomgår store deformasjoner som følger av dette, da nettverket strekkes y-retningen og samtidig forlenges i z-retningen. Nettverket til bunnflaten vist i figur 5.4 (b) har nær symmetriplanet primært forlengning, mens nettverket i overgangen til profilveggen også gjennomgår skjærdeformasjon.



Figur 5.5. Effektiv tøyningsrate, matrise nr. 0

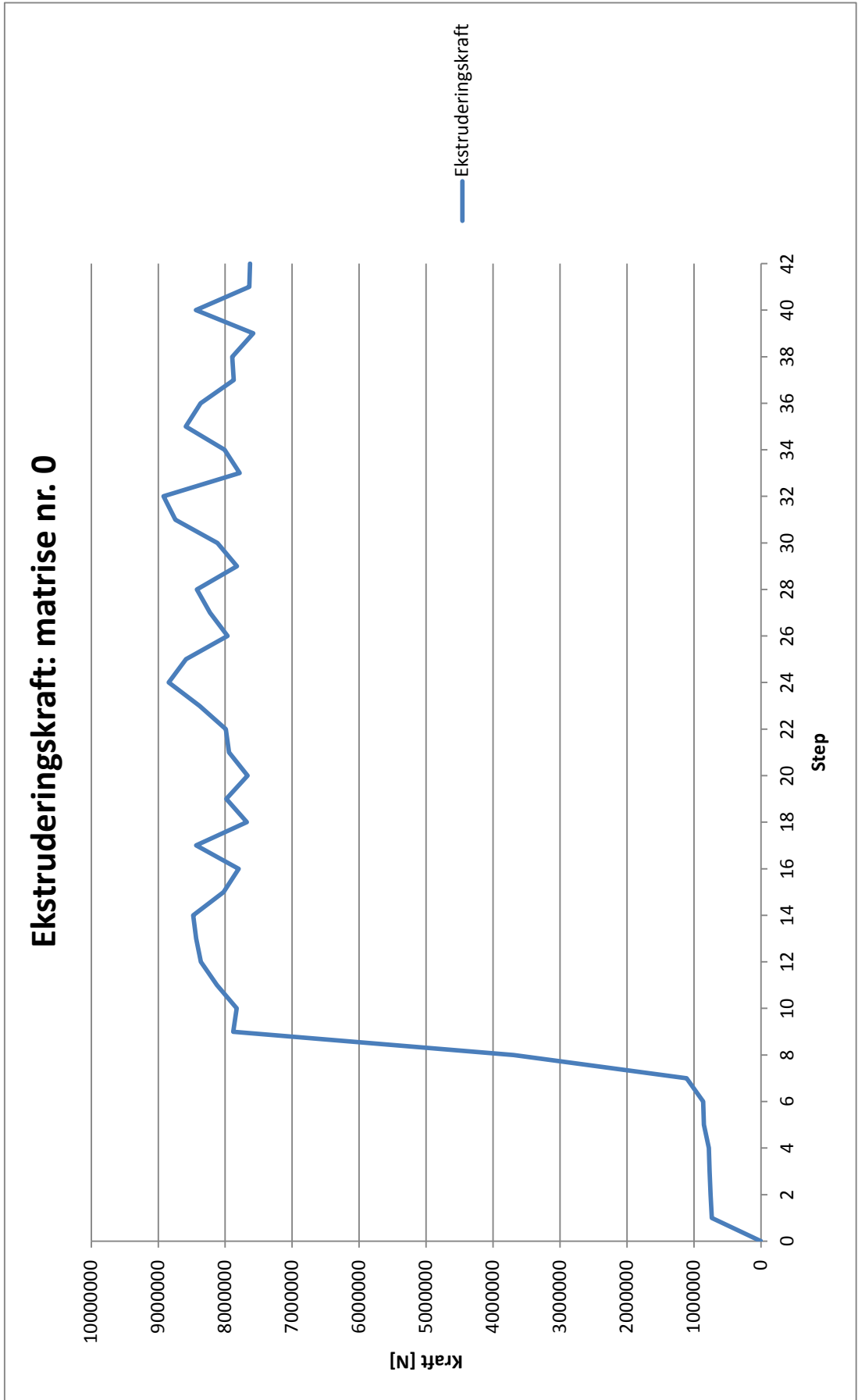
5.1.3 Effektiv tøyningsrate

Fordelingen av effektiv tøyningsrate i de samme planene som det er lagt nettverk viser at det er to andre karakteristiske soner tilstede inne i bolten. I figur 5.5 kan man se primær dødsone i «hjørnene» der kontaineren og matrisen møtes. Sekundær dødsone er under stempel. Langs kontainerveggen ser man skjærsoner.

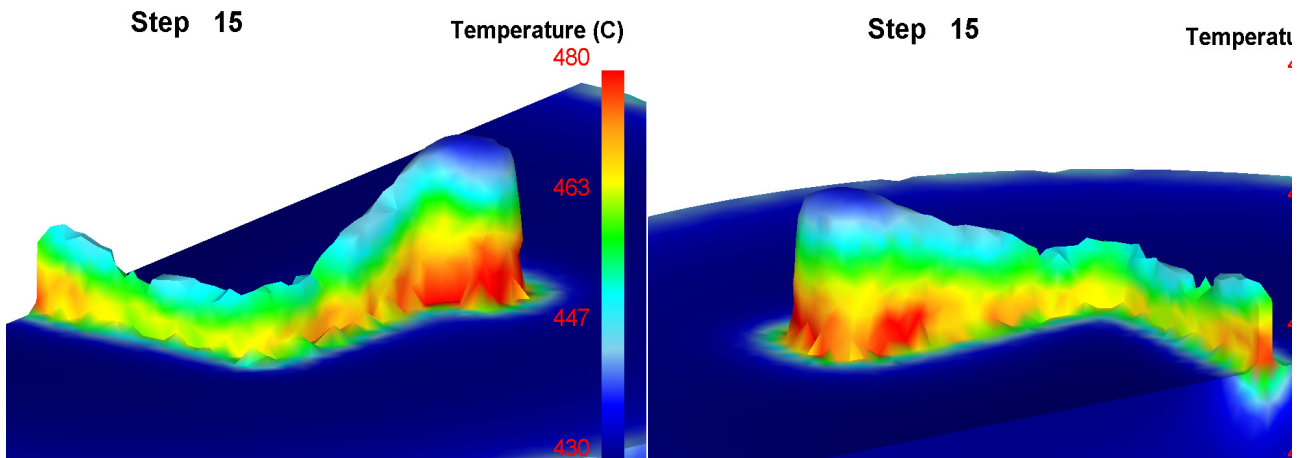
5.1.4 Ekstruderingskraft

Presskraftforløpet under ekstruderingen er satt opp slik at den viser kraft fordelt over antall step. Et step tilsvarer 1 mm forflytning av bolten i negativ z-retning, ekstruderingsretningen. I figur 5.6 kan man se at grafen har en svak økning fra step 1 til step 7, dette er fylling av kontaineren. Når grafen begynner å stige eksponentielt er det begynnende materialflyt inn i bæreflateområdet, deretter viser grafen at presskraften holder seg på et høyt nivå og materialflyten er i stasjonær tilstand. Maksimal presskraft er målt til 8.92 MN i step 32 som tilsvarer 32 mm presslengde, se tabell 5.3.

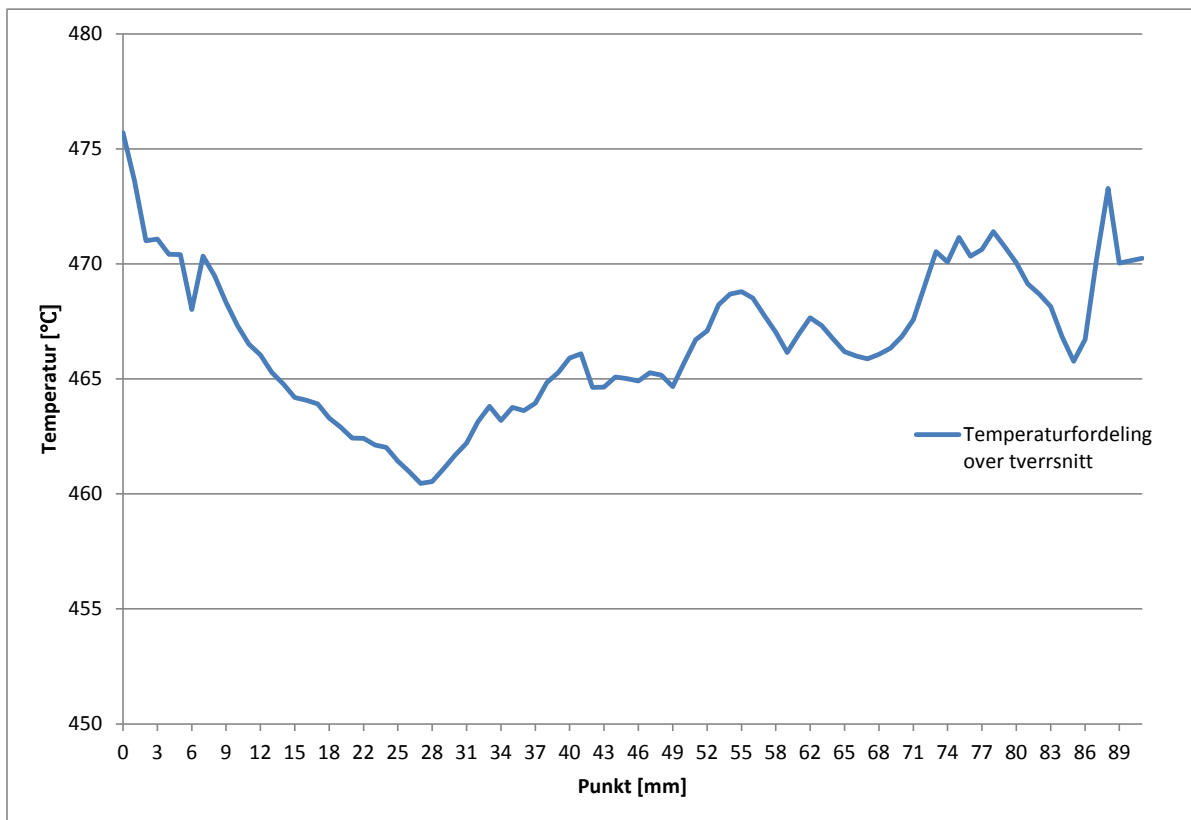
Tabell 5.3. Presskraftmålinger		
	Presslengde [mm]	Maksimal presskraft [MN]
Matrise nr. 0	32	8.92



Figur 5.6. Presskraftmåling matrise nr. 0



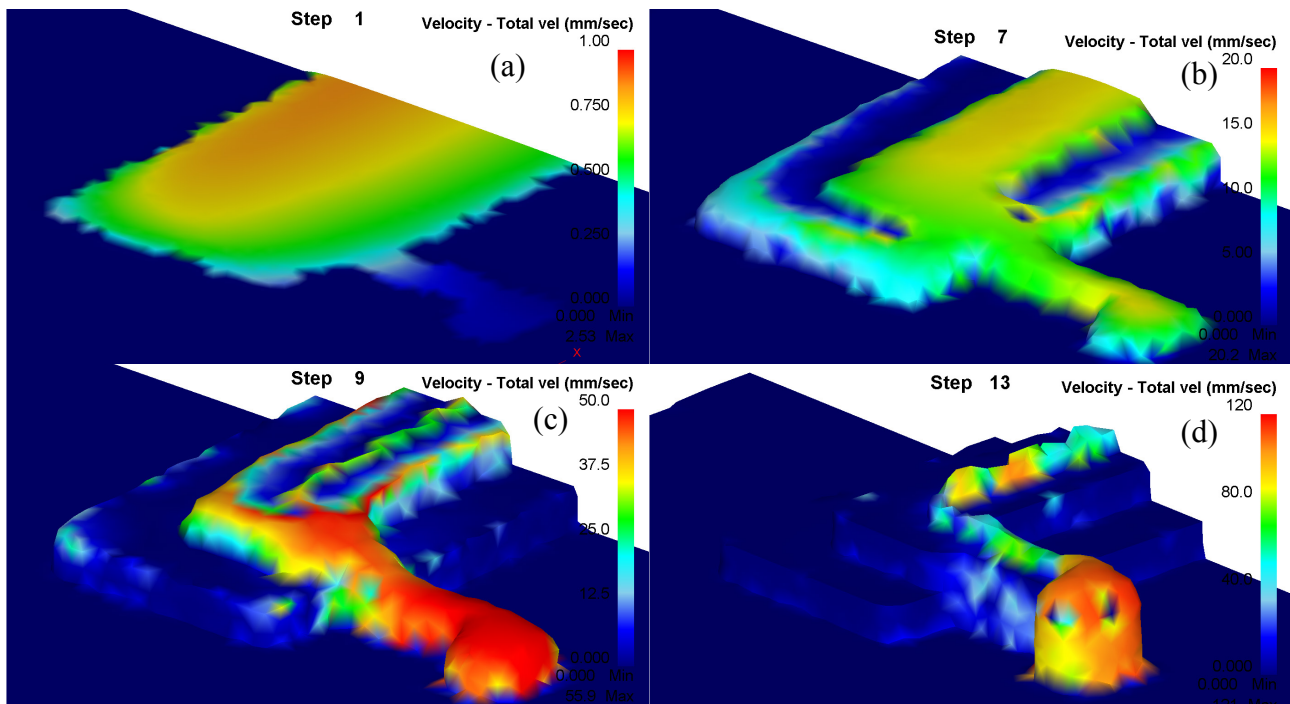
Figur 5.7. Temperaturfordeling i bæreflateområdet, matrise nr. 0



Figur 5.8. Temperaturfordeling i senter av bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter bæreflaten

5.1.5 Temperatur

Temperaturen ved utgangen til bæreflate området er en viktig parameter som blant annet har påvirkning for overflatekvaliteten til ekstrudatet og muligheten for å øke ekstruderingshastigheten. Temperaturfordelingen over profiletstverrsnittet vist i figur 5.7. Måkanse at maksimumstemperaturene befinner seg langs og i bæreflateområdet, dette er grunnet store plastiske deformasjoner og friksjon i overflatesjiktet mellom bæreflate og material. Langs profilveggen, der profilet har de største hastighetene, jamfør 5.1.2 kan man se at det også er her ekstrudatet har de høyeste temperaturene.



Figur 5.9. Fylling av matrise ved ulike step (a) Begynnende flyt (b) Begynnende flyt over i 2. forkammertrinn (c) Begynnende kontakt med bæreflate (d) Begynnende ekstrudering

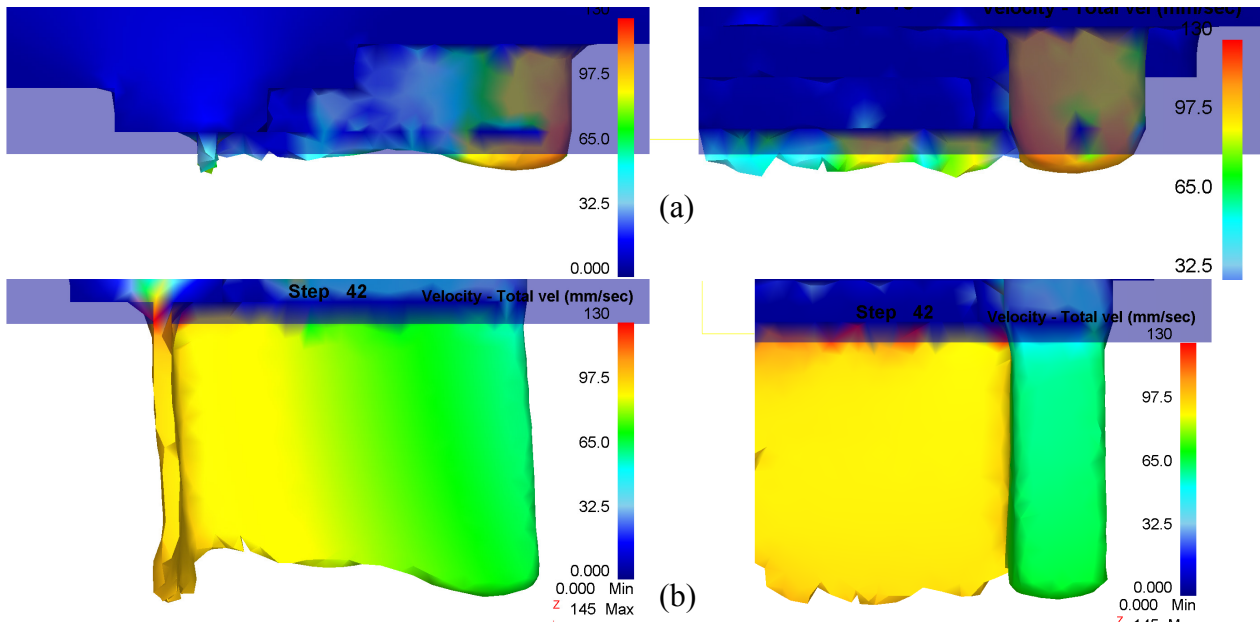
5.2 Matrise nr. 1

5.2.1 Hastighetsforskjeller

Fylling av forkammer til matrise nr. 1 er vist i figur 5.9. Materialet nær boltens senter flyter raskere enn materialet i overgangen mellom trinnet og kontaineren og i profilveggs øverste del, se figur 5.9 (a). I figur 5.9 (b) ser man at materialet har begynt å fylle 2. forkammertrinn og nærmer seg bæreflaten før 1. forkammertrinn er fylt. Figur 5.9 (c) viser også tydelig hastighetsforskjell mellom profilets bunnflate og profilvegg, da bunnflaten til profilet har begynt å få kontakt med bæreflaten mens profilveggen er ekstrudert omtrentlig på høyde med 1. forkammertrinn. Man ser også i samme figur at materialflythastigheten i dette området er mye høyere enn materialet nær bæreflaten. Figur 5.9 (d) viser hvordan denne differansen i materialflythastighet fører til at profilveggs øvre del nærmer seg nivået til bunnflate før materialet flyter inn i bæreflateområdet.

Når forkammertrinnene er tilnærmet fylt, begynner materialet å flyte igjennom bæreflateområdet. I figur 5.10 kan man se at det er en mer balansert materialflythastighet over hele tverrsnittet enn sammenlignet med matrise nr. 0 i figur 5.1. I det materialet forlater bæreflaten og spesielt langs profilveggen flyten mer balansert, profilveggs øverste del ikke er ekstrudert like langt som tidligere. Derimot ser det ut til at bunnflaten har lignende flytforløp ut av bæreflaten som i matrise nr. 0. Profilveggen ser ut til å ha en noe større hastighet i øvre del enn i nedre del, figur 5.10 (a). Videre ser man i figur 5.10 (b) at denne hastighetsdifferansen fremkommer tydeligere når profilet er ekstrudert lenger. Det ser også ut til at toppen av profilveggen kommer i stasjonær tilstand, med en hastighet lavere enn resten av ekstrudatet.

De lokale hastighetene langs bunnflaten og profilveggen er hentet inn på samme måte som for

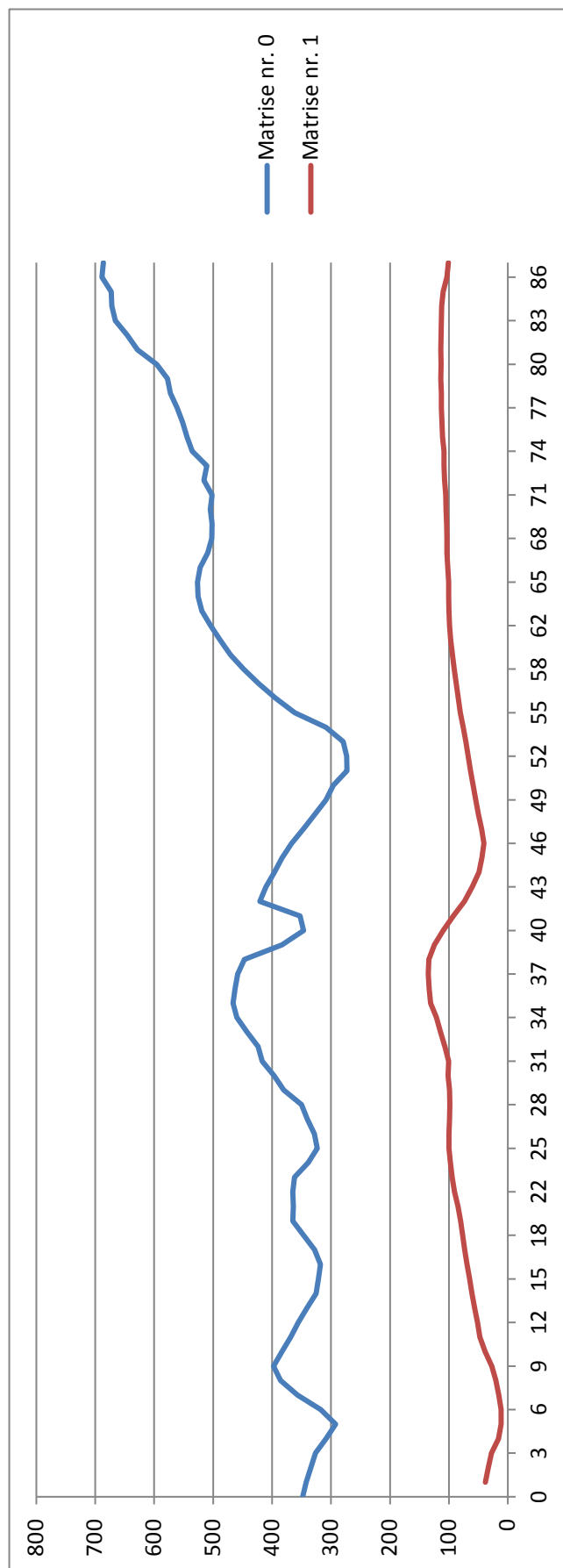


Figur 5.10. Flytforløp igjennom matrise nr. 1 (a) Materialet slipper bæreflate (b) Profil ekstrudert

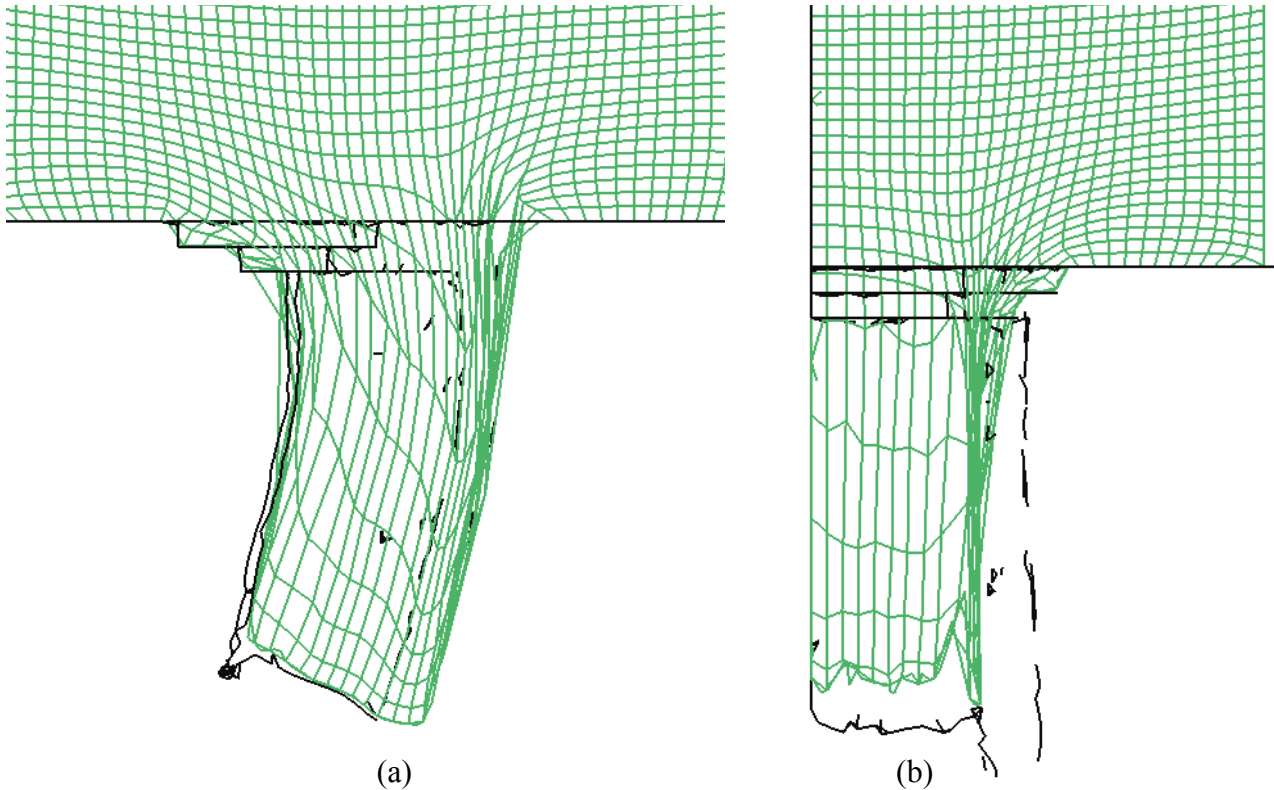
Tabell 5.4. Hastighetsforskjeller, matrise nr. 0 og matrise nr. 1			
	v_{\min} [mms ⁻¹]	v_{\max} [mms ⁻¹]	Relativ differanse [%]
Bunnflate matrise nr. 0	292.1	466.3	37.4
Profilvegg matrise nr. 0	273.0	688.6	60.4
Bunnflate matrise nr. 1	11.3	135.1	91.6
Profilvegg matrise nr. 1	40.9	124.4	67.1
Rlativ differanse mellom bunnflate og profilvegg			
	v_{avgb} [mms ⁻¹]	v_{avgpv} [mms ⁻¹]	Relativ differanse [%]
Hastighetsforskjell mellom bunnflate og profilvegg, matrise nr.0	368.0	479.9	26.4
Hastighetsforskjell mellom bunnflate og profilvegg, matrise nr.1	74.6	91.7	18.6

matrise nr. 0, men datapunktene til de lokale hastighetene er plottet som en sammenhengende graf, se figur 5.11. Grafen for matrise nr. 1 viser at de lokale hastighetene stiger fra punktet i symmetriplanet, midten av bunnflaten til enden av bunnflaten. I hjørnet der bunnflaten møter profilveggen synker de lokale hastighetene for så å stige og holde seg jevne over resten av profilveggen.

Høyeste og laveste hastighet, og relativ differanse mellom disse kan leses i tabell 5.4. Målingene viser at det er større relativ differanse mellom hastigheten langs profilveggen og langs bunnflaten i matrise nr. 1 enn i matrise nr. 0, men de lokale hastighetene er mye lavere i matrise nr. 1 enn i matrise nr. 0. De relative hastighetsdifferansene i gjennomsnitts hastighet over bunnflate og profilvegg er regnet ut på samme måte som for matrise nr. 0, og er 18.6 %. Noe som er lavere enn for matrise nr. 0 som har en relativ differanse lik 26.4 %.



Figur 5.11. Lokal hastighetsfordeling over ekstrudatets bunnflate og profilvegg 0.5 mm etter passering av bæreflate



Figur 5.12. Nettverk matrise nr. 1 (a) Profilvegg (b) Bunnflate

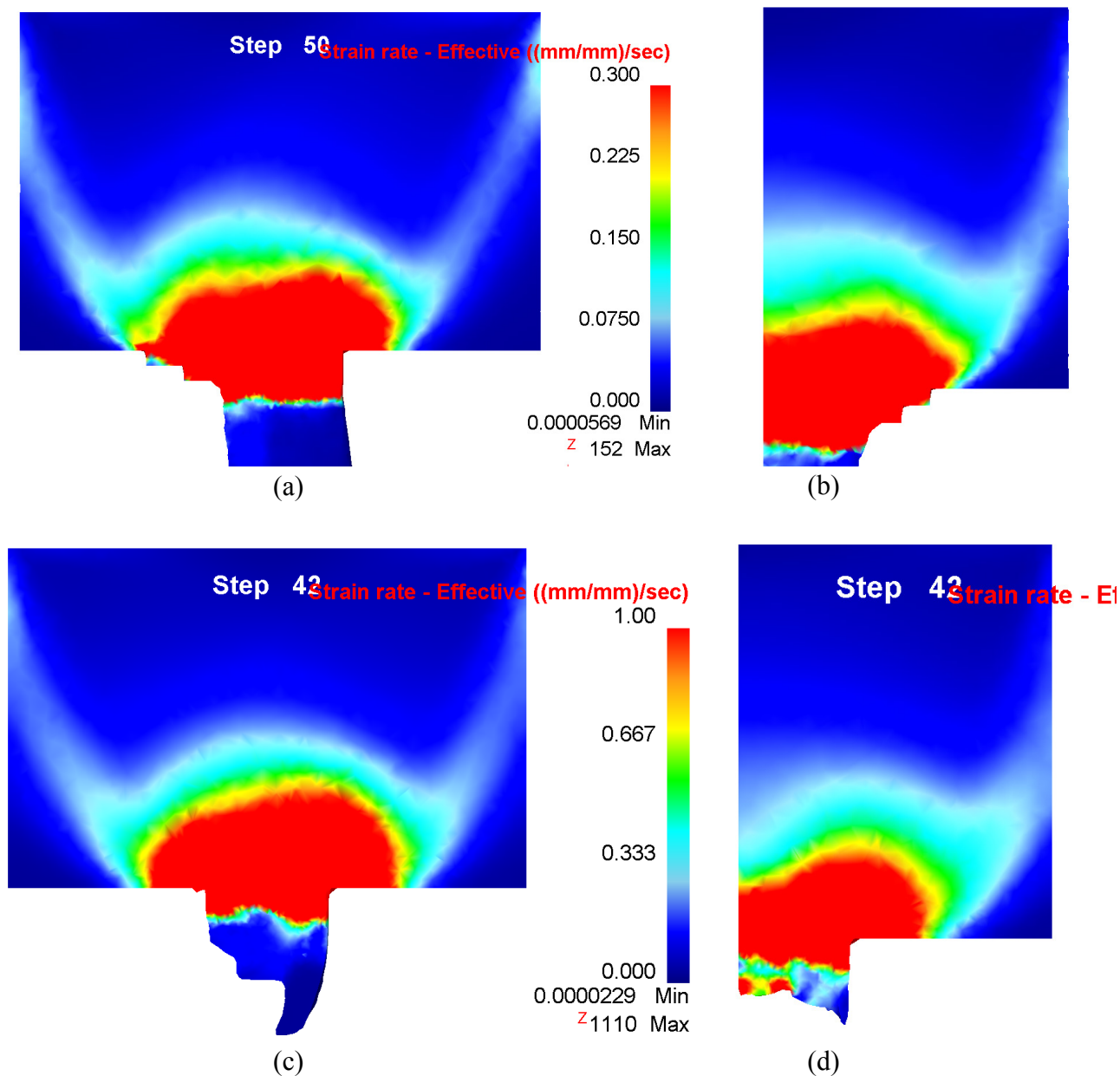
5.2.2 Nettverksanalyse

Nettverksanalyse for matrise nr. 1 er satt opp på samme måte som for matrise nr. 0, i senter av profilet slankeste del i bunnflate og profilvegg. Koordinater og normalplan er gitt tidligere i tabell 5.2. I figur 5.12 (a) og (b) er profilet ekstrudert til step 94, og her kan man se at nettverket forlenges kraftig fra bolt og igjennom bæreflateområdet i hjørnet til profilet og i toppen av profilveggen.

Nettverket i profilveggen figur 5.12 (a) forlenges i likhet med matrise nr. 0 i z-retningen og strekkes i y-retningen. Dette kan være en følge av at det akkumuleres en større mengde material i dette området da profilveggen er vesentlig breiere i toppen, enn nederst. Det fremkommer fra nettverket at materialet utsettes for store skjærdeformasjoner mot toppen av profilveggen. Videre ser man at det i nederste del av ekstrudatet er det elementer som ikke har blitt utsatt for noe særlig deformasjon, men har passert igjennom matrisen uten å bli deformert. Det vil si at materialet ved øverste del av profilveggen passerer rett igjennom matrisen ved begynnende ekstrudering. Dette materialet er inne i ekstrudatet og blir ikke utsatt for friksjonen langs bæreflaten.

I figur 5.12 (b) ser man at det langs bunnflaten primært er forlengning av nettverket, dette kan være fordi at bunnflaten i motsetning til profilveggen har en konstant tykkelse. I hjørnet ser det derimot ut til at det er store skjærdeformasjoner.

Ytterst i forkammertrinnene, lengst bort bæreflateområdet ser det ut til at det dannes små dødsoner som følger av heften, for å se dette tydeligere, og andre dødsoner må man se på den effektive tøyingsraten under ekstruderingen.

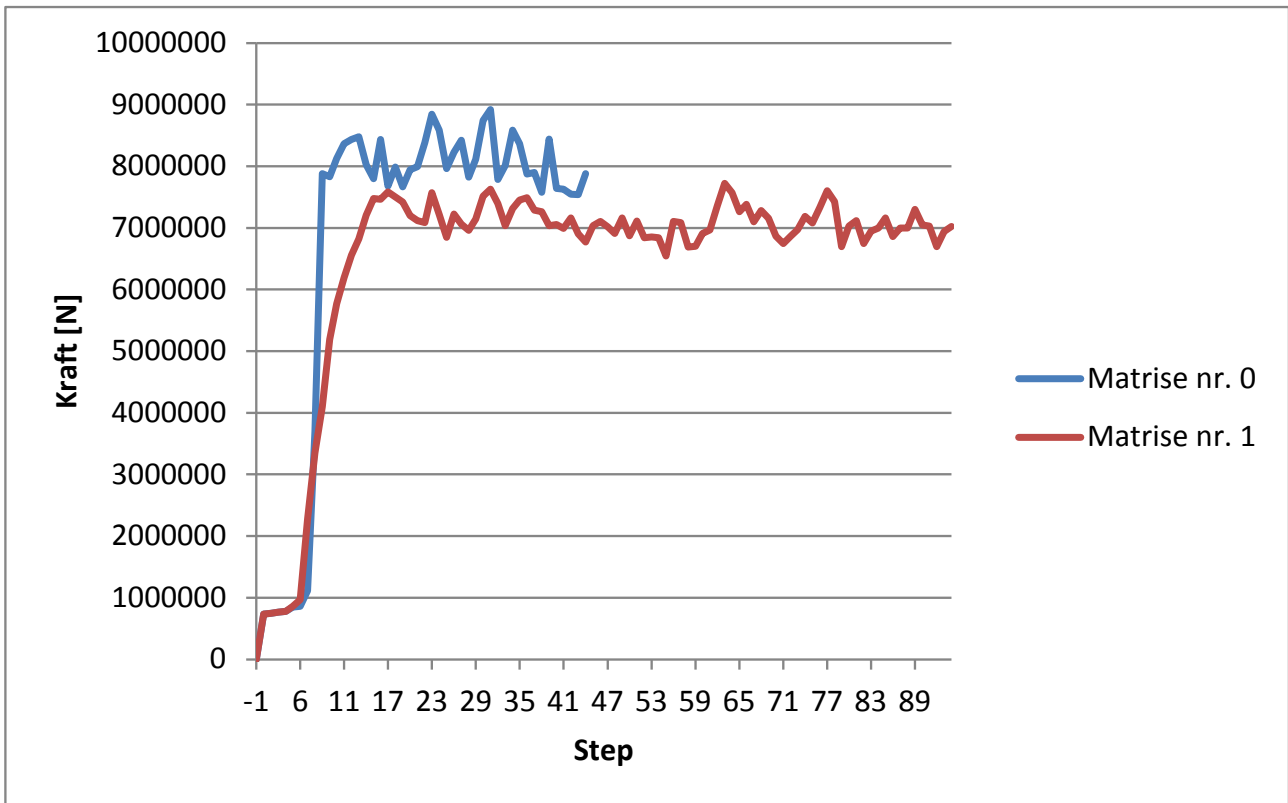


Figur 5.13. Sammenligning av effektiv tøyingsrate mellom matrise nr. 1 og matrise nr. 0

5.2.3 Effektiv tøyingsrate

Sammenlignes effektiv tøyingshastighet i matrise nr. 1 med matrise nr. 0, figur 5.13 (a) - (d) kan man se at dødsonen til høyre i figur 5.13 (a) er større i matrise nr. 1 enn i 5.13 (c). Dødsonene i 5.13 (b) og 5.13 (d) er tilnærmet like i formen. Dette kan være fordi forkammertrinn ser ut til å starte der primær deformasjonssone starter for matrise nr. 0.

Effektiv tøyingshastighet i figur 5.13 (a) og (b) viser som nettverket indikerte at det dannes små dødsoner langs den ytre kanten til forkammertrinnene, grunnet heftfriksjonen.

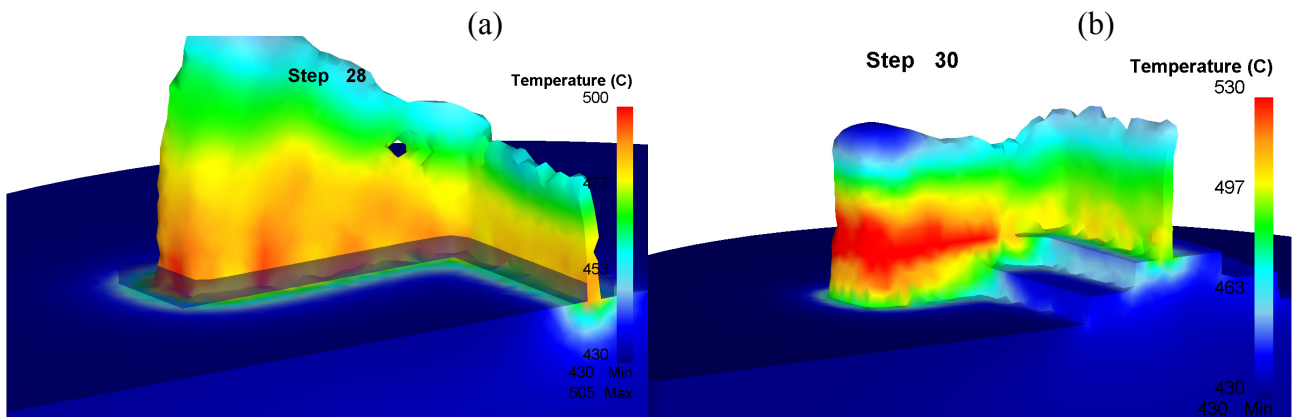


Figur 5.14. Presskraftmåling matrise nr. 0 og matrise nr. 1

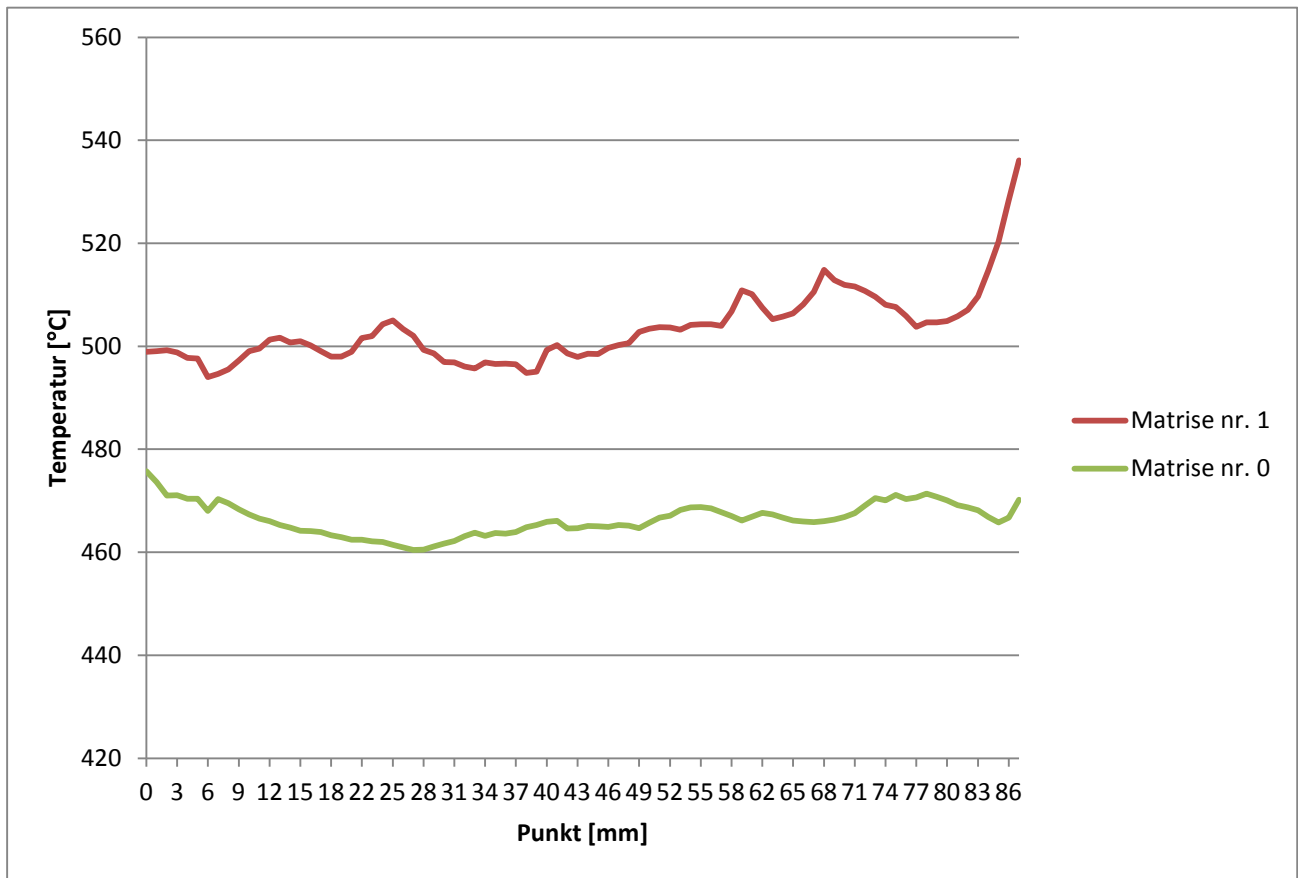
Tabell 5.5. Presskraftmålinger		
	Presslengde [mm]	Maksimal presskraft [MN]
Matrise nr. 0	13	8.48
Matrise nr. 1	17	7.98

5.2.4 Ekstruderingskraft

I figur 5.14 kan man se en sammenligning av ekstruderingskraft mellom matrise nr. 0 og matrise nr. 1. Dette er for å se hvilken effekt tilførsel av et forkammer har på presskraften. I starten av simulering er forløpene naturligvis like, siden dette er fylling av kontaineren, men matrise nr. 0 stiger mye hurtigere og når en stor presskraft tidligere enn matrise nr. 1. Dette er som følger av at for matrise nr. 0 starter flyt igjennom bæreflaten umiddelbart, mens for matrise nr. 1 pre-deformeres materialet i forkammeret først. Man kan også se at ekstruderingskraften synker når det tilføres et forkammer. Dette indikerer at selv om kontaktområdet og friksjonsflatene øker vil tilførselen gjøre det er lettere å få materialflyt igjennom matrisen og ekstruderingskraften kan økes for å få en hurtigere ekstrusjon.



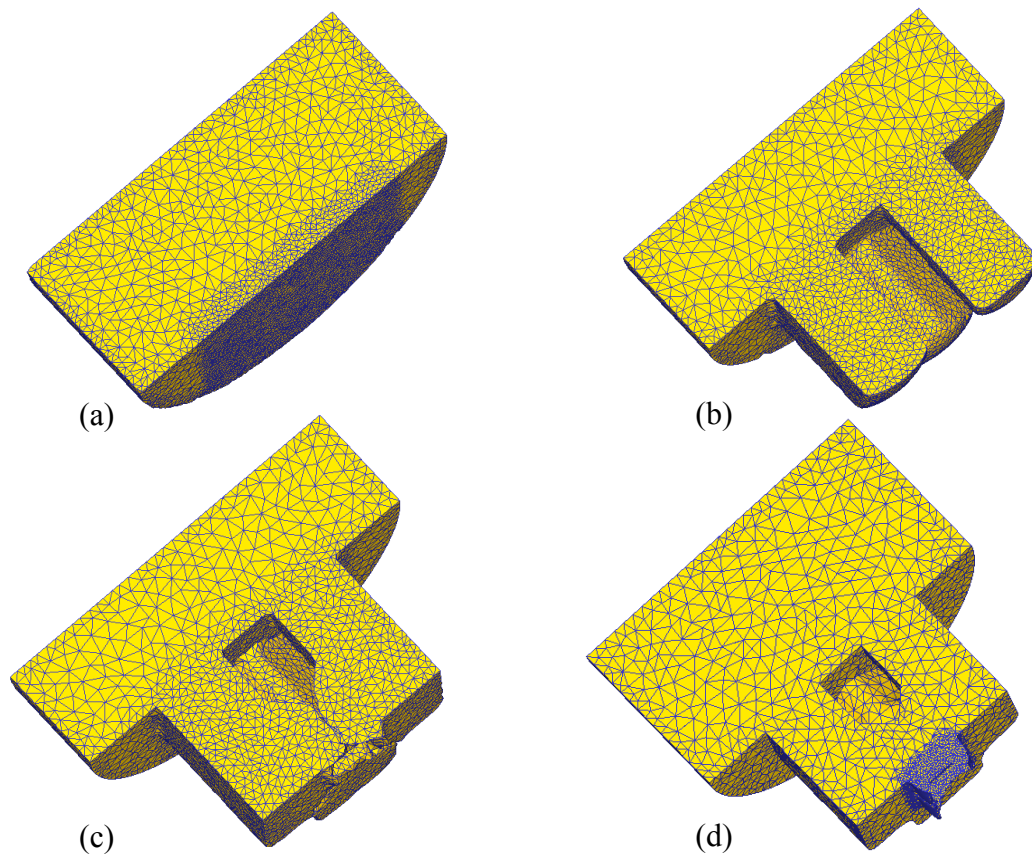
Figur 5.15. Temperaturfordeling (a) matrise nr. 0 (b) matrise nr. 1



Figur 5.16. Temperaturfordelingsgraf sammenligning mellom matrise nr. 0 og matrise nr. 1

5.2.5 Temperatur

Figur 5.15 og 5.16 viser temperaturfordelingen over ekstrudatet til matrise nr. 0 og matrise nr. 1. I likhet med matrise nr. 0 ser man at maksimumstemperaturene er i bæreflateområdet, men temperaturene har en mer inhomogen fordeling og kraftigere økning over tverrsnittet i det det forlater bæreflaten. Dessuten økes temperaturen over tverrsnittet med 25-60 °C ved tilførsel av et forkammer.

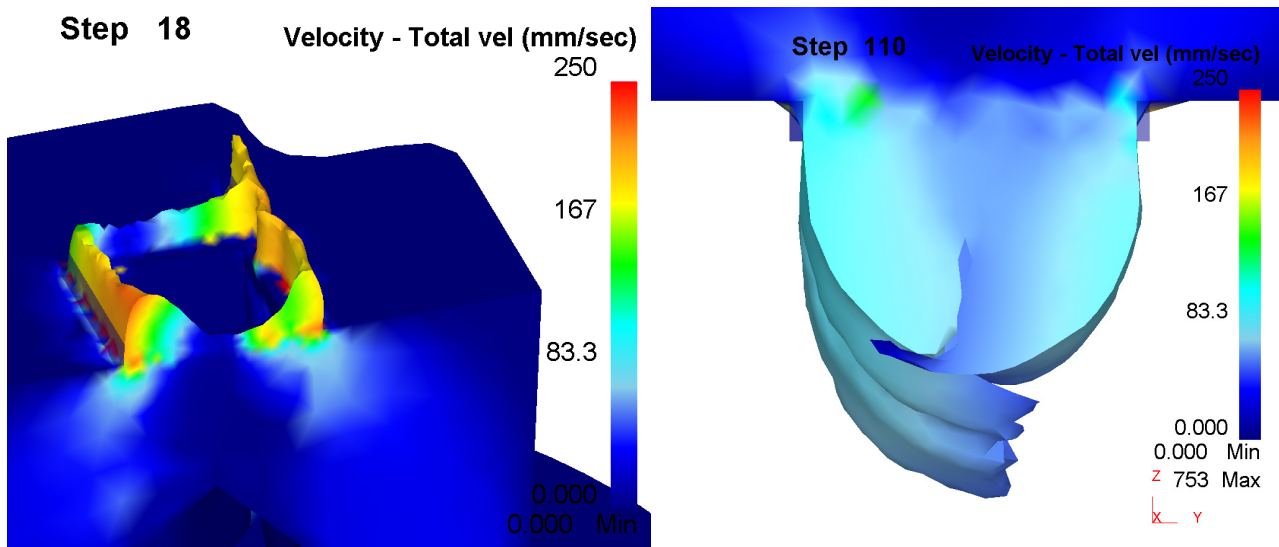


Figur 5.17. Flyt forløp igjennom porthullmatrise (a) Bolt innsatt i kontainer (b) Materialet splittes i porthull (c) Materialet sveises sammen (d) Begynnende flyt igjennom bæreflate området

5.3 Støtfanger

Faktorer som påvirker materialets utløpshastighet inkluderer størrelse, form og lokasjoner av porthull, størrelse og form på sveisekammer, lengde på bæreflater og stempelets presskraft. For å komme i bukt med til kort kommende deler under ekstrudering, vet man at man kan modifisere designet til matrisen for å få et ideelt uniformt flytmønster. Dette delkapittelet vil ta for seg analyse av materialflyten ved ekstrudering av det tynnvegde støtfangerprofilet ved bruk av en flat porthullmatrise der designet er beskrevet i delkapittel 3.3.

Materialflyt igjennom en porthullmatrise er en høy-kompleks prosess, og for denne simuleringen er materialflyten igjennom verktøyet vist i figur 5.17 (a) – (d). Her kan man se hvordan boltmaterialet deformeres plastisk fra å være innsatt i kontaineren til å entre porthullene og frem til sveisekammeret. Tilslutt passerer materialet igjennom matrisene og får endelig geometri. Først i figur 5.17 (a) er boltinnsatt i kontaineren, videre i figur 5.17 (b) flytter materialet inn i porthullene og splittes inn i fire materialstrømmer. Dernest i figur 5.17 (c) fylles sveisekammeret. Her får DEFORM-3D problemer siden programvaren ikke kan sveise sammen materialet, i neste figur er derfor det ekstruderte materialet erstattet med en bolt som er modellert slik at materialet er sveiset sammen sveisekammeret for videre ekstrudering. I figur 5.17. (d) kan man se den begynnende materialflyten ut av matrisen. Meshet og "mesh window" er endret og flyttet, samt forfinet. "Mesh window" er nå lagt i overgangen fra sveisekammeret og igjennom bæreflateområdet i den nye modellen.



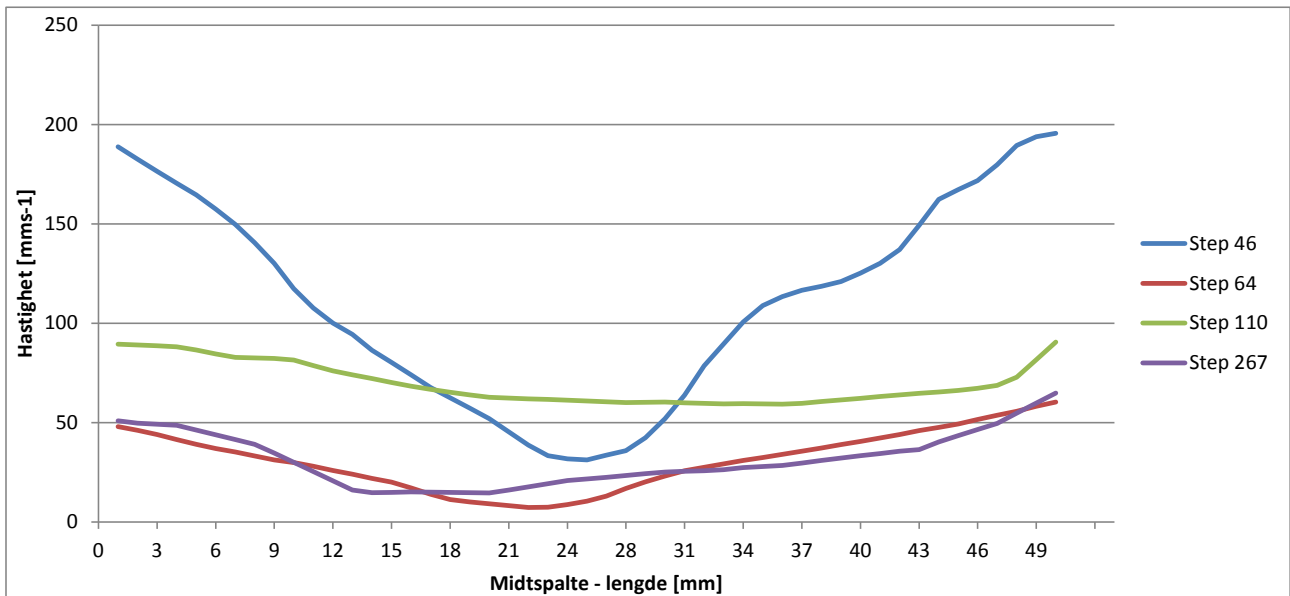
Figur 5.18. Hastighetsfordeling ved forskjellige step, støtfangerprofil

5.3.1 Hastighetsfordeling

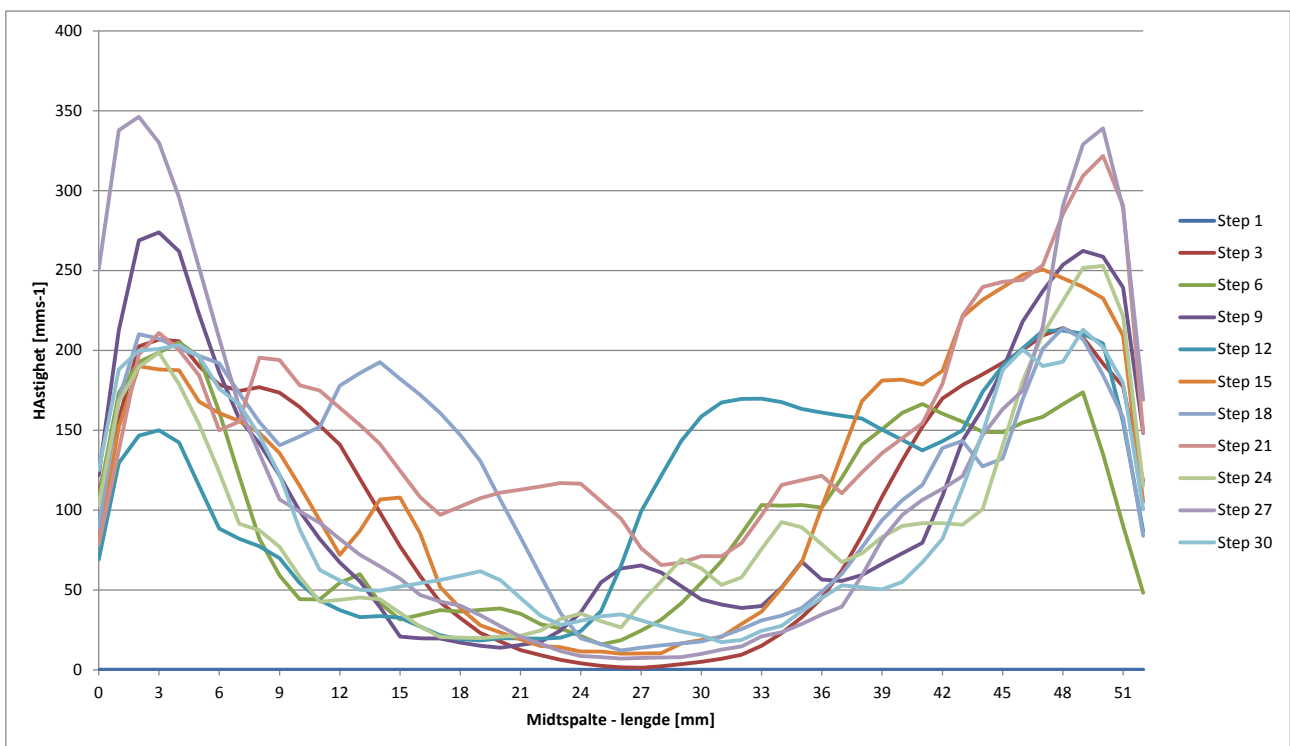
Hastighetsfordelingen når materialet forlater bæreflateområdet kan sees i figur 5.18 (a) her kan man observere at materialet flytere raskere langs de lengste sidene til profilet enn langs kortsiden og midtspalten. Materialet i midtspalten som dannes av en langsgående sveis blir igjen i bæreflateområdet, og som følger av dette krummer profilets langsider kraftig inn over tverrsnittet ved senere step, figur 5.18 (b).

På samme måte som for U-profilet er hastighetsvariasjonen midt i profilveggen plottet som en graf, men i dette tilfellet er det mest interessant å se på hvordan hastigheten fordeler seg langs midtspalten ved ulike step. Fordelingen ved de ulike stepene er vist i figur 5.19, og man kan se av grafen at det er svært lav hastighet inn mot senter av midtspalten i forhold til ytterkantene ved step 46. Step 46 representerer det punktet når alt materialet i midtspalten har blitt ekstrudert 1 mm fra bæreflaten. Dette tyder på at det ved begynnende flyt ut av bæreflateområdet er veldig lav mating av nytt material under doren, noe som kan føre til at det dannes en dødsone her. Ved senere step, step 110 og 267 er hastigheten jevnere over midtspaltens lengde, noe som tyder på at ekstruderingen er kommet i stasjonær tilstand.

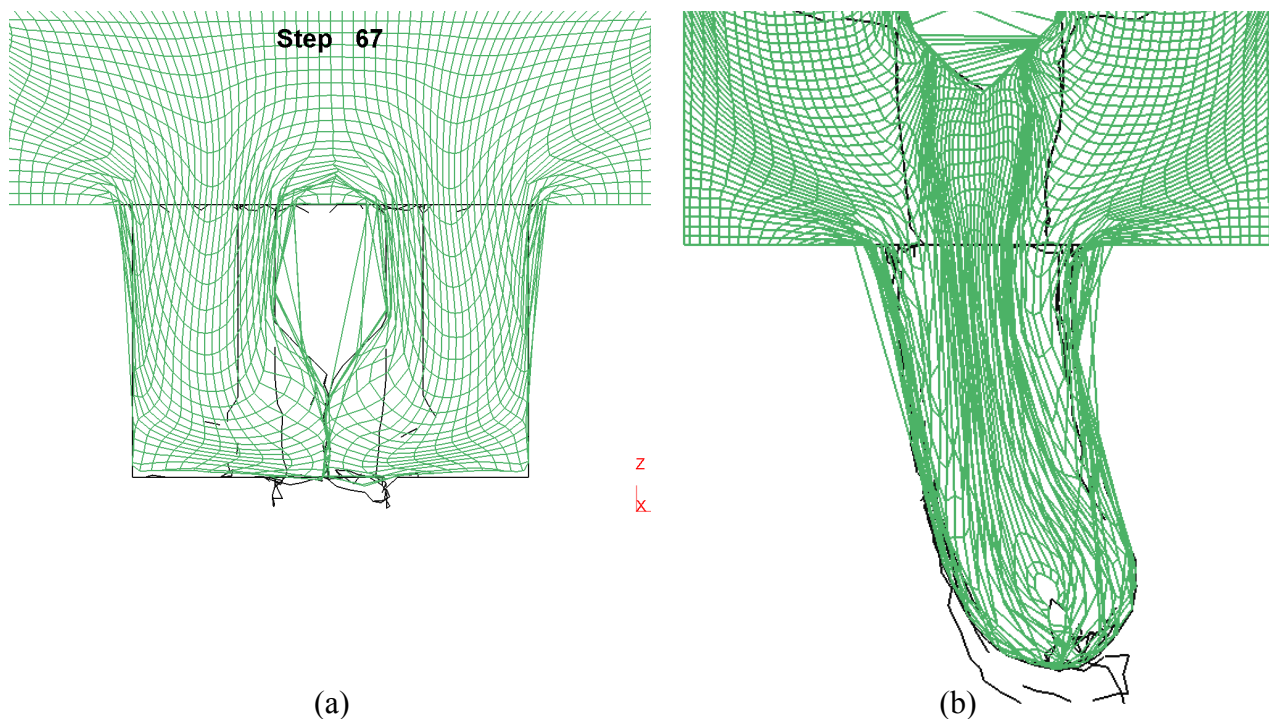
For nøyere å studere hvordan materialet flyter igjennom bæreflaten, er det også lagt punkter i overgangen fra sveisekammeret til bæreflateområdet. Resultatene fra punktsporingen over flere step er vist i figur. 5.20. Her kan man se at det er gjennomgående er lav hastighet ved senter av midtspalten, og at ved ytterkantene der midtspalten er i kontakt med langsidenes til profilet har materialet høyere hastighet.



Figur 5.19. Hastighetsfordeling 0.5 mm etter bæreflate



Figur 5.20. Hastighetsfordeling over midtspalte i overgang mellom sveisekammer og bæreflate

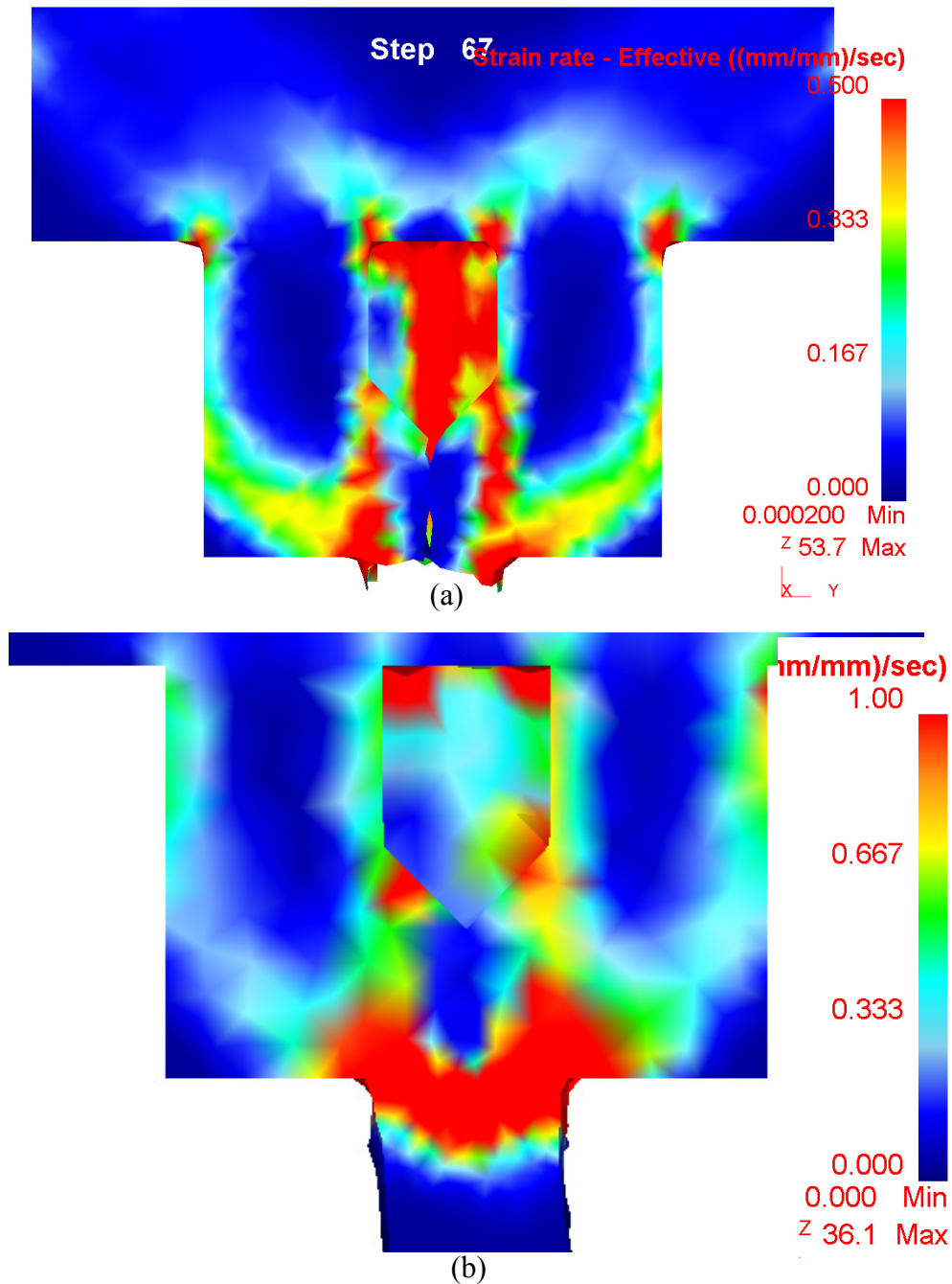


Figur 5.21. Nettverk for del 1 og 2 av simulering

5.3.2 Nettverksanalyse

For å studere materialflyten nøyere er det utført en nettverksanalyse i postprosessoren. Primært er det gjort analyse av materialflyten i midtspalten for videre undersøkelser av hva som skjer her, men andre snitt og nettverket ved flere step er mulig å se i appendiks B. Siden simulering av profilet er gjort i to omganger er også nettverket gjort i to omganger, et nettverk som viser materialflyten fra bolt innsatt i kontainer til fylling av sveisekammer, og et nettverk for materialflyten ved ekstrudering av profilet.

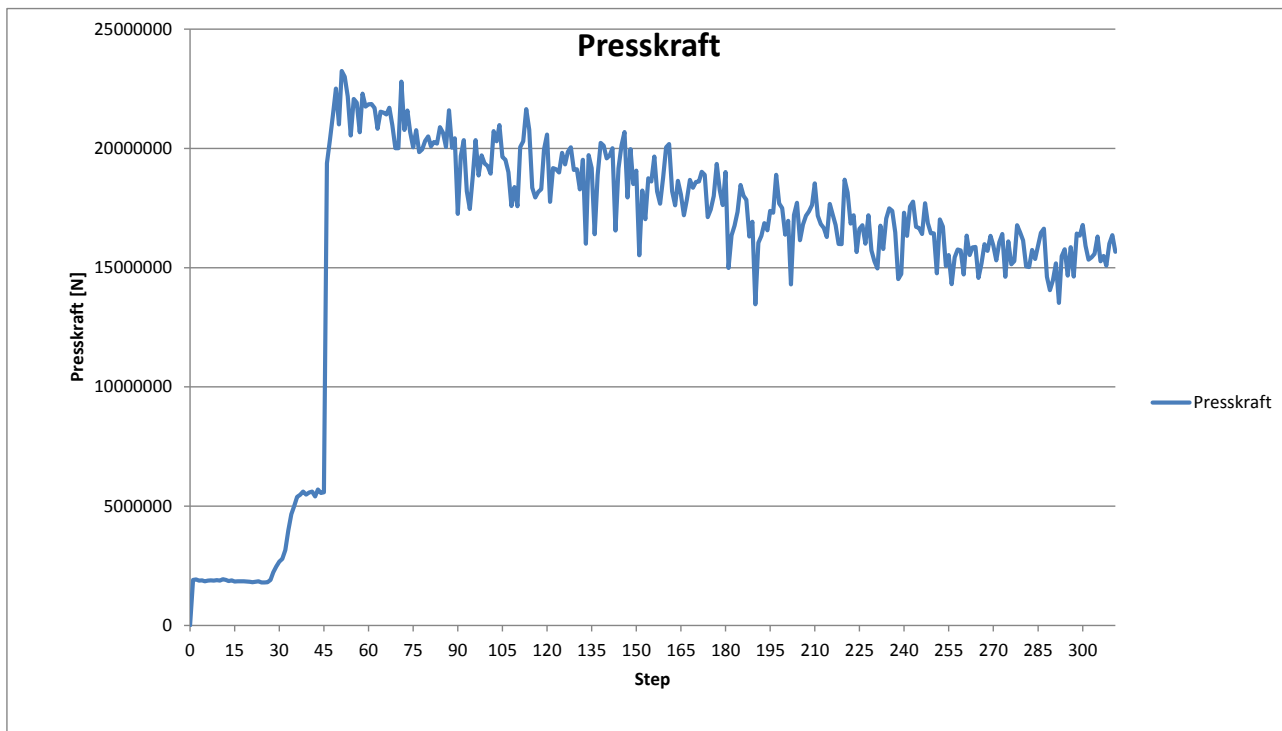
Figur 5.21 (a) viser hvordan nettverket deformeres igjennom porthullene og ned til sveisekammeret. Man kan tydelig se at det dannes dødsoner i hjørnet mellom kontainer og porthull, midt over doren, under stempel og i hjørnet nederst i sveisekammeret. Man kan også observere at det er skjærsoner langs kontainerveggen, doren og porthullveggen. Jamfør betingelsene om heftfriksjon satt i preprosessoren mellom bolten og disse verktøydelenes er dette forventet. Man kan også se i figur 5.21 (b) at det som mistenkt fra resultatene i foregående delkapittel at det er lite mating av nytt material inn mot senter av dor. Nettverket indikerer at det dannes skjærsoner langs høyre og venstre side under doren. Materialet i dette området skal danne den langsgående sveisen som utgjør midtspalten, men materialet flyter ikke inn under doren for å gjøre dette. Nettverket som representerer materialet i senter av midtspalten forlenges som følge av skjærsonene i dets ytterkanter og får ikke tilflyt av nytt material og blir derfor værende igjen under doren. Denne sonen er å betrakte som en dødson. Slik det fremgår av figuren blir materialet i senter av midtspalten forsinket ut av bæreflateområde fordi det må vente på tilflyt av material lenger oppe i bolten.



Figur 5.22. Effektiv tøyingsrate i simulering (a) del 1 (b) del 2

5.3.3 Effektiv tøyingsrate

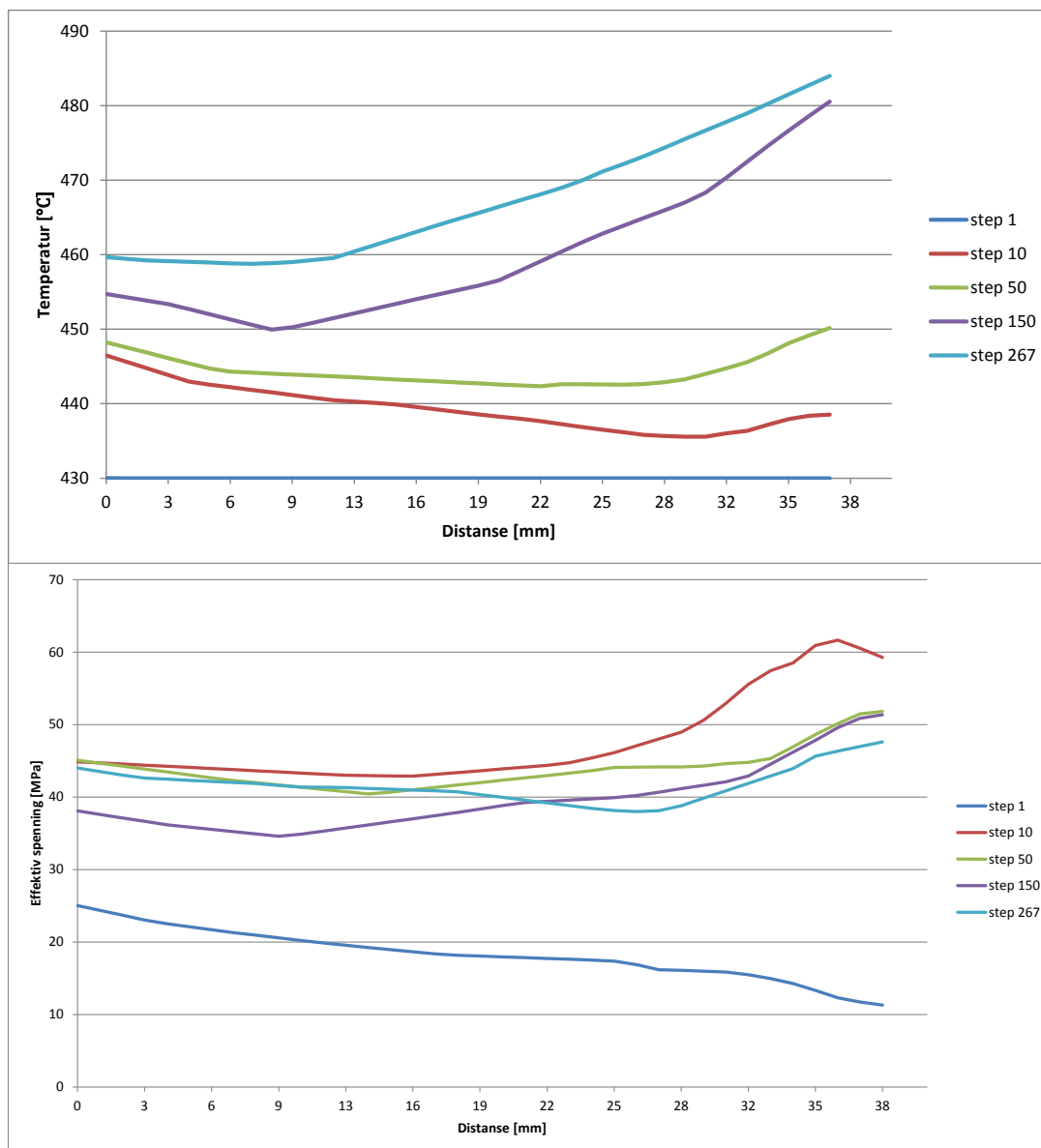
Ved å betrakte de effektive tøyingsratene igjennom simuleringen kan man studere materialflyten ytterligere. De effektive tøyingsratene viser tydelig at det er deformasjonssone over og i bæreflateområdet. Det fremkommer også at det som betraktes som dødsoner og skjærsoner i nettverksanalysen bekreftes i figur 5.22. Dødsonen observeres som koniske områder midt under stempel, i hjørnene mellom kontainer og porthull, i hjørnet av sveisekammer og som antatt midt i den langsgående sveisen. Man kan også se at det dannes skjærsoner langs denne dødsonen. Effektiv tøyingsrate ved forskjellige skalaer kan sees i appendiks C.



Figur 5.23. Presskraftmåling for støtfangerprofil

5.3.4 Presskraft

Figur 5.23 viser at hvordan presskraften til stempelet holdes jevn ved fylling av kontainer for så å øke hurtig i det materialet flyter igjennom porthullene. Presskraften fortsetter å øke til materialestrømmene treffer bunnen av sveisekammeret og begynner å fylle dette. Her flater grafen noe ut. Videre øker presskraften eksponentielt fordi materialet begynner å flyte igjennom bæreflateområdet. Bæreflateområdet som materialet skal passere igjennom er veldig smalt i forhold til resten av verktøyet og det trengs stor kraft for å initiere flyt. Maksimal presskraft nås ved begynnende flyt igjennom bæreflateområdet og er målt til 23.2 MN. Videre kommer materialflyten i stasjonær



Figur 5.24. (a) Temperaturfordeling i senter av langsgående sveis (b) Trykkfordeling i senter av langsgående sveis

tilstand og presskraften synker gradvis. Det registreres at maksimal presskraft er veldig stor.

5.3.5 Trykk- og temperaturfordeling

Trykkfordeling i senter av den langsgående sveisen viser at det med unntak for step 1 er økende trykk ned mot bæreflateområdet. Dette er fordi, som det vises i hastighetsfordelingsplottet i figur 5.20 at det ikke er begynnende flyt inn i bæreflateområdet ved step 1. Grafen ligger flatt ved 0 mms^{-1} . Ellers er det svakt økende trykk ned mot bæreflateområdet.

Temperaturen i senter av langsgående sveis er jevnt økende, og den øker mest ned mot bæreflaten i tidlige step i simuleringen. Ved senere step øker temperaturen kraftigere.

Kapittel 6

Diskusjon

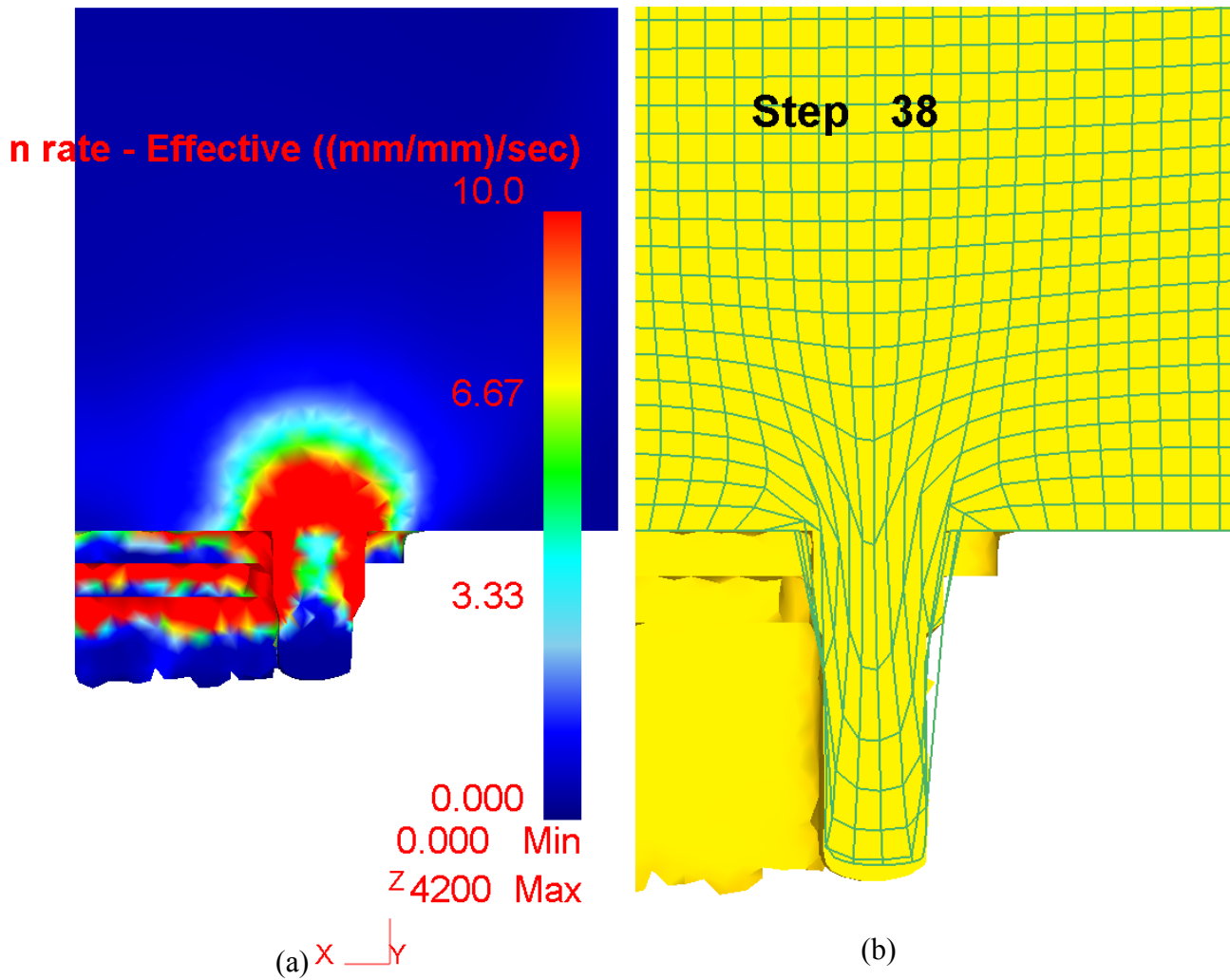
6.1 U-profil

Ekstrudering av U-profilen igjennom matrise nr. 0 viste som forventet store hastighetsforskjeller mellom bunnflaten og profilveggen ut av matrisen, og profilen krummet mye inn mot senteraksen. En grunn til dette er fordi profilen er mye bredere i toppen av profilveggen og ekstrudert material flyter raskere igjennom brede åpninger enn smale. Utløpshastighetene over tverrsnittet var jevnt over mye høyere enn når materialflyten avbalanseres for ved bruk av forkammer. Pre-deformasjonen i forkammeret gjør at materialet i matrise nr. 1 får en mye lavere og jevner gjennomsnittshastighet når man ser på bunnflaten og profilveggen hver for seg. Dette stemmer godt overens med andre studier om avbalansering ved bruk av forkammer og kan leses mer om i [19, 14].

Temperaturfordelingene over tverrsnittene viste at temperaturen økte ved tilførsel av forkammer. Dette kan begrunnes med at kontaktområdet mellom materialet og matrisen økes og dermed blir materialet utsatt for mer friksjon. Spesielt kan dette observeres ved profilveggenes øvre del. Her er forkammertrinnenes geometri tilnærmet lik endelig geometri og materialet i dette området gjennomgår ingen pre-deformasjon i forkammeret på lik linje med nedre del av profilveggen og bunnflaten. I stedet har denne delen av profilen nesten kontinuerlig kontakt med matrisen og siden friksjonsfaktoren er satt $m = 1$, heftfriksjon i forkammertrinnene skaper dette naturlig nok tøyninger og skjærsoner som gir opphav til oppvarming av materialet, se figur 6.1. Andre studier i litteraturen kan vise til at temperaturen jevnt over synker, men i litteratur funnet er det bare behandlet profiler med konstant tykkelse over tverrsnittet noe som gir en annen utforming på forkammergeometrien.

Nettverksanalysene og studering av effektive tøyingsrater viste at skjærsoner, dødsoner og deformasjonssoner opptrer som forventet og er realistisk gjengitt og er samsvar med teorien gjennomgått i kapittel 2.3. Sammenligning av tøyingsratene viste også at det er liten endring i hvor sonene befinner seg. Største forskjeller var at forkammertrinnene ga opphav til små dødsoner ytterst i trinnene og at primær deformasjonssone ble økt. Økningen er et resultat av at materialet i tillegg deformeres i forkammeret.

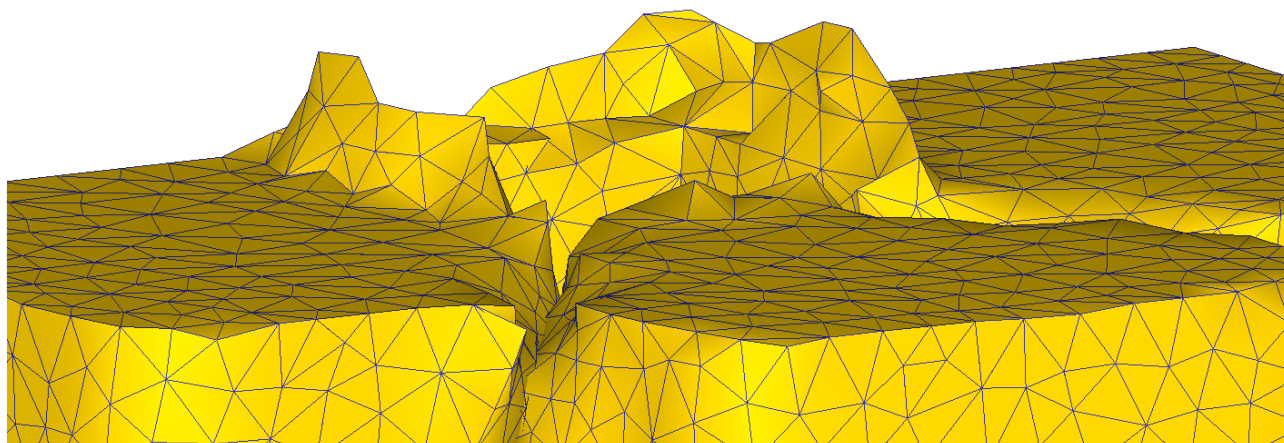
At presskraften sank er også realistisk, dette er igjen grunnet pre-deformasjonen i forkammeret, men også på grunn av temperaturøkningen i materialet. Aluminiumen flyter lettere når den blir



Figur 6.1. (a) Effektiv tøyingsrate i profilveggenes øvre del (b) Nettverk i profilveggenes øvre del

varmere og i kombinasjon med at materialet ikke flyter direkte over i et trangt bæreflateområde synker nødvendig kraft for å få materialet til å flyte inn i og igjennom bæreflateområdet.

Step 67



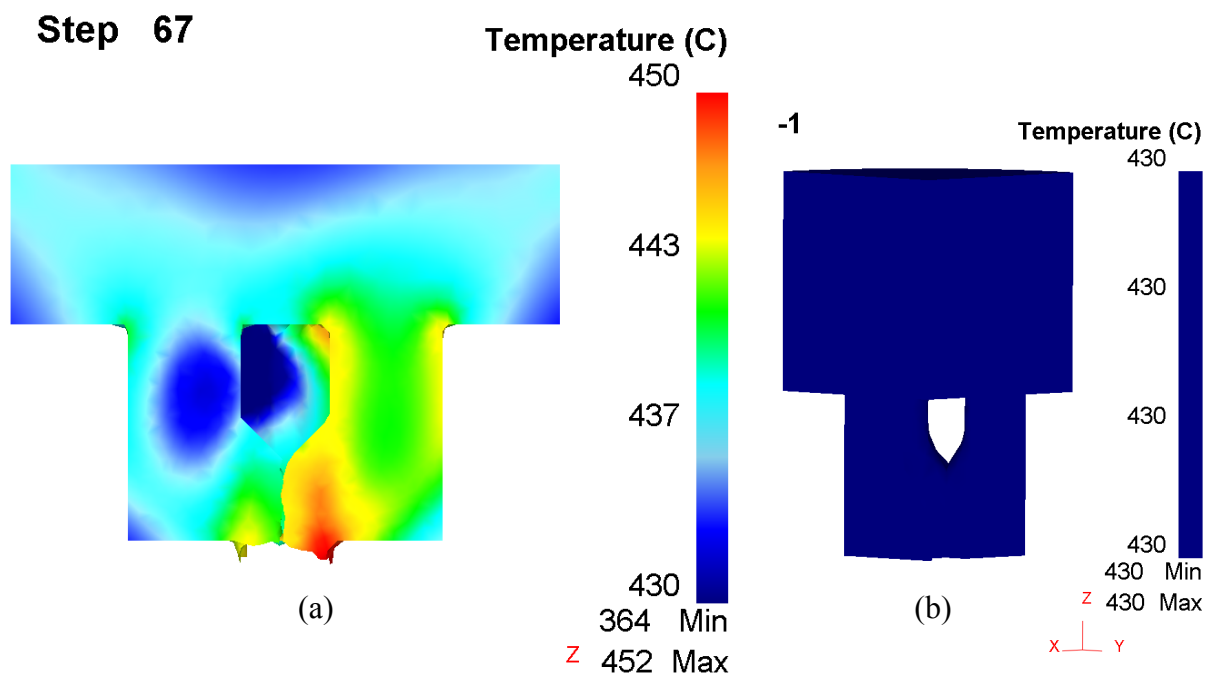
Figur 6.2. Begynnende flyt ut av bæreflateområdet i første del av simulering

6.2 Støtfangerprofil

Fylling av porthullmatrisen viser materialflyt inn under dor, dette materialet skal danne en langsgående sveis som utgjør midtspalten til profilet. Ved utbytting av delvis ekstrudert bolt til videre simulering viser seg at det er lite tilførsel av nytt materiale til sveisen, noe som skaper uriktige resultater ved videre simulering. Når midtspalten ikke får tilførsel av nytt materiale fungerer dette som en brems for langsiden i profilgeometrien, og man får kraftig krumning av det ekstruderte profilet. Etter mailkorrespondanse med Gerda Nubdal i Benteler Aluminium Systems Norway AS ble det bekreftet at noe krumning i starten av ekstrudering er vanlig, men at det i dette tilfellet var vel i overkant. Dette antas å være et resultat av at materialet i midtspalten bremser ned materialflyten da det ikke får nok material i begynnelsen av ekstruderingen. Den øvrige hastighetsfordelingen over tverrsnittet viser moderat variasjon i lengde ekstrudert materiale ved begynnende flyt ut av matrisen, men det går ikke an å studere hvordan dette vil utarte seg grunnet krumningen på det ekstruderte profilet som også bremser de ytterste veggene.

Resultatene fra presskraftmålingen er ekstremt store sammenlignet med andre eksperimenter gjort med porthullmatriser der nivået ligger på 3-8 MN [19, 20], en av grunnene til at presskraften er såpass stor kan være at det ikke er modellert begynnende flyt ut av matriseåpningen etter sveisingen i sveisekammeret. Det er naturlig å tro at noe materiale vil bevege seg mot, og igjennom bæreflateområdet og initier flyten ut av matrisen samtidig som sammensveising av materialet som akkumuleres i sveisekammeret pågår. Dette kan man observere i den første delen av simuleringen der man se at enkelte av nodene i meshet begynner å flyte ut av matrisen, figur 6.2.

En annen del av simuleringen som kan gi opphav til feilkilder ved beregning av antatt presskraft



Figur 6.3. Temperaturfordeling (a) første del (b) andre del av simulering

er ved videre simulering fra fylling av sveisekammeret. Når bolten er byttet ut for ekstrudering av profilet ut av matrisen er ikke temperaturendringene som forekommer i første del av simuleringen tatt hensyn til. Før bolten byttes ut er det temperaturendringene som følger av friksjon i grenseflaten mellom verktøy og materialet og deformasjonen materialet gjennomgår. Denne økningen i temperatur kan være med å stimulere for bedre materialflyt ut av matrisen, da materialet flyter lettere når det blir varmere. Spesielt med tanke på den langsgående sveisen. I stedet har materialet en ny uniform temperaturfordeling som er lavere enn den virkelig ville ha vært. I figur 6.3 vises en sammenligning av hvordan temperaturfordelingen var før og etter at bolten ble erstattet. Dette kunne blitt tatt hensyn til ved å sette en høyere temperatur jevnt over bolten for den videre simuleringen, så presskraftmålingen antas å være høyere enn den burde vært, men forløpet til kurven antas å være representativ.

Som følger av ovenfor drøfting gir trykk- og temperaturfordelingsgrafene et uriktig bilde av hvordan det burde vært, men det at temperaturen og trykket stiger nedover den langsgående sveisen stemmer og gir et riktig bilde av det som skjer i dette området, dog med feil verdier.

Effektiv tøyningshastighet og nettverksanalysene viser realistisk oppførsel sammenlignet med tidligere kartlagte eksperimenter og kunnskap om dannelse av dødsoner, skjærsoner og deformasjonssoner gjennomgått i kapittel 2.3.

Kapittel 7

Konklusjon og videre arbeid

Rapportens hovedfokusområde er å øke forståelsen for hvordan materialflyten i en ekstruderingsprosess for forskjellige tynnveggede komplekse profiler av ulik art, i en industriell sammenheng oppfører seg. Det er også tatt for seg hvordan man kan avbalansere materialflyten ved bruk av forkammer. U-profilen som er gitt av veileder, og som det tidligere har blitt gjennomført laboratorieeksperimenter på ved bruk av modellmateriale, har blitt simulert med og uten forkammer for å se hvordan dette avbalanserer flyten. Støtfangergeometrien som er gitt av Benteler Aluminium Systems Norway AS har også blitt simulert.

7.1 Konklusjon: U-profil

Bruk av forkammer for avbalansering til jevn materialflyt ved bruk av forkammer ble analysert ved bruk av 3D FEM-simulering. Ved å sammenligne en flat matrise, matrise nr. 0 med en matrise med forkammer, matrise nr.1. Det ble bekreftet at bruk av forkammer spiller en viktig rolle ved avbalansering av materialflyt og kan brukes alene for å oppnå en jevnere materialflyt ut av matrisen. Simuleringene avdekket en rekke fordeler med bruk av forkammer. Implementeringen viste at bruk av forkammer ved ekstrudering av et U-profil med varierende tykkelse over tverrsnittet:

- ..kan brukes alene for å avbalansere for ujevn materialflyt.
- ..minker maksimal presskraft igjennom ekstruderingsprosessen fra 8.48 MN til 7.98 MN.
- ..senker gjennomsnittlig utløpshastighet drastisk, fra 368.0 mms^{-1} til 74.6 mms^{-1} langs bunnflaten og 479.9 mms^{-1} til 91.7 mms^{-1}

7.2 Konklusjon: støtfangerprofil

Analyse og simulering av materialflyt igjennom er porthullmatrise for ekstrudering av et tynnvegget støtfangerprofil ble gjennomført. Materialflyten igjennom bæreflateområdet krever veldig stor presskraft for det tynnveggede profilet, og en kombinasjon av ekstruderingshastigheten og friksjonen i dette området fører til at profilet krummer veldig mye mer enn det som er vanlig i

industrien. Konklusjoner trukket fra simuleringen er:

- Materialflyten fra bolten er innsatt i containere til fylling av sveisekammer vise tydelig karakteristiske dødsoner, skjærsoner og deformasjonssoner jamfør teorien omhandlende dette tema, simuleringen gir et realistisk resultat for den første delen av simuleringen.
- Profilet krummer mye mer enn det som er vanlig ved industriell produksjon av et slikt profil, fordi modellen ikke er korrekt utformet slikt det gjøres i industrien, så simuleringsresultatene omhandlende hastighetsfordeling er ikke representative.
- Siden det ikke ble modellert begynnende materialflyt i bæreflatområdet i den «nye» bolten er presskraften som kreves mye høyere enn ved lignende simuleringer.
- Det er ikke tatt hensyn til temperaturøkning i boltmaterialet fra den er innsatt i containeren til den ekstruderes til sveisekammeret, så resultatene ved ekstrudering av profilet er ukorrekte.

7.3 Videre arbeid

7.3.1 U-profil

Forslag til videre arbeid for å kartlegge materialflyt og avbalansering av ujevn materialflyt burde bli gjort på følgende områder:

- Avbalansering ved bruk av bæreflater med ulik lengde.
- Utforske andre muligheter ved utforming av forkammergeometri som gir mindre friksjon i profilveggenes øvre del for å redusere temperaturøkningen her.
- Kjøre simuleringene med finere mesh for å få mer nøyaktige målinger av utløpshastigheten.

7.3.2 Støtfangerprofil

- Legge til en bit material på den delvis ekstruderte bolte fra sveisekammer for å se om dette har innvirkning på materialflyten ut av bæreflateområdet og presskraften ved ekstrudering.
- Kjøre en simulering der det tas hensyn til temperaturøkningen i bolten.
- Endre geometrien til doren for å få mer realistisk resultater fra materialflyten i midtspalten.

Referanser

[1] Kofstad, P. K., 2013, 26. juli. Aluminium. I Store norske leksikon. Hentet 01. mai 2014 fra <http://snl.no/aluminium>

[2] Aluminium Extruders Council: Aluminum Extrusion Manual – 4th Edition, hentet fra http://aec.org/library/design_manual.cfm

[3] European Aluminium Association, hentet fra www.alueurope.eu/about-aluminium/history/

[4] Norsk Hydro, Faktaside: Hvorfor aluminium, hentet 01.mai 2014 fra <http://www.hydro.com/no/Hydro-i-Norge/Om-aluminium/Hvorfor-aluminium/>

[5] Moe, P.T., “Pressure and Strain Measurement during Hot Extrusion of Aluminium”, Institutt for Produktutvikling og Materialer, 2005, NTNU: Trondheim – Doctoral thesis p. 1 – 25

[6] Valberg, H.S., “Applied metal forming: including FEM analysis”, 2010, New York: Cambridge University Press

[7] Urskog. T.U., Analyse av aluminiumsekstrudering ved eksperimenter og FEA, Institutt for Produktutvikling og produksjon, 2013, NTNU: Trondheim - Masteravhandling

[8] ECplaza faktaside, tilgjengelig fra <http://chinlaialuminium.en.ecplaza.net/>

[9] Sheppard, T., Extrusion of aluminium alloys, 1999, The Netherlands: Kluwer academic publishers

[10] Valberg, H.S., Formgivning av metaller ved smiing, valsing, ekstrudering, trekking, klipping og plateforming – kompendium i faget TMM4155: Puma 8

[11] Støren, S. Moe., Extrusion in Handbook of aluminium, physical metallurgy and process, 2003: New York. p. 385-480

[12] Valberg, H., Grønseth, R.A. and Kovacs, R.: «Extrusion of light alloys», Sintef Project Memo, 1990

[13] Khan. Y.A., Material flow in extrusion of aluminium hollow profiles, Institutt for Produktutvikling og Produksjon, 2013, NTNU: Trondheim – Doctoral thesis p.42.

[14] Fang, G., Zhou, J. and Duszczyc J., Effect of pocket design on metal flow through single-bearing extrusion dies to produce a thin-walled aluminum profile. Journal of Materials Processing

Technologies, 2008. 199 p. 91-101

[15] Ulysse, P., Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods. *International Journal of Mechanical Science*, 2002. 44: p. 319-341

[16] Kumar, S. and Vijay, P., Die design and experiments for shape extrusion under cold and hot condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. 190: p. 375-381

[17] Vala, K., Optimalisering av materialflyt gjennom ekstruderingsverktøy (aluminium) ved optimalt valg av bæreflatelengder, Insitutt for materialer og bearbeiding, 1992, NTNU: Trondheim - Diplomoppgave

[18] Scientific Forming Technologies Corporation, Faktaside: DEFORM-3D, hentet 16.mai 2014 fra <http://www.deform.com/products/deform3-d/>

[19] He. Y., Xie. S., Cheng. L., and Huang G., FEM simulation of aluminum extrusion process in porthole die with pockets, 2009, tilgjengelig fra: www.sciencedirect.com

[20] Jo, H.H., Lee, S.K., Jung, C.S., Kim, B.M., A non-steady state FE analysis of Al tubes hot extrusion by a porthole die. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006. 173: p.223-231.

Appendiks A

Risikovurdering

NTNU		Utarbeidet av		Nummer		Dato	
		HMS-avd.		HMSRV2601		22.03.2011	
HMS		Godkjent av		Side		Erstatter	
		Rektor				01.12.2006	

Kartlegging av risikofylt aktivitet

Enhet: _____ **Dato:** 21.01.2014

Linjeleder: _____

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon):
 Henry Valberg, Wenche Christenssen

(Ansv. veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre m. kompetanse)

Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess:
 Wenche Christenssen, FEM-ANALYSE AV INDUSTRIELL
 ALUMINIUMSPROFILEKSTRUDERING

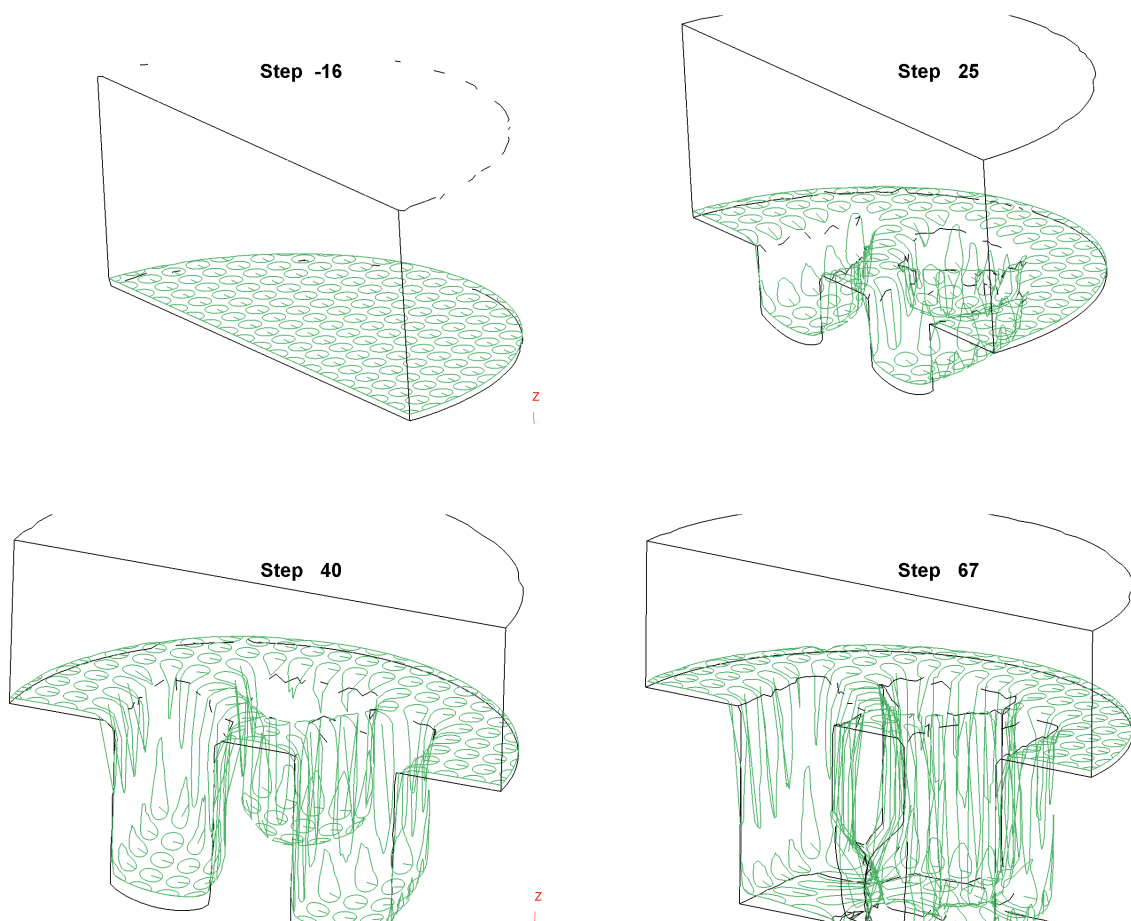
Er oppgaven er rent teoretisk? (JA/NEI) JA "JA" betyr at veileder inestår for at oppgaven ikke inneholder noen aktiviteter som krever risikovurdering

Signaturer: Ansvartlig veileder: *Henry Valberg* Student: *Wenche Christenssen*

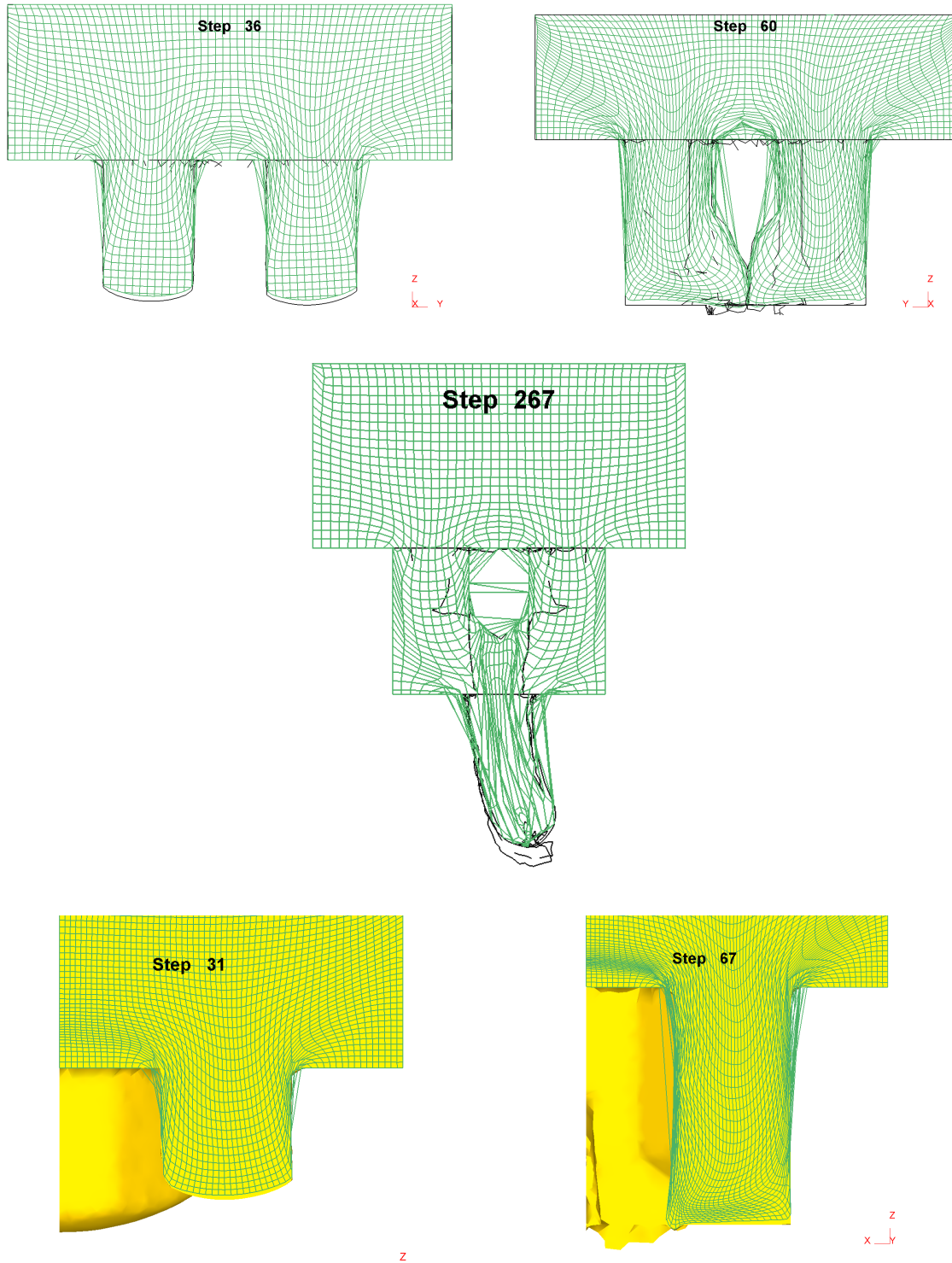
ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvarli	Eksisterende dokumentasjon	Eksisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
1	FEM-simuleringer og analyse, kontorarbeid	g				
2						
3						
4						
5						
6						

Appendiks B

Nettverksanalyse: støtfanger



Figur B1: Nettverk som følger overflatesjiktet til bolten som blir ekstrudert



Figur B2: Nettverkløp i YZ-planet og XZ-planet

Appendiks C

Effektiv tøyningsrate

