

Simulering og uttesting av nye forformingsprosesser for varmsmiing

Fredrik Hansen Moheim

Master i produktutvikling og produksjon
Innlevert: juli 2016
Hovedveileder: Torgeir Welo, IPM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling og materialer

Forord

Denne oppgaven er skrevet ved NTNU våren 2016 som avsluttende masteroppgave ved instituttet for produktutvikling og materialer. Oppgaven er en del av et forskningsprosjekt på metallforming og materialteknologi i samarbeid med Neuman Aluminium Raufoss, med fokus på å finne alternative prosesssteg i produksjonen av hjuloppheng.

Oppgaven har bydd på en høyst reell innføring i produktutvikling med en veldig aktuell problemstilling, der en kombinasjon av simuleringer og fysisk testing har vært sentralt for å oppnå et godt resultat. Det har vært spennende og læringsrikt å kunne jobbe med en så konkret oppgave, der resultatet potensielt kan brukes i industrien.

Jeg ønsker å takke min veileder Torgeir Welø. I tillegg vil jeg rette en stor takk til Dirk Nolte for konsultasjon og mye god input i forhold til metode, testmuligheter og oppgavestruktur. Oppgaven hadde vært veldig redusert uten hans hjelp og engasjement. Jeg ønsker også å takke kontaktpersonen min ved Neuman Aluminium Raufoss, Frode Paulsen, for hurtige og konkrete svar på spørsmål jeg har hatt. Takk rettes også til Henry Valberg som har kjørt Deform-simuleringer for meg. Det må også rettes en stor takk til ingeniørene på IPMs verksted, med Børge Holen i spissen, for mye hjelp under konstrueringen av testverktøyet. Til slutt vil jeg takke Ole Christian Hermanrud for mange gode diskusjoner på mulige løsninger for denne oppgaven, samt Camilla Andersen som har bidratt med korrekturlesing og generell støtte under oppgaveskrivingen.

Fredrik Moheim

Fredrik Moheim

Trondheim, 1. juli 2016

Oppgavetekst

NTNU - NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR PRODUKTUTVIKLING
OG MATERIALER

MASTEROPPGAVE VÅR 2016 FOR STUD.TECHN. Fredrik Hansen Moheim

Simulering og uttesting av nye forformingsprosesser for varmsmiing

Simulation and testing of novel preforming processes for hot forging

I varmsmiing (av aluminium) er forforming vesentlig for å fordele materialet før selve smioperasjonen. En metode som benyttes er staking (upsetting). Vanligvis begrenses staking av at emnet knekker og folder (selvkontakt), med fare for senere sprekkdannelse i smiing. Alternativt kan stempelet som benyttes til staking knekke ut hvis graden av staking er for stor. Ofte kan det i stukeprosessen være vanskelig å fordele materialet dit man ønsker - dette vil gi lav utnyttelse av innsatsmaterialet og føre til mye skrap (skjegg i smiprosessen). Mye skrap gir dyre og lite konkurransedyktige produkter.

Utgangspunktet for varmsmiing er ofte en sylindrisk bolt som enten er støpt eller ekstrudert (fra stangpresse). Ekstruderte bolter er foretrukket, fordi man da unngår støpestruktur som kan gi et sprøtt ferdigprodukt. En smiprosess der man benytter et støpt utgangsemne gir lavere kost, men man er da avhengig av at støpestrukturen blir borte gjennom plastisk deformasjon i forformetrinnet. Et eksempel på en slik prosess er flytpressing (stykkekstrudering), som enten kan gi bakoverekstrudering, foroverekstrudering eller en kombinasjon av disse.

Formålet med denne MSc-oppgaven er å dokumentere teknisk og økonomisk egnethet (og risiko) knyttet til en ny industriell metode for forforming av varmformingsemner. Metoden skal ikke baseres på staking og bør helst benytte et støpt emne som utgangspunkt, der forforming fjerner støpestrukturen.

Arbeidsoppgaver:

- Kort gjennomgang av litteratur basert på prosjektoppgave
- Oppdatering av plan fra prosjektoppgave
- Formulere og definere av problemstilling
- Etablere av kriterier/rammeverk (f.eks. knyttet til temperatur, belegg, friksjon, klining, struktur, nødvendig etterbearbeiding, etc.) for en vellykket forformingsprosess). Av spesiell interesse er der å kartlegge/sikre at deformasjon fjerner støpestruktur.
- Utvikle numeriske simuleringmodeller (Deform) for mest lovende metode/prosess
- Detaljert analyse og systematisk sammenligning av alternative prosesser basert på kriteriene over
- Vurdering av eksperimentelle verifiseringsmetode for valgt prosess; herunder eventuelt skalert, forenklet og konseptuell for studie av identifisert delproblem.
- Gjennomføring av forsøk (NTNU eller på Raufoss).

- Analyse av eksisterende praksis/prosess.
- Etablere en anbefaling med risikovurdering knyttet til implementering.
- Skissere industrielle implementeringsplan.
- Rapportskriving.

Formelle krav:

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 (<https://www.ntnu.no/web/ipm/masteroppgave-ved-ipm>). Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av masteroppgaven.

Risikovurdering av forsøksvirksomhet skal alltid gjennomføres. Eksperimentelt arbeid definert i problemstilling skal planlegges og risikovurderes innen 3 uker etter utlevering av oppgavetekst. Konkrete forsøksvirksomhet som ikke omfattes av generell risikovurdering skal spesielt vurderes før eksperimentelt arbeid utføres. Risikovurderinger skal signeres av veileder og kopier skal inngå som vedlegg til oppgaven.

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 velkrevet. 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.

Kontaktperson: Dr.ing. Frode Paulsen, Neuman Raufoss A/S

Torgeir Welo
Instituttleder

Torgeir Welo
Faglærer



NTNU
Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
Institutt for produktutvikling
og materialer

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg alternative metoder for å forforme en komponent brukt i produksjon av hjuloppheng til personbiler. De alternative metodene skal bruke andre prinsipper enn staking, og det er ønsket at man skal kunne bruke støpte utgangsemner for prosessen. Komponenten er laget av aluminium.

Teori og industriell praksis er presentert for å illustrere de mange faktorene som man må ta hensyn til ved utvikling av alternative produksjonsmetoder. Tre metoder, bestående av kombinert forover- og bakoverekstrudering, og lateral ekstrudering ble valgt som utgangspunkt. Innledende simuleringstester ble gjennomført for å velge ut metoden med mest potensiale, og den valgte løsningen ble testet videre, både via simuleringer og skalerte, fysiske tester.

Simuleringene er utført med FEM-programmet Deform. Prioriterte faktorer er formfylling og kraftbehovet for å utføre prosessen. Simuleringer er også gjennomført i NX 9.0 for å se på lasttilfeller i forhold til verktøyutforming.

Fysiske tester er gjennomført med 1:6-skalering av den opprinnelige størrelsen i en 60 tonns presse. Testene er utført som varmforming med vannbasert smøremiddel. Verktøy og emne ble varmet til 500°C i sammenheng med testingen.

Resultater tyder på at en variant av lateral ekstrudering er svært lovende for videre testing. Formemetoden viser gode resultater i forhold kraftbehov, formfylling, skjeggdannelse og deformasjoner. Den store graden av oppnådde tøyninger åpner også for bruken av støpte utgangsemner.

Abstract

This thesis investigates possible solutions to preform a component used in production of suspension systems for passenger cars. The possible solutions were restricted to non-upsetting methods of metal forming. It is also desired that the new preform method can use casted billets. The component is made out of aluminium.

Theory and industrial practices are presented to give an image of the many factors that affects choosing a new, alternative production method. Three methods, consisting of combined forward and backward extrusion, and lateral extrusion, were chosen as the initial methods. Initial testing is done for several methods, eliminating the less optimal ones. The chosen solution, based on the initial test results, is further tested, via both simulations and physical testing.

Simulations are conducted with the FEM-program Deform. Die filling and necessary force needed to perform the process are prioritized during these tests. Simulations are also conducted in NX 9.0 to investigate load cases associated with tool design.

Physical testing has been conducted with a 1:6 scaled version of the original component size. For the experiments, a 60-ton press was used. All tests are conducted as hot forming with a water-based lubricant. The process temperature for the experiments was 500°C.

Results indicates that a form of lateral extrusion is highly promising for further testing. This preforming method shows good results regarding power requirements, die filling, generated flash and deformations. The high degree of deformation enables the use of cast billets.

Innholdsfortegnelse

Figurliste	IX
Tabelliste	XII
Formelverk	XII
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling og mål for oppgaven.....	2
1.3 Oppgavens struktur	2
1.4 Begrensninger ved oppgaven	2
2. Teori	4
2.1 Generelt om metallforming.....	4
2.2 Kraftbehov	4
2.3 Trykk og spenninger	5
2.4 Tøyninger og tøyningshastighet	6
2.5 Friksjon.....	7
2.6 Materialflyt	9
2.6.1 Inhomogen deformasjon.....	10
2.7 Prosesstemperatur	11
2.7.1 Varmeutvidelse	12
2.8 RekrySTALLISERING og kornvekst.....	12
2.9 FEM.....	14
3. Industriell praksis	16
3.1 Smiing	16
3.2 Ekstrudering.....	18
3.3 Legering AA6082.52.....	19
3.4 Bruk av støpte utgangsemner	20
3.5 Defekter	21
3.5.1 Folding.....	21
3.5.2 Klining.....	22
3.5.3 Kneking	22
3.5.4 Blisters	22
3.5.5 Lokal smelting.....	23
3.6 Sammenligning av nåværende metode.....	23

3.6.1	Stuking:.....	25
3.6.2	Valsing:	25
3.6.3	Kommentar til dagens metoder:.....	25
4.	Metode.....	26
4.1	Nye alternativer	26
4.1.1	Kombinert stykkekstrudering.....	27
4.1.2	Lateral ekstrudering	27
4.1.3	Lateral ekstrudering L-form.....	28
4.2	Case-produkt	29
4.3	Simuleringer i NX og Deform	30
NX.....		30
Deform.....		34
4.3.1	Innledende simuleringer	35
4.3.2	Simuleringer for valgt løsning	39
4.4	Utforming og eksperimentell testing av valgt metode	41
4.4.1	Hardhetstest.....	41
4.4.2	Verktøydimensjoner og utstyr	41
4.4.3	Verktøysimulering	46
4.4.4	Beregninger for verktøyutforming.....	49
4.4.5	Plastelinatest	50
4.4.6	Test 1	50
4.4.7	Test 2	50
4.4.8	Test 3	51
5.	Resultater.....	53
5.1	Simuleringsresultater – Innledende simuleringer	53
5.1.1	Kombinert ekstrudering Ø100.....	53
5.1.2	Kombinert ekstrudering Ø200.....	55
5.1.3	Lateral ekstrudering «stukedel»	57
5.1.4	Lateral ekstrudering L-form uten ventilerings.....	59
5.2	Simuleringsresultater for valgt løsning.....	61
5.2.1	Lateral ekstrudering L-form med ventilerings.....	61
5.2.2	Lateral ekstrudering L-form fint mesh	64
5.3	Eksperiment.....	68

5.3.1	Hardhetstest.....	68
5.3.2	Verktøysimulering	68
5.3.3	Konsepttest med plastelina.....	71
5.3.4	Test 1	72
5.3.5	Test 2	74
5.3.6	Test 3	75
6.	Drøfting og diskusjon av resultater.....	80
6.1	Simuleringsresultater	80
6.1.1	Innledende simuleringer	80
6.1.2	Simuleringer for valgt løsning	81
6.1.3	Verktøysimuleringer	82
6.2	Konsepttest med plastelina	82
6.3	Eksperiment.....	82
6.3.1	Hardhetstest.....	82
6.3.2	Test 1	84
6.3.3	Test 2	85
6.3.4	Test 3	85
6.4	Refleksjon av metode og feilkilder	87
6.4.1	Refleksjon over metode	87
6.4.2	Feilkilder	88
6.5	Drøfting av resultater opp mot problemstilling	88
6.6	Anbefaling med risikoplan.....	89
6.7	Forslag til industriell verktøyutforming.....	91
7.	Konklusjon.....	93
8.	Videre arbeid.....	93
8.1	Implementeringsplan.....	93
	Referanser	95
	Vedlegg A.....	100

Figurliste

Figur 1 Bæream laget av Neuman Aluminium Raufoss	1
Figur 2 Tøyningshastighet i flytkurver [8]	7
Figur 3 Friksjonsmodeller [10].....	8
Figur 4 Kontrastpinner i snitt [11]	9
Figur 5 Materialflyt illustrert av kontrastpinner [11]	9
Figur 6 Innrisset rutenett [12]	10
Figur 7 Inhomogen deformasjon.....	10
Figur 8 Flytkurver vs. temperatur [14]	11
Figur 9 Nedkjølingskurve [22]	13
Figur 10 Elementtyper [26]	14
Figur 11 Smieksempel [27]	16
Figur 12 Senkesmiing [28]	17
Figur 13 Slippvinkel a og b.....	17
Figur 14 Direkte ekstrudering [31]	18
Figur 15 Indirekte ekstrudering [31]	18
Figur 16 Lateral ekstrudering [33].....	18
Figur 17 Flytekurver [34]	19
Figur 18 Støpt (a) og formet/valset (b) struktur [35]	20
Figur 19 Rekrystallisering [20].....	21
Figur 20 Folding [36].....	21
Figur 21 Blisters [40].....	23
Figur 22 Blisters i SEM [39].....	23
Figur 23 Ventilering [39].....	23
Figur 24 Stykkeekstrudering.....	27
Figur 25 Lateral ekstrudering "stukedel"	27
Figur 26 Lateral ekstrudering L-form sett ovenfra	28
Figur 27 Lateral ekstrudering L-form isometrisk vinkel	28
Figur 28 Geometri «stukedel».....	29
Figur 29 Geometri L-form.....	29
Figur 30 Kombinert ekstrudering helt verktøy.....	31
Figur 31 Kombinert ekstrudering oppdelt verktøy	31
Figur 32 Maskintegning kombinert ekstrudering.....	31
Figur 33 Lateral ekstruderingsverktøy	32
Figur 34 Lateral ekstruderingsverktøy snitt	32
Figur 35 Maskintegning lateral ekstrudering	32
Figur 36 L-form, Helt verktøy	33
Figur 37 L-form, Transparent verktøy	33
Figur 38 Maskintegning L-form	33
Figur 39 Setup kombinert ekstrudering Ø100.....	35
Figur 40 Setup kombinert ekstrudering Ø200.....	36
Figur 41 Setup lateral ekstrudering stukedel	37
Figur 42 Setup lateral ekstrudering L-form	38
Figur 43 Dimensjoner komponent	41

Figur 44 Dimensjoner nedre verktøy	42
Figur 45 Dimensjoner øvre verktøy	43
Figur 46 Dimensjoner utgangsemne	44
Figur 47 Dimensjoner stempel	45
Figur 48 Komplette verktøy exploded view	45
Figur 49 Testverktøy påført smøremiddel	51
Figur 50 Testverktøy i presse	52
Figur 51 Kombinert ekstrudering Ø100.....	53
Figur 52 Kraftkurve Ø100	53
Figur 53 Tøyning, spenninger og temperatur for kombinert ekstrudering Ø100.....	54
Figur 54 Kombinert ekstrudering Ø200.....	55
Figur 55 Kraftkurve Ø200 mm	55
Figur 56 Tøyning, spenning og temperatur for kombinert ekstrudering Ø200	56
Figur 57 Lateral ekstrudering "stukedel"	57
Figur 58 Kraftkurve lateral ekstrudering "stukedel"	57
Figur 59 Tøyninger, spenninger og temperatur for "stukedel"	58
Figur 60 Skjeggdannelse på stukedel	58
Figur 61 Lateral ekstrudering L-form.....	59
Figur 62 Kraftkurve lateral ekstrudering "L-form"	59
Figur 63 Tøyninger og tøyningshastighet L-form uten ventilering	60
Figur 64 Lateral ekstrudering L-form med ventilering	61
Figur 65 Kraftkurve L-form med ventilering.....	61
Figur 66 Tøyninger, L-form med ventilering	62
Figur 67 Tøyningshastighet, L-form med ventilering	63
Figur 68 Lateral ekstrudering L-form fint mesh	64
Figur 69 Kraftkurve L-form fint mesh	64
Figur 70 Tøyninger, L-form fint mesh.....	65
Figur 71 Tøyningshastighet, L-form fint mesh	66
Figur 72 Overflatedefekt L-form	67
Figur 73 Deformasjoner verktøy	68
Figur 74 Spenninger testverktøy	69
Figur 75 Kraftkurve Verktøy	70
Figur 76 Plastelinatest	71
Figur 77 Plastelinatest, stempel	71
Figur 78 Plastelinatest, A og B.....	71
Figur 79 Test 1, emne	72
Figur 80 Test 1, emne	72
Figur 81 Test 1, skader på stempel.....	72
Figur 82 Test 1, verktøyskade.....	73
Figur 83 Test 2, komponent	74
Figur 84 Test 2, stempeltapp.....	74
Figur 85 Test 2, komponent sett ovenfra	74
Figur 86 Test 2, komponent sett undenfra	74
Figur 87 Test 2, komponent med tapp.....	74

Figur 88 Test 3, emne i verktøy	75
Figur 89 Test 3, stempel	75
Figur 90 Test 3, overskuddsmateriale	75
Figur 91 Test 3, komponent i øvre verktøy	76
Figur 92 Test 3, nedre verktøy	76
Figur 93 Test 3, underside av komponent.....	77
Figur 94 Test 3, overside av komponent	77
Figur 95 Test 3, overside av komponent 2	78
Figur 96 Test 3, tupp av komponent	78
Figur 97 Test 3, mål for komponent	79
Figur 98 Test 3, mål for komponent	79
Figur 99 Kornorientering kombinert ekstrudering.....	80
Figur 100 Kraftbehov innledende metoder.....	81
Figur 101 Hardhetsskalaer [42]	83
Figur 102 Hardhet og flytegrense [42]	84
Figur 103 Foldedefekt	85
Figur 104 Overflatekvalitet fokuspunkter	86
Figur 105 Industriell implementering.....	92

Tabelliste

Tabell 1 Simuleringsparametere kombinert ekstrudering.....	35
Tabell 2 Simuleringsparametere kombinert ekstrudering.....	36
Tabell 3 Simuleringsparametere Lateral ekstrudering «stukedel».....	37
Tabell 4 Simuleringsparametere L-form uten ventilerings.....	38
Tabell 5 Simuleringsparametere L-form med ventilerings.....	39
Tabell 6 Lateral ekstrudering L-form finere mesh.....	40
Tabell 7 Simuleringsparametere verktøy.....	48
Tabell 8 Oppsummering av resultater.....	88

Formelverk

Formel 1 Kraftkomponenter	4
Formel 2 Spenning [2]	5
Formel 3 Tensor-notasjon for spenninger [3]	5
Formel 4 Ekte tøyninger [6].....	6
Formel 5 Nominelle tøyninger [6].....	6
Formel 6 Tøyninger i x-retning[6]	6
Formel 7 Tøyninger i y-retning[6]	6
Formel 8 Tøyninger i z-retning[6].....	6
Formel 9 Ekte tøyningshastighet [7]	6
Formel 10 Nominell tøyningshastighet [7].....	6
Formel 11 Coulombs friksjonsmodell [10]	7
Formel 12 Trescas friksjonsmodell [10]	7
Formel 13 Varmeutvidelse	12
Formel 14 Grad av rekrytallisering	13
Formel 15 Kornvekst [17]	13
Formel 16 Knekking.....	22

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Stadig strengere krav til utslipp og drivstoff-effektivitet krever at bilprodusenter må produsere lettere, mer miljøvennlige biler. Dette setter også krav til underleverandørene i bilindustrien om å produsere lettere, men samtidig sterke komponenter. Derfor er det et ønske å produsere så lette deler som mulig, som samtidig oppfyller alle krav til styrke og utmatting som en typisk bilkomponent krever.

På grunn av dette blir aluminium i større og større grad brukt fremfor stål. Generelt har aluminium god korrosjonsbestandighet, det er lett å forme, og betraktelig lettere enn stål. Aluminium kan også legeres med andre grunnstoffer for å skreddersy legeringer som er tilpasset bruksområdet de er tiltenkt. Samtidig kan disse legeringene etterbehandles på flere forskjellige måter for å oppnå gode styrkebidrag som trengs for å kunne brukes som deler i bilindustrien.

Reduksjon i materialsvinn og kortere produksjonstid gjør at bedriften kan ivareta sin markedsposisjon, og produsere konkurransedyktige produkter. Derfor er det viktig for bedrifter å se etter nye og forbedrede metoder som kan hjelpe dem å oppnå nettopp dette.

Neuman Aluminium Raufoss er en bedrift som produserer hjuloppheng i aluminium til personbiler. Bedriften leverer deler til bilprodusenter som blant annet BMW, Mercedes og Volvo. Delen som er valgt for denne oppgaven er en L-formet bæream, vist i Figur 1, som er del av hjulopphenget. L-armen lages av aluminium, og produseres i hovedsak ved smiing. Produksjonen er delt opp i flere ledd, der delen forformes flere ganger før den smis. Dette for å begrense skjeggdannelse ved smiing, og slik redusere materialsvinn. Forforming betyr å forme komponenter slik at de ligner mest mulig/utnyttes mest mulig i neste prosess.



Figur 1 Bæream laget av Neuman Aluminium Raufoss

Som nevnt tidligere er det i bedriftens beste interesse å videreutvikle og forbedre prosessene sine. Denne oppgaven vil ta for seg alternative forformingsmetoder enn de som brukes i dag, med spesielt fokus på steget der det i dag brukes steking eller valsing. En foreslått variant er bruk av stykkestrudering, eller andre metoder som ikke innebærer steking. Det er også et ønske om å kunne bruke støpte utgangsemner framfor ekstruderte emner, da førstnevnte er billigere. Ulempen er at støpte emner ofte er «brittle», eller «sprø», og kan knekke under prosessen med å produsere hjulopphenget. Forutsetningen er derfor at det nye alternativet helst skal kunne endre metallstrukturen til en mer duktil struktur under prosessen.

1.2 Problemstilling og mål for oppgaven

Basert på forrige innledningen får man følgende problemstilling:

- Kan man bruke smi- eller ekstruderingsprosesser for å lage gode forforminger?
- Kan man bruke støpte emner som utgangspunkt?
- I så fall; i hvor stor grad omdannes strukturen fra sprø til duktil av den nye prosessen?

Oppgavens mål:

Finne en metode som sikrer materiale i det ønskede området på en bedre eller tilsvarende måte som dagens metode.

Undersøke muligheten for å bruke støpte utgangsemner med den alternative metoden.

1.3 Oppgavens struktur

I denne oppgaven vil det bli foreslått tre metoder som sammenlignes med to metoder som brukes av bedriften i dag. Fokus vil være generell egnethet til forforming. Oppgaven er delt opp i 3 deler.

Del 1, bestående av kapittel 2 og 3 tar for seg teori og tidligere arbeid rundt metallforming. Litteraturstudie er innbakt og referert til i teorien.

Del 2, bestående av kapittel 4, vil gjelde oppsett av simuleringer og forsøk.

Del 3, bestående av kapittel 5, 6 og 7, tar for seg resultater, diskusjon av resultater, samt en konklusjon. Avslutningsvis vil det også presenteres en implementeringsplan for den valgte løsningen i kapittel 8.

Vedlegg består av risikovurdering for eksperimentell testing, og er oppgitt sist i denne oppgaven.

1.4 Begrensninger ved oppgaven

Potensielle økonomiske fordeler/ulempes ved en ny metode vil diskuteres, men det vil ikke fokuseres på kostnadsestimater eller kostnadsoverslag for alternative metoder og implementering av disse. Kostnader forbundet med forskning og utvikling av ny metode er heller ikke nevnt i detalj, da disse kan være høyst variable. Formemetoder som valsing eller sveising er det ikke fokusert på i denne oppgaven. Smøremidler vil nevnes, men ikke prioriteres, da en egen oppgave ved IPM NTNU [1] tar for seg testing av egnede smøremidler våren 2016.

Testverktøyets geometri er noe forenklet for å enklere kunne utforme verktøyet i forhold til testing. Det forventes derfor noe avvik sammenlignet med den faktiske utformingen, men hensikten for testingen er i hovedsak å teste prinsippet/konseptet. Økonomiske begrensninger og begrenset med tid ligger til grunn for at valg av verktøymateriale og maskinering av verktøyet, ikke holder den beste kvaliteten. Begrenset med tid i forhold til fysisk testing, samt begrenset tilgang på utstyr ligger til grunn for at det ikke er gjennomført flere tester.

Tilgjengelig programvarelisens for Deform var mellom 8. februar og 8. mars. Lisensperioden var også relativt tidlig i semesteret, slik at det på dette tidspunktet ikke

var full oversikt over hva som skulle simuleres. På grunn av dette har det ikke vært mulighet til å kjøre simuleringer jevnt utover arbeidsperioden, og derfor har det ikke blitt kjørt det ønskede antall simuleringer, eller så grundig som man hadde ønsket. De dyptgående simuleringene (avsnitt 4.3.2) er derfor ikke gjennomført av undertegnede grunnet mangel av lisens. Simuleringsoppsettet, samt utforming av alle deler, er gjort av undertegnede og så sendt til Henry Valberg som har kjørt simuleringene og sendt tilbake resultatene. På grunn av dette er det noe inkonsekvent presentasjon av simuleringsresultater i kapittel 5.

Enkle håndberegninger er utført i forhold til testverktøy og dimensjonering av dette. Særlige håndberegninger for kraftbehov, oppståtte spenninger og tøyninger for prosessene er ikke utført grunnet delens noe komplekse form, samt mange påvirkende parametere. Såpass mange forenklinger og antagelser måtte nok blitt gjort at resultatet ikke nødvendigvis hadde vært særlig reelt. Det er antatt at simuleringsresultatene i det minste gir tilnærmet sannsynlige verdier. Resultater fra simuleringene er sammenlignet opp mot empiriske data for dagens metode.

2. Teori

Dette kapittelet tar for seg generell teori som er relevant i forhold til metallforming. Teorien er rettet spesielt mot varmforming.

2.1 Generelt om metallforming

Siden tidenes morgen har man vært avhengig av å kunne forme materialer for å kunne lage praktiske verktøy og hjelpemidler. Århundrer med videreutvikling og forskning har gitt oss evnen til å konstruere ekstremt komplekse deler med svært nøyaktige toleranser, samt uendelige mengder med legeringer og materialer. For enhver metallformingsprosess er det relaterte prosessparametere. Disse er blant andre friksjon, tøyninger, tøyningshastighet, prosessstemperatur osv. Disse vil belyses mer i detalj videre i oppgaven. Av metallformingsprosesser kan man eksempelvis nevne smiing, valsing og ekstrudering, som er de vanligste formeprosessene. Det er tatt utgangspunkt i smiing og ekstrudering for følgende teori.

2.2 Kraftbehov

For alle metallformingsprosesser der noe skal deformeres, så trengs det kraft. Denne kraften er som oftest i form av en presse, der et stempel eller en senkeform deformerer utgangsemnet. Den totale kraften består av flere kraftkomponenter, som vist i Formel 1.

$$F_{total} = F_{fc} + F_{dh} + F_{fd} + F_{ds}$$

Formel 1
Kraftkomponenter
[2]

Kraftkomponentene betyr følgende:

F_{fc} = Kraften som trengs for å overvinne friksjonen emnet har mot kontainerveggen under forming.

F_{dh} = Kraften som trengs for å overvinne den interne deformasjonsmotstanden i komponenten.

F_{fd} = Kraften for å overvinne friksjon mellom materiale i flytsoner og dødsoner

F_{ds} = Kraften som trengs for å skjærdeformere materialet når det møter variasjoner i hastighetsfelter.

Overflatekvaliteten på emnet, og kontaktkreftene mellom verktøy og emne vil altså være svært utslagsgivende for den totale kraften som trengs. I tillegg vil områder der materialflyten endrer flytretning, som ved skarpe hjørner og store overganger, tilføre betydelige krafttillegg. Optimal verktøyutforming, prosessstemperatur og smøremidler er tiltak for å redusere disse faktorene.

2.3 Trykk og spenninger

En forutsetning for at formeprosessen er vellykket er at kraften er såpass stor at spenningene som oppstår overgår flytegrensen til materialet som skal formes. Flytegrensen er et mål for når et materiale deformeres plastisk, oftest angitt i MPa.

Formel 2 viser den enkleste formen for å beregne spenningene som oppstår.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Formel 2 Spenning [3]}$$

Der σ betegner spenningen eller trykket, F betegner kraften, og A betegner arealet kraften fordeles på. Det skilles mellom ekte spenninger og nominelle spenninger, basert på om man beregner spenningen på faktisk areal, eller opprinnelig areal. Kraften som fordeles på arealet til utgangsemnet må altså være større enn flytegrensen til materialet for å kunne forme det. Samtidig må flytegrensen til verktøyet som brukes være større enn de oppståtte spenningene, slik at verktøyet ikke begynner å flyte. Hvis dette skjer, er verktøyet overbelastet og innehar ikke den opprinnelige geometrien sin, slik at verktøyet må byttes.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{utgangsemne}} &< \sigma_{\text{prosess}} \\ \sigma_{\text{verktøy}} &\geq \sigma_{\text{prosess}} \end{aligned}$$

Spenninger som oppstår kan generelt beskrives med 9 spenningskomponenter. Disse kan igjen forenkles til seks komponenter grunnet parvis likhet for skjærtøyningene [4].

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \text{Formel 3 Tensor-notasjon for spenninger [4]}$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \rightarrow \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

Spenningene deles altså typisk i vanlige spenninger og skjærspenninger, sistnevnte er betegnet som τ .

Skarpe hjørner hindrer ikke bare god materialflyt, men er også utsatt for kjerneeffekter, altså spenningskonsentrasjoner på grunn av geometrien. Dette påvirker utmattingshastigheten og levetiden til verktøyet, og kjervområder er også utsatt for større deformasjoner, slik at verktøyet må byttes ut. Anbefalt er å bruke så stor krumningsradius som mulig for å unngå særlige kjerneeffekter i overganger [5].

2.4 Tøyninger og tøyningshastighet

Deformasjoner betegnes ved tøyninger. Tøyninger er en verdi uten benevnning, da denne måles ved å se på lengdeendringer delt på ordinær lengde for en del. Tøyninger kan måles som ekte tøyninger, eller som nominelle tøyninger. Ekte tøyninger kan summeres sammen, noe nominelle ikke kan. Ved små deformasjoner er det ganske likegyldig hvilken metode man bruker, da de gir tilnærmet samme verdi. Ved større deformasjoner burde formelen for ekte tøyninger brukes for å oppnå mest nøyaktig svar [6]. Formler for utregning av tøyninger er oppgitt under.

Ekte tøyninger:
$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$
 Formel 4 Ekte tøyninger [7]

Nominelle tøyninger:
$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$
 Formel 5 Nominelle tøyninger [7]

Tøyninger i 3 dimensjoner

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u_x}{\delta x}$$
 Formel 6 [7]

$$\varepsilon_y = \frac{\delta u_y}{\delta y}$$
 Formel 7 [7]

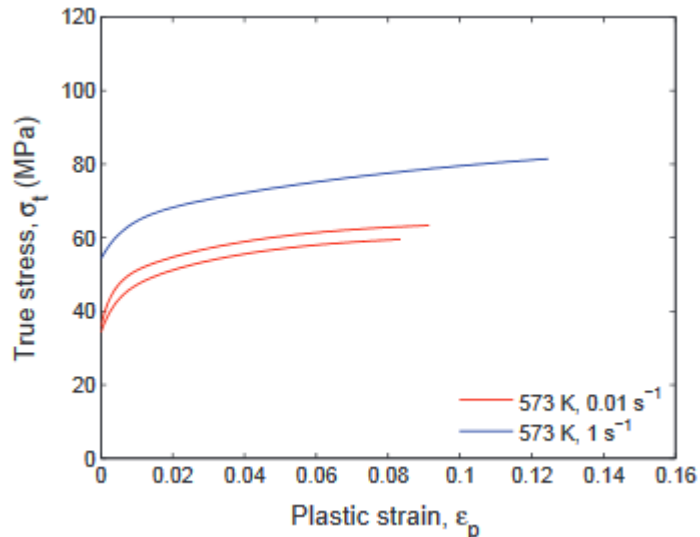
$$\varepsilon_z = \frac{\delta u_z}{\delta z}$$
 Formel 8 [7]

Tøyningshastigheten er den tidsderiverte av tøyninger. Dette er et mål på hvor fort tøyningene opptrer. Som tøyninger kan tøyningshastigheten angis som ekte tøyningshastighet eller nominell.

Ekte tøyningshastighet
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$
 Formel 9 Ekte tøyningshastighet [8]

Nominell tøyningshastighet
$$\dot{e} = \frac{de}{dt}$$
 Formel 10 Nominell tøyningshastighet [8]

Tøyningshastighet har stor innvirkning på flytkurvene til de fleste metaller. Generelt øker fastningen jo høyere tøyningshastigheten er, og man oppnår høyere flytkurver som vist i Figur 2. Figuren er hentet fra en masteroppgave skrevet ved NTNU 2013 med fokus på aluminiums oppførsel ved høye temperaturer og tøyningshastigheter [9]. Den samme tendensen bekreftes i en studie basert på en AA7075-kompositt-legering [10]



Figur 2 Tøyningshastighet i flytkurver [9]

2.5 Friksjon

Friksjon er svært utslagsgivende i metallformingsprosesser. For metallforming er det typisk to friksjonsmodeller som brukes; Tresca og Coulomb. For tilfeller med lavt kontaktrykk, eksempelvis en klosse som glir mot en annen, er Coulombs friksjonsmodell best egnet. Her er kontaktrykket vanligvis langt under flytegrensen. Men for tilfeller som ekstrudering og smiing hvor emnet presses mot containervegg eller smiformene, er Trescas modell mer egnet. Typisk for disse tilfellene er at kontaktrykket overstiger flytespenningene til materialene. Ved bruk av Coulombs friksjonsmodell ved prosesser med stor deformasjon av emnet, risikerer man at modellen ikke beskriver friksjonen skikkelig. [11] Det vil derfor tas utgangspunkt i Trescas modell videre i oppgaven, da den er mer egnet for prosesser med større deformasjoner og høye kontaktrykk. Under er det angitt formelverk for de to modellene.

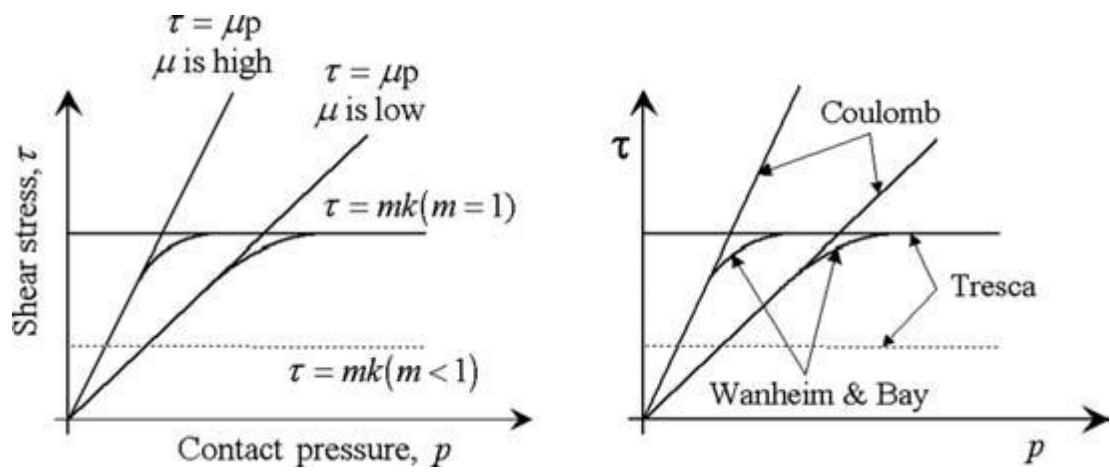
Coulomb: $\tau = \tau_i = \mu p$ *Formel 11 Coulombs friksjonsmodell [11]*

Der μ er friksjonskoeffisienten, og p er trykket. For Trescas modell er formelen følgende:

Tresca: $\tau = \tau_i = mk$ *Formel 12 Trescas friksjonsmodell [11]*

Der m er en friksjonsfaktor som varierer mellom 0 og 1, og k er symbolet for skjærflytespenningen.

Figur 3 illustrerer forskjellen mellom de to modellene.

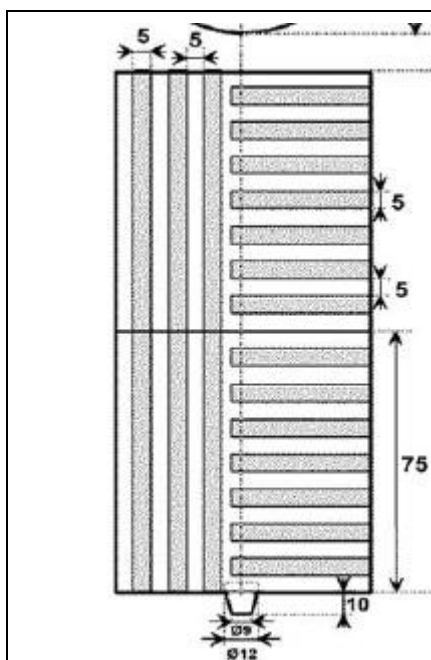


Figur 3 Friksjonsmodeller [11]

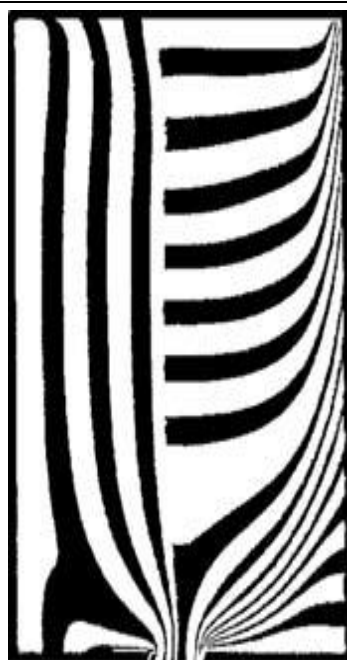
2.6 Materialflyt

For å sikre at formen fylles helt er det viktig med god materialflyt. Materialflyten påvirkes av friksjon, og av geometrien til formen, slik som skarpe kanter eller hjørner. Avrundede hjørner hjelper for å oppnå bedre materialflyt. Friksjonen mellom emnet og stempel/matrisevegg påvirker i høyeste grad hvordan materialet flyter og fordeler seg i prosessen. Friksjonskoeffisienten avhenger av hvilke materialer som brukes, og om det brukes smøremidler eller at verktøyene har «coating». For en ny prosess kan det også være interessant å se hvilke områder av utgangsemnet som flyter hvor i en prosess. Flere simuleringsprogrammer har mulighet til å overvåke dette ved valg av utvalgte noder, eller innsetting av «grids». Det tas forbehold om at simuleringsresultater ikke nødvendigvis er korrekte, og burde sammenlignes med fysiske tester for verifisering.

En metode for å se hvordan materialet flyter er å sette inn kontrastpinner. Disse kan settes inn horisontalt, samt vertikalt som vist i Figur 4. Etter prosessen er utført, deles profilet, og kontrastpinnene observeres. Disse kan så sammenlignes med simuleringsresultater for å se hvor godt de samsvarer. Hvis de samsvarer godt, tyder det på at simuleringene gir realistiske resultater. [12]

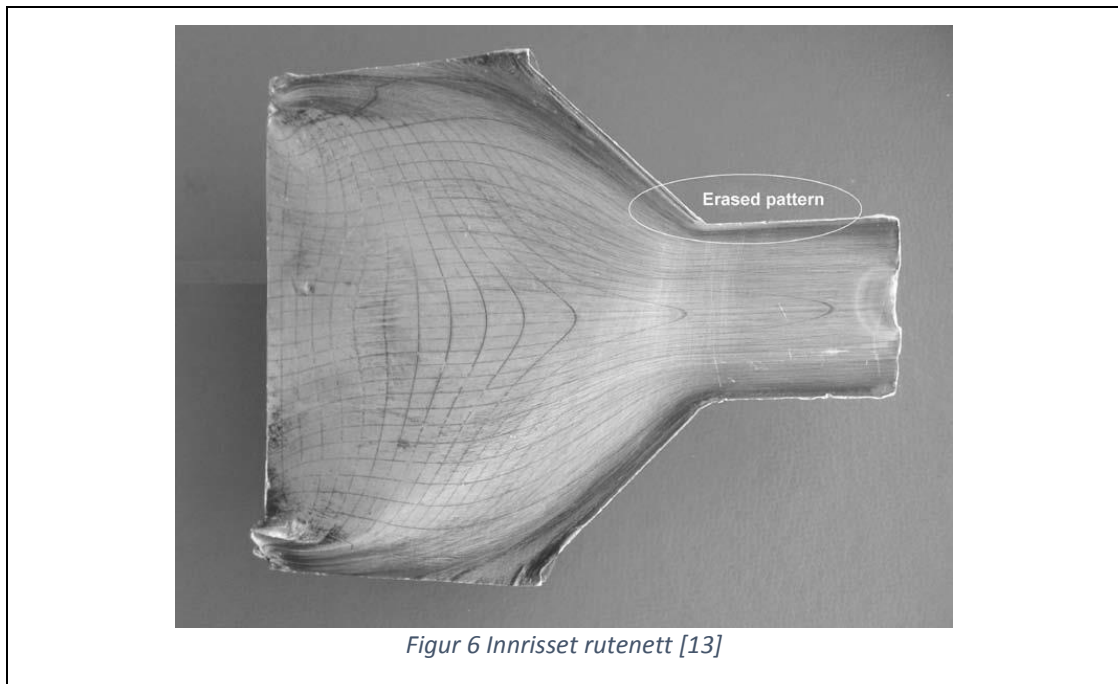


Figur 4 Kontrastpinner i snitt [12]



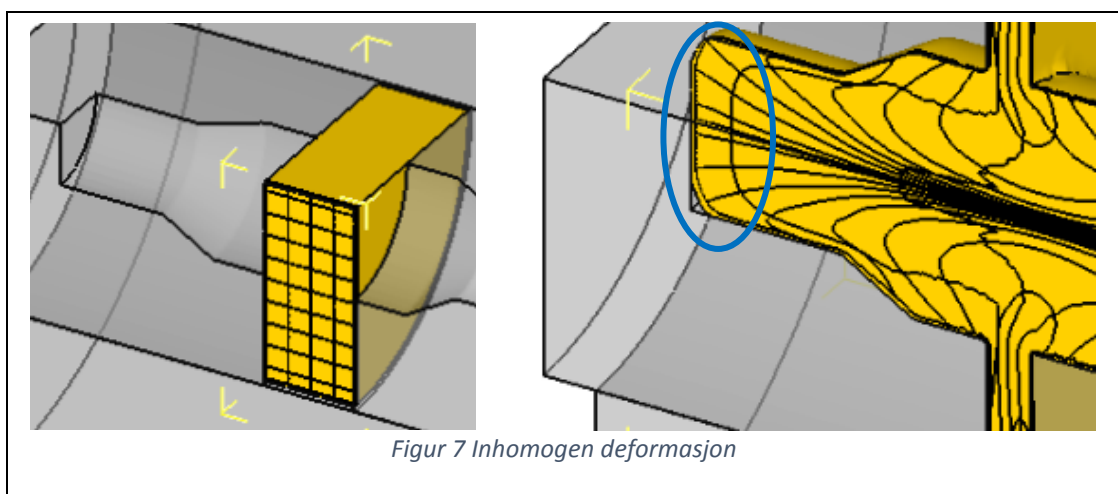
Figur 5 Materialflyt illustrert av kontrastpinner [12]

Et annet alternativ er å dele emnet i to, og risse inn et rutenett i kontaktflaten mellom de to delene. Delene monteres så sammen igjen, og testen utføres. Etter testen er utført helt eller delvis, separeres de to delene fra hverandre igjen og man kan se hvordan rutenettet har deformert under prosessen [13]. Figur 6 viser et eksempel på hvordan dette kan se ut.



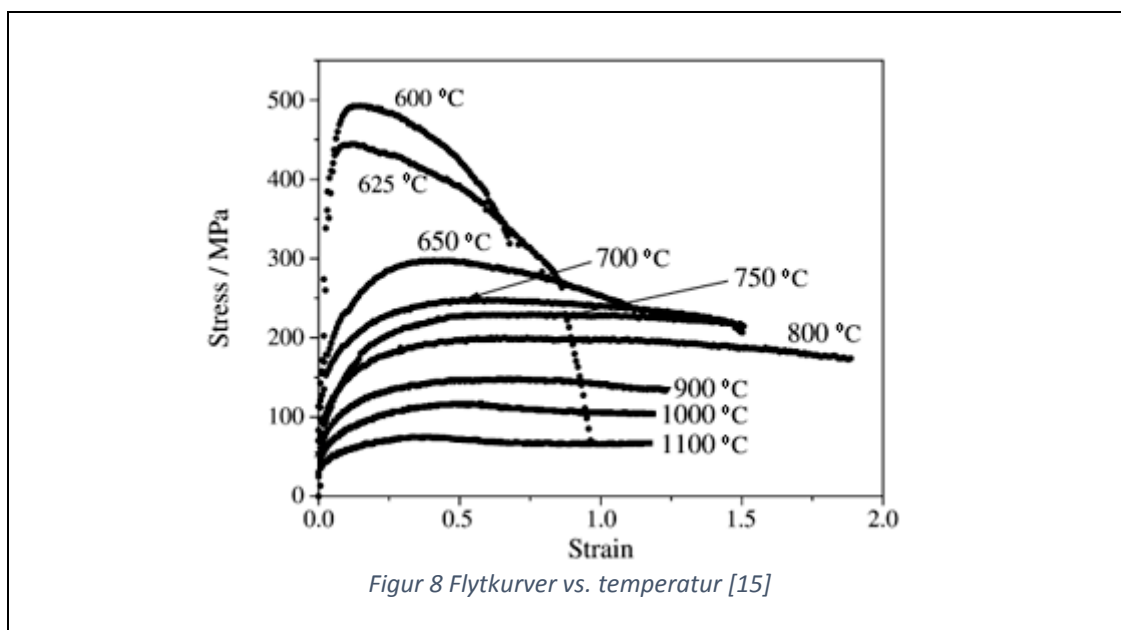
2.6.1 Inhomogen deformasjon

Under formingsprosessen vil det oppstå inhomogene deformasjoner. Inhomogen deformasjon betyr at enkelte områder har deformert i større grad enn nærliggende områder. En annen mulighet er at området ikke har blitt deformert i særlig grad, og beholder sin opprinnelige struktur. Figur 7 viser et eksempel på en slik sone for en formet komponent. Legg merke til at området som er markert i figuren fortsatt har tilnærmet samme rektangulære form som det hadde i utgangspunktet. Slike soner kan være svært uheldig, spesielt hvis disse områdene ender opp der komponenten opplever store belastninger, eller i overganger som ofte er utsatt for kjerveffekter. «Tendensen» er mest kritisk i tilfeller der man ønsker å endre metallstrukturen under formeprosessen. Komponentens struktur kan enten inspiseres med metodene som er nevnt over, eller ved bruk av elektronmikroskop.



2.7 Prosesstemperatur

Metallforming utføres ofte som varmforming, i motsetning til kaldforming. Varmforming er definert som forming der temperaturen er over rekrySTALLISERINGSTEMPERATUREN til emnet som brukes [14]. RekrySTALLISERING vil gjennomgå mer i detalj i avsnitt 2.8. Ved varmforming forvarmes ofte emnet til en temperatur der flytegrensen er sterkt redusert. Ved høyere temperaturer synker flytegrensen for de aller fleste metaller. Dette medfører at prosessen vil kreve mindre kraft, emnet blir mer formbart og duktilt, samt at sjansen for sprekke dannelse reduseres. Enda en effekt ved varmforming er at eventuelle styrkebidrag som oppnås ved deformasjoner, kalt deformasjonsharding eller fastning, nøytraliseres. Figur 8 viser effekten av varmforming for stål.



Under prosessen kan det genereres varme fra deformasjonen eller friksjonen, slik at emne og verktøy oppnår enda høyere temperaturer. Dette er viktig å beregne slik at prosesstemperaturen pluss den genererte varmen ikke overstiger smeltetemperaturen til emnet, eller temperaturer der defekter oppstår.

Aluminium varmformes som oftest mellom 350 – 550°C. Forming under 350°C gjør at aluminiumet blir mindre formbart, da flytegrensen øker. Forming over 550 grader er i grenseland for smelting for de fleste aluminiumslegeringer [16].

Samtidig kan oppvarmingen av emnet brukes som en del av prosessen for å normalisere metallstrukturen, og slik sikre at man ikke har restspenninger, eller anisotrope styrkebidrag i enkelte deler av utgangsemnet. Temperaturen må helst vedlikeholdes gjennom hele prosessen for å unngå utfellingsherding, slik at man får en annen metallstruktur enn den man ønsker. Hvis emnet kjøles tilstrekkelig vil også flytegrensen øke, og prosessen vil kreve mer kraft. Derfor varmes som regel stempel og form for å unngå unødvendig nedkjøling. Kjøling fra stempel og form er derfor viktig å ta med i beregningene.

2.7.1 Varmeutvidelse

Varmforming tilsier at komponentene formes ved relativt høye temperaturer. Derfor er fenomenet varmeutvidelse ganske sentralt. Alle materialer har en varmeutvidelseskoeffisient α . For stål er denne $12 \times 10^{-6} K^{-1}$, og for aluminium $22,2 \times 10^{-6} K^{-1}$ [17]. Dette tilsier at stål og aluminium vil utvide seg ulikt ved samme temperatur. Merk at varmeutvidelseskoeffisienten også varierer for type stål og aluminium, alt etter hva slags legering som brukes. Likningen under sier at materialer som er av en viss lengde vil utvide seg når den blir varmet opp. Følgende likning er brukt for å beregne denne utvidelsen:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

Formel 13
Varmeutvidelse

Der ΔL er utvidelsen, α er varmeutvidelseskoeffisient, ΔT er temperaturendring og L_0 er opprinnelig lengde.

Varmeutvidelsen må tas hensyn til ved utforming av verktøy slik at man unngår at deler kiler seg fast enten ved at de utvider seg ved oppvarming, eller at verktøyet krymper fast om emnet ved nedkjøling. Det må også tas hensyn til toleranser for den ønskede komponenten, da målene kan variere når verktøyet varmes opp, eller komponenten krymper ved nedkjøling etter forming.

2.8 Rekrystallisering og kornvekst

Rekrystallisering er dannelse av nye kornstrukturer som er uten restspenninger fra tidligere formeprosesser. Disse nye kornene har stort sett isotropisk utforming, altså at de har lik geometri i alle retninger. Det vil derfor være nødvendig med stor grad av rekrystallisering hvis man ønsker å bruke utgangsemner med dårlig duktilitet. Rekrystallisering skjer ved å holde materialer over en viss temperatur kalt rekrystalliseringstemperaturen, som varierer for hvert enkelt metall og type legering av dette metallet. Denne temperaturen er et mål for at strukturen rekrystalliseres 100% i løpet av en time. Generelt ligger denne temperaturen mellom 40% og 70% av smeltetemperaturen for metallet. For aluminium ligger denne generelt rundt $80^\circ C$ [18]. Tidsperioden materialet blir oppbevart på denne temperaturen er også utslagsgivende for hvor stor grad av rekrystallisering som forekommer, samt hvor hurtig denne skjer. Oppvarmingen kan være del av normaliseringsprosess for komponenten, eller det kan være del av en formeprosess.

Kaldforming kan også påvirke rekrystallisering, ved at rekrystalliseringstemperaturen minker jo større grad av kaldforming som er utført på komponenten. Sagt på en annen måte, jo mer kaldforming som er utført, jo lavere er terskelen for at komponenten begynner å rekrystallisere strukturen sin. Effekten av rekrystallisering er at materialet blir mykere og svakere, men samtidig mer duktilt [18] [19].

I tillegg til temperatur så påvirker også tøyninger og tøyningshastigheten graden av rekrystallisering [20] [21].

$$X_{DRX} = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon^*}\right)^m}$$

Formel 14 Grad av
rekrystallisering

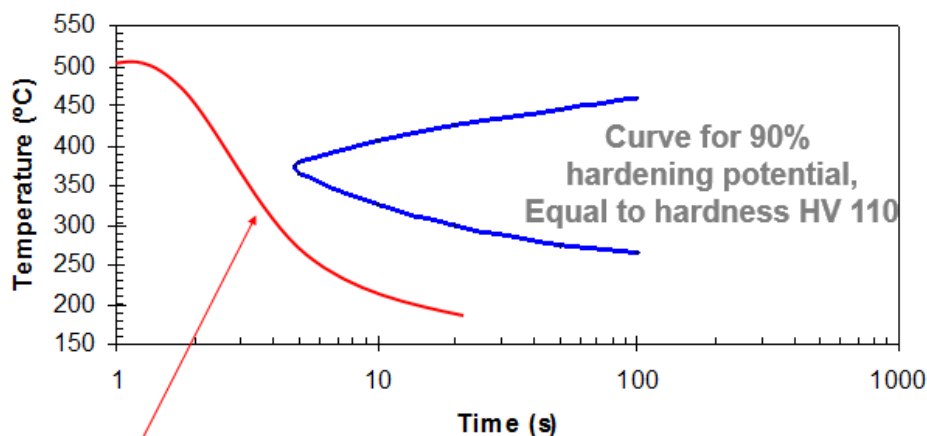
Når rekrystalliseringen er fullført, så kan kornene fortsette å vokse hvis komponenten enda oppbevares over rekrystalliseringstemperaturen [18]. Kornene utvider seg, og absorberer nærliggende korn, litt på samme måte som vanndråper føyes sammen [22]. Slik øker den generelle kornstørrelsen. Kornveksten går fortere jo høyere temperaturen er. Temperaturavhengigheten kan beregnes av formelen under:

$$d^n - d_0^n = Kt$$

Formel 15
Kornvekst [18]

Der d_0 er den opprinnelige korndiameteren, t er tidskonstanten, og n og K er tidsuavhengige konstanter. Komponenter med en fin kornstruktur som består av små korn er generelt sterkere enn en grov struktur bestående av store korn. Det er derfor uønsket å ha større grad av kornvekst for å sikre de mekaniske egenskapene til komponenten. Komponenter burde derfor nedkjøles etter ønsket grad av rekrystallisering er oppnådd for å unngå unødig kornvekst.

Nedkjøling etter varmforming kan påvirke hvor stor grad av rekrystallisering og kornvekst som skjer i komponenten. Nedkjølingen kan også påvirke strukturen i metallet, og hardheten den ferdige komponenten får. Komponenter kan enten bråkjøles med vann eller olje for raskt å senke temperaturen og låse kornstrukturer, eller langsom nedkjøling i ovn eller med luftkjøling. For hurtig nedkjøling kan dog få komponenten til å sprekke opp, eller «slå» seg, altså at den permanent deformeres. Figur 9 viser nedkjølingskurven for å oppnå den ønskede hardheten for en aluminiumskomponent.



Typical cooling curve

Figur 9 Nedkjølingskurve [23]

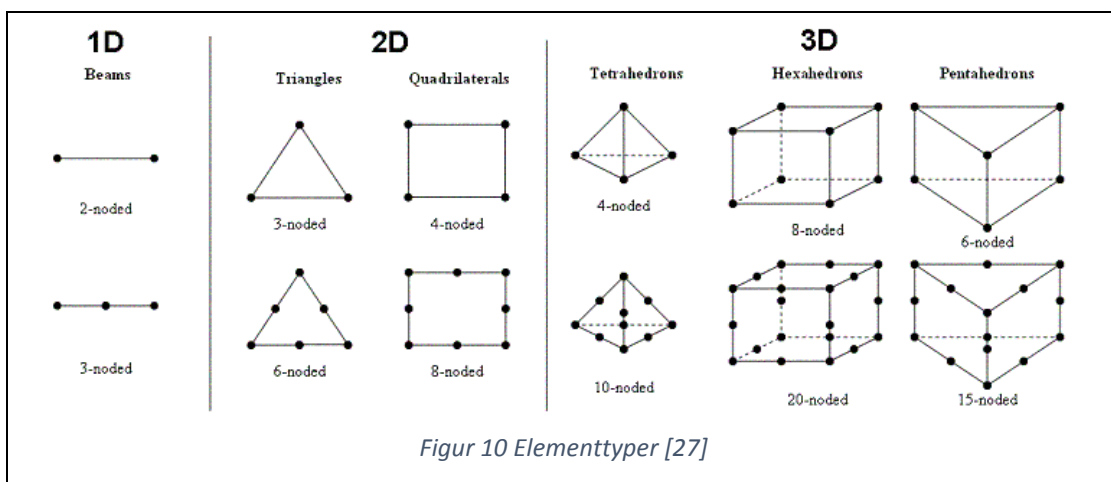
2.9 FEM

I dag brukes FEM-programmer (Finite Element Method) mer og mer i produksjonssammenhenger. FEM er en numerisk løsningsmetode for å matematisk beskrive partielle differensialligninger eller integralligninger [24]. Metoden brukes ved å dele det kompliserte «problemet» opp i små, kjente «problemer», og løse disse samlet [25]. Eksempelvis kan FEM brukes til å beregne parametere i metallformeprosesser. Disse beregningene er verifisert med matematiske modeller, materialmodeller og eksperimentell fysisk testing. Simuleringsprogrammer kan brukes for å simulere mange ulike prosesser eller lasttilfeller. Verktøyene er anerkjent for å gi reelle resultater, så fremt valgte parametere, materialmodeller, og randbetingelser er riktige. Simulering er veldig fordelaktig med at man kan spare tid og kostnader ved å simulere, framfor å måtte lage testverktøy og testmaskiner, for så å kjøre et større antall fysiske tester.

Studier utført av Kong og Chan [26] konkluderer med at opptil 40% av utviklingskostnadene, og 20% av utviklingstiden kan reduseres for utvikling av nye formeprosesser ved bruk av simuleringsverktøy. Studien konkluderer også med at man kan oppnå svært gode samsvar mellom simuleringsresultater og faktiske, fysiske resultater.

FEM-programmer gir også muligheten til å bedre visualisere prosessen, og eventuelle problemområder i en prosess. Dette gjør det lettere å forstå prosessen, og slik kunne forbedre den. En fordel er at man kan overvåke hele prosessen, for eksempel hvordan materialflyten utvikler seg gjennom prosessen, sammenlignet med kontrastpinner eller innrissede rutenett nevnt i avsnitt 2.6, der man bare får et bilde av hvordan flyten er i det øyeblikket. Stadig utvikling av disse verktøyene gjør at man oppnår bedre og bedre samsvar mellom simuleringsresultater og faktiske, reelle resultater.

Ved bruk av FEM «meshes» komponenter, altså deles opp i et antall elementer. Avhengig av program kan også typen elementer velges, der disse igjen varierer i hvor mange noder de består av. Kompleksiteten til disse avhenger selvsagt av hvor komplekst simuleringstilfellet er, og i hvor mange dimensjoner.



Jo finere mesh, jo flere elementer består delen av, og valg av mesh-størrelse og mesh-type kan i stor grad påvirke nøyaktigheten på resultatene man får. Fine mesh gir generelt mer nøyaktige resultater enn grove mesh. Samtidig krever det mer prosessorkraft jo finere mesh man bruker, og simuleringen tar lengre tid. Derfor er det en utfordring å balansere dette på en fornuftig måte. Samtidig oppnår man ikke nødvendigvis nevneverdige forskjeller i resultat ved å gå fra et fint mesh til et enda finere mesh. De fleste FEM-programmer har også muligheten til å angi finere mesh på enkeltområder, typisk der man forventer at større deformasjoner/spenninger vil finne sted.

Til tross for mange fordeler ved bruk av FEM, er det likevel viktig å notere seg at man aldri burde basere seg kun på simuleringsresultater, og at resultatene burde sammenlignes opp mot beregninger, empiriske data eller fysiske tester for å kunne si noe sikkert.

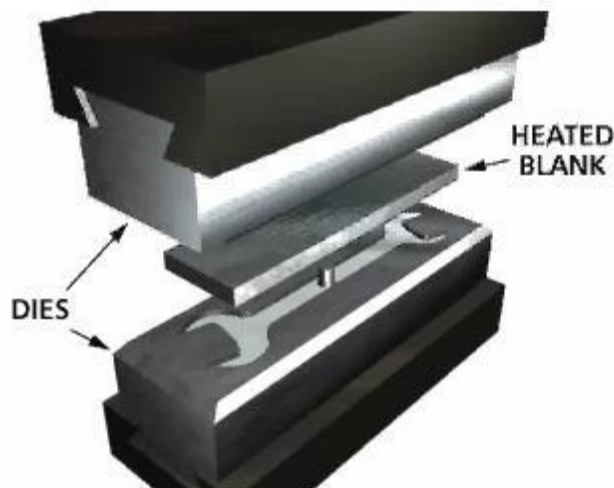
3. Industriell praksis

Det vil i dette kapittelet presenteres mer konkret praksis som brukes i industrien i dag. Innholdet er rettet mot dagens metode, samt praksis som er relevant for nye, alternative metoder. Formemetodene som er presentert i dette kapittelet er basert på at disse er egnede til å endre metallstruktur i forhold til bruk av støpte utgangsemner.

3.1 Smiing

Smiing er en av de eldste metallformingsmetodene med en historie på flere tusen år. Smiing er typisk delt inn i åpen og lukket smiing. Åpen smiing, eller frihåndssmiing, består av å føre et arbeidsstykke mellom en hammer og en ambolt. Denne formen for smiing er uaktuelt i en industriell setting der det skal masseproduseres deler. For masseproduksjon brukes det formsmiing, også kalt senkesmiing, der emnet hamres eller presses inn i en bestemt form. Eksempler er vist i Figur 11 og Figur 12. Disse prosessene er ofte svært automatisert, og produksjonstempoet er høyt. Smiing kan utføres som kaldforming, eller som varmforming. Kaldforming utføres ved relativt lave temperaturer, eksempelvis ved romtemperatur, der hensikten er å gjøre komponenter sterkere via fastning og deformasjonsharding.

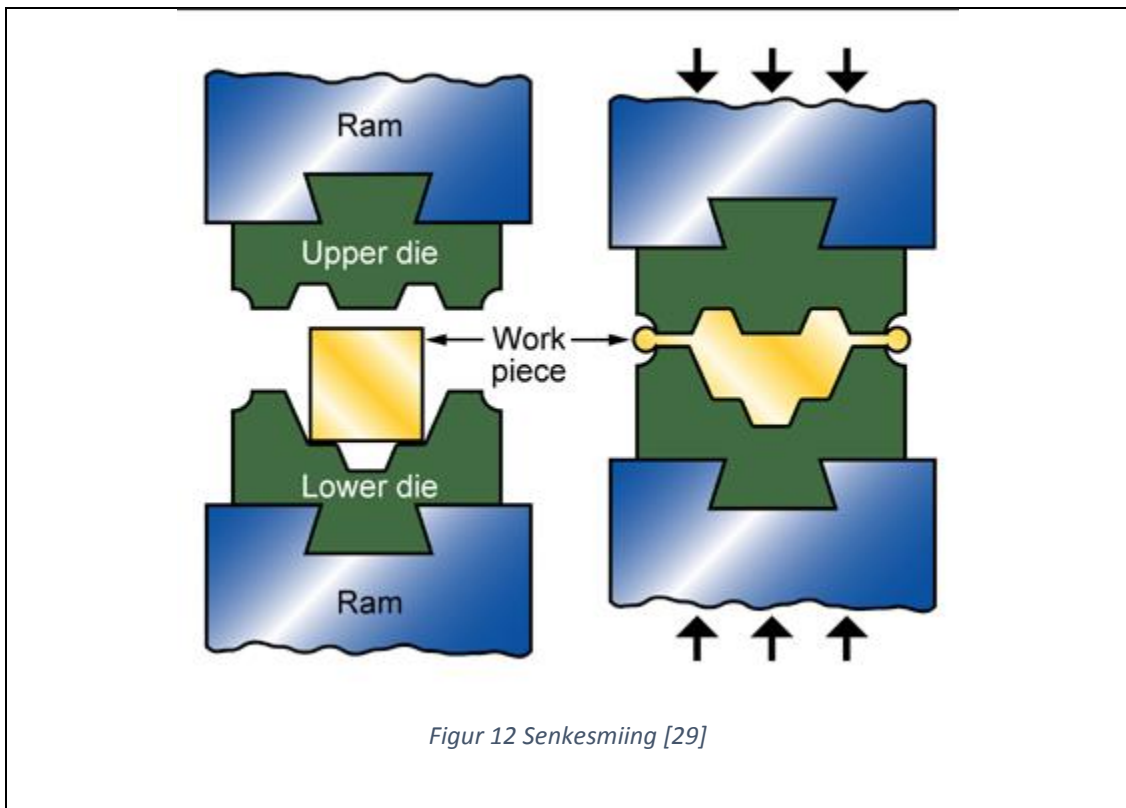
Ved varmforming varmes emne opp til temperaturer over rekrytalliserings-temperaturen for materialet [14]. Som nevnt i avsnitt 2.7 medfører dette at metallet blir mykere, og mer formbart. Dette betyr at det trengs mindre kraft fra pressene for å forme delen. Samtidig gjør den økte «mykheten» at man reduserer sjansen for at metallet sprekker opp under forming. For denne oppgaven vil det kun fokuseres på varmforming.



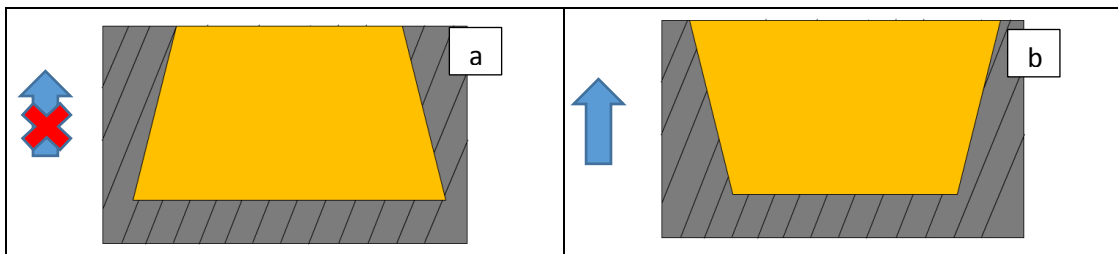
Figur 11 Smieksempel [28]

Som regel må det beregnes noe materialsvinn i form av skjegg for å sikre at formen fylles helt. I tillegg til å sikre formfylling, unngår man muligheten for at det dannes hydrostatisk trykk inni formen, ved at materialet kan flyte utenfor formen. Hvis materialet ikke har mulighet til å flyte ut til sidene, vil materialet komprimeres og utøve veldig store krefter på verktøy og kontainer, som i verste fall sprekker. Uten mulighet for skjeggdannelse må man derfor være veldig nøye med volumberegninger for

utgangsemne og den ferdige delen. Lukket formsmiing er stort sett forbeholdt komponenter med relativt enkel geometri.



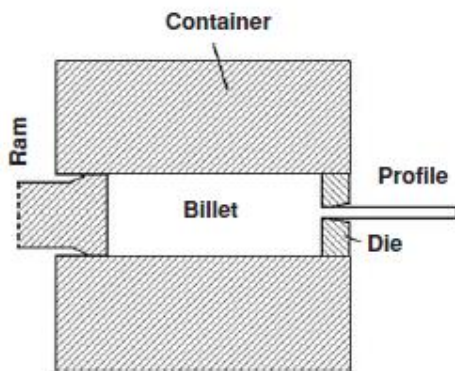
Ved utforming av smiformen inkluderer man ofte slippvinkler. Slippvinkler er inkorporert for å sikre at det skal være mulig å fjerne delen etter forming. Hvis man ikke har designet slippvinkler risikerer man at delen har kilt seg fast, og ikke er mulig å få ut uten å skade enten verktøyet eller delen. Figur 13a viser et mulig scenario hvis man ikke har slippvinkler. Delen er tenkt å løftes ut vertikalt. Figur 13b derimot viser hvordan man unngår at deler kiler seg fast under forming, og enkelt kan hentes ut. Slippvinkler er på typisk 3 til 5 grader [30].



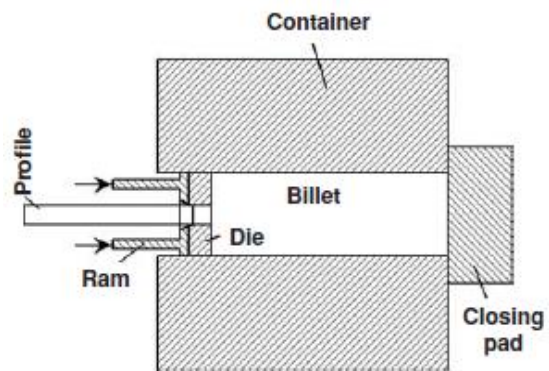
Figur 13 Slippvinkel a og b

3.2 Ekstrudering

Ekstrudering er en av mange metallformingsmetoder som kan brukes for å formgi materiale. Ekstrudering brukes typisk til å lage lange profiler med et konstant tverrsnitt, og deles opp i direkte og indirekte, avhengig av stempelretningen, og hvilken retning materialet flyter. Indirekte, eller bakoverekstrudering gir typisk lavere kraftbehov, og jevnere kraftoverføring sammenlignet med direkte ekstrudering. Ulempen er dog at profilet må hentes ut fra den hule matrisen, noe som betyr at verktøyet må demonteres for å få ut delen. En annen ulempe er at det ytterste laget vil inneholde flere urenheter ved indirekte ekstrudering [31].

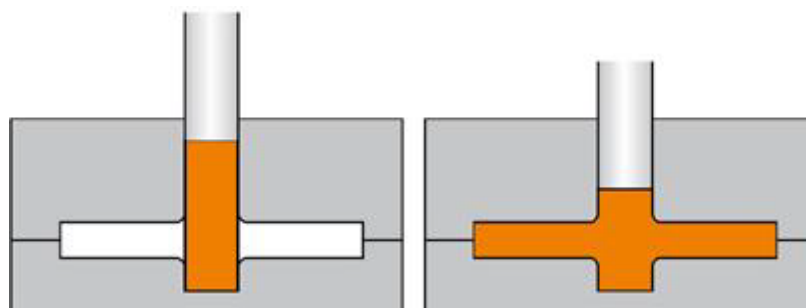


Figur 14 Direkte ekstrudering [32]



Figur 15 Indirekte ekstrudering [32]

En av metodene som blir undersøkt i denne oppgaven er stykkeekstrudering, også kalt for flytpressing. Prosessen blir altså en form for lateral ekstrudering. Som navnet tilsier, så ekstruderes det mindre profiler i «stykker», som gjerne kan ha forskjellig tverrsnitt langs profilet. Rent teknisk ligner denne prosessen mer på smiing enn på typisk ekstrudering, da emnet presses inn mellom to former og har variabelt tverrsnitt [33]. Prosessen er illustrert i Figur 16.

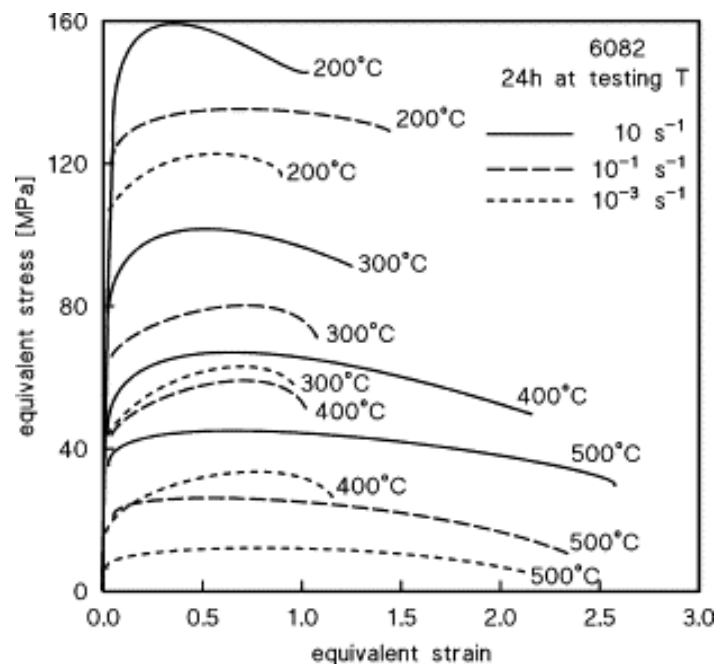


Figur 16 Lateral ekstrudering [34]

3.3 Legering AA6082.52

Legeringen som brukes som utgangsemne kalles for AA 6082.52 og er en veldig populær legering innenfor bilindustrien. Den er blant de sterkeste 6000-serie legeringene, og har god korrosjonsbestandighet, samt god styrke vs. vekt-egenskaper. Ved forskjellige varmebehandlinger og herdeprosesser kan man oppnå et bredt spekter av duktilitet og styrke for legeringen. Legeringen består blant annet av silisium, mangan og magnesium, som gir gode styrkebidrag.

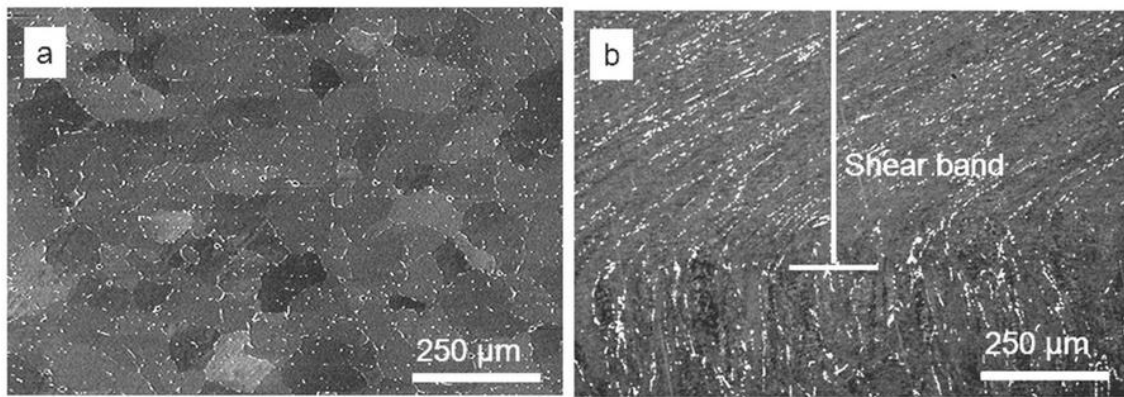
Legeringen kan ikke varmes til mer enn 560-570 grader før det oppstår lokal smelting, noe som selvsagt påvirker materialkvaliteten. Emnet brukt i smiing eller ekstrudering varmes som regel opp til ca. 500 grader for å redusere flytespenningen. Figur 17 viser forskjell i flytespenning ved 500 grader, sammenlignet med lavere temperaturer.



Figur 17 Flytekurver [35]

3.4 Bruk av støpte utgangsemner

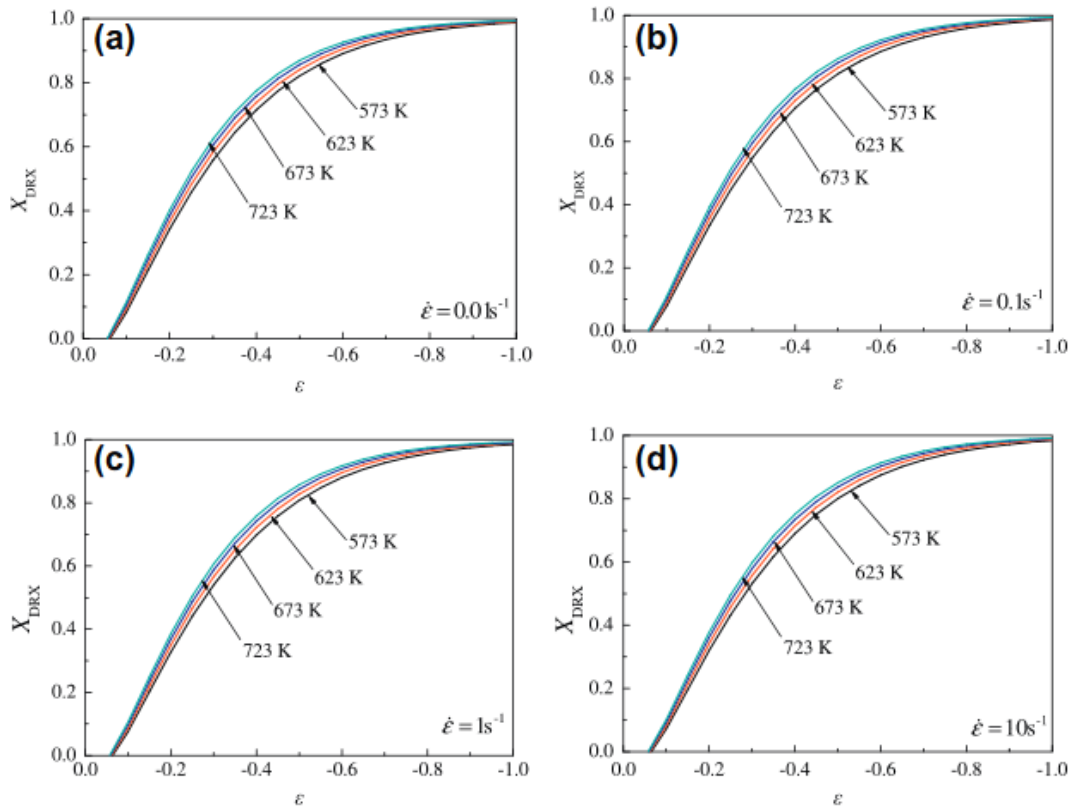
Det vil i denne oppgaven ses på muligheten for å bruke støpte utgangsemner i produksjonen. Støpte emner er å foretrekke, da disse er mer økonomisk gunstige enn ekstruderte emner. Støpte emner er likevel ikke så mye brukt, da disse kjennetegnes av en sprø kornstruktur, og vil kunne knekke eller sprekke opp under flere av stegene i produksjonsprosessen av hjulopphengene. I dag brukes det ferdig ekstruderte emner som utgangspunkt, da disse har en mer duktil struktur, samt at kornene er orientert langs ekstruderingsretningen. Dette er fordelaktig ved at det gir styrkebidrag til utsatte områder hos den ferdige komponenten.



Figur 18 Støpt (a) og formet/valset (b) struktur [36]

En forutsetning er derfor at det nye prosessteget omdanner strukturen i så stor grad at delen vil få en mer duktil kornstruktur. Dette kan også medføre at endring i kornorientering gir anisotriske styrkebidrag, altså at delen er sterkere i enkelte retninger sammenlignet med andre. Figur 18 viser forskjellene i kornstrukturen for støpt og formet aluminium av AlMgSi0.5-legering. Man kan tydelig se hvordan kornene er orientert etter valseretningen i Figur 18b.

For å kunne bruke støpte emner så må altså metallstrukturen omdannes til en mer duktil struktur. Det er her rekrySTALLISERING kommer inn. Studier er utført for å se på sammenheng mellom tøyning, tøyningshastigheten og temperaturen som formingen er utført på, opp mot prosentvis rekrySTALLISERING. Figur 19 viser resultatet for studien utført av Guo-zheng Quan med flere [21], for legeringen AA 7075. Hver av grafene viser variasjon av oppnådd rekrySTALLISERING ved forskjellige tøyningshastigheter.



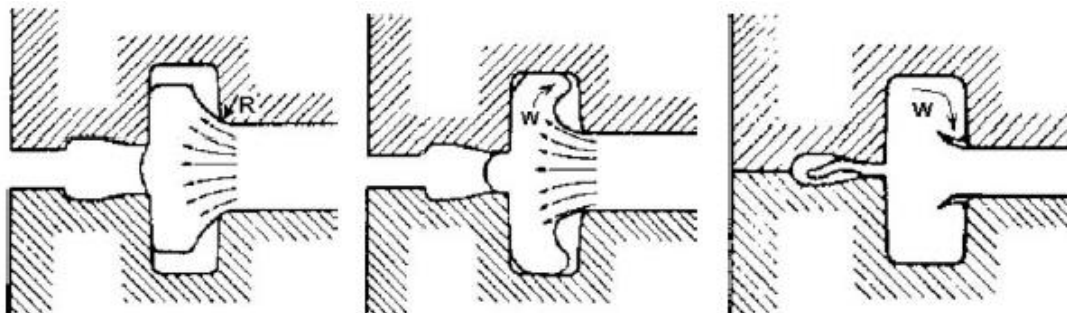
Figur 19 Rekrystallisering [21]

3.5 Defekter

Ved å introdusere nye forformingsmetoder så må man ta hensyn til defekter som kan oppstå under disse prosessene. Flere aktuelle defekter er listet opp under.

3.5.1 Folding

Skarpe kanter kan medføre at materialet «snurrer» og folder inn i seg selv. Dette kan gi dårlig overflatekvalitet, samt gi sprekker som svekker delen. I verste fall lukkes denne sprekken inne i komponenten som en indre sprekke, slik at den er vanskelig å oppdage. Figur 20 under viser hvordan folding typisk skjer. Sprekken kan være utgangspunktet for videre sprekkevækst, slik at denne defekten ofte resulterer i at komponenten må skrotes [37].



Figur 20 Folding [37]

3.5.2 Klining

En annen mulig defekt er «klining» der materiale fra utgangsemnet slites av og fester seg på verktøyoverflaten. Dette skjer ved høye temperaturer og høy friksjon. Defekten gir dårlig overflatekvalitet, samt kan ødelegge formen på neste del som skal formes hvis ikke det fastklistrede materialet fjernes fra formen først [38].

Studier utført av Pujante [39] har sett på klining som oppstår ved varmforming, i dette tilfellet ved varmekstrudering. Testingen ble utført ved å kjøre kuler av AA2017 mot ståloverflater laget av verktøystålet AISI H13. Forsøket ble utført ved temperaturer opp mot 450°C. Overflatekvaliteten til stålet ble også variert under forsøket. Studiet konkluderer med at kliningseffekten reduseres ved høyere temperaturer, men at verktøyslitasjen også øker ved høyere temperaturer.

3.5.3 Knekking

Hvis utgangsemnet er relativt langt i forhold til diameteren kan man risikere at den bøyer ut eller knekker hvis den ikke er støttet opp. Dette er både tilfelle for emne og stempel. Verktøyutforming og valg av emnestørrelse er derfor viktig for å unngå knekking eller unødvendig verktøyslitasje. Hvis man kjenner til kraften til prosessen kan man løse ligningen under med hensyn på lengde for å beregne maksimal emnelengde for å unngå knekking.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Formel 16 Knekking}$$

Der P_{cr} er knekklasten, E er E-modul for materialet brukt, I er andre arealmoment, og L er lengden av emnet eller stempelet som ikke er støttet opp.

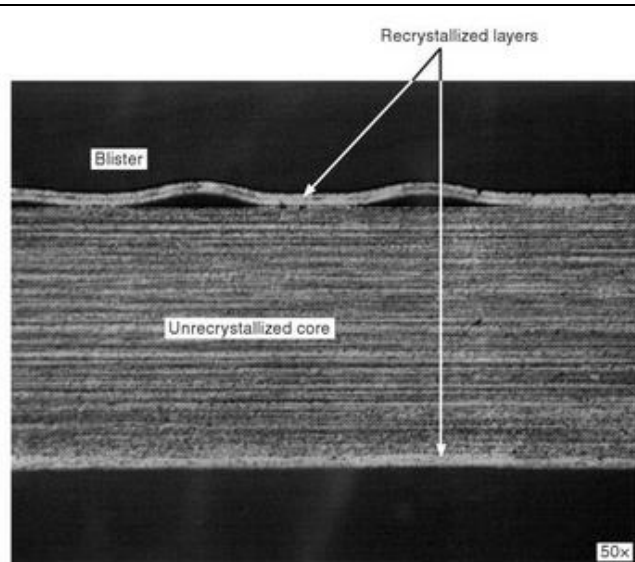
Utgangsemner til ekstrudering kommer typisk i standardstørrelser på 100 mm til 400 mm i diameter. Desto mindre diameter, jo høyere må sylindere være. Dette betyr at stempelet må bevege seg lengre. Omvendt, ved en veldig stor diameter, så er høyden lav, men desto større grad av deformasjon. Stempelet/formen må altså ikke bevege seg særlig langt, men man ender opp med en betydelig mengde skjegg hvis delen har lite tverrsnitt sammenlignet med emnet. Kraftbehovet vil også øke for en større diameter. For enkelte produksjonsmetoder må også emnet kunne få plass innenfor «rammene» til den ønskede delen, slik at det er dette som blir avgjørende for emnestørrelsen.

3.5.4 Blisters

Hvis luft som er inne i verktøyet blir fanget inne sammen med emnet uten mulighet til å ventileres ut, så kan hydrogenet i luften trenge inn i det øverste laget av emnet under formingsprosessen. Spesielt ved varmforming kan dette gi såkalte «blisters» eller «blemmer» på overflaten til emnet, noe som gir svært dårlig overflatekvalitet [40]. Fenomenet er vist i Figur 21 og Figur 22.

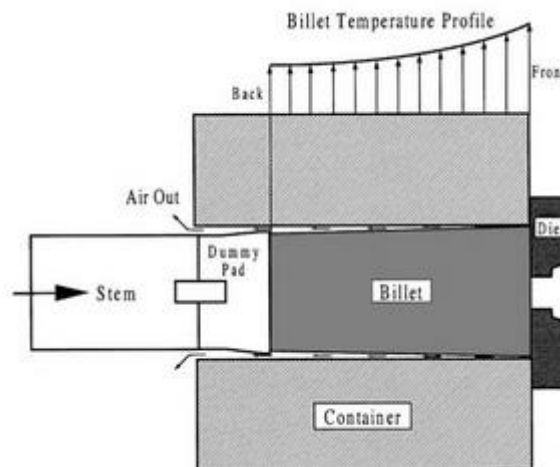


Figur 21 Blisters [41]



Figur 22 Blisters i SEM [40]

Verktøy og/eller stempel må derfor dimensjoneres slik at luften har mulighet til å unnslippe før prosessen kjøres. Et eksempel er vist i Figur 23.



Figur 23 Ventilering [40]

3.5.5 Lokal smelting

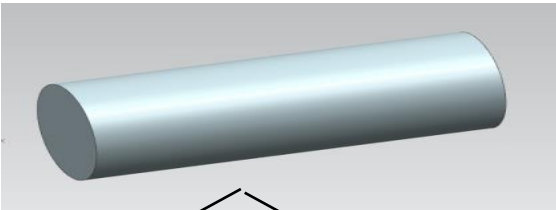
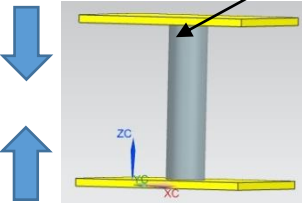
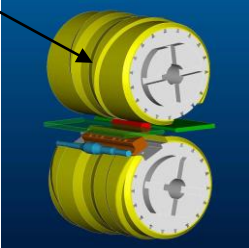
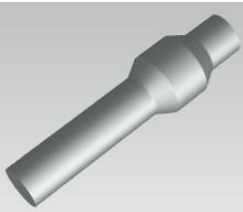
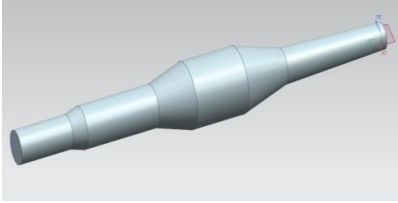
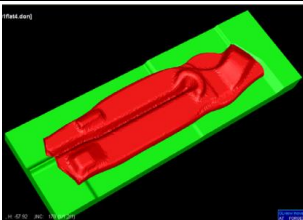
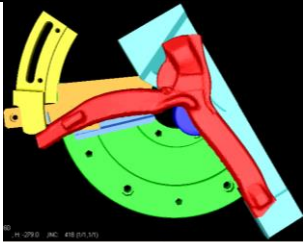
Under formeprosessen kan det oppstå varmeutvikling fra friksjon og deformasjon, slik at temperaturen i emnet øker lokalt, eller generelt. Som nevnt i avsnitt 2.7 kan forvarmingstemperaturen være ganske nær smeltetemperaturen til aluminium. Det er derfor viktig å unngå unødig varmeutvikling slik at lokal smelting kan unngås. Lokal smelting kan gi områder med redusert styrke, dårlig overflatekvalitet, samt en annen kornstruktur enn nærliggende områder. I tillegg risikerer man sprekkdannelse som ofte betyr at komponenten må skrotes [42].

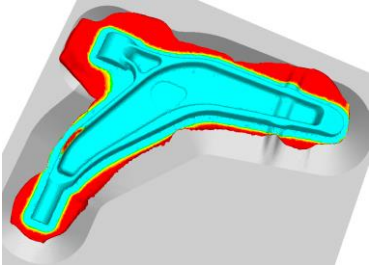

3.6 Sammenligning av nåværende metode

Per i dag har Neuman Aluminium Raufoss to metoder for å forforme komponenten før smiing: Stuking og valsing. Majoriteten produseres ved stukemetoden. Utgangsemnet er sylindriske bolter av aluminium 6082.52-legering. Dimensjonene varierer alt etter

hvilken størrelse bærearmeren skal være. Informasjonen som er gitt her er noe begrenset i detalj for å sikre bedriftens konfidensialitet rundt prosessen.

1. Ferdig ekstruderte bolter av 6082-legeringen varmes opp til 500 grader for homogenisering, samt å redusere flytespenningen til aluminiumet.
2. Den varmede bolten stukes, slik at den får en fortykkelse omtrent midt på. Eventuelt blir bolten valset med spesielle valser for å oppnå samme form.
3. Den forformede komponenten legges så i en presse der den blir klemt flat samt splittet opp langs midten.
4. Komponentene blir bøyd ut til en typisk «L»-form.
5. Den forformede komponenten legges i smiformen, og smies til den endelige delen.
6. Overflødig materiale og skjegg kuttes bort. Delen inspiseres og sendes til montasje av bushinger.

Steg 1		
Steg 2		
		
Steg 3		
Steg 4		

Steg 5	
Steg 6	

Bilder er hentet fra raufoss-presentasjonen med tillatelse fra bedriften [23].

3.6.1 Stuking:

Emnet varmes opp til 520 – 540 grader og stukes med formrestriksjoner slik at materialet konsentreres i det ønskede området. Prosessen tar ca. 20 sekunder og følger linjens generelle hastighet. Kraftbehov på 100 – 200 tonn.

3.6.2 Valsing:

Valsingen utføres ved 350 grader. Valsingen bruker også i underkant av 20 sekunder, men fordeler materialet mer effektivt enn stuke-prosessen.

3.6.3 Kommentar til dagens metoder:

Stukeprosessen påfører verktøyet mye slitasje da stempelengden er relativt lang. I verste fall resulterer dette i at stempelet knekker. Ingen av metodene sikrer kornorientering aksielt på emnet. Emnet deformeres heller ikke så stor grad at støpte utgangsemner kan brukes.

4. Metode

Dette kapitlet tar for seg prosessen med å finne alternative metoder, samt velge den mest egnede metoden basert på simuleringstester. Den valgte metoden vil så gjennomgå grundigere simuleringer, før det lages en testmodell for fysisk testing. Mål for komponenter og oppsett av forsøk er også beskrevet her.

4.1 Nye alternativer

Proessen med å finne nye formemetoder har i hovedsak skjedd i dialog med Neuman Raufoss. Et av ønskene for en ny formeprosess er å kunne bruke støpte utgangsemner. Den nye formemetoden må derfor kunne omdanne strukturen i større grad for at dette skal være mulig. Bedriften har derfor sett for seg at metoden består av en form for stykkestrudering. Under er det oppgitt noen kriterier den nye metoden må oppfylle.

Kriterier

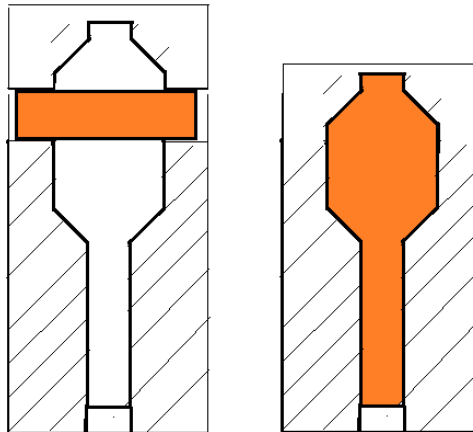
- Formfylling **må** være tilfredsstillende, da det er dette som er nevnt som første prioritet av bedriften. Formfylling burde være tilsvarende som dagens metode, om ikke bedre.
- Emnetemperaturen kan ikke overstige 570°C, da lokal smelting kan forekomme. Andre defekter ved høye temperaturer kan være inhomogen deformasjon og kornstruktur, tap av duktilitet og sprekkdannelse.
- Verktøy må være dimensjonert på en slik måte at man unngår unødvendig slitasje på verktøyet. Verktøyslitasje påvirker levetiden til verktøyet, og utgjør slik en økonomisk faktor. Kort levetid påvirker også den generelle produktiviteten med hyppig vedlikehold/utskiftning.
- Verktøyet burde også være dimensjonert på en slik måte at innmating av emne og uthenting av ferdigformet komponent er enkel.
- Må oppnå en viss grad av deformasjon hvis man skal kunne bruke støpte emner slik at man får endret kornstrukturen.
- Burde helst unngå unødig materialsvinn. Skjeggdannelse vil kreve en ekstra prosess for å fjernes etter forming. I tillegg vil mye skjegg bety at mye metall skrotes, og at prosessen er lite økonomisk.
- Prosessen bør helst ligge under 300 tonn i kraft fra pressen.
- Prosessen burde helst ligge under 20 sekunder i prosesstid.

Basert på disse kriteriene og input fra bedriften ble valgt to metoder i utgangspunktet, der den tredje er en «naturlig» videreføring av de to foregående. Metodene er presentert under i kronologisk rekkefølge etter når de ble vurdert.

Det vil bli utført simuleringer på de tre alternativene, der resultatene sammenlignes, og én variant vil velges basert på best «ytelse».

4.1.1 Kombinert stykkekstrudering

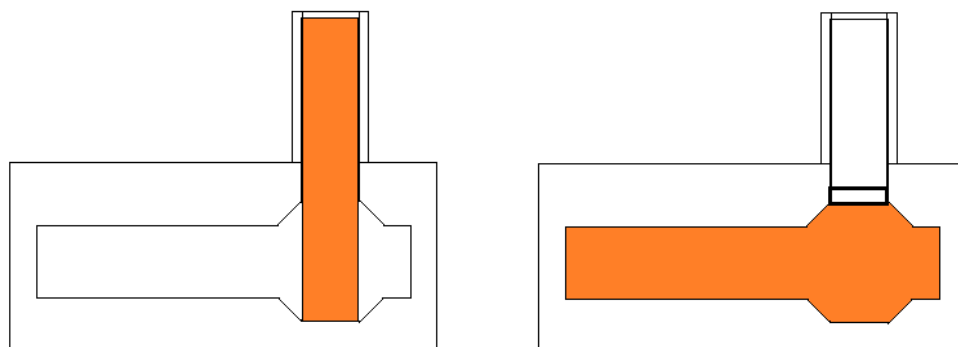
Proessen består av en kombinert forover- og bakoverekstrudering, der emnet presses inn mellom de to formene for å gi den ønskede formen. Prosessen kan bestå av at den ene formen beveger seg, mens den andre er statisk, eller at begge formene beveger seg samtidig. Noe skjeggdannelse må beregnes mellom de to verktøyene, og dette må så fjernes før delen/komponenten sendes videre. Metoden vil erstatte steg 2 i dagens prosess, nevnt i avsnitt 3.6. Dimensjoner på utgangsemner begrenses bare av hva som anses som hensiktsmessig størrelse på matrisen/verktøyene.



Figur 24 Stykkekstrudering

4.1.2 Lateral ekstrudering

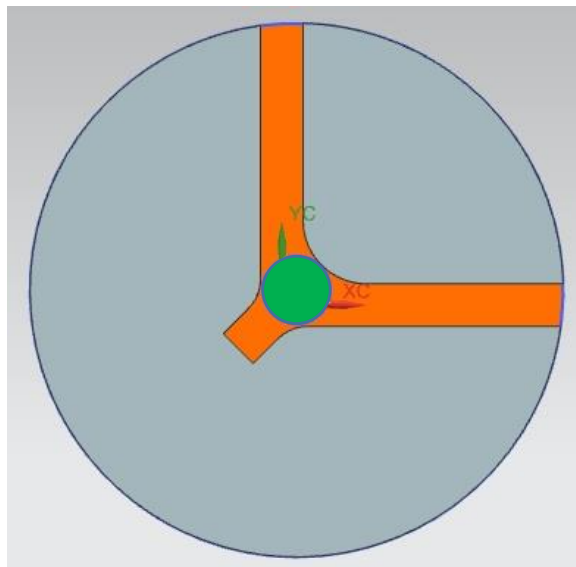
Utgangsemnet som er formet som en sylinder presses vertikalt ned av et stempel, og materialet flyter ut til sidene og fyller hulrommet. Også denne metoden vil erstatte det som er steg 2 i dagens episode. Dimensjoner på utgangsemnet er begrenset av størrelsen på «midtdelen», slik at emnet formes mest mulig som verktøyformen.



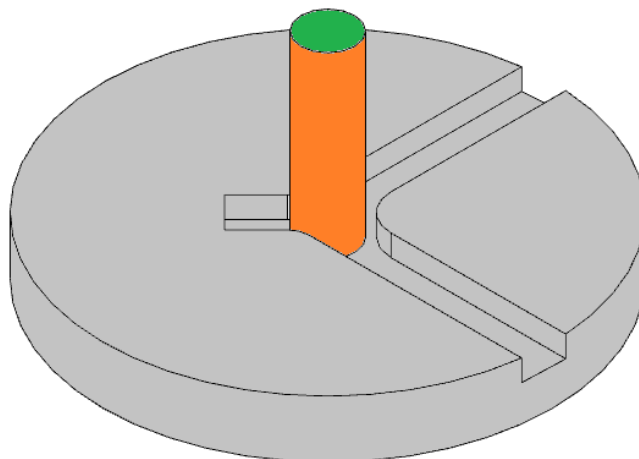
Figur 25 Lateral ekstrudering "stukedel"

4.1.3 Lateral ekstrudering L-form

Utgangsemnet som er formet som en sylinder presses vertikalt ned av et stempel, og materialet flyter ut til sidene og fyller hulrommet. Forskjellen er at materialet flyter ut i en L-form i stedet for «stukedelen». Slik kan man potensielt kutte to andre forformingssteg. Metoden tilsvarer altså steg 4 i dagens metode. Emnedimensjoner er begrenset av muligheten til å sette en sylinder i området som er markert med grønt i Figur 26. Ønskes det å bruke større utgangsemner må det lages et forkammer som reduserer diameteren til emnet før de flyter ut i formen.



Figur 26 Lateral ekstrudering L-form sett ovenfra



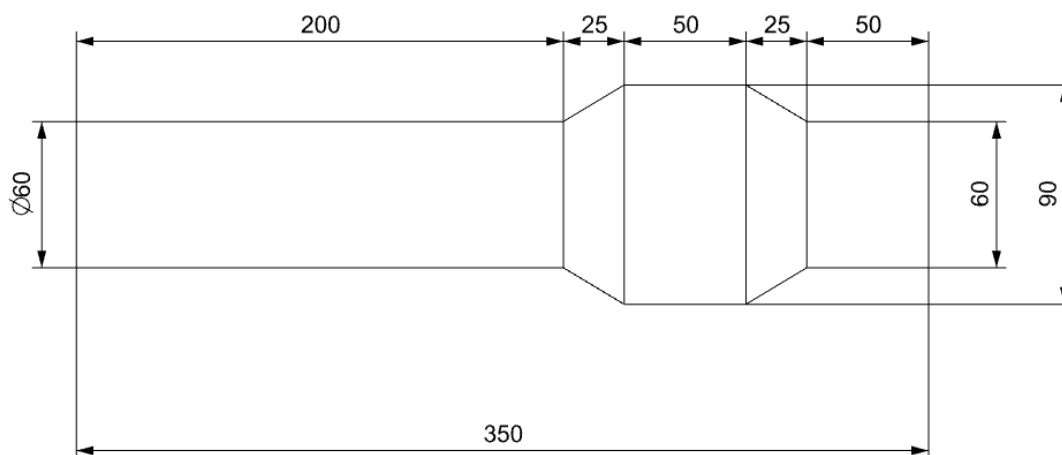
Figur 27 Lateral ekstrudering L-form isometrisk vinkel

4.2 Case-produkt

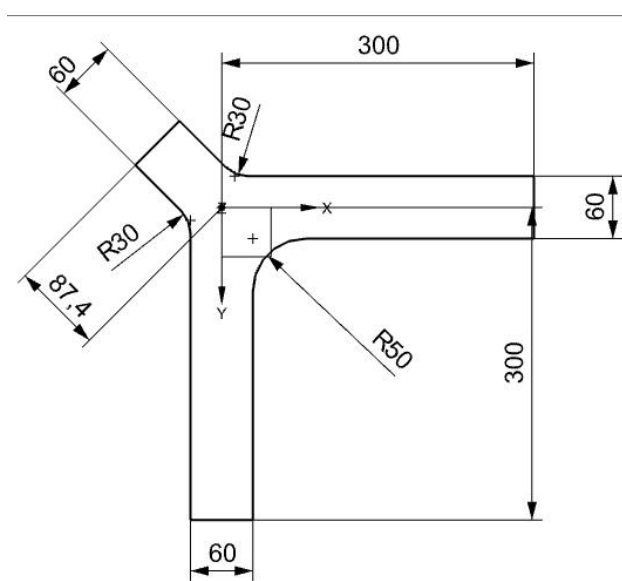
Siden Neuman Raufoss produserer flere typer hjuloppheng og forskjellige størrelser på disse, så er det valgt to modeller for videre beregninger og testing. Figur 28 og Figur 29 viser ønsket form og mål for de respektive forformede komponentene. Alle mål er i millimeter. Komponenten i Figur 28 er en sylindrisk bolt med en «fortykkelse» plassert der det trengs mer materiale i neste forformingssteg. Komponenten tilsvarer den forformede delen i steg 2 fra avsnitt 3.6. Delen kommer videre til å omtales som «stukeformen».

Komponenten i Figur 29 tilsvarer steg 4 i den nåværende prosessen, nevnt i avsnitt 3.6, og er en flat komponent med tilnærmet utforming som den ferdige bæreamen. Tilnærmet lik form sikrer unødvendig skjeggdannelse. Mål er basert på lengde og volum for «stukedelen». Delen kommer videre til å omtales som «L-formen».

Alternativ forformingsmetode 1 og 2 vil bruke målene i Figur 28 som utgangspunkt. For alternativ 3 brukes målene til Figur 29.



Figur 28 Geometri «stukedel»



Figur 29 Geometri L-form

4.3 Simuleringer i NX og Deform

Som nevnt i avsnitt 2.9 brukes simuleringstøytøy av typen FEM/FEA mer og mer i produksjon. I denne oppgaven er det brukt to forskjellige programmer, NX og Deform, hver med sine styrker og svakheter. Det er økonomisk fordelaktig å teste metodene via simuleringer, da dette er tidsbesparende, og man kan teste flere metoder uten å være begrenset av testmaskiner eller testobjekter.

Siemens NX 9 er et velegnet 3D-modelleringsprogram, der man kan lage svært komplekse deler. Programmet er mer egnet for utforming av ønskede deler enn Deform er, da NX har svært mange verktøy for formgiving. Delene konstrueres altså i NX før de importeres til Deform. I tillegg har NX svært kraftige simuleringstøytøyer, og kan brukes til å beregne belastninger og deformasjoner. Det er likevel ikke egnet til å kjøre større prosesser som går stegvis, slik som ekstrudering og smiing.

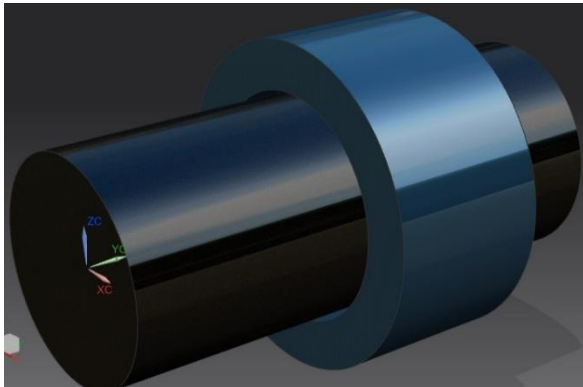
Deform er et simuleringstøytøy som er godt egnet for å se på relativt kompliserte produksjonsprosesser. Prosesser som valsing, smiing, ekstrudering med flere kan typisk simuleres i Deform. Deform har en rekke forskjellige prosesser man kan sette opp, og en mengde parametere som kan justeres. Disse er blant annet stempelhastighet, friksjonskoeffisient, temperaturer for hver enkelt del, varmeoverføringskoeffisient, med flere. Programmet er dog ikke særlig egnet for å modellere delene i prosessen hvis disse ikke består av enkle former.

NX

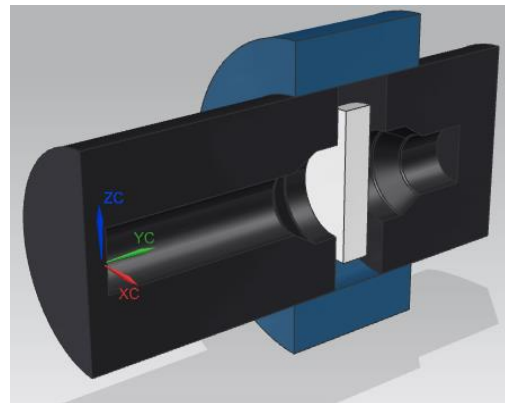
De alternative metodene presentert i 4.1 er 3D-modellert i NX, og presenteres hver for seg med bilder og mål for hver del. Indre mål som er utformet etter delen er ikke inkludert da de står oppført i avsnitt 4.1. Alle mål er i mm.

Kombinert ekstrudering

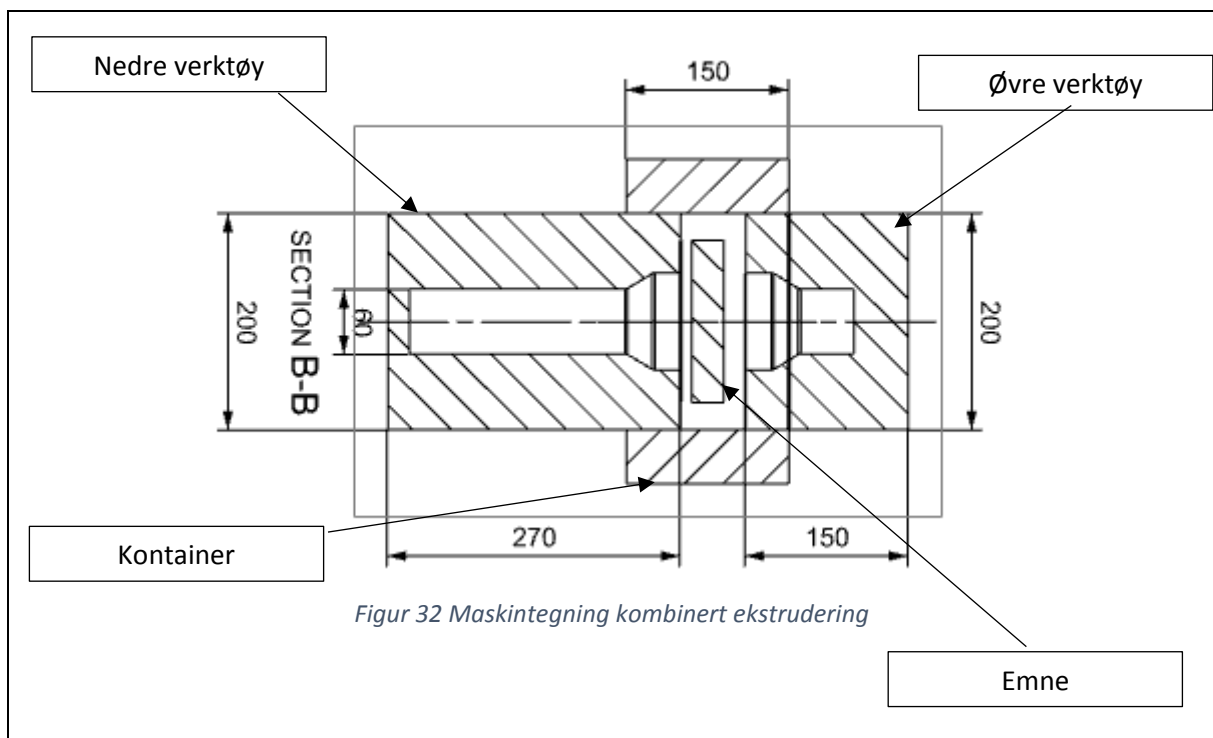
Verktøyet består av 4 deler; nedre verktøy, øvre verktøy, emne og kontainer. Kontaineren er her merket i blått i Figur 30, mens emnet vises i Figur 31 liggende mellom formene. Verktøyet er splittet opp som vist i Figur 31 for å enklere kunne sette i emnet, samt hente ut den ferdige delen.



Figur 30 Kombinert ekstrudering helt verktøy



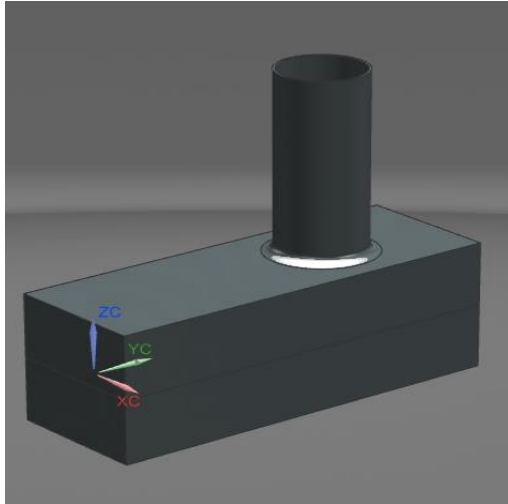
Figur 31 Kombinert ekstrudering oppdelt verktøy



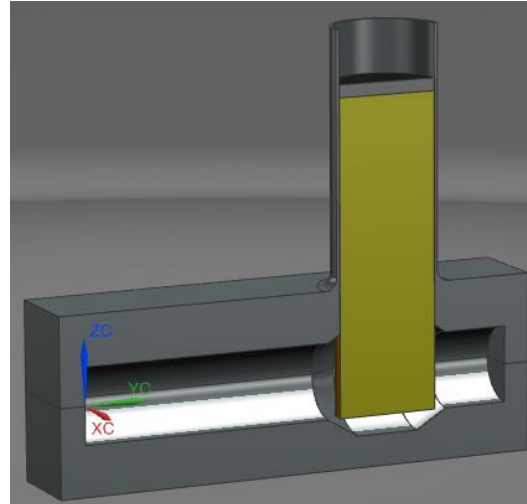
Figur 32 Maskintegning kombinert ekstrudering

Lateral ekstrudering

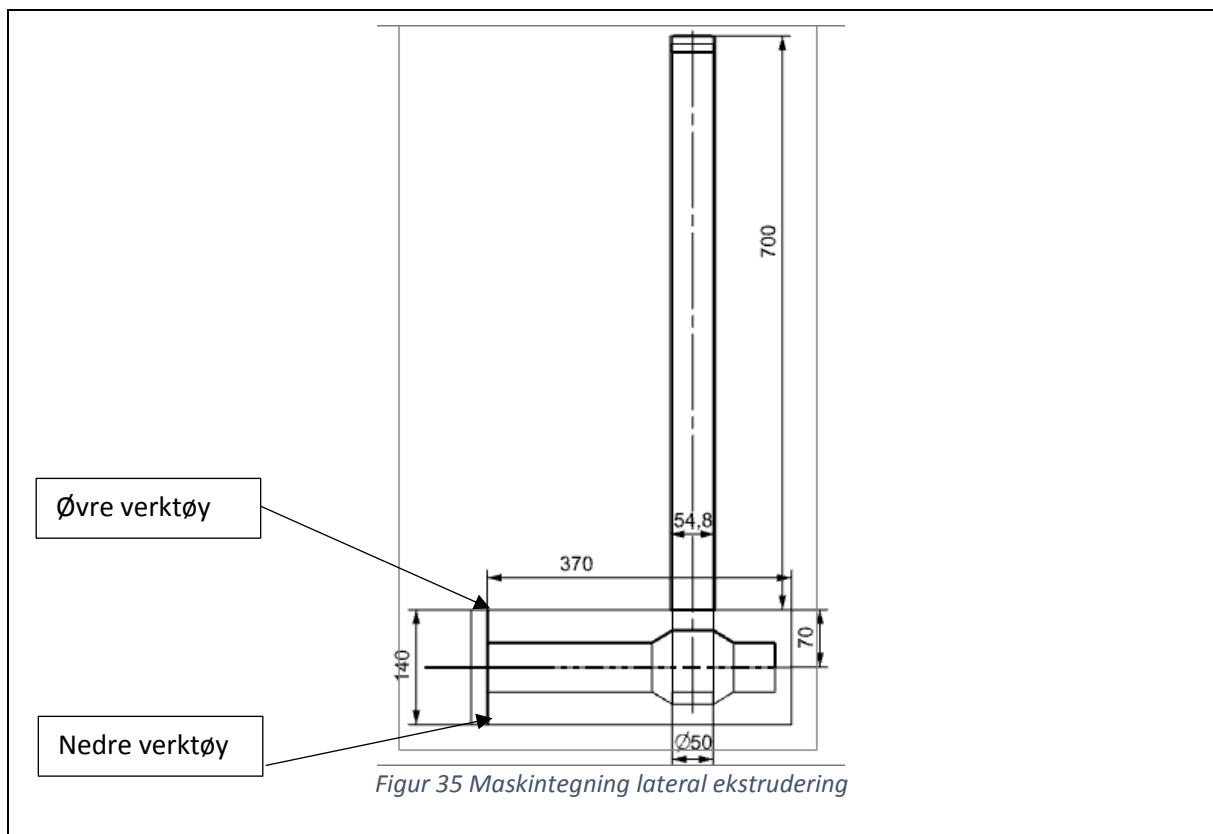
Verktøyet består av en øvre og nedre del som låses sammen, samt et guide-rør for emne og stempel. Utgangsemnet mates inn vertikalt, og blir stående i verktøyet støttet opp av verktøyveggen. Emnet presses så vertikalt nedover ved hjelp av et stempel. Verktøyet må låses fast slik at utgangsemnet ikke presses fra hverandre av emnet som utøver trykk mot formen under prosessen. Verktøyet er splittet midt på i det horisontale planet for å enklere kunne ta ut den ferdige delen.



Figur 33 Lateral ekstruderingsverktøy



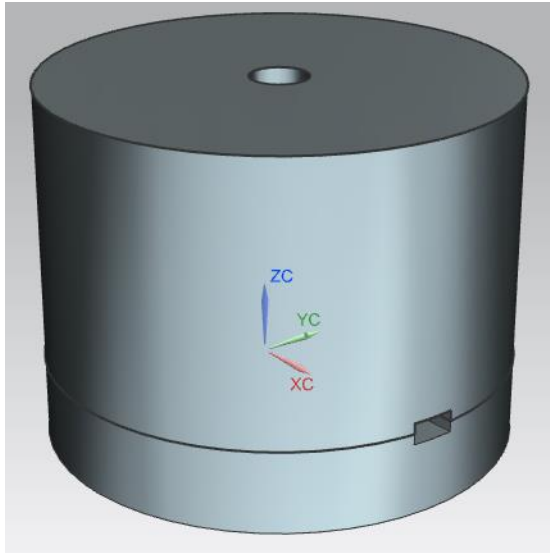
Figur 34 Lateral ekstruderingsverktøy snitt



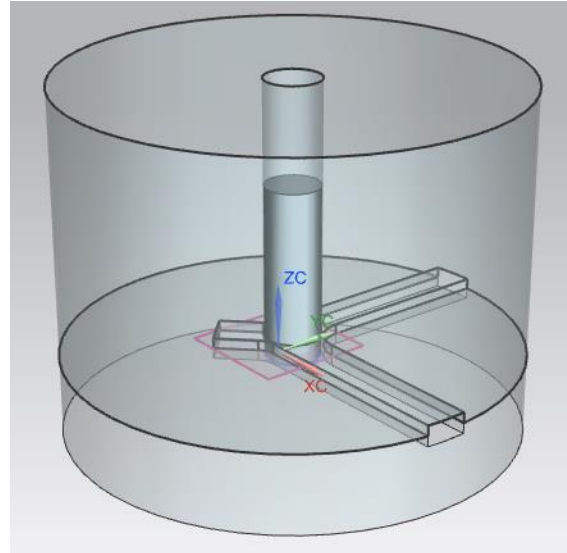
Figur 35 Maskintegning lateral ekstrudering

L-formet lateral ekstrudering

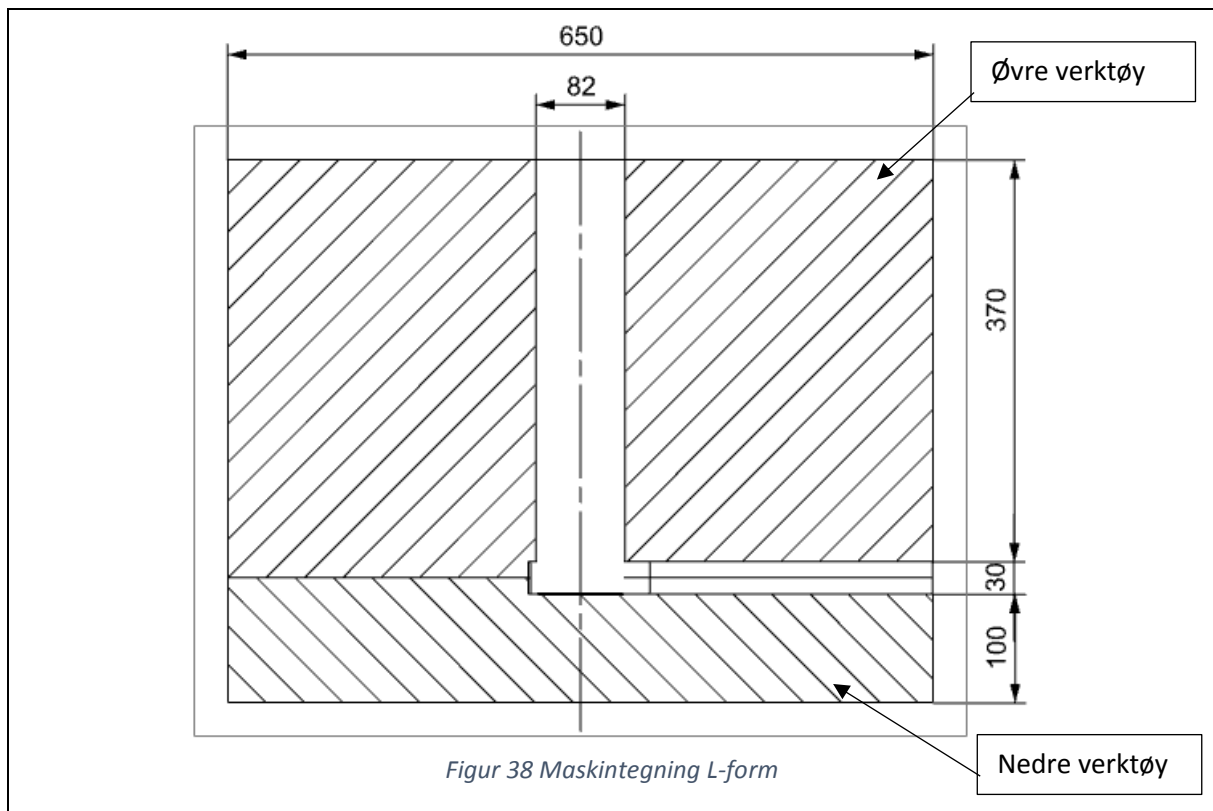
Det øvre verktøyet er overdimensjonert i forhold til veggtykkelse for å matche formen under. Verktøyet er splittet i to deler, slik at halve sporet ligger i hver del. Dette er for å gjøre det enklere å hente ut den ferdige delen. Emnet kan ses stående i verktøyet i Figur 37. Verktøyet er simulert både med lukket spor inni verktøyet, og med åpne spor som i figurene under. Varianten med lukket spor er utgangspunktet i avsnitt 4.3.1.



Figur 36 L-form, Helt verktøy



Figur 37 L-form, Transparent verktøy



Deform

De innledende simuleringene er utført med samme mesh-størrelse for alle emnene, uavhengig av emnegeometri. Dette er for å sikre konsekvent mesh, samt prøve å redusere parametere som kan påvirke resultatene. Alt annet verktøy er i utgangspunktet ikke meshet for å redusere simuleringstiden, samt at materialflyten til emnet er prioritert fremfor verktøyslitasje.

Mesh-størrelse er satt til **32 000** elementer (standard). Meshet kan endre seg underveis, da Deform remesher under prosessen. Utgangsemnet er en sylindrisk bolt i alle tilfeller. Emnetemperatur er satt til **500°C** i samtlige tilfeller. Emnematerialet brukt i simuleringene kalles **ALUMINIUM-6082(300-500)** og er hentet fra Deforms materialdatabase. Verktøy og kontainer er satt til **350°C**, da det er det som brukes i dagens prosesser ved Raufoss. Simuleringene er beregnet med smøring. **Tresecas** friksjonsmodell er brukt for simuleringene (avsnitt 2.5). Friksjonskoeffisienten er satt til **0,3**, da dette er Deforms standardverdi for friksjon ved varmforming med smøring. Varmeoverføringskoeffisienten er satt til **5 N/sec/mm/C**, da dette er Deforms standardverdi ved varmforming. Enkelte simuleringer er kjørt som en halv eller en fjerdedel av modellen for å redusere simuleringstiden. Dette er mulig siden disse verktøyene er aksesymmetriske.

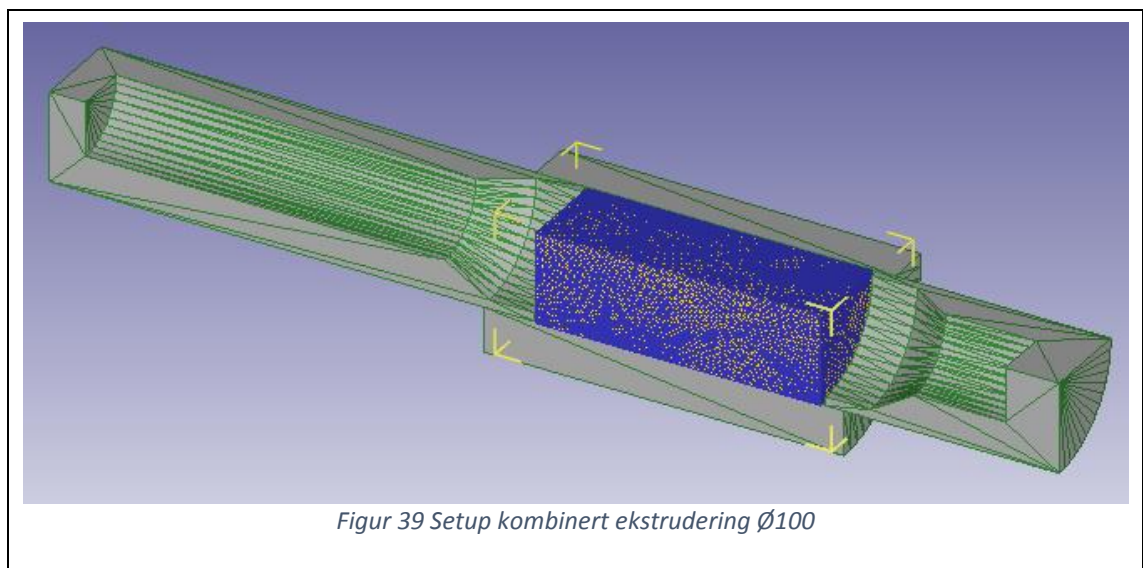
For den valgte løsningen vil det også sees på hvor mesh-avhengig resultatene er ved å kjøre en simulering med finere mesh på modellen.

4.3.1 Innledende simuleringer

Kombinert ekstrudering $\varnothing 100$

Tabell 1 Simuleringsparametere kombinert ekstrudering

Simuleringsparametere kombinert ekstrudering		
Bolt/Emne	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	100
	Lengde [mm]	159
	Mesh [elementer]	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	0,085
	Volum [mm ³]	311 930
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger	Stempelhastighet [mms ⁻¹]	30
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	160

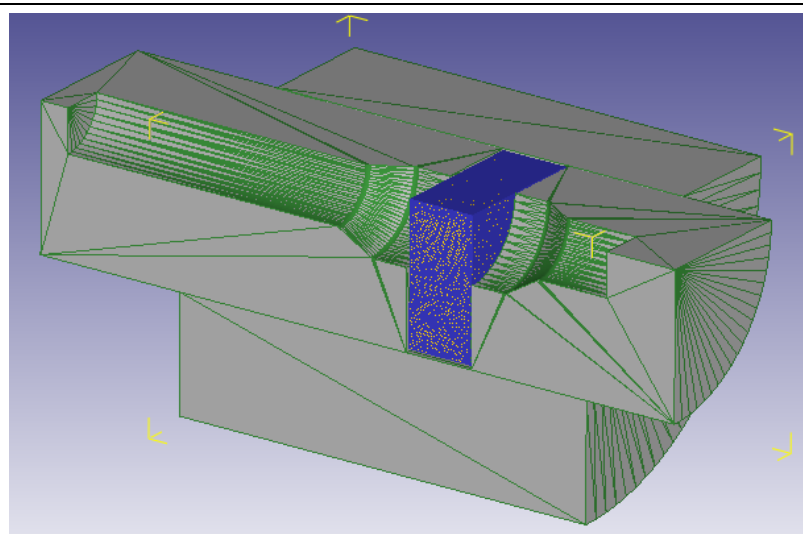


Kombinert ekstrudering Ø200

Tabell 2 Simuleringsparametere kombinert ekstrudering

Simuleringsparametere kombinert ekstrudering		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	200
	Lengde [mm]	40
	Mesh	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	-6,8
	Volum [mm ³]	335 633
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring [N/sec/mm/C]		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ⁻⁵]	30
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	36,5

Delen er simulert som en fjerdedel for å redusere simuleringstiden.



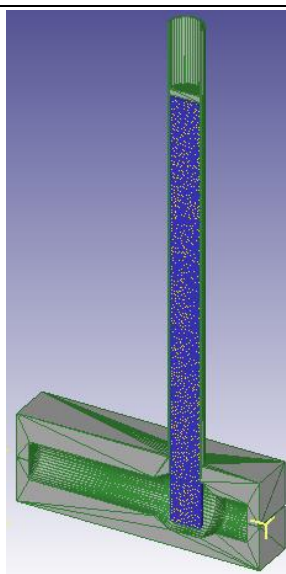
Figur 40 Setup kombinert ekstrudering Ø200

Lateral ekstrudering «stukedel»

Tabell 3 Simuleringsparametere Lateral ekstrudering «stukedel»

Simuleringsparametere Lateral ekstrudering «stukedel»		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	50
	Lengde [mm]	636
	Mesh	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	4,8
	Volum [mm ³]	646 505
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring [N/sec/mm/C]		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ⁻⁵]	30
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	590

Delen simuleres som en halvdel for å redusere simuleringstiden.

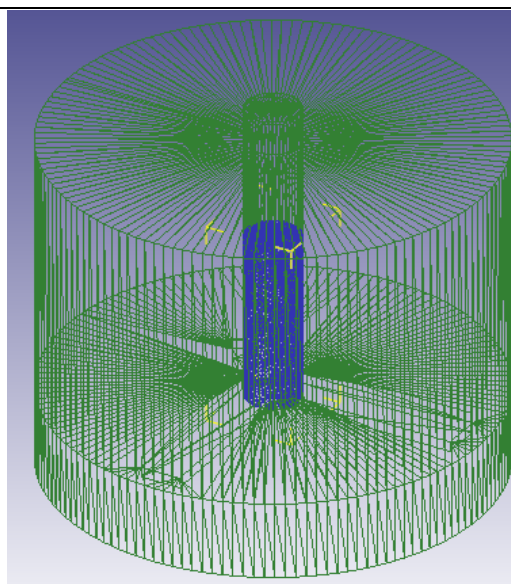


Figur 41 Setup lateral ekstrudering stukedel

Lateral ekstrudering L-form

Tabell 4 Simuleringsparametere L-form uten ventilering

Simuleringsparametere L-form uten ventilering		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	80
	Lengde [mm]	248
	Mesh	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	-0,22
	Volum [mm ³]	1 253 380
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring [N/sec/mm/C]		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ⁻⁵]	10
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	220



Figur 42 Setup lateral ekstrudering L-form

Kommentar til innledende simuleringer:

Basert på simuleringresultatene er alternativ 3, lateral ekstrudering til L-form, valgt for videre simuleringer, da dette virker som den mest lovende metoden. Resultatene presenteres i kapittel 5, der resultatene fra de innledende simuleringene finnes i avsnitt 5.1

4.3.2 Simuleringer for valgt løsning

For den valgte metoden er det utført mer dyptgående simuleringer for å se hvor parameteravhengig løsningen er, samt optimalisering av verktøyutforming.

L-form med ventilering

For denne simuleringen er det testet hvilke følger det får å ha åpne spor helt ut, framfor en lukket form inni verktøyet.

Tabell 5 Simuleringsparametere L-form med ventilering

Simuleringsparametere L-form med ventilering		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	80
	Lengde [mm]	248
	Mesh	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	-0,22
	Volum [mm ³]	1 253 380
Starttemperatur [°C]	500	
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring [N/sec/mm/C]		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ⁻⁵]	10
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	220
	Remesh-kriterie [antall steg]	1

L-form finere mesh

Denne simuleringen er utført for å se hvor mesh-avhengig resultatene er. Meshet består av over dobbelt så mange elementer enn de foregående simuleringene.

Tabell 6 Lateral ekstrudering L-form finere mesh

Simuleringsparametere L-form finere mesh		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	80
	Lengde [mm]	248
	Mesh	100 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	-0,075
	Volum [mm ³]	1 253 380
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring [N/sec/mm/C]		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ^{-s}]	10
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	220
	Remesh-kriterie [antall steg]	1

4.4 Utforming og eksperimentell testing av valgt metode

For testingen er det laget en skalamodell for å teste konseptet. Design og utforming er basert på den valgte løsningen med åpne kanaler. Grunnet økonomiske begrensninger er ikke verktøyet laget av verktøystål, typisk orvar-stål eller AISI13-stål, men heller overskuddsstål som var tilgjengelig på verkstedet. Det er derfor utført en hardhetstest for å bestemme kvaliteten på stålet. Verktøyet er beregnet i både NX og Deform for å finne faktorer som er utslagsgivende for dimensjoneringen.

Generelt for de eksperimentelle testene så er oppvarmingstiden basert på antagelser og empiriske «tommelfingerregler». Grunnet emnets små dimensjoner er det vanskelig å måle temperaturen skikkelig. 1 time er antatt å være tilstrekkelig for å gjennomvarme emnet og verktøyet. Det er ikke kritisk at verktøyet er gjennomvarmet, da hensikten er å unngå unødvendig kjøling av emnet.

4.4.1 Hardhetstest

For å sjekke hardheten til stålet ble det utført Vickers hardhetstest. Testen ble utført for Rockwell C-skala, altså en diamantstift som presses inn i stålet med 150 kg kraft. Stålskiven ble montert i verktøyet og verdien ble avlest på måleren. Testen ble utført på 3 områder for å unngå lokale forskjeller i hardhet.

4.4.2 Verktøydimensjoner og utstyr

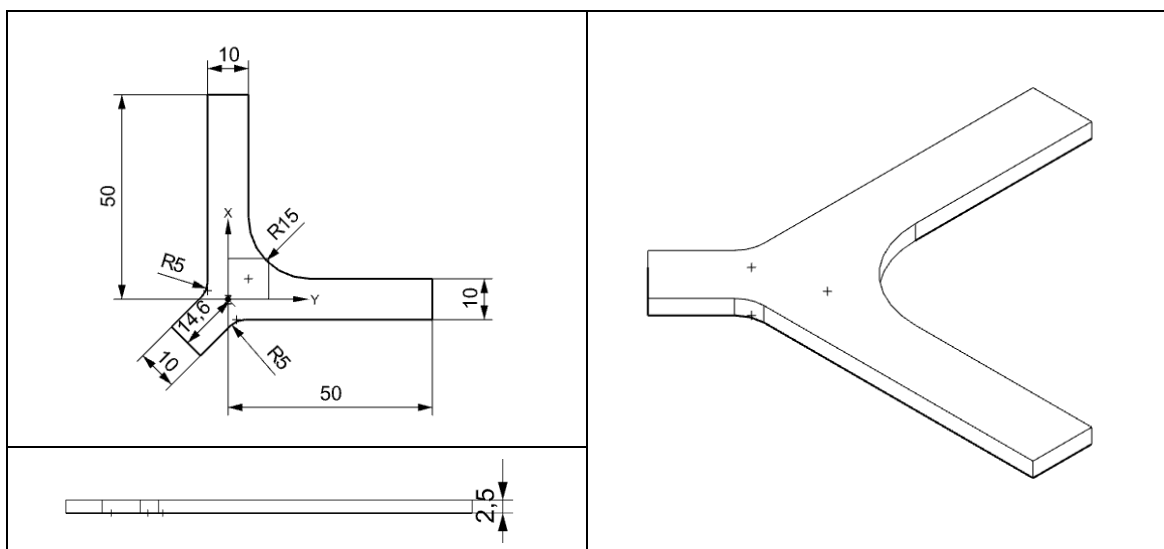
Verktøyet er skalert ned til en sjettedel (1:6) av det ordinære verktøyet. Grunnet feil i maskineringen av verktøyet er spordybden halvparten av hva den ordinært skulle vært. Dette påvirker også emnedimensjonene. Dette er markert med en stjerne * og ordinær dimensjon er oppgitt i parentes. Øvrige dimensjoner for testoppsettet er følgende:

Komponent

Toppareal: 1484 mm²

Volum: 3710 mm³ * (opprinnelig 7420 mm³)

Tykkelse: 2,5 mm* (opprinnelig 5 mm)



Figur 43 Dimensjoner komponent

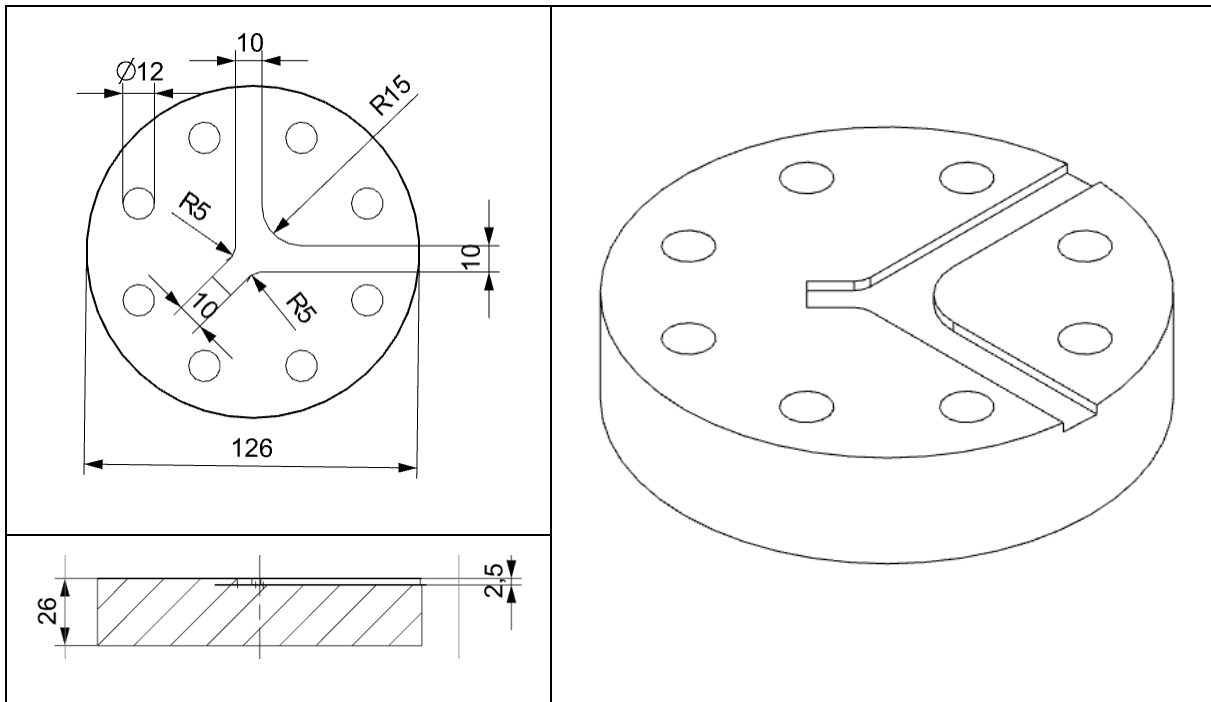
Nedre verktøy

Verktøydiameter: 126 mm

Verktøytykkelse: 26 mm

Spordybde: 2,5 mm

Materiale: Konstruksjonsstål. Flytegrense 980 MPa.



Figur 44 Dimensjoner nedre verktøy

Øvre verktøy

Verktøydiameter: 126 mm

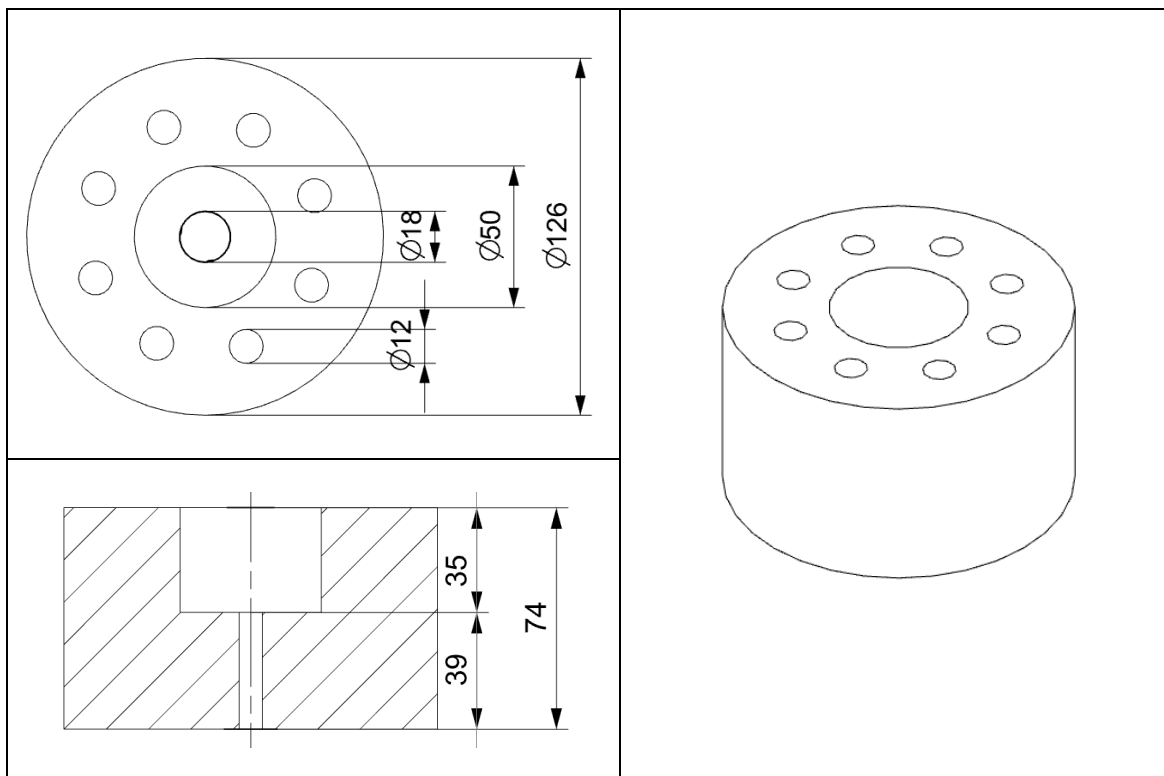
Verktøyhøyde/tykkelse: 74 mm

Indre diameter: 50 mm

Indre diameter liten: 18 mm

Spordybde: 0 mm* (opprinnelig 2,5 mm)

Materiale: Konstruksjonsstål. Flytegrense 980 MPa.



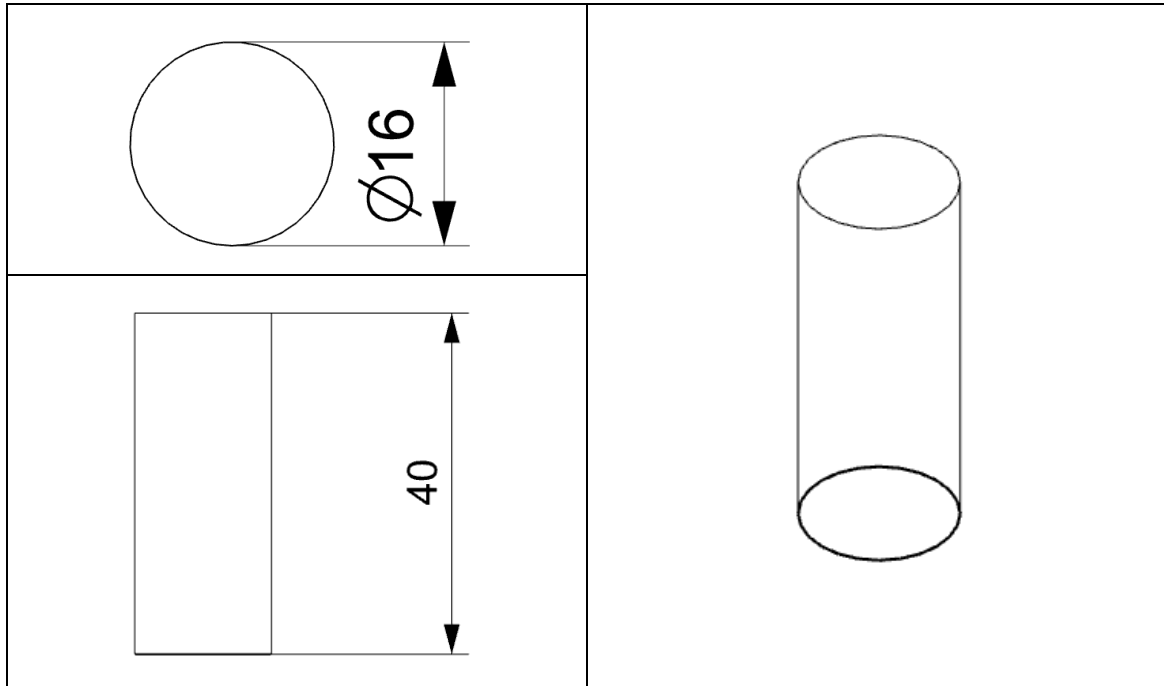
Figur 45 Dimensjoner øvre verktøy

Utgangsemne

Emnemateriale: Aluminium 6082.52

Emnediameter: 16 mm

Emnelengde: 25 mm* (40 mm ordinært)



Figur 46 Dimensjoner utgangsemne

Emnedimensjoner er basert på tilsvarende volum som den forformede komponenten skal ha.

Stempel

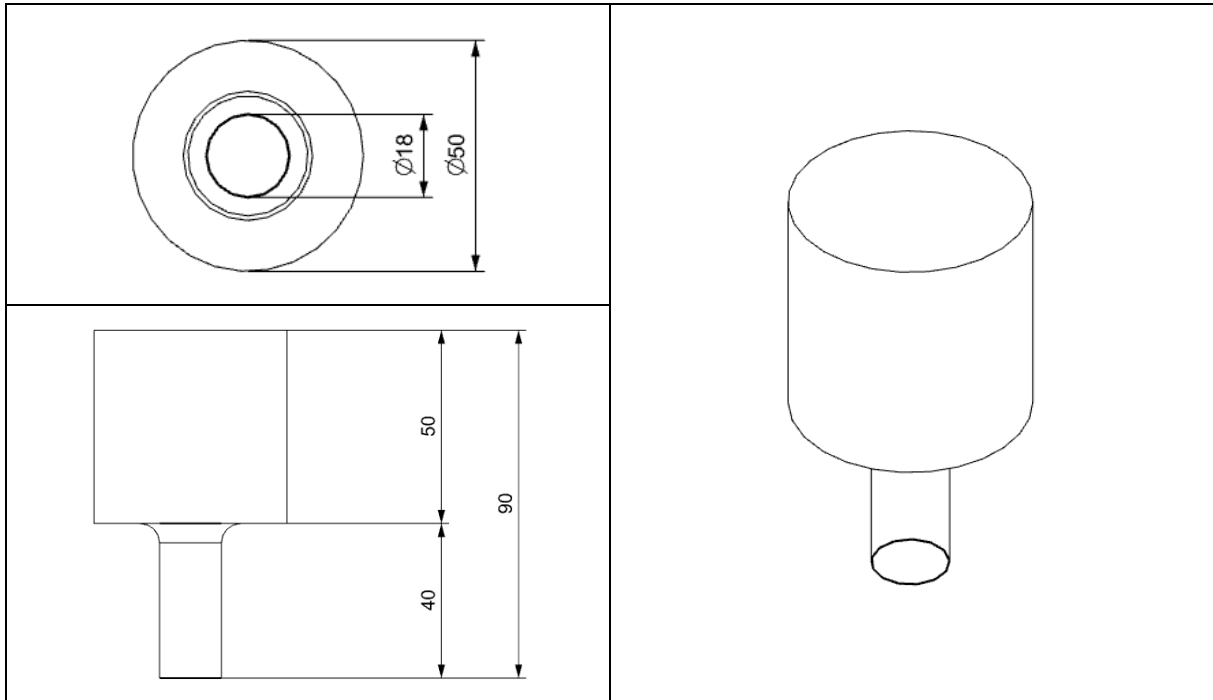
Diameter, stempelhode: 50 mm

Diameter, stempeltapp: 18 mm

Høyde, stempelhode: 50 mm

Høyde, stempeltapp: 35 mm

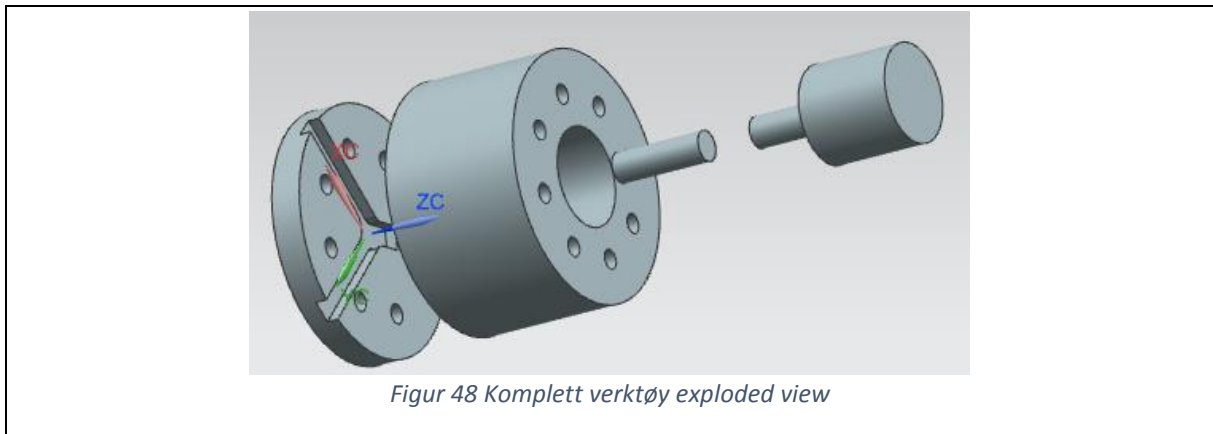
Materiale: Konstruksjonsstål. Flytegrense 980 MPa.



Figur 47 Dimensjoner stempel

Stempelet er utformet slik for å sikre en stor overflate mellom presse og stempel. I tillegg er det øvre verktøyet utformet slik at begge delene av stempelet står støttet opp av verktøyveggen under pressing for å unngå bøyning eller knekking av stempelet.

Komplett verktøy exploded view



Figur 48 Komplett verktøy exploded view

Presse

Pressen brukt under forsøkene er en hydraulisk presse med maks kraftlevering på 60 tonn (ca. 589 kN). Pressen er utstyrt med overtrykksventil, slik at den ikke fortsetter å presse hvis den møter nok motstand. Pressen har ingen mulighet til logging av stempelhastighet eller presskraftkurve under forsøkene.

Smøremiddel

For forsøket ble det brukt Lubrodal F 33 Al som smøremiddel. Dette er et vannbasert smøremiddel som skal påføres på oppvarmede verktøy, slik at smøremiddelet koker inn og etterlater et størknet belegg av grafitt. Smøremiddelet skal egentlig blandes ut med vann, men etter anbefalinger fra leverandøren burde smøremiddelet påføres ublandet og med pipette. Dette fordi smøremiddelet vanligvis påføres med trykksatte dyser som sprayer en fint lag på verktøyet, slik at det er vanskelig å gjenskape laget av smøremiddel uten slikt utstyr.

For de utførte simuleringene var friksjonskoeffisienten satt til 0,3, men forsøk utført av Carine Eggen tyder på at oppnådd friksjonskoeffisient for dette smøremiddelet heller ligger nærmere 0,1. [1]

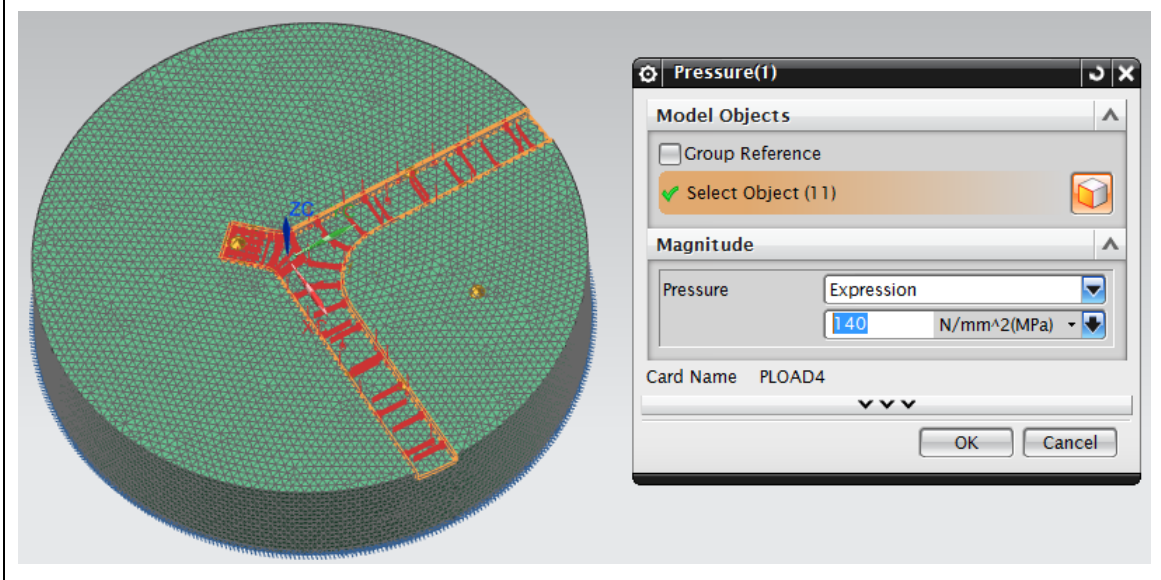
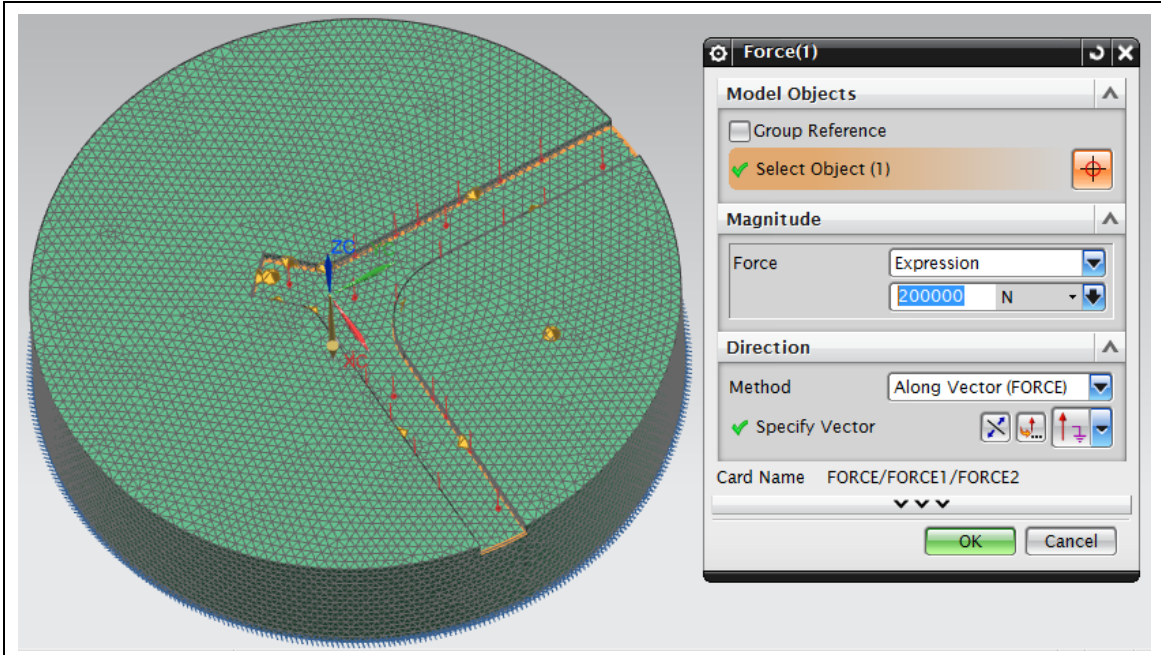
Grunnet begrenset klebeffekt over 250°C, er det valgt å påføre smøremiddelet etter at verktøyet er varmet opp til 150-200°C.

4.4.3 Verktøysimulering

Verktøyet er simulert i NX og Deform for å se på belastninger som oppstår under testingen som kan være avgjørende for dimensjoneringen.

NX

Delen består av et 3D tetrahedalmesh, med elementstørrelse på 2 mm. Materialet brukt i simuleringen er «Steel» fra NXs materialdatabase. Delen er fast innspent i bunnen. Modellen er belastet med en vertikal kraft fordelt over sporet i verktøyet på 200 kN som skal etterligne emnet som presses ned i verktøyet, samt trykk mot alle flater på 140 MPa. Det er valgt å bare simulere det nedre verktøyet, da det er dette som vil få de største belastningene under testen. Belastningen er noe overdimensjonert for å sikre at verktøyet er dimensjonert for større belastninger enn de som man forventer vil oppstå under testingen. Temperaturen er satt til 400°C.

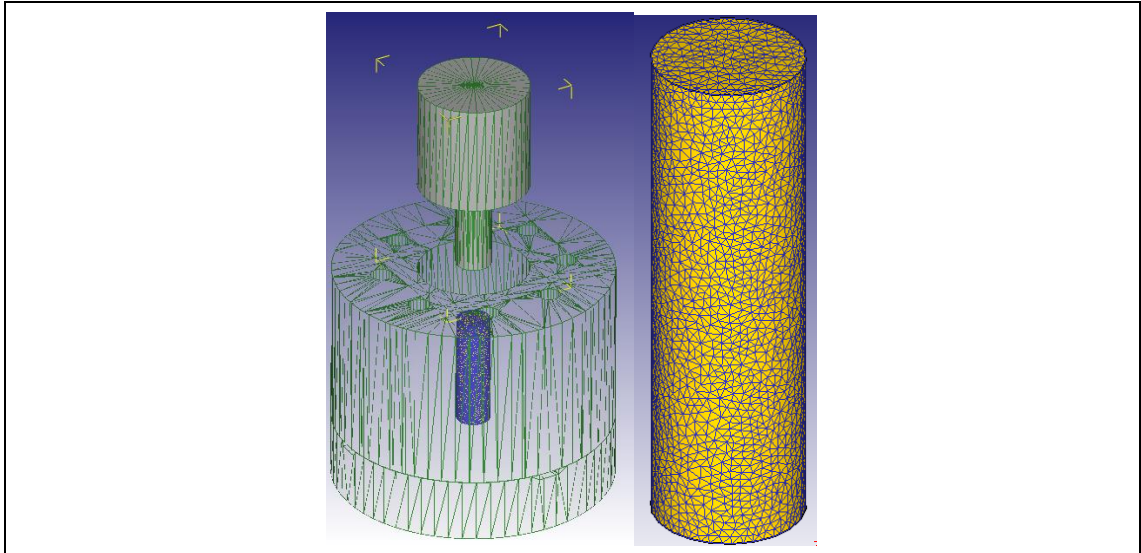


Deform

Det er utført en simulering for det skalerte testverktøyet for å beregne kraftbehovet som trengs for å utføre testen. I tillegg utføres simuleringen for å se om belastninger og andre parametere også skaleres i forhold til den ordinære størrelsen.

Tabell 7 Simuleringsparametere verktøy

Simuleringsparametere «Verktøydimensjoner»		
Bolt/Emne		
	Materiale	AA6082
	Diameter [mm]	16
	Lengde [mm]	50
	Mesh	32 000
	Mesh-nøyaktighet avvik [%]	-0,0072
	Volum [mm ³]	8716
	Starttemperatur [°C]	500
Verktøy/Matrise		
	Materiale	H13
	Mesh	-
	Starttemperatur [°C]	350
Friksjonstall		
	Mellom kontainer og bolt	0,3
	Mellom stempel og bolt	0,3
	Mellom underdel og bolt	0,3
Varmeoverføring		
	Mellom kontainer og bolt	5
	Mellom stempel og bolt	5
	Mellom underdel og bolt	5
Andre innstillinger		
	Stempelhastighet [mms ⁻⁵]	10
	Step increment	1
	«Stempelvandring» [mm]	220
	Remesh-kriterie [antall steg]	1



4.4.4 Beregninger for verktøyutforming

Det er utført noen beregninger i forhold til utforming av testverktøy for å sikre at testen er så optimal som mulig. Disse går på sammenkobling av verktøy, samt varmeutvidelse under testen.

Beregninger for sammenkobling

Grunnet begrensninger til testutstyret festes verktøyets øvre og nedre del sammen med skruer. Under forsøket vil emnet utøve en kraft mellom delene, og prøve å presse dem fra hverandre, noe som vil føre til lekkasjer og skjeggdannelse. Beregninger er utført med hensyn på denne kraften, samt antall skruer som må til for å tåle belastningene. Alle formler brukt i beregningene er hentet fra boka *Dimensjonering av maskindeler*. [5] Utgangspunktet er tatt i skruer av fasthetsklasse 12.9, og størrelse M12.

$$\text{Flytespenning: } R_{p0.2} = 1200 \text{ MPa} \times 0,9 = 1080 \text{ MPa}$$

$$\text{Spenningsdiameter: } d_s = \frac{10,86+9,85}{2} \text{ mm} = 10,36 \text{ mm}$$

$$\text{Spenningsareal} = A_s = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi \times 10,36^2}{4} = 84,3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Flytelast} = F_{p0.2} = R_{p0.2} \times A_s = 91\,044 \text{ N} \approx 91 \text{ kN}$$

$$\text{Bruddlast} = F_m \geq R_m A_s = 1200 \times 84,3 = 101\,160 \text{ N} \approx 101,2 \text{ kN}$$

$$\text{Delens toppflateareal: } 1484 \text{ mm}^2$$

$$\text{Anslått trykk: } 250 \text{ MPa}^{**}$$

$$\text{Kontaktkrefter: } 1484 \times 250 = 371\,000 \text{ N} = 371 \text{ kN}$$

$$\text{Fordelt på 8 skruer: } \frac{371\,000}{8} = 46\,375 \text{ N}$$

Sikkerhetsmargin: $\frac{91\,044}{46\,375} = 1,96$

***Trykket er overdrevet en del, da flytegrensen for aluminiumet ligger på maks 100 MPa, og simuleringresultatene antyder på at maks spenning som oppstår ligger rundt det samme.*

Basert på beregningene konkluderes det med at åtte M12-skruer med 12.9 fasthetsklasse er tilfredsstillende.

Beregninger for varmeutvidelse:

Siden testen skal utføres ved høy temperatur, så må det påberegnes noe varmeutvidelse. For disse beregningene er det brukt Formel 13 fra avsnitt 2.5. Beregningene er basert på at utgangsemnet varmes fra romtemperatur til 500°C, og at verktøyet varmes fra romtemperatur til 350°C.

Utgangsemne:

$$\text{Aksielt: } \Delta L = \alpha \Delta T L_0 = 22,2 \times 10^{-6} \times 480 \times 25 = 0,266 \text{ mm}$$

$$\text{Radielt: } \Delta L = \alpha \Delta T L_0 = 22,2 \times 10^{-6} \times 480 \times 16 = 0,17 \text{ mm}$$

Verktøy:

$$\text{Sporbredde: } \Delta L = \alpha \Delta T L_0 = 12 \times 10^{-6} \times 330 \times 10 = 0,039 \text{ mm}$$

$$\text{Innmatingshull: } \Delta L = \alpha \Delta T L_0 = 12 \times 10^{-6} \times 330 \times 18 = 0,071 \text{ mm}$$

Det er valgt å ikke dimensjonere testverktøyet for varmeutvidelse, da disse er såpass små.

4.4.5 Plastelinatest

En konsepttest ble utført med plastelina for å se på materialflyten i verktøyet. Biter med plastelina rulles ut til sylindere i ca. samme lengde som emnet skal være. Plastelinasylinderen mates inn i verktøyet, og presses ut for hånd.

4.4.6 Test 1

Verktøyet ble ikke smurt. Emnet ble bare varmet til 300°C i 15 minutter grunnet dårlig tid. Temperaturen på emnet ble ikke målt grunnet mangel av måleutstyr. Emnet ble matet inn i verktøyet, og pressen ble kjørt til maks.

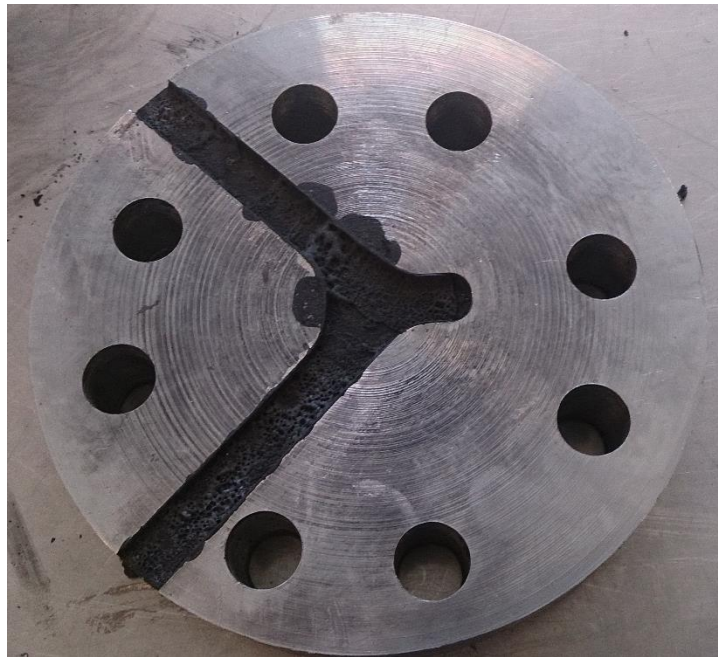
4.4.7 Test 2

Et nytt stempel måtte lages, da det forrige måtte ødelegges for å få det løst fra verktøyet. Verktøyet ble varmet til 200°C før smøremiddel ble påført. Verktøyet ble avkjølt en halvtime før det ble montert sammen. Grunnen til dette er for å sikre at sporene fikk rikelig med smøremiddel, noe som er vanskelig når verktøyet er montert opp. I tillegg vil verktøyet potensielt krympe ved nedkjøling, noe som kan avlaste skruene. Verktøyet ble så satt tilbake i ovnen og varmet til 250°C i 15 minutter. Emnet ble satt i en annen ovn på 505°C, og

latt ligge i 20 minutter. Emnet ble «matet» inn i verktøyet, og pressen ble kjørt til overtrykksventilen slo inn.

4.4.8 Test 3

Et nytt stempel måtte lages igjen, da det forrige var for skadet til å kunne brukes igjen. Verktøyet ble varmet til 160°C i 30 minutter, og så tatt ut for påføring av smøremiddel. Figur 49 viser hvordan smøremiddelet har kokt inn og etterlatt et belegg.



Figur 49 Testverktøy påført smøremiddel

Verktøyet ble så montert sammen, og emnet ble plassert inni før hele verktøyet ble satt inn i ovn til oppvarming. Verktøyet ble holdt på 520°C i 80 minutter, før det ble plassert i pressen og testen ble utført. En klosse ble brukt mellom pressa og stempelet, siden stempelet er lavere enn lengden på skruene i den endelige posisjonen. Klossen var ikke varmet opp.



Figur 50 Testverktøy i presse

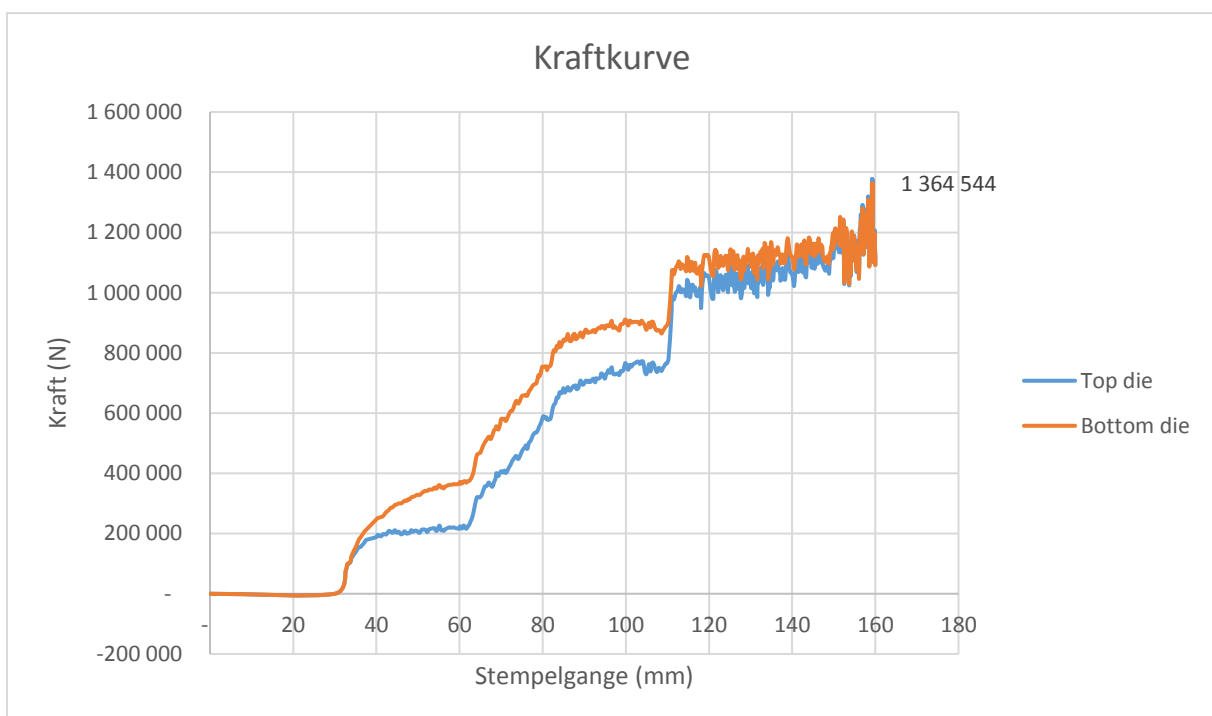
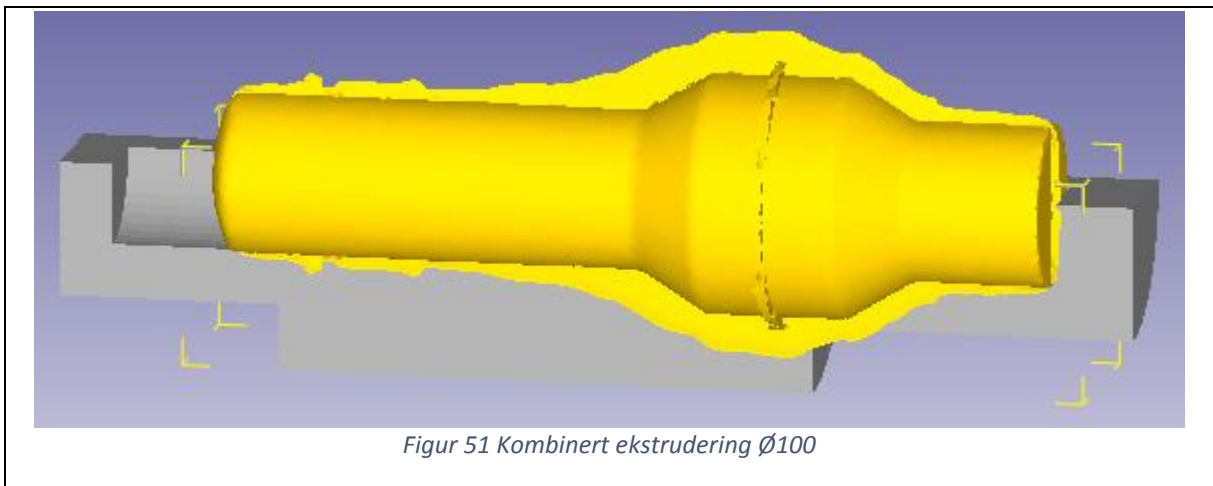
5. Resultater

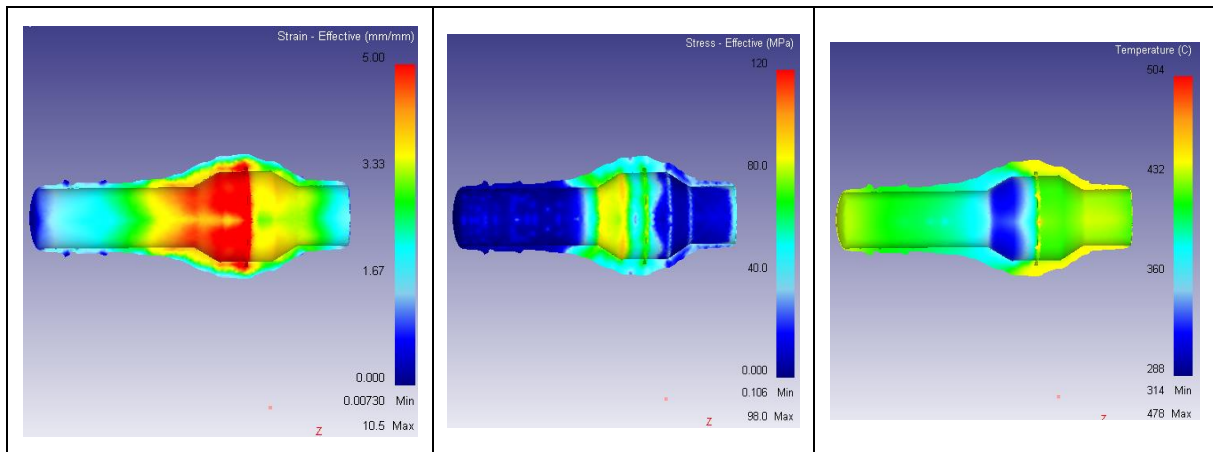
Resultatene presenteres i samme rekkefølge som de ble presentert i metodekapittelet. Kapittelet består av mange figurer da dette gir bedre forståelse enn kun tekst.

5.1 Simuleringsresultater – Innledende simuleringer

5.1.1 Kombinert ekstrudering $\varnothing 100$

Man kan tydelig se lekkasjen rundt emnet, samt skjeggdannelsen midt på (se Figur 51). Delen vil også potensielt være utsatt for «shaving», eller «skrelling», siden diameteren til utgangsemnet bare er 10 mm større enn diameteren til den formede komponenten.



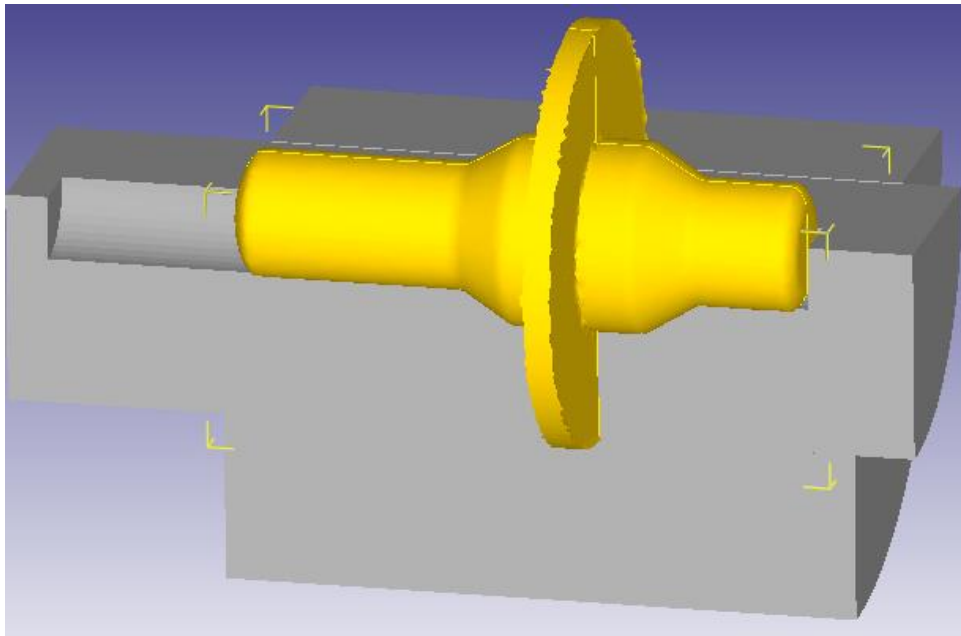


Figur 53 Tøyning, spenninger og temperatur for kombinert ekstrudering $\varnothing 100$

Det kan observeres at de største spenningene og tøyningene oppstår nedre del av «halsen» for komponenten. Den laveste sluttemperaturen som er målt er 314°C når prosessen er fullført. Maks temperatur var 504°C under prosessen.

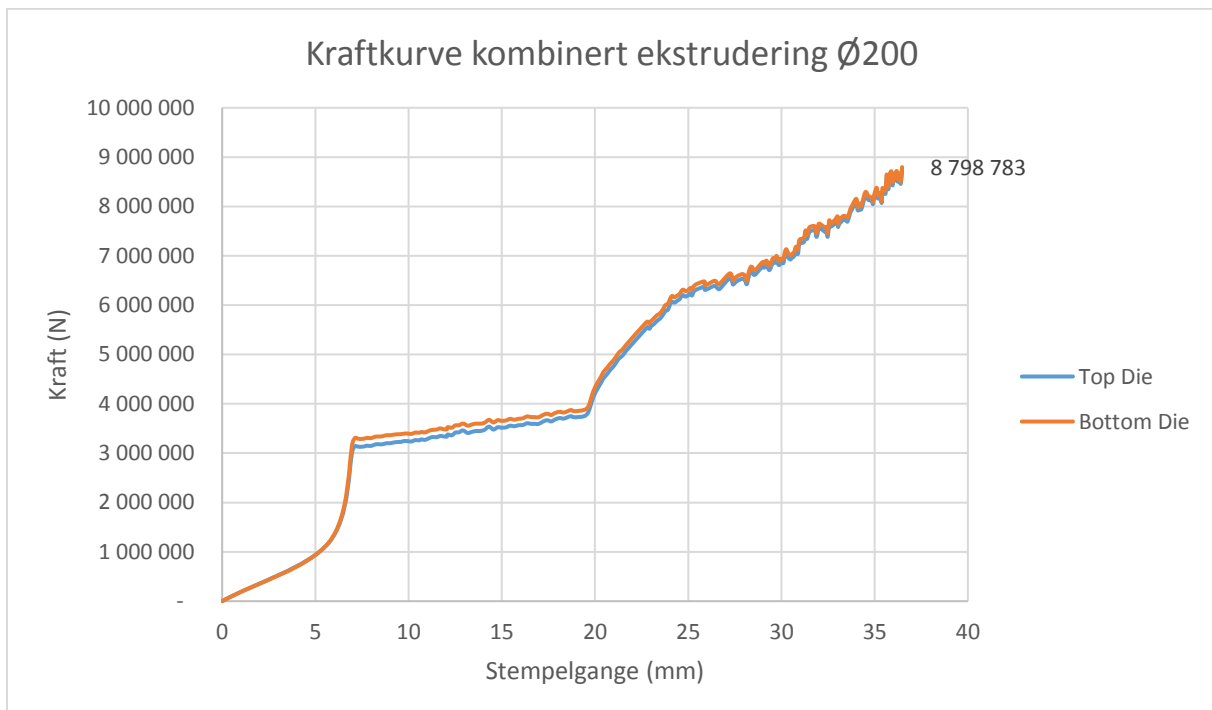
5.1.2 Kombinert ekstrudering $\varnothing 200$

Proessen fyller bare halvparten av den nedre formen, og det dannes store mengder skjegg mellom verktøyene. Den massive skjeggdannelsen er grunnen til at formen ikke fylles i større grad.

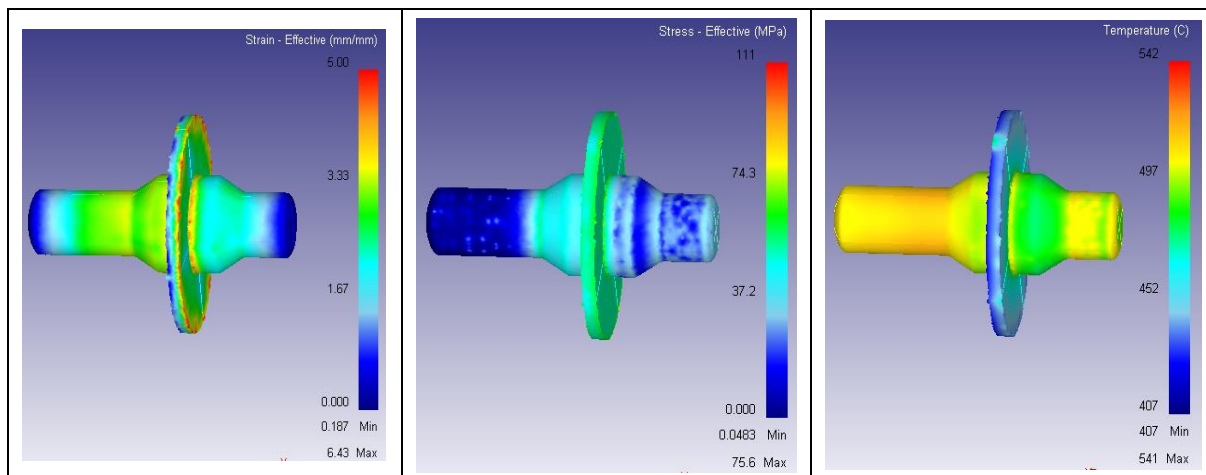


Figur 54 Kombinert ekstrudering $\varnothing 200$

Kraftkurven øker kraftig idet prosessen er ca. halvveis.



Figur 55 Kraftkurve $\varnothing 200$ mm

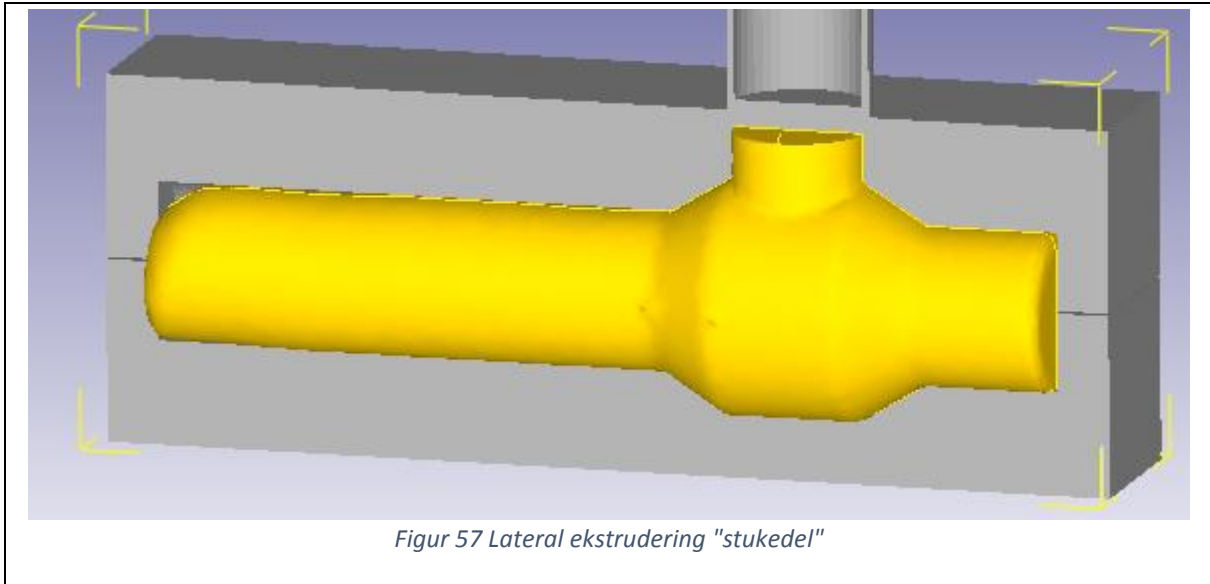


Figur 56 Tøyning, spenning og temperatur for kombinert ekstrudering $\varnothing 200$

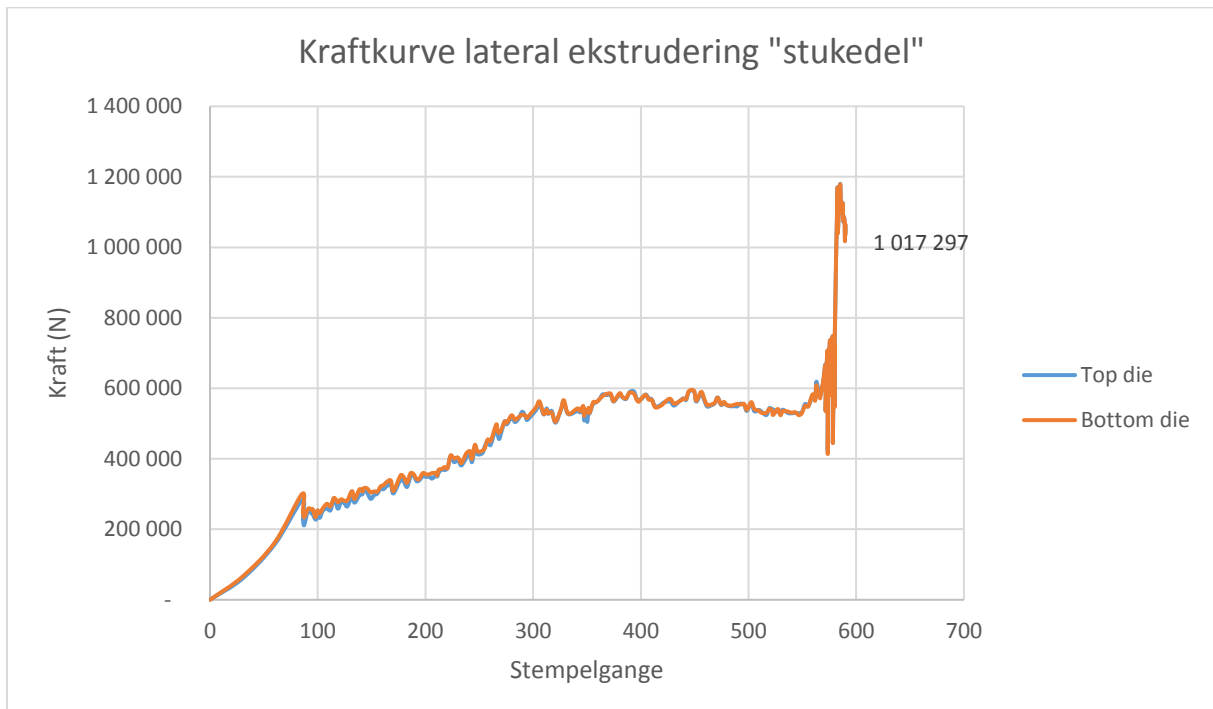
De største spenningene og tøyningene er langs nedre del av den tykke delen, og særlig i området der skjegget dannes. Temperaturen øker også til 542 grader på det meste under prosessen.

5.1.3 Lateral ekstrudering «stukedel»

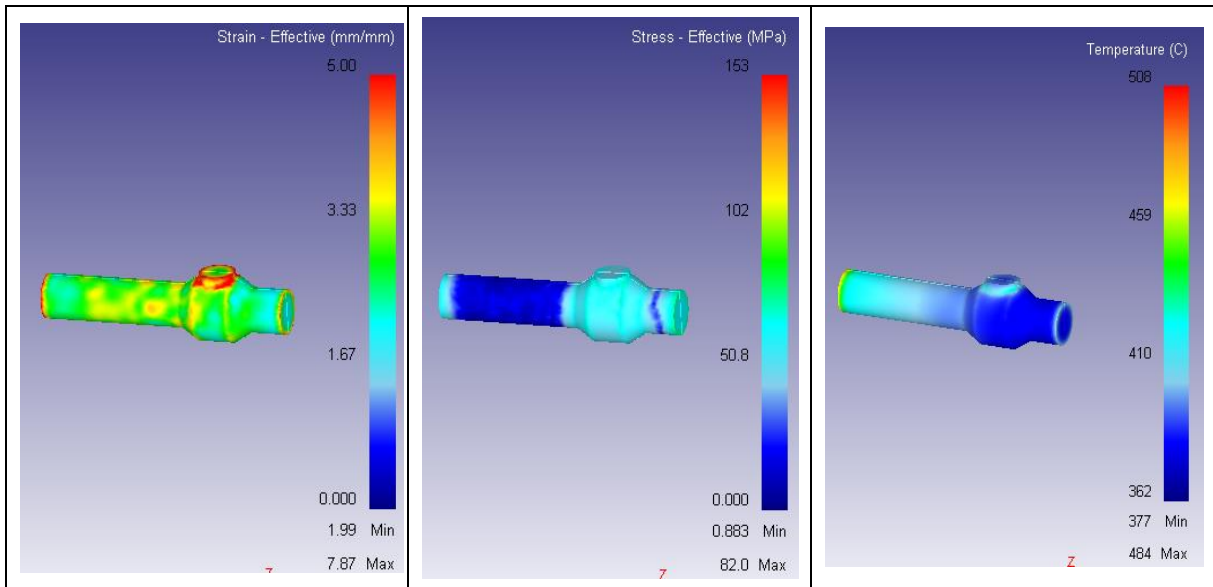
Formen fylles ikke helt opp i den ene enden. Samtidig er ikke alt av emnet presset ned i formen av stempelet. Komponenten viser små tegn til skjeggdannelse langs det tykkeste området. Dette kan ses tydeligere i Figur 60.



Kraftkurven skyter også i været når formen nærmer seg fylt opp. Kraften doubles nesten i de siste stegene av prosessen.

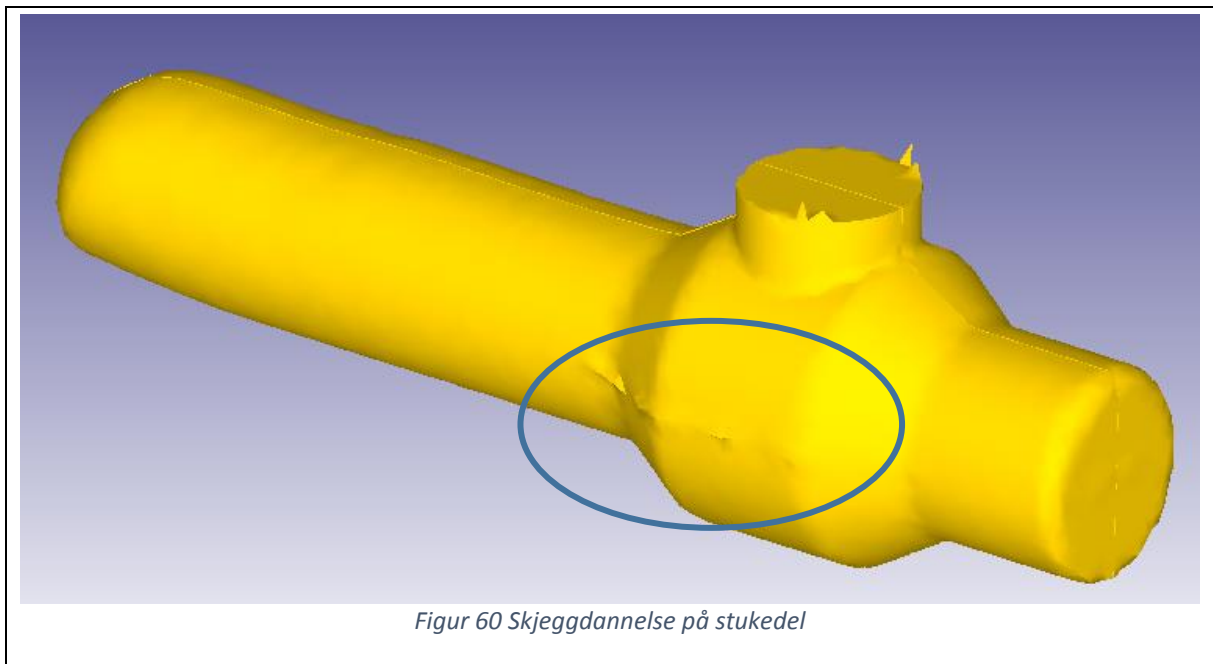


Figur 58 Kraftkurve lateral ekstrudering "stukedel"



Figur 59 Tøyninger, spenninger og temperatur for "stukedel"

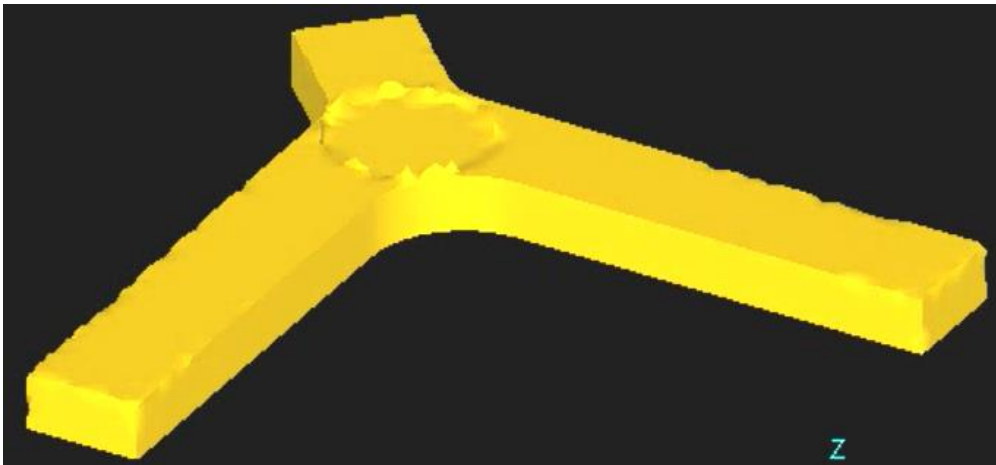
De største spenningene og tøyningene oppstår i tuppene av komponenten, og langs det tykkeste området. Maks temperatur ligger på 508 grader i løpet av prosessen.



Figur 60 Skjeggdannelse på stukedel

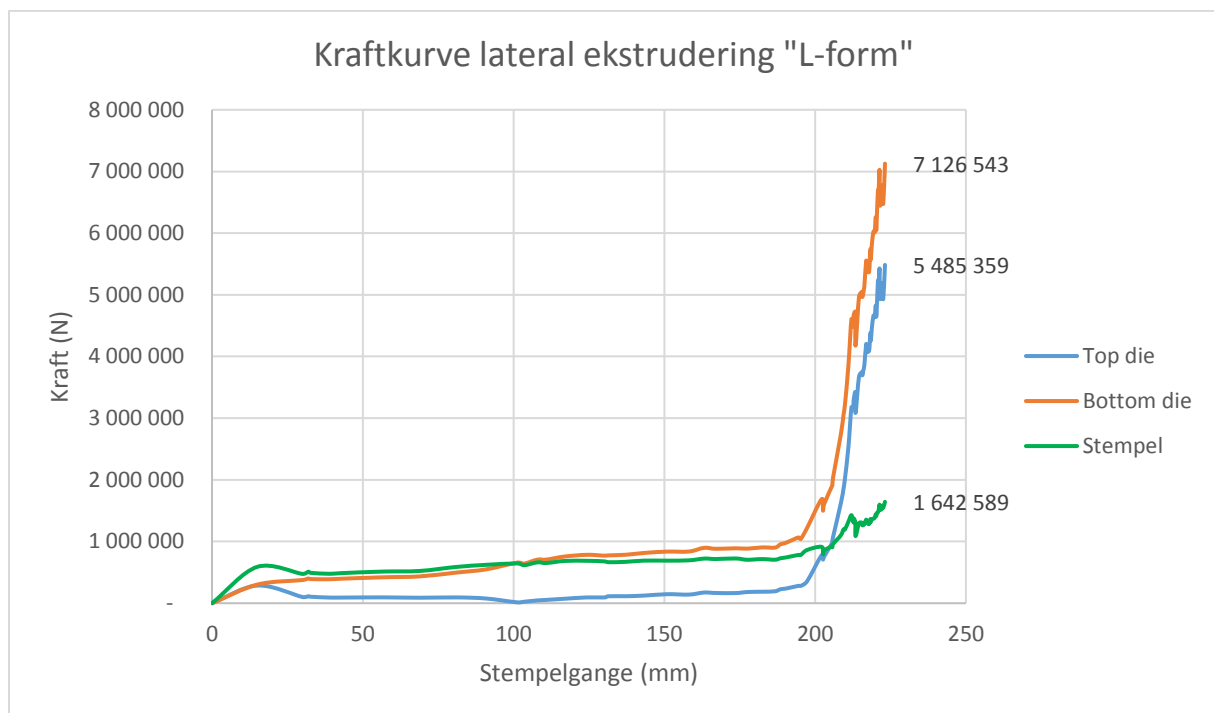
5.1.4 Lateral ekstrudering L-form uten ventilering

Formen fylles helt opp, noe som kan observeres av de flate tuppene på komponenten



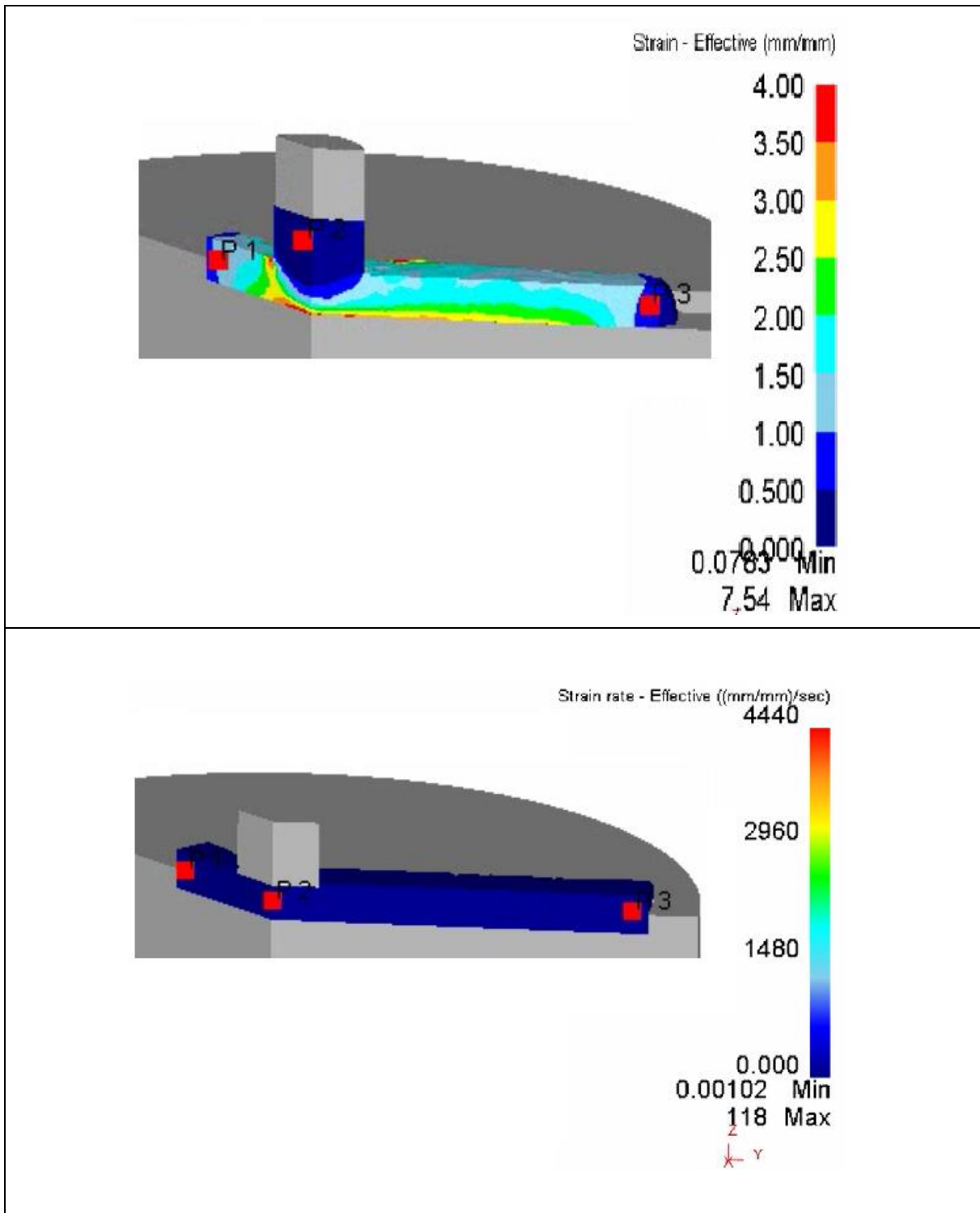
Figur 61 Lateral ekstrudering L-form

Som den forrige metoden øker også her kraftkurven veldig i løpet av den siste fasen av prosessen. Dette skyldes nok at formen er tilnærmet full og at materialet ikke har mer plass.



Figur 62 Kraftkurve lateral ekstrudering "L-form"

Tøyningene er stort sett fordelt over hele delen, med unntak av tuppene. Særlig bunnen av komponenten gjennomgår store tøyninger. Tøyningshastigheten er det vanskelig å si noe på, da skalaen er veldig forskjøvet.

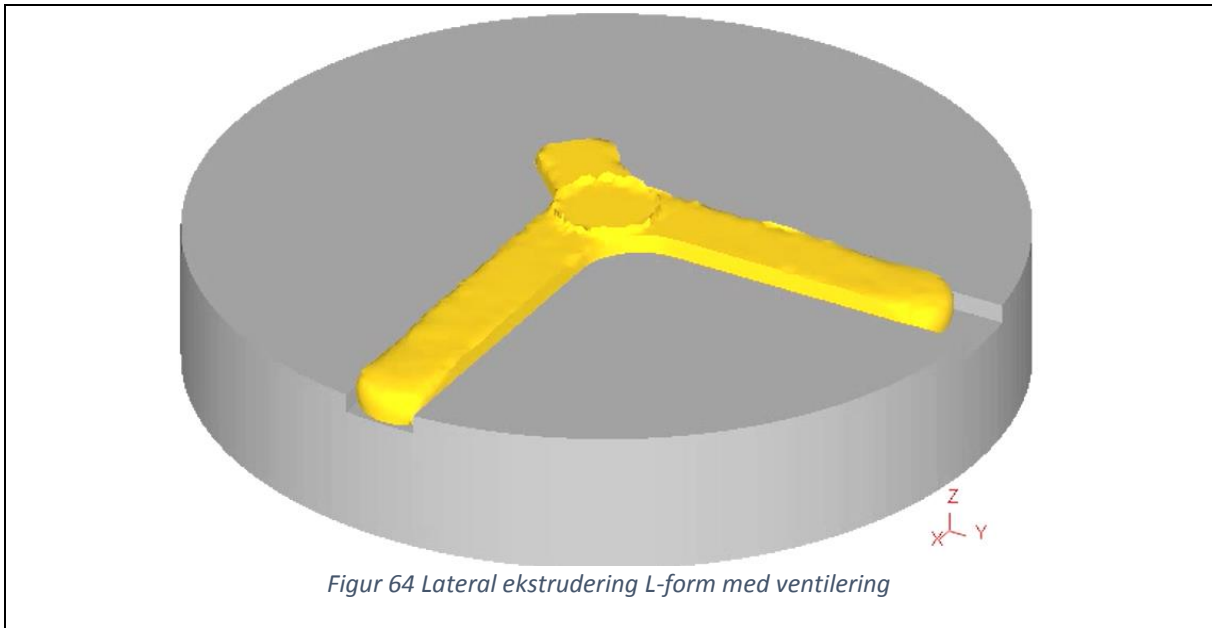


Figur 63 Tøyninger og tøyningshastighet L-form uten ventilering

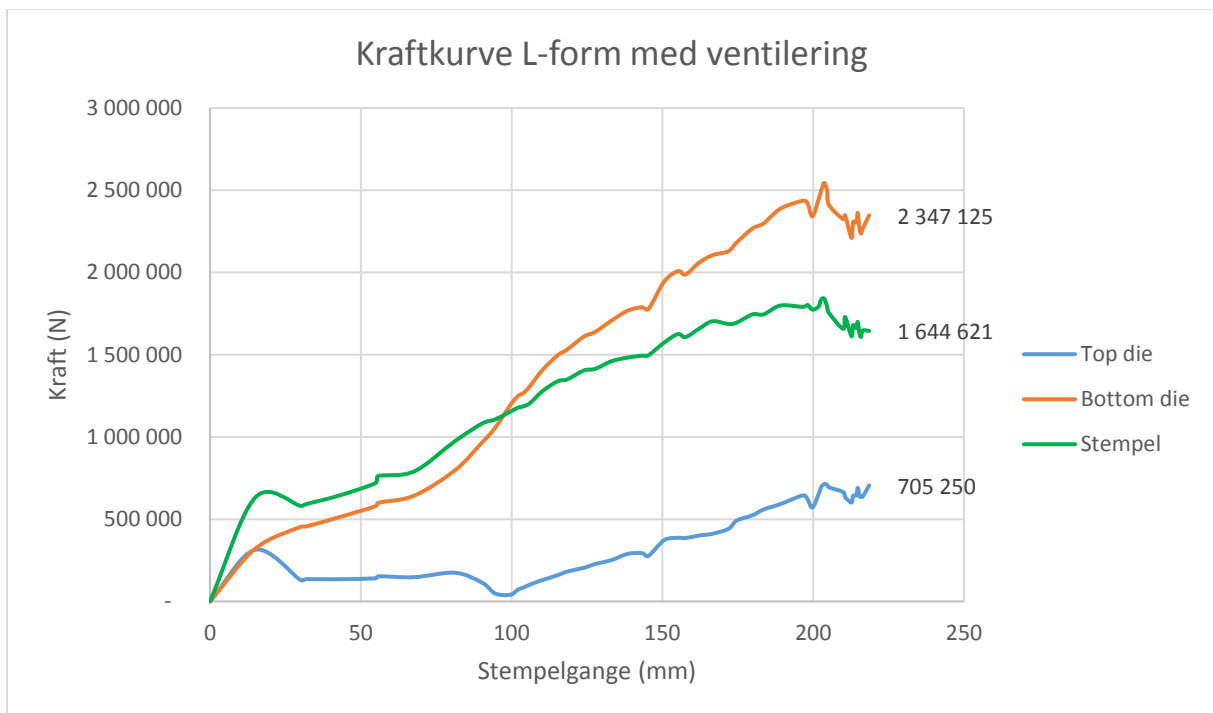
5.2 Simuleringsresultater for valgt løsning

5.2.1 Lateral ekstrudering L-form med ventilering

Formen fylles tilfredsstillende, men med noe ujevn flyt i de to sporene.

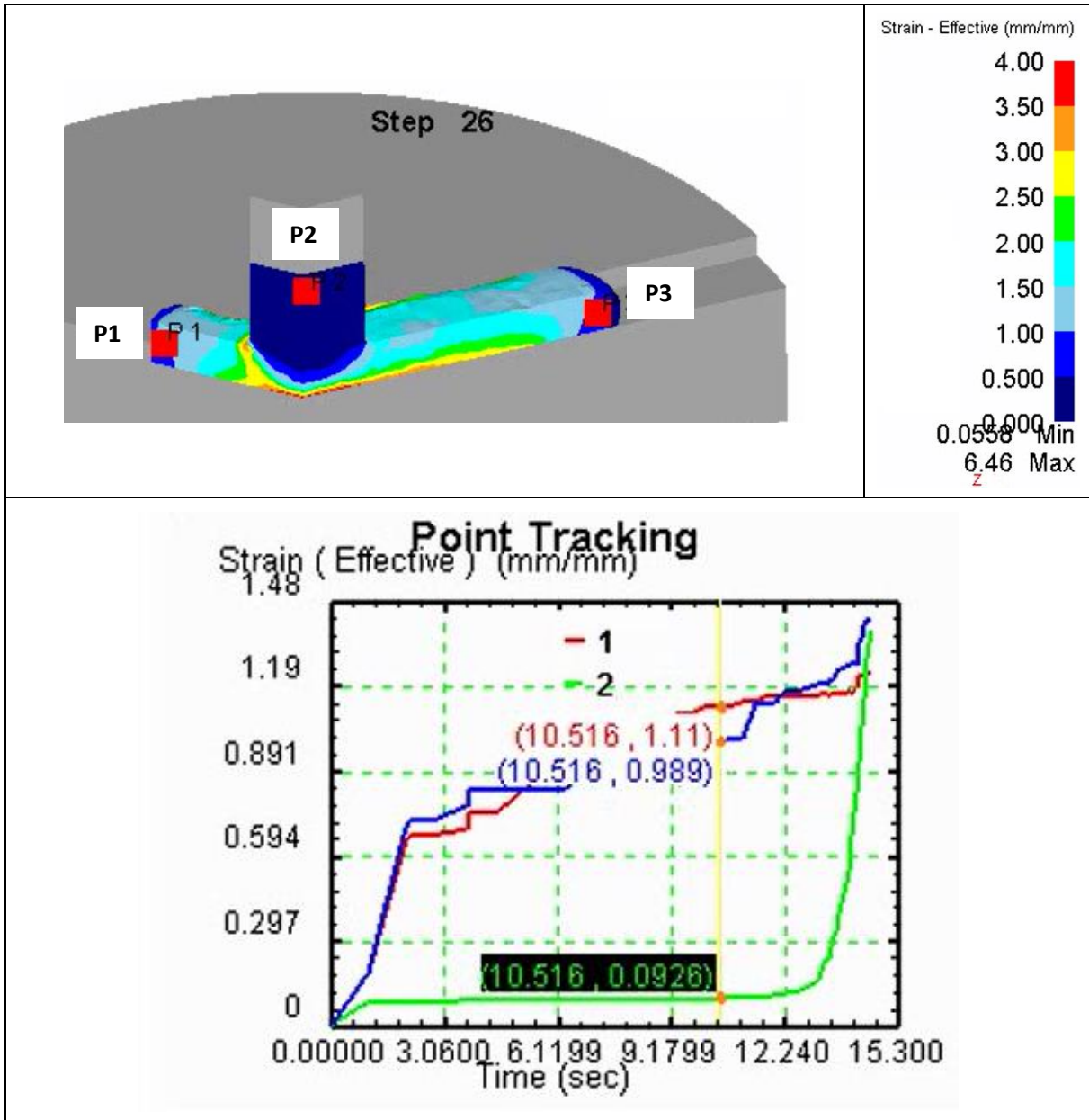


Kraftkurven øker jevnt over hele prosessen, uten særlige «hopp» eller skarpe topper.



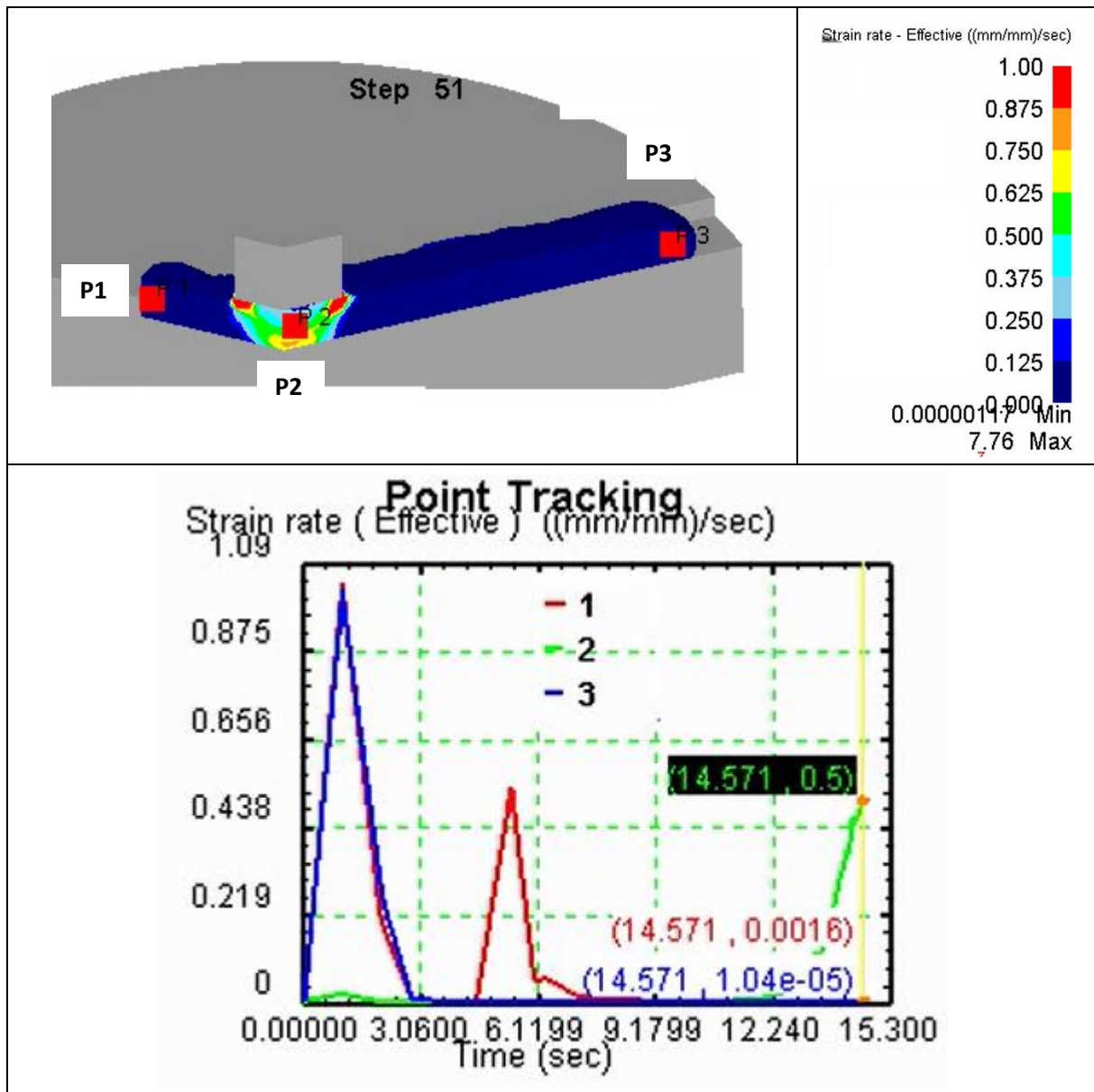
Figur 65 Kraftkurve L-form med ventilering

Det er valgt 3 punkter for overvåking, P1, P2 og P3, fordelt over tuppene og i midten av komponenten. Komponentten er symmetrisk om linjen P1-P3. Med unntak av tuppene gjennomgår hele komponenten større tøyninger, med særlige konsentrasjoner i bunnen der emnet presses ned i formen. Grafen i Figur 66 viser hvordan tøyningene fordeler seg i de tre valgte punktene under prosessen. Man kan også merke seg at prosessen tar ca. 15 sekunder å gjennomføre.



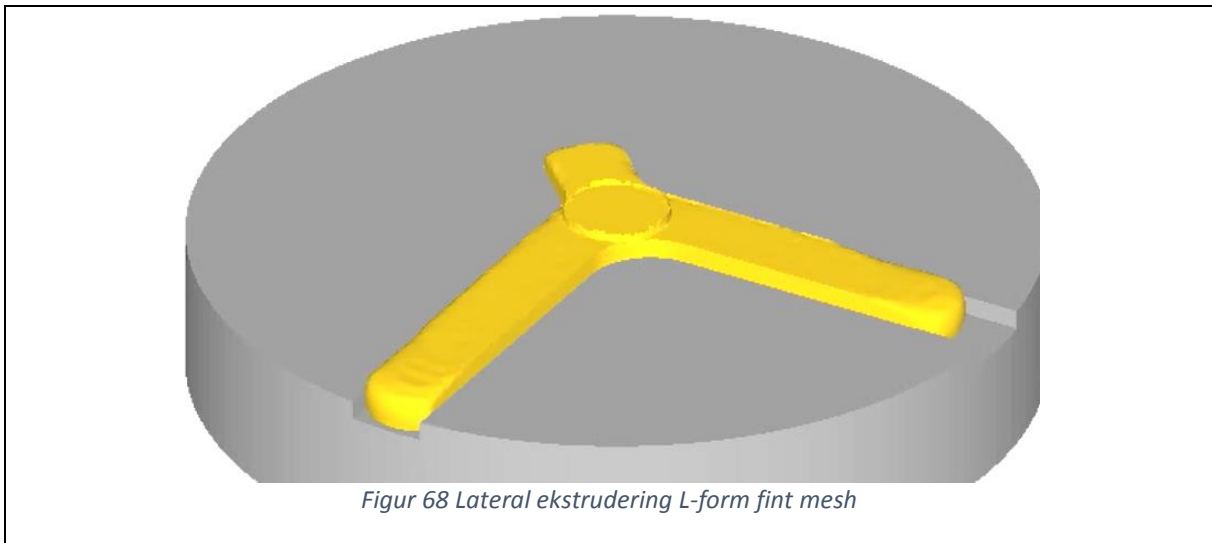
Figur 66 Tøyninger, L-form med ventilering

De største tøyningshastighetene oppstår i overgangen til sporene, med særlig konsentrasjoner rundt kantene inn til sporet.

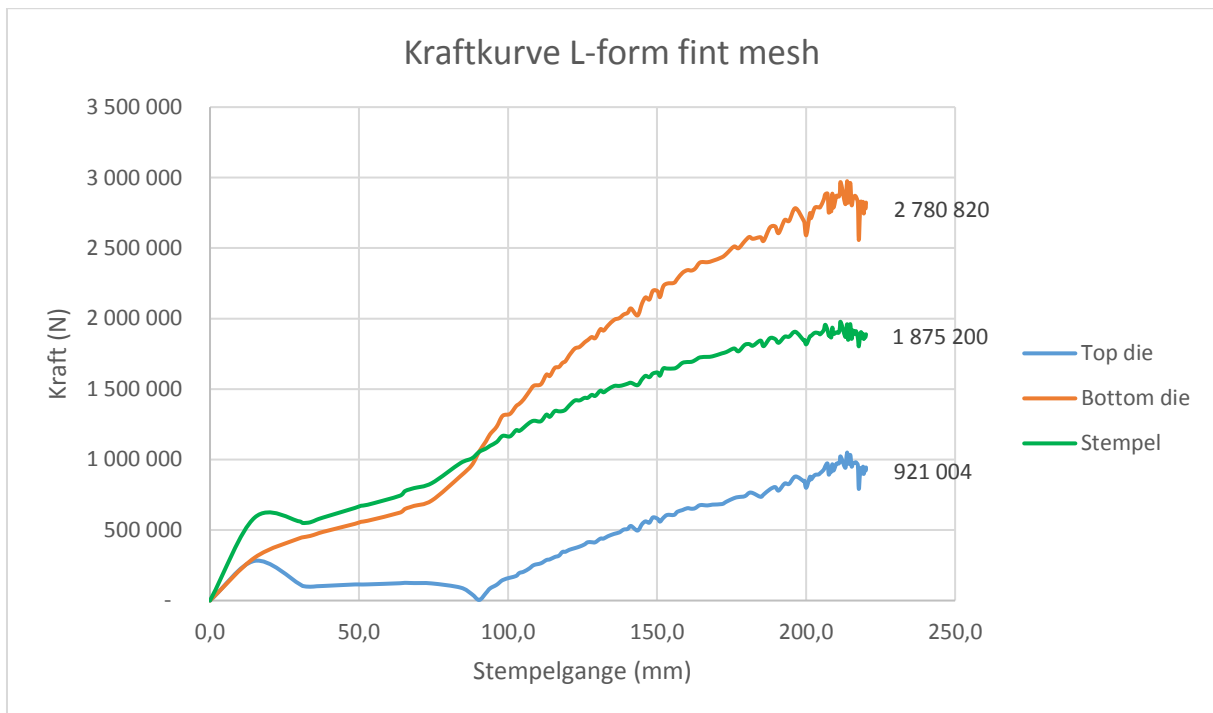


Figur 67 Tøyningshastighet, L-form med ventilering

5.2.2 Lateral ekstrudering L-form fint mesh

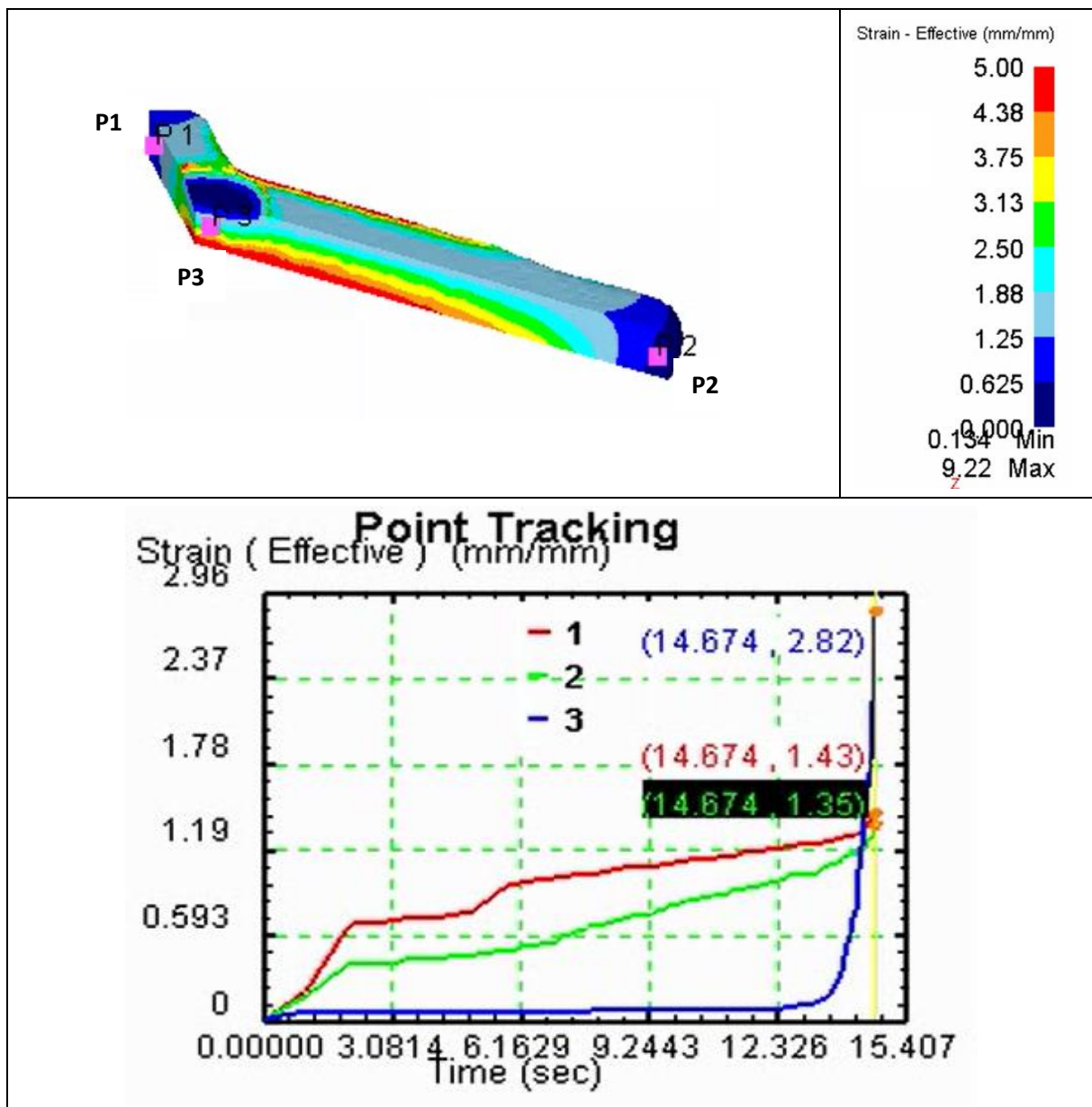


Kraftkurven øker også her jevnt oppover. Merk at kreftene er noe større enn i den forrige simuleringen.



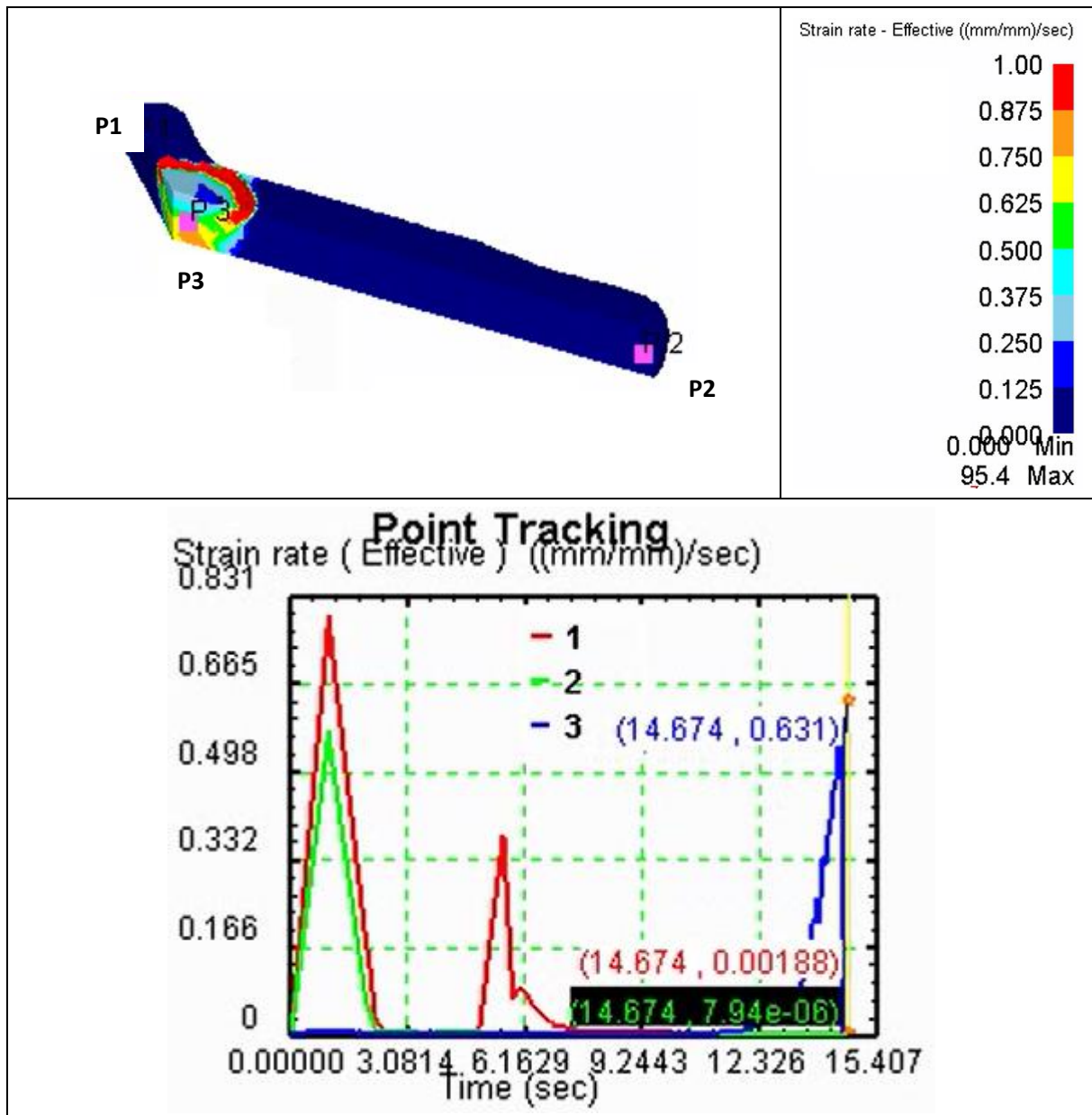
Figur 69 Kraftkurve L-form fint mesh

Det er igjen valgt 3 punkter for overvåking, P1, P2 og P3, fordelt over tuppene og i midten av komponenten. Komponentens symmetri er om linjen P1-P3. Fordelingen av tøyninger er som vist i Figur 70.



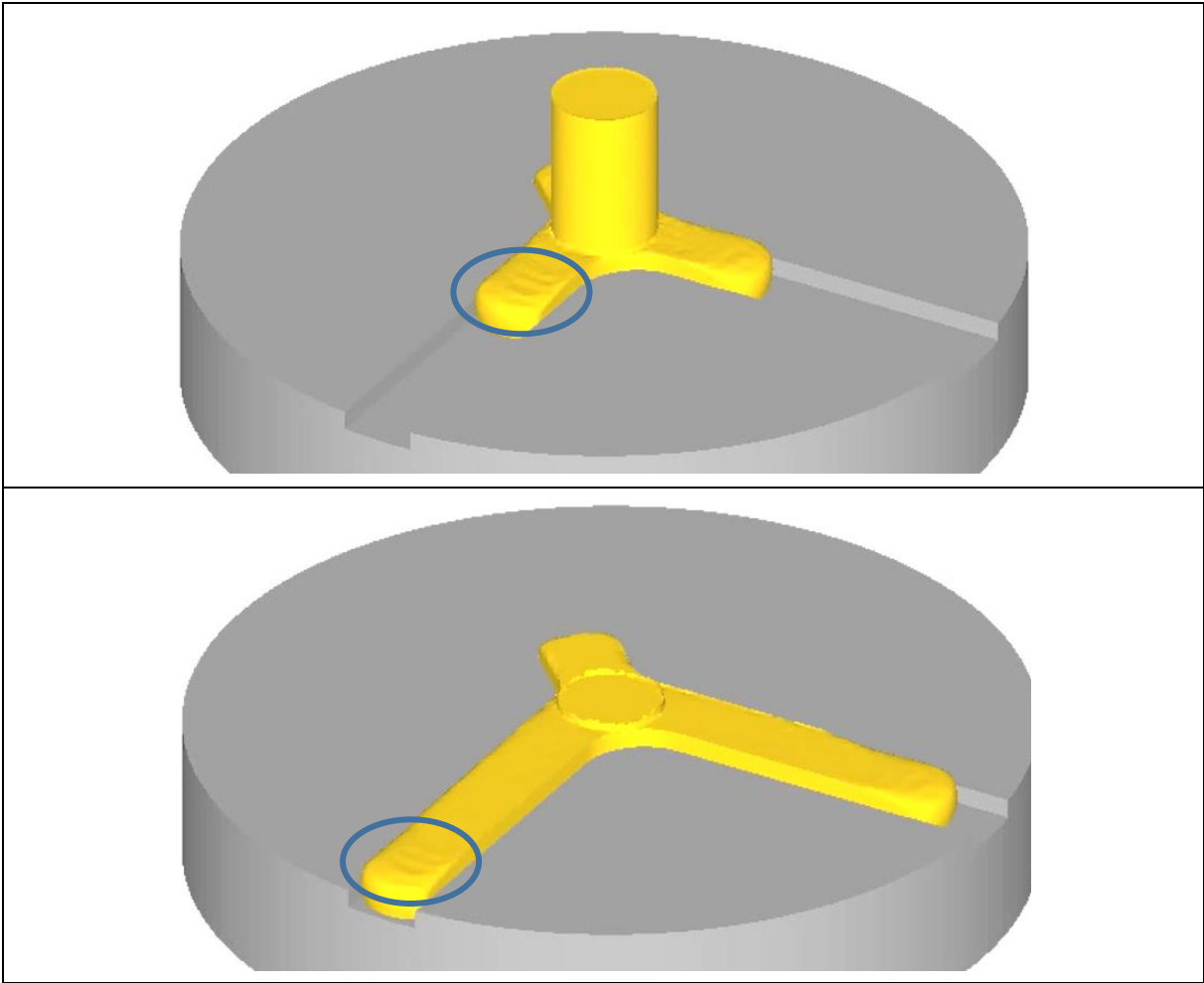
Figur 70 Tøyninger, L-form fint mesh

De samme punktene er valgt for å overvåke tøyningshastighetene i komponenten. Fordelingen av tøyningshastighet er som vist i Figur 71. Igjen ser man at de største tøyningshastighetene skjer i overgangen mellom innmatingshullet og sporet.



Figur 71 Tøyningshastighet, L-form fint mesh

Legg merke til den «rynkede» overflaten som ender opp i tuppene på komponenten.



Figur 72 Overflatedefekt L-form

5.3 Eksperiment

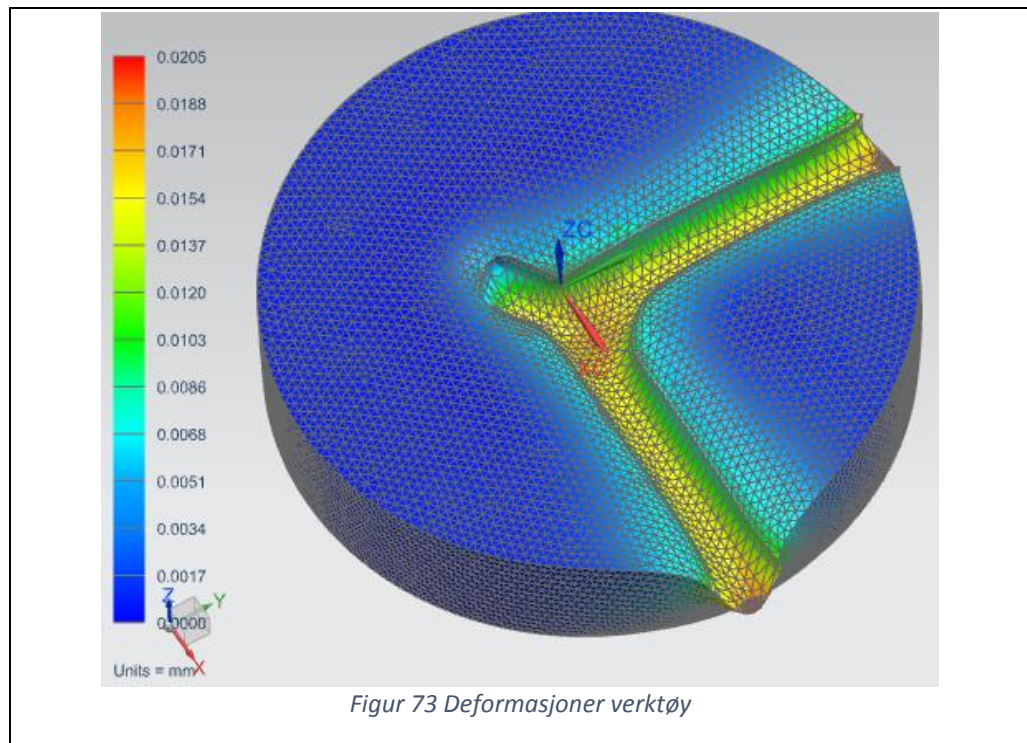
5.3.1 Hardhetstest

Avlest verdi for HRC var 30 for stålet brukt til verktøyet, og 29 for stålet brukt til stempelet.

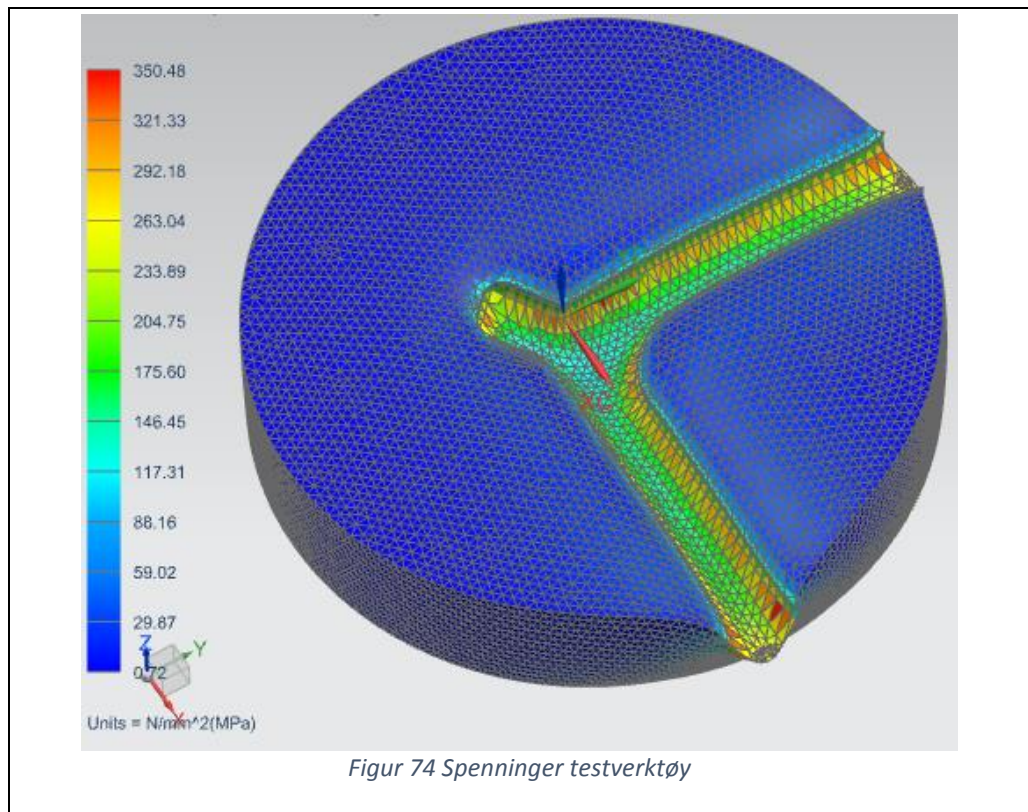
5.3.2 Verktøysimulering

NX

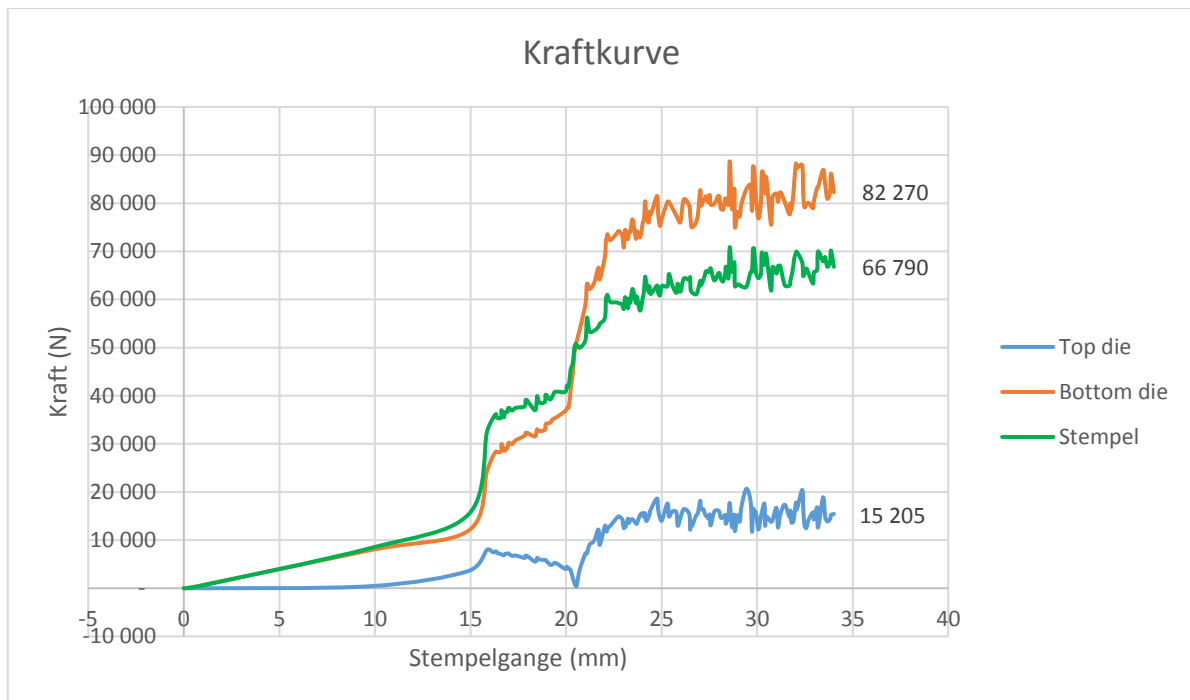
De største deformasjonene ligger på 0,02 mm, og ligger i midten av sporet der emnet presses ned, samt utkanten av sporet. Vær obs på at deformasjonene i Figur 73 er illustrert ganske voldsomt i forhold til den faktiske deformasjonen.



De største spenningene som oppstår er 350,48 MPa, og er fordelt i hjørnene på sporet. Dette skyldes nok kjerneffekt, siden det ikke er noen avrunding i hjørnene på sporet.



Deform



Figur 75 Kraftkurve Verktøy

Simuleringen tilsier at det vil trenes 66,79 kN med kraft for å utføre prosessen. Dette tilsvarer ca. 7 tonn med presskraft. Kraften som oppstår i det nedre verktøyet ligger på ca. 8,4 tonn.

5.3.3 Konsepttest med plastelina

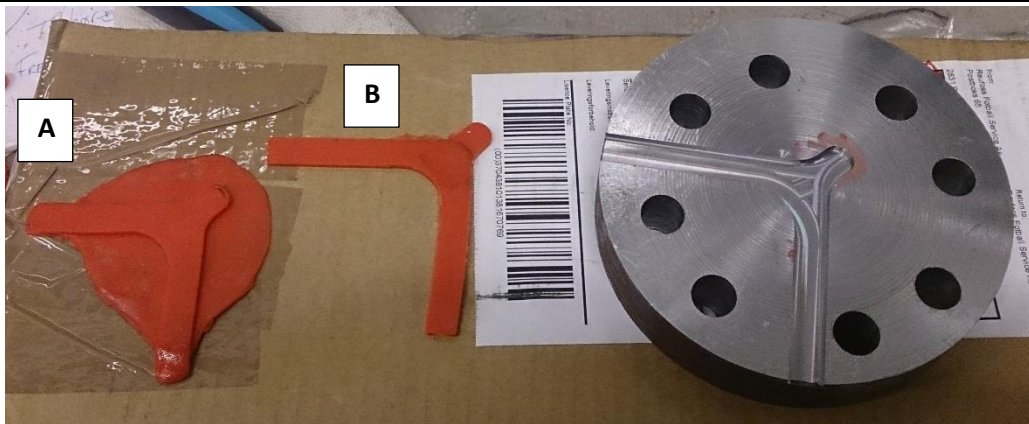
Testen viser god formfylling for plastelina. Likevel er det tegn til at materialet flyter bakover og opp mellom stempel og kontainer (Figur 77). Dette skyldes at toleransen mellom stempel og kontainer er for stor. Potensielt kan dette føre til at verktøyet kiler seg fast, og burde utbedres for å unngå fastkiling av verktøy. Helt til venstre på Figur 78 kan man se resultatet ved lekkasje mellom formene (A), der det har oppstått tydelig skjeggdannelse. Dette skyldtes at verktøyet ikke var skrudd sammen. Komponenten midt på (B) viser resultatet av at verktøyet er skrudd skikkelig sammen, og viser ingen tegn til skjeggdannelse.



Figur 76 Plastelinatest



Figur 77 Plastelinatest, stempel



Figur 78 Plastelinatest, A og B

5.3.4 Test 1

Fikk presset ca. 5 mm før pressen ikke ga mer trykk. Det var begrenset med varme på emne og verktøy, slik at testen egentlig tilsvarer kaldpressing. Emnet viser likevel tegn på at det begynner å flyte ut i formen, som kan ses på den høyre delen av Figur 79 og Figur 80. Hakkene på emnet som vises i Figur 80 er påført etter testing i et forsøk på å løsne emnet fra verktøyet.

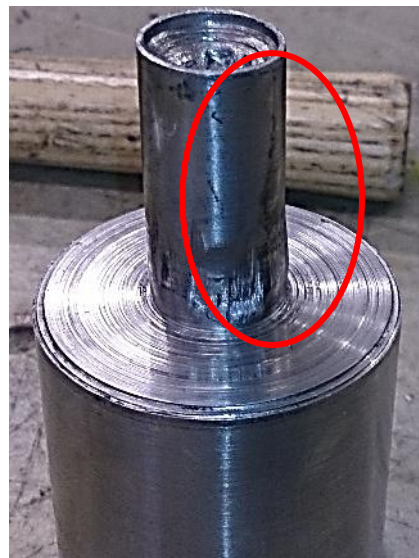


Figur 79 Test 1, emne



Figur 80 Test 1, emne

Stempelet er kilt fast i øvre del av verktøyet. Emnet og deler av stempelet bores opp, og ødelegger strukturen slik at det er vanskelig å si hva som er årsaken til kilingen. Etter at man har fått ut stempelet kan man se flere skader og faktisk bøying av stempeltappen. Øvre verktøy viser også tegn til skader i overgangen til innmatingshullet for emnet. (Figur 82)



Figur 81 Test 1, skader på stempel



Figur 82 Test 1, verktøyskade

5.3.5 Test 2

Emnet har begynt å flyte ut i sporene. Heller ikke i denne testen klarer man å presse stempelet helt gjennom. For øvrig oppnås det bedre flyt enn i test 1. Stempelet ender også her med å kile seg fast i øvre del av verktøyet/kontaineren. Etter separasjon ser man riper og skader på stempelet. Det kan også se ut som at det er en liten skjevhet i kontaineren, noe som tyder på at stempelet blir bøyd under prosessen. Stempeltappen viser også tegn på å ha utvidet seg radielt, noe som tilsvarer staking. Tappen i Figur 87 er restene av emnet som ikke er presset ut.



Figur 83 Test 2, komponent



Figur 84 Test 2, stempeltapp



Figur 85 Test 2, komponent sett ovenfra



Figur 86 Test 2, komponent sett underfra



Figur 87 Test 2, komponent med tapp

5.3.6 Test 3

Emnet flyter tydelig ut i sporene. Som man ser av Figur 88 så flyter materialet bedre i det ene sporet. Stempelet klarer heller ikke her å presse hele veien gjennom, og kiler seg fast. Etter separasjon kan det observeres at stempelet har blitt dekket av aluminium på tuppen, altså at aluminiumet har begynt å flyte bakover mellom stempel og kontainervegg. Det er derfor en liten tapp med overskuddsmateriale som ikke er blitt presset ut i sporet.



Figur 88 Test 3, emne i verktøy



Figur 89 Test 3, stempel

Det kan observeres at restene av emnet har oppnådd en slags koppform etter at det har begynt å flyte opp mellom stempelet og verktøyveggen i innmatingshullet.



Figur 90 Test 3, overskuddsmateriale

Legg merke til noe innsøkk midt på komponenten, som mest sannsynlig skyldes smøremiddel som har blitt liggende i sporet. Dette bekreftes av Figur 92, da man kan se gjenværende smøremiddel i akkurat samme form liggende i sporet.



Figur 91 Test 3, komponent i øvre verktøy



Figur 92 Test 3, nedre verktøy

Komponenten måtte sages av for å få løsnet den fra verktøyet. Komponenten har derfor fått noen skader fra metoden som er brukt for å løsne delen. Legg merke til det rynkede mønsteret på tuppene av komponenten vist i Figur 93.



Figur 93 Test 3, underside av komponent

Oversiden av komponenten viser også skader fra forsøket på å løsne delen. Tuppene har relativt god overflatekvalitet. Tuppene på hver «vinge» har riper som går aksielt, med tverrgående riper lengre inn. De tverrgående ripene er konsentriske, og ser ut til å være deler av et ringmønster. Det markerte området i Figur 94 er skader påført ved at komponenten måtte sages løs fra verktøyet. De aksielle linjene kan sees bedre i Figur 95.



Figur 94 Test 3, overside av komponent



Figur 95 Test 3, overside av komponent 2

Figur 96 viser formen på tuppene til den formede komponenten. Formen tilsier at friksjonen er høyere på oversiden, siden tuppen får denne buede formen.



Figur 96 Test 3, tupp av komponent

Den lengste «vingen» er på ca. 44 mm, altså 6 mm unna de ordinære målene.



Figur 97 Test 3, mål for komponent

Den korteste «vingen» ligger på ca. 35 mm, og er derfor 15 mm unna de ordinære målene.



Figur 98 Test 3, mål for komponent

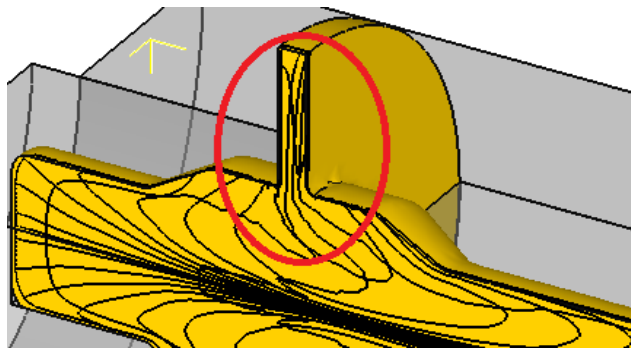
6. Drøfting og diskusjon av resultater

Dette kapittelet vil ta for seg diskusjonen av resultatene fra kapittel 5 med hensyn til teori, antagelser og forventede resultater.

6.1 Simuleringsresultater

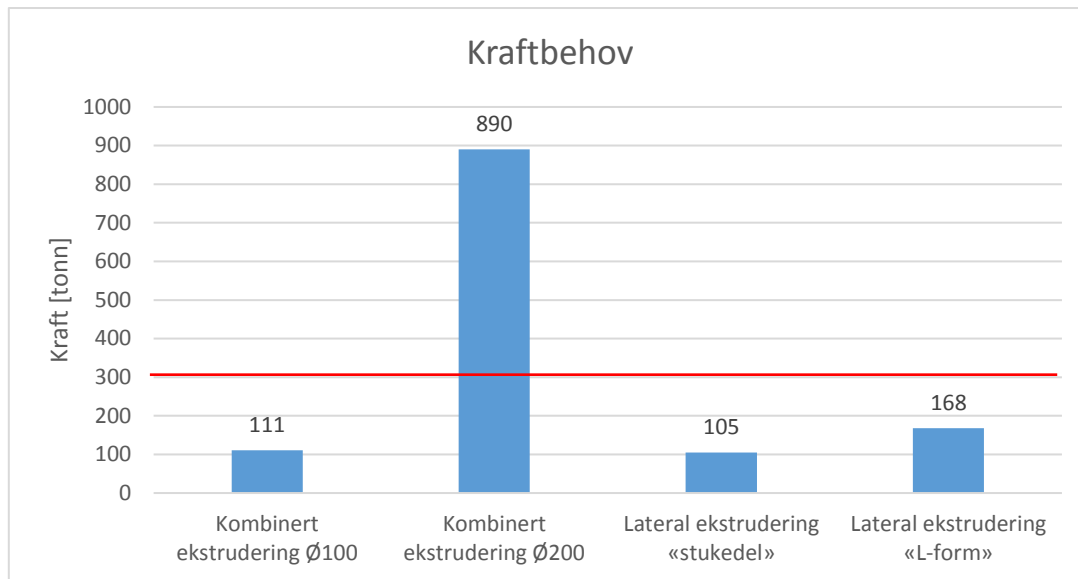
6.1.1 Innledende simuleringer

Begge variantene av kombinert ekstrudering viser tegn på skjeggdannelse. I tillegg er ikke formfyllingen optimal for noen av dem. Skjeggdannelsen, med kornorienteringen i disse områdene, samt kraftbehovet for Ø200-varianten ekskluderer disse metodene for videre testing. Kraftbehovet for sistnevnte er over dobbelt så mye som kravet for en ny formeprosess. Fordelingen av kraftbehov kan ses i Figur 100. Selv om skjegget fjernes vil kornorienteringen i dette området stå nesten vinkelrett på resten av kornretningen (Figur 99). Dette resulterer i anisotropiske svakheter i den ferdigformede delen, som kan gi katastrofale følger hvis de ender opp i utsatte områder for den ferdige bærearman (Avsnitt 2.3).



Figur 99 Kornorientering kombinert ekstrudering

For den laterale «stuke»-delen fylles ikke formen helt ut. Dette kan sees på tuppen i Figur 57. Kraftbehovet for prosessen er innenfor kravet, og er blant de laveste av de innledende testene. Likevel må lengden på utgangsemnet være veldig lang for å kunne passe i verktøyet, slik at stempelgangen blir relativt lang. Dette er nevnt i oppgaveteksten som en risiko for at stempellet skades eller knekker under formeprosessen. Metoden ekskluderes derfor fra egnede metoder.



Figur 100 Kraftbehov innledende metoder

Den laterale L-formen er den metoden som fyller formen best, samtidig som den har lite skjeggdannelse. Av kraftkurven i Figur 62 kan man se kraften i verktøyene skyter i været mot slutten av prosessen. Dette skyldes at emnet ikke har mer plass å flyte ut på, og derfor utøver veldig store krefter på verktøyet. Selve stempelkraften nødvendig for å utføre prosessen er innenfor kravet. Resultatene indikerer at den laterale L-formen er den mest egnede metoden av de innledende forsøkene, og velges derfor for videre testing. Det velges likevel å åpne ventilasjonskanaler i verktøyet, slik at man unngår den store belastningen på verktøyet. Det kan diskuteres om lengden på utgangsemnet er i lengste laget i forhold til stempelgange og knekking av stempel, men dette kan potensielt løses ved å lage et forkammer i verktøyet som reduserer diameteren på utgangsemnet før det flyter ned i formen. Dette er det likevel ikke beregnet for i videre testing grunnet tidsbegrensninger i forhold til å konstruere et nytt verktøy.

6.1.2 Simuleringer for valgt løsning

Sammenlignet med L-formen uten ventilering ser man at verktøybelastningene er nesten en tredjedel for varianten med ventilering. Resultatene støtter altså opp om avgjørelsen om å inkludere ventilasjonskanalene. Som det kan leses av på grafen i Figur 65, ligger maks kraft for stempelet rundt 168 tonn, noe som altså er innenfor benchmark-kravet.

Som forventet er det noe avvik i resultatene mellom vanlig mesh-størrelse og det fine meshet. Kraftbehovet øker til 193 tonn, som tilsvarer en økning på 25 tonn. Resultatene er likevel i samme størrelsesorden, og kraftbehovet er fortsatt innenfor kravet. Det kan derfor antas at resultatene er relativt mesh-uavhengig, slik at man kan anta at verdiene er tilnærmet riktige.

Hvis man sammenligner resultatene for tøyning og tøyningshastighet fra avsnitt 5.2 opp mot Figur 19, virker det sannsynlig at emnet gjennomgår en betydelig grad av rekrySTALLISERING. Selv om studien er utført på AA7075-legering, så antas

det at kravene for rekrytallisering også tilnærmet gjelder for AA6082. Det virker derfor fornuftig at det vil være mulig å bruke støpte utgangsemner, siden metallstrukturen omdannes i så stor grad. Testing på bruk av støpte utgangsemner må selvsagt gjennomføres før man kan si dette sikkert.

6.1.3 Verktøysimuleringer

NX-resultatene i avsnitt 5.3.2 bekrefter at man burde unngå lukkede former inni verktøyet. Ved å inkludere ventilasjonskanaler sikrer man at materialet kan flyte fritt, slik at det ikke dannes hydrostatisk trykk inni verktøyet. Simuleringen viser små deformasjoner i vertikal akse, altså at sporet trykkes ned i verktøyet, og at verktøyet begynner å flyte utover mot sidene. De største deformasjonene opptrer som oftest i hjørnene på sporet, og skyldes nok kjerveffekt. Til tross for at disse deformasjonene er minimale, så kan de være utslagsgivende hvis kravet til toleranser på den forformede komponenten er veldig strenge. Det er uvisst hvor lenge verktøyet kan brukes hvis deformasjonene er 0,01 mm for hver formeoperasjon.

I tillegg kan det oppstå negativ slippvinkel (Avsnitt 3.1) ved at deformasjonene er størst i hjørnene, og slik låse emnet fast i verktøyet. Det burde derfor implementeres slippvinkler i verktøyet for å unngå dette. Det må likevel nevnes at belastningene er noe overdimensjonerte i forhold til verktøydimensjonene, slik at deformasjonene ikke nødvendigvis inntreffer uansett.

Resultatene fra Deform-simuleringene i avsnitt 5.3.2 tilsier at det trengs rundt 7 tonn med kraft for å kunne gjennomføre prosessen. Dette betyr at man skal, hvert fall i teorien, ha mer enn nok kraft tilgjengelig i pressa. Dette er basert på pressa har en kapasitet på 60 tonn (avsnitt 4.4.2).

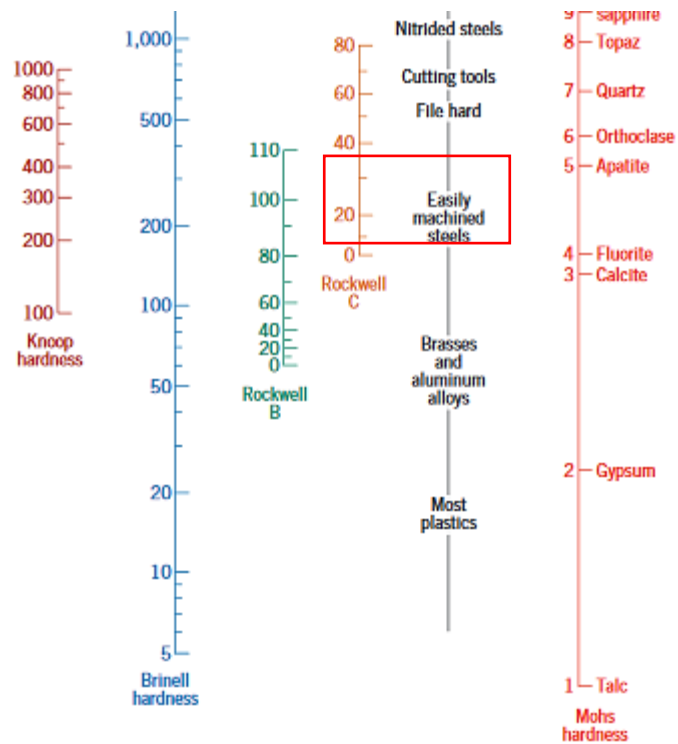
6.2 Konsepttest med plastelina

Plastelinatesten viser at konseptet fungerer ved at plastelinaen fordeler seg fint i sporet uten særlig skjeggdannelse. Bakoverflyten vist i Figur 77 skyldes dårlige toleranser på maskineringen. Lekkasjen som oppsto på første test skyldes at verktøyet ikke var skrudd sammen, i den tro at plastelinaen er såpass myk at det ikke ville klare å bevege verktøyet. Overraskende nok klarte plastelinaen å separere de to verktøydelenene, og er en god indikator på hvilke krefter som oppstår under prosessen. Testen viser ingen tegn på overflatedefekter som er vist i Figur 72.

6.3 Eksperiment

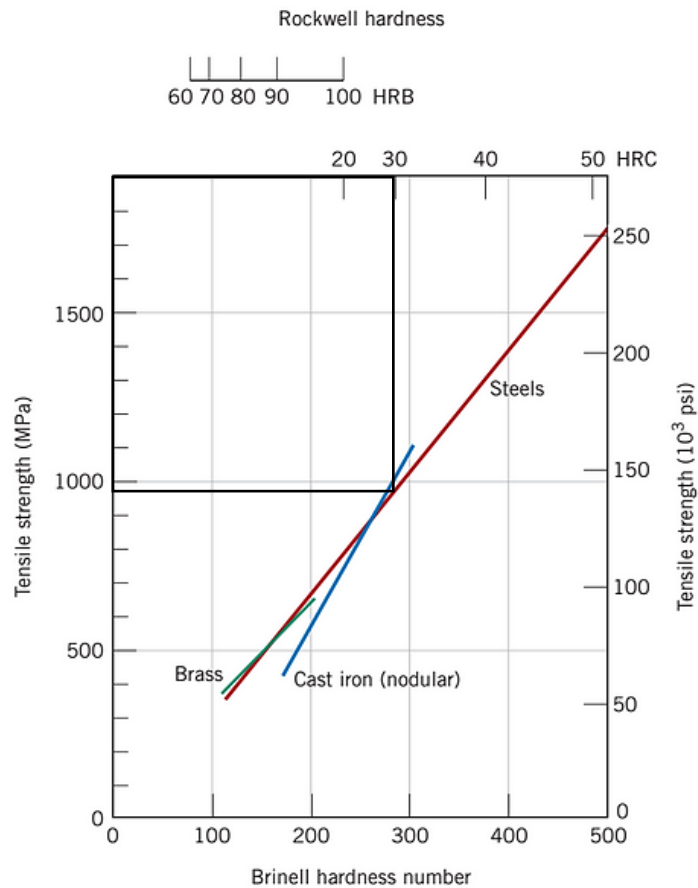
6.3.1 Hardhetstest

Resultatene fra hardhetstesten tyder på at stålet som er brukt er et veldig mykt konstruksjonsstål. Faktisk er verdien, oppgitt i avsnitt 5.3.1, under halvparten av det typisk Orvar-stål ligger på. Figur 101 som er hentet fra boka Materials Science and Engineering [43] har følgende oversikt mellom hardhet og type stål. Ifølge figuren tilsvarer hardheten et lavlegert stål, noe som stemmer godt med antagelsen fra testingen.



Figur 101 Hardhetsskalaer [43]

I tillegg viser Figur 102 sammenheng mellom hardhet og flytegrense for stålet. Slik kan man anslå flytespenningen til stålet, og gjøre en vurdering på om stålet vil tåle påkjenningene under eksperimentet. Figuren er hentet fra samme bok som figuren over.



Figur 102 Hardhet og flytegrense [43]

Verdien som avleses på figuren tilsvare ca. 980 MPa. Litteratur funnet på nett [44] [45] bekrefter verdiene og tilsier at HRC 30 tilsvare ca. 970 - 980 MPa i flyt for stålet. Det må likevel settes spørsmål ved flytegrensen for stålet ved 500°C, da man ikke vet hva slags legering stålet er.

Selv om stålet som er brukt ikke er et typisk verktøystål som vanligvis brukes til varmforming, så kan det fungere til testingen. Studier utført på varmforming med diverse industristål tilsier at generelt konstruksjonsstål ala det brukt i denne oppgaven ikke vil miste tilstrekkelig med styrke under varmforming til at det skulle deformeres i særlig grad under testen. [46] [47].

6.3.2 Test 1

Forsøket med å «brute-force» eksperimentet var ikke særlig vellykket. Begrenset med tid gjorde at testen ble utført som tilnærmet kaldforming for å se om prosessen må utføres som varmforming. Kombinasjonen av mykt stål, samt en relativt sterk aluminiumslegering resulterer i at emnet ikke formes særlig før stempelet stukes ut og kiler seg fast i det øvre verktøyet. Effekten av usmurte overflater bidrar nok også til mye friksjon som bidrar til at flyten er begrenset. Emnet viser likevel tendenser til å ta form etter sporet i det nedre verktøyet, noe som er lovende, testens oppsett tatt i betraktning.

6.3.3 Test 2

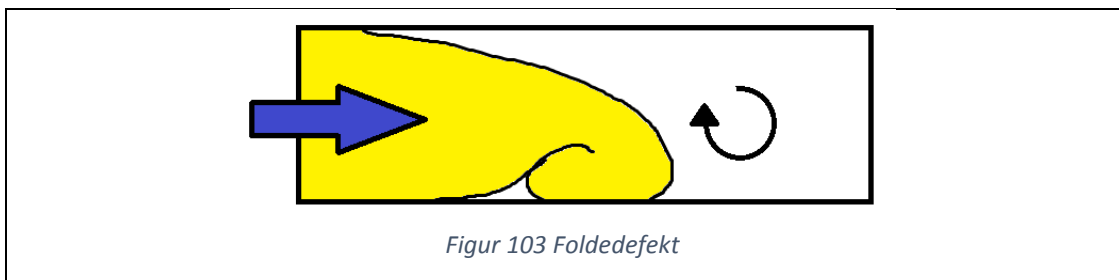
Antagelsen fra Test 1 om at stålet er mykt blir bekreftet da stampelet stukes ut og kiler seg fast i det øvre verktøyet under testen (Avsnitt 5.3.1). Redusert flyt skyldes flere årsaker; kjøling av emne fra verktøy øker flytegrensen, redusert dybde i sporet (2,5 mm i stedet for 5 mm) skaper ekstra motstand, og at det er uvisst hvor godt smøremiddelet faktisk fungerer. Likevel ser man tydelig at materialet flyter ut i sporet i ønsket form, uten tegn til skjeggdannelse eller lekkasje. Mønsteret på undersiden av komponenten, som er vist i Figur 86, er ikke helt optimalt, da det rynkete mønsteret gir svært dårlig overflatekvalitet. Det er usikkert hva dette fenomenet faktisk er, og hva som forårsaker det, men det kan skyldes at formbarheten er redusert på grunn av at emnet blir såpass nedkjølt av verktøyet. En annen grunn kan være at det er dannet sprekker på grunn av manglende duktilitet. Dette er likevel mer en typisk defekt for strekking, og ikke trykk.

Tappen som stikker opp av komponenten i Figur 87 er, som nevnt i avsnitt 5.3.5, restene av emnet som ikke er presset ut. Eventuelle rester i en industriell setting må skjæres bort før komponenten kan sendes videre til smiing.

6.3.4 Test 3

Som vist i resultatene i avsnitt 5.3.6 er den ene «vingen» kortere enn den andre. Dette kan skyldes flere faktorer, men det antas at det enten er ujevn påføring av smøremidler, eller geometriske forskjeller i sporet. Sporet er frest ut med CNC-maskin, og anses for å være temmelig nøyaktig, slik at det mest sannsynlig er høyere friksjon i det ene sporet. Sammenlignet med simuleringresultatene i avsnitt 5.2.2, der 3D-modellen er utgangspunktet for CNC-maskineringen, så kan en forskjell i flyt også skyldes at emnet ikke treffer helt i senter mellom de to sporene. Igjen er det for dårlig toleranse mellom stempel og kontainervegg, slik at emnet har mulighet til å flyte bakover.

Komponenten viser samsvar med simuleringresultatene i avsnitt 5.2.2 (Figur 72) og får et rynkete mønster ytterst i tuppene. Forskjellen er at dette oppstår på oversiden av komponenten i simuleringen, og ikke på undersiden. Helt hva som er årsaken til dette er usikkert. Dette kan være folding, og at tuppen til komponenten «ruller som en bølge» bortover sporet, forsøkt illustrert i Figur 103. Figuren forestiller materialet i gult, som flyter i retningen av den blå pilen, og som begynner folde inn i seg selv.

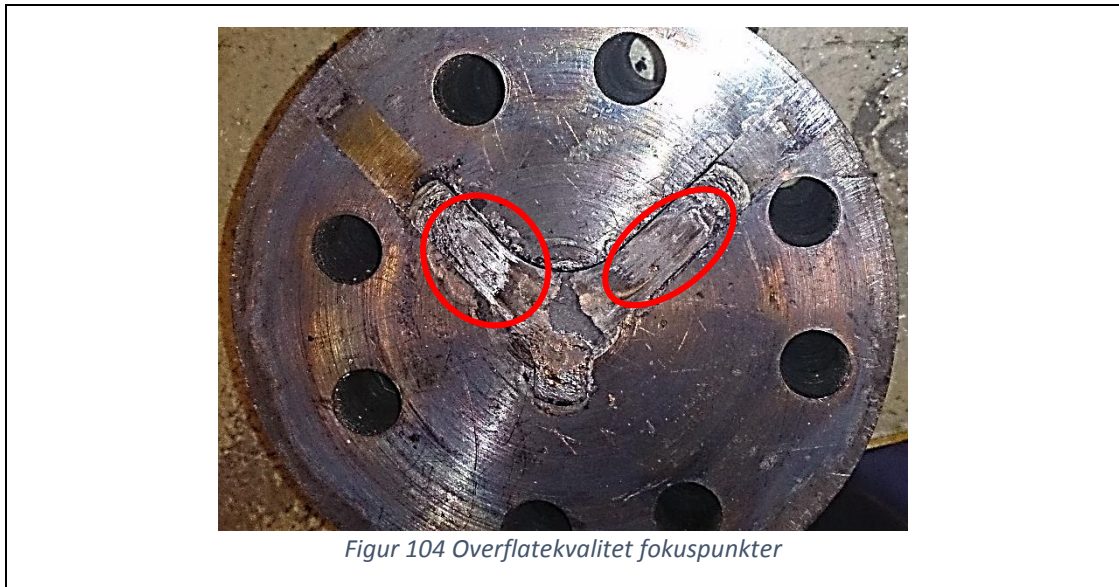


Folding skyldes i så fall dårlig materialflyt, som igjen skyldes mye friksjon i sporet. Likevel vises ikke denne defekten på andre siden, der overflaten ikke er smurt, og man

skulle forvente høyere friksjon. Mistanken om høyere friksjon på oversiden styrkes av Figur 96.

En annen mulighet er at tuppen gjennomgår en annen deformasjonszone enn resten, og så bare skyves videre av etterfølgende materiale. Dette styrkes av at maskineringsmerkene til utgangsemnet kan kjennes på tuppen til komponenten. Det samme kan observeres på komponenten fra test 2. Dette motsier i så fall at defekten er folding, altså avkrefte det at materialet «ruller» langs sporet.

Delen viser likevel overraskende fin og glatt overflate midt på sporet. Dette er markert med røde ringer i Figur 104.



Av Figur 49 ser man helt klart ujevnheter og porer i smøremiddelet. Det er fornuftig å anta at friksjonen er svært ujevn i sporet på grunn av dette. Smøremiddelet er påført med pipette, og delvis smurt utover sporet, noe som forårsaker nettopp dette ujevne mønsteret. For en industriell prosess vil dette automatiseres, og ved hjelp av dyser og trykkluft vil man kunne oppnå et mye jevnere lag med smøremiddel.

Sammenlignet med test 1 og test 2 så ser man virkelig fordelene med å varme opp emne og verktøy til 500°C, siden resultatet er såpass mye bedre. Skikkelige forberedelser og prosstemperatur er utslagsgivende for å oppnå gode testresultater.

Det må tas forbehold om at en fullskala-test må utføres for å si noe sikkert om den nye metoden. Det må også påberegnes en påfølgende prosess etterpå for å slipe bort skarpe kanter eller restmateriale på delen før den smis. Tester må altså utføres for å se hvorvidt den forformede delen er egnet til smiing.

6.4 Refleksjon av metode og feilkilder

Avsnittet tar for seg hva som kunne vært gjort annerledes, hva man sitter igjen med av erfaringer, samt feilkilder.

6.4.1 Refleksjon over metode

Lengre tilgang til simuleringsprogram hadde nok utgjort en stor forskjell på kvaliteten for denne oppgaven. Siden undertegnede har liten erfaring med programmet og alle tilgjengelige parametere og muligheter, ble en del av lisenstiden brukt til prøving og feiling og bare det å sette seg inn i programvaren. Med de kunnskapene undertegnede har nå, så kunne nok lisensperioden vært brukt mer effektivt.

I forhold til maskinering så burde maskineringsprosessen vært snudd på hodet. I første omgang kunne man prøvd å få skaffet et mer egnet stål å lage verktøy av. Det hadde også vært fordelaktig å frese ut sporet i verktøyet først, slik at man slipper høypresisjon ved innspenning av de to verktøydelenes for å sikre at de overlapper korrekt. Ved maskineringen av verktøyet ble sporet frest ut helt til slutt, uten å notere seg vinkel og lignende i innspenningen, slik at bare en grads forskjell ville gjort at sporene ikke overlappet, og verktøyet hadde vært ubrukelig. Det ble derfor valgt å ikke frese ut et spor i det øvre verktøyet. I tillegg burde nok begge hullene for emnet og stempelet i det øvre verktøyet vært boret ut i dreiebenk, framfor en borebenk, da sistnevnte metode kan ha gitt en uønsket skjevhet i verktøyet. Ved bruk av dreiebenk hadde man hvert fall sikret at hullet var i senter, og at det var uten skjevhet.

Testrelatert, så kunne nok forberedelsene vært bedre. Også her ble man nødt til å erfare hva som faktisk må være på plass, og hvor mye lengre tid ting tar enn man kanskje tror i utgangspunktet. Aluminium leder varme svært godt, og uten mulighet til å måle temperaturen raskt og nøyaktig, så ble det heller prioritert å kjøre testene så fort som mulig, før emnet ble nedkjølt mer enn nødvendig. En av de største feilkildene ligger nettopp her, da det er vanskelig å si hva den faktiske temperaturen er før, under og etter forsøket. Uvissheten om nøyaktig hva slags stål som ble brukt, (se avsnitt 4.4), og hva slags oppførsel det får ved 500°C, gjør det også vanskelig å si hva slags deformasjoner og slitasje som er reelle for prosessen. Begrenset med tid og økonomiske midler gjorde at avgjørelsen falt på at det var bedre å lage et verktøy og teste dette, selv om det ikke holdt den rette kvaliteten, framfor å ikke kunne teste i det hele tatt.

Det samme må sies om bruken av pressen. Det er uheldig at det ikke var mulighet for å logge verken kraftkurve, eller justere stempelhastigheten. Eventuell logging hadde vært utmerket for å sammenligne opp mot simuleringsresultater for verifisering. Det var likevel begrenset med muligheter for å bruke annet utstyr, og det ble derfor avgjort at det var bedre å utføre en mangelfull test enn å ikke skulle få kjørt noen tester.

Likevel er det oppnådd gode resultater med det utstyret som har vært tilgjengelig. Undertegnede har anskaffet seg mye praktisk erfaring, både i forhold til simuleringsprogrammer, men også maskinering av deler og oppsett før testing.

6.4.2 Feilkilder

Temperaturmålinger både før, under og etter testing er ikke-eksisterende grunnet mangel på egnet utstyr. Oppvarmingstid av verktøy og emne er basert på antagelser og empiriske «tommefingerregler» for lignende prosesser og tester. Det er derfor vanskelig å si hvordan temperaturen varierer i både emne og verktøy under prosessen. Verktøytemperaturen i test 3 er mye høyere enn det som er standard i industrien. Det er derfor vanskelig å si hvor stor grad man kan relatere resultatene fra testen til industriell produksjon.

Det er ingen garanti for at simuleringsresultatene er reelle, da disse er svært parameteravhengig. Mesh-størrelse, mesh-type, friksjonsmodell, osv. er parametere som kan påvirke resultatene. Valg av randbetingelser og materialmodeller vil også kunne påvirke resultatene. Valg av «feil» parametere som er brukt i simuleringene kan derfor gi uriktige resultater. Samtidig, uten noen loggemuligheter for den fysiske testen i forhold til kraftkurve og kraftbehov, er det få numeriske resultater å sammenligne simuleringsresultatene med.

Fordelingen av smøremiddel på verktøyet er langt fra homogent, og det er derfor vanskelig å si om det er områder på verktøyet som har påvirket flyten negativt med høy friksjon.

6.5 Drøfting av resultater opp mot problemstilling

Under er det satt opp en matrise for å oversiktlig sammenligne resultatene opp mot kriteriene for en ny formeprosess. Kriteriene er oppgitt i avsnitt 4.1. Resultatene er fargekodet for å illustrere i hvilken grad resultatet innfrir kravet. Grønt symboliserer at resultatet innfrir kravet i stor grad, gult symboliseres at kravet innfris delvis, men med noe forbedringspotensiale, mens rødt ikke innfrir kravet. Ved røde verdier må metoden utbedres, eller forkastes. Noen av kravene er ikke kvantitative, og har derfor ingen benchmark-verdi. For disse er det gjort en vurdering i henhold til resultatene.

Tabell 8 Oppsummering av resultater

	Benchmark-kriterier	L-form
Kraftbehov [tonn]	300 >	198
Prosesstid [sekunder]	20 >	15
Temperatur [°C]	570 >	504
Materialsinn (avkapp)	-	Moderat
Formfylling	God	God
Etterarbeid (sliping)	-	Moderat
Kan bruke støpte utgangsemner	-	Ja

Tabell 8 viser at metoden innfrir alle kriterier. Observer at ingen verdier er markert i rødt. Det er altså ingen kriterier som er på et ikke-akseptabelt nivå. Den lateral-ekstruderte L-formen har god formfylling, og komponenten kan overdimensjoneres uten at verktøyet vil ta unødig skade. Med overdimensjoneres menes det at mer materiale brukes, slik at «vingene» blir lengre på komponenten. Ifølge

simuleringsresultatene generes det heller ikke nevneverdig varme under prosessen, slik at lokal smelting ikke er et reelt problem. Inkluderingen av ventileringskanaler sikrer at man unngår unødvendig verktøyslitasje, og forslaget til industriell verktøyutforming presentert i avsnitt 6.7 vil sørge for en raskere innmating og uthenting av komponent enn testverktøyet har.

Hvis man sammenligner resultatene i avsnitt 5.2.2 for tøyninger, tøyningshastighet og temperatur opp mot studien gjort på rekryllisering [21], så utfører prosessen så store deformasjoner at man kan anta at komponenten vil ha gjennomgått stor grad av rekryllisering. Dette betyr igjen at prosessen vil endre strukturen i så stor grad at støpte utgangsemner kan brukes. Dette må likevel testes med forsøk for å kunne si noe sikkert.

Bedriften har uttrykt bekymringer for at folding kan oppstå for den nye metoden. Særlige tegn til folding er ikke observert på testresultatene fra test 2 og 3. Merk likevel at foldedefekten kan ligge skjult inne i komponenten. Mer urovekkende er kanskje den rynkede overflaten i tuppene på komponenten fra test 3, som er diskutert i avsnitt 6.3.4. Hvis dette er en konsekvent defekt må man vurdere om komponenten må overdimensjoneres, og så kuttes i ønsket lengde. En ekstra prosess må nok uansett påberegnes for å kutte bort restmateriale på toppen av komponenten. Det er likevel å foretrekke at ekstra materiale stikker opp, enn at stempelet har presset en grop i komponenten.

Resultatene fra avsnitt 5.2.2 viser at prosesstiden er ca. 15 sekunder, noe som er innenfor kravet til prosesstid. Prosessen kan potensielt gjøres raskere ved å øke stempelhastigheten, da denne er litt lav sammenlignet med industriell standard der stempelhastigheten godt kan ligge mellom 20 – 30 mm/s.

6.6 Anbefaling med risikoplan

Bedriften har sendt følgende punkter i forhold til risiko rundt implementering av ny forformingsmetode. Punktene fra bedriften er markert i blått.

-Kan du anbefale metoden til forforming?

Ja! Den valgte løsningen har et høyt potensial, uten særlige defekter eller krav.

- 3 forformingsledd er nå samlet i 1 ledd. Dette reduserer ikke bare prosesstid for hver enkelt prosess, men reduserer total produksjonstid ved at man slipper «transport» mellom flere stasjoner.
- Økonomiske gevinster er også å hente i form av reduserte utgifter på maskindeler, for eksempel verktøyslitasje, tid brukt på bytting av slitte deler, påføring av smøremidler og lignende.
- Basert på simuleringsresultatene krever ikke den nye prosessen mer presskraft enn nåværende, slik at samme presse og utstyr skal kunne brukes med noen modifikasjoner. Det må altså ikke måtte investeres i nye/større presser.

Dette er selvsagt basert på de simuleringene og testene som er utført i denne oppgaven.

-Hva er den største risikoen for at implementeringen feiler?

-Verktøy

Testverktøyet er relativt overdimensjonert, slik at det er skruene som vil gi etter først. For en industriell variant må man beregne fornuftige dimensjoner slik at man unngår flyt/slitasje på verktøyet, men samtidig ikke alt for stort og massivt, i forhold til vekt og størrelse. (Hvor stor fysisk plass verktøyet tar, og kraften det trengs for å bevege det.) Skrueløsningen er uaktuell for en industriell setting, da sammenkobling og frakopling av de to verktøydelenes vil ta for lang tid. Det må derfor ses etter en annen løsning. Festeordninger med hydraulikk er en potensiell løsning. Løsningen med ventileringskanaler vil også sørge for at verktøyet ikke overbelastes av indre trykk.

-Friksjon/klining

Det er ikke observert klining i sporet til testverktøyet. Mulige tendenser mellom øvre verktøy og stempel, men dette er mer en defekt grunnet dårlige toleranser.

-Variasjoner i geometri

Fra forsøkene og simuleringene kan man observere at det er ujevn materialflyt mellom de to sporene. Dette kan skyldes ujevn friksjon i testscenarioet. For simuleringen sin del så kan det være at innmatingshullet ikke er midt i symmetrilinjen mellom de to sporene. Størrelsen på komponenten avhenger veldig av størrelsen på utgangsemnet, naturlig nok, men verktøyet vil ha mulighet til å lage større komponenter som så kuttes i ønsket lengde.

-Frigjøre emnet fra verktøy

Frigjøring av emnet har vært noe problematisk, da det har oppstått bakoverflyt mot stempelet. Dette skyldes at toleransene mellom stempel og verktøyvegg er for dårlig. Hvis maskineringen er god, og stempelet går så langt at det fyller hele innmatingshullet, så kan man unngå dette, og frigjøring av emne burde være enkelt. Dette forenkles også ved at sporet ligger i begge verktøyene, slik at når det ene verktøyet løftes av er det enkelt å få tak i emnet som stikker opp. Inkludering av slippvinkler vil også bidra til at frigjøring av emne blir lettere. Et tredje tiltak kan være å bruke stempelet som en ejetor og dytte komponenten ut av formen etter formingene er fullført.

-Smelting/struktur under ekstrudering?

Prosessen viser ingen tegn til særlig varmeutvikling, hvert fall ikke under simulering. Lokal smelting er derfor ingen risiko per nå.

-Hva blir fordelene med denne metoden som forforming?

-Smistruktur

Metoden deformerer emnet i så stor grad at strukturen vil ha endret seg fra den typiske støpestrukturen. Kombinasjonen av varmforming, store tøyninger og tøyningshastighet vil sørge for at komponenten rekrystalliseres i stor grad.

-Spare ekstruderingskost av smibolt

Siden strukturen mest sannsynlig endres i stor grad, åpner dette for å kunne bruke støpte utgangsemner, og slik unngå at de må ekstruderes først.

-Kostnader/materialutnyttelse

Metoden gir liten grad av skjeggdannelse under prosessen. Dimensjoner på utgangsemnet kan beregnes nøyaktig slik at man oppnår den lengden man ønsker på den forformede komponenten. Det må nok likevel påberegnes en trimmeprosess i etterkant for eventuell kutting til korrekt lengde, samt trimme bort rester av emnet på toppen av komponenten. Hvis tuppene får den typiske rynkete overflaten, må man bruke mer materiale og kutte i ønsket lengde. Dette gir likevel dårligere materialutnyttelse, noe som ikke er økonomisk heldig.

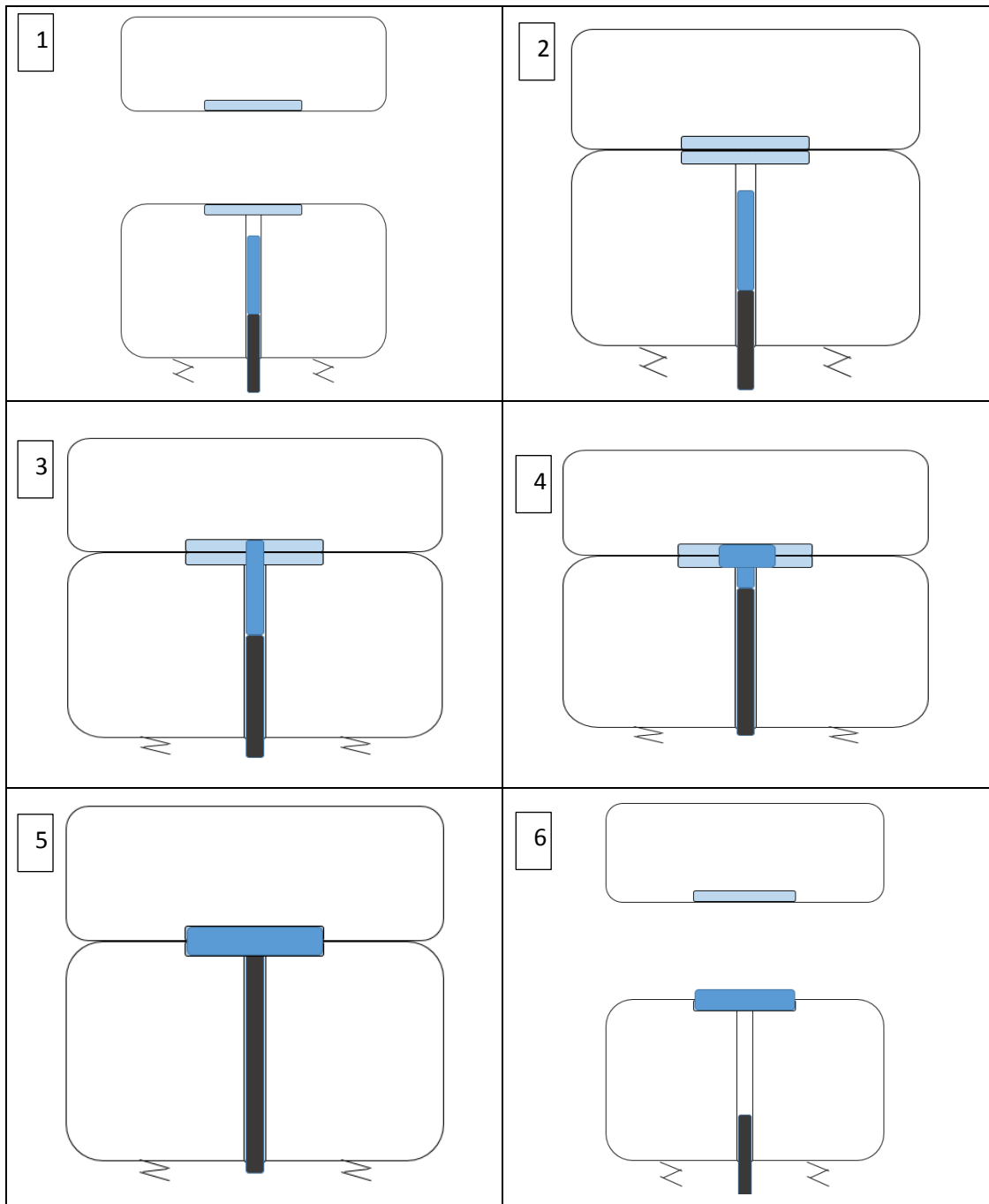
6.7 Forslag til industriell verktøyutforming

Det er vesentlige forskjeller på testverktøyet og det industrielle forslaget. Forslaget er basert på at det skal være raskt å mate inn emnet, samt hente ut den ferdige delen.

Øvre del av verktøyet fungerer som pressen, og vil bevege seg vertikalt nedover. Her brukes det øvre verktøyet til å sikre kontakt mellom øvre og nedre del, samt presse delen ferdig. Nedre del er opplagret i en fjæranordning, muligens hydrauliske stempel, og har mulighet til å bevege seg vertikalt. Stempelet, markert i svart, er statisk/fast opplagret, og vil bevege seg motsatt av nedre del.

Formen til verktøyet er markert med lyseblått. Emnet er farget blått, og stempelet er markert i svart.

Figur 105.1 viser første steg. Emnet mates inn ved en robotarm, og står støttet opp i nedre del av verktøyet, oppå stempelet. Øvre del senkes ned og låser kontakten mellom øvre og nedre del. Øvre del fortsetter å bevege seg vertikalt nedover, og presser dermed nedre del nedover, mens stempelet beveger seg oppover og presser emnet inn i formen til verktøyene. Når formen er fylt, løftes øvre del av, og delen kan enkelt hentes ut. Stempelet kan eventuelt brukes som ejetektor for å løfte komponenten ut av formen.



Figur 105 Industriell implementering

7. Konklusjon

Basert på resultatene har lateral ekstrudering til L-form svært store potensialer som ny forformeprosess. Metoden innfrir alle krav og kriterier oppgitt av bedriften. Metoden reduserer antall steg i den overordnede prosessen, og åpner for bruken av støpte utgangsemner. Det ligger derfor potensielle økonomiske gevinster i å bruke denne metoden sammenlignet med metodene som brukes i dag. Videre testing må likevel gjennomføres for å si noe sikkert.

8. Videre arbeid

For videre arbeid burde det utføres studier av struktur og kornorientering i den forformede delen for videre bruk i smiprosessen. Dette kan eksempelvis gjøres med SEM (Scanning Electron Microscope). Verktøyslitasje må også undersøkes for det faktiske verktøyet som brukes.

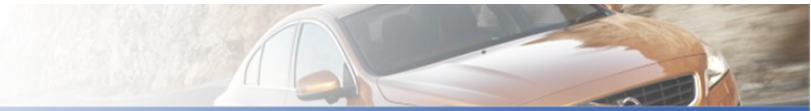
Fullskala-tester må også utføres for å se hvor godt det samsvarer med den nedskalerte testen. Fullskalamodellen må også testes for egnethet videre i prosessen, altså hvor godt den tåler å smis.

Forbedringer: Stempelet burde gå så langt at man sikrer at alt aluminiumet presses ut av kontaineren. Toleranser mellom stempel og verktøyvegg burde være veldig nøyaktige.

8.1 Implementeringsplan

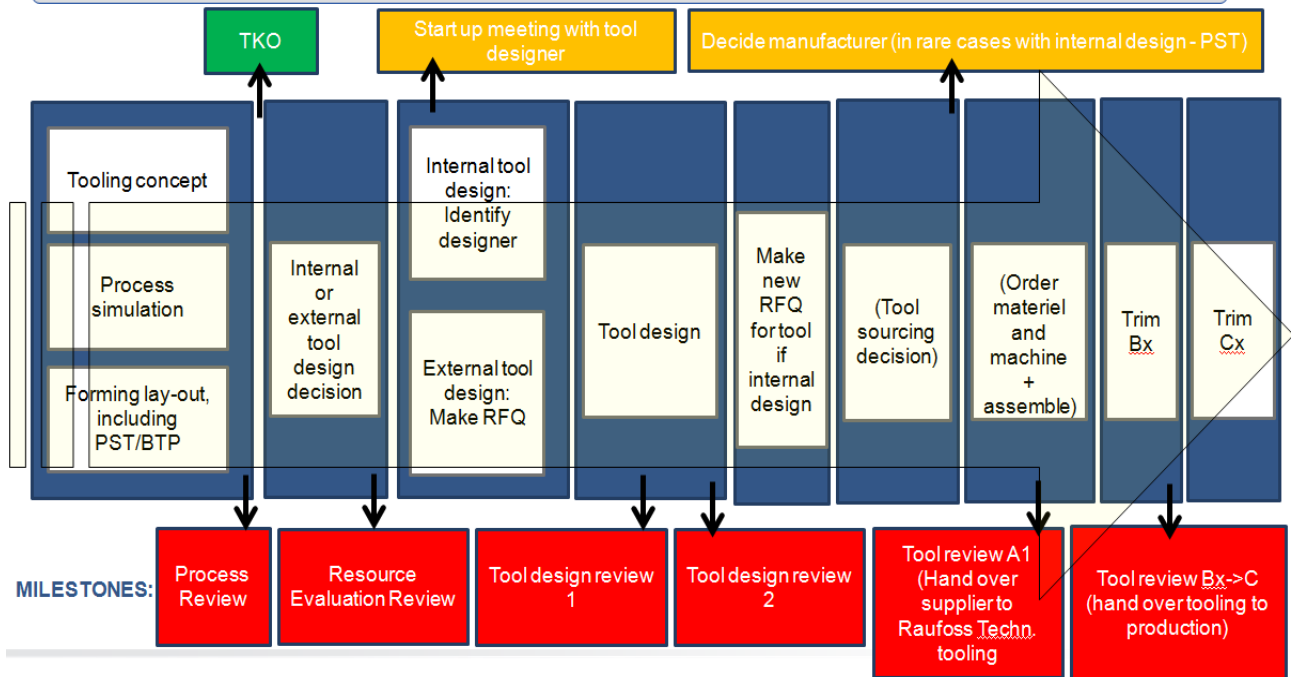
Bedriften har følgende prosedyre for testing av nye prosesser. Listen og figuren er tilsendt fra Neuman Aluminium Raufoss.

- 1) Optimalisere prototypeprosess
- 2) Lage prototypemaskin og teste noen hundre bolter
- 3) Få kostnadsoverslag basert på verktøykost/verktøyforbruk/syklustid
- 4) Evaluere prototyper og milepel for videre satsing
- 5) Hvis ok -> Bestille serieverktøy
- 6) Verktøyovertagelse med første test (FAT)
- 7) Trimming av verktøy, mating og utstøting
- 8) PPAP
- 9) Serieproduksjon



Tooling Process Flow

Agreed and defined tooling process to follow all sites



Referanser

- [1] C. Eggen, «Tribology testing of lubrication and surface treatment of tool interfaces in hot forging of aluminium,» IPM NTNU, Trondheim, 2016.
- [2] H. Valberg, «Extrusion force and pressure,» i *Applied metal forming*, Cambridge, 2010, p. 337.
- [3] R. C. Hibbeler, *Mechanics of materials*, Pearson, 2011.
- [4] H. Valberg, «Stresses,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 53-58.
- [5] G. Härkegård, *Dimensjonering av maskindeler*, Trondheim: tapir akademisk forlag, 2012.
- [6] C. T. Henry Valberg, *Kompendium TMM4140 Plastisk deformasjon og brudd (PDF)*, Trondheim: IPM, NTNU, 2014.
- [7] H. Valberg, «Strain,» i *Applied metal forming*, Cambridge, 2010, pp. 58-61.
- [8] H. Valberg, «Strain rate,» i *Applied metal forming*, Cambridge, 2010, p. 67.
- [9] E. Semb, «Behavior of aluminium at elevated strain rates and temperatures,» Trondheim, 2013.
- [10] S. R. M. Rajamuthamilselvan, «Deformation Stability of Al 7075/20%SiCp (63 μm) Composites during Hot Compression,» 2011.
- [11] H. Valberg, «Friction and friction models,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 139-144.
- [12] H. Valberg, «Grid patterns made from contrast pins,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 184-187.
- [13] H. Valberg, «The scratched grid pattern technique,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 181-184.
- [14] D. G. R. William D. Callister, «Forming operations,» i *Materials Science and Engineering 8th edition*, Wiley, 2011, p. 417.
- [15] A. J. J. J. R. N.J. Lourenço, «Plastic Behavior of Medium Carbon Vanadium Microalloyed Steel at Temperatures Near $\gamma \leftrightarrow \alpha$ Transformation,» *Materials Research*, pp. 149-156, 2001.
- [16] B. Doege, i *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*, Springer, 2010, pp. 671-673.

- [17] «www.engineeringtoolbox.com,» The Engineering Toolbox, [Internett]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html. [Funnet 24 Juni 2016].
- [18] W. D. Callister, «Recovery, Recrystallisation and Grain Growth,» i *Material Science and Engineering 8th edition*, Wiley, 2011, pp. 218-227.
- [19] M. H. F. J. Humphreys, «Recrystallization,» i *Recrystallization and related annealing phenomena*, 1995, pp. 219-232.
- [20] F. J. H. G. S. R. M. H. Anthony Rollett, i *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier, 2004, pp. 220-232.
- [21] Y.-p. M. G.-s. L. W.-q. L. Y. W. J. Z. Guo-zheng Quan, «A characterization for the dynamic recrystallization kinetics of as-extruded 7075 aluminum alloy based on true stress–strain curves,» *Computational Materials Science*, pp. 65-72, 12 Januar 2012.
- [22] Wikipedia, «[Wikipedia.com](https://en.wikipedia.com),» 23 Mars 2015. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Grain_growth. [Funnet 3 Juni 2016].
- [23] *Raufoss group presentation - forging*. [Performance]. Raufoss Technology.
- [24] K. Bell, «Elementmetoden,» 2 Oktober 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/elementmetoden>. [Funnet 26 Juni 2016].
- [25] K. Bell, «Introduction,» i *An engineering approach to finite element analysis of linear structural mechanics problems*, Fagbokforlaget, 2014, p. 1.
- [26] L. C. T.F. Kong, «Prediction of Multipreform Shapes in Warm Forming,» 2015.
- [27] R. Andujar, 17 Juli 2011. [Internett]. Available: <http://stochasticandlagrangian.blogspot.no/2011/07/what-does-shape-function-mean-in-finite.html>. [Funnet 31 Mai 2016].
- [28] U. o. Cambridge, "www.doitpoms.ac.uk," [Online]. Available: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/metal-forming-2/forging.php>. [Accessed 13 December 2015].
- [29] Høyskolen i Sør-Trøndelag, [Internett]. Available: <https://hist-materialer-og-energi.wikispaces.com/smiing>. [Funnet 11 Juni 2016].
- [30] «thelibraryofmanufacturing.com,» Library of manufacturing, [Internett]. Available: <http://thelibraryofmanufacturing.com/forging.html>. [Funnet 27 Juni 2016].
- [31] H. Valberg, «Extrusion,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 23-26.
- [32] H. Valberg, «Figure 2.6,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, p. 23.

- [33] H. Valberg, "Surface cracking in aluminium extrusions," in *Applied Metal Forming*, Cambridge University Press, 2010, pp. 178-179.
- [34] «www.schulergroup.com,» Schuler, [Internet]. Available: https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_massiv_umformung_fliesspressen/. [Funnet 22 Juni 2016].
- [35] E. E. H. M. S. Spigarelli, «Study of hot workability of a heat treated AA6082 aluminum alloy,» *Scripta Materialia*, pp. 179-183, Juli 2003.
- [36] D. D. T. M. P. F. D. S. a. T. L. Daniela Nickel, «Effect of Strain Localization on Pitting Corrosion of an AlMgSi0.5 Alloy,» *Metals*, pp. 172-191, 3 Februar 2015.
- [37] H. Valberg, «Folding defects in forging,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, p. 279.
- [38] J. R. Davis, «Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance,» ASM international, 2001, pp. 75-76.
- [39] L. P. M. V. D. C. B. P. J. Pujante, "Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures," *Wear*, pp. 193-198, 30 November 2013.
- [40] P. K. Saha, «Aluminium Extrusion Technology,» ASM International, 2000, pp. 4, 199-204.
- [41] H. Valberg, «Hot unlubricated extrusion of aluminium alloys,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 322-324.
- [42] H. K. S. S. G.E. Dieter, «Bulk workability of metals,» i *Handbook of workability and process design*, ASM International, 2003, p. 23.
- [43] D. G. R. William D. Callister, «Hardness conversion,» i *Materials Science and Engineering 8th edition*, Wiley, 2011, pp. 174-179.
- [44] «www.steelexpress.co.uk,» Steel express, [Internet]. Available: <http://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>. [Funnet 1 Juni 2016].
- [45] «www.westyorkssteel.com,» [Internet]. Available: <http://www.westyorkssteel.com/technical-information/hardness-conversion-chart/>. [Funnet 1 Juni 2016].
- [46] B. Y. B. Y. J. Chen, «Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures,» *Journal of structural engineering*, pp. 1948-1954, 2006.
- [47] P. M. Jyri Outinen, «Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down,» 2002.

- [48] «www.matweb.com,» [Internett]. Available:
http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7. [Funnet 5. April 2016].
- [49] H. Valberg, «Forward vs. backward extrusion,» i *Applied Metal Forming*, Cambridge, 2010, pp. 324-326.
- [50] «www.engineersedge.com,» Engineers Edge, [Internett]. Available:
<http://www.engineersedge.com/manufacturing/forging-design.htm>. [Funnet 27 Juni 2016].

Vedlegg

Vedlegg A: Risikovurderingsskjema

NTNU	Kartlegging av risikofylt aktivitet			Utarbeidet av	Nummer	Dato
HMS				HMS-avd.	HMSRV2601	22.03.2011
		Godkjent av		Erstatter		
		Rektor		01.12.2006		

Dato: 19.05.2016

Enhet: Institutt for produktutvikling og materialer

Linjeleder: Torgeir Welo

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon): Agnes Digranes (Lableder), Dirk Nolte (Kompetanse rundt bruk av presse), Fredrik Moheim (Student)

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

Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess: Masteroppgave Fredrik Moheim. Verktøytest i hydraulisk presse.

Er oppgaven rent teoretisk? (JA/NEI): NEI
 «JA» betyr at veileder inneslår for at oppgaven ikke inneholder noen aktiviteter som krever risikovurdering. Dersom «JA»: Beskriv kort aktivitetstøten i kartleggingskjemaet under. Risikovurdering trenger ikke å fylles ut.

Signaturer: Ansvarlig veileder: *Dirk Nolte* Student: *Fredrik Moheim*

ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvarlig	Eksisterende dokumentasjon	Eksisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
1	Testing av verktøy i presse	Torgeir Welo				
2	Oppvarming av verktøy/emne	Torgeir Welo				
3	Påføre smøremidler	Torgeir Welo	Sikkerhetsdatablad ifølge Forordning (EC) nr. 1907/2006			

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

Enhet: Institutt for produktutvikling og materialer

Linjeleder: Torgeir Welo

Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon): Agnes Digranes (Lableder), Dirk Nolte (Kompetanse rundt bruk av presse), Fredrik Moheim (Student)

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

Risikovurderingen gjelder hovedaktivitet: Masteroppgave student Fredrik Moheim. Verktøytest i hydraulisk presse.

Signaturer: Ansv. Veileder: *Torgeir Welo* Student: *Fredrik Moheim*

Dato: 19.05.2016

ID nr	Aktivitet fra kartleggings-skjemaet	Mulig uønsket hendelse/ belastning	Vurdering av sannsynlighet (1-5)	Vurdering av konsekvens:				Risiko-Verdi (menneske)	Kommentarer/status Forslag til tiltak
				Menneske (A-E)	Ytre miljø (A-E)	ØK/ materiell (A-E)	Om-dømme (A-E)		
1	Testing på verksted	Skruer overbelastet	1	D	A	C	C	D1	Bruk av glitter og skjerm for beskyttelse, vernebriller. Alltid to personer ved forsøk.
1	Testing på verksted	Verktøy sprekker	1	D	A	C	B	D1	Bruk av glitter og skjerm for beskyttelse, vernebriller. Alltid to personer ved forsøk.
1	Testing på verksted	Klemfare i presse	2	D	A	B	C	D1	Holde avstand til presse under drift. Bruke glitter. Alltid være to personer ved forsøk.
2	Oppvarming av verktøy/ermne	Brannskade på person ved kontakt	2	B	A	D	B	B2	Bruk av hansker, tenger, annet verneutstyr for å håndtere varme komponenter
3	Påføring av smøremidler	Innånding av fordampet smøremiddel	3	A	B	A	B	A3	Bruk av maske. Holde avstand under påføring.
3	Påføring av smøremidler	Smøremiddel antenner	2	C	C	C	C	C2	Ha slukkeutstyr tilgjengelig. Begrense prosessstemperatur.

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



Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

Svært liten 1	Liten 2	Middels 3	Stor 4	Svært stor 5
1 gang pr 50 år eller sjeldnere	1 gang pr 10 år eller sjeldnere	1 gang pr år eller sjeldnere	1 gang pr måned eller sjeldnere	Skjer ukentlig

Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:

Gradering	Menneske	Ytre miljø Vann, jord og luft	Øk/materiell	Omdømme
E Svært Alvorlig	Død	Svært langvarig og ikke reversibel skade	Drifts- eller aktivitetstans > 1 år.	Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket
D Alvorlig	Alvorlig personskade. Mulig uferhet.	Langvarig skade. Lang resitusjonstid	Driftstans > ½ år Aktivitetstans i opp til 1 år	Troverdighet og respekt betydelig svekket
C Moderat	Alvorlig personskade.	Mindre skade og lang resitusjonstid	Drifts- eller aktivitetstans < 1 mnd	Troverdighet og respekt svekket
B Liten	Skade som krever medisinsk behandling	Mindre skade og kort resitusjonstid	Drifts- eller aktivitetstans < 1 uke	Negativ påvirkning på troverdighet og respekt
A Svært liten	Skade som krever førstehjelp	Ubetydelig skade og kort resitusjonstid	Drifts- eller aktivitetstans < 1 dag	Liten påvirkning på troverdighet og respekt

Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens

Beregn risikoverdi for Menneske. Enheten vurderer selv om de i tillegg vil beregne risikoverdi for Ytre miljø, Økonomi/materiell og Omdømme. I så fall beregnes disse hver for seg.

Til kolonnen "Kommentarer/status, forslag til forebyggende og korrigerende tiltak":

Tiltak kan påvirke både sannsynlighet og konsekvens. Prioriter tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer, dvs. sannsynlighetsreduserende tiltak foran skjærpet beredskap, dvs. konsekvensreduserende tiltak.




NTNU		Risikomatrise		Dato	
				08.03.2010	
HMS/KS				Erstatter	
		utarbeidet av		Nummer	
		HMS-avd.		HMSRV2604	
		godkjent av			
		Rektor		09.02.2010	



MATRISSE FOR RISIKOVURDERINGER ved NTNU

KONSEKVENNS		E1	E2	E3	E4	E5
Svært alvorlig						
Alvorlig		D1	D2	D3	D4	D5
Moderat		C1	C2	C3	C4	C5
Liten		B1	B2	B3	B4	B5
Svært liten		A1	A2	A3	A4	A5
		Svært liten	Liten	Middels	Stor	Svært stor
		SANNSYNLIGHET				

Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatrisen.

Farge	Beskrivelse
	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen.
	Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.
	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.