



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2022. 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi

# **Utredning, testing og dokumentering av produksjonsegenskaper, styrke og potensiale hos moderne RP-teknologier**

Investigation, testing and documentation of production characteristics, material properties and potential in modern RP-technology

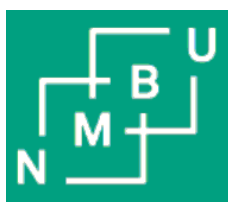
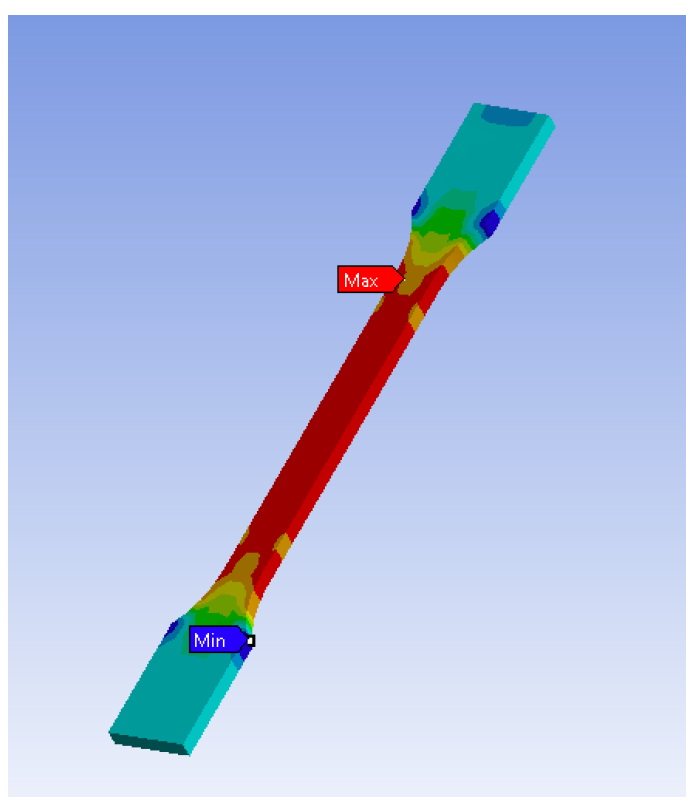
**Børge Falleth Høysæter**

Maskin, prosess- og produktutvikling

# Utredning, testing og dokumentering av produksjonsegenskaper, styrke og potensiale hos moderne RP-teknologier.

av

Børge Falleth Høysæter



**Masteroppgave i Maskin, prosess og produktutvikling**

**Fakultet for realfag og teknologi, NMBU**

**Våren 2022**

# FORORD

Dette er min rapport fra mastergradsoppgavearbeidet ved Norges miljø og biovitenskapelige universitet våren 2022, og tilsvarer en arbeidsmengde på ca. 750-900 bruttotimer (30 ECTS).

Dette arbeidet er avslutningen på min masterstudie i Siv.ing. maskin, og jeg hadde lyst til å skrive en oppgave om noe jeg interesserer meg for. Samtidig gjorde denne oppgaven det mulig for meg å kombinere flere fagfelt jeg syntes er spennende som dataanalyse, økonomi og ingeniørvitenskap. Denne oppgaven har gjort det mulig å dra inn aspekter fra alle disse fagfeltene, og muligheten for å kombinere disse har vært en interessant læringsprosess.

Min egen motivasjon for å skrive en oppgave om prototypningsverktøy begynte med et studentengasjement på EIK lab. Jeg fikk muligheten med å jobbe med hurtigprototyp utvikling på små prosjekter hvor det krevdes proof of concept. I et av de første prosjektene jobbet jeg med å produsere rammer for sporingsutstyr til rev, og fordelene med direkte digital produksjon kombinert med AM-teknologi kom tydelig frem.

Senere i studiet erfarte jeg at prototyper er en veldig gunstig måte å kartlegge kundegruppens meninger om produktets funksjoner og hvorvidt produktet svarer til en problemstilling. Muligheten til å ha en prototype under samtaler med kundegruppen gjør det lettere å «snakke et felles språk». Videre har det også kommet frem hvor enkelt det er å iterere produktene basert på tilbakemelding fra testgrupper, og tiden fra tilbakemelding til en ny iterasjon av prototypen tar kort tid når AM-produksjon benyttes. Det er mange fordeler med AM-produksjon, men det har også sine utfordringer. Derfor har det vært spennende å kunne se på flere RP-teknologier og AM-produksjon i produksjonsserier, vurdering av materialkvalitet og det økonomiske aspektet rundt RP-verktøy.

Takk til førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for god veiledning, refleksjoner, innspill, kritikk og diskusjoner gjennom hele arbeidsperioden. Videre vil jeg takke Senioringeniør Henrik Holmberg som sa seg villig til å være biveileder, og hjelpen til å produsere, sette opp og gjennomføre forsøkene som har blitt gjort i oppgaven. Videre vil jeg takke Senioringeniør Øyvind hansen for hjelp med å sette opp testmaskiner og innspill til den komparative analysen mellom de forskjellige RP-teknologiene. Jeg vil også takke Siviløkonom og analytiker Dane Cékov for innspill rundt økonomiske vurderinger og markedsaspekter i produktutviklingsprosessen, Advokatfullmektig Svein Gjørtz for innspill, tolkning og forklaring av produktansvarsloven og Siviløkonom Sigurd Berstad for innspill rundt faktorer som bedrifter ofte vurderer i en anskaffelsesprosesser og investeringer.

Ås, den 14 mai 2022

Børge Falleth Høysæter

## SAMMENDRAG

Bakgrunnen for prosjektet var å gjøre en kartlegging av moderne *rapid prototyping* (RP) teknologier. RP-teknologi gjør det enklere å produsere prototyper som kan gi et proof of concept, eller brukes i tester på kundegruppen. Dette kombinert med direkte digital produksjon gir nesten ubegrensede muligheter innenfor designtilpasninger, itereringer av produktet og etterprøving av produktets egenskaper.

For å begrense omfanget av oppgaven ble den avgrenset til additiv produksjon (AM), og mer spesifikt *material extrusion* (MEX). AM-produksjon er en teknologi med mange fordeler, men materialegenskapene til AM-produserte deler er begrenset. Problemstillingene for prosjektet ble derfor å kartlegge materialegenskaper, bærekraftperspektivet, kostnadsbilde og designmulighetene teknologien har. Dette førte til en målsetningen om å undersøke, teste og dokumentere produksjonsegenskaper og andre aspekter rundt AM-produksjon. Det har også blitt sett på muligheter, fordeler og potensialet AM-produksjon har som fremtidig produksjonsmetode. Videre ble det også sett på muligheten til å kombinere AM-produksjon med etterbehandlingsmetoder for å gi produktene best mulig egenskaper.

For å gjennomføre prosjektet ble det valgt ut relevant metodikk til å løse problemstillingene som ble reist. Metoder som IPD/IPPD, S.C.A.M.P.E.R, QFD *house of quality* og preferansesett har blitt brukt gjennom prosjektet for å gi et bilde på kundegruppens preferanser. Disse metodene har også blitt brukt til å sikre medvirkning og involvering av eksperter fra forskjellige fagfelt gjennom hele prosessen. Videre ble det gjort LCA-analyser, kostnadsanalyser og en utredning rundt designtilpasningsmulighetene til AM-produksjon for å gi et overordnet inntrykk av produksjonsmetoden.

Gjennom oppgaven har det blitt undersøkt hvorvidt materialkvaliteten påvirkes av produksjonsorienteringen til prøvestavene. Det har blitt produsert prøvestaver i tre forskjellige orienteringer. Prøvestavene har blitt brukt i to forskjellige forsøk for å definere flytegrensen og hardheten. Alle forsøksstrinn, maskineri, produksjonsparametere og parametere for testing har blitt dokumentert i oppgaven for å gjøre forsøket etterprøvbart.

Resultatene og analysen av strekkprøvene viser at det er en statistisk signifikant forskjell i flytegrensene hvis en ekstremmåling ble fjernet fra datasettet. Om ekstremmålingen var inkludert i datasettet var det ikke en statistisk signifikant forskjell mellom prøvestavene som ble produsert horisontalt på byggeplattformen og vertikalt på XY-planet. Resultatene og analysen av hardhetsprøvene viste at det ikke var en statistisk signifikant forskjell i hardheten til prøvestavene. Det ble også definert materialegenskaper for hver av gruppene, og disse har blitt målt opp mot standardverdier for materialet. Det har også kommet frem at AM-produksjon er mer kostnadseffektiv ved få produserte enheter, og mer bærekraftig enn tradisjonell produksjon.

For å bygge videre på forsøket bør det produseres flere prøvestaver med forskjellige produksjonsparametere for å kartlegge hvilke faktorer som påvirker materialegenskapene til AM-produserte produkter. Disse dataene bør brukes til å lage en kvantitativ modell som kan predikere materialegenskaper basert på produksjonsparametere og orientering.

## ABSTRACT

The motivation for conducting this study is to create an aggregated impression of rapid prototyping (RP) technology. RP-technology makes it easy to produce prototypes that can create a proof of concept or be used to get feedback from a control group. The combination of direct digital production and RP-technology creates almost unlimited design possibilities, an option to iterate the product based on feedback from the control group and verification of the products features.

The study has been limited to explore the possibilities of additive manufacturing (AM), and more specific material extrusion (MEX). AM-technology comes with many benefits, but the material properties of AM-produced components is limited. Therefore this project aims to create an aggregated impression of material properties, sustainability, cost of production and design possibilities AM-production creates. For these reasons the goal of the project is to investigate, test and document production capabilities and other aspects of AM-production. It has also been looked into the possibilities, benefits and potential of AM-production as a future manufacturing technology. The effects of postprocessing and how different postprocessing techniques impacts the material properties of AM-produced components.

To conduct this study relevant methodologies has been chosen to answer the research questions. IPD/IPPD, S.C.A.M.P.E.R, QFD house of quality and vectorization of customer preferences has been used to compare technical requirements with the customer groups needs. These methodologies have also created involvement and participation of the experts throughout the study. There has also been completed LCA-analysis, cost-analysis, and an exploratory study of design possibilities for AM-production

Throughout the study it has been researched how orientation during production affect material properties of a test rod. It has been produced test rods in three different orientations, and these test rods has been used to gather information of the materials hardness and yield strength. All the research steps, test machinery, production parameters and test parameters has been documented so that the study can be verified by another researcher.

This study resulted in a statistically significant difference in yield strength based on orientation during production if an outlier was removed from the dataset. If this outlier is included in the dataset there is no statistically significant difference in yield strength between two of the groups. The results and analysis of the hardness test concluded that there was no statistically significant difference in hardness based on orientation during production. Material properties of the different orientations during production was also determined, and these were compared to standard properties for the material. The study also conclude that AM-production is more cost efficient when few units are produced, and that the method is more sustainable than traditional manufacturing.

Further work should focus on producing more test rods with different production parameters. This data should be used to create a predicative model for material properties based on production parameters and orientation during production.

# INNHALDSFORTEGNELSE

<b>FORORD</b> .....	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>INNHALDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrunn</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Sentrale utviklingstrekk og aktører</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Tidligere arbeider på området</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4. Eksisterende produksjonsmetoder og løsninger</b> .....	<b>5</b>
1.4.1 Støpning .....	5
1.4.2 Hurtigmaskinering.....	5
1.4.3 Ekstrudering / additiv produksjon .....	6
<b>1.5. Markedsbehov og potensiale</b> .....	<b>6</b>
<b>1.6. Oppdragsbeskrivelse</b> .....	<b>9</b>
<b>1.7. Problemstillinger og teknologiske flaskehals</b> .....	<b>9</b>
1.7.1. Problemstillinger og fokuspunkter .....	9
1.7.2. Teknologiske flaskehals og utfordringer .....	10
<b>2. PROSJEKTPLANLEGGING</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1. Prosjekt målsettinger</b> .....	<b>12</b>
2.1.1. Hovedmål .....	12
2.1.2. Delmål .....	12
<b>2.2. Tids og arbeidsplan med milepeler</b> .....	<b>12</b>
<b>2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet</b> .....	<b>15</b>
<b>3. METODEBESKRIVELSE</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 Terminologi og begreper</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 Løsningsverktøy og metodikk</b> .....	<b>18</b>
3.2.1 Programvarebruk .....	18
3.2.2 Tester .....	19
3.2.3 Løsningsverktøy .....	19
3.2.4 Diagrammer .....	19
3.2.5 Metodebruk .....	19
<b>3.3. Databehandling og forsøksmetodikk</b> .....	<b>24</b>
3.3.1 Datainnsamling.....	24
3.3.2 Statistisk grunnlag .....	24
<b>3.4. Kvalitetssikring</b> .....	<b>29</b>
<b>3.5. Arbeidsmåte, prosessstrinn og trinnspeifisering</b> .....	<b>30</b>
3.5.1 Forprosjekt .....	33
3.5.2 Markedsvurdering .....	33
3.5.3 Teori utredning.....	33

3.5.4 Ekstern tilbakemelding.....	33
3.5.5 Forsøksdesign og forsøk.....	33
3.5.6 Tolkning og visualisering av data.....	34
3.5.7 Kostnad-/bærekraftsanalyse og designtilpasning.....	34
3.5.8 Diskusjon og konklusjon.....	34
3.5.9 Ferdigstillingsfase.....	34
<b>4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Grunnlagsteori.....</b>	<b>35</b>
4.1.1 Materialvalg og egenskaper.....	35
4.1.2 Materialstrukturer i polymer.....	38
<b>4.2 Generalisering av AM produksjonsprosess.....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Produktdefinisjon og CAD arbeid.....	40
4.2.2 Konvertering av fil til STL/AMF.....	40
4.2.3 Overføring til AM maskin og STL manipulering.....	41
4.2.4 Oppsett av maskin.....	41
4.2.5 Byggeprosess.....	41
4.2.6 Fjerning av figur og opprydding.....	42
4.2.7 Etterbehandling.....	42
4.2.8 Bruk av komponent.....	42
<b>4.3 Utdyping av MEX prosessen.....</b>	<b>42</b>
4.3.1 Lasting av materiale.....	43
4.3.2 Smelting av materialet.....	43
4.3.3 Ekstrudering.....	44
4.3.4 Solidifisering.....	45
4.3.5 Posisjonskontroll.....	46
4.3.6 Bindingsprosess.....	47
4.3.7 Generering av støttestruktur.....	48
4.3.8 Plotting og kontroll av veivalg.....	49
<b>4.4. Eksempler på AM Produksjon.....</b>	<b>50</b>
4.4.1 Fused deposition modelling (FDM).....	50
4.4.2 3D printing (3DP).....	51
4.4.3 Laminated object manufacturing (LOM).....	52
4.4.4 Stereolithography (SLA).....	53
4.4.5 Polyjet modelling (PJM).....	54
4.4.6 Selective laser sintering (SLS).....	55
4.4.7 Selective laser melting (SLM).....	56
4.4.8 Electron beam melting (EBM).....	57
4.4.9 Laser metal deposition (LMD).....	58
<b>5 INTERVJUER OG EKSPERTINNSPILL.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1 Målsetting for intervjuer og ekspertinnspill.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2 Valg av ekspertteam.....</b>	<b>60</b>
<b>5.3 Kommunikasjonsform.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4 Resultater og resultattolkning.....</b>	<b>61</b>
5.4.1 Senior ingeniør Henrik Folke Holmberg.....	61
5.4.2 Siviløkonom Dane Cékov; Analytiker.....	62
5.4.3 Siviløkonom Sigurd Berstad; prisings og profitt kontrollør.....	64
5.4.4 Advokatfullmektig Svein Gjørtz.....	65
5.4.5 Senioringeniør Øyvind Hansen.....	66
<b>5.5 Utvikling av preferansesett og QFD «house of quality» analyse.....</b>	<b>67</b>

<b>6</b>	<b>UTVIKLING AV FORSØK OG PRØVETAKNING .....</b>	<b>71</b>
6.1	Hovedmål for forsøk og prøvetakning .....	71
6.2	Utvikling av forsøk for å teste strekkegenskaper .....	71
6.1.1	Forsøksmål for styrkprøvingen.....	72
6.1.2	Forsøksutstyr .....	73
6.1.3	Forutsetninger for forsøk.....	73
6.1.4	Forsøkstrinn.....	73
6.3	Utvikling av forsøk for bestemmelse av hardhet.....	75
6.2.1	Forsøksmål for hardhetstetingen .....	75
6.2.2	Forsøksutstyr .....	75
6.2.3	Forutsetninger.....	76
6.2.4	Forsøkstrinn.....	76
<b>7</b>	<b>GJENNOMFØRING AV FORSØK.....</b>	<b>77</b>
7.1	Gjennomføring av strekkprøve forsøk.....	77
7.1.1	Produksjon av prøvestaver .....	77
7.1.2	Produksjonsparametere.....	78
7.1.3	Oppsett av maskin for strekkprøver.....	80
7.1.4	Utførelse av strekkforsøk .....	81
7.1.5	Andre observasjoner fra forsøk .....	81
7.2	Gjennomføring av hardhetsprøver .....	82
<b>8</b>	<b>TOLKNING OG BRUK AV FORSØKSDATA .....</b>	<b>84</b>
8.1	Resultat fra strekkprøving.....	84
8.2	Resultater fra hardhetsprøvene .....	86
<b>9</b>	<b>DATAVISUALISERING OG PREPROSESSERING .....</b>	<b>88</b>
9.1	Visualisering .....	88
9.1.1	Visualisering av strekkprøver .....	88
9.1.2	Visualisering av hardhetsdataene .....	92
9.2	Preprosessering.....	94
<b>10.</b>	<b>TOLKNING AV RESULTATER.....</b>	<b>95</b>
10.1	Tolkning av resultater fra strekkprøver .....	95
10.1.1	Hypotesetester der ekstremmålingen har blitt inkludert .....	95
10.1.2	Hypotesetester der ekstremmålingen har blitt ekskludert.....	95
10.2	Tolkning av resultater fra hardhetsprøver .....	96
10.3	Bestemmelse av materialegenskaper.....	96
<b>11</b>	<b>ETTERBEHANDLINGSMETODER .....</b>	<b>98</b>
11.1	Fjerning av materialet.....	98
11.1.1	Mekanisk fjerning av materiale .....	98
11.1.2	Laserbasert behandling som fjerner materiale.....	99
11.1.3	Kjemisk behandling.....	99
11.2	Ingen fjerning av materiale.....	99
11.2.1	Mekanisk behandling .....	100
11.2.2	Laserbehandling .....	101
11.3	Påføring av belegg.....	101
11.4	Hybridbehandling.....	101



11.5 Kostnadsvurdering av etterbehandling.....	102
<b>12. KOSTNADSANALYSE.....</b>	<b>103</b>
12.1 Kontantstrømmer analyse.....	103
12.2 Nullpunkt analyse og gunstig antall produserte enheter.....	104
12.3 Fordeling av inntekter basert på produksjon .....	105
12.4 Leveringskjede .....	105
12.5 Ordreproduksjon og serieproduksjon. ....	106
<b>13.1 Resultater fra LCA-analyse .....</b>	<b>107</b>
13.1.1 Resultater for polymer ekstrudering .....	107
13.1.2 Resultater for polymer Støpning.....	108
13.1.3 Resultattolkning av LCA analysene .....	109
<b>14 DESIGNTILPASSING OG MULIGHETER .....</b>	<b>112</b>
<b>14.1 Designfordeler og DFM.....</b>	<b>112</b>
14.1.1 Industripraksis .....	112
14.1.2 DFM retningslinjer og praksis.....	112
14.1.3 Forskning på DFM, verktøy og miljø.....	113
<b>14.2 Fordeler og tilpasningsdyktigheten til AM-produksjon.....</b>	<b>113</b>
14.2.1 Kompleksitet i design.....	113
14.2.2 Hierarkisk kompleksitet.....	114
14.2.3 Funksjonell kompleksitet.....	114
14.2.4 Materiell kompleksitet.....	114
14.2.5 Topologisk optimalisering av design.....	115
<b>15 Prosessevaluering og diskusjon.....</b>	<b>116</b>
<b>16 KONKLUSJON .....</b>	<b>121</b>
<b>17. REFERANSER.....</b>	<b>124</b>
<b>18 VEDLEGG .....</b>	<b>132</b>

# 1. INNLEDNING

*I denne delen av gradsrapporten vil det bli gitt et oversiktsbilde knyttet til bakgrunnen for mastergradsarbeidet, utviklingstrekk på området, samt overordnede rammer for gradsprosjektet. Det vil også bli definert oppdragsomfang og sett nærmere på områder som kan by på utfordringer.*

## 1.1 Bakgrunn

Rapid prototyping (RP), eller hurtigprototyping, er noe som har blitt mer og mer aktuelt innen produktutvikling de siste årene. Prisene på RP-utstyr har gått ned, og dette gjør teknologien mer tilgjengelig for alle. Enten det er en hobbyentusiast, eller et lite selskap så finnes det RP-modellbyggingsmaskiner i de fleste prisklassene. Dette gjør at RP-teknologi har blitt en sentral del av utviklingsprosessen, og gjør det enkelt å pivotere og iterere produktet etter tilbakemelding fra endebruker.

I en verden med store og intrikate leveringskjeder vil denne typen teknologi gjøre det enkelt å produsere prototyper uten begrensninger fra tilgjengeligheten av hyllevarer og andre ressurser. Disse prototypene kan brukes til funksjonsanalyse, forsøksgrupper og designtilpasninger etter tilbakemelding. Muligheten til å produsere en enkel prototype gjør det lett å sjekke at produktet holder krav til design og størrelse, samtidig som endringer kan gjøres tidlig i produktutviklingsprosessen. Per dags dato er RP-teknologi best egnet til prototypeproduksjon, men dette er en teknologi som har store potensialer, og i fremtiden vil det kanskje være mulig å bruke dagens RP-teknologi i produksjonsserier. En av metodene blir mye brukt er additiv manufacturing (AM), og dette er en enkel metode som ikke krever mye kunnskap om produksjon for å kunne benyttes.

Muligheten for 3D-printing ligger langt utover enkle prototyper, og allerede i 2016 kunne aftenposten skrive om bruken av 3D-printere til å bygge hus og broer. Videre brukes det andre typer RP teknologi for å kunne bygge mindre tradisjonelle former, og mer organiske design. Et eksempel på bruk av RP-utstyr i produksjon er tverrfjellpaviljongen eller reinsdyrpaviljongen på Dovrefjell, hvor det har blitt brukt en industrirobot til å skjære ut treverk i et organisk design. [1]

Historisk sett ble den første patentsøknaden for 3D-printing sendt inn i 1980, og beskrev en metode som brukte UV-lys til å herde et fotopolymer. Denne ble sendt inn av Hideo Kodama, men ble aldri kommersialisert. Charles Hull fant opp den første 3D-printeren i 1983, og dette var et stereolitografi apparat. Senere får han den første patenten på 3D-printer i 1986, og i 1987 kommer Carl Deckard på banen med den første SLS maskinen. Året etter kommer den første kommersielle RP-printeren på markedet, og dette er en «SLA-1» maskin. I årene fremover skjer det store fremskritt og nye AM metoder blir funnet opp. I 2009 går en av patentene til Stratasys ut, og dette fører til at FDM printere blir billigere. Dette gjør at flere får råd til å kjøpe seg AM-

maskiner, og i 2019 ble det rapportert at antall AM maskiner har økt til 170 forskjellige systemer. [2]

Det første miljøet i Norge som fikk finansiert en maskinpark bestående av RP-modellbyggingsmaskiner var Arkitekthøgskolen. I 2003 investerte Arkitekthøgskolen i 5 RP-maskiner med finansiering fra NRF, og hadde på dette tidspunktet Norges beste maskinparken for rapid prototyping. Maskinparken besto av tre maskiner for lasersintring, en for støpning av stål-former og en RP konseptmaskin. Dette gjorde at AHO kunne produsere modeller med dimensjoner opp til 40x35x30cm, med en presisjon på 0.2mm. Dette ga en presis produksjonsmåte som kunne produsere prototyper med kaviteter og andre designutfordringer uten vesentlig økning i prisen. [3]

I 2013 begynte NTNU å opparbeide seg AM- maskiner, og produksjonsmetoden var selectiv laser melting (SLM). I et samarbeid med SINTEF gikk NTNU til anskaffelse av en concept laser m2 cusing-maskin. Denne maskinen kostet om lag fem millioner kroner, og var en av datidens mest avanserte 3D-printere. Denne printeren ble blant annet brukt til å printe luftinntaksrør for Revolve-bilen i 2012, og en tilsvarende maskin ble brukt av NASA for å produsere rakettdeler til Space Launch System (SLS) som skulle frakte mennesker utenfor lav jordbane for første gang siden Apollo. [4]

På NMBU var det første AM-apparatene en brukt Stratasys FDM, og en Z-Corp/Minoko-z450 fullfarge gipsprinter. Disse maskinene kom i perioden 2008-2009, og ble brukt av studenter og ansatte for å spesialprodusere deler og prototyper. Stratasysmaskinen var brukt og ble donert i gave fra Adigo til Realtek, og Z-corp Z450 maskinen ble kjøpt inn litt senere [5]



Figur 1: Den første AM-maskinen som kom til NMBU. Dette var en Stratasys FDM Hentet fra: [101]

Per dags dato er det en rekke forskjellige AM-maskiner på NMBU, og det finnes alt fra «FlashForge adventurer 3» maskiner på Eik lab og hos linjeforeningen Tannhjulet til en «Ender3 V2» med dirkete ekstruder som står på kontoret til Senioringeniør Henrik Folke Holmberg. Denne teknologien er lett tilgjengelig for studenter ved NMBU, og blir brukt til å designe prototyper i flere innovasjonskurs.

Bakgrunnen for å gjennomføre en masteroppgave rundt hurtigprototypingsmetoder er å undersøke om produksjonsmetoden har tilstrekkelig kvalitet, materialeegenskaper og prisnivå som tradisjonell produksjon. Muligheten til å gjøre et studie rundt dagens situasjon vil kunne avdekke bruksområder og markeder der RP-utstyr vil være gunstig under produksjon. Miljøpåvirkningen til forskjellige produksjonsmetoder er et aspekt som er viktig for valg av produksjon, og en bærekraftsanalyse vil kunne gi et innblikk i eksternalitetene produksjonsmetodene fører med seg.

## 1.2 Sentrale utviklingstrekk og aktører

For å få en oversikt over aktører i markedet og relevante utviklingstrekk har det blitt gjort en undersøkelse av markedet, og bruk av AM-teknologi.

Det flere aktører som driver med hurtigprototyping i Norge, og blant disse er Norsk titanium. Dette er en bedrift som jobber mye med «*rapid plasma deposition*», og dette er en OEM-godkjent produksjonsmetode som brukes i luftindustrien. Bedriften har fått FAA godkjenning som tillater serieproduksjon av deler til luftfartsindustrien, og har også ISO9001:2008 godkjenning. Selskapet har også en NORSOKM-650 sertifisering som gjør at de kan produsere titaniumsdeler for olje og gass sektoren. [6]

Selskapet oppgir at de kan produsere deler 50-100 ganger raskere enn pudderbasert AM-produksjon og med 25-75% mindre materialbruk enn ved tradisjonelle produksjonsmetoder. De kan produsere deler innenfor dimensjonene 900mm x 600mm x 300mm med en maksvekt på 270kg. Selskapet flagger også at de vil kunne produsere større deler på et senere tidspunkt. [6]

Norsk titanium har en visjon om å jobbe med forsvar & romfart, utviklingen av motorer og vedlikeholdsarbeid. Mulighetene AM-teknologi gir vil kunne produsere lettere, men like hardføre dele som tradisjonell produksjon. [6]

En annen bedrift som driver med RP-utvikling er Tronrud Engineering, og de har et verksted med mange forskjellige RP-maskiner. Tronrud Engineering startet med bruk av AM-teknologi i 2014, og beskriver denne teknologien som rask, kostnadsbesparende, tilpasningsdyktig for lettvekts komponenter med kompleks geometri og designfrihet med mulighet for unike tilpasninger. Selskapet har tre AM-maskiner og en rekke annet hurtigprototype verktøy. Selskapet har de siste 40 årene jobbet med å skape innovative løsninger, og er en ledende aktør i utviklingen av automatiserte løsninger. [7]

En aktør som hovedsakelig jobber med prototyping er Protolab. Protolab er etablert i 2006, og er en del av «Scandinavian tooling & production»-gruppen som jobber produktutvikling innenfor forskjellige bransjer. Selskapet har en bred portefølje med maskiner og produserer deler med CNC maskinering, AM-teknologi og støpning. Selskapet driver med prototyping innenfor flere fagfelt, og har muligheten til å bistå med alt fra PCB-brett til 3D-scanning. [8]

En internasjonal aktør innenfor prototyping er det britiske selskapet Protolabs. Dette selskapet jobber med digital produksjon, og businessmodellen deres består av at kunder sender inn CAD-modeller. Det blir det gjort en designanalyse av modellen, og når den er gjennomført vil delen bli produsert. Etter produksjon vil prototypen bli sendt til kunden, og denne prosessen kan ta så kort tid som en dag. Dette selskapet tilbyr tjenester innen injeksjonsstøpning, CNC-maskinering og AM-produksjon. Selskapet er sertifisert med ISO 9001:2015, EN ISO 13485 og DNVGL-ST-B203. Bedriften er også registrert hos JOSCAR, som er et kvalitetsstempel på bedriftens kompetanse. [9-10]

### 1.3. Tidligere arbeider på området

For å få en oversikt over arbeidet som allerede har blitt gjort på området vil det bli gjort et søk etter tidligere masteroppgaver.

Blant det tidligere arbeidet er det gjennomført en masteroppgave innen 3D scanning og 3D printing. Denne oppgaven er skrevet av Kristine Falk Gabrielsen ved NMBU i 2017. Her ble AM-produksjon brukt til å produsere prøvehylser til pasienter som hadde amputert. Amputasjonsstumpen ble 3D scannet, og et spesialtilpasset produkt ble produsert til hver enkelt pasient. Denne oppgaven konkluderer med at AM-produksjon bruker for lang tid sammenlignet med andre produksjonsmetoder, og at overflateruheten til de produserte prøvehylsene ikke var tilfredsstillende. Videre kom det frem at AM-produksjonen også var dyrere enn tradisjonelle produksjonsmetoder, men AM-produksjon kan bli mer aktuell hvis apparatene blir billigere. Det var med andre ord ikke gunstig med AM-produksjon selv om hvert enkelt produkt vil kreve tilpasninger for endebruker. [11]

Et annet arbeid som har blitt gjort på området er en undersøkelse av AM-produksjons effekt på mikrostrukturen og de mekaniske egenskapene til en Inconel 718 Nikkellegering (UNS N07718). Denne oppgaven ble skrevet i 2015 av Eivind Petersen-Øverleir ved universitetet i Stavanger. Denne oppgaven konkluderer med at flytegrensen og strekkfastheten til materialet er betraktelig lavere enn tradisjonelt produserte deler. AM-produserte deler ble varmebehandlet for å se på hvordan etterbehandling påvirket materialegenskapene, og dette ga verdier på strekkfasthet og hardhet i materialet som var høyere enn andre kommersielt produserte deler. Dette gikk derimot på bekostning av andre egenskaper som duktilitet, bruddforlengelse og sammentrekningen ved brudd. Disse verdiene viste seg å være vesentlig lavere enn kommersielt produserte deler. [12]

En annen gradsoppgave som har blitt gjort på materialegenskaper er masteroppgaven til Espen Kultorp. Denne masteren gikk ut på verifisering av material- og styrkeegenskaper i komposittmaterialer, og ble skrevet ved NMBU i 2012. Denne oppgaven tar for seg forskjellige materialer og bruksområdene til dette for å kunne skreddersy en løsning til en designutfordring. Denne oppgaven inneholdt blant annet forsøk for å finne ut av materialstyrken til en plate med to hull i, og dette ble etterprøvd med FEM-analyse. [13]

I 2015 ble det gjort en masteroppgave ved Saimaa University of Applied Sciences i Finland, og denne handlet om additive produksjon som produksjon i hurtig prototyping. Denne oppgaven handlet om å kartlegge kunnskap, teknikker, fordeler trender og utfordringer rundt AM-produksjon av en girkasse. Denne oppgaven konkluderer med at AM-produksjon er en teknologi som flere selskaper drar nytte av. Muligheten til å spesialtilpasse produkter til kundene sine, samtidig som de investerer i ny produksjonsteknologi gir teknologien flere fordeler. [14]

Den siste oppgaven det har blitt sett på er en masteroppgave fra universitetet i Missouri. Denne oppgaven er skrevet av Chen-Yu-Liu i 2013 og var et komparativt studie av forskjellige systemer innen hurtig prototyping. Dette studiet kom frem til at materialegenskapene vil variere med orientering under produksjon og produksjonsutstyr som brukes. Materialegenskapene til de forskjellige orienteringene ga også forskjellige resultater, og beste produksjonsorientering vil variere mellom produksjonsmetodene. [15]

## 1.4. Eksisterende produksjonsmetoder og løsninger

Innen hurtig prototyping er det flere forskjellige metoder som kan benyttes, og de vanligste teknikkene er støpning, hurtigmaskinering og ekstrudering. Alle disse metodene vil gjøre det mulig å kunne teste funksjonene til en prototype, men hver av metodene vil ha sine fordeler og ulemper.

### 1.4.1 Støpning

Det finnes flere forskjellige teknikker for støpning, men grunnprinsippet er det samme. Det produseres en form, gjerne ved hjelp av 3D-printing eller kutting i isopor. Denne figuren blir deretter brukt til å lage støpeformen, og denne formen blir fylt med støpningsmasse. Støpeformen blir deretter satt til avkjøling/herding, og når støpningsmassen har stivnet kan det ferdige produktet fjernes fra støpeformen. Denne produksjonsmetoden egner seg når det skal produseres et stort antall deler, eller mindre komplekse deler.

Metoden er enkel, men krever forsiktighet og sikkerhetstiltak for oppvarming og transportering av støpningsmassen. Videre krever produksjonsmetoden at støpningsformene skapes til hver enkelt prototype, og hvert design må ta hensyn til at produktet skal fjernes fra en støpningsform. [16]

### 1.4.2 Hurtigmaskinering

Hurtigmaskinering er en prosess der det brukes verktøy som CNC maskinering for å utarbeide en prototype. I denne prosessen blir det utarbeidet en CAD-modell som blir lagret som en STEP eller IGES fil. Denne filen kan deretter brukes til å produsere en modell ved hjelp av å kutte bort materiale fra en blokk.

Disse maskinene operer i alt fra 3-akser til 12-akser, og produserer komponentene med høy kvalitet og presisjon. Ulempen med denne produksjonsmetoden er at den er vanskelig å bruke, og det for å få et godt produkt må operatøren ha fagbrev og spesialkompetanse. [16]

### 1.4.3 Ekstrudering / additiv produksjon

Denne typen hurtig prototyping er som oftest kjent som AM-produksjon, denne metoden baserer seg på lagvis produksjon. AM-produksjon betyr at en CAD-modellen blir lagret som en STL-fil. Dette er en mesh fremstilling av CAD-modellen, og denne filen vil bli lastet inn i et slicingprogram. Her blir orientering og parametere for produksjons bestemt, og denne filen blir deretter overført til en 3D-printer, og delen kan produseres etter at produksjonsparametere har blitt bestemt.

Denne metoden er enkel å lære seg, og i motsetning til de andre alternativene vil nesten hvem som helst kjøpe en 3D printer og trykke på startknappen. Det finnes også CAD-programmer som er brukervennelige, og dette gjør at AM-produksjon er tilgjengelig for de som ønsker å utforske metoden. Det finnes også mer avanserte maskiner som egner seg til industribruk ol. [16-17]

## 1.5. Markedsbehov og potensiale

Hurtigprototyping er en enkel måte å få etterprøvd funksjonene til en prototype. Ved å produsere en prototype tidlig vil det være mindre kostbart å endre på produktdesignet. Denne tidlige produksjonen vil som oftest bli gjort med en form for RP-teknologi, men kan også være så enkelt som en tegnet modell. Et eksempel på framtidig bruk av denne teknologien er AM-produksjon av deler og verktøy på oljeplattformer eller ISS. En annen viktig faktor er bærekraftperspektiv, og hvor mye klimagassutslippet som er assosiert med produksjonsmetoden, sammenlignet med andre produksjonsmetoder.

En av de største utfordringene innen produktutvikling er produktdefinisjonen. Dette er delen av et prosjekt som handler om å definere produktet med egenskaper før produksjonen startes. Dette steget i prosessen definerer også hvilke problemstillinger produktet skal svare på, hvem produktet er rettet mot og hvordan produktet skal produseres. For å nå en god produktdefinisjon vil endebbrukeren bli involvert i utviklingsprosessen og prototypen blir iterert etter tilbakemelding. Ved å gjøre denne prototypingen vil det bli brukt mindre tid på å definere produktet, og endringer i produktet er betraktelig billigere under produktdefinisjonen enn senere i prosjektet. [18]

Et godt design trenger ofte flere prototyper, og prototypnings prosessen blir derfor ofte en flaskehals i utviklingsprosessen. En raskere utvikling av prototype vil være et komparativt fortrinn, som kan føre til høyere inntjening for selskapet[18]. Dette gjør også at rapid prototyping er en god måte å implementere metodikk som SCAMPER og IPD/IPPD i utviklingsprosessen siden innoveringen av endebbrukeren gir tilbakemeldinger som itererer designet. Videre vil RP-utstyr gjør det mulig å svare på problemstillingene listet opp under [18];

- Samle brukerkrav til produktet
- Få et tidlig «proof of concept», og vise dette til prosjekteier
- Teste funksjonskrav, finne designproblemer og forbedre produktet
- Involvere endebruker i produksjonsprosessen
- Kvalitetssikring av produktets funksjoner

Videre kan rapid prototyping føre til at produktet når ut til markedet tidligere enn med alternative metoder. Under er det listet opp en tabell med faktorer som påvirker en utviklingsprosess: [18]

Tabell 1: Oversikt over faktorer i utviklingsprosessen som påvirker avkastning på et produkt

Utfordringer	Viktighet	Årsak	Kommentarer
Marked	Alvorlig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manglende etterspørsel</li> <li>• Prising</li> <li>• Late-to-marked</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behov</li> <li>• Kostnad</li> <li>• Tid</li> </ul>
Ledelse	Medium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dårlig markedsanalyse</li> <li>• Underbemanning</li> <li>• Mangel på kapital</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behov</li> <li>• Tid/kostnad</li> <li>• Kostnad</li> </ul>
Teknologiske	Mindre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utdatert teknologi</li> <li>• Designproblemer</li> <li>• Kvalitetsmangel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ytelseskvalitet</li> <li>• Ytelseskvalitet</li> <li>• Kvalitet</li> </ul>
Andre	Mindre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uspesifisert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Annet</li> </ul>

Fra tabell 1 kommer det frem at de største utfordringene i produktutvikling er markedets behov for produktet, tid i utviklingsprosessen og kostnadene assosiert med utvikling og produksjon. Grunnlaget for å utvikle et produkt er at selskapet kan få avkastning på investeringen i prosjektet. Dette kalles ofte «return on investment» (ROI) og er gitt i formelen under [18]:

$$ROI = \frac{(total\ profit) - (Årlig\ utviklingskostnad)(Tid\ til\ marked)}{(Årlig\ utviklingskostnad)(Tid\ til\ marked)} \quad (1.1)$$

Ved en raskere utviklingsprosess vil produktet kunne ha en lengre levetid i markedet, og dette vil føre til en høyere «return on investment». Dette vil si at bedriften høyst sannsynlig vil tjene mer penger på å investere i et utviklingsprosjektet jo raskere produktet treffer markedet, og dette gjør det attraktivt å investere i RP-teknologi. [18]

Det er også fordeler med de nevnte produksjonsmetodene utenfor prototypningsaspektet. Ved å produsere med hurtigmaskinering eller ekstruderingsmetoder vil forsyningskjedene kunne forenkles, og dette skaper et potensial for kostnadsbesparelse. Dette vil føre til mindre indirekte



kostnader assosiert med frakt og sammenstilling av produktet. Leveransetiden vil også bli signifikant lavere siden deler kan produseres etter behov, og ikke bestilles inn på forhånd. [19]

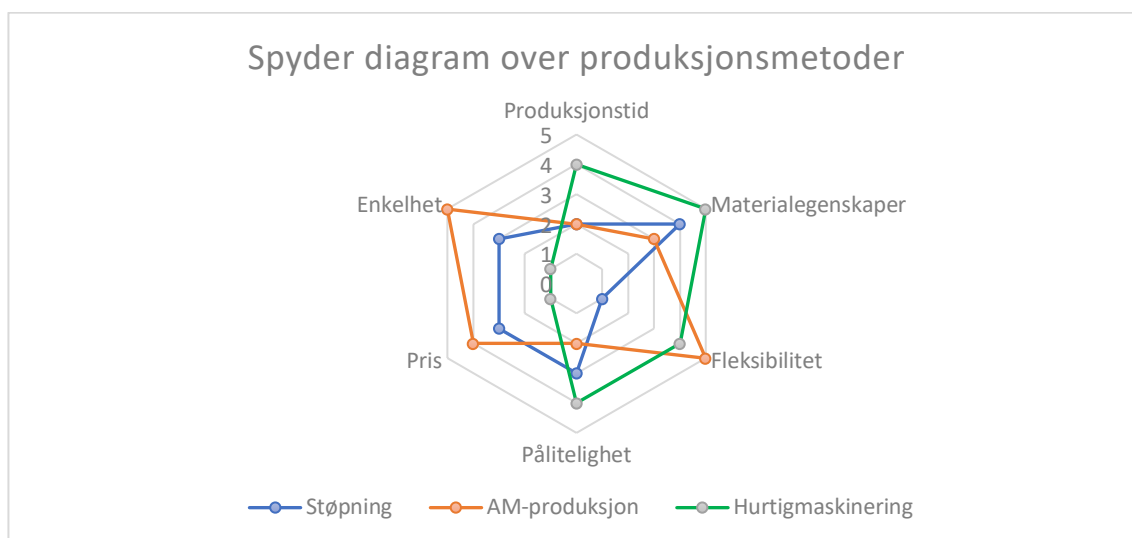
For å gi et innblikk i hvordan den komparative statikken mellom produksjonsmetodene ser ut vil det bli satt opp et spyder-diagram. I dette diagrammet vil det være enkelt å se hvilke fordeler hver av produksjonsmetodene har, og faktorene som har blitt verdsatt er ramset opp under.

- Produksjonstid:** Hvor lang er produksjonstiden?
- Materialegenskaper:** Hvor god materialutnyttelse har eksisterende løsninger?
- Fleksibilitet:** Kan produksjonsmetoden tilpasses et bredt utvalg av komponenter?
- Pålitelighet:** Hvor pålitelig er produksjonsmetoden?
- Pris:** Er produksjonsmetoden kompetitivt priset?
- Enkelhet:** Hvor enkel er produksjonsmetoden å bruke?

Disse løsningene vil bli evaluert på en skala fra en til fem. Her vil fem være særdeles bra, og en vil være dårlig.

Tabell 2: Komparativ analyse av produksjonsmetoder. Utarbeidet med hjelp av Senioringeniør Øyvind Hansen [16].

Kriterier	Støpning	AM-produksjon	Hurtigmaskinering
Produksjonstid	2	2	4
Materialegenskaper	4	3	5
Fleksibilitet	1	5	4
Pålitelighet	3	2	4
Pris	3	4	1
Enkelhet	3	5	1



Figur 2: Spyderdiagram som illustrerer styrkene og svakhetene til de forskjellige produksjonsmåtene

Senioringeniør Øyvind Hansen hjalp til med å fylle ut tabell 2, og disse resultatene har blitt plottet inn i Excel for å kunne illustrere metodenes fordeler og ulemper. Fra Spyder diagrammet kommer det frem at AM-produksjon og CNC-maskinering er de to metodene som kommer best ut av analysen. Det kommer frem at AM-produksjon er en allsidig produksjonsmetode som er best på å være fleksibel, billig og enkel. CNC-maskinering er mest pålitelig og gir best materialegenskaper, men metoden er dyr og krever mye kompetanse. Støpning er i likhet med AM-produksjon en ganske allsidig produksjonsmetode, og har sine komparative fortrinn innenfor pålitelighet og materialegenskaper ovenfor AM-produksjon.

## 1.6. Oppdragsbeskrivelse

Bakgrunnen for å gjennomføre et mastergradsprosjekt knyttet til hurtigprototypingsmetoder og additive produksjonsteknikker, er å undersøke om dette er en alternativ industriell produksjonsmetode med tilstrekkelig kvalitet og presisjon sammenlignet med tradisjonelle produksjonsmetoder. Muligheten til å gjøre et grundigere studie rundt dagens situasjon vil kunne avdekke mulige nisjer der det vil være gunstig å benytte denne typen produksjon.

Som en viktig del av prosjektet skal det også gjøres en teoriutredning, en teknologiutredninger og ulike kvalitetsundersøkelser knyttet til produksjonsmetodene. Dette skal også omfatte laboratorietester knyttet til en, eller hvis mulig flere ulike teknologier og produksjonsmetoder. Hensikten med denne utredningen og undersøkelsene vil være å danne et best mulig bilde av materialegenskaper og materialutnyttingsgraden til de forskjellige produksjonsmetodene.

En annen sentral del av prosjektoppdraget omfatter også at det skal gjennomføres en undersøkelse av markedets behovet for de relevante teknologiene, slik at det vil være mulig å identifisere bruksområder der disse produksjonsmetodene vil kunne ha komparative fortrinn.

Videre vil det også bli sett på om det er noen klar miljømessige fordeler rundt alternative produksjonsmetoder. Klimagassutslipp assosiert med produksjonsmetoden, og muligheten for å produsere deler basert på overføring av datafiler vil kunne gjøre det enklere og mindre ressurskrevende med transport av nødvendige produkter.

## 1.7. Problemstillinger og teknologiske flaskehals

For å gi en oversikt over problemstillinger og teknologiske flaskehals i oppgaven har disse blitt listet under. Dette er punkter som er viktige, og som det bør konsulteres med eksperter for å få et overordnet bilde av disse problemstillingene.

### 1.7.1. Problemstillinger og fokuspunkter

#### **Materialegenskaper**

Muligheten til å bruke RP-teknologi i en produksjonsprosess vil være avhengig av hvor gode materialegenskaper man kan forvente fra produktet. Om et produkt skal holde tilstrekkelig

kvalitet og levetid vil det stilles krav til materialet som brukes. Hvis materialeegenskapene faller drastisk som følge av produksjonsprosessen vil dette gjøre produksjonsmåten mindre aktuell. Materialkvaliteten og utvinningsgrad er derfor en sentral problemstilling ved valg av produksjonsmetode.

### **Produksjonstid og tid til marked**

Videre er produksjonstiden til produktet sentralt. Som nevnt tidligere i oppgaven er det viktig at produktet bruker kortest mulig tid i utviklingsfasen, og treffer markedet raskest mulig etter et oppdaget behov. Videre vil den marginale produksjonskostnaden være avhengig av ressursene som går inn i byggeprosessen, og jo mer tid denne prosessen tar jo mer humankapital må allokeres til produksjonen.

### **Pålitelighet og presisjon**

Påliteligheten til maskineriet er også en viktig problemstilling. Et lite pålitelig maskineri vil kunne føre til feilproduserte deler og eventuelle tilbakekallinger av en produksjonsserie. Videre vil presisjonen til maskineriet være en interessant faktor, og vil påvirke hvor komplekse deler som kan produseres.

### **Kostnadsanalyse**

Kostnadsanalysen til et produkt er sentralt i produktutvikling. For at en bedrift skal ønske å utvikle et produkt bør den tjene penger på prosjektet. Bedriften bør ha en oversikt over forventet inntekt, kostnader og risiko som inngår i prosjektet.

### **Bærekraft**

Den siste problemstillingen vil være hvorvidt produksjonsmetodene vil være bærekraftig, og om det er noen kartlagte negative eksternaliteter. Klima og natur er viktig, og i en verden som legger mer og mer vekt på bærekraftperspektivet er det viktig å kartlegge hvordan maskineriet påvirker miljøet.

### **Optimalisering av produksjon og produkt**

Videre vil optimalisering av produksjonen være en sentral problemstilling. Om et produkt skal produseres vil faktorer som stordriftsfordeler og tilgjengelig maskineri være en sentral del av optimaliseringsprosessen. For å kunne optimalisere produksjonen må produktet produseres på best mulig måte, og billigst mulig.

## **1.7.2. Teknologiske flaskehalsar og utfordringer**

### **Kunnskap om relevante problemstillinger**

For å finne de relevante problemstillingene rundt RP-teknologi blir det gjort et litteratursøk. Dette er for å finne de mest kritiske faktorene assosiert med produksjon, og bygge opp en

teoridel for å kunne formulere en nullhypotese og alternativhypotese til forsøket som vil bli gjennomført.

### **Kunnskap rundt relevante tester**

Relevante tester for material og kvalitet er en utfordring som må undersøkes. Etter at problemstillingene rundt produksjonsmetoder er identifisert vil det være mulig å forhøre seg med eksperter angående relevante tester. Disse testene vil deretter kunne brukes til å produsere data rundt materialutnyttelsen til produksjonsmetodene.

### **Kjennskap til markeder**

Kjennskapen til marked og markedstilpasninger vil være begrenset. På grunn av de høye investeringskostnadene for produksjonsverktøy er det vanskelig å si om endringer i produksjonsmetoder vil forsvare anskaffelseskostnaden til nytt maskineri. For at et produkt skal selge må det passe inn i et marked, og uten kjennskap til disse markedene vil det være nærmest umulig å se på tilbakebetalingsmetoder.

### **Kjennskap til «supply chain» nettverk**

En av fordelene til AM produksjon er at deler kan bli produsert på stedene der det er behov for komponenter, og at produksjon skjer på ordre fra en kunde. Dette vil kunne gjøre leveransekjeder og transportkostnader mindre relevante for selskaper, og være et komparativt fortrinn for AM produksjon.

### **Kjennskap til lovverk rundt produktutvikling**

Kjennskapet til det juridiske aspektet av produktutvikling vil være mangelfull. Det juridiske rundt prosessen definerer ansvar for produsent, og dette ansvaret vil definere krav til presisjon og materialkvalitet. Siden ansvarsfordelingen for en produksjonsserie er viktig bør det konsulteres med en sakkyndig person.

### **Kjennskap til alternative produksjonsmetoder**

Mangel på kjennskap til de forskjellige produksjonsmetodene vil være kritisk i dette arbeidet. Det er vanskelig å finne fordeler og ulemper med de forskjellige metodene uten å ha noe særlig erfaring på området, og det bør derfor konsulteres med en som har kjennskap rundt produksjon og produksjonsprosesser.

### **Kjennskap til prissetting og investeringsanalyser**

Mangelen på kjennskap til metodikk for å sette pris på produkter, og hvilke faktorer som blir verdsatt i en investeringsanalyse vil føre til at det er vanskelig å se på kostnadsanalyser assosiert med produksjonsverktøy. Det bør derfor konsulteres med noen som har kjennskap rundt investering og prising av produkter for å identifisere relevante faktorer.

## 2. PROSJEKTPLANLEGGING

*I denne delen av prosjektet vil planleggingen av prosjektet bli presentert. Dette er gjort for å gi en oversikt over arbeidsoppgaver, og sikre fremdrift i arbeidet. Videre vil dette også bli gjort for å ha en oversikt over alle arbeidsoppgavene som skal bli gjort under prosjektet.*

### 2.1. Prosjektmålsettinger

Målet med dette prosjektet er å undersøke produksjonsegenskaper og mulighetene rundt RP teknologi. Flere av milepælene vil være avhengig av hverandre, og det vil være tilrettelagt for en agil prosess der eventuelle oppdagelser vil være med på å pivotere og iterere prosessen.

#### 2.1.1. Hovedmål

Det overordnede hovedmålsettingen for prosjektet er formuleres som følger:

***«Å utrede, undersøke, teste og dokumentere produksjonsegenskaper, styrke, bruksegenskaper og økonomi for hurtig prototypingsteknologier og additive produksjonsteknikker, samt potensiale som framtidige industrielle produksjonsmetoder. Analyser, funn og resultater skal dokumenteres ved trinnvis rapportering og anbefalinger»***

#### 2.1.2. Delmål

Delmålene er ment å fungere som veileder i arbeidet for å nå hovedmålet. Disse trinnmålene vil gå mer direkte inn i de konkrete arbeidsoppgavene.

Delmålene er som følger;

- Å formulere bakgrunnen for oppdraget, fokus for oppgaven, vurdere markedsaspekter og sammenligne produksjonsmetoder
- Utrede om eksisterende metoder for hurtig prototyping og additiv produksjon
- Avgrense oppgave til relevant RP-teknologi
- Planlegge prosjektet med mål, milepæler, tidsplaner og utrede rundt relevant metodikk
- Undersøke teori, markedsaspektet og muligheter for teknologien
- Planlegge og gjennomføre forsøk
- Fremstille og visualisere resultater fra forsøk
- Utarbeide en kostnadsanalyse og se på økonomiske aspekter for valgt produksjonsmåte
- Gjennomføre en bærekraftsanalyse for produksjonsmetoden
- Finne fordeler og komparative fortrinn til valgt produksjonsmetode
- Utrede rundt designtilpasninger og muligheter for teknologien
- Ferdigstille og levere rapport, forberede muntlig prosjektpresentasjon

### 2.2. Tids og arbeidsplan med milepeler

For å gi en oversikt over fremdriftsplanen har dette blitt illustrert i et forenklet GANTT. Dette diagrammet vil gi en oversikt over når aktivitetene er planlagt gjennomført, og dette er oppsummert i tre punkter. Disse er; [20]

- **Aktiviteter** er en samling av arbeidsoppgaver som krever ressurser for å bli utført
- **Hendelser** er tidspunkt hvor en aktivitet starter eller slutter
- **Milepæl** en planlagt registrerbar hendelse knyttet til et definert ferdigstillelse eller oppnådd resultat

Videre stilles det 3 krav til en aktivitet. En aktivitet må være definerbar ved at den har en klar angitt start og slutt, og et arbeidsomfang. Videre må en aktivitet kunne tilordnes en ansvarlig person eller organisasjonsenhet for å kunne utføres. Det siste kravet er at en aktivitet må være vesentlig. Dette vil si at aktiviteten må ha en betydning for planen. GANTT diagrammet for denne oppgaven er oppsummert under [20]:

Tabell 3: GANTT-diagram som viser fremdriftsplanen til prosjektet

Delmål og aktivitet	Januar	Februar	Mars	April	Mai	Juni
Delmål 1						
Bakgrunn og historisk perspektiv	■			■		
Oppdragsbeskrivelse		■			■	
Problemstillinger og flaskehals			■		■	
Delmål 2						
Prosjektplan og målsetting			■		■	
Metodikk og kvalitetssikring			■			
Prosesstrinn			■		■	
Delmål 3						
Teoretisk og teknisk grunnlag			■		■	
Krav og regelverk			■			
Utredning av teknologi		■	■		■	
Utredning rundt eksisterende metoder			■		■	
Delmål 4						
Intervjuer angående forsøk			■		■	
Intervjuer angående marked				■	■	
intervjuer angående økonomi				■	■	
Intervjuer angående produksjonsutstyr				■	■	
Delmål 5						
Utvikle forsøksmetodikk			■		■	
Utarbeide forsøk			■			
Utføre forsøk				■	■	
Delmål 6						
Visualisering og fremstilling av data				■	■	
Tolkning av data				■	■	
Delmål 7						
Kostnadsanalyse				■	■	
Bærekraftsanalyse				■	■	
Komparativ statikk & QFD				■	■	

Tabell 3 fortsetter

Delmål og aktivitet	Januar	Februar	Mars	April	Mai	Juni
Delmål 8						
Finnskriving av oppgave						
Prosessevaluering og konklusjon						
Ferdigstilling og korrektur						
Levering						
Presentasjon						

\*) Planlagt påskeferie er markert i gult

Under vil milepælene for prosjektet være oppsummert

Tabell 4: Oversikt over milepæler og planlagt fullføringsdatoer

Milepel	Planlagt dato
Når bakgrunn for oppgaven og flaskehals er kartlagt	18.2-22
Når prosjektplan, metodikk og prosesstrinn er etablert	30.2-22
Når teori, regelverk og utredningen rundt teknologien er ferdigstilt	15.3-22
Når Intervjuer skal være ferdigstilt	15.4-22**
Når forsøk skal være utviklet, utarbeidet og gjennomført	1.4-22
Når data skal være visualisert og prosessert	15.4-22
Når det er gjennomført en dataanalyse og tolkning av resultatene	23.4-22
Når kostnadsanalyse og bærekraftsanalyse skal være gjort	8.05-22
Når rapport skal være ferdigstilt med prosessevaluering og konklusjon	15.5-22

\*\*) Denne milepælen er satt tidlig i diagrammet selv om den har en sen fullføringsdato. Grunnen til dette er at innspillene til utvikling av forsøket må komme før utvikling og gjennomføring av forsøket

### 2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet

- Det vil ikke bli gjort større utredninger rundt forsyningskjedene til forskjellige leverandører. Det vil heller ikke bli gjennomført en LCA-analyse rundt av forskjellige forsyningskjeder basert på tradisjonell produksjon og AM-produksjon
- Forsøkene i oppgaven vil være begrenset til hardhet og flytegrense.
- Oppgaven vil bli begrenset til produksjonsmaterialer innenfor polymergruppen.
- Det vil ikke bli gjort en spørreundersøkelse av bedrifter
- Bærekraftsanalysen vil bli gjort med to utvalgte produksjonsmetoder på grunn av manglende valg i Granta EduPack
- Det vil ikke bli gjort noen sensitivitetsanalyse av produksjonsmetodene
- Det vil ikke bli gjort en kvantitativ undersøkelse for å kartlegge hvilke parametere som påvirker materialkvaliteten til AM-produksjon
- Det vil ikke bli laget egen innfestning til prøvestavene for å få gjennomført forsøkene.
- Det vil ikke bli utredet noe rundt hvordan renteendringer påvirker profitabiliteten til bedrifter og cashflower assosiert med produksjonsutstyr
- Det vil ikke bli gjort en grundig undersøkelse av produktansvarsloven eller bli lett frem rettspraksis på området.
- Det vil ikke bli produsert modeller som kan predikere materialegenskapene basert på produksjonsparametere og produksjonsorientering.
- Det vil ikke bli gjennomført et kvalitativt studie for en enkelt bedrifts fordeler ved å investere i AM-produksjon.

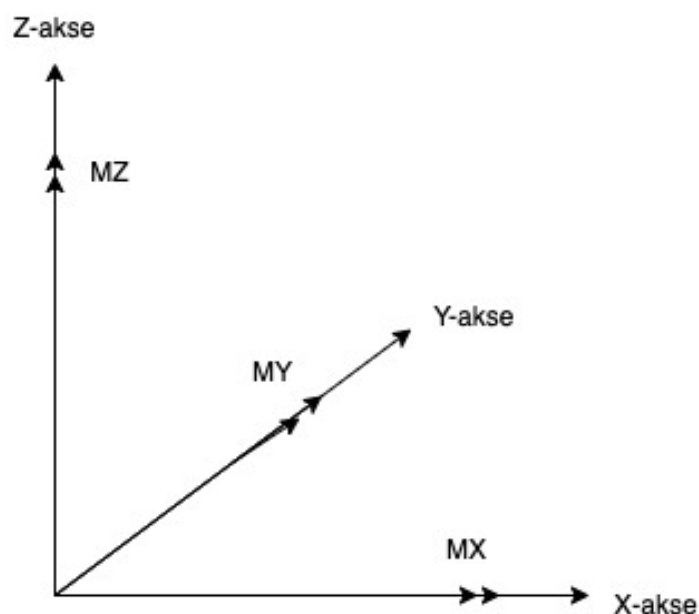


### 3. METODEBESKRIVELSE

For å sikre fremgang i prosjektet blir det satt opp en fremdriftsplan med hovedmål, delmål og milepæler. Disse skal være veiledende for prosjektarbeidet, og bidra til god fremgang i prosessen.

#### 3.1 Terminologi og begreper

Siden det vil bli sett på produksjon i et tredimensjonalt rom blir det definert et aksesystem som er gjeldende for oppgaven. Dette er for å enkelt kunne forklare hvilke akser og plan det arbeides langs. Dette aksesystemet er definert på figuren under.



Figur 3: X, Y, Z, rotasjonsakser (3), 3 og 5 akser, rotasjon defineres etter høyrehåndsregelen, dvs. positiv rotasjonsretning er med klokken, sett fra origo.

Videre vil det bli benyttet en rekke begreper og fagterminologi i oppgaven, og for å gi et innblikk i hva som menes med de forskjellige begrepene har disse blitt oppsummert i tabellen under.

Tabell 5: Oversikt over begreper som er brukt i oppgaven

Begrep	Forklaring
AM	Additiv manufacturing
RP	Rapid prototyping
STL	STereoLithography
Sintring	
Slicing	Gjøre om STL/AMF filen til 2D tversnitt av modellen
DFM	Design for manufacturing
DFAM	Design for additive manufacturing
EDA	Exploratory data analysis

Tabell 5 fortsetter

Begrep	Forklaring
Eksternalitet	Samfunnsøkonomisk gevinst eller kostnad ved produksjon eller konsum av en vare eller tjeneste
PMT	Annualisert kontantstrøm
NPV	Nåverdi

Det vil bli brukt en rekke forskjellige symboler i denne oppgaven, og disse har blitt oppsummert i tabellen under med forklaring og SI-enhet. Disse vil være gyldige for hele oppgaven, men kan få tilleggsinformasjon for å definere ting som kraftretning ol.

Tabell 6: Oversikt over hoved symbolbruk i rapporten

Symbol	Betydning/forklaring	SI-enhet
F	Kraft, generelt	N
A	Areale	m <sup>2</sup>
$\sigma$	Materilpenning, generelt	MPa
E	E-modul	MPa
$R_e$	Flytegrense	MPa
$\bar{x}$	Gjennomsnitt	-
S	Standardavvik	-
T	t-verdi	-
n	Antall målinger	-
$\alpha$	Signifikansnivå	-
$\mu$	Gjennomsnitt for en gruppe	-
$\varepsilon$	Forlengelse	mm
$\rho$	Massetetthet	Kg/m <sup>3</sup>
Q	Volumstrøm	m <sup>3</sup> /s
$\beta$	Regresjonskoeffisient	-
$\pi$	Profitt	Kr
w	Ressurskostnad	Kr
z	Ressursbruk	-

For å kunne gi en oversikt av kjerneformelene som brukes vil det bli satt opp en enkel formel liste for å definere bruk og bruksområder. Disse er kjerneformelene er oppsummert i tabellen under.

Tabell 7: Oversikt over hovedformler som benyttes i arbeidet

Formel	Betydning/forklaring	Indeks
$\sigma = \frac{F}{A}$	Denne formelen brukes til å finne ut hvor mye stress som er i prøvestavene	3.1
$A = b * h$	Denne formelen beskriver utregningen av et areal for en firkant	3.2
$PV * (1 + r)^t = FV$	Denne formelen definerer hva fremtidsverdien for en investering vil være over en gitt tidsperiode og avkastning	3.3
$C(x; w, z)$	Funksjon som definerer hvor mye x antall produkter vil koste i produksjon med ressursbruk og ressurskostnader som eksogene variabler	3.4
$\pi(x) = P * x - C(x) - b$	Profitt funksjon som beskriver fortjenesten til et selskap	3.5
$\tau = F * L$	Momentfunksjon definert som kraft ganger arm	3.6
$P = \omega * \tau$	Effekten utledet fra moment og vinkelhastighet	3.7
$q_v = \frac{V}{t}$	Volumstrøm definert som volum per tidsenhet	3.8

Spesialformler blir nærmere definert i de relevante kapitlene og avsnittene der de er relevante.

## 3.2 Løsningsverktøy og metodikk

For å gi et innblikk i programmer, tester, løsningsverktøy og diagrammer som vil bli brukt i oppgaven har disse blitt listet og forklart under.

### 3.2.1 Programvarebruk

- **Solidworks** vil bli brukt til å lage prøvestaver
- **Granta** vil bli brukt til å finne materialdata
- **Diagram.net** vil bli brukt til å lage diagrammer og figurer
- **Microsoft Excel** vil bli brukt til å lage tabeller og figurer
- **Microsoft Word** vil bli brukt til å fremstille oppgaven
- **Flowchart designer 3** vil bli brukt til å lage prosessdiagram og funksjonsanalysen.
- **Python** vil bli brukt som programmeringsspråk
- **Jupyter Notebook** vil bli brukt til å kode den statistiske analysen
- **Matplotlib** vil bli brukt til å visualisere dataene fra forsøket
- **Seaborn** vil bli brukt til å visualisere dataene fra forsøket

### 3.2.2 Tester

- **Shore test** vil bli brukt til å finne materialets hardhet
- **Strekprøver** vil bli brukt til å teste flytegrensen til materialer

### 3.2.3 Løsningsverktøy

- **IPD** Vil bli brukt for å finne tester og andre relevante synspunkter
- **QFD** Vil bli brukt for komparativ statikk
- **SCAMPER** Vil bli brukt til å identifisere bruksområder for RP teknologi
- **Preferansesett** vil bli brukt til å representere antatte meninger om konsumgruppen
- **Nåverdimetode** vil bli brukt til å se på kontantstrømmer
- **Profittfunksjon** vil bli brukt til å finne et optimalt antall produserte enheter
- **ABC-kalkyle** vil bli brukt til å se på inntekter til forskjellige maskineri

### 3.2.4 Diagrammer

- **Spyder diagram** vil bli brukt til å analysere markedet produktet skal passe inn i.
- **GANT diagram** vil bli brukt til å holde oversikt over fremdriften i prosjektet
- **House of quality** vil bli brukt til å gjøre komparativ statikk
- **Histogrammer** vil bli brukt til å se på fordelingen av innsamlede data
- **Boks-plott** vil bli brukt til å se etter ekstremmålinger

### 3.2.5 Metodebruk

#### **Integrated product development IPD/ IPPD**

Integrert produktutvikling er en metode som sikter på å få et komplett og fullstendig endeprodukt. IPD/IPPD har 11 underpunkter som brukes til å kvalitetssikre endeproduktet for brukergruppen. IPD/IPPD blir ofte brukt i tverrfaglige ekspertteam hvor ingeniørarbeidet skjer parallelt med annet arbeid. IPD/IPPD fokuserer også på å ivareta kundebehovet, og det blir ofte hentet informasjon om kundens ønske til funksjonalitet tidlig i prosessen. For en oversiktlig forklaring av IPD/IPPD har alle faktorene som inngår i prosessen blitt listet opp i tabellen under; [21-24]

Tabell 8: Oversikt over faktorer i IPD tankegangen

Faktorer	Beskrivelse
Kundebehov	Henting av informasjon angående kundegruppens behov
Planlegging og kvalitetsstyring	Planlegging av kortsiktige mål, men også det overordnede strategiske målene til bedriften

Tabell 8 fortsetter

Faktorer	Beskrivelse
Tverrfaglige team	Involvering av flere fagområder for enklere overgang til produksjonsdelen av prosjektet
Integrert prosessdesign	Involvering av deltagere i alle prosesstrinnene. Dette involverer alt fra kundestøtte til ingeniørarbeidet
Kostnadsstyring	Tidlig bestemmelse av kostnadsramme for produktet
Involvere interessenter	Involvering av interessenter på forskjellige nivåer tidlig i prosessen. Dette er alt fra butikker til aksjonærer
Robust design	Prosessten sikter på å utvikle et optimalisert og robust design.
CAD/ CAM verktøy	Bruk av digitale hjelpemidler for produktdesign og produksjon.
Produkttesting og produksjon	Bruk av hjelpemidler som 3D-printing for å teste produktet og egenskaper tidlig i prosessen
Effektiv tilnærming til utviklingsprosessen	Fokus på en mer agile prosess fremfor en byråkratisk prosess
Kontinuerlig forbedring av produktet	Reevaluering av løsninger og egenskaper som er indifferent for kundegruppen

I denne oppgaven vil IPD/IPPD tankegangen bli brukt for å involvere eksperter i arbeidsprosessen. IPD tankegangen vil bli brukt i sammenheng der det oppstår teknologiske flaskehalsar..

### **Osbourne S.C.A.M.P.E.R. (ref)**

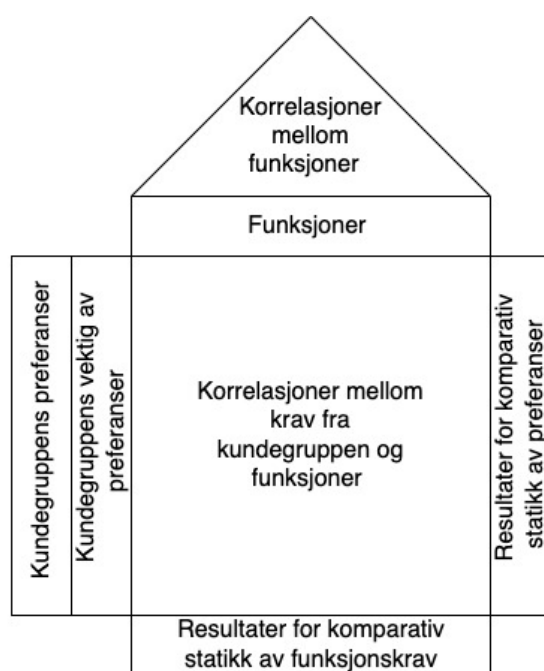
SCAMPER er en metodikk som brukes for å modifisere produktet etter at det har blitt definert en rekke egenskaper. Dette vil være en måte og eliminere egenskaper, legge til egenskaper og utvikle et produkt slik at det treffer markedet bedre. S.C.A.M.P.E.R er bygget opp av følgende punkter:

- S - Substitute, erstatt
- C - Combine, kombinere
- A - Adapt, adaptere
- M - Magnify/ Modify, skalere/modifisere
- P - Put into use, finne bruksområde
- E - Eliminate, eliminere
- R - Re arrange/Reverse, endre/reversere

Gjennom å teste egenskapene til en produksjonsprosess med S.C.A.M.P.E.R metoden vil det være mulig å forenkle/ modifisere prosessen gjennom kritisk tankegang. Denne metoden har blitt brukt kontinuerlig for å finne løsningsalternativer til prosessen og testene som skal gjøres. I denne oppgaven vil S.C.A.M.P.E.R også bli brukt til å se på muligheten til å kombinere produksjon med etterbehandlingsmetoder, og om dette påvirker materialegenskapene til endeproduktet. [25-26]

## QFD – House of quality

House of quality er en matrisefremstilling av kundegruppens behov og funksjonelle krav til produktet. Dette er en av dele til den iterative prosessen som heter quality function deployment, og ved hjelp av denne metoden kan det enkelt bli gjennomført en komparativ analyse. Modellen vil bli brukt i kombinasjon med kundegruppens antatte preferanser, og sammenligne disse med de tekniske kravene til produksjonsmetoden. QFD «house of quality» er illustrert på figuren under, og hver del av huset er forklart. [27-28]



Figur 4: Innhold i et QFD "House of quality"

QFD vil bli brukt til å se på krav markedet setter til maskiner, og hvilke bruksområder og funksjoner RP teknologi skal ha for å kunne tilfredsstille behovet for produsentene. Disse funksjonskravene vil bli hentet fra intervjuer, og vil bli målt opp mot egenskapene til relevant RP teknologi. Korrelasjonsfaktorene mellom funksjonelle krav og bedrifters preferanser vil være illustrert i figuren under [29]:

Relationships	
Strong	●
Moderate	○
Weak	▽

Figur 5: Korrelasjonsfaktorer for House of quality

I figuren over viser det til at «●» betyr en sterk korrelasjon mellom de funksjonelle kravene og kundegruppens behov. Videre er «○» definert som en moderat korrelasjon, og «▽» er definert som svak korrelasjon. Denne skalaen har blitt brukt for å forenkle den komparative statikken, og gi en retningslinje på hvilke faktorer som har størst innvirkning på kundegruppens oppfatning av produktet. Videre har det blitt definert et ønske om hvordan funksjonskriteriene skal tolkes, og disse er illustrert i figuren under;

Direction of Improvement	
Maximize	▲
Target	◇
Minimize	▼

Figur 6: Måldefinisjon for produktets funksjoner

For å vite hvordan en faktor ved produktet skal videreutvikles vil det også defineres en faktor som beskriver hvordan produktet kan forbedres. Et ønske om å maksimere egenskapen til produktet vil være beskrevet med «▲», videre vil en egenskap som produktet skal ha bli notert som «◇» og en faktor som skal minimeres blir markert som «▼».

Den delen av QFD huset med egen symbolikk er taket. Her vil «+» indikere en positiv korrelasjon mellom de funksjonelle kravene, «-» definerer en negativ korrelasjon og hvis feltet ikke er fylt inn indikerer dette ingen korrelasjon.

Correlations	
Positive	+
Negative	-
No Correlation	

Figur 7: Tolkning av korelasjoner mellom funksjonskravene

## **Preferansesett**

Dette er en måte å fremstille tilbakemeldingen fra intervjuene i en vektor. Gjennom samtaler med eksperter vil det danne seg et bilde av hva bedrifter verdsetter og har preferanser for i et RP-verktøy. Dette vil også være en metode for å avdekke egenskaper kundegruppen stiller seg indifferent ovenfor, slik at disse kan elimineres ved videre arbeid. Denne metodikken vil også gjøre det lettere å koble RP-teknologi opp mot et eventuelt marked, og vil være et av de sentrale bindeleddene mellom økonomifaget og ingeniørfaget. Denne metodikken setter et par viktige punkter som må følges for at teorien skal kunne fungere, og disse er som følger:

### **Fullstendighet**

Fullstendighet vil si at en konsument enten foretrekker, er indifferent eller ønsker minst mulig av faktoren. Et eksempel på dette vil være at konsumentene ønsker mest mulig funksjonalitet i produktet, men er indifferent ovenfor farge og ønsker et billigst mulig produkt. [30-31]

### **Refleksivitet**

Refleksivitet vil si at konsumenten har en definert preferanse for alle vektorsettene i et utvalg. En konsument kan foretrekke et sett med faktorer over et annet, men en konsument må ha en mening om alle faktorene i preferansesettet. [30-31]

### **Transitivitet**

Transitivitet betyr at hvis en konsument foretrekker et sett over et annet må også konsumenten foretrekke et tredje sett hvis det er bedre for konsumenten enn de to foregående settene. Et eksempel på dette vil være hvis en konsument har en avdekket preferanse for mest mulig kaffe, vil konsumenten alltid foretrekke det alternativet med mest kaffe. [30-31]

### **Kontinuitet**

Kontinuitet betyr at indifferenskurven til konsumenten er avgrenset. Dette punktet handler om at konsumenten vil velge seg frem til den ideelle kombinerte mengden. Dette punktet er mer rettet mot økonomi, og vil ikke være like relevant for denne prosjektfasen. [30-31]

### **Monotonisitet**

Monotonisitet betyr at hvis to faktorer i preferansesettet til konsumenten er bedre enn et annet utvalg vil konsumenten foretrekke det settet som gir konsumenten høyest nytteverdi basert på de faktorene som øker nytteverdien. Dette vil si at hvis en av faktorene i settet øker vil konsumenten ta et valg basert på preferansene.

Alle disse nevnte punktene vil antas å være oppfylt siden den aggregerte konsumenten i markedet vil være å anse som rasjonell. [30-31]



### 3.3. Databehandling og forsøksmetodikk

#### 3.3.1 Datainnsamling

For at dataene som blir hentet inn skal være mest mulig representative vil det bli produsert flere prøvestaver til hver test. Dette er for at verdiene i datasettet ikke skal være ekstremverdier, og at verdiene skal være mest mulig representative ovenfor de reelle dataene. For at kvaliteten av dataene skal være tilfredsstillende kan det stilles følgende spørsmål. [32]

- Er utvalget stort nok?
- Er utvalget representativt for hele populasjonen?
- Har målingene pågått lenge nok?
- Har observatøren påvirket målingene?
- Er variabler og kjennetegn entydig og fornuftig definert?
- Er målingene nøyaktige?

For at disse kravene skal være oppfylt vil det bli satt krav til flere homogene prøvestaver som vil knekkes på samme måte. Videre er det viktig at målingene er identiske distribuert og uavhengige av hverandre. Dette er for å unngå at prøvesvarene varierer på grunn av faktorer som ikke måles i forsøket, og at sammenligningsgrunnlaget skal være det samme. Eksempler på dette kan være at en av prøvestavene får bøyespennning i tillegg til normalspenningen, og at verdien denne testen gir ikke vil være distribuert likt som resten av testene. [32-33]

#### 3.3.2 Statistisk grunnlag

Videre vil resultatene fra forsøkene som skal gjennomføres være kontinuerlige variabler. For å få et bedre bilde på resultatene vil gjennomsnitt bli brukt til å sammenligne de forskjellige gruppene. Gjennomsnitt er definert med følgende formel: [32]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.9)$$

For å se på fordelingen av dataene er det også gunstig å se på medianen til dataene. Medianen er en målenhet som beskriver midten av datasettet. Om antall målinger er oddetall vil medianen være den midterste målingen. Om det er et partall vil medianen være midt mellom de to midterste målingene. [32]

For å få et bedre bilde på dataene vil det også bli brukt egenskaper som standardavvik og varians. Dette er to verdier som forteller om avvikskvadratet og spredningen til målingene. [32]

$$\text{variens} = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.10)$$

$$\text{Standardavvik} = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

Her vil standardavviket være kvadratroten av variansen, og disse uttrykkene kan brukes til å lage et konfidensintervall for beskrive resultatene. Dette vil være nyttig for å definere materialverdiene og utnyttelsesgrad. [32]

For å kunne lage konfidensinterfaller må det bestemmes et signifikansnivå. Signifikansnivået forteller noe om hvor stor feilsannsynlighet som kan aksepteres, og forteller oss noe om hvor stor sannsynlighet det er for at det blir gjort en type 1 feil i hypotesetestingen. I konfidensintervallet vil dette fortelle noe om hvor stor sannsynlighet det er for at målinger vil falle utenom de to ytterpunktene som er regnet ut. I denne oppgaven vil signifikansnivået være satt til 0.05. [32]

For å visualisere og beskrive dataene vil det også bli brukt et histogram. Et histogram er et søylediagram visualiserer inneholde i dataene, og arealet av alle søylene er til sammen lik 1. En viktig del av å lag histogrammer er å definere antall intervaller som brukes, og dette er gjort for å gi et best mulig inntrykk av dataene [32]. I denne oppgaven er histogrammene laget med en funksjon i python, og intervaller er bestemt internt i funksjonen.

Videre vil det også bli sett på skjevheten og kurtosisen til fordelingene. Dette er to verdier som forsøker å si noe om formen til histogrammene. Skjevheten forteller noe om hvordan toppen i histogrammet ligger i forhold til en normalfordelt kurve. For å kunne si noe om skjevheten til histogrammene benyttes det tabellverdier og en tommelfingerregel. Disse er oppsummert i tabellen under. [32]

Tabell 9: Tolkning over verdier fra skjevhetsanalyse av statistiske fordelinger

Karakteristikk	Betingelse
Tilnærmet symmetrisk	$ \text{Skjevhet}  < 0.5$
Svakt skjev	$0.5 <  \text{Skjevhet}  < 1$
Svært skjev	$ \text{Skjevhet}  > 1$

For å regne ut selve verdien vil det som oftest bli brukt et statistikkprogram eller funksjoner fra Scipy, men verdien kan også regnes ut for hånd med følgende formel.

$$\text{Skjevhet} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (3.12)$$

For å kunne få et inntrykk av hvor spisst histogrammet er kan det bli sett på kurtosis til kurven. Tommelfingerreglene for kurtosis er oppsummert i tabellen under.

Tabell 10: Oversikt over tolkning av kurtosis analyse

Karakteristikk	Betingelse
Spiss topp	Kurtosis > 0
Normalfordelt	Kurtosis ≈ 0
Utflytende	Kurtosis < 0

Kurtosis er også en verdi som er vanlig å regne ut med programmer, men kan regnes ut med følgende formel.

$$Kurtosis \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \quad (3.13)$$

Videre vil verdiene til student-t fordelingen bli brukt siden det opereres med relativt få målinger ( $n < 30$ ). Videre må tabell E.5 fra Løvås sin bok benyttes for å få riktig antall standardavvik fra det målte gjennomsnittet. [32]

$$\left[ \bar{X} - z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (3.14)$$

Videre kan det også testes om det er en statistisk signifikant forskjell i materialstyrkene til de forskjellige produksjonsmetodene. Dette vil bli gjort ved en hypotesetest, og resultatet fra disse testene vil vise om produksjonsmetoden har en statistisk signifikant innvirkning på materialelegenskapene. [32]

For å gjennomføre hypotesetesten vil det bli satt opp en arbeidshypotese i forkant av forsøkene, og denne vil være påstanden som ønskes å teste. Denne er også kjent som alternativhypotesen, og må bevises med data. Nullhypotesen velges som den motsatte påstanden. For å gi en oversikt over feil som kan bli gjort i en hypotesetest har det blitt satt opp en tabell under som viser de forskjellige utfallene. [32]

Tabell 11: Oversikt over resultater fra hypotesetest med type-1 og type-2 feil

Naturens ukjente sannhet:			
		H0 er sann	H1 er sann
Vår beslutning	Behold H0	Riktig konklusjon	Gal konklusjon (Type 2 feil)
	Forkast H0	Gal konklusjon (Type 1 feil)	Riktig konklusjon

I tabellen over kommer det frem at hvis nullhypotesen kastes, men den egentlig stemmer er dette en type 1 feil og dette kalles en forkastningsfeil. Om nullhypotesen beholdes, men det er H1 som stemmer er dette en type 2 feil og dette kalles en godtakningsfeil. Av disse to feiltypene

er det vanlig å anta at forkastningsfeil har størst konsekvenser, og derfor bør sannsynligheten for type 1 feil minimeres. [32]

For selve hypotesetesten benyttes en tosidig T-test. Dette er den vanligste måten å sammenligne kvantitative data for to uavhengige grupper, og dette er gjort for å undersøke om det er en forskjell på de to gruppegjennomsnittene. Dette gjør at det kan settes følgende forutsetning for hypotesetesten.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (3.15)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (3.16)$$

For å kunne gjøre en beslutning i dette tilfellet benyttes alternativ 3 fra regel 8.2 på side 336 i Løvås sin bok. Denne sier som følge; [32]

Tabell 12: Oversikt over nullhypoteser, alternativhypoteser og forkastningsgrunnlag

$H_0$	$H_1$	Forkast $H_0$ hvis
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$ T  > t_{\alpha/2}$

For å finne selve T-verdien må det regnes ut en interpolert varians. Dette blir gjort under antagelsen av at gruppens varianser er like, og denne gjetningen utgjør den interpolerte variansen. Interpolert varians regnes ut på følgende måte;

$$S_P^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3.17)$$

Videre brukes den interpolerte variansen til å regne ut en T-verdi på følgende måte;

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_P \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3.18)$$

Denne T-verdien vil deretter bli til å finne en p-verdi, også kjent som signifikanssannsynligheten. Denne p-verdien er «*sannsynligheten for å få et resultat som er minst like mye i favør av H1 som det observerte resultatet- dersom H0 er riktig*» [32].

Denne p-verdien regnes ut ved å putte T-verdien inn i styrkefunksjonen til en T-test. Denne styrkefunksjonen «*angir sannsynligheten for å forkaste nullhypotesen for ulike verdier av denne ukjente parameteren*» [32]. I denne oppgaven vil denne verdien bli regnet ut med en funksjon fra SciPy.stats. «*Styrkefunksjonen til T-testen er ikke oppgitt, fordi det er ganske komplisert å beregne den*» [32]. På grunn av dette blir det etter henvisning i boken brukt regel 6.18 på siden 263 i boken til Løvås, og det henvises til styrkefunksjonen til en tosidig z-test. Denne er gitt med følgende formel.

$$p - verdi = \gamma(\mu) = 1 - G\left(\frac{z\alpha}{2} - \frac{\mu - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right) + G\left(-\frac{z\alpha}{2} - \frac{\mu - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right) \quad (3.19)$$

Denne p-verdien brukes deretter til å sjekke om nullhypotesen kan forkastes, og dette gjøres ved å sammenligne signifikansnivået med p-verdien. Om p-verdien er høyere enn signifikansnivået vil nullhypotesen bli forkastet. [32].

### Visualisering av data

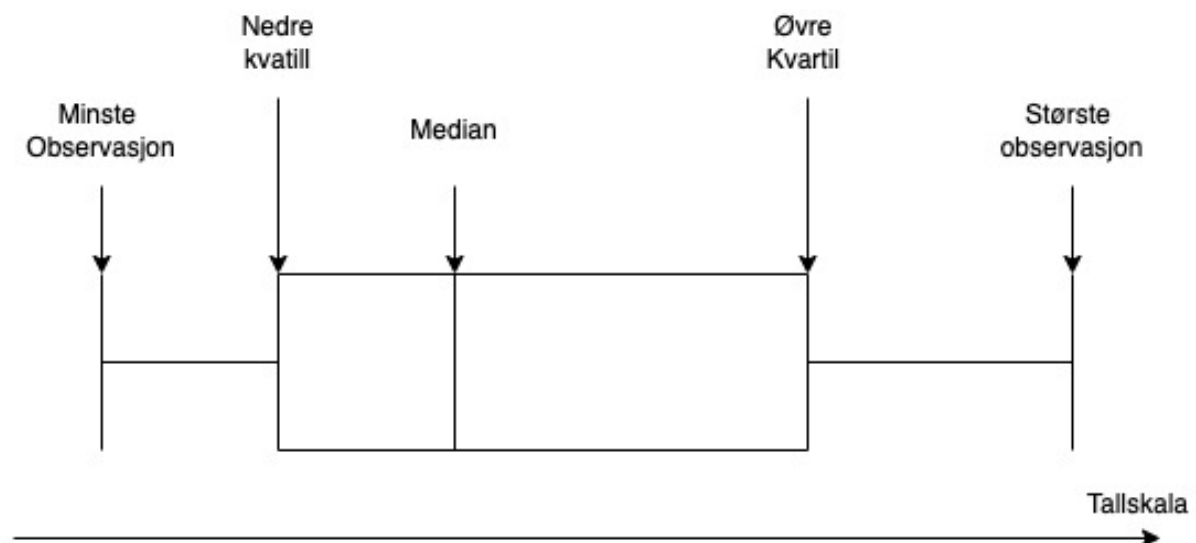
For å visualisere dataene vil det bli burkt forskjellige diagrammer fra datapakkene seaborn og matplotlib. Disse bibliotekene er enkle å bruke sammen med lister i python, og vil derfor gjøre det enkelt å visualisere dataene. Det vil hovedsakelig bli laget histogrammer og box-plotter for å gi en oversikt over data, og gi et innblikk om datasettet inneholder mange ekstremmålinger. «Exploratory data analysis» (EDA) er et viktig, og ofte første steg i prosessen rundt dataanalyse og modellbygging. [34]

### Preprosessering av data

Etter at dataene har blitt visualisert vil de bli gjennomgått for eventuelle feil i datasettet. Dette vil bli gjort med en deskriptiv analyse av datasettet, og en kontroll etter eventuelle ekstremverdier. Denne evalueringen av datapunkter vil bli gjort med en kombinasjon av visualisering og deskriptiv informasjon av dataen. Grunnen til at dett er at kvaliteten og mengden relevant informasjon i datasettet vil påvirke en dataanalyse. Det er derfor kritisk at datasettet blir undersøkt og pre-prosessert. [34]

### Boks-plott

Et boks-plot er en grafisk fremstilling av minste og største observasjon sammen med medianen, 25% kvartilen (nedre kvartil) og 75% kvartilen (øvre kvartil). Ved en symmetrisk fordeling vil medianen ligge i midten mellom nedre og øvre kvartil, og på figuren under er det vist en venstreskjevt fordelt boks-plot. Boks-plot er en enkel metode til å sammenligne forskjellige datasett [32].



Figur 8: Tolkning av et boks-plot

### 3.4. Kvalitetssikring

Det vil primært bli benyttet fagstoff fra anerkjente forlag, samt fag og vitenskaplige artikler som er kvalitetssikret gjennom fagfelleurdeim eller på annen måte. Nettekilder vil bli ettergått kvalitetsmessig så langt dette er mulig. Videre vil rapporten bli finkjemmet for skrivefeil og referansebruk. Det vil også bli brukt terminologi fra standarder for å beskrive prosesser og konstruksjoner, men disse vil ikke bli brukt i sin helhet.

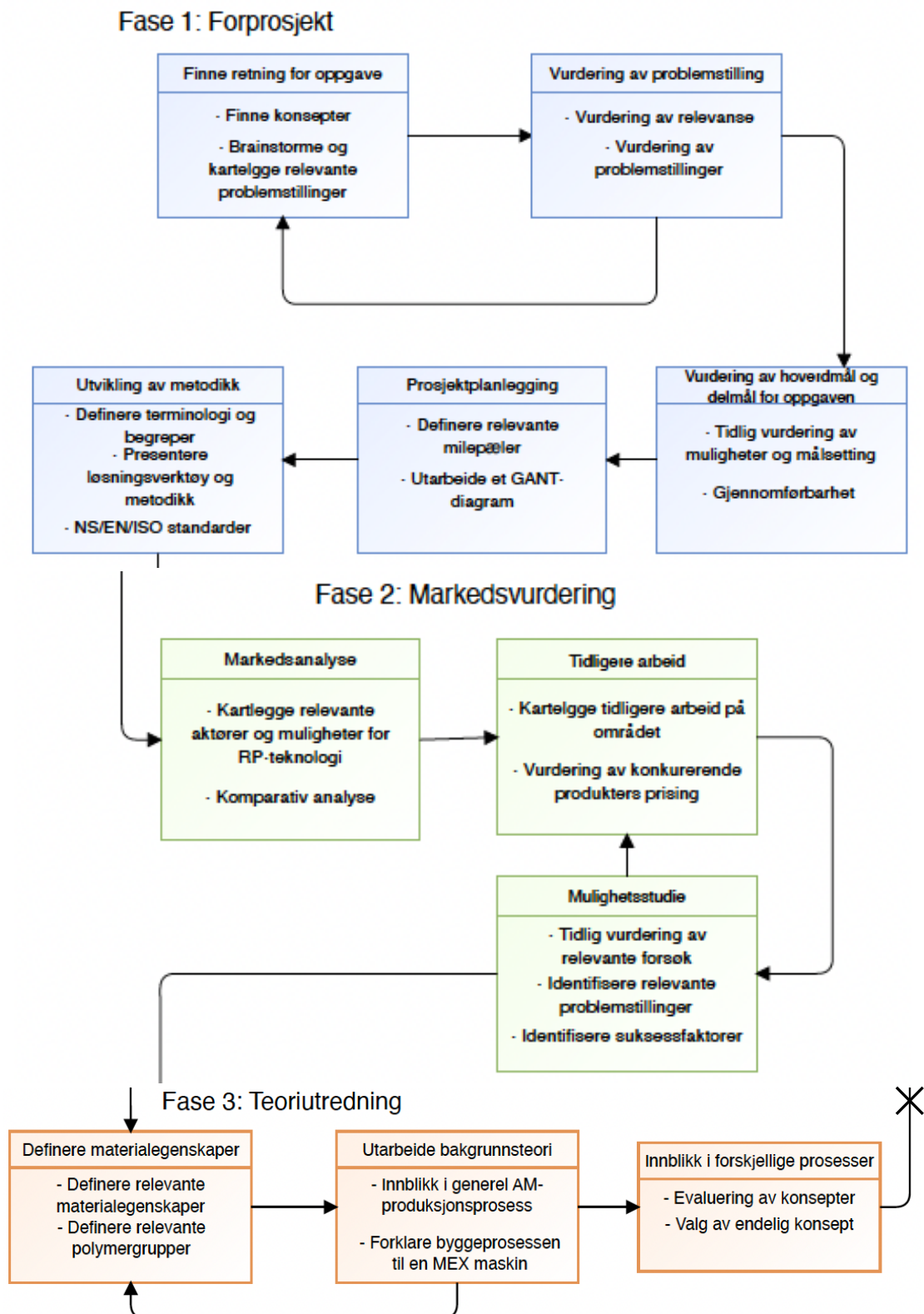
Videre er det mange nye standarder assosiert med AM produksjon siden dette er en relativt ny teknologi, og siden det er mangel på data fra industrien er riktig standardbruk hjørnesteinen for en god produktutviklingsprosess. Dette er viktig siden det er en rekke faktorer i byggeprosessen som kan påvirke kvaliteten til endeproduktet. På grunn av dette er det essensielt med standarder som kartlegger utviklingsmetodikk for produkter og fremgangsmåter for å få best mulig resultater fra produksjon. Det vil derfor bli lagt vekt på følgende standarder.

- **ISO 9000** vil være begrepsapparatet til kvalitetssikring
- **ISO 9001** vil være grunnlaget for kvalitetssikring
- **ISO 14001** vil definere bærekraftperspektivet
- **ISO 527-1:2012** vil bli brukt til å utvikle strekkforsøk
- **ISO 527-2:2012** vil bli brukt til å utvikle strekkforsøk
- **ISO 17296-3:2014** definerer egenskaper og korresponderende testmetoder for AM produksjon
- **ISO/ASTM 52901-16** definerer krav til kjøp av AM produserte deler
- **ISO 48-4:2018, ASTM D2240** og **NS ISO 868:2003** definerer hvordan Shore D hardhetstesten skal gjøres

Viktige elementer knyttet til standardbruden vil bli nærmere utdypt i de relevante avsnittene og kapitlene.

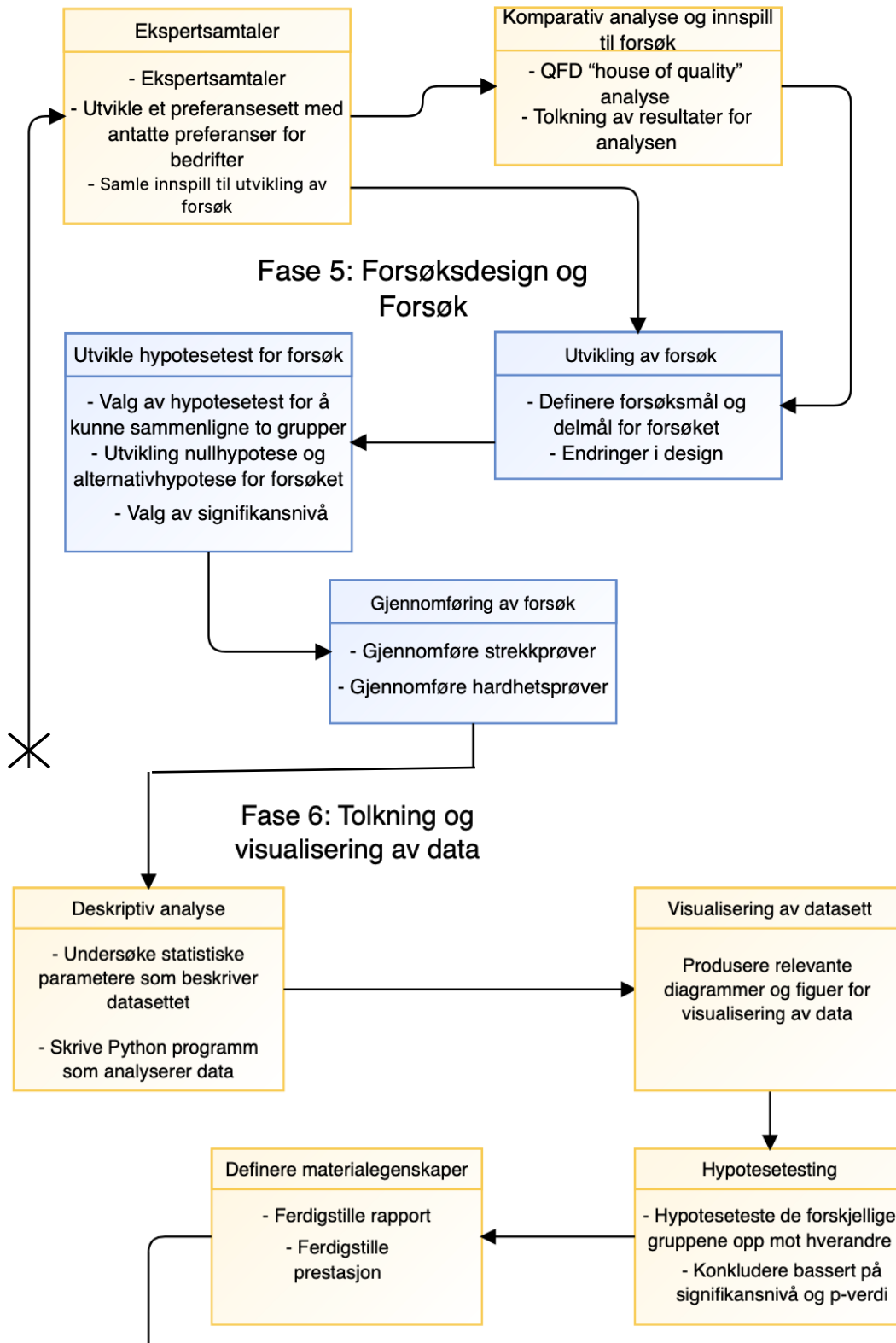
### 3.5 Arbeidsmåte, prosesstrinn og trinnspefisering

Det har blitt laget en visualisert oversikt over prosesstrinnene for å gi et innblikk i hvordan arbeidsprosessen har blitt bygget opp.



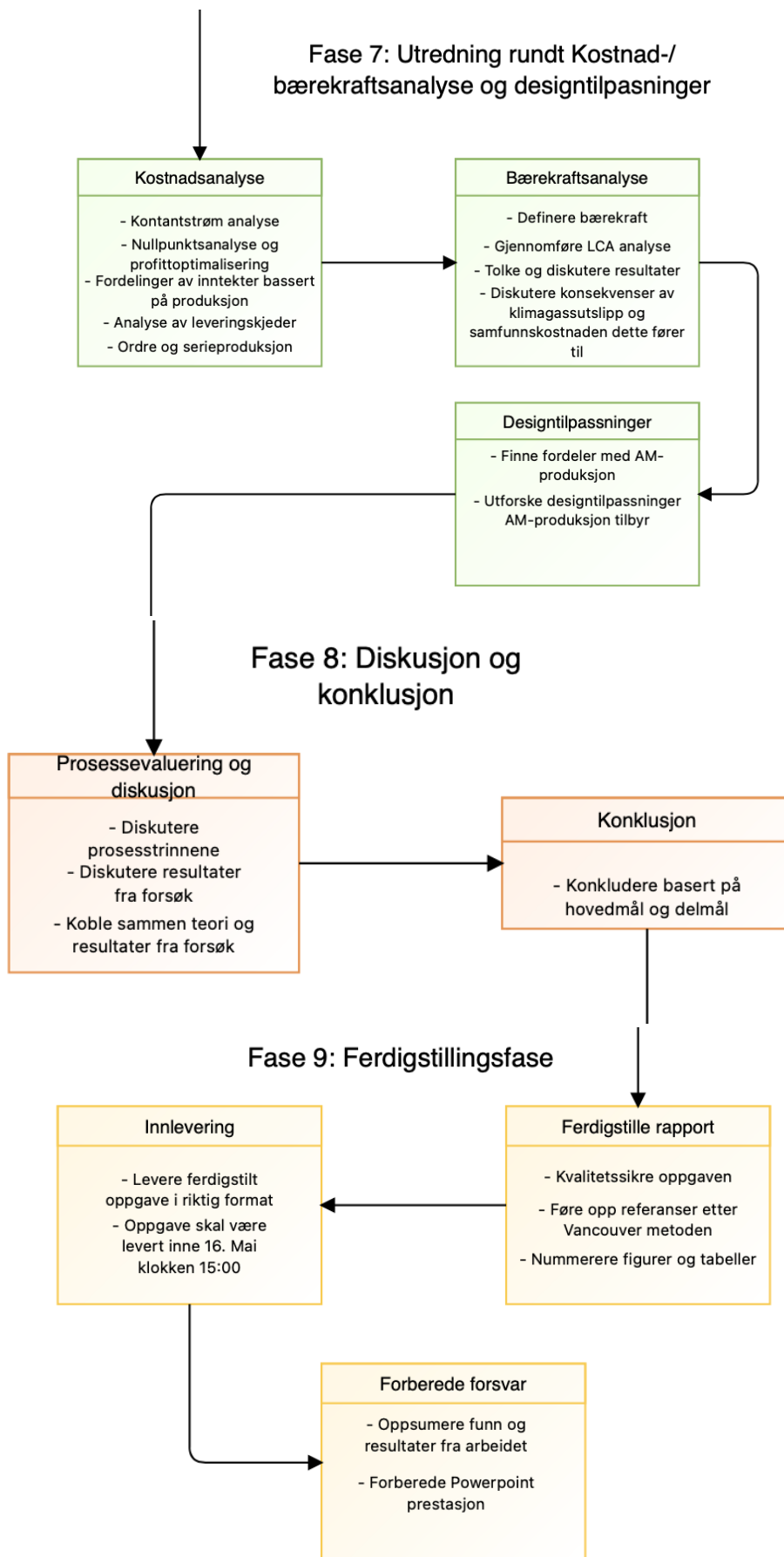
Figur 9: Prosesstrinn 1-3

## Fase 4: Ekstern tilbakemelding



Figur 10: Prosesstrinn 4-6





Figur 11: Prosessdiagram del 7-9

### 3.5.1 Forprosjekt

I denne delen av prosessen vil fremgangen av prosjektet bli planlagt, og at det skal være enkelt å vite hva som skal gjøres gjennom prosjektet. Det vil bli laget fremdriftsplaner, flaskehalsar vil bli kartlagt, oppgaven vil begrenses og det vil bli utredet rundt relevant metodikk for oppgaven.

### 3.5.2 Markedsvurdering

Dette prosesstrinnet vil gjøre en markedsvurdering for å finne bruksområder til produktet. Det vil bli sett på markedsmuligheter for teknologien, og på fordeler sammenlignet med andre typer produksjoner. Videre er det viktig å kunne se på hvordan teknologien passer inn i dagens marked, og hvilket suksesskriterier som må oppfylles for at teknologien skal kunne brukes på et industrielt nivå.

### 3.5.3 Teori utredning

I denne delen av oppgaven vil det bli utredet rundt teorien som inngår i oppgaven. Det vil bli satt søkelys på å finne ut hva som vil påvirke materialeegenskapene til produkter som har blitt bygget med RP-teknologi. Videre vil det også bli gitt en oversikt over forskjellige typer materialeegenskaper som vil være veiledende under en produktutviklingsprosess.

Det vil også bli gjort et overblikk over forskjellige typer AM-produksjon, og hvordan byggeprosessen skiller seg fra hverandre. Det vil bli utredet om fordeler og ulemper rundt produksjonsmetodikken, og det vil bli tatt opp relevante utfordringer som påvirker endeproduktet.

### 3.5.4 Ekstern tilbakemelding

I denne delen av oppgaven vil det bli gjort intervjuer for å finne ut av perspektiver og tilbakemelding på faktorer som kan påvirke oppgaven. I denne delen av oppgaven vil det bli gjort intervjuer med en ekspertgruppe for å få innspill på synspunkter i oppgaven. Disse intervjuene vil bli brukt til å lage en liste med antatte krav det er realistisk å forvente at en kundegruppe vil verdsette ved anskaffelser av produksjonsutstyr

. Ekspertene vil bli valgt for å kunne gi veiledning rundt de teknologiske flaskehalsene, og deres innspill være formende for videre arbeid på de gitte områdene. Videre vil disse ekspertene bli brukt til å identifisere metodikk og fremgangsmåter for å kunne sammenligne og vurdere RP-teknologiene

### 3.5.5 Forsøksdesign og forsøk

Dette prosesstrinnet er sentralt for å få gjennomført den empiriske delen av oppgaven. I denne delen av oppgaven vil det bli definert et forsøk, hvor alle trinn skal forberedes og

dokumenteres. Det vil også bli satt opp forutsetninger for forsøket slik at resultater kan etterprøves hvis det skulle være nødvendig.

Disse forsøkene vil bli designet slik at de er etterprøvbare, og alle maskiner og produksjonsparametere vil bli ført opp.

### 3.5.6 Tolkning og visualisering av data

Her vil fokuset bli satt på å lage modeller og visualisere dataene som har blitt samlet inn under forsøket. Det vil bli gjort en analyse av den deskriptive statistikken, og deretter vil det bli gjort en visuell analyse av dataen. Dette blir gjort etter en standard EDA metode, og alle funnen vil bli presentert i kapittelet.

### 3.5.7 Kostnad-/bærekraftsanalyse og designtilpasning

For å kunne få et innsyn i den komparative statikken til produksjonsmetodene vil det bli satt opp en enkel kostnadsanalyse. Siden det er flere faktorer som spiller inn i den komparative statikken vil det også bli gjort en bærekraftsanalyse. Til slutt vil det også bli gjort en utredning av designtilpasninger og muligheter til en valgt teknologi.

Videre vil det også bli gjort en teoretisk tilnærming til designtilpasninger som kan gjøres med AM-produksjon, og hvordan disse kan påvirke pivoteringene og itereringene av et produkt i utviklingsfasen.

Som det siste punktet under teoriutredningen vil det bli tatt opp etterbehandlingsmetodikk av AM-produserte deler. Her vil det bli sett på etterbehandling som kan forbedre materialeegenskapene og levetiden til produktet.

### 3.5.8 Diskusjon og konklusjon

I denne delen av prosessen vil resultatene fra forsøkene bli diskutert, og forsøkene vil bli koblet opp mot teoridelen. Denne diskusjonen vil danne grunnlaget for konklusjonen, og konklusjonen vil bli satt opp mot hovedmål og delmål for oppgaven.

### 3.5.9 Ferdigstillingsfase

I denne delen av oppgaven vil det bli fokusert på å ferdigstille dokumentet, kvalitetssikre teksten og sørge for at oppgaven svarer på problemstillingen som har blitt reist. Videre vil det også bli lagt fokus på å ferdigstille relevante funn på en mest mulig illustrerende måte, og det vil bli laget en prestasjon til forsvaret av oppgaven.

## 4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING

*I denne delen av oppgaven vil det bli presentert underleggende teori som støtter opp under kausalitetsspørsmålet mellom produksjonsmetodikk og materialegenskaper.*

### 4.1. Grunnlagsteori

For å gi en oversikt over sammenhengene mellom materialoppbygging, produksjonsmetode og materialkvalitet vil det bli bygget et teoretisk grunnlag. Teoridelen sikter også på å finne kausale faktorer som kan påvirke materialkvaliteten, og det vil bli sett på alt fra oppbyggingen av materiale til produksjonsmetodikken i en MEX prosess.

#### 4.1.1 Materialvalg og egenskaper

For å kunne kvalitetssikre et produkt er det viktig at produktets egenskaper svarer problemstillingene produktet skal løse. Det er en rekke materialegenskaper som kan evalueres, og et produkt bør produseres i et materiale som svarer til best på problemstillingene. De relevante egenskapene for denne oppgaven vil være de fysiske og mekaniske egenskapene, og disse er listet opp i tabellen under. Resten av egenskapene må kartlegges ved videre arbeid. [18]

Tabell 13: Relevante egenskaper til materialvalg

Egenskaper	karakteristikk
Fysiske	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tetthet</li><li>• Viskositet</li><li>• Porøsitet</li><li>• Permeabilitet</li><li>• Reflektivitet</li><li>• Krystallstruktur</li></ul>
Mekaniske	<ul style="list-style-type: none"><li>• Styrke</li><li>• Spenning-/tøyningsdiagram</li><li>• Duktilitet</li><li>• E-modul</li><li>• Poisson's ratio</li><li>• Hardhet</li></ul>

#### Spenningstøyningsdiagram

En av de mer grunnleggende måtene og definere materialegenskapene er et spenning-/tøyningsdiagram. Et spenning-/tøyningsdiagram beskriver en rekke egenskaper til materialene, og vil være en sentral del av å analysere et materiale, og blant disse er. [35]

- E-modul
- Flytegrense
- Strekkfasthet
- Bruddspenning

### **E-modul**

Beskriver hvor stivt materialet er, og brukes i sammenheng med spenning i materialet til å regne ut forlengelse i et materiale. [35-36].

$$\sigma = \epsilon E \quad (4.1)$$

Dette er definert som Hooke's lov, og forteller at spenningen i materialet er E-modulen ganget med forlengelsen som har kommet som følge av en kraftpåvirkning. Videre kan dette skrives om til uttrykket under, som definerer E-modulen. [35-36].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.2)$$

Fra ligning 4.2 kommer det frem at elastisitetsmodulen beskriver sammenhengen mellom stresset i materialet og forlengelsen. E-modulen kan regnes ved å ta endringen i spenningen til et materiale, og dele på endringen i forlengelsen. Dette vil gi et godt estimat på stigningen til den lineærelastiske kurven. [35-36].

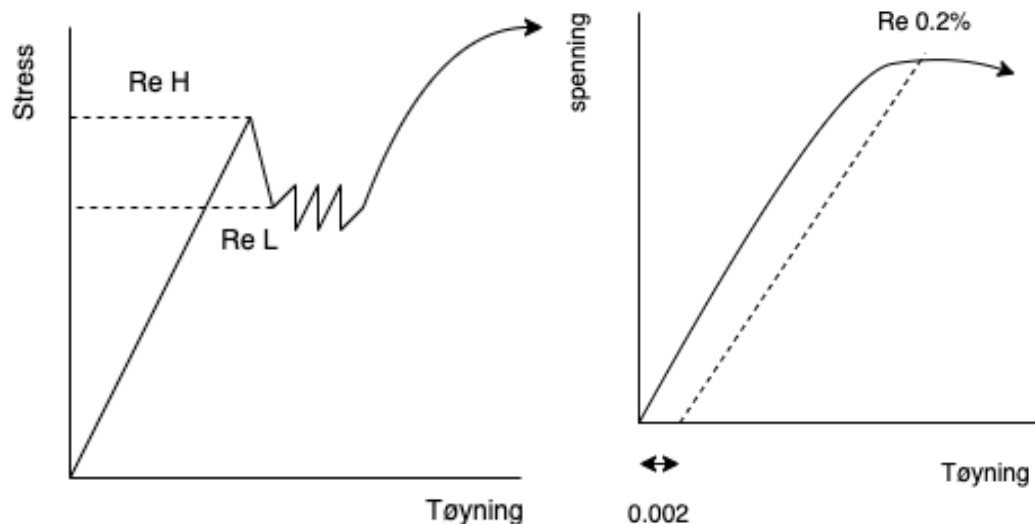
$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (4.3)$$

### **Flytegrense**

Flytegrensen angir den nominelle spenningen hvor glidning mellom atomplan med høyest skjærspenning setter inn. Flytegrensen definerer hvor mye spenning materialet kan ta opp før det oppstår plastisk deformasjon. Det er flere måter å finne flytegrenser til et materiale på, men normalt sett vil dette være området der kurven flater ut.

En måte å finne flytegrensen til et materiale med ingen klar utflytning i spenningstøyningsdiagram er å bruke 0.2% regelen. Dette gjøres ved å tegne en parallell strek til spenningstøyningskurven flyttet 0.2% ut i diagrammet. Krysspunktet mellom spenningstøyningskurven og den nye kurven vil kunne brukes som flytegrensen til materialet.

Videre finnes det også en øvre og nedre flytegrense. Disse er illustrert på figurene under, og den øvre flytegrensen vil være det øverste punktet på den lineærelastiske linjen, mens den lavere flytegrensen vil være spenningen der materialet har begynt å gå i plastisk deformasjon [35-37].



Figur 12: Oversikt over tolkning av flytegrensen til materialer

### Strekfasthet

Strekfastheten til et materiale er mengden stress et materiale kan ta opp ved maksimal last. Strekkfastheten vil være topp punktet i spenning/tøynings-diagrammet, og kan defineres som den nominelle spenningen ved maksimal last. [35]

### Bruddspenning

Bruddspenningen er hvor mye spenning et materiale tåler før det går i brudd. Denne spenningen er justert for endringen i areal når prøven blir tatt. Bruddspenningen er det punktet i spenning/tøynings-diagrammet der materialet har gått i brudd, og vil være enden av kurven i diagrammet. [35 - 36] [38].

Denne spenningen kan ha to verdier, der den ene verdien er den reelle spenningen. Den andre spenningen vil være ingeniørtilnærmingen. Forskjellen mellom disse er at ingeniørtilnærmingen vil være modifisert basert på et oppdatert tverrsnitt på prøvestavene. [36] [38].

### Hardhet

En annen mekanisk egenskap til materialer er hardhet. Denne egenskapen defineres som et materials egenskap til å motstå lokal plastisk deformasjon [36]. Hardhet er relativt, og ikke en absolutt skala. Dette gjør at sammenligning av verdier på tvers av skalaer er vanskelig. Hardheten til et materiale kan måles på en rekke forskjellige måter: [35-36]

- Rockwell hardness test
- Brinell hardness test
- Knoop and Vickers microindentation hardness test
- Shore

For denne oppgaven er det Shore test som vil være den mest relevante, og er den eneste som vil bli grundig forklart.

## **Shore**

Shore hardhetstest er den vanligste testmetodene for polymer. Denne testen baserer seg på samme prinsipper som de andre testene, der en ball eller annen form for hode presses ned i et materiale. I en Shore test varierer objektet som presses inn i materialet med hvilken Shore test som gjennomføres.

Det finnes flere typer Shore tester, og i denne rapporten vil det bli brukt en Shore D test. Dette er en test som egner seg for hardere polymer, og blir gjort med et durometer. Dette durometeret er koblet til en nål som penetrerer polymer-konstruksjonen. Etter hvert som nålen penetrer konstruksjonen vil motstanden til materialet bli målt som hardhet på durometeret. [39-40]

## 4.1.2 Materialstrukturer i polymer

### **Struktur på polymerere**

Strukturen på polymerere er en kombinasjon av karbonatomer og andre typer atomer. Karbonatomene danner som oftest en karbonkjede med enkle atombånd, men denne strukturen endrer seg med mer kompliserte polymer [36].

Polymer klassifiseres også inn i fire forskjellige strukturer, og disse er som følger;

- Lineære polymer
- Forgrenet polymer
- Tverrbundet polymer
- Nettverks polymer

### **Lineære polymer**

Lineære polymer kjennetegnes ved at de repeterende strukturene i polymere gjentas fra ende til ende. Dette vil si at alle de gjentagende strukturene binder seg sammen til lange kjeder som ligger inntil hverandre. Det vil ikke være noen bindepunkter mellom polymerkjedene [36].

### **Forgrenet polymer**

Forgrenete polymer er karbonkjeder med avgreninger. I likhet med lineære polymer er det en repeterende struktur i karbonkjedene, men i forgrenete polymer er det også avstikkere fra karbonkjeden. Disse avgreningene gjør at polymere ikke kan bli liket tett pakket, og dette vil påvirke massetettheten til endeproduktet. Disse avgreningene blir ofte skapt i produksjonen til polymere [36].

### **Tverrbundet polymer**

I en tverrbundet polymer vil det være koblinger mellom lineære polymer. Disse polymerne blir fremstilt gjennom ikke reversible kjemiske prosesser og synteser. Et eksempel på en tverrbundet polymer vil være gummi [36].

## **Nettverks polymer**

Nettverks polymer er definert som multifunksjonelle monomer som former tre eller flere aktive kovalente bånd som danner en tredimensjonal nettverksstruktur. Videre kan polymerer også deles inn i to klasser, disse er herdepolymer og termoplast. Disse to typene polymer har forskjellige egenskaper som er relevant med tanke på resirkulering og bærekraftperspektivet. [36].

## **Herdepolymer**

Denne typen polymer er som oftest nettverks polymer. Disse polymerne blir permanent harde, og vil ikke mykne når de varmes opp. Nettverks polymer har kovalente bånd mellom polymerkjedene, og disse båndene vil holde polymerne sammen selv om det varmes opp. Disse kryssbindingene kan løses opp ved å varme polymerne til høye temperaturer, men dette vil også ødelegge materialet. Herdepolymer er som regel hardere enn termoplaster. [36].

## **Termoplast**

Termoplast er en type polymer som blir mykt når det varmes opp, og stivner når det kjøles ned igjen. Denne prosessen er reversibel, og kan gjentas. Dette gjør at termoplast kan resirkuleres i enden av livsløpet, og brukes i andre produkter. Disse polymerne består normalt sett av lineære og forgrenete polymerkjeder, og er mykere enn herdeplaster.

Når termoplasten varmes opp blir sekundære bindekrefter redusert, og relativ bevegelse mellom polymerkjeder oppstår. Dette gjør at termoplasten kan brukes til å lage nye objekter. Denne prosessen er avhengig av at polymerne ikke varmes opp til en for høy temperatur, og for høye temperaturer fører til irreversible endringer i polymerne. [36].

Videre finnes det polymerblandinger, og disse kalles kopolymerer. Dette er en blanding av forskjellige repeterende strukturer i polymerkjeden. Disse materialene vil ha egenskapene til begge de repeterende strukturerne. Disse polymerne er forholdsvis billige å produsere, og deles inn i følgende underklasser;

- Tilfeldige kopolymerer
- Alternerende kopolymerer
- Blokk kopolymerer
- Pode kopolymerer

## **Tilfeldige ko-polymer**

Denne strukturen er bygget opp av to typer repeterende enheter. Strukturen til polymerne er lineært, og de to repeterende enhetene vil være tilfeldig plassert i polymerkjeden. [36].

## **Altererende ko-polymer**

I altererende kopolymer vil det være to repeterende enheter som gjentas altererende i polymerkjeden. Disse repeterende enhetene vil være plassert annenhver gang, og den repeterbare enheten vil ikke være plassert ved siden av en lik enhet. [36].



### **Blokk ko-polymer**

Et blokk kopolymer er en struktur den samme som i altererende kopolymerer, men i dette tilfellet vil den repiterende strukturen være plassert som blokker. Dette vil si at det er flere enheter av den repiterende strukturen ved siden av hverandre. [36].

### **Pode ko-polymer**

Pode kopolymerer er avgrenede polymerkjeder der det er to repeterende strukturer som bygger opp polymerkjeden. I denne strukturen er det en repeterende struktur som utgjør den lineære delen av polymerkjeden, og en annen repeterende struktur som utgjør avgrensingene. [36].

## **4.2 Generalisering av AM produksjonsprosess**

AM-produksjon består av en rekke forskjellige steg fra konsept til ferdig produsert prototype. AM-produksjon har en rekke applikasjonen, og involveringen av produksjonsmetoden i byggeprosessen vil variere fra produkt til produkt. Små objekter kan produseres i sin helhet ved hjelp av AM-produksjon, men større ingeniørprosjekter kan dra nytte av delvis involvering av AM-produksjon. Videre kan større prosjekter dra nytte av å bruke AM-produksjon til itereringer og pivoteringer av produktet gjennom produktdefinisjons fasen. Oppbygningen til produksjonsprosessen vil være som følger; [17]

1. Produktdefinisjon og CAD arbeid
2. Konvertering til STL/AMF
3. Overføring til AM maskin og STL fil manipulering
4. Oppsett av maskin
5. Byggeprosess
6. Fjerning av figur og opprydding
7. Etterbehandling
8. Bruk av komponent

### **4.2.1 Produktdefinisjon og CAD arbeid**

Det første steget i all AM-produksjon vil være å definere hvordan delen skal se ut, og hvilke tenkte funksjoner produktet skal ha. Dette gjøres digital, og skjer gjennom konstruksjon av delen i et CAD program. Her vil geometrien til delen som skal produseres bli definert, og filen som beskriver figuren må være solid eller en overflate representasjon. [17]

### **4.2.2 Konvertering av fil til STL/AMF**

Majoriteten av AM maskiner aksepterer STL-filformat. Nesten alle CAD programmer kan produsere STL-filer , og dette filformatet en meshet representasjon av figuren. Denne filtypen inneholder også grunnlaget for kalkulasjonene som gjøres i når figuren blir gjort om til 2D tverrsnitt i slice programmet. [17]

STL filer er uordnet samling av triangelhjørner og normalvektorer. Dette gjør at STL filen ikke har noen enheter, farger, materiale eller noen annen form for informasjon om konstruksjonen. Disse manglene har ført til utviklingen av AMF formatet, og dette formatet har blitt en internasjonal ASTM/ISO standard. Dette filformatet inkluderer informasjonen nevnt ovenfor, og har også fordelene til STL formatet. [17]

Diskontinuitet og kompleksiteten til modellene kan føre til triangler som ikke overlapper eller tilpasser seg korrekt, og dette fører til mangler på overflatene som skal bygges. Programvarene som brukes bør derfor synliggjøre disse feilene i geometrien slik at ønskelig geometri og materialbruk oppnås. Videre kan ting som programvaren oppfatter som feil være kompleksiteter i designet, og konstruksjonen bør bygges som ønsket fremfor å bli forenklet av programvaren. [17]

### 4.2.3 Overføring til AM maskin og STL manipulering

Etter at STL filen har blitt bygget og reparert kan den sendes til en AM-maskin. Ideelt sett burde delen kunne bygges på dette punktet i prosessen, men dette er ikke alltid tilfellet.

AM-software har ofte en funksjon som lar brukeren visualisere og manipulere delen før byggeprosessen startes. Disse programmene lar brukeren endre på delens posisjonering og orientering inne i maskinen. Ofte blir flere deler produsert samtidig i AM maskinene, og disse delene kan være fra forskjellige STL/AMF filer. Disse programvarene legger også til støttestruktur om det trengs. For deler som trenger støttestruktur er orienteringen og plasseringen i maskinen viktig. Deretter vil det produseres en fil som beskriver orientering og de forskjellige delene som skal produseres, og denne vil bli brukt i selve printeprosessen. [17]

### 4.2.4 Oppsett av maskin

Parametere som korresponderer med byggeprosessen og materialet må bli definert før byggeprosessen kan iverksettes. Eksempler på slike parametere er lagtykkelse, timing og temperatur. [17]

For maskiner som kan bruke forskjellige typer materiale er det viktig at de riktige temperaturene for materialet som brukes. Dette er for å sikre at byggeprosessen blir gjort raskest mulig, og at konstruksjonen holder tilstrekkelig kvalitet. Dette arbeidet blir ofte gjort i slice programmet.[17]

### 4.2.5 Byggeprosess

Byggeprosessen er assistert av datamaskiner, men de første stegene i prosessen kan kreve manuelt arbeid i form av interaksjon med maskinen. Når disse stegene er gjort går maskinen over til en automatisert byggeprosess. Kun overfladisk oppsyn med maskineriet er nødvendig når byggeprosessen har startet, og dette er for å sjekke at det ikke har skjedd noen feil. Eksempler på slike feil er at maskinen har gått tom for materiale, feil i software eller problemer med ekstruderingsdysen. [17]

#### 4.2.6 Fjerning av figur og opprydding

Etter at byggeprosessen er ferdig, må delen fjernes fra maskinen. Delene kan som oftest fjernes med malingsskraper eller lignende verktøy uten problemer. Hvis konstruksjonen er bygget i metall el. vil det kreve annet verktøy til å fjerne konstruksjonen fra plattformen. Videre er prosessen med å fjerne støttemateriale fra konstruksjonen mer krevende. [17]

Videre bør også maskinen renses mellom bruk, og materiale som eventuelt henger fast i byggeplattformen bør fjernes. Dette er for at neste modell som skal bygges ikke påvirkes av tidligere produksjon. [17]

#### 4.2.7 Etterbehandling

Denne delen av byggeprosessen består av å fjerne støttemateriale og rensing av delen. Figurer som har blitt bygget kan være svake på dette tidspunktet, og man bør være forsiktig når støttestrukturen fjernes.

Denne delen av prosessen inkluderer ting som maskinering, kjemiske behandling ect. Videre kan denne prosessen bestå av varmebehandling eller ekstra UV-stråling for å styrke delene. Denne etterbehandlingen kan være kostbar, arbeidsintensiv og/eller tidskrevende avhengig av kravene til konstruksjonen. [17]

#### 4.2.8 Bruk av komponent

Etter etterbehandlingen er konstruksjonene klar for bruk. Brukere bør merke seg at materialeegenskapene til en 3D-printet konstruksjon kan variere fra andre byggeprosesser som støpning og maskinering. Noen AM-metoder kan føre til feil i materialet som hulrom i materialet, svekkelse av materialet under byggeprosessen, materialet fester seg feil, eller krystalliseres ikke tilstrekkelig. [17]

### 4.3 Utdyping av MEX prosessen

Material ekstrudering en av de mest brukte AM-metodene. Maskinene er billige, og dette gjør de tilgjengelige for hobby bruk og bedrifter. Disse maskinene er også enkle å få tak i, og kan kjøpes på nett og i de fleste elektronikkbutikker. [17]

Det er mange måter å ekstrudere materialet, og den vanligste metoden er varmepåvirkning før og under ekstruderingsprosessen. For de fleste MEX maskiner vil det være et rundt filament som blir brukt presset frem av et sett med ruller som ekstruderer materialet gjennom en dyse. [17]

En enkel måte å forklare MEX er en kremsprøyte. Her vil materialet være oppbevart i sprøyten, og når sprøyten får en kraftpåvirkning vil materialet fra reservoaret bli presset ut av dysen. I selve MEX prosessen er tankegangen den samme, men filamentet er som oftest en form for polymer. [17]

Det ekstruderte materialet som bygger opp materialet kalles ofte «roads», men det egentlig navnet på dette er ekstrudat. Hvis trykket og farten på dysen holdes konstant over byggeplattformen vil ekstrudatet ha samme tverrsnitts diameter over hele figuren. [17]

For å kunne ekstrudere materialet er det hovedsakelig to metoder som brukes. Metoden som er vanligst bruker temperaturpåvirkning på materialet for å endre fasen. Smeltet materiale blir gjort flytende i reservoaret, og presset ut gjennom dysen til printereren. Deretter vil materialet stivne og binde seg til materialet som tidligere har blitt ekstrudert [17]

En alternativ tilnærming er å gjøre en kjemisk behandling på det ekstruderte materialet slik at det stivner. Her er det ofte brukt et preparat som gjør at materialet herder, løsemiddel, reaksjon med luft eller tørking av vått materiale som lar det oppstå bindinger mellom lagene i figuren. [17]

### 4.3.1 Lasting av materiale

Siden MEX prosessen baserer seg på ekstrudering av materialet må det være et reservoar av tilgjengelig materiale. Materialet i MEX prosessen blir som oftest kontinuerlig foret inn i maskinen, og smelteprosessen skjer i ekstruderingshode. Ekstruderingshode blir etterfylt med materiale under byggeprosessen, og denne etterfyllingsprosessen skjer ved hjelp av ruller som skyver materialet inn mot dysen. Når materialet blir matet med ruller blir det som oftest generert nok trykk til å dytte det smeltede filamentet ut gjennom dysen, og ned på byggeplattformen. Hvis denne prosessen ikke skaper nok trykk er det mulig å bruke komprimert gass eller noe som dytter filamentet gjennom dysen.[17]

### 4.3.2 Smelting av materialet

Ekstrudering baserer seg på at materiale som oppbevarer seg i reservoaret vil bli smeltet, og videre dyttet ut gjennom dysen til printereren. Dette materialet vil stivne raskt etter at det har blitt dyttet ut på byggeplattformen, og er som regel flytende eller semi-flytende under ekstruderingsprosessen. [17]

Denne varmen blir som regel tilført av varmekabler som ligger i ekstruderingshode, og ideelt sett skal denne temperaturen være den samme gjennom hele byggeprosessen. Dette byr på utfordringer i form av størrelse på reservoaret, og jo større reservoaret er jo vanskeligere er det holde en lik temperatur på byggematerialet. Her vil det være utfordringer assosiert med varmeoverføring, termisk konduktivitet og posisjon på temperatursensoren. [17]

Filamentet i reservoaret bør holdes i en flytende fase, og ved lavest mulig temperatur. Grunnen til dette er at polymer blir ødelagt raskere ved høye temperaturer. Videre kan for høye temperaturer føre til at det smeltede filamentet brenner seg fast i reservoaret, og dette vil være vanskelig å fjerne og kan kontaminere fremtidig byggeprosesser. Høye temperaturer kan også føre til at ekstrudatet krever ekstra avkjøling når det har blitt plassert på byggeplattformen. [17]

### 4.3.3 Ekstrudering

I ekstruderingsprosessen vil formen og størrelsen på dysen bestemme dimensjonene på ekstrudatet. En større dyse vil gjøre ekstruderingsprosessen raskere, men vil også føre til mindre presisjon i figuren sammenlignet med CAD modellen. Denne størrelsen vil også definere minstestørrelsen på konstruksjoner som kan lages. MEX egner seg derfor best til produksjon av større deler der veggtykkelsen er minst dobbelt så stor som den nominelle diameteren på dysen. [17]

Massestrømmen i en ekstruderings prosess defineres av trykkforskjellen mellom atmosfæretrykket og trykket i reservoaret. Selv om dette er grunnprinsippet for en standard ekstruderings prosess vil det kunne variere litt med AM-produksjon. Her vil trykket som dytter materialet ut av dysen komme fra nytt materiale som føres inn i ekstruderingshode. [17]

For å definere hvor mye materiale som kommer ut av dysen kan det settes opp en forenklet uttrykk for massestrøm. Her vil massestrømmen være relatert til trykkfall, geometrien på dysen og viskositeten til materialet. I uttrykkene som beskriver vil notasjonen  $f$  være relatert til filamentet, og  $r$  vil være relatert til ekstrudat på byggeplattformen.

Volumstrømmen inn i reservoaret, der hvor filamentet blir smeltet vil være definert i formelen under. [17]

$$Q = v_r \pi r_f^2 \quad (4.4)$$

Her vil  $v_r$  være hastigheten filamentet blir matet inn i reservoaret,  $r_f$  vil være radiusen til filamentet og  $Q$  vil være volumstrømningen av filament inn i reservoaret.

Ved dysen vil det også være en volumstrømning som beskriver hvor mye av det smeltete filamentet som kommer ut. Denne sammenhengen er gitt i formelen under.

$$Q = v_r WH \quad (4.5)$$

Her vil  $v_r$  være avsetningshastigheten,  $W$  vil være bredden på ekstrudatet som legges på plattformen og  $H$  vil være høyden på ekstrudatet. Hvis ekstrudatet er sirkulært vil  $W$  og  $H$  ha samme verdi, men det antas at ekstrudatet er mer rektangulært formet. [17]

Siden volumstrømningen inn og ut av reservoaret må være den samme kan disse uttrykkene settes lik hverandre for å finne et uttrykk for matingshastigheten av filamentet. Dette uttrykket er beskrevet under. [17]

$$v_f = \frac{v_r WH}{\pi r_f^2} \quad (4.6)$$

Videre kan matingshastigheten relateres til hastigheten på motorene som driver rullene som mater materialet inn i reservoaret.

$$v_f = \omega_p R_p \quad (4.7)$$

Her vil  $\omega_p$  være vinkelhastigheten til rullene og  $R_p$  vil være radiusen til rullene. Dette uttrykket kan løses for  $\omega_p$  og det er mulig å bestemme hastigheten på rullene slik at filamentet blir matet i ønsket hastighet. Denne sammenhengen er gitt under. [17]

$$\omega_p = \frac{v_f}{R_p} \quad (4.8)$$

Det er også mulig å sette opp et uttrykk som beskriver hvor mye kraft som trengs for å presse ekstrudatet gjennom dysen. Dette kan gjøres ved å bruke trykkfallet mellom reservoaret og atmosfæretrykket. Dette uttrykket er gitt under. [17]

$$F = \Delta P A \quad (4.9)$$

Her vil  $\Delta P$  være endringen i trykkfallet,  $A$  vil være arealet til tverrsnittet av filamentet og  $F$  er den nødvendige kraften for å trykke ut ekstrudatet. Siden den nødvendige kraften er definert er det også mulig å definere nødvendig moment og effekt for å drive filamentet gjennom reservoaret. Disse formlene er gitt under. [17]

$$\Gamma = F R_p \quad (4.10)$$

$$P_{mot} = \omega_p \Gamma \quad (4.11)$$

Denne modellen er basert på antagelsen om at det kun er en motor som driver rullene gjennom et gir. Om kraften som blir generert av rullen overstiger det nødvendige trykket for å drive filamentet gjennom reservoaret vil det forekomme vipping i filamentet. Dette forutsetter at det ikke er noen utgliding mellom byggematerialet og rullene.

Denne analysen indikerer at matingskraften er relatert til E-modulen, og at det er vanskelig å bruke sprø materialer fremfor mer duktile. Dette vil si at kompositt filamenter som bruker keramer ol. vil kreve høy presisjon i matningshastigheten.

En økning i E-modulen vil føre til høyere trykkforskjell, og som følge av dette må det genereres en høyere kraft i rullene. Dette fører også til at det er større sjanse for at filamentet glipper, eller at det blir en forskjell i input og output som fører til at strømmingen av filamentet stopper, eller at materialet vipper i inngangen til ekstruderingshode. [17]

#### 4.3.4 Solidifisering

Etter at materialet har blitt varmet opp i reservoaret vil ekstrudatet stivne. Ideelt sett skal ekstrudatet beholde form og størrelse etter at det har blitt lagt på byggeplattformen. Det er derimot faktorer som internspenninger i materialet og tyngdekraft som kan påvirke formen til

ekstrudatet. Størrelsen på ekstrudatet kan også variere som følge av avkjøling og tørking av materialet.

Hvis filamentet blir ekstrudert som en gel kan krympe under herdeprosessen og bli porøst. Hvis ekstrudatet blir ekstrudert i flytende form kan det også krympe når det stivner. Avkjølingen av ekstrudatet vil trolig også være ikke-lineær, og hvis denne ikke-lineære avkjølingen er signifikant vil komponenten kunne bli deformert under avkjølingsprosessen. Denne effekten kan minimeres om temperaturforskjellen fra reservoaret og omgivelsene er minimal, og at avkjølingsprosessen er kontrollert og konstruksjonen ikke blir bråkjølt.

MEX AM systemer vil som oftest ekstrudere fra et større reservoar til en mindre dyse ved hjelp av et konisk grensesnitt. Det smeltete materialet forventes å følge veggene gjennom reservoaret og dysen med null hastighet i disse områdene. Materialet blir utsatt for en skjær deformasjon under utstrømningen. Skjærforholdet og skjærstresset er definert i formlene. [17]

$$\dot{\gamma} = - \frac{dv}{dr} \quad (4.12)$$

Skjærstress

$$\tau = \left( \frac{\dot{\gamma}}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4.13)$$

I skjærforholdet vil  $\dot{\gamma}$  være forholdet mellom den marginale endringen i hastigheten på filamentet og radiusen til ekstrudatet. I uttrykket for skjærstresset vil  $m$  beskrive strømningskomponenten og  $\phi$  vil beskrive fluiditet. Kateketikken til strømmingene av materiale og avviket fra Newtonsk oppførsel. [17]

#### 4.3.5 Posisjonskontroll

Som de fleste formene for AM-produksjon bruker MEX en plattform for å beskrive den vertikale aksene, og plattformen gjør det mulig å bygge en konstruksjon lagvis. Dysen som legger ekstrudatet på plattformen, er festet til et system som beveger seg i det vertikale planet. Bevegelsene til dette systemet må være samkjørt med ekstruderingsraten slik ekstrudatet blir lagt jevnt og konsist på byggeplattformen. [17]

Siden reservoaret og dysen utgjør en masse er det viktig at ekstruderingshode ikke har for høy hastighet når det skal bytte retning. Dette gjør at ekstruderingshode må de-akselereres printeren endrer retning, og deretter akselereres igjen. Den korresponderende matingen av filament må matche denne endringen i fart for at det ikke skal ekstruderes for mye eller for lite ekstrudat. [17]

Ekstruderingshodet blir flyttet over et 2D plan blir det ofte brukt 2 lineære drivmekanismer som er montert ortogonalt på hverandre. Disse vil representere X og Y-aksene til planet, og må være kraftige nok til å bevege ekstruderingshode i tilstrekkelig fart. Teknologien som brukes

til denne delen av maskinen kan variere fra servomotorer til beltedrift avhengig av prisklassen til maskinen. [17]

For å holde tidsbruken i produksjonen nede er det vanlig å legge filament rundt omrisset til figuren først. Dette blir gjort med en lavere hastighet på ekstruderingshode for å få en konstant strømning av ekstrudat, og sørge for at geometrien til CAD modellen blir ivaretatt. De indre lagene i figuren kan bygges raskere siden dette ikke vil påvirke endeproduktets geometri i like stor grad. [17]

#### 4.3.6 Bindingsprosess

For varmebaserte systemer kreves det en tilstrekkelig mengde varmeenergi for å binde sammen nye lag. Andre systemer vil ha egne måter å bygge opp strukturen på, og for gel baserte systemer kan dette være en form for løse-/fuktemiddel. Begge disse metodene for å binde materiale sammen kan bli betraktet som energi levert til materialet av ekstruderingshode. [17]

Mengden energi som tilføres materialet er kritisk med tanke på byggeprosessen, og hvis det ikke tilføres tilstrekkelig energi vil det bli dårlige forbindelser mellom lagene i figuren. Lagene i figuren kan fremdeles feste seg til hverandre, men det vil bli en distinkt grense mellom det gamle og nye ekstrudatet. Dette vil føre til at materialet enklere kan få sprekkdannelser og delamineringer. Videre kan også dette føre til at figuren separerer seg i lagene. [17]

For mye energi kan føre til at ekstrudatet i lagene under flyter ut, og dette kan føre til tap i presisjonen til produksjonsmetoden. Dette kan resultere i geometriske feil i endeproduktet, og dårlig definerte deler. Videre kan for mye energi også skade byggematerialet om dette er laget av et polymer. [17]

Etter at materialet har blitt ekstrudert må det stivne og binde seg til resten av figuren. Det vil være mulig å beskrive prosessen, og lage en modell som beskriver sammenbindingen mellom lagene. Denne termiske prosessen er definert som arbeider i ekstrudatet. Denne likningen blir presentert som en kontinuerlig, åpen linje i x-retning. Denne er avhengig av materialeegenskaper, og er gitt i likningen under. [17]

$$\rho \frac{\partial q}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - S_c - S_1 \quad (4.14)$$

I denne likningen vil  $\rho$  være materialtetthet,  $q$  vil være den spesifikke entalpi koeffisienten,  $k$  er den effektive termiske konduktiviteten,  $T$  vil være den gjennomsnittlige temperaturen i ekstrudatets tverrsnitt og  $S_c$  vil være et oppsamlingsbegrep for å beskrive konvektivtap.  $S_c$  kan også beskrives som et matematisk uttrykk, og dette er gjort i formelen under. [17]

$$S_c = \frac{h}{h_{eff}} (T - T_\infty) \quad (4.15)$$

I dette uttrykket beskriver  $h$  varmeoverføringskoeffisient for konvektiv kjøling,  $h_{eff}$  er en geometrisk uttrykk som beskriver forholdet mellom ekstrudat volumet til overflaten for den konvektive kjølingen, og vil være avhengig av diameteren på dysen.  $T_\infty$  vil beskrive steady-



state temperaturen for det omgivende miljøet.  $S_1$  er et synkebegrep som beskriver den termiske interaksjonen mellom de ekstruderte banene, og er beskrevet i uttrykket under. [17]

$$S_1 = \left( \frac{k}{width^2} \right) (T - T_{neigh}) \quad (4.16)$$

I dette uttrykket vil «width» være bredden på de ekstruderte banene, og  $T_{neigh}$  vil beskrive temperaturen på en aktuell nabo-bane. Dette oppsamlingsuttrykket vil øke avkjølingstiden hvis nytt materiale legges for nærme gammelt materiale.

Videre vil dysen kunne nå en kritisk temperatur  $T_c$ , og hvis denne temperaturen nåes vil bindingsprosess starte. Hvis temperaturen er under denne temperaturen, vil ikke materialet binde seg riktig. Ut fra dette kan bindingspotensialet til materialet beskrives, og dette er gjort i uttrykket under. [17]

$$\varphi = \int_0^{\tau} (T - T_c) d\tau \quad (4.17)$$

#### 4.3.7 Generering av støttestruktur

Nesten alle typer AM produksjoner trenger støttestruktur for frittstående deler, eller deler med overheng, Dette er for at alle egenskapene til produktet skal bli ivaretatt gjennom produksjonsprosessen. I MEX produksjon trengs det ekstra støttestruktur i produksjonsprosessen, og støttestruktur deles normalt sett inn i to grupper. Disse er som følger. [17][60]

- Støttestruktur av samme materiale
- Støttestruktur av annet materiale

I MEX maskiner vil typen støttestruktur variere med prisklasse. De billigste maskinene vil være bygget enklest mulig, og som oftest med en type filament. I tilfellene der maskinene kun bruker et filament vil støttestrukturen bli bygget i samme materiale som delen. Dette kan kreve at komponenten og støttestrukturen må bygges på en slik måte at de enkelt kan separeres etter produksjon. En metode å skille støttestrukturen fra komponenten er å endre på temperaturen i dysen, og dette kan resultere i sprekkdannelse rundt i overflaten av støttematerialet. En annen måte å oppnå denne effekten på er å legge ekstrudatet i støttematerialet med større avstander fra hverandre. Ved å separere ekstrudatet vil dette kunne påvirke energioverføringen mellom de ekstruderte banene, og dette kan føre til sprekkdanningsfenomenet. [17][60]

Den andre metoden å lage støttestruktur på er et alternativt materiale. Dette krever at maskinen kan bruke to forskjellige filamenter, har to forskjellige dyser og parametere som definerer byggeprosessen til støttestrukturen. Denne metoden gjelder ofte maskiner i det høyere prissjiktet. Fordelen med to forskjellige materialer er at materialegenskaper og farge kan utnyttes, og dette kan utnyttes for enklere separasjon av støttestruktur og modell. [17][60]

Ved å produsere støttestrukturen i en annen farge vil det være tydelig hva som inngår i selve komponenten. Videre kan det benyttes et mer porøst materiale slik at det er lettere å knekke av støttestrukturen. Det er også verdt å nevne at et sekundært materiale kan brukes til å synliggjøre forskjellige ting i modellen slik som festepunkter. I springerboken brukes det et eksempel der

et sekundært materiale blir brukt til å synliggjøre en kreftsvulst på en knokkel, og dette er et godt eksempel på en designtilpasning med flere filamenter. [17][60]

#### 4.3.8 Plotting og kontroll av veivalg

For at MEX maskinene skal kunne bygge en figur trenger den en CAD-fil lagret som en STL-fil. Når MEX maskinene skal legge ut filamentet basert på filen blir det brukt en programvare som kontrollerer strømmingen av filamentet. Denne typen programvare er spesielt viktig i MEX prosessen siden det ekstruderes materiale på områder som ikke inneholder materiale i utgangspunktet. Det kan ikke være eksisterende materiale i området som ekstruderingshodet går over, og det nye materialet skal ikke kompromittere gammelt materiale. Videre vil materiale som ikke legges tett nok på et tidligere lag binde seg skikkelig til resten av figuren. I laserbasert AM-produksjon vil ikke dette være en like reel problemstilling siden det normalt sett vil være en grad av overlapp, og det er ingen problemer med at ekstruderingshode krasjer i ekstrudat eller overfylling av materiale. [17]

For å opprettholde presisjon blir omrisset til figuren plottet med en lav hastighet på ekstruderings hode. Veien ekstruderings hode skal gå over planet blir planlagt, og start og slutt punkt blir fastsatt. Siden dysen på ekstruderings hode har en fastsatt diameter vil startpunktet være definert i midten av dysen. Videre vil det siste punktet være satt til en diameter til dysen unna startpunktet. Grunnen til det er at det er bedre med overlapp, enn mangel på materiale. Videre er det også vanskelig å kontrollere flyten av materialet så presist at start og slutt punkt tangerer hverandre. Når start og slutt punkt blir stacket oppå hverandre vil dette fungere som en søm, og det vil være en fordel om denne sømmen ikke er synlig på figuren. På grunn av dette vil disse punktene normalt sett være plassert på forskjellige steder i figuren. Alternativt kan denne sømmen fjernes i etterbehandlingen. [17]

Programvaren som bestemmer hvordan materialet skal legges på innsiden av figuren må kalkulere en bane slik at det er offset fra omrisset til banene. Programvaren må etablere et startpunkt og et slutt punkt og kalkulere en bane for ekstruderings hode basert på allerede eksisterende materiale. Fyllmønsteret vil vareiere med hva som produseres, og mønster og tykkelse kan som regel bestemmes i slicing-programmet. [17]

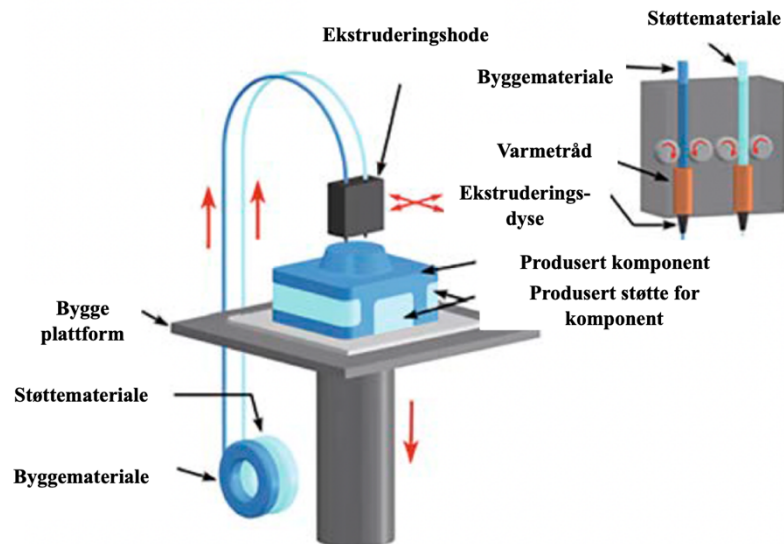
Fyllmønsteret trenger ikke å være en kontinuerlig linje, men kan bli segmentert etter behov. Videre er det viktig og tenkte på hvordan materiale legges i høyden, og at det gjerne ikke bør legges parallelt. Hvis Materialet legges som et vevet mønster vil dette kunne forbedre materialeegenskapene signifikant. Dette er også en fordel om det brukes filament med karboninnhold siden alle fiberne ikke vil ligge i samme retning. [17]

Videre vil hvert enkelt vevemønster innad i et lag skape en diskontinuitet som kan føre til svakheter i endeproduktet. Videre bør bruken av forskjellige mønstre i fyllet minimeres innad i et lag. Det er heller ingen garanti for at et mønster kan fylle et helt lag, og det er usannsynlig at en programvare kan produsere det beste fil-mønsteret. [17]

## 4.4 Eksempler på AM Produksjon

Siden MEX har blitt forklart grundig vil det også være interessant å se på et par alternative AM-produksjonsmetoder. Disse vil basere seg på forskjellige metoder, material og bruksområder.

### 4.4.1 Fused deposition modelling (FDM)



Figur 13: Illustrasjon av FDM produksjon. Omarbeidet etter [100]

Dette er den vanligste formen for additiv produksjon, og er teknikken som brukes i de fleste kommersielle 3D-printere. Dette er en maskin som bygger på MEX prosessen som er forklart i forrige kapittel. Denne metoden bruker en spole med materiale som smeltes i ekstruderingshode, og ekstrudatet blir brukt i den lagvise produksjonen. Gjennom flere lag med termoplast bygges modellen nedenifra og opp. Denne prosessen er delt opp i 3 trinn. [41][61-63]

- Pre-prosessering
- Produksjon
- Etterbehandling

#### Pre-prosessering

I denne delen av prosessen blir modellen kjøres gjennom et «bygge forberedende» program, og en fil for byggeprosessen blir produsert. Denne filen beskriver og kalkulerer hvordan termoplasten skal ekstruderes, og nødvendig støttemateriale. [[41][61-63]

#### Produksjon

I denne delen av prosessen varmer 3D printerens termoplasten til en semi-flytende fase, og denne plasten blir plassert slik som filen til det forrige prosessstrinnet har regnet ut. Der hvor det trengs støttemateriale vil 3D printerens legge materialet som enkelt kan fjernes senere. [41][61-63]

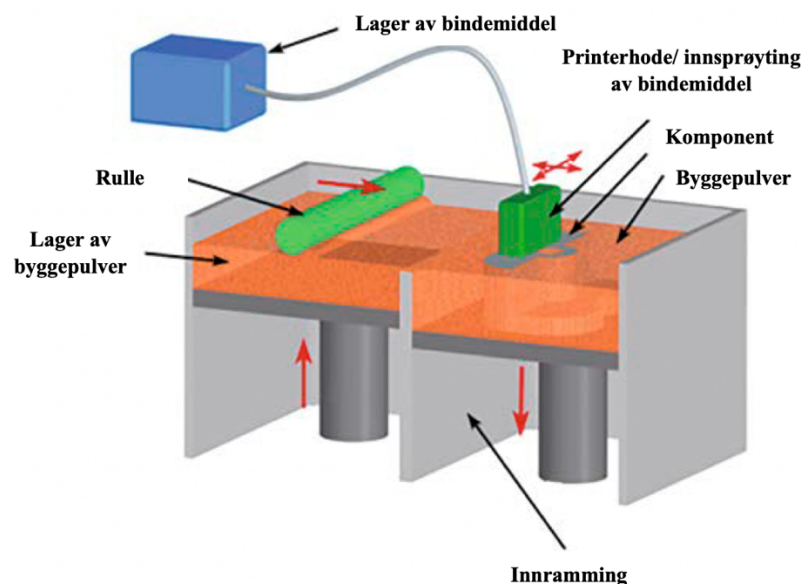
## Etterbehandling

Støttemateriale knekkes av eller legges i en blanding av vann og løsemiddel. Etter dette vil objektet være klart til bruk. [41][61-63]

Fordeler med FDM produksjon

- Teknologien er ren, brukervennlig og kontorvennlig
- Produksjonsgrad termoplast mekanisk og miljøvennlig
- Komplekse geometrier er enkelt å produsere

### 4.4.2 3D printing (3DP)

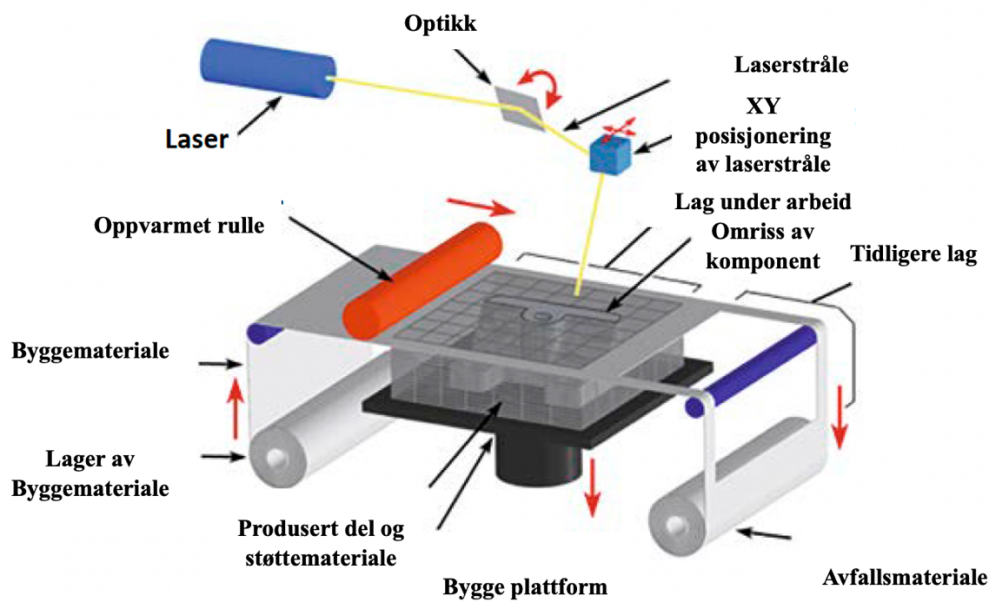


Figur 14: Illustrasjon av 3DP produksjon. Omarbeidet etter [100]

Denne metoden baserer seg på at et pulverisert materiale blir spredd utover en flate. Deretter blir området som utgjør delen bundet sammen ved hjelp av en bindemiddelsstråle. Byggeplattformen beveger seg en lagtykkelse ned langs Z-aksen, og en rulle tilfører et nytt lag med byggemateriale. Denne prosessen gjentas og produktet bygges lagvis som vist på figur 14. [42][63]

3DP gjør det mulig å bruke en rekke forskjellige bærekraftige materialer som polymer, metaller og keramer. Videre kan de fleste materialer med partikler i riktige størrelser brukes som byggemateriale. For å konstruere et objekt er det en 5 steps prosess som må gjennomføres. (1) definere den nye typen pulver. (2) bestemme en bindingsmetode. (3) Bestemme bindingsvæske og teste bærekraften for printing og kompatibilitet med pulveret. (4) Spesifisere parametere til printe prosessen. (5) Spesifisere etterbehandlingsmetoder. [42][63]

#### 4.4.3 Laminated object manufacturing (LOM)



Figur 15: Illustrasjon av LOM produksjon. Omarbeidet etter [100]

Byggeprosessen i LOM består av en sekvensiell oppbygging der platene som kuttes til den ønskede former blir bundet sammen lag for lag. Denne prosessen blir utført av ruller som forer et limebelagt materiale til byggeplattformen som vist på figuren over. Videre blir byggematerialet presslagt med en varm plate eller rulle som blir lagt over de spesifiserte områdene. Etter dette kutter en laser ut de ønskede formene, og overflødig materiale blir ferdig. [43-45]

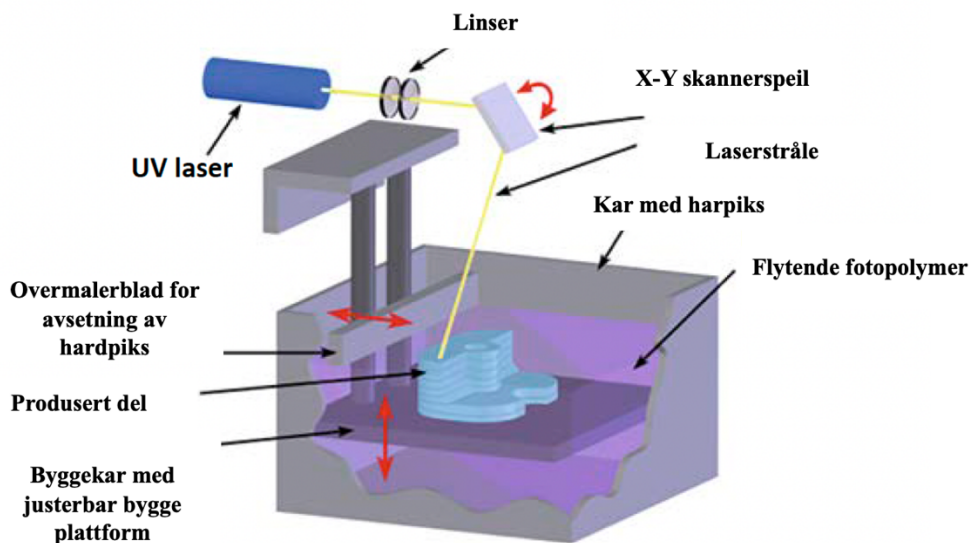
Etter at denne prosessen har blitt gjennomført vil plattformen bevege seg ned tilsvarende en tykkelse på byggemateriale. Nytt materiale trekkes over konstruksjonene, og varmerullen eller platen presser sammen det nye laget og den allerede eksisterende figuren. Denne prosessen vil bli gjentatt helt til. Oppsummert vil produksjonsprosessen se ut som følger: [43-45]

- En datamaskin slicer 3D modellen til tynne 2D tverrsnitt av modellen. Denne tykkelsen er like stor som materiale som brukes i byggeprosessen.
- Denne datafilen mates inn i LOM printeren, og byggeprosessen begynner. Laseren kutter ut geometrien til tverrsnittet og en rulle eller plate limer lagene sammen.
- Plattformen senkes tilsvarende lagtykkelsen, og rullene trekker et nytt lag over konstruksjonen.
- Høyden blir sendt tilbake til printeren i en feedback loop slik at det neste laget kan kalkuleres med de nåværende parametere
- Laseren kutter ut et nytt tverrsnitt, og rullene eller platen limer dette tverrsnittet til resten av konstruksjonen. Denne prosessen gjentas til konstruksjonen er ferdigbygget.
- Figuren kommer ut av maskinen som en rektangulær blokk, og overflødig materiale fjernes

LOM produksjon har en rekke fordeler, og disse er listet under: [43-45]

- En rekke organiske og uorganiske materialer kan brukes i LOM prosessen, og dette gjør at produksjonsmetoden kan tilpasses en rekke problemstillinger. Eksempler på disse problemstillingene kan være pris, bærekraftperspektiv, farger, mekaniske egenskaper ect.
- Nesten alle typer materialer kan brukes så lenge det kan produseres i lag, og disse lagene kan binde seg til hverandre.
- Prosessen er rask, og laseren trenger kun å kutte ut de geometriske formene som utgjør laget til endeproduktet. Denne fordelene i produksjonshastighet øker med størrelsen og volumet på den produserte delen.
- Produksjonsmetoden produserer nesten ikke noe internt stress eller uønsket deformasjon i objektene som blir produsert. Produksjonsmetoden er også presis siden det ikke er utsatt for krymping og det er mulig å gjøre målinger og slicing under prosessen.
- Overflateruheten til figuren vil kunne være veldig lav siden produksjonsmaterialet kan ha en tykkelse helt ned til 0.013mm (0.0005 tommer).
- Produksjonsmetoden trenger ingen støttestruktur.

#### 4.4.4 Stereolithography (SLA)



Figur 16: Illustrasjon av SLA produksjon. Omarbeidet etter [100]

SLA er den eldste formen for AM teknologi, og ble utviklet allerede i 1981. Dette er en AM-produksjon som stammer fra VPP metoden, og i dette tilfellet er det UV-stråling som blir brukt. [46][61-64]

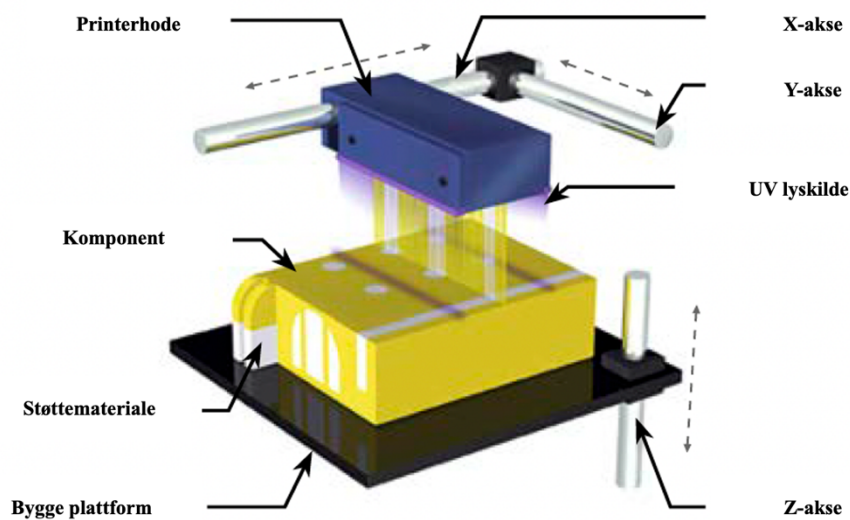
Byggeprosessen i SLA består av en UV-laser og et bad med flytende fotopolymer<sup>1</sup>/harpiks. Når lagene i byggeprosessen dannes blir konstruksjonen utsatt for UV-laseren, og en

<sup>1</sup> Et fotopolymer er et polymer som endrer egenskaper når det utsettes for lys/UV stråling

fotoinitiator i harpiksen gjør at de stedene som blir utsatt for UV-lys stivner. Etter at det første laget har blitt dannet går laseren over de nye områdene som bygger opp figuren, og denne prosessen gjentas helt til konstruksjonen er ferdigbygget. Denne prosessen er den samme for alle SLA metoder. [46][61-64]

Sammensetningen på fotopolymere kan tunes, og det vil være mulig å oppnå forskjellige materialegenskaper ved å endre på komposisjonen til byggematerialet. Videre vil det også være mulig å bruke andre strålingstyper, og disse kan variere mellom alt fra UV-lys til laserstråler. SLA produkter kan etterbehandles med UV-lys el for å herde byggematerialet, og dette er en vanlig etterbehandlingsmetode for å styrke materialet som brukes i SLA prosessen. [46][61-64]

#### 4.4.5 Polyjet modellering (PJM)



Figur 17: Illustrasjon av PJM produksjon. Omarbeidet etter [100]

Polyjet modellering er en metode som gjør det mulig å bruke flere materialer i byggeprosessen. Dette gjør at PJM er en metode som kan brukes til å lage komponenter som krever forskjellige materialegenskaper eller farger under prosessen. Dette har samme fordeler som er nevnt under MEX med flere reservoarer. Dette kan brukes til å legge forskjellige farger for å tydeliggjøre deler av modellen, enkel bygging av støttemateriale og bruke materialer med forskjellige egenskaper. Multi-materiell AM produksjon er fremdeles en veldig ny teknologi sammenlignet med AM produksjon som kun bruker et materiale. [47][62]

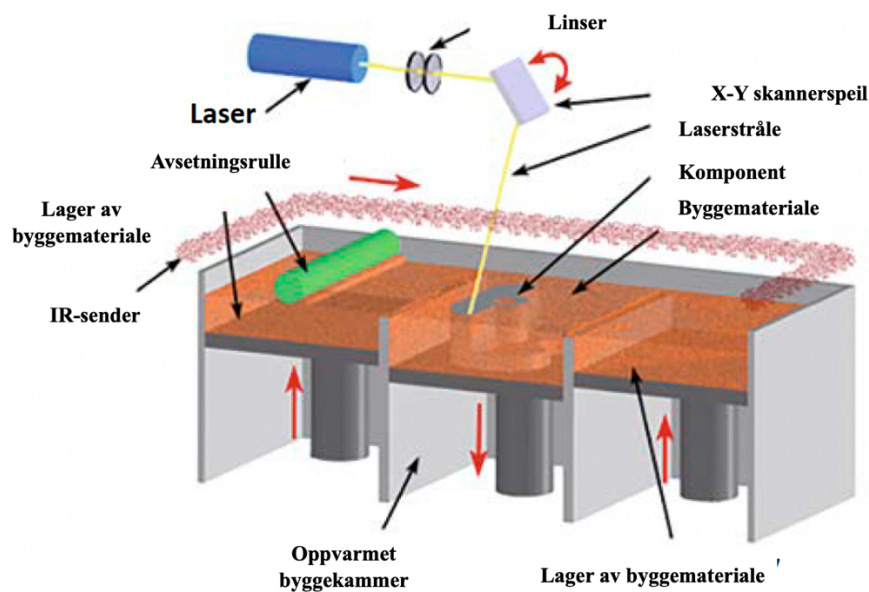
Når det brukes flere materialer sammen, er det viktig å vite hvordan disse materialene påvirker hverandre på et makroskopisk og mikroskopisk nivå

Selve prosessen baserer seg på at et tynt lag med materiale på byggeplattformen. Dette materialet blir umiddelbart utsatt for et UV-lys, og plattformen blir flyttet et hakk ned langs z-aksen. Det blir lagt et støttemateriale for at modellen skal bevare den originale

geometrien og støttematerialet kan fjernes ved å manuelt bryte det av eller å dyppe figuren i natriumhydroksid. Sistnevnte metode kan skade overflaten, og gjøre modellen mer utsatt for utmattelsesbrudd. [47][62]

Fordelene med PJM er at ved riktig bruk av materialer vil interaksjonen mellom disse være sterk nok til å motstå ekstern påvirkning. Videre kan det produseres deler med høy presisjon og oppløsning med et bredt utvalg av materialegenskaper. Apparatet kan også installeres i et vanlig rom, og er ikke avhengig av spesialtilpassede laboratoria omgivelser. [47][62]

#### 4.4.6 Selective laser sintering (SLS)



Figur 18: Illustrasjon av SLS produksjon. Omarbeidet etter [100]

Denne metoden baserer seg på at en laser går over et pudder og selektivt sintrer materialet slik at figuren bygges. Sintring av materialet vil si at pulveret varmes opp til en temperatur hvor partikler begynner å reagere med hverandre og vokser sammen. Materialpulveret blir med andre ord ikke varmet opp til en temperatur der det smelter, men en temperatur der pulveret reagerer på et molekylært nivå. [17][48-51][61-62]

SLS var den føreste kommersielle PBF metoden, og alle andre PBF metoder bygger på denne prosessen. De resterende PBF metodene er iterasjoner av SLS prosessen, og er utviklet for å kunne bruke nye typer materialer eller spesifikke patenterte mønstre. [17][48-51][61-62]

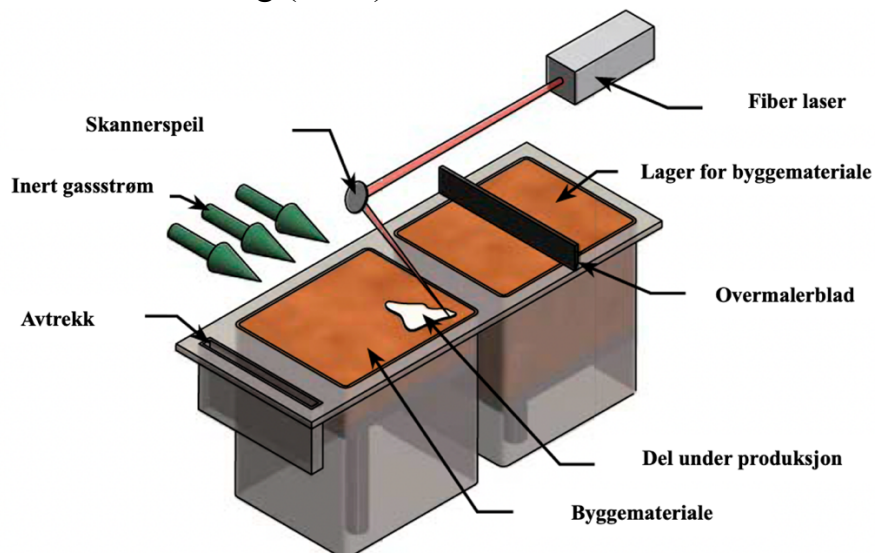
Alle typer PBF prosesser bygger på det samme konseptet, og et standard karakteristisk sett med egenskaper. Blant disse egenskapene er en eller flere varmekilder for å indusere en fusjon mellom partiklene i pulveret. [17][48-51][61-62]



PBF metoden ble i utgangspunktet bygget for å lage prototyper i plast, men metoden ble senere utvidet til å omfatte metall og keramer. Denne muligheten til å bruke forskjellige materialer i AM-prosessen har gjort PBF til en utbredt metode. [17][48-51][61-62]

Selve metoden berettiger seg på at en laser binder sammen pulveret i tversnittrepresentasjonene av figuren som skal bygges. Laseren blir guidet av et galvanometer, og en CO2 laser blir prosjektert direkte på produksjonsplattformen slik at byggematerialet blir termisk bundet sammen. Overflødig byggemateriale forblir i pulverform, og vil fungere som støttestruktur til konstruksjonen. Plattformen senkes ned, og et nytt lag med byggematerialet blir lagt over produksjonsplattformen. Denne prosessen gjentas til konstruksjonen er ferdigbygget. Hele prosessen skjer i et innkapslet kammer som holder temperaturer høyere enn omgivelsene, og ferdigbyggete konstruksjoner trenger en nedkjølingsperiode før den blir tatt ut av maskinen. Dette er for at byggematerialet ikke skal miste materialegenskapene sine, og at konstruksjonene skal ha best mulig egenskaper. [17][48-51][61-62]

#### 4.4.7 Selective laser melting (SLM)



Figur 19: Illustrasjon av SLM produksjon. Omarbeidet etter [100]

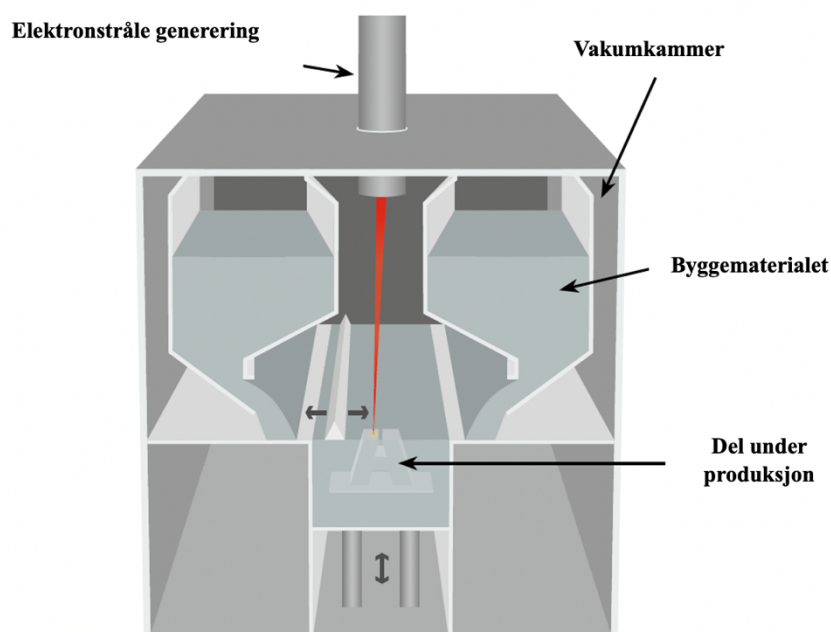
SLM er en av de metodene som dominerer AM produksjon. Denne metoden bruker en laser som skanner over en byggeplattform, og varmer opp byggematerialet slik at det smelter sammen. I likhet med andre metoder er SLM avhengig av en slicet fil som beskriver en STL fil lagvis. Under byggeprosessen beveger det seg en laser med høy effekt seg over en byggeplattform, og vil smelte byggematerialet sammen. Denne prosessen skjer i et lukket kammer med en beskyttende atmosfære. [52-54]

Ut i fra dette bygges det 2D plan som har blitt slicet ut av en 3D modell. Og laseren smelter materielle ut fra geometrien som er definert av 2D planene. Etter at et lag har blitt smeltet vil det bli tilført nytt pulver, plattformen vil bevege seg en lagdybde ned og smelteprosessen gjentar seg. Denne prosessen gjenta seg til figuren er ferdigbygget, og modellen kan fjernes fra apparatet. [52-54]

En av fordelene med SLM er at metoden tillater nesten 100% fyll av figuren, og dette gjør at metoden garanterer like egenskaper for en produksjonsserie. Videre brukes SLM innenfor bransjer der det kreves spesielle designtilpasninger, eller skal produseres i små kvanta. SLM egner seg på disse område, og vil være kostnadseffektiv i disse mindre produksjonsseriene. [52-54]

Noen av ulempene ved SLM metoden er et høyt nivå av residualstress og metallurgiske defekter. Noen av disse feildannelsene vil være alt fra sprekker til opphopning av metall. Dette er problematisk med tanke på overflaterøffhet, presisjonen og materialegenskapene til produktene. Videre er det gjort få studier på utmatting og bruddmekanikk rundt SLM metoden, og det er vanskelig å si noe om SLM produserte komponenters levetid. [52-54][62][64-65]

#### 4.4.8 Electron beam melting (EBM)



Figur 20: Illustrasjon av EBM produksjon. Omarbeidet etter [100]

Dette er i likhet SLM en PBF metode, og baserer seg på at en energikilde binder byggematerialet sammen på en byggeplattform. Denne metoden er mye mindre brukt enn andre PBF metoder, men har sine fordeler som høyere byggehastighet og bedre penetrering inn i byggematerialet. [55-56][62][64]

Grunnprinsippet med en EBM-printer er at en fokusert elektronstråle blir omdirigert for å binde sammen en ønsket geometrisk form. Etter at materialet har blitt bundet sammen blir byggeplattformen senket ned et hakk, og det tilføres nytt materiale. Dette materialet blir deretter utsatt for en elektronstråle og prosessen gjentar seg til figuren er ferdigprodusert. [55-56][62][64]

Fordelene med EBM er at metoden bruker en varmekilde med høy energitetthet og en høy skannehastighet over byggeplattformen. Dette gjør at metoden blir sett på som passende til å produsere deler i en rekke forskjellige metall legeringer. Den gode skannehastighet gjør det økonomisk gunstig å produsere høykvalitetsdeler med EBM metoden. [55-56][62][64]

En av ulempene til EBM er at denne metoden bruker en varm byggeplattform, og temperaturen skal være over 870K. Dette gjør at EBM metoden ikke produserer like fin mikrostruktur som andre PBF metoder. Videre vil metoden produsere en veldig røff overflate sammenlignet med andre metoder. Videre kan det formes metallballer som følge av elektronstrålen sin høye kinetiske energi. Dette kommer av at elektronene krever flere kollisjoner med byggemateriale før den kinetiske energien er absorbert. Dette fører til overflatespenninger i det smeltede materialet overgår fuktingsevnen til de tidligere lagte lagene. Dette fører til at byggeprosessen ikke kan fortsette som følge av den røffe og humpete overflaten. [55-56][62][64]

En annen kritisk faktor vil være delamineringer i endeproduktet. Denne delamineringen kommer av den av solidifiseringen i det øverste laget i byggeprosessen, og at energipåvirkningen danner et for høy residualstress. Dette residualstresset overgår bindeegenskapene mellom lagene i produksjonen, og byggeprosessen må avbrytes siden endeproduktet vil bli defekt. [55-56][62][64]

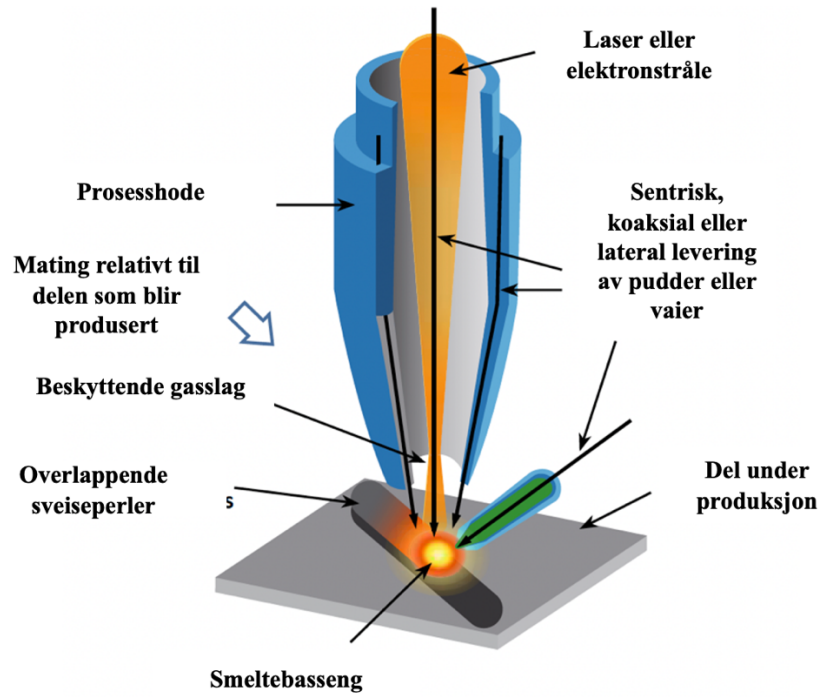
#### 4.4.9 Laser metal deposition (LMD)

LMD er en annen form for AM teknologi som gjør det mulig med lagvis produksjon. I likhet med alle andre metoder krever også LMD en slicet 3D figur for å kunne konstruere et produkt. Når denne filen er produsert vil byggeprosessen kunne startes. [57–59]

Denne prosessen har en laser som varmer opp et område og skaper et sveisebasseng. Metallpulver blir sprayet direkte inn i sveisebassenget, og dette pulveret kombineres med grunnmaterialet. Sveisebassenget blir ofte beskyttet med argon-gass slik at det blir mindre urenheter i metallet. Prosesshode vil bevege seg over X-Y planet, og bygger et tynt lag med ønsket geometri. Deretter vil prosesshode og dysen som sprøyter inn metallpulver bli flyttet en lagtykkelse opp langs Z-aksen og prosessen vil gjenta seg til figuren er ferdig bygget. [57–59]

LMD er en produksjonsmetode som gir gode materialeegenskaper, og når kravene til egenskaper for reel bruk. Mikrostrukturen til materiale som har vært igjennom byggeprosessen er også tilstrekkelig god, og materialet har gode egenskaper innenfor duktilitet og styrke. Videre resulterer produksjonsmetoden i normale brudd, og bruddkarakteristikken er normal i forhold til materialet som brukes. [57–59]

Noen av ulempene med produksjonsmetodene er at egenskaper som hardhet faller gjennom komponenten, og den vil være hardest på toppen. Videre resulterer metoden i lavere verdier enn referansepunktet både på E-modul og Poisson ratio. [57–59]



Figur 21: Illustrasjon av LMD produksjon. Omarbeidet etter [100]

## 5 INTERVJUER OG EKSPERTINNSPILL

*I dette kapittelet vil det bli gjort undersøkelser med ekspertgrupper og fagkyndig personell. Dette vil bli gjort for å få eksterne innspill på faktorer som kan påvirke bruk av RP-teknologi.*

For å få eksternt innspill på områder som testing, økonomi, marked og lovverk har det blitt konsultert med eksperter innenfor forskjellige områder. Disse intervjuene og diskusjonene vil være med på å gjøre antagelser om preferansene til kundegruppen og bedrifter. Det vil også blir undersøkt ansvaret en bedrift vil ha dersom produksjonsmetoden fører til mangler ved et produkt. For å få fornuftige innspill på ekspertenes områder vil det bli rådslått med ingeniører om tester og utfordringer rundt produksjonsmetodene. Videre vil det bli konsultert med økonomer angående faktorer som blir vektlagt i investeringsanalyse og profitabilitet i prosjekter.

### 5.1 Målsetting for intervjuer og ekspertinnspill

Hovedmålet for testingen er å få tilbakemelding på faktorer som bør vektlegges når en RP teknologi skal vurderes. Et annet aspekt er å få ekspertinnspill på testingen slik at denne gjøres riktigst mulig.

Preferansesettet er ment å inneholde antatte faktorer en bedrift vil verdsette når innkjøp av teknologi vurderes, og vil være veiledende for å vurdere funksjonene til en teknologi opp mot krav fra bransjen. Kort fortalt er et preferansesett en matematisk fremstilling av hva bransjen vektlegger. Faktorer som har blitt

Ingeniørperspektiv

- **Standarder:** Hvilke standarder er relevante for testingen?
- **Fornuftige tester:** Hvilke tester vil være fornuftig å gjøre?
- **Sammenligning:** Hvilke fordeler produksjonsmetodene?

Juridisk perspektiv

- **Produkter i sirkulasjon:** Hvilket ansvar har en bedrift for produkter i sirkulasjon?
- **Krav til produkter:** Hvilke krav bør stilles til produkter som skal produseres?

Økonomiske perspektiv

- **Prising:** Hvor viktig er prisingen for kunden?
- **Bærekraft:** Hvordan fokusere på bærekraft?
- **Marked:** Hvordan komme seg inn i et marked?

### 5.2 Valg av ekspertteam

Siden det vil være vanskelig å finne bedrifter til å svare på en spørreundersøkelse vil det kun bli konsultert med en eksperter og fagkyndige. Siden det vil være interessant å høre om

relevante tester, ansvar for produksjonsserier, økonomiske perspektiver på produksjonsutstyr og faktorer som gjør det mulig å konkurrere i et marked har det blitt konsultert med eksperter fra flere områder.

Tabell 14: Oversikt over ekspertteam og kompetanse

Navn	Bakgrunn	Ekspertområde
Sigurd Berstad	Økonom; Pricing and profitability controller	Prising og marked
Dane Cekov	Siviløkonom; Analytiker	Marked og innspill til kostnadsanalyse
Svein gjørtz	Jurist; Advokatfullmektig	Juridisk ansvarsområde
Henrik Holmberg	Senioringeniør	Testing og oppsett av testutstyr.
Øyvind Hansen	Senioringeniør og jobber på prototypeverkstedet til NMBU.	Sammenligne produksjonstyper
Jan Kåre Bøe	Førsteamanuensis	AM-teknologiens historie på NMBU

### 5.3 Kommunikasjonsform

Kommunikasjonsformen i konsultering med eksterne vil være basert på intervjuer. Intervjuformen vil variere mellom forhåndsbestemte spørsmål og diskusjoner avhengig av ekspertens tilgjengelighet. Dette er antatt å danne et godt grunnlag som vil bli brukt til å lage antagelser om aktører i markedet, som også vil bli dobbeltsjekket med senioringeniør Øyvind Hansen

### 5.4 Resultater og resultattolkning

#### 5.4.1 Senior ingeniør Henrik Folke Holmberg

Samtalene med Senioringeniør Henrik Folke Holmberg har vært gjennomgående gjennom hele prosjektet, og han bidrar til utviklingen av forsøkene. Senioringeniør Henrik Folke Holmberg kommer også med forslag og veiledning av standardbruk rundt strekkprøvene, og anbefaler å bygge dette forsøket rundt ISO 527-1:2012 og ISO 527-2:2012. Videre anbefaler han på det sterkeste å avgrense forsøkene for å kunne se på isolerte faktorer som påvirker resultatene. Han kommer også med innspill om at alle forsøkene bør utføres under samme forhold slik at minst mulige eksogene faktorer påvirker resultatet av forsøkene. Her anbefaler han også at alt i materialet skal være likt slik at det kun er produksjonsmetoden som påvirker resultatene fra forsøket. Han anbefaler også å lage en innspenning til prøvestavene slik at innspenningen ikke har noen innvirkning på resultatet [66].

Senioringeniør Henrik Folke Holmberg anbefaler en Shore hardhetsprøver som er den vanligste måten å teste hardheten til polymer. Han hjalp også til med å sette opp forsøket, og var behjelpelig med lån av testmaskin og planbord slik at resultatene fra testen skulle være best mulig. [66]

Senioringeniør Henrik Folke Holmberg anbefaler også å begrense oppgaven til polymer, og unngå bruk av metaller. Dette er for å holde forsøkene enkle og oversiktlige, og ikke skape merarbeid med å forklare fasediagram og kornstruktur for metaller. Videre reiser han også spørsmål rundt hvordan prøvestavene skal produseres, og hvordan filamentet skal legges i prøvestaven. Skal de produseres på en normal måte, eller skal filamentet skal legges i en isotrop retning? Hvor mye fyll skal det være i figuren, og hvilke parametere for produksjon er ønskelig å se på? [66].

Videre har Senioringeniør Henrik Folke Holmberg også kommet med tips til punkter som bør diskuteres for å forsvare resultatene fra forsøket, og har gitt veiledning på faktorer som bør vurderes under produksjon og utførelse av forsøk. [66]

#### 5.4.2 Siviløkonom Dane Cékov; Analytiker

##### **Hva tenker du skal til for at et produkt skal passe inn i et marked?**

Til dette spørsmålet svarer Siviløkonom Dane Cékov at produktet må svare på et behov eller et problem. Alternativt må produktet gjøre det bedre enn konkurrentene i markedet, og her drar han opp et eksempel med Iphone. Det finnes mange andre alternativer på markedet med bedre spesifikasjoner, men Apple har flere egenskaper med produktet som gjør at endebrukeren velger produktet deres. Videre handler det også om hvor lang tid et produkt bruker til markedet, og at markedet blir timet riktig. Det finnes mange eksempler på produkter som timer markedet feil, og at konsumgruppen ikke ser behovet for produktet når det treffer markedet. Han drar frem at et produkt må treffe markedet med riktige funksjoner, til riktig tid. [67]

##### **Hvordan ville du sett på faktorer som kan brukes til en komparativ analyse av produkter?**

Her drar Siviløkonom Dane Cékov igjen frem at markedet må se et behov for produktet. Hvis produktets egenskaper ikke svarer til markedets behov, vil produktet ikke kunne konkurrere eller være relevant for konsumgruppen. For å få til dette anbefaler han å spørre endebbrukere for å finne et aggregert behov hos kundegruppen. Et forslag han kommer med for å finne konkurransedyktigheten til produkter er fremgangsmåter som blindtester ol. Videre drar Siviløkonom Dane Cékov frem kostandsperspektivet, og at nytten produktet bidrar med for endebrukeren må kunne forsvare kostnaden assosiert med produktet. Denne kostnaden er direkte sammenlignbar med konkurrentenes produkter i markedet med samme egenskaper. Videre drar han også frem spørsmålet rundt alternativkostnader. Hvis en bedrift eller en konsument får mer ut av å investere i et alternativ produkt vil dette være mer gunstig for endebrukeren. [67]

### **Hva mener du er viktig når det blir sett på investeringer, og hvilke faktorer vil et selskap vektlegge?**

Her drar Dane frem at hva som skal produseres må stå sentralt i avgjørelsesprosessen. Videre bør det ligge søkelys på maskinenes evne til å produseres mest mulig riktig, og at feilproduksjon må minimeres. Her mener han også at den komparative statikken på kostandsperspektivet kan sees på som kvanta ganger pris på produksjon, og hvor mye nytte får selskapet ut av investeringen. Det kan også være ikke finansielle faktorer som spiller inn, og disse må også komme inn i avgjørelsen. [67]

Som metodikk mener han at det bør sees på en DCF-analyse som ser på fremtidige kontantstrømmer som følge av investeringen, og om investeringen er kostnadsbesparende for bedriften. Om nåverdien fra DCF-analysen er positiv vil det være gunstig å investere. I likhet med Sigurd Berstad drar også siviløkonom Dane Cékov frem at bedrifter bruker penger idag for å komme tjene penger senere. Videre drar siviløkonom Dane Cékov også frem at det burde bli sett på hva som skal til for at maskinene tjener penger, og hvordan endringer i forsyningskjedene påvirker lønnsomheten til produksjonsutstyret. [67]

### **Tror du det er mulig å oppnå stordriftsfordeler for mindre firmaer hvis produksjonsutstyret er agilt og kan tilpasses flere prosesser?**

Her drar siviløkonom Dane Cékov frem at det vil være en fordel med et agilt maskineri, og det er en fordel om maskineriet kan tilpasses en produksjonsserie raskere. Videre drar han også frem at produksjonsutstyr som er lett å tilpasses en produksjonsserie vil kunne føre til bedre kontroll i selskapet og kortere leveringstider. Her anbefaler han å kjøre en sensitivitetsanalyse for å se hvordan lønnsomheten vil endre seg med avkastningskravet til de mindre bedriftene. [67]

### **Hvordan ville du fordelt inntekter fra et prosjekt hvis det blir brukt mange typer maskineri i prosessen?**

Siviløkonom Dane Cékov tror det kan være interessant å se på hvor stor andel av profitten som kan følges tilbake til maskiner. Siviløkonom Dane Cékov syntes ikke det vil være usannsynlig at du kan bruke en form for ABC-kalkyle for å finne ut hvor mye profitt som kan skrives til en gitt produksjonstype. Dane Cékov syntes også det burde bli gjort en sensitivitetsanalyse for å se hvordan dette vil se ut for bedrifter på lengre sikt. Renteendringer og økninger i råvarepriser kan endre kostnadsbildet for bedriftene relativt raskt. [67]

### **Tror du AM-produksjon er noe som kan supply chains mer effektive og kostandsbesparende, og tror du forsyningskjedene kan bli mer stabile som følge av AM-produksjon?**

Dane Cékov tror dagens samfunn for kan trenge mer stabilitet i leveringskjedene. Globaliseringen som har skjedd de fra vi var små, men nå stopper det. Vi begynner å se en deglobalisering uten at jeg skal si for sikkert at det skjer. Det er mange faktorer som Covid-19 i kina og Ukraina krisen som kan føre til mer splittelse i verden hvis ting aggregerer. Denne



deglobaliseringen kan være kritisk siden verden har støttet seg på råvarer og maskineri fra kina. Det har vært lave fraktkostnader, og det kan fort hende at dette endrer seg med årene. Det er ikke umulig at i en verden hvor vi vil bli mer robuste og mindre sårbare fra forsyningskjeder at AM-produksjon vil være noe som blir nyttig. Det kan fort hende at ting plutselig kommer til å koste mer som følge av tariffen og skatter på importsiden, og dette vil drive opp kostander for bedrifter. Dette er noe små og store bedrifter fort må bli mer vandt til. [67]

Andre faktorer som Dane Cékov mener kan bli relevante i for bedrifter er lokal produksjon, bærekraft, kvalitetssikrede og kortreiste varer. sier dane at; *«Jeg vet ikke så mye om hvordan teknologien fungerer, men det er viktig at det gir tilstrekkelig kvalitet. Dette kan jeg ikke, og kan ikke uttale meg om.»* [67]

### 5.4.3 Siviløkonom Sigurd Berstad; prisings og profitt kontrollør

Sigurd Berstad har blitt spurt angående profitt og prising. Han har også uttalt seg om markedsandeler og økonomiske utfordringer rundt manglende kvalitet i produkter.

Det første Sigurd ble spurt om hvordan var hva han vil se på hvis han skal investere i et prosjekt, eller sette prisen på en kontrakt el. Hensikten med dette var å få et innblikk i hvordan en bedrift tenker ved anskaffelser av nytt maskineri.

*«så det første jeg ville sagt er at man bør ha en oversikt over forventet inntekt, kostnader og risiko. For å få oversikt over de innsatsfaktorene er man avhengig av data, og det er stor variasjon om hvilken grad man har av data på ulike ting»* [68]

Videre uttaler Sigurd seg om hva han mener er relevant og riktig fremgangsmåte for å evaluere og forsvare en investering. Her trekker han frem at en grei tilnærming er å se på cashflowen til investeringen, og henter til bruk av nåverdimetoden.

*«Det avhenger veldig av produktet, men en måte å tenke på det er at du gjør en investering, Så må du gjøre en beregning av fremtidig cash flow fra investeringen. Det gjelder alt fra boliglån til investeringer i aksjer og prosjekter.»* [68]

Videre legger han til det han mener er grunnprinsippet for en investering. *«Stort sett er investeringer det samme; man bruker penger i dag mot en forventet profitt på investeringen i fremtiden»* [68]

Videre var det interessant med et perspektiv på tilpasningsdyktigheten til produksjonsutstyret, og om dette er en fordel for en bedrift som driver med flere produksjonsserier. *«Dersom man ser på en produksjonsserie som et prosjekt, så er jo produksjonsutstyr potensielt kostnadsbesparende, ergo forventet inntjening i fremtiden kan være høyere. Ved at utstyret kan brukes på flere serier, og produsere billigere»* [68]

Videre var det også interessant å høre om hva en eventuell fordel med effektivisering i produksjonsserier kan føre til. Her lå baktanken i designfordeler, og utfordringer som normalt sett ville vært en utfordring for tradisjonelle maskineringsmetoder. «*Alt som effektiviserer vil jo bety en kostnadsbesparelse*»

Videre var det interessant og få utdypet litt rundt viktigheten av pålitelig produksjonsutstyr, og hvordan det økonomiske aspektet av feilproduksjon og tilbakekalling av produkter. Her forklarte Sigurd at dette er en problematisk situasjon og at pålitelig utstyr er viktig. «*Tilbakekalling av produkter er jo problematisk, fordi der har man den direkte kostanden som er enkel å måle i form av utbetaling til kunde, men det som er vanskelig å måle er ringvirkningene av en slik hendelse. Hvilket renommé får produktet hos kunder ved at man må tilbakekalle, og hvilken kostnad innebærer det tapet av renommé?*» [68]

Bedrifter kjemper som ofte i et marked hvor små fordeler kan føre til økt profitt for selskapet, og Sigurd utredet litt rundt hvordan eventuell effektivisering og kostnadsminimering påvirker selskapene. «*Markedsandel avgjøres av hvorvidt kunder velger ditt produkt foran andre tilsvarende produkter. Altså hvilken bit av kaken du tar. Senkning av produksjonskostnader er ikke i seg selv en grunn til høyere markedsandel. Men det er grunnlag til større profittmargin gitt den markedsandelen du har. Markedsandelen øker du ved å få kunder til å velge ditt produkt, ergo må prisene senkes. Eventuelt kan det settes søkelys på andre faktorer kunden verdsetter. Da er det golden sweetspot spørsmålet om hvor mye bør man senke prisene for å totalt sett kapre mest salg (markedsandel) slik at margin per produkt\*salg blir høyest mulig*» [68]

#### 5.4.4 Advokatfullmektig Svein Gjørtz

For å få et innspill på hvilke ansvar en bedrift har ovenfor en produksjonsserie har det blitt utført et intervju med advokatfullmektig Svein Gjørtz. Målet med denne samtalen har vært å finne ut hvor mye ansvar en bedrift sitter med ovenfor en produksjonsserie. Advokatfullmektig Svein Gjørtz la også vekt på at han ikke uttaler seg som en ekspert innenfor dette juridiske fagfeltet, men uttalers seg på bakgrunn av generell juridisk kompetanse.

Angående feil eller mangler i produksjon nevner svein produktansvarsloven av 1988. han nevner at «Den regulerer produsentens ansvar for skader som forårsakes av produktet», og trekker frem § 2-1. [70]

Han nevner at «denne gjelder erstatning for skader som produktet har forårsaker etter den er satt i omsetning (aka. Levert fra produksjonen)» [69]

Videre nevner han at krav til produkter ofte varierer veldig med bransjer, og nevner også problemstillingen der «en defekt eller innebygget feil i produksjonsutstyret kan det jo tenkes at det er produsenten av produksjonsutstyret som er ansvarlig for skaden.». Han nevner også videre at «Spørsmålet i en slik situasjon ville i så fall være om dere burde ha oppdaget at den feilen gjorde at deres produkt ikke oppfylte den sikkerheten som allmennheten kunne

*forvente.»*. Han nevner også at dette vil være en veldig kompleks juridisk problemstilling. Intervjuet avgrenses derfor til feil i produksjon fra produsentens side, og at alt som leveres fra produsent av maskineri er å betrakte som tilfredsstillende. [69]

Etter at spørsmålet har blitt avgrenset til å gjelde en produksjonsserie kommer Svein med utsagnet *«Jeg vil si at normen som oppstilles i produksjonsutstyret krever at du som produsent går nøye gjennom produksjonsprosessen, inkludert produksjonsutstyret, for å se at det ikke er feil som kan forplante seg i produktet dere leverer.»*. Han nevner også at *«feilkalibrering, skjevheter som gjør at produktet ikke blir som designet ect»* for faller på produsent av produktet, og dermed er produsentens ansvar. [69]

*«Det mest vesentlige jeg antar en produsent må gjøre, er å teste produktet som kommer av produksjonslinja for ulike risikoer som er normale for produktet, feks store belastninger for en terrengsykkel»* [69]

Han sier også at *«du må ha på plass prosesser som sikrer at dere er overbevist om at produkter oppfyller alminnelige krav til sikkerhetsstandarder. Eventuelt om det finnes fastsatte bransjestandarder»* [69]

Videre forteller han også at *«Det juridiske spørsmålet er om produktet oppfyller de krav til sikkerhet en bruker eller samfunnet i alminnelighet kan forvente av den typen produkt. Når man skal finne ut hva de kravene er for en spesifikk type produkt så kan man se til bransjestandarder for å utlede hva man i alminnelighet forventer av sikkerhet. Når det gjelder spørsmålet om produsenten har forsikret seg om at produktet oppfyller de kravene så vil man fort se til de interne prosessene som er ment å verifisere at produktet lever opp til sikkerhetskravene»* [69]

#### 5.4.5 Senioringeniør Øyvind Hansen

Senioringeniør Øyvind Hansen har blitt spurt om innspill for å kunne sammenligne RP-produksjon, og hvilke fordeler de forskjellige metodene har. Han har også kommet med innspill til de komparative analysene, og har også gitt en vurdering av det antatte preferansesettet til bedrifter som skal kjøpe inn utstyr. [16]

Når det kommer til faktorer som senioringeniør Øyvind Hansen vektlegger i anskaffelse av produksjonsmaskineri svarer han at kapasiteten og kompleksiteten til produkter som skal maskineres ut faktorer som vurderes. Videre nevner han pris, og at maskinen helst bør være fleksibel og tilpasningsdyktig til flest mulig produksjoner. Dette vil si at maskinen bør ha minst mulig begrensninger og flest mulig egenskaper som treffer flere bruksområder. [16]

Senioringeniør Øyvind Hansen ble også spurt om preferansesettet som har blitt kartlagt fra de andre samtalene så greit ut, og om han mente det var noen flere faktorer som burde inkluderes for å gi best mulig resultat for QFD analysen. Senioringeniør Øyvind Hansen hadde heller ikke

flere faktorer han mente burde tilføres for å gi et godt bilde på hva bedrifter vil verdsette i anskaffelsen av nytt maskineri. [16]

Videre kommer han med tre innspill for å gi et innblikk i faktorer han er viktige, og hvordan han ville rangert disse. Som den viktigste faktoren mener han egenskapen maskinen har til å produsere mest mulig komplekse deler. Etter bør det bli vurdert hvor presist maskinen kan produsere deler, og som siste faktor tar han opp produksjonshastigheten. Han mente den sistnevnte egenskapen ikke nødvendigvis er like viktig, og at hovedfokuset står på at maskinene kan produsere komplekse deler med høy presisjon. [16]

Senioringeniør Øyvind Hansen fortalte også litt rundt RP-metoder og hvordan disse gjennomføres. Disse innspillene har blitt inkludert i kapittel 1 hvor metodene sammenlignes, og han veiledet utviklingen av spyder-diagrammet. [16]

## 5.5 Utvikling av preferansesett og QFD «house of quality» analyse

Siden det ikke blir gjennomført en kvantitativ undersøkelse angående bedrifters preferanser vil preferansesettet basere seg på ekspertsamtalene. I dette tilfellet vil alle preferansene være antatte preferanser om konsumgruppen, og ikke avslørte preferanser om hva markedet faktisk foretrekker.

Disse preferansene vil bli produsert ut fra hva ekspertgruppene har utalt seg om, og det vil bli valgt ut 6 antatte preferanser om konsumgruppen. Basert på ekspertsamtalene har det kommet frem at pålitelighet til produksjonsmetoden er en faktor som bør vektlegges, Dette kommer frem som en kombinasjon erstatningsansvaret advokatfullmektig Svein Gjørtz nevner, og problematikken ved å trekke tilbake en vareserie og kostnadene rundt dette som siviløkonom Sigurd Berstad tar opp.

Som følge av dette er materialkvalitet en av faktorene som også bør vektlegges, og som det er antatt at bedrifter vil maksimere. Presisjon er også en faktor som kommer frem som en faktor som bør vektlegges, og dette henger sammen med kvaliteten til produktet.

Videre handler dette også om et økonomisk perspektiv med tanke på cashflow som Sigurd nevner. Bedrifter gjør investeringer i dag med et ønske om å tjene penger på det i fremtiden. Dette viser at pris på utstyr også er en faktor som bør vektlegges. Vider bør maskinene være såpass robuste at de kan brukes over en lengre tidsperiode, og dette har derfor blitt inkludert i preferansesettet. Den siste faktoren som har blitt inkludert er bærekraft, og dette er for at produksjonen ikke skal ha for mange eksternaliteter.

Disse faktorene blir satt inn i en vektorfremstilling for å kunne brukes videre i en senere prosjektfase.

$$(X_{\text{Pålitelighet}}, X_{\text{Robusthet}}, X_{\text{Pris}}, X_{\text{Materialkvalitet}}, X_{\text{Bærekraft}}, X_{\text{Presisjon}}) = \vec{X} \quad (5.1)$$

For videre bruk vil følgende sammenhenger være gjeldende. Dette er ikke avslørte preferanser for konsumgruppen, men antatte preferanser;

$$X_{P\ddot{a}l\ddot{t}e\ddot{l}i\ddot{g}h\ddot{e}t} \leq X'_{P\ddot{a}l\ddot{t}e\ddot{l}i\ddot{g}h\ddot{e}t} \quad (5.2)$$

$$X_{R\ddot{o}b\ddot{u}st\ddot{h}e\ddot{t}} \leq X'_{R\ddot{o}b\ddot{u}st\ddot{h}e\ddot{t}} \quad (5.3)$$

$$X_{K\ddot{o}st\ddot{n}a\ddot{d}e\ddot{r}} \geq X'_{K\ddot{o}st\ddot{n}a\ddot{d}e\ddot{r}} \quad (5.4)$$

$$X_{M\ddot{a}t\ddot{e}r\ddot{i}a\ddot{l}k\ddot{v}a\ddot{l}i\ddot{t}e\ddot{t}} \leq X'_{M\ddot{a}t\ddot{e}r\ddot{i}a\ddot{l}k\ddot{v}a\ddot{l}i\ddot{t}e\ddot{t}} \quad (5.5)$$

$$X_{B\ddot{a}r\ddot{e}k\ddot{r}a\ddot{f}\ddot{t}} \leq X'_{B\ddot{a}r\ddot{e}k\ddot{r}a\ddot{f}\ddot{t}} \quad (5.6)$$

$$X_{P\ddot{r}e\ddot{s}i\ddot{s}j\ddot{o}n} \leq X'_{P\ddot{r}e\ddot{s}i\ddot{s}j\ddot{o}n} \quad (5.7)$$

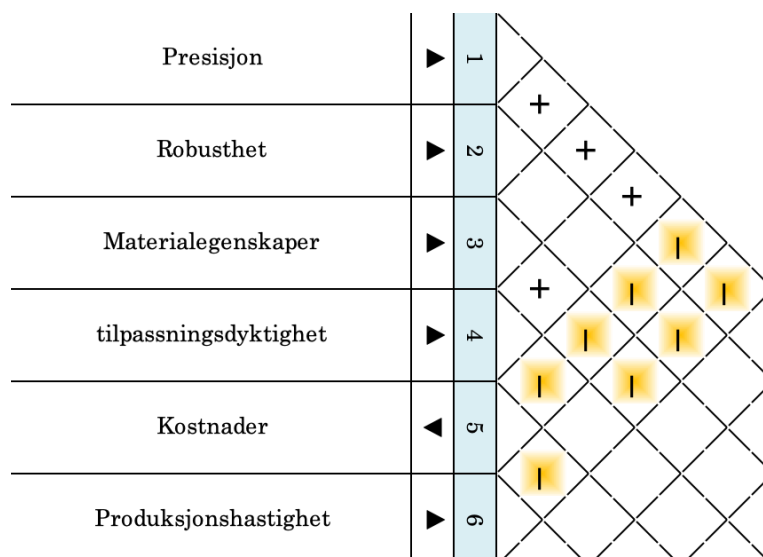
Her vil X' være et høyere nivå av tilfredstillelse enn X, og fra disse sammenhengene vil faktorene påliteligheten til produksjonen, Robustheten til maskineriet, materialkvaliteten i produktet og bærekraftperspektivet ønskes å maksimeres. Hvis en av disse faktorene økes vil kundegruppen foretrekke dette produktutkastet fremfor en tidligere iterasjon. Videre vil kostnaden assosiert med innkjøp og bruk være ønskelig å minimere.

Disse resultatene har blitt knyttet opp til et QFD «house of quality» for å kunne gjøre en komparativ analyse basert på resultatene fra ekspertsamtalene. For funksjonskravene har det blitt satt opp en rekke faktorer som har blitt avdekket i teorigjennomgangen, og disse har også blitt validert av senioringeniør Øyvind Hansen. Det antatte preferansesettet med korrelasjoner til tekniske krav er satt opp i figuren under.

Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Column #	1	2	3	4	5	6
						Direction of Improvement						▲
						Functional Requirements	Presisjon	Robusthet	Materialegenskaper	tilpassingsdyktighet	Kostnader	Produksjonshastighet
1		26%	5	6	Pålitelighet i produksjon		●	●	●	▽	●	●
2		16%	3	6	Robust maskineri		●	●	▽	●	○	▽
3		21%	4	6	Investeringskostander		●	●	●	●	●	●
4		26%	5	6	Materialkvalitet		●	●	●	○	●	▽
5		11%	2	6	Bærekraft		○	●	○	●	▽	▽

Figur 22: Funksjoner, endebbrukers antatte preferanser og korrelasjonen mellom disse

For å gi et innsyn i korrelasjonene mellom funksjonskravene har toppdelen av QFD «house of quality» blitt satt opp. Dette viser hvordan funksjonskravene påvirker hverandre, og er illustrert på figuren under.



Figur 23: Oversikt over korrelasjoner mellom produksjonsutstyrets egenskaper

Fra figur 17 kommer det frem at majoriteten av funksjonskravene korrelerer med hverandre, men at nesten alle funksjonskravene korrelerer negativt med kostnader assosiert med bruk/anskaffelse og produksjonshastighet.

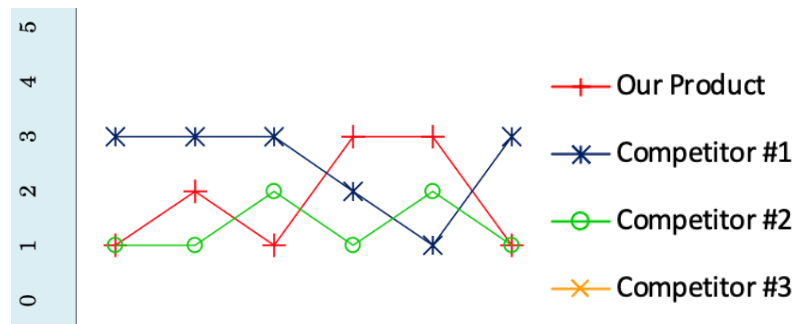
For å se på den tekniske konkurransedyktigheten til produktene har disse blitt rangert ved hjelp av den komparative analysen senioringeniør Øyvind Hansen hjalp til med i kapittel 1. Her har det også kommet frem hvor viktige de forskjellige faktorene er, og det kommer frem at robustheten til maskineriet, høy presisjon i produksjon og om løsningen er kostnadseffektiv er de tre viktigste faktorene. Senioringeniør Øyvind Hansen nevner også at produksjonshastighet ikke er like viktige som de andre faktorene.

Target	Høy presisjon i produksjonen	Maskinen er robust	Gode materialutnyttelse	Tilpassningsdyktighet	Kostnadseffektiv løsning	Produksjonshastighet
Max Relationship	6	6	6	6	6	6
Technical Importance Rating	836,84	900	710,53	531,58	721,05	478,95
Relative Weight	20%	22%	17%	13%	17%	11%
Weight Chart						
AM-produksjon	1	2	1	3	3	1
Hurtigmaskinering	3	3	3	2	1	3
Støpning	1	1	2	1	2	1

Figur 24: Oversikt over funksjonsmål, vekting og rangering av produksjonsmetodene

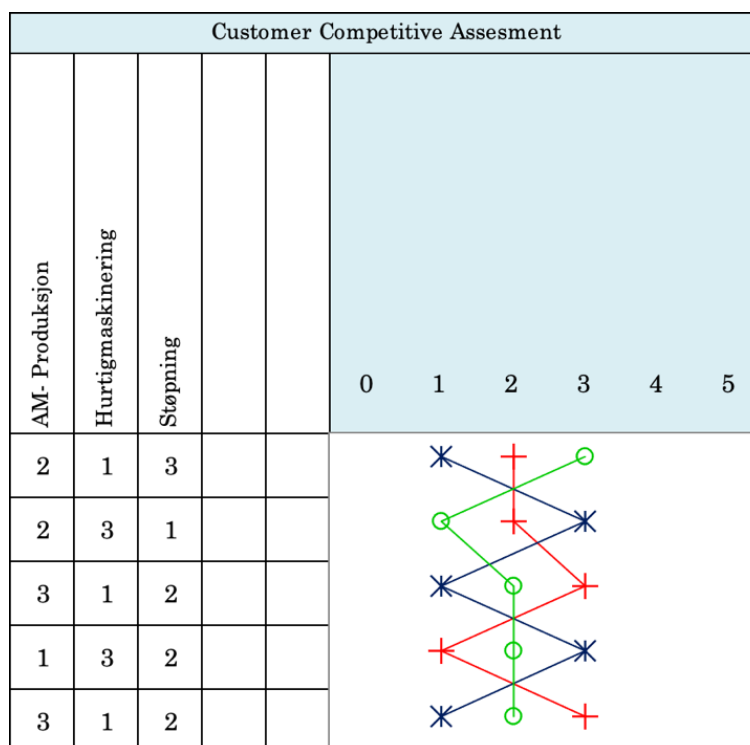
Fra denne analysen kommer det frem at AM-produksjon er best på tilpassningsdyktighet og kostnadseffektivitet, men produksjonsmetoden er dårligst på materialkvalitet. CNC-

maskinering er best på de resterende funksjonskravene, og støpning ligger stabilt rundt midten, men scorer dårligst på tilpasningsdyktigheten. Disse funnene er illustrert på figur 19.



Figur 25: Resultater av rangeringen for produksjonsmetodenes funksjonsmål

Fra kundegruppens kompetitive vurdering kom det frem at CNC-maskinering maskinering er best på robustheten til maskineriet og materialkvaliteten. AM-produksjon har komparative fortrinn innenfor investeringskostnaden og bærekraftsperspektivet. Støpningsprosessen har scoret høyest på påliteligheten til produksjonsmetoden siden dette er en enkel metode som gir gode resultater.



Figur 26: Resultater fra komparativ analyse av kundegruppens krav og hvorvidt produksjonsutstyret svarer til disse

Resultatene fra den komparative analysen viser at det er stor forskjell mellom hvilken produksjonsmetode som er best. For å kunne velge et RP-verktøy må derfor bedrifter være klar over fordelene og ulempene ved de forskjellige produksjonsmetodene før innkjøp.

## 6 UTVIKLING AV FORSØK OG PRØVETAKNING

*I dette kapitlet vil det bli forklart hvordan forsøk skal utføres, hvilke faktorer som skal loggføres og hvilket maskineri som skal brukes.*

### 6.1 Hovedmål for forsøk og prøvetakning

Det har tidligere blitt gjort forsøk basert på hvordan orientering under produksjon påvirker egenskapene til AM-produserte prøvestaver. I rapporten «*Determination of mechanical properties of materials used for 3D printing*» blir det gjort strekkprøver på to grupper prøvestaver som har blitt produsert med forskjellig orientering. Her har det blitt brukt ABS filament, og det ble produsert 10 prøvestaver. Disse blir produsert i to forskjellige måter, der lengderetningen til den ene prøvestaven er lagt langs x-aksen og den andre har lengderetning langs y-aksen. Fra dette forsøket kommer det frem at det er en forskjell i de mekaniske egenskapene som følge av orientering under produksjon, og at denne forskjellen ikke er neglisjerbar. [71]

For å bygge videre på dette forsøket vil strekkeegenskapene til PETG plast bli testet for å sjekke om materialet påvirker resultatene. Videre vil det også bli testet hvorvidt orienteringer under produksjon vil ha en innvirkning på materialeegenskapene når forsøket videreutvikles til forskjellige orienteringer i et tredimensjonalt rom.

For å kunne si noe om materialkvaliteten til AM-produserte prøvestaver vil det bli satt opp et hovedmål. Dette hovedmålet vil være.

***«Teste og utrede om hvorvidt orienteringen til prøvestavene under produksjon vil ha noen påvirkning på materialeegenskapene. Alle trinnene i forsøket skal dokumenteres, og resultatene skal loggføres»***

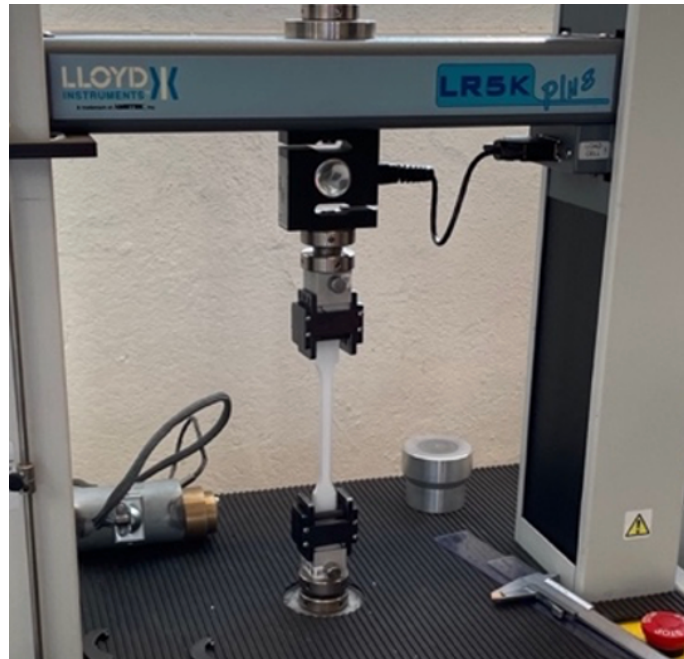
For å avgrense og konkretisere forsøket har det blitt valgt og se på to materialeegenskaper, og utfra dette har det blitt formulert to delmål

- Utvikle, gjennomføre og dokumentere tester for flytegrensen til AM-produserte prøvestaver med forskjellig orientering.
- Utvikle, gjennomføre og dokumentere tester for hardheten til AM-produserte prøvestaver med forskjellig orientering.

### 6.2 Utvikling av forsøk for å teste strekkeegenskaper

Den første materialeegenskapen som testes vil være flytegrensen til prøvestavene som har blitt produsert med forskjellig orientering. Forsøket vil bestå av tre kategorier med prøvestaver, og hver av disse kategoriene vil være produsert under samme forhold. Den isolerte forskjellen vil være orienteringen til prøvestavene under produksjon. De tre kategoriene vil være liggende på byggeplattformen, vertikalt på x,y-planet og vertikalt langs Z-aksen.





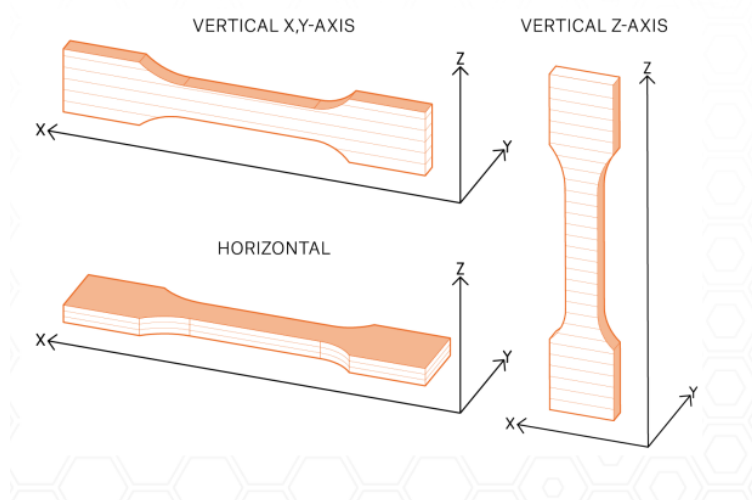
Figur 27: Lloyd LR5K pluss maskin brukt under strekkprøving av prøvestavene

### 6.1.1 Forsøksmål for styrkprøvingen

Målet med forsøket er å finne flytegrensen til prøvestaver produsert i PETG med forskjellige orientering under byge prosessen. Dette blir gjort ved å sette opp en hypotesetest med følgende nullhypotese og alternativhypotese.

$H_0$  : Orientering under produksjon påvirker ikke flytegrensen til materialet

$H_1$  : Det vil være en statistisk signifikant forskjell mellom flytegrensene som følge av orientering under produksjon.



Figur 28: Orienteringer under produksjon. Hentet fra [102]

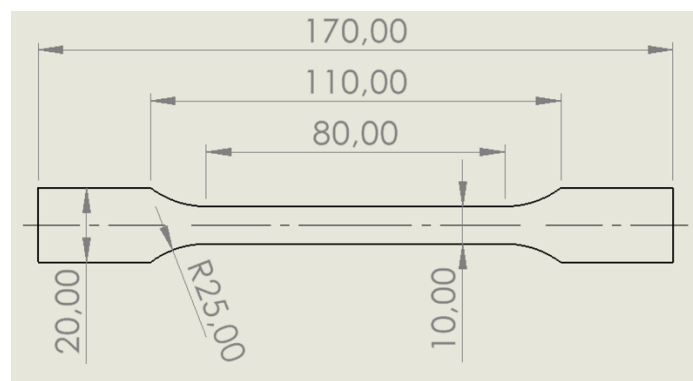
### 6.1.2 Forsøksutstyr

- **LLOYD LR5K pluss** vil bli brukt til å utføre strekkprøvene
- **Ender3 V2 med dirkede ekstruder** vil bli brukt til å produsere prøvestavene
- **Cura** vil bli brukt til å slice modellene
- **NS 527-1:2012** vil bli brukt for å utarbeide forsøket
- **NS 527-2:2012** vil bli brukt til å produsere prøvestavene

### 6.1.3 Forutsetninger for forsøk

For at all prøvetakningen i forsøket skal være mest mulig identisk vil det bli satt opp en rekke forutsetninger.

- For at dataene skal være minst mulig utsatt for eksogene faktorer bør forholdene være homogene for alle forsøkene. Alle forsøk vil derfor bli tatt samme dag.
- Alle prøvestaver skal være produsert i samme materiale, med samme farge, fra samme leverandør under samme produksjonsparametere.
- Alle prøvestavene vil være produsert etter NS ISO 527-2:2012, og alle prøvene vil bli målt før prøvetakning for å sjekke at alle parametere stemmer med standard. Disse parameterne er gitt på figur 28.
- Det vil bli brukt lik innspenning for alle forsøkene, og det er ønskelig å minimere mest mulig bøyemoment fra prøvene slik at normalstresset bli isolert i prøvetakningen.



Figur 29: Dimensjonene til prøvestav konstruert etter ISO 527-2:2012

### 6.1.4 Forsøkstrinn

For å gi et innsyn i hvordan forsøket er tenkt å bli gjort har det blitt satt opp forsøkstrinn som beskriver prosessen.

#### Trinn 1

For å kunne gjennomføre testene må det produseres 10 prøvestaver i hver av de forskjellige orienteringene. Alle prøvestavene med samme orientering vil bli produsert samtidig, og alle andre parametere vil bli holdt like for produksjonen.

#### Trinn 2

Best mulig innspenning for forsøket vil bli valgt, og maskinen vil bli utstyrt med denne innfestningen for å gjennomføre forsøket.

### Trinn 3

Testmaskinen vil bli kalibrert, og parameteren for forsøket vil bli notert i en tabell slik at resultatene vil være etterprøvbare.

### Trinn 4

For å gjennomføre forsøket vil prøvestaven bli spent opp i testmaskinen langs Z-aksen. Prøvestaven strekkes i denne retningen frem til brudd eller forhåndsbestemt stress eller tøyning er oppnådd. Spenning og tøyning vil være målt og loggført i tabell 15 under hele forsøket.

Denne prosessen vil bli gjentatt for alle prøve stavnene har brudd i testsonen, og resultatene for de forskjellige produksjonstypene vil bli separert. Siden resultatene skal sammenlignes er det viktig at alle stavnene har dimensjoner innenfor toleranser, og dette blir dobbeltsjekk mot standard før prøvestavnene spennes inn.

Tabell 15: Tabell til innfylling av prøveresultater fra strekkprøving

Prøve nummer	Liggende (MPa)	Stående (MPa)	Vertikalt på XY-planet (MPa)
1			
2			
3			
4			
5			

## 6.3 Utvikling av forsøk for bestemmelse av hardhet

For å kunne teste materialenes hardhet vil det blir gjort en Shore D test. Dette er en test som brukes til å avgjøre hardheten til et polymer, og D'en indikerer at det brukes et ekstra lodd for å teste hardheten. For å gjennomføre hardhetsprøvene vil apparatet bli satt opp til spesifikasjonene for testen, og at tilsvarende durometer brukes. Resultatet for prøvene vil bli lest innen 1 sekund etter at prøvenålen treffer prøvestaven, og dette er for å måle overflatheten til prøvestaven og ikke motstandsdyktigheten mot deformasjon innad i prøven.



Figur 30: Maskinoppsett til en Shore D test plassert på et planbord

### 6.2.1. Forsøksmål for hardhetstetingen

Målet med forsøket er å måle hardheten til materialer som har gått igjennom forskjellige produksjonstyper.

$H_0$  : Orientering under produksjon påvirker ikke hardheten til materialet

$H_1$  : Det vil være en statistisk signifikant forskjell mellom hardhetene som følge av orientering under produksjon.

### 6.2.2 Forsøksutstyr

- **Bareiss Shore D durometer** vil bli brukt til å utføre hardhetsprøvene
- **Planbord** vil bli brukt til å minimalisere uønskede faktorer som påvirker målingene
- **Prøvestavene** fra strekkforsøket vil bli brukt til å gjennomføre hardhetsprøvene

### 6.2.3 Forutsetninger

For å gjennomføre hardhets testene vil det være ønskelig at labforholdene er mest mulig homogene. Samme krav til temperatur og homogent materiale vil bli stilt til dette forsøket. Videre vil det bli lagt vekt på at underlaget i størst mulig grad er vannrett for at skjevheter ikke skal ha noen innvirkning på prøveresultatene.

### 6.2.4 Forsøkstrinn

For å kunne gjøre forsøket etterprøvbart blir forsøkstrinnene beskrevet i detalj. Dette er også gjort for å gi en enkel oversikt over fremgangsmåten under forsøket.

#### **Trinn 1**

For å gjennomføre forsøket blir det satt opp til et Shore D test med et Bareiss 7938 durometer. Shore D test brukes for å teste polymer med en relativt høyere hardheter, og vil være gunstig for å teste PETG.

#### **Trinn 2**

Testmaskinen vil bli testet mot et materiale som har en kjent hardhet. Dette resultatet testes mot kjente verdier, og om dette stemmer overens med tabellverdier for materialet er instrumentet riktig kalibrert.

#### **Trinn 3**

Delene av prøvestavene fra tidligere forsøk vil bli brukt til å utføre hardhetstestene. Disse prøvene vil bli gjort lengst unna bruddområdet for å minske påvirkningen fra kaldarbeidet under strekktestene.

#### **Trinn 4**

Alle prøvene vil bli testet en gang etter ASTM D2240 og NS ISO 868:2003. Hardheten leses av innen 1 sekund av påkjønning av materiale for å måle hardheten til materialet og ikke den plastiske deformasjonen som skjer i prøven.

#### **Trinn 5**

Resultatene blir ført inn i tabell 16, og prøvene vil kun bli testet 1 gang. Dette er for å unngå datamining og fabrikking av resultater. Alle prøvene vil bli separert i sine respektive grupper.

Tabell 16: Tabell til innfylling av hardhetsmålinger fra Shore D testen

Prøve nummer	Liggende	Stående	Vertikalt på XY-planet
1			
2			
3			
4			
5			

## 7 GJENNOMFØRING AV FORSØK

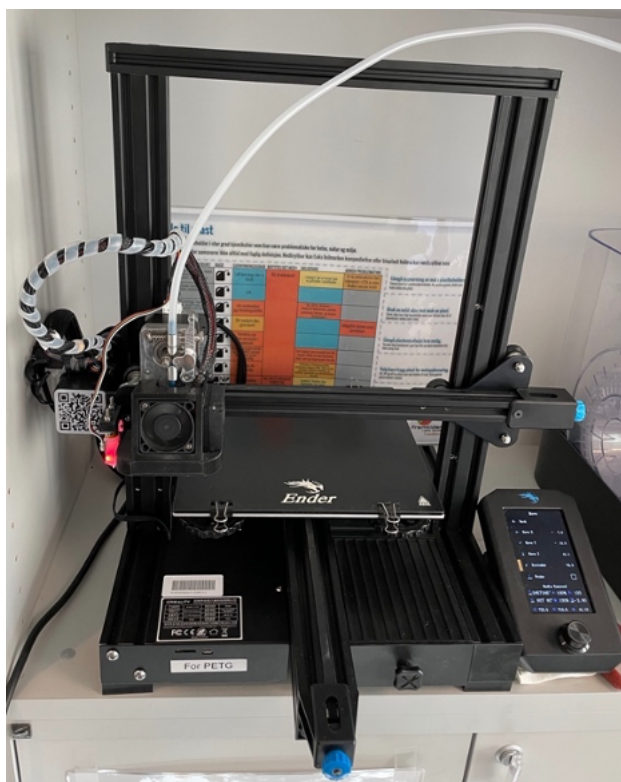
*I denne delen av oppgaven vil det bli presentert bilder og fremgangsmåte for gjennomføring av forsøk. Alle parametere, maskiner og programmer som har blitt brukt til å utføre forsøket vil bli presentert.*

### 7.1 Gjennomføring av strekkprøve forsøk

Det første forsøket som blir gjennomført er strekkprøve forsøke, og har som mål å identifisere flytegrensene til prøvestavene. Alle punktene for gjennomføring av forsøket har blitt dokumenter og rapportert. Temperaturen dagen forsøket ble gjennomført var 18 grader celsius.

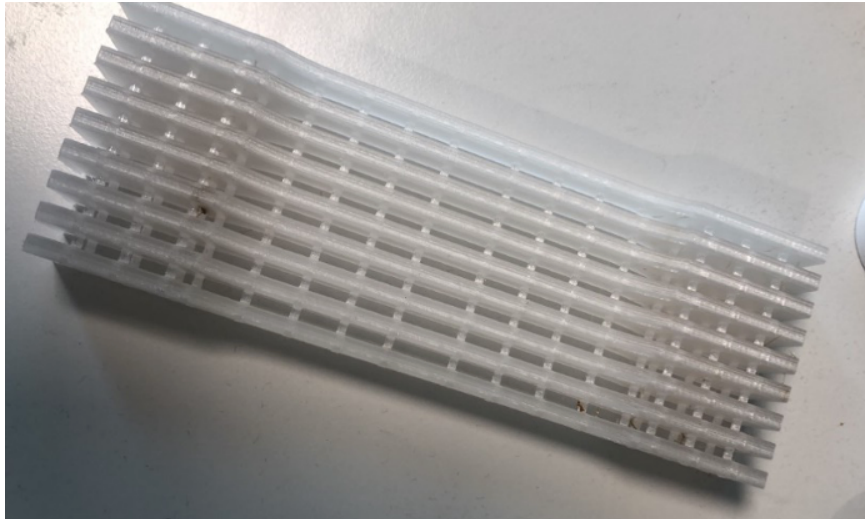
#### 7.1.1 Produksjon av prøvestaver

For å produsere prøvestavene ble det laget en CAD modell med solidworks. Denne modellen ble designet etter ISO 527-2:2012. Etter dette ble modellene slicet med Cura, og alle parameterene for produksjonen er listet opp lengre nede. Printereren som ble brukt var en ender3 V2 med dirkete ekstruder. Denne er vist på figuren under.



Figur 31: 3D-printer brukt til produksjon av prøvestaver

Alle prøvestavene ble produsert etter anvisningen med unntak av prøvestavene som er produsert stående langs Z-aksen. Disse ble designet slik at det var et bindeledd mellom stavene for å gjøre konstruksjonsprosessen stabil. Dette er vist på figuren under.



Figur 32: Modifiserte prøvestaver for å sikre god produksjon langs Z-aksen

Alle prøvestavene ble produsert med hjelp fra Senioringeniør Henrik Holmberg etter at han fikk tilsendt STL-fil av prøvestavene. Prøvestavene som ble produsert vertikalt langs Z-aksen ble produsert med en annen type STL-fil, men begge designene er innenfor toleransene til ISO 527-2-2012.

### 7.1.2 Produksjonsparametere

For at forsøket skal være etterprøvbart har alle parametere i programmet blitt loggført i tabellen under.

Tabell 17: Parametere brukt i slicerprogrammet for produksjon av prøvestaver.

Kvalitet		
Parameter	Størrelse	Måleenhet
Lagtykkelse	0.2	mm
Lagtykkelse på første lag	0.3	mm
Lagbredde	0.4	mm
Initialt lagbredde	100	%
Vegger		
Veggtykkelse	1.2	mm
Antall linjer i veggen	3	-
Optimal vegg	Huket av	-
Fyll av hulrom mellom vegger	Over alt	-
Horisontal ekspansjon	0.0	Mm
Topp og bunnlag		
Tykkelse på topp og bunnlag	1.2	Mm
Antall topplag	3	-
Antall bunnlag	6	-

Tabell 17 fortsetter

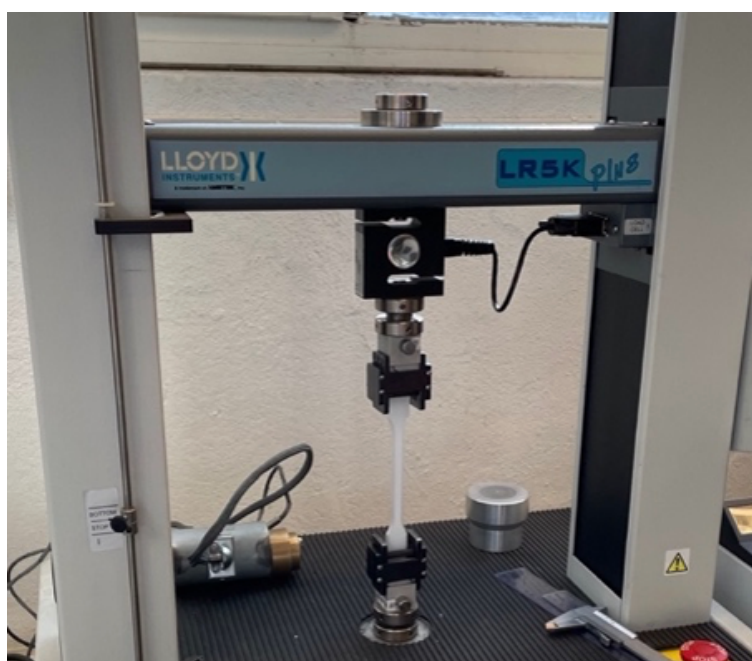
Parameter	Størrelse	Måleenhet
<b>Smeltetemperaturer og temperatur på byggeplattform</b>		
Bygge temperatur	245	C
Bygge temperatur på første lag	245	C
Initial bygge temperatur	245	C
Endelig bygge temperatur	245	C
Temperatur på byggeplattform	80	C
Initial Temperatur på byggeplattform	80	C
<b>Hastigheter på ekstruderingshode</b>		
Produksjonshastighet	50	mm/s
Hastighet under produksjon av utfylling	50	mm/s
Hastighet under produksjon av vegger	25	mm/s
Hastighet under produksjon av ytre vegger	25	mm/s
Hastighet under produksjon av indre vegger	40	mm/s
Hastighet under produksjon av topp-/bunnlag	25	mm/s
Hastighet under produksjon av støttestruktur	25	mm/s
	150	mm/s
Initial hastighet under lagproduksjon	20	mm/s
«Jerk» kontroll	Ikke huket av	-
Akselasjonskontroll	Ikke huket av	-
<b>Avkjøling</b>		
Avkjøling under produksjon	Huket av	
Hastighet på vifte	40	%
Normal hastighet på vifte	40	%
Maks hastighet på vifte	40	%
Normal/ maks grense på hastigheten til viften	10	%
Initial hastighet på vifte	0	%



### 7.1.3 Oppsett av maskin for strekkprøver

For å utføre strekkprøvene ble det brukt en LLOYD LR5k pluss maskin. Denne maskinen ble programmert til å spørre om dimensjonene til prøvestavene, og alle prøvestavene ble målt før prøvetakning for å sørge for at de svarer til ISO 527-2:2012.

Senioringeniør Øyvind Hansen hjalp til med å sette opp Lloyd maskinen, og hjalp hovedsakelig til med å installere innspenningen og forklare bruk av maskinen. Etter at maskinen ble satt opp til forsøket hjalp Senioringeniør Henrik Holmberg til med å sette opp dataprogrammet slik at forsøket kunne gjennomføres. Maskinen ble programmert til å spørre om dimensjoner, materiale og orientering for hver prøve. Orienteringen ble brukt for å skille prøvene, og alle prøvene ble målt før de ble testet slik at dimensjonene til prøvestavene stemte overens med ISO standarden.



Figur 33: Prøvestav innspent i Lloyd maskinen

Parametere som ble brukt under strekkprøvingen er listet opp under.

Tabell 18: Parametere for Lloyd maskinen for strekktesting

Parameter	Størrelse	Måleenhet
Retning	Strekk	
Preload/stress	5.6	N
Preload/stress speed	21	mm/min
Extension rate	100	mm/min
Automatically zero at the start of the test (load and extension)	Avhuket	

#### 7.1.4 Utførelse av strekkforsøk

For å dokumentere resultatene fra forsøkene har alle bruddene til prøvestavene som inngår i datasettet blitt tatt bilde av. Eventuelle funn under prøvetakningen har blitt fotografert og dokumentert i dette delkapittelet.



Figur 34: Til venstre: prøvestaver som er produsert langs z-akse, i midten: Prøvestaver som er produsert liggende på byggeplattformen og til høyre er stavene som er produsert stående vertikalt på XY-planet.

I prøvene som har blitt produsert langs Z-aksen har det blitt dokumentert brudd i testområdet på alle prøvestavene. Alle disse bruddene er glatte, og det er tydelig at alle prøvene har samme brudd karakteristikk.

Resultatet fra prøvene som ble produsert liggende på byggeplattformen var at alle knakk i testområdet. Alle prøvene har også like brudd karakteristikk som tyder på at utfallet vil være relativt likt i alle tilfellene. Det kan tyde på at det har vært litt moment i prøvestaven under belastning, og at det har kommet en initial sprekke dannelse på siden av staven som videre førte til brudd.

Blant prøvene som er produsert vertikalt på XY-planet ble det er også synlig fra brudd karakteristikken at denne prøvestaven har blitt utsatt for moment, og bruddet skjer i enden av testområdet. Dette kan tyde på moment fra innspenning eller andre komplikasjoner rundt produksjon

#### 7.1.5 Andre observasjoner fra forsøk



Figur 35: Observasjon av andre typer brudd i prøvestavene som har blitt produsert langs Z-aksen, og deformasjon i prøvestavene som har blitt produsert med annen orientering

Prøvestavene som ble produsert stående langs z-aksen har vist seg å være svake, og det var vanskelig å få til brudd i testområdet. Disse prøvene knakk i flere av tilfeller i innfestingen, og dette tyder på at materialegenskapene er såpass dårlige at denne produksjonsmetoden frarådes. Det ble også dokumentert deformasjon i prøvestavene som ble produsert med annen orientering. Dette viser at innspenningen som var valg i forsøket ikke var optimal, og det burde blitt produsert en alternativ innfestning for å gjennomføre forsøket.

## 7.2 Gjennomføring av hardhetsprøver

For å gjennomføre forsøket ble det brukt en Shore D test på et Shore apparat. Dette apparatet er koblet opp til et durometer som gir hardhetsmålingene. For å få best mulige målinger ble det gjort en prøvetakning med Shore A for å se om dette ville gi bedre resultater, men hardheten til materialet viste seg å være for stor til å få gode lesninger med Shore A. Apparatet ble deretter bygget om til å gjennomføre Shore D tester, og oppsettet er vist på figuren under. Forsøket ble gjennomført i innendørs kontorklima.



*Figur 36: Maskin satt opp til Shore D test*

Apparatet er også plassert på et planbord for at det skal være en helt vannrett overflate som gjør at skjevheter hvor prøvene blir tatt ikke påvirker. Planboret er den store svarte overflaten apparatet er plassert på i figur 35. Durometeret vil også bli byttet slik at hele apparatet er stilt inn for å gjennomføre Shore D testene, og dette er vist på figuren under.



Figur 37: Installasjon (Venstre) og kalibrering av durometeret (Høyre)

For å sjekke at apparatet er riktig innstillet ble det gjennomført en hardhetsprøve på et materiale der hardheten allerede er kjent, og her ble det brukt et stykke med TPU 95A. Dette er for å se at målingene vil være forventningsrettete, og at apparatet er kalibrert riktig.

Under forsøket ble hardhetsprøvene tatt i et område på prøvestavene som vil være minst mulig utsatt for kaldarbeid. Dette er antatt i å ha skjedd et stykke unna innspenningen til prøvestavene under strekkforsøkene, og et stykke unna bruddet. For å måle hardheten på samme område i alle prøvestavene ble dette punktet valgt å være relativt nærme der prøvestaven begynner å snevre inn mot testområdet.



Figur 38: Utføring av Shore D test \*)

\*) Bildet som illustrerer prøvetakningen er gjort i første runde av forsøket, og før standarden ble dobbeltsjekk. Denne målingen er derfor ikke representert i datasettet.

Alle hardhetsmålingene ble tatt innen et sekund av at prøvenålen treffer materialet, og blir deretter ført inn i datasettet. Her ble det observert at verdiene på durometeret sank litt etter den initiale verdien, men det var ikke store forskjeller i dataene.

## 8 TOLKNING OG BRUK AV FORSØKSDATA

I denne delen av rapporten vil ønsket bruk av data bli forklart. Dette vil gjøre det tydelig hvilke verdier fra prøvene som skal bli brukt videre i oppgaven.

Alle resultatene fra strekktestene har blitt lagt til i tabellen under, og verdiene til flytegrensen er det som har blitt loggført under forsøket.

### 8.1 Resultat fra strekkprøving

For å kunne få et overblikk over resultatene fra strekkprøvene har disse blitt ført inn i tabellen under. Dette har deretter blitt ført inn som lister i «Jupyter notebook» for å kunne gjøre en enkel dataanalyse med python og scipy.

Tabell 19: Resultater fra strekkprøvene

Prøve nummer	Liggende (MPa)	Stående (MPa)	Vertikalt på XY-plan (MPa)
1	44.5	20.3	48.9
2	43.4	15.4	49.7
3	46	18.8	49.6
4	42.2	16.9	38.8*
5	43.7	24.1	49

\*) Denne prøven hadde et eksplosivt brudd som kan tyde på at det var noe feil fra byggeprosessen. Prøven knakk fremdeles i prøveområdet

Etter at listene over data har blitt laget ble det gjort en enkel analyse for å få frem den deskriptive statistikken til dataene. Siden hver av orienteringene under produksjon er å betrakte som uavhengige av hverandre har dette blitt delt inn i tre.

Tabell 20: Deskriptiv analyse av flytegrensene til prøvestavene ble produsert liggende på byggeplattformen

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	43.96
Median	43.7
Varians	1.98
Standardavvik	1.4
Skewness	0.3
Kurtosis	-0.85

Fra den deskriptive analysen av resultatene fra prøvestavene som har blitt produsert liggende på byggeplattformen kommer det frem at gjennomsnittet for målingene ligger på 43.96MPa. Videre ligger medianen på dataene tett opp til dette punktet. Variansen og standardavviket til målingene er å betrakte som relativt lave, og skjevheten (Skewness) tyder også på at dataene er greit fordelt. Tommelfingerregelen på dette er at en skewness mellom -0.5 og 0.5 er assosiert med en med en fordeling som er relativt symmetrisk. Kurtosis med en verdi på -0.85 tyder også på at histogrammene er utflytende. [32]

Tabell 21: Deskriptiv analyse av flytegrensene til prøvestavene som ble produsert stående langs Z-aksen

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	19.1
Median	18.8
Varians	11.27
Standardavvik	3.36
Skewness	0.48
Kurtosis	-0.94

I dette tilfellet er gjennomsnittet til målingene på 19.1MPa, og medianen på 18.8MPa. Dette kan tyde på at det ikke er store ekstremmålinger som påvirker gjennomsnittet til målingene og at målingene er ganske greit fordelt. Variansen til målingene er derimot ganske høy med en verdi på 11.27, og standardavviket er også ganske stort med en verdi på 3.36. Dette forteller at det er ganske stor spredning på målingene som er gjort. Det kommer også frem at skjevheten til fordelingen er på 0.48, og fordelingen kan framdels betraktes som tilnærmet symmetrisk. Kurtosen er også på den negative siden i dette tilfellet, og det tyder på at fordelingen breier seg mer utover. [32].

Tabell 22: Deskriptiv analyse av flytegrensene til prøvestavene som ble produsert vertikalt på XY-planet

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	47.2
Median	49
Varians	22.18
Standardavvik	4.71
Skewness	-1.48
Kurtosis	0.22

For disse målingene er gjennomsnittet på 47.2 MPa og medianen på 49MPa. Dette kan tyde på at det ikke er ekstremmålinger som påvirker gjennomsnittet i stor grad. Også i dette tilfellet vil det være en stor varians med verdi på 22.18 og et relativt stort standardavvik på 4.71. Dette tyder på at det er en del spredning i dataene. Skjevheten i dette tilfellet ligger på -1.48, og dette tilsvarer en fordeling som er svært skjev. Dette tyder på at det er målinger i datasettet som gjør at fordelingen ikke tilsvarer den tradisjonelle bell-kurven. Kurtosen i dette tilfellet ligger omtrent rundt null på den positive siden, og dette beskriver en spiss fordelingskurve. [32]

## 8.2 Resultater fra hardhetsprøvene

Tabell 23: Resultater fra Shore D test

Prøve nummer	Liggende	Stående	Vertikalt på XY-plat
1	69	70	61
2	72	71	71
3	73	70	69
4	71	69	65
5	71	73	69

For hardhetsprøvene har målingene blitt ført inn i tabellen på samme måte som for strekkprøvene. Dette har blitt ført inn som lister i «*Jupyter notebook*», og det har deretter blitt gjort en deskriptiv analyse på dataene. [32]

Tabell 24: Deskriptiv analyse av hardhetsdata til prøvestavene som er produsert liggende på byggeplattformen

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	71.2
Median	71
Varians	2.2
Standardavvik	1.48
Skewness	-0.37
Kurtosis	-0.78

For disse målingene har det kommet frem at gjennomsnittet ligger på 71.2 og medianen på 71. Dette viser at det ikke er store ekstremverdier som påvirker gjennomsnittet til fordelingen. Videre er variansen lav med en verdi på 2.2 og standardavviket er også relativt lav med en verdi på 1.48. Skjevheten i dette tilfellet ligger på -0.78 og dette tyder på en svak skjevhet. Videre ligger også kurtosen relativt langt ute på den negative siden, og dette tyder på at fordelingskurven er relativt flat. [32]

Tabell 25: Deskriptiv analyse av hardheten til prøvestavene som ble produsert stående langs Z-aksen

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	70.6
Median	70
Varians	2.3
Standardavvik	1.52
Skewness	0.75
Kurtosis	-0.64

I dette tilfellet er gjennomsnittet og medianen relativt like med sine respektive verdier på 70.6 og 70. Variansen og standardavviket er også ganske lave og har verdier på 2.3 og 1.52. Skjevheten til denne fordelingen kan også antas å være svakt skjev som følge av at verdien ligger på 0.75. Kurtosis ligger også i dette tilfellet på -0.64 og tyder på at fordelingen kan være noe utflytende. [32]

Tabell 26: Deskriptiv analyse av hardheten til prøvestavene som ble produsert vertikalt på XY-planet

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	67
Median	69
Varians	16
Standardavvik	4
Skewness	-0.62
Kurtosis	-1.05

For disse målingene er gjennomsnittet på 67, og medianen på 69. Det er med andre ord ikke stor forskjell på medianen og gjennomsnittet, og det kan tyde på at det ikke er noen ekstremmålinger som påvirker gjennomsnittsveriden. Variansen derimot er relativt høy med en verdi på 16, og et standardavvik på 4 er også noe av det høyeste i datasettet. I dette tilfellet er skjevheten til fordelingen -0.62 og dette tyder i likhet med de andre målingene på at fordelingen er svakt skjev. Kurtosisen ligger på -1.05 og dette tyder på at fordelingskurven er mer utflytende enn de andre tilfellene. [32]



## 9 DATAVISUALISERING OG PREPROSESSERING

*I dette kapitlet vil dataene bli visualisert og funn vil bli forklart. Dette vil gjøre det mulig å se hvilke faktorer som påvirker resultatet, og identifisere eventuelle ekstremverdier i datasettet.*

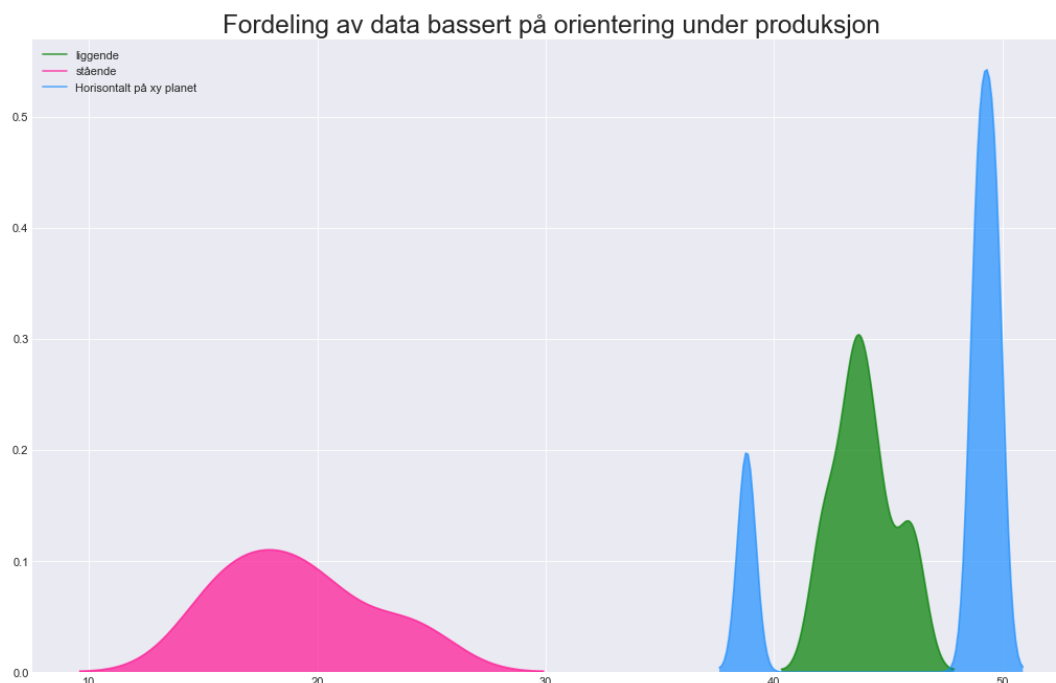
For at dataene skal bli visualisert på en fornuftig måte vil det bli brukt en rekke hjelpeverktøy som gjør visualiseringsprosessen lettere. Dette vil være innebygde funksjoner fra forskjellige datapakker som blir importert til python. Før dataene blir visualisert vil de også bli preprosessert slik at verdiene skal kunne være sammenlignbare med annen forskning på området.

### 9.1 Visualisering

For å visualisere data vil det bli brukt et par datapakker til python. Dette er for å gjøre visualiseringsprosessen enklere, og gjøre kodingen lettere. Tilleggsprogrammene som har blitt brukt er matplotlib og seaborn. Disse tilleggsprogrammene har blitt brukt for å illustrere histogrammer ol. Ved å visualisere dataene er det enkelt å se hvordan de er fordelt, og det er enkelt å se hvordan eventuelle utstikkere ser ut i forhold til [72-73]

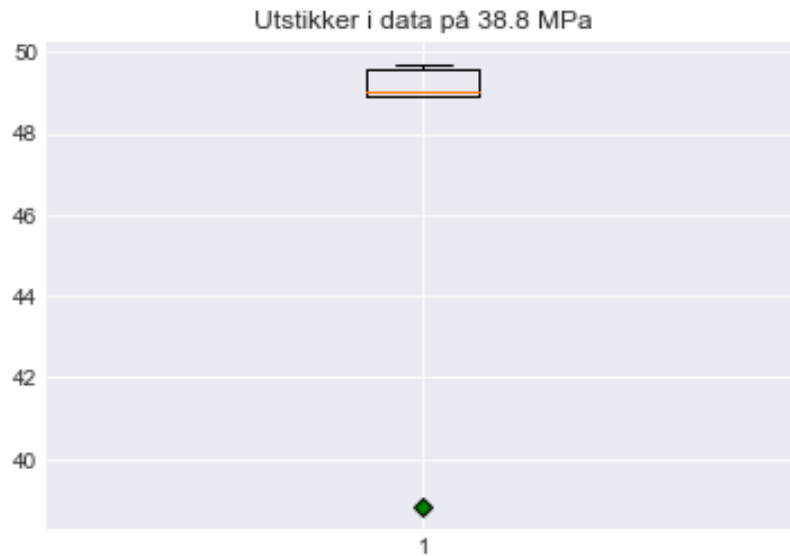
#### 9.1.1 Visualisering av strekkprøver

For å få en visuell fremstilling av fordelingen av dataene ble det satt opp histogrammer for alle produksjonsmetodene. Disse ble plottet sammen for å se hvordan dataene ble fordelt basert orientering under produksjon. Dette plottet er illustrert i figuren under.



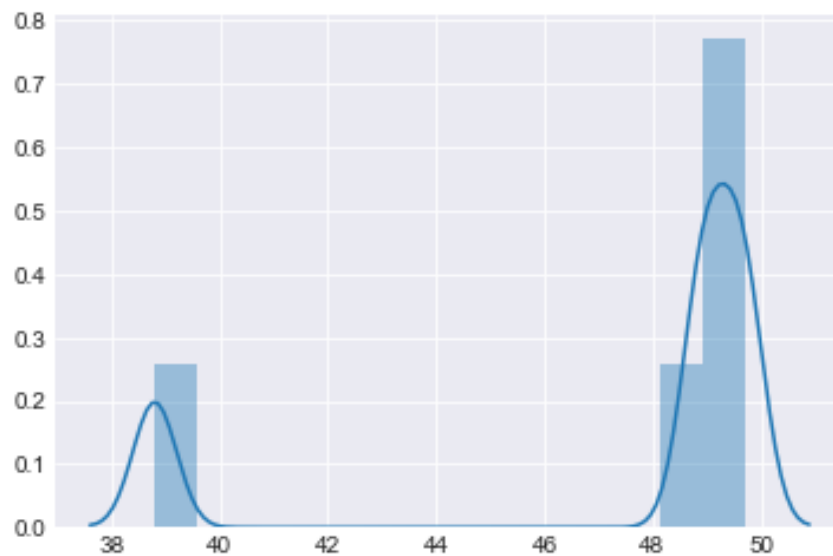
Figur 39: Fordeling av flytegrensene fra strekkforsøket illustrert i et histogram

Her kommer det frem at den ene målingen fra strekkprøvene som er produsert vertikalt på XY planet har en utligger. For å undersøke denne utstikkeren grundig ble det plottet et boks-plot. Dette resulterte i figuren under, og denne målingen blir definert som en utstikker i plottet.



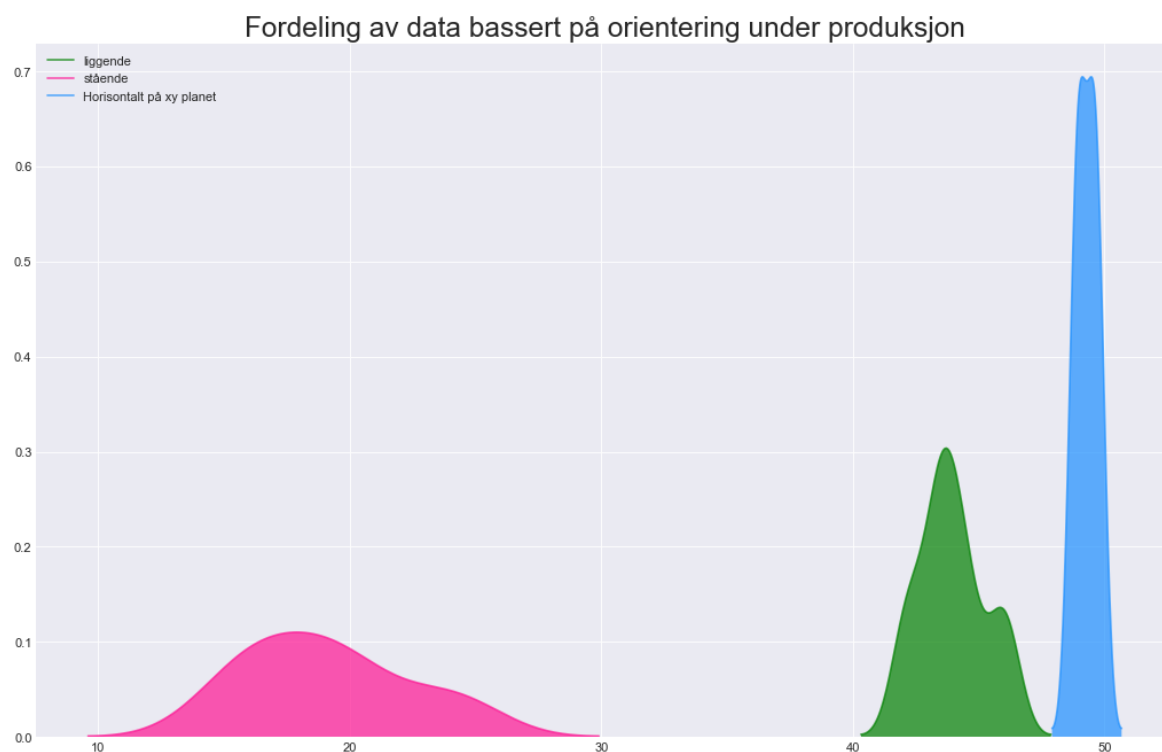
Figur 40: Boks-plot av flytegrensen til prøvestavene som ble produsert vertikalt på XY-planet

For å se litt på fordelingen og hvordan denne utstikkeren ser ut i helhet mot resten av målingene ble det plottet et histogram med en bell kurve. Her vises det også at denne ekstremmålingen er fraskilt resten av dataene med en så stor margin at den ikke påvirker bell-kurven som formes rundt resten av dataene.



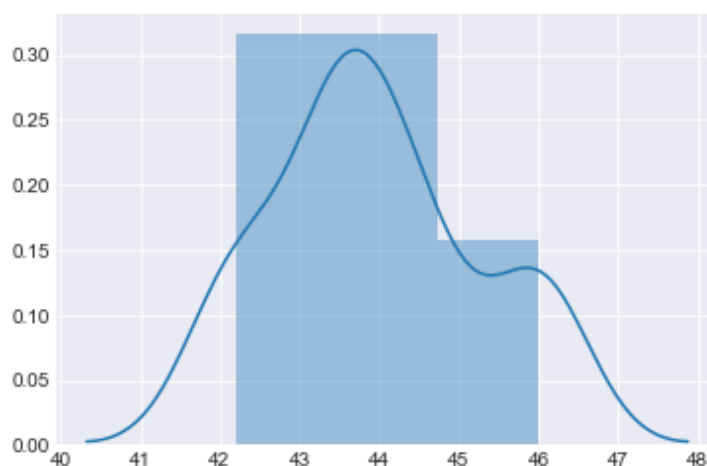
Figur 41: Histogram av flytegrensen til prøvestavene som ble produsert vertikalt på XY-planet

Etter at ekstremmåling er fjernet fra datasettet ble det igjen plottet histogrammer for å få en oversikt over hvordan dataene er fordelt. Her kommer det også frem at utstikkeren er relativt langt fra resten av prøvene. For å se på hvordan fordelingene vil se ut uten denne utstikkeren har dataene også blitt visualisert uten denne målingen.



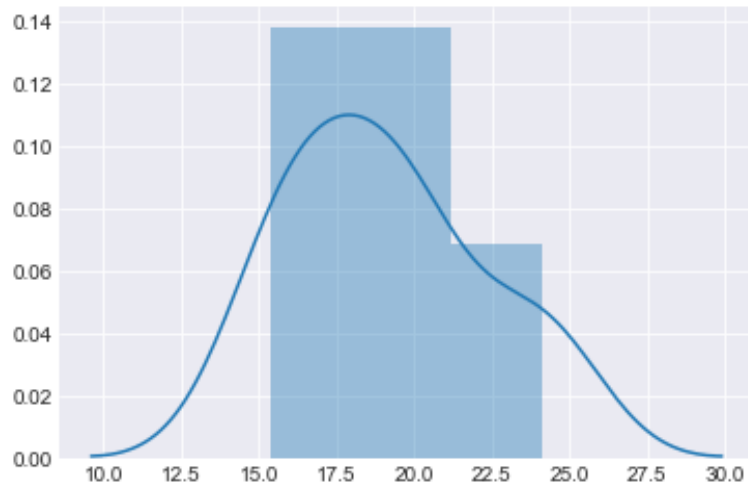
Figur 42: Fordeling av flytegrensene fra strekkprøvene etter at ekstremmålinger har blitt fjernet

I denne figuren har ekstremmålingen blitt fjernet, og det kommer frem at de resterende målingene i liten grad har noe overlapp med hverandre. Etter at denne figuren ble laget har det blitt satt opp histogrammer for alle målingene fra de forskjellige orienteringene under produksjonen.



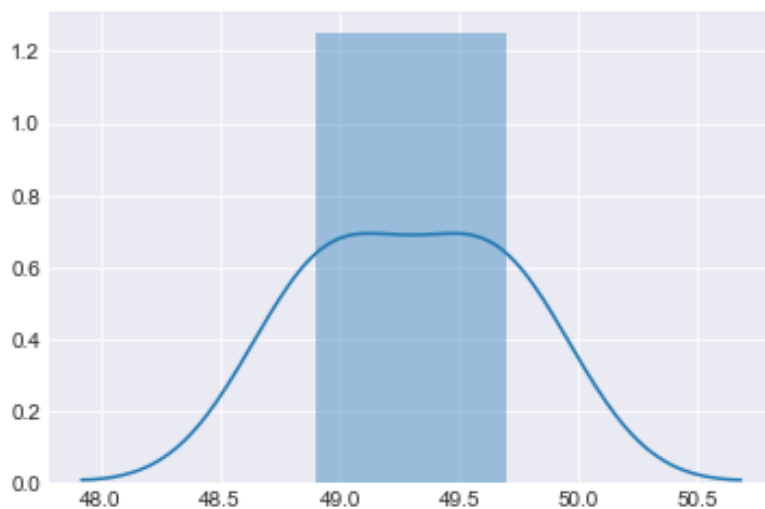
Figur 43: Histogram av flytegrensene til prøvestavene som er produsert liggende på byggeplattformen

De første dataene som ble visualisert i et histogram var prøvestavene som ble produsert liggende på byggeplattformen. Figur 42 viser at det er en distinkt topp, og at alle dataene er fordelt rundt gjennomsnittet på 43.97MPa. Det er en liten topp rundt målingen på 46MPa som er den høyeste målte verdien. Dette diagrammet stemmer godt overens med den deskriptive statistikken som ble gjort tidligere.



Figur 44: Histogram av flytegrensene til prøvestavene som er produsert stående langs Z-aksen

For prøvestavene som har blitt produsert stående langs Z-aksen har en ganske fin fordeling, og det er en distinkt topp på fordelingskurven. Det er heller ingen store utstikkere, men kurven flater litt ut mot de høyere målingene i dataene.

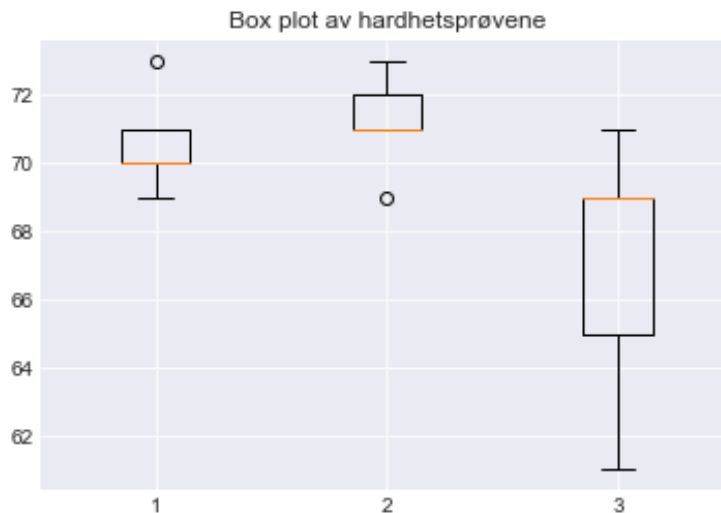


Figur 45: Histogram over flytegrensene til prøvestaver produsert stående vertikalt på XY-planet

For å illustrere fordelingen av resultatene for prøvestavene som er produsert vertikalt på XY-planet uten ekstremmålingen har det blitt produsert et histogram for dette. Her kommer det frem at alle målingene er jevnt fordelt rundt gjennomsnittet og det er ingen målinger som påvirker fordelingen i større grad. Her kommer det også frem at fordelingen vil ha betraktelig mindre skjevhet, men en relativ lav kurtosis siden kurven er veldig flat på toppen.

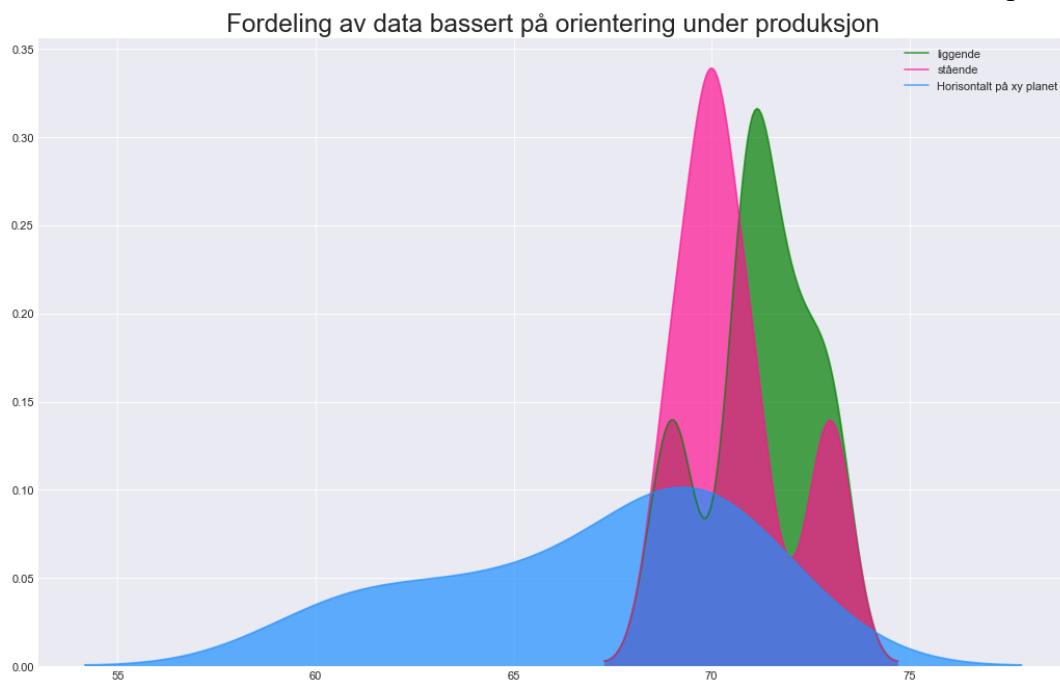
### 9.1.2 Visualisering av hardhetsdataene

For å se på fordelingen til hardhetsdataene som har blitt samlet inn vil det bli gjort tilsvarende analyser som under visualiseringen av strekkprøvene. Det første plottet som ble satt opp var et box-plot, og dette er å finne på figuren under.



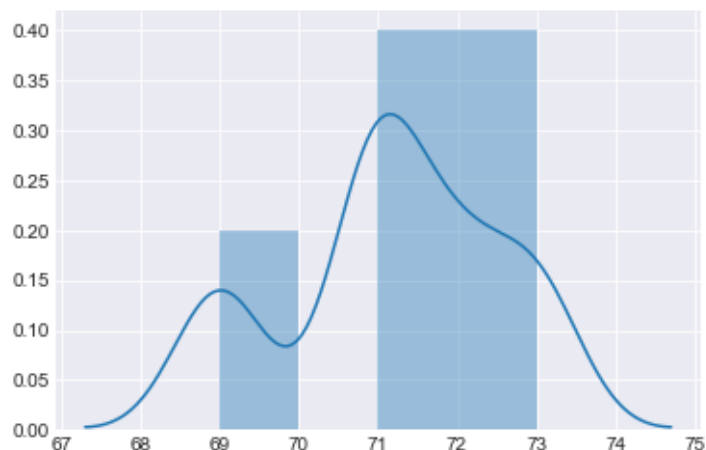
Figur 46: Boks-plot over resultatene fra Shore D hardhetsprøvene

I dette boxplottet vil 1 være prøvene som er produsert stående, 2 være prøvene som er produsert liggende og 3 prøvene som er produsert vertikalt på XY-planet. I boxplottet kommer det frem at det er flere utstikkere i dataene, men dette er mer konsekvent enn i strekkprøvene. Fordelingen av dataene og spennene på fordelingene er betraktelig større i dette tilfellet enn det som var tilfellet i strekkprøvene. For å videre utforske fordelingen av hardhetsdataene ble det satt opp histogrammer som viser overlappet mellom kurvene. Her kommer det også frem at det er noen utstikkere i dataene, men disse er ikke like ekstreme som under strekkprøvene.



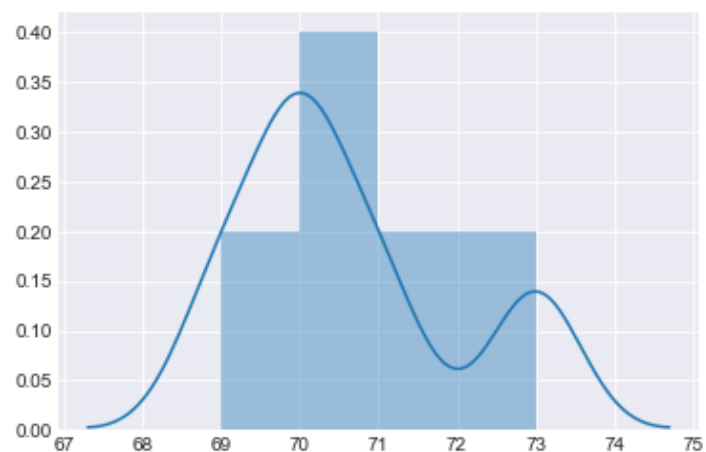
Figur 47: Histogrammer over resultater fra Shore D hardhetsprøver

Her kommer det frem at fordelingen i dataene i stor grad er overlappende. Her kommer det også frem at hardheten til prøvestavene som har blitt produsert vertikalt på XY-planet har et større standardavvik og en flatere fordeling enn resten av prøvestavene. Videre er det også tydelig at toppen av kurvene er relativt likt fordelt mellom alle kategoriene.



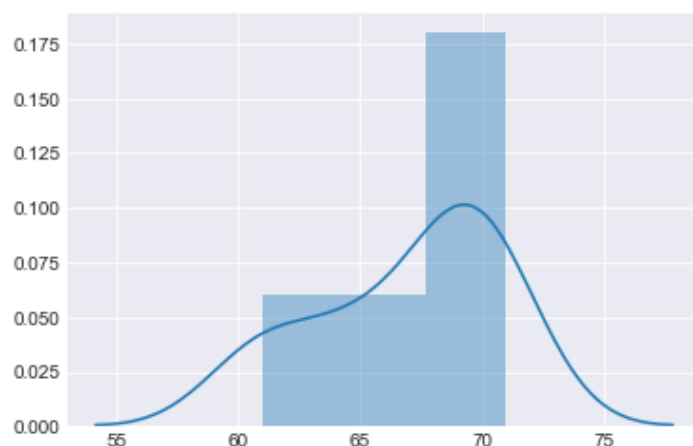
Figur 48: Histogram over hardheten til prøvestaver som ble produsert liggende på byggeplattformen

I figuren over kommer det frem at det er en liten topp rundt det som kommer frem som en ekstremmåling i box-plottet. Videre er det en god ansamling av data rundt gjennomsnittet på 71. Disse ekstremmålingene vil ikke være like kritiske som under strekkprøvene, og det er ingen andre faktorer som tilsier at det er noe galt som har skjedd under forsøkene. Trenden under hardhetsprøvene er generelt mer spredde, og fordelingskurvene er totalt sett mer utflytende.



Figur 49: Histogram over hardheten til prøvestaver som ble produsert stående langs Z-aksen

Prøvene som har blitt produsert stående har også en fordeling med to topper. Det er også mindre spredning i selve dataene i dette tilfellet, men det er fremdeles en topp på 73 merke. Dette stemmer overens med box-plottet som tilsier at målingen på 73 er en ekstremmåling sammenlignet med resten av dataene.



Figur 50: Histogram over hardheten til prøvestavene som ble produsert stående vertikalt på XY-planet

For prøvene som ble produsert vertikalt på XY-planet har det ikke blitt registrert flere toppe. Dette stemmer overens med box-plottet som ikke viser noen utliggere i dataene.

## 9.2 Preprosessering

I preprosesseringen av datasettet ble det identifisert utstikkere i dataene. Dette gjaldt en prøvestav som knakk ved særskilt mindre påvirkning enn resten av prøvestavene, og dette skyldes trolig en produksjonsfeil. Som det ble illustrert i visualiseringsdelen av kapitlet er dette en utstikker som ligger langt unna alle de andre målingene, og vil trolig påvirke resultatene fra hypotesetestene som vil bli gjort senere i oppgaven.

På grunn av dette vil det bli laget et datasett der ekstremmålingen har blitt ekskludert og et der ekstremmålingen er inkludert. Dette blir gjort for å se på hvordan denne ekstremmålingen vil påvirke resultatene.

Tabell 27: Deskriptiv analyse av flytegrensene til prøvestavene som ble produsert vertikalt på XY-planet etter at ekstremmålingen har blitt fjernet

Parametere:	Verdier:
Gjennomsnitt	49.3
Median	49.3
Varians	0.17
Standardavvik	0.41
Skewness	3e-14
Kurtosis	-1.92

Etter preprosesseringen av dataene er det tydelig at variansen og standardavviket til dataene har gått betraktelig ned. Videre har skjevheten til fordelingskurven også blitt tilnærmet lik null.

## 10. TOLKNING AV RESULTATER

*I denne delen av oppgaven vil resultatene fra analysene bli tolket. Dette vil være med på underbygge konklusjonen og diskusjonen rundt materialelegenskaper og hva som påvirker disse.*

### 10.1 Tolkning av resultater fra strekkprøver

For å se på resultatene fra strekkprøvingen vil det bli gjort to analyser. Det vil bli gjort hypotesetester som inkluderer utstikkeren, og det vil bli gjort tester som ekskluderer utstikkeren.

#### 10.1.1 Hypotesetester der ekstremmålingen har blitt inkludert

For å teste hypotesen for forsøket vil det bli brukt en to halet t-test for å sammenligne dataene til de forskjellige orienteringene. Det vil bli brukt et signifikansnivå på 0.05, og alle dataene er inkludert i testen.

Tabell 28: Resultater fra hypotesetesting av flytegrensene hvor ekstremmålingen er inkludert i datasettet

Grupper som testes	Resultat fra hypotesetesting	P-verdier:
Vertikalt på XY-plan og liggende på plattform	Nullhypotesen beholdes	0.18
Vertikalt på XY-plan og stående langs Z-aksen	Nullhypotesen forkastes og alternativhypotesen godtas	0.000005
Stående langs Z-aksen og liggende på byggeplattformen.	Nullhypotesen forkastes og alternativhypotesen godtas	0

Her kommer det frem at nullhypotesen ikke kan kastes hvis utstikkeren er inkludert i datasettet. Dette resulterer i at flytegrensen til materialet er såpass like at det ikke vil være en statistisk signifikant forskjell mellom prøvene som er produsert liggende på byggeplattformen og prøvestavene som er produsert vertikalt på XY-planet.

For de to andre hypotesetestene er resultatene at nullhypotesen kan kastes, og det er en statistisk signifikant forskjell mellom gruppene. Orienteringen under produksjon vil med andre ord ha en innvirkning på materialelegenskapene for disse tilfellene.

#### 10.1.2 Hypotesetester der ekstremmålingen har blitt ekskludert

Siden det kommer frem i den deskriptive statistikken og visualiseringsdelen at dette datasettet for prøvene som er produsert vertikalt på XY-planet har en utligger. På grunn av denne utliggeren vil det også bli utført en hypotesetest for å se på forskjellen mellom gruppene uten utliggeren. Denne hypotesetesten blir også gjennomført med et signifikansnivå på 0.05



Tabell 29: Resultat fra hypotesetesting av flytegrensen der ekstremmålingen har blitt fjernet

Grupper som testes	Resultat fra hypotesetesting	P-verdi:
Vertikalt på XY-plan og liggende på plattform uten ekstremmåling	Nullhypotesen forkastes, og alternativhypotesen godtas.	0.000169

Her kom det frem at nullhypotesen kunne forkastes og alternativhypotesen godtas. Det er også tilnærmet lik null sjanse for en type-1 feil siden p-verdien er såpass lav som den er.

## 10.2 Tolkning av resultater fra hardhetsprøver

For hardhetsprøvene blir nullhypotesen beholdt i alle tilfellene. Dette vil si at det ikke er en statistisk signifikant forskjell i hardheten basert på orientering under produksjon. Det er mer spredning i prøvene som er produsert vertikalt på XY-planet.

De to første gruppene som blir testet er prøvestavene som er produsert vertikalt på XY-planet. Denne testen blir gjennomført med et signifikansnivå på 0.05 og gruppene blir behandlet som individuelle.

Tabell 30: Resultater fra hypotesetestene av hardhetsmålingene

Grupper som testes	Resultat fra hypotesetesting	P-verdier:
Vertikalt på XY-plan og liggende på plattform	Nullhypotesen beholdes	0.059
Vertikalt på XY-plan og stående langs Z-aksen	Nullhypotesen beholdes	0.097
Stående langs Z-aksen og liggende på byggeplattformen.	Nullhypotesen beholdes	0.54

Resultatet fra disse hypotesetestene er at nullhypotesen beholdes i alle tilfeller, og at produksjonsorienteringen ikke har noen statistisk signifikant påvirkning på hardheten til materialet. Alternativhypotesen blir forkastet i alle tilfeller, og dette har blitt gjort ved å sammenligne signifikansnivået med de kalkulerede p-verdiene.

## 10.3 Bestemmelse av materialegenskaper

For å bestemme materialegenskapene har det blitt satt opp et konfidensintervall. Her vil den nederste grensen i konfidensintervallet være gjeldene fremfor gjennomsnittet. Grunnen til dette er at dette estimatet vil være mer konservativt, og større sikkerhet i en brukssituasjon. Siden det er 5 målinger for hver av orienteringene vil det bli brukt en student-t fordeling med signifikansnivå på 0.05. For å få riktige verdier til å kalkulere standardavviket blir det hentet

en tabellverdi for t-fordeling fra boken til Løvås. Denne verdien ligger på 2.517, og svarene fra konfidensintervallet vil bli rundet ned til nærmeste hele tall. Resultatene vil bli ført inn i tabellen under.

Videre er det interessant å se hvor mye materialkvaliteten faller som følge av AM-produksjonen. Dette vil bli kalkulert ved å se på flytegrensen til PETG opp mot de bestemte materialverdiene som ble regnet ut for de produserte prøvestavene.

For å regne ut det mest konservative estimatet vil den øvre grensen i intervallet Granta EduPack oppgir, og denne verdien er på 52.9 MPa. Kalkulasjonene vil bli gjort med formelen under:

$$\eta = \frac{R_{AM-produisert}}{R_{PETG}}$$

Tabell 31: Utnyttelsesgrad for flytegrensen i AM-produserte prøvestaver med forskjellig orientering under produksjon

Orientering under produksjon	Flytegrense:	Utnyttelsesgrad [%]:
Liggende på byggeplattformen	40 MPa	76
Stående langs Z-aksen	10 MPa	19
Vertikalt på XY-planet	35 MPa	66

Den samme prosessen ble gjennomført for dataene fra hardhetsprøvene. Her ble samme signifikansnivå og antall målinger brukt for å finne en t-verdi.

For å finne utnyttelsesgraden til hardheten i materiale ble forsøkt hentet fra Granta, men hardheten var ikke oppgitt i shore D. Det ble derfor hentet inn en hardhetsverdi på 78 fra S-Polytec og RS components sine gjennomsiktige PETG plater for at det størst mulig grad skal kunne ligne byggematerialet til prøvestavene. [74-75]

Tabell 32: Utnyttelsesgrad av hardhetsverdier i AM-produserte prøvestaver med forskjellig orientering under produksjon

Orientering under produksjon	Shore D hardhet:	Utnyttelsesgrad [%]:
Liggende på byggeplattformen	67	86
Stående langs Z-aksen	66	85
Vertikalt på XY-planet	56	72

# 11 ETTERBEHANDLINGSMETODER

*Dette kapitlet tar opp forskjellige etterbehandlingsmetoder av RP teknologi, og gir et innblikk i hvordan metodene fungerer og hvilke resultater disse metodene gir. Videre blir det også sett på kostnadsbilde til etterbehandlingsmetodene.*

Etterbehandling av konstruksjoner fra AM-produksjon kan etterbehandles slik at materialeegenskapene bedres. Disse metodene er forbehold additiv produksjon av metaller. Overflaterøffheten er noe som påvirker egenskapene til 3D-printete komponenter, og dette begrenser bruksområdene til komponentene. En grov overflate vil påvirke utmatting, presisjonen til byggeprosessen og det estetikken til konstruksjonen.

For å gi et overblikk over faktorer som påvirker overflaten til et 3D-printet produkt har det blitt laget en figur som viser faktorer fra hele produksjonsprosessen. Disse faktorene vil også påvirke kvaliteten til konstruksjonen. Disse er materiale, designtilpasninger parametere under produksjon og bindingspotensialet mellom lagene. [76]

Videre kan overflatebehandlingen klassifiseres i to grupper basert på tilnærmingen til prosessen. Disse er basert på å fjerne materiale, og metoder som beholder alt materialet. Det finnes også metoder som baserer seg på å legge et ytre belegg på figuren, og en metode som kombinerer forskjellige typer behandling. [76]

## 11.1 Fjerning av materialet

For mekaniske metoder som tar bort et tynt lag med materiale med mål om å endre overflateruheten til figurene. Disse etterbehandlingsmetodene er delt inn i tre grupper, og disse er mekanisk etterbehandling, laserbehandling og kjemisk behandling.

### 11.1.1 Mekanisk fjerning av materiale

Innenfor mekanisk etterbehandling som fjerner materiale finnes det flere underkategorier, og hver av disse vil være en forskjellig behandlingsmåte for å bedre kvaliteten til produktene. Disse kategoriene er som følger[76]:

#### **Maskinering**

Maskinering er et begrep som omfatter en rekke teknologier og kan generelt beskrives som en kontrollert prosess hvor materiale fjernes. Dette gjøres med maskiner som kutter bort ytterste laget til omrisset til figuren, og produserer en glatt overflate. Basert på presisjonen og type verktøy som brukes kan disse prosessen ble delt inn i flere undergrupper. Disse er sliping og fresing, men vil ikke bli beskrevet i detalj. [76]

Mekanisk maskinering har blitt standarden innenfor etterbehandling av overflatene til en AM produsert del, og er metoden som ofte blir brukt i industrien. Denne metoden har blitt påvist å

fungere på flere typer materiale, og utmattelses styrken har blitt bedret med 30% mot bøyning og 50% i aksialretning. [76]

### **Polering**

Polering brukes på metallbasert AM produksjon med målet om å redusere overflateruheten. Denne metoden blir brukt for å bedre egenskaper mot utmattelsesbrudd, og har sammenlignet med andre metoder vist å være en av de mer effektive etterbehandlingene for å øke levetiden til en komponent. [76]

### **Tumble**

Dette er en metode som baserer seg på at den AM produserte delen blir lagt i en tønne med etterbehandlingsmateriale. Deretter vil tønne bli dreid rundt med en forhåndsbestemt fart, og dette vil bearbeide overflateruheten. Denne prosessen kan styres med parametere som størrelse, form og sammensetningen av etterbehandlingsmateriale. Rotasjonshastigheten til tønne er også en parameter som kan endres for å påvirke endeproduktet. Denne metoden har vist seg å øke utmattelsesegenskapene til produkter med opptil 40%. [76]

## 11.1.2 Laserbasert behandling som fjerner materiale

Laserbehandling av AM produserte deler baserer seg på at en laser blir brukt som energikilde for å fjerne materiale og bedre overflateruheten. Laser mikro-maskinering er en vanlig etterbehandlingsmetode som bruker et spekter av forskjellige bølgelengder, bølgeformer og pulssignaler. Laserstrålen blir styrt av speil for best mulig refleksjon og minst mulig energitap under prosessen. Disse speilene blir også brukt for å dirigere laserstrålen over delen, og har vist å kunne signifikant bedre overflateruheten. [76]

## 11.1.3 Kjemisk behandling

Kjemisk behandling er en vanlig brukt metode for å forbedre overflateruheten til AM-produserte deler. Denne overflatebehandlingen har som fordel at den når alle overflater av figuren, både på innsiden og utsiden. Kjemisk etterbehandling blir også ofte brukt til å lokalt forbedre overflateruheten etter at komponenten har vært igjennom en annen etterbehandlingsmetode som maskinering eller polering. Metoden blir også ofte brukt til å etterbehandle områdene der støttestrukturen henger fast i figuren. Kjemiske etterbehandlingsmetoder er ofte veldig like, og baserer seg på å senke den AM-produserte delen i et temperaturregulert bad med en kjemisk løsning. [76]

## 11.2 Ingen fjerning av materiale

For mekaniske metoder som ikke fjerner materiale, men forbedrer overflateruheten og de mekaniske egenskapene til AM-produserte deler. Disse metodene baserer seg som oftest på å generere en plastisk deformasjon i overflaten til delen. [76]

### 11.2.1 Mekanisk behandling

De mekaniske behandlingsmetodene baserer seg på å utsette de konstruerte delene for en mekanisk maskinering. Dette består som oftest av en form for kaldarbeiding av metallet, og metodene er nevnt under. [76]

#### **Rulling**

Rulling er en prosess som plastisk deformerer det ytterste laget av figuren ved å presse ruller med forskjellige former og geometrier mot overflaten til materialet. Rulling er tradisjonelt brukt for å redusere tykkelse eller kontrollere overlateruheten. Rulling har vist seg å kunne introdusere en residualspenning som følge av trykkpåvirkningen, men er fremdeles en metode som har vist å kunne bedre materialeegenskapene samtidig som overlateruheten blir forbedret. [76]

#### **Sandblåsing**

En annen metode som ikke baserer seg på fjerning av materiale er sandblåsing. Dette gjøres ved at slipemateriale som sand eller kermaiske kuler blir skutt på overflaten til den produserte delen. Denne metoden er god på å redusere overlateruheten, og dette begrunnes med mengden kinetisk energi som inngår i metoden. Det er også vel dokumentert at sandblåsing er en metode som bedrer materialeegenskapene til de AM-produserte delene. [76]

#### **Skudd hamring**

Skudd hamring er en kaldbehandlingsprosess hvor overflaten til en AM-produsert del blir bombardert med små perler under kontrollert intensitet og eksponering. Metoden har vist seg å kunne forbedre overlateruheten til produserte komponenter, og det er mulig å kontrollere prosessparametere for å variere resultatet av etterbehandlingen. Det har også blitt vist at denne metoden signifikant forbedrer utmattingssegenskapene til produkter. Denne metoden har vist å kunne forbedre utmattingssegenskapene til produktet med opptil 12%. [76]

#### **Kavitasjons hamring**

Kavitasjonshamring er en hamringsprosess som ikke baserer seg på å skyte perler på overflaten. Metoden har vist å kunne redusere overlateruheten til produserte deler, men vil også tilføre residualstress i materialet. Metoden har også vist seg å kunne forbedre utmattingssegenskapene til produktene. Metoden egner seg best til å forbedre overflatehardheten, men har vist seg å kunne forbedre utmattingssegenskapene med opptil 15%. [76]

#### **Ultrasonisk nano-krystall overflate modifikasjon**

Denne metoden baserer seg på å redusere overlateruheten til en AM-produsert del ved hjelp av gjentakende påvirkning fra wolframkarbid-tupp under supersoniske frekvenser. Denne tuppen kontrolleres med en statisk last. I likhet med andre metoder som har en fysisk påkjenning på materialet skaper også denne metoden residualstress. Denne metoden har vist å kunne øke hardheten og en rekke andre egenskaper til materialet, på bekostningen av elastisiteten. [76]

### 11.2.2 Laserbehandling

Det er mulig å etterbehandle komponenten med en laser uten at material blir fjernet, og dette avsnittet tar opp metoder innen laserbehandling som forbedrer materialegenskaper ved hjelp av laser. [76]

#### **Laser sjokk hamring**

Denne metoden baserer seg på at en pulserende laser går over overflaten til materialet og genererer sjokkbølger et lag av materialet eller et tynt lag med væske. Dette skaper plastisk deformasjon i det øverste laget til komponenten, og dette skaper residualstress. Denne metoden gir komponentene en betraktelig økning i utmattingsegenskaper sammenlignet med en del som ikke har gått igjennom behandling. Denne metoden har bevist å bedre materialegenskapene bedre enn kavitasjonshamring, men ikke bedre enn skudd hamring. Altså øker levetiden til komponenten et sted mellom 12 og 15%. [76]

#### **Laser re-smelting**

Her vil det bli skannet en laser over figuren for å smelte det gjenværende materialet før det legges et nytt lag. Dette har blitt gjort forsøk på dette gjennom flere metoder, og en av disse er å re-smelte hvert eneste lag i produksjonsprosessen. Dette har vist å ta merkbart mer tid i produksjonsprosessen, og metoden har vist å kunne overflateruheten og porøsiteten til konstruksjonen. [76]

#### **Laser polering**

Denne prosessen er veldig lik som laser re-smelting, og i prosessen blir en laser pekt på produktets ytterste lag. Laseren vil sende en puls som vil skape en lokal smelt i overflaten. Smeltedybden kan variere fra et par nanometer til millimeter avhengig av intensiteten til laseren. Denne metoden gir gode resultater når det kommer til å etterbehandle overflatestrukturen til en figur. [76]

### 11.3 Påføring av belegg

Påføringen av et belegg er sett på som en praktisk tilnærming for å kontrollere egenskaper og overflaten til en AM-produsert del. Påføring av belegg har også fordelen at det fungerer som korrosjonsforebyggende. Påføring av belegg har også vist å forbedre de mekaniske egenskapene til en AM-produsert del, samtidig som det reduserer overflateruheten. Det går an å påføre belegg med forskjellige sammensetninger, og på forskjellige metoder. Resultatene fra etterbehandlingen vil variere med typen belegg, og metodikken som har blitt brukt til å påføre belegget. [76]

### 11.4 Hybridbehandling

Hybridbehandling er en kombinasjon av etterbehandlingsmetoder. Dette gir muligheten for å spesialtilpasse etterbehandlingen slik at komponenten har de materialegenskapene som egner seg best til bruken. Varmebehandling kombineres som oftest med andre etterbehandlinger for å kunne homogenisere stålet og eliminere residualstress som har blitt generert under produksjonen. [76]

## 11.5 Kostnadsvurdering av etterbehandling

For å gi en oppsummering av etterbehandlingsmetodene har det blitt sett på kostand og tidsbruk av de tidligere nevnte metodene. Dette er gjort ved å multiplisere kostnad med tidsbruk for å få en verdi som skaper et sammenligningsgrunnlag. Her vil hver av perspektivene rangert fra veldig lav (1) til veldig høy (5). Disse har også blitt fargekodet for enkelhetsskyld, og oversikt over dette er å finne i tabellen under. [76]

Tabell 33: Scorematrise for etterbehandlings metoder. Hentet fra [76]

Matrise for kostnadsanalyse							
Tid	Veldig høy	5	5	10	15	20	25
	høy	4	4	8	12	16	20
	Moderat	3	3	6	9	12	15
	Lav	2	2	4	6	8	10
	Veldig lav	1	1	2	3	4	5
			1	2	3	4	5
			Veldig lav	Lav	moderat	høy	Veldig høy
Penger							

Alle etterbehandlingsmetodene har blitt scoret og rangert etter denne matrisen og resultatene er å finne i tabellen under. [76]

Tabell 34: Evaluering og rangering av etterbehandlingsmetoder. Hentet fra [76]

Etterbehandling av overflate		Kostand		Score	Rangering
		Tid	Penger		
Fjerning av materiale	Mekansik	Lav	Veldig lav	2	1
	Laserbassert	Veldig høy	Veldig høy	25	5
	Kjemisk behandling	Lav	Lav	4	2
Materiale beholdes	Mekansik	Moderat	Lav	6	3
	Laserbassert	Veldig høy	Veldig høy	25	5
Belegg på overflaten		Høy	Høy	16	4
Hybridbehandling		Veldig høy	Veldig høy	25	5

Fra tabellen over kommer det frem at mekanisk etterbehandling som fjerner materiale er en av de mest gunstige metodene for å bedre materialeegenskapene.

## 12. KOSTNADSANALYSE

*I denne delen av oppgaven vil det bli gjort en kostnadsanalyse av de forskjellige produksjonsmetodene. Dette vil bli gjort en nullpunktsanalyse for å se hvor mange produkter som må produseres før maskineriet er lønnsomt.*

### 12.1 Kontantstrømmer analyse

For å kunne gjøre en kostnadsanalyse vil det bli sett på kontantstrømmer som følge av investeringen i maskineri og et avkastningskrav

For å kunne se på kostnadsbildet for en 3d-printer må det defineres et antatt livsløp for maskinene. I denne oppgaven vil det bli antatt at en 3D-printer kan brukes for 4 timer om dagen over 10 år. [77]

Videre vil kontantstrømmene som blir brukt i oppgaven være regnet per kalenderår for å gjøre utregningene lettere. Avkastningskravet til bedriften vil være satt til 7% som er en realistisk forventning på avkastning. Avkastningskravet til bedriften kan variere med mange faktorer, og som oftest vil dette variere med interne praksiser og sammenstilling av lån og egenkapital. En normal måte å finne avkastningskravet på er å gjøre en analyse på «weighted average cost of capital» (WACC). [78]

Denne faktoren vil bli brukt til å neddiskontere kontantstrømmene en bedrift kan forvente å ha i fremtiden basert på investeringen gjort i første tidsperiode. Kontantstrømmene er forskuttet og verdien reduseres med en rente, og når alle tidsperiodene er summert opp vil resultatet være nåverdien til prosjektet. Dette gjøres ved følgende formel; [78]

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{x_t}{(1+r)^t} \quad (12.1)$$

Med en levetid på 10 år vil det da være mulig å finne ut hvor mye kontantstrømmer et AM-apparat må frembringe for å kunne forsvare investeringen. Den generelle tommelregelen for nåverdi metoden er at alle prosjekter med en positiv nåverdi skal godtas med mindre de er ekskluderende. Ved ekskluderende prosjekter godtas det med høyest nåverdi. [78-79]

For å gjøre en enkel analyse av kontantstrømmene har det blitt satt opp en investering i år null som symboliserer investeringskostnaden til prosjektet, altså kjøpet av et AM-apparat. Videre vil det bli antatt at investeringen skaper en lik inntekt i alle årene maskinen er i bruk. Ut fra dette er det mulig å beregne hvor mye kontantstrømmer denne maskinen må skape hvert år. Dette blir gjort med følgende formel;

$$NPV = PMT * \frac{1}{r} \left( 1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right) \quad (12.2)$$



Her vil NPV være nåverdien, og PMT vil være den årlige kontantstrømmen. Ved å skrive om denne slik at PMT står alene vil det være mulig å se minimum kapitalstrøm før investeringen er profitabel. Denne formelen vil se ut som følger;

$$PMT = \frac{NPV}{\frac{1}{r} \left( 1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right)} \quad (12.3)$$

En industriell 3D-printer kan koste alt mellom \$20k-\$100k, og for å tydeliggjøre eksempelet vil den øverste verdien bli brukt. Dette resulterer i følgende utregning: [80]

$$PMT = \$14\,300 \approx \frac{\$100\,000}{\frac{1}{0.07} \left( 1 - \frac{1}{(1+0.07)^{10}} \right)} \quad (12.4)$$

Dette vil si at for at det skal være økonomisk gunstig å investere i et AM-apparat må det frembringe \$14 300 i positive kontantstrømmer. Dette er medberegnet de løpende utgiftene som går med til strøm og produksjonsmateriale.

## 12.2 Nullpunkt analyse og gunstig antall produserte enheter

For å kunne se på profitten og mulighetene til AM produksjon vil det bli tatt utgangspunkt i en standard profittlikning. Denne vil bli satt opp slik at en vil kunne se kostander og inntekter assosiert med hvert enkelt produserte produkt. [30-31]

$$\pi(x) = p * x - c(x) - B \quad (12.5)$$

I dette tilfellet vil  $\pi(x)$  være den årlige kontantstrømmen basert på antall produserte enheter,  $p$  vil være prisen per enhet,  $x$  vil være antall enheter,  $C(x)$  vil være kostandsfunksjonen som beskriver hvor mye det koster å produsere en enhet og  $B$  vil være tapte kostander.

For å nærmere kunne kalkulere kostanden assosiert med produksjonen av en enhet vil dette bli disaggregert til et mer deskriptivt nivå. Her vil alle enhetene som går inn i produksjonen være beskrevet som en vektor, og prisene til hver av innsatsfaktorene vil være beskrevet med en annen vektor. Dett er beskrevet i formelen under [30-31]

$$\text{Pris per vare} = C(\mathbf{w}, q) := \min_{z \geq 0, \phi(z) \geq q} \sum_{i=1}^m \mathbf{w}_i z_i \quad (12.6)$$

På dette disaggregerte nivået vil  $\mathbf{w}$  være kostnadsvektoren som beskriver kostanden til hver av innsatsfaktorene,  $z$  vil beskrive bruken av hver av hver innsatsfaktor og summen av disse vil utgjøre kostanden assosiert med produksjon av hver enkelt enhet. For enkelhets skyld blir kostandsfunksjonen antatt å være avhengig av antall produserte enheter, og at det brukes et fastsatt antall deler per enhet. [30-31]

Ved å se på den marginale profitten per enhet er det mulig å se når kostanden per produserte enhet er det samme som prisen den kan selges for i markedet. Dette gjøres ved å derivere profittfunksjonen med hensyn på  $x$ . [30-31]

$$\frac{\partial \pi}{\partial x} = p - \frac{\partial C(x)}{\partial x} \quad (12.7)$$

Siden inntjeningen ved det siste produktet som blir solgt vil være null kan likningen over skrives om.

$$p = \frac{\partial C(x)}{\partial x} = \sum_{i=1}^m w_i z_i \quad (12.8)$$

Denne likningen forteller at den marginale kostanden vil være lik prisen på den siste produserte varen. Ved sette inn det optimale antallet for  $x$  vil det være mulig å finne ut hvor mye profitt bedriften kan forvente av produksjonsserien. [30-31]

### 12.3 Fordeling av inntekter basert på produksjon

For å kunne se på disse kontantstrømmene og hvordan de påvirker prosjektet er det mulig å anta at deler av profittmarginen til større produkter vil kunne forklares med implementeringen av AM-produserte deler. Ved å regne ut hvor stor del av endeproduktet som stammer fra AM-produksjonen er det mulig å regne ut en aktivitetsbasert kostnadskalkyle (ABC-kalkyle) som viser hvor mye av profitten som kan tilfalles AM-teknologien. Dette kan gjøres ved følgende likning. [67]

$$\eta = \frac{w * z}{\sum_{i=1}^m w_i z_i} \quad (12.9)$$

Deretter kan dette ganges med profittfunksjonen for å finne ut hvor mye av profitten som kan tilskrives produksjonsverktøyet.

$$PMT = \eta * \pi(x_{optimal}) \begin{cases} PMT < \$14\,300 : \text{Ikke lønnsomt} \\ PMT > \$14\,300 : \text{lønnsomt} \end{cases} \quad (12.10)$$

Fra denne likningen er det mulig å se om inntekten fra produksjonsserien vil kunne forsvare bruken av maskineriet, og om PMT er lavere enn \$14 300 vil det føre til en negativ nåverdi for investeringen og det vil ikke være gunstig å investere i produksjonsutstyret. [78]

### 12.4 Leveringskjede

En av de tenkelige fordelene med AM-produksjon som kom frem i intervjuene med Dane Cékov var mulige kostnadsbesparelser i leveringskjedene og fordeler ved lokal produksjon. En leveringskjede vil være forsyningsnettverket som skal til for at et produkt skal kunne bygges. Fordelen med AM produksjon er at dele kan produseres i sin helhet på et sted, fremfor at komponenter transporteres mellom fabrikker for å minimere produksjonskostnaden.

For å se på hvor mye som kan spares ved en lokal produksjon fremfor et bredt forsyningsnettverk, og det har blitt dokumentert at innsparingspotensialet kan være rundt 30% av kostanden [81]. Det er også flere artikler som dokumenterer at AM baserte leveringskjeder er overlegne fremfor tradisjonelle leveringskjeder, men om investeringskostnaden inkluderes i kalkyle vil ikke nødvendigvis AM baserte leveringskjeder være mer effektive. [82]. Et studie fra Mississippi forslår at en kombinasjon av tradisjonell produksjon (TP) og AM produksjon vil være den mest optimale løsningen i områder med lavere transportkostnader, og at et lokalt sentralisert produksjonsverksted vil kunne føre til inntjening i mindre forsyningskjeder. Her brukes staten Mississippi som eksempel, og at et lite forsyningsnettverk ikke nødvendigvis er dyrere enn at lokale bedrifter har sin egen AM-maskin. [83] Også innenfor luftfartsindustrien er det dokumentert at AM teknologi kan være med på å effektivisere leveringskjedene, og artikkelen konkluderer med at det er et klart potensiale for bruk av AM produksjon til å effektivisere leveringskjedene innen reservedeler til luftfartsindustrien. [84]

Den lokale produksjonen av varer vil også kunne svare til «first come first served» prinsippet, en mer agil ordreproduksjon som produserer for kunder på etterspørsel og enklere bestilling av varer for leverandør [81]. Studiet fra Mississippi tar også opp at tidsaspektet til produksjon vil ha en innvirkning på leveringer som haster, og at dette kan være med på å gjøre lokal AM-produksjon mer gunstig [83]. AM baserte leveringskjeder har med andre ord flere fordeler enn den potensielle kostnadsinnsparingen, men er avhengig av investeringskostnadene til produksjonsutstyret og pris på lokal transport.

## 12.5 Ordreproduksjon og serieproduksjon.

En av fordelene med digital prototyping og produksjon er at produktene enkelt kan redigeres og spesialtilpasset hver enkelt bruker. Denne muligheten til å iterere produktene uten å endre på produksjonsutstyret vil være en kjempefordel i kostnadsbildet. En produksjonstype som passer godt til denne typer egenskaper er ordreproduksjon. Dette vil være en produksjonstype der et produkt produseres etterspørsel. Denne typen produksjon vil være gunstig for produkter som skal spesialtilpassas, og det er små variasjoner mellom hvert produkt. [78]

Serieproduksjon vil være en produksjonsmetode der det produseres mange like enheter, og kunden ikke vil ha personlige behov for produktet. Denne produksjonsformen henger som oftest sammen med et større produsert kvanta av varer, og produksjonsmetoder som støpning vil ofte bli brukt. [78]

Mellom disse to produksjonsmetodene vil det være en gråsoner hvor antall varer markedet etterspør vil være stort, men ikke så stort at det lønner seg med en storskala produksjon. Kostnadseffektiviteten er med andre ord avhengig av antall produserte varer, og en artikkel fra arkitekthøgskolen viser at AM-produksjon kan nå en lavere marginal kostand raskere enn alternative produksjonsmetoder. Dette kommer tydelig frem på figur 1 i rapporten «*Design issues and orientations in additive manufacturing*», og figuren viser at AM produksjon vil være mer gunstig enn injeksjonsstøpning inntil det skal produseres litt over 1000 deler [85]. Dette indikerer at AM produksjon kan være gunstig å bruke i nisjemarkeder der det ikke vil bli solgt mange deler, men det fremdeles vil være et behov i markedet. Skal det produseres mange enheter bør alternative produksjonsmetoder benyttes.

## 13. BÆREKRAFTSANALYSE

*For å få et bilde over bærekraftperspektivet til produksjonsmetodene vil det bli undersøkt hvor mye klimagassutslipp som er assosiert med de forskjellige teknikkene.*

I dette kapitlet vil det bli gjort en bærekraftsanalyse av RP-teknologi. Her vil det bli sett på utslipp assosiert med maskineri og produksjon.

For å kunne gjøre en analyse av RP-teknologien vil det bli sett på LCA-analysen for en maskin. Dette vil bli brukt som mengden CO<sub>2</sub> som assosieres med antall produserte enheter.

Denne LCA analysen vil bli gjort på prøvestaver som blir resirkulert etter bruk. Grunnen til dette er at alle prøvestavene vil være laget av det samme materialet, vil ha like dimensjoner og den isolerte forskjellen er produksjonsmetodene.



Figur 51: Prøvestav produsert etter ISO 527-2:2012

For å finne volumet til figuren har «mass properties» i Solidworks blitt brukt, og volumet til figuren er 9582.5 kubikk millimeter. Prøvestaven vil være bygget i polyetylentereftalat, glykol (PETG). PETG veier  $1.26e-3 - 1.28e-3$  g/cm<sup>3</sup> og resulterer i prøvestaven vil bruke ca 12.3g materiale per prøvestav.

Videre er forutsetningen for analysen at det ikke er noe transport av prøvestavene, det er samme masse og resirkuleringsgrad på alt av utstyr. Den eneste forskjellen er produksjonsmetoden. Videre har det blitt valgt en resirkuleringsgrad på 90%, og dette har blitt gjort for å ta hensyn til eventuell slitasje og ineffektivitet i resirkuleringsprosessen.

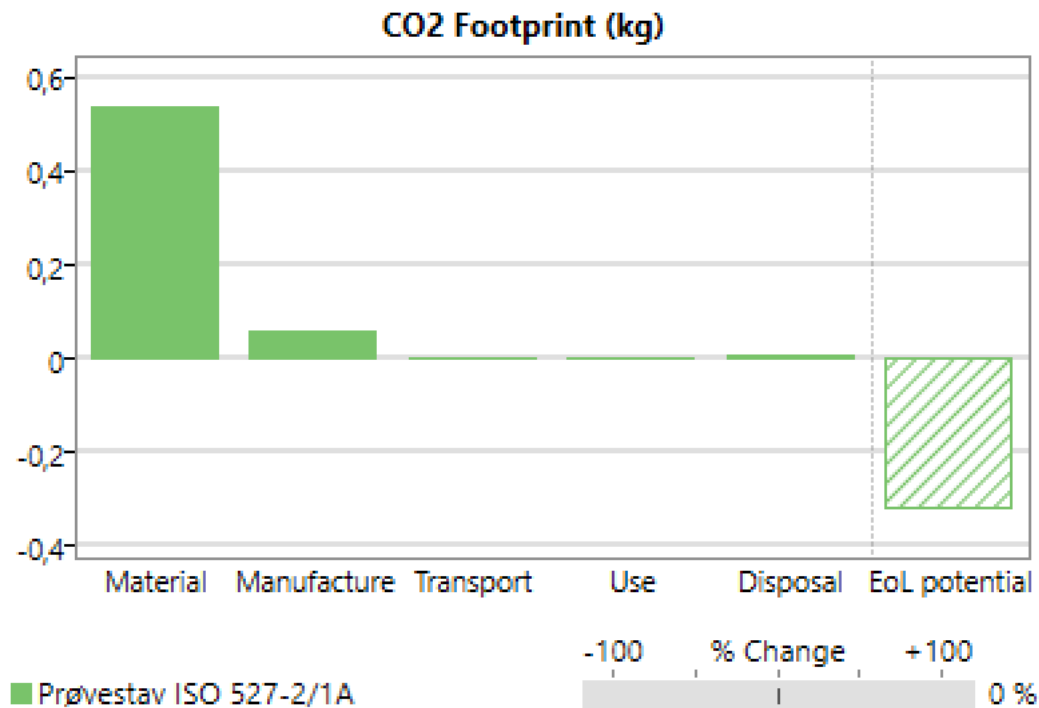
Videre har det blitt sett på polymer ekstrudering mot polymerstøpning. Grunnen til dette er at polymerekstrudering vil være produksjonsmetoden som minner mest om AM-produksjon

### 13.1 Resultater fra LCA-analyse

Etter at LCA analysene har blitt gjennomført vil resultatene presenteres, og det vil settes opp et uttrykk som beskriver Co<sub>2</sub> utslipp per produserte enhet.

#### 13.1.1 Resultater for polymer ekstrudering

For å se på en prosess som er mest mulig lik AM produksjon har det blitt sett på polymer ekstrudering. Dette ga et utslipp på 0.6Kg Co<sub>2</sub> assosiert med komponentens livsløp.



Figur 52: LCA analyse av en prøvestav produsert med polymer ekstrudering

Fra LCA analysen kommer det frem at majoriteten av klimagass utslipper er assosiert med materialet som brukes. Fra dette resultatet kommer det frem at det er viktig at materialet resirkuleres, og at resirkuleringsprosessen er mest mulig effektiv.

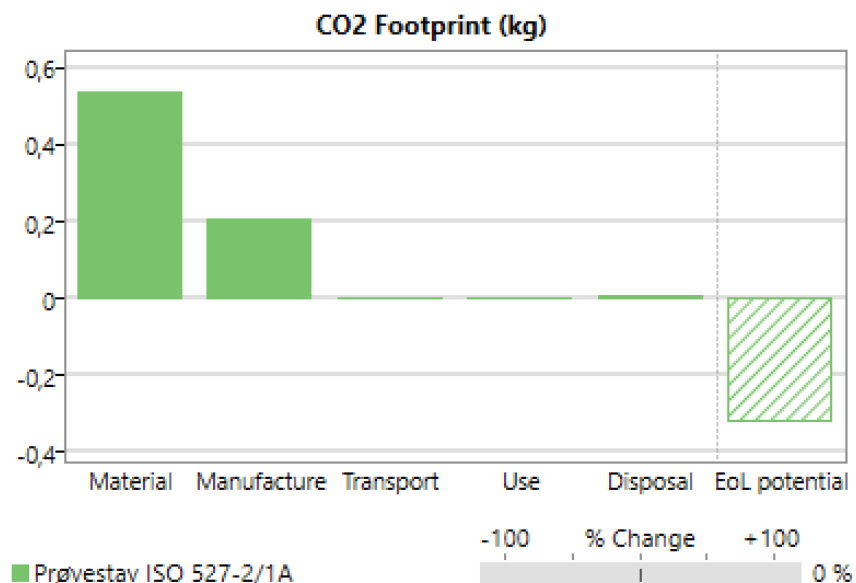
Tabell 35: Resultater fra LCA-analysen av en prøvestav produsert med polymer ekstrudering listet opp i en tabell

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 footprint (kg)	CO2 footprint (%)
<b>Material</b>	11,5	93,2	0,537	89,5
<b>Manufacture</b>	0,765	6,2	0,0574	9,6
<b>Transport</b>	0	0,0	0	0,0
<b>Use</b>	0	0,0	0	0,0
<b>Disposal</b>	0,08	0,6	0,0056	0,9
Total (for first life)	<b>12,4</b>	<b>100</b>	<b>0,6</b>	<b>100</b>
<b>End of life potential</b>	-6,84		-0,32	

Det kommer også frem at potensialet på enden av livsløpet til en prøvestav vil være -0.32kg Co2 for polymer ekstrudering, og at om alt materialet resirkuleres kan utslippet reduseres.

### 13.1.2 Resultater for polymer Støpning

Videre ble det sett på polymerstøpning. Denne produksjonsmetoden resulterte med et Co2 utslipp på 0.75kg i løpet av livssyklusen.



Figur 53: LCA analyse av en prøvestav produsert med polymer støpning

I denne LCA analysen kommer det også frem at majoriteten av Co2 utslippet er assosiert med materialet, men det er også tydelig at støpningsprosessen krever mer energi siden denne søylen ligger på rundt 0.2kg Co2.

Tabell 36: Resultater fra LCA-analysen av en prøvestav produsert med polymer støpning listet opp i en tabell

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 footprint (kg)	CO2 footprint (%)
Material	11,5	80,2	0,537	71,6
Manufacture	2,77	19,3	0,208	27,7
Transport	0	0,0	0	0,0
Use	0	0,0	0	0,0
Disposal	0,08	0,6	0,0056	0,7
Total (for first life)	14,4	100	0,751	100
End of life potential	-6,84		-0,32	

I likhet med polymerekstrudering har denne metoden et potensiale på å redusere utslippet med 0.32kg Co2. Dette er samme reduksjon som kan forventes med polymer ekstrudering, og selve produksjonsprosessen vil ikke påvirke dette resultatet.

### 13.1.3 Resultattolkning av LCA analysene

Den kausale effekten på utslippsmengden er dermed produksjonsprosessen, og med tilgjengelige data kommer det frem at polymerstøpning er en mer forurensende prosess. Dette vil bli betraktet som det marginale utslippet per produserte enhet, og forholdstallet mellom produksjonstypene vil være som følger. Her har  $\beta$  blitt valgt som variabel for å markere at dette er en betakoeffisient assosiert med utslipp fra produksjon, og det vil være mulighet for å lage en forenklet modell som beskriver utslippet til et gitt antall produserte enheter.

$$\frac{\beta_{Støpning}}{\beta_{ekstrudering}} = \frac{0.208 \text{ kg Co2}}{0.0574 \text{ kg Co2}} \approx 3.6 \quad (13.1)$$

Ved å sammenligne utslippet til det to produksjonsmetodene kommer det frem at polymerstøpning er mer forurensende en ekstrudering med en faktor på tilnærmet 3.6, eller 360%. [86- 91]

Med antagelsen om at AM produksjon har et likt utslipp som polymer ekstrudering vil denne produksjonsmetoden være signifikant mer miljøvennlig enn alternativet. Utslippet for en produksjonsserie med prøvestaver kan nå representeres, og er gitt under.

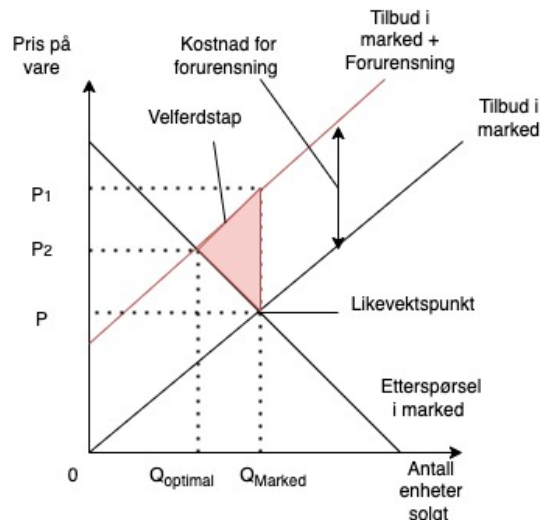
$$y(x) = \beta_{ekstrudering} * x + 0.1 * \beta_{materiale} * x + B \quad (13.2)$$

Her vil x være antall produserte enheter, B vil være Co2 utslippet assosiert med kjøp av maskineri og 0.1 vil reflektere gjenvinningsfaktoren siden 90% av materialet antas og resirkuleres. Betakoeffisientene er hentet fra LCA analysen av prøvestaven, og er hentet fra tabell 35.

En annen sentral del av bærekrafts aspektet til produksjonstypene er eksternalitetene som følge av produksjon. En eksternalitet er definert som konsekvensen av en aktivitet fra et selskap eller person som påvirker en tredjepart som ikke betaler eller får kompensasjon for denne påkjeningen. I dette tilfellet vil miljøpåvirkningene av en produksjon være en negativ eksternalitet som påvirker omverden på en negativ måte. [92]

Disse eksternalitetene kan være alt fra små plastmolekyler, avgasser og mikroplast som introduseres til økosystemer som følge av produksjonsmetodene. Denne miljøkostnaden er det vanskelig å kategorisere siden det ikke nødvendigvis går inn i en bedrifts eller konsumenters kalkyler, men fremdeles vil ha en samfunnspåvirkning. Denne samfunnspåvirkningen kan være som følge av restriksjoner av annen produksjon, effektivitet innad i bedriften eller miljøpåvirkninger. [92]

Fra et samfunnsøkonomisk ståsted kan denne velferdskostanden identifiseres, og dette gjøres ved å legge til en kostand for eksternaliteten på toppen av tilbudet i markedet. Her vil det være antatt at markedet er effektivt, og at kostnaden av eksternaliteten bæres av samfunnet. For å eksemplifisere dette har det også blitt sett på et antatt scenarie hvor det aggregerte tilbudet av AM-produserte PETG produkter i et marked. [93]



Figur 54: Markedspåvirkning av klimagassutslipp og illustrasjon av samfunnskostnaden dette medfører

Fra figur 12 kommer det frem at kostnadene for Co2 utslipp (el.) påvirker de sosiale kostnadene for en produksjon. De sosiale kostnadene er definert som bedriftens kostand i tillegg til kostandene for klimapåvirkningene. Denne differansen mellom selskapets kostander og de reelle kostandene for samfunnet fører til et velferdstap som følge av de negative eksternalitetene klimagassutslippet medfører. Dette velferdstapet vil ikke bli båret av endebbrukere eller bedriftene med mindre det innføres strenge klimakvoter eller klimaskatter. [93]

Ved å reduserer disse klimagassutslippene som følge av produksjon vil det føre til mindre velferdstap i samfunnet i tillegg til mindre påkjenning av miljø og mennesker. Et eksempel på hvordan en produksjonsserie har ført til store utfordringer for klima og mennesker er DuPont's teflonproduksjon der avfall ble dumpet av selskapet uten å tenke på hvordan dette påvirket miljø og levestandard til lokalbeboere. [94]

Disse eksternalitetene som følge av utslipp fra fabrikk førte til misdannelser hos barn, døde dyr og andre utfordringer. Dette førte til en direkte velferdskostnad for samfunnet som må ta vare på de generasjonene som ble påvirket og andre utilsiktedes konsekvenser av utslipp og manglende avfallshåndtering. En av utfordringene er mangel på kjennskap, og kausalitetsprinsippet mellom utslipp og konsekvensene. [93]

Denne utfordringen står samfunnet ovenfor idag med tanke på Co2 utslipp, mikroplast og lignende miljøutfordringer. Mikroplast som fort kan være en konsekvens av AM-produksjon har blitt tatt opp som en bekymring for menneskelig helse og en bærekrafts utfordring. Det er allerede bevist at mikroplast fører til inflammasjoner og hormonforstyrrelser hos mennesker, men det er dessverre mangel på verifiseringsmetoder. Videre er også langtidspåvirkningene fra mikroplast ikke dokumentert, og det er derfor vanskelig å pris sette denne samfunnskostnaden. Dette gjør at jo mindre miljøpåvirkninger og negative eksternaliteter en produksjon fører mer seg, jo mer samfunnsnyttig vil produksjonsmetoden være. [92][94]



## 14 DESIGNTILPASSING OG MULIGHETER

*I dette kapittelet vil det bli undersøkt hvilke fordeler det kan ha og bruke 3D printing og andre RP teknologier i produksjon. Det vil bli sett på hvilke designtilpasninger som kan gjøres, og hvilke fordeler dette vil ha for endeproduktet.*

AM-produksjon åpner en rekke muligheter for designtilpasninger og nytenkning. Selv om AM produksjon har sine ulemper lar metoden designere tenke utenfor tradisjonelt produksjonsutstyr og sammenstilling. Det går an å konstruere hule komponenter kan både vekt og arealmoment endres. Videre vil det også være mulig å endre på messesenteret til komponenten ved å legge mer materiale i noen deler av figuren. Det er enkelt å legge til rette for en iterativ prosess der prototyper kan testes fortløpende etter tilbakemelding fra endebbrukere. Dette gjør at det legges vekt på at designere lærer seg å bruke fordelene AM-teknologi tilbyr. [17] [96-97]

### 14.1 Designfordeler og DFM

Det er ofte viktig å tenke på hvordan en komponent skal designes for å ikke skape store utfordringer i maskinering og produksjonsprosessen, og det er dette som kalles «design for manufacture and assembly» (DFM). AM-teknologi har gjort det mulig å lage mer utfordrende design, og designeren trenger ikke i like stor grad å tenkte på produksjonsmetodikken. Det er ikke uvanlig at produsenter tar i bruk AM-produksjon for å nyte av fordelene de tilbyr, og det finnes eksempler på dette hos alt fra Siemens til Boeing. [17]

Målet med en DFM tilnærming er å minimere utfordringer og kostnader i produksjon og sammenstilling. For å kunne gjøre dette trenger man god kjennskap til produksjonsprosessen, leverandørers materialeegenskaper osv. Normalt er det tre aspekter DFM kan deles inn i, og disse er: [17]

- Industripraksis
- DFM retningslinjer og normal praksis
- Forskning på DFM metoder, verktøy og miljø

#### 14.1.1 Industripraksis

Industripraksisen har gått igjennom en utviklingsprosess for å bedre DFM perspektivet, og ble på 1980-1990 tallet gjort om til ekspertteam som består av ingeniører, designere, produksjonspersonell ol. Dette ble gjort for å inkludere alle ledd i produksjonsprosessen, og kan minne om IPD/IPPD tankegangen. Videre ble disse teknikkene brukt for å minimere sjansen for konflikter i produksjonsprosessen, eller behov for å endre produktet etter at produksjonsserien har begynt. [17]

#### 14.1.2 DFM retningslinjer og praksis

For å sikre kvaliteten til produktet bør det legges vekt på retningslinjer og praksis som definerer hvordan implementeringen av DFM skal foregå. Som retningslinje på beste praksis finnes

boken «*Handbook for product design for manufacture*» som forteller om materialegenskaper, produksjonsprosesser og tommelfinger regler. Her er det også utdypet rundt produksjonsteknikker som støpning, maskinering og sammenstilling [17]

### 14.1.3 Forskning på DFM, verktøy og miljø

Denne delen av DMF har handlet om å finne produksjonsparametere og utvikle enkle verktøy som lar designere evaluere hvor produksjonsvennlige produkter vil være. Disse verktøyene får designere til å se på utfordringer designet vil ha basert på tenkt produksjonsmetode, og gi et kostnadsestimat på hva en eventuell produksjon vil koste. Videre vil metoden kunne gi noen retningslinjer på hvordan produktet kan re-designes. [17]

## 14.2 Fordeler og tilpasningsdyktigheten til AM-produksjon

Noen av disse utfordringene vil forsvinne når produksjonsmetoden som velges er AM-produksjon. Retningslinjer, metoder og verktøy for AM produksjon bør etableres i større grad, og gi designeren et godt bilde på mulighetene assosiert med AM produksjon. For å tydeliggjøre disse mulighetene har det blitt satt fokus på design for additive manufacturing (DFAM), som sikter på å tydeliggjøre fordelene med AM produksjon. De fordelene produksjon tilbyr er oppsummert under. [17]

- **Kompleksitet i design:** Alle former og design kan bygges
- **Hierarkisk kompleksitet:** Egenskaper kan bygges med kompleksitet i alle størrelser
- **Funksjonell kompleksitet:** Funksjonelle produkter kan bygges i en byggeprosess
- **Materiell kompleksitet:** Det er mulig å bruke flere materialer under byggeprosessen

### 14.2.1 Kompleksitet i design

Kompleksiteten i produserte deler ligger som oftest i begrensningene til produksjonsutstyret. Injeksjonsstøpning og maskinering er to veldig vanlige metoder for produksjon, og begge disse er utsatt for begrensinger av kompleksitet som følge av produksjonsmetodikken. Muligheten til å kunne lage et komplekst design kommer med presisjonen til AM-teknologiene, og kompleksiteten er nærmest ubegrenset. [17]

Små endringer i designet er også en mulighet som er kompatibelt med AM produksjon, og gjør teknologien oppportun innenfor markeder med mye spesialtilpasninger. Videre vil det være mulig å spesialtilpasse deler som krever stive, men lette komponenter. Her vil en AM-produksjon kunne legge mer materiale for å opprettholde stivheten, og det er ikke utenfor normalen med en 25% vektreduksjon. [17]

Den siste fordelen rundt komplekst design og AM produksjon er begrensningen av geometriske former. Tradisjonelle produksjon legger begrensninger på geometri som kan produseres. [17] [98-99]

### 14.2.2 Hierarkisk kompleksitet

Den hierarkiske kompleksiteten ligger i muligheten til å kontrollere strukturer på flere forskjellige nivåer. Dette inkluderer nano-/mikrostrukturer, mesostruktur og makrostrukturen til delen. Muligheten til å kunne kontrollere et produkts mikrostruktur, mesostruktur og makrostruktur ut fra en CAD-fil er en fordel ingen annen type produksjon har, og er en av de større fordelene AM produksjon har over tradisjonell produksjon. [17] [98-99]

### 14.2.3 Funksjonell kompleksitet

Tradisjonell produksjonsmetoder setter også begrensinger til funksjoner ved produkter. Det vil være vanskelig å maskinere ut komplekse geometrier på innsiden av et produkt. Videre må funksjonelle deler som ledd ol. Produseres separat og settes sammen, Med AM-teknologi vil det være mulig å designe og produsere deler med fungerende bindefunksjoner som ledd ol. Dette er mulig å gjøre med både MEX og PBF printere, og bevegelige bindeledd vil kunne produseres som en enhet med minimalt av etterbehandlingsbehov.[17] [98-99]

### 14.2.4 Materiell kompleksitet

I en AM-prosess vil byggematerialet bli behandlet punkt for punkt, og dette gjør det mulig å behandle byggematerialet forskjellig gjennom byggeprosessen. Dette vil si at en AM produsert del vil kunne ha skreddersydde materialeegenskaper. Flere AM teknologier tillater også bruk av flere materialer gjennom produksjonsprosessen, så i tillegg til forskjellige materialeegenskaper for et materiale kan det legges flere typer materiale. Dette gjør at komponenter i stor grad kan tunes slik at egenskapene er tilpasset brukssituasjon til komponentene. Heterogene komponenter et noe det har blitt forsket en del på, og produksjonsmetoder som PJM. AM teknologiens egenskaper gir en rekke designmuligheter, og ved å følge noen retningslinjer for designet, og disse er listet under: [17] [98-99]

- AM produksjon gjør bruken av kompleks geometri for å nå design mål mulig uten at det vil kreve mye ekstra tidsbruk og ekstraomkostninger sammenlignet med tradisjonell produksjon.
- Komplekse deler kan designes og produseres som en komponent, og det vil derfor være mulig å unngå problemer i sammenstilling.
- AM teknologi gjør det mulig med spesialtilpasset geometri og deler ved direkte produksjon fra 3D data
- AM teknologi som bruker flere materialer gir enorme muligheter for designere, og disse ligger innenfor kompleks geometri og materialbruk
- Designere slipper å tenke på tradisjonell maskinering når de designer delene, men det er fremdeles begrensninger ved AM produksjon designeren må tenke på.

En annen enorm fordel med AM produksjon er at det er enkelt å designe for funksjonalitet. Muligheten til å produsere en del gjennom et CAD-program gjør det enkelt å pivotere og iterere produktet til å gi best mulig funksjon for endebrukeren. Dette kan variere fra topologi til funksjoner produktet har, og denne prosessen gjør det enkelt å kombinere utviklingsprosessen

med verktøy som QFD «house of quality». Videre vil hovedfunksjonene til et produkt enkelt kunne identifiseres, og AM produksjon vil kunne produsere spesialtilpassede deler som realiserer ønskede funksjoner.[17] [98-99]

#### 14.2.5 Topologisk optimalisering av design

Topologi optimalisering (TO) er en matematisk basert teknikk som optimaliserer hvor materialet legges og hvordan delen skal formes for optimal utnyttelse av material. Gjennom optimaliseringsprosessen er det vanlig å gjøre en FEM-analyse ved hver av itereringene for å se hvordan disse endringer påvirker resultatet. Ulempen med denne prosessen er at det vil kreve mye datakraft, og kan være tidkrevende. TO kan resultere i mange forskjellige topologiske former, og disse kan være vanskelige å produsere med tradisjonelle maskiner. Her vil AM-produksjon ha noen fordeler siden denne produksjonsmåten ikke må ta like mye hensyn til DFM aspekter i designvalgene, og det er enklere å produsere komponenter med komplekse former. Det er flere tilnærminger til optimalisering av topologien, og to vanlige prosesser er fagverksbasert og volumbasert tetthet. [17]

Fagverks basert optimalisering handler om å finne stavene i fagverket som er viktigst for egenskapene til designet. Denne metoden endrer på størrelsene til stavene, og om diameteren til en stav blir for liten vil denne bli fjernet fra modellen. Resultatet fra en slik tilnærming vil være et fagverk med varierende størrelse på stavene. En annen fremgangsmåte er å bruke posisjonen til stavene og størrelsen til stavene som en designvariabler. Den generelle metoden for fagverks basert optimalisering er å kjøre en FEM-analyse på designet som en komponent. De lokale målingene på trykk og strekk er med på å iterere designet, og høye stress verdier i materialet vil føre til en tykkere stav. [17]

Den andre metoden går ut på å finne den optimale material tettheten i produktet, og den vanligste metoden heter «Solid Isotropic Material with Penalization» (SIMP). Denne metoden baserer seg på å finne en verdi mellom 1 og 0 som bestemmer tettheten til materialet i et punkt. Her vil 1 være 100% tetthet i materiale, og 0 vil være fravær av materiale. Ved å variere på tettheten til materialet er det dermed mulig å komme frem til et optimalisert design, og et eksempel på dette er å finne på figur 19.27 på s.599 i boken til Gibson, Rosen, Stucker & Khorasani. [17]

## 15 Prosessevaluering og diskusjon

*I denne delen av oppgaven vil arbeidsprosessen bli evaluert, resultater diskuter og erfaringer fra prosjektet oppsummert.*

### 15.1. Kompetanseutvikling og læring

- En viktig læring for prosjektet har vært avgrensninger. Et for bredt scope på oppgaven vil gjøre det vanskelig med en tilstrekkelig utredning og gjennomføring innenfor tidsrammene.
- Nytt av kommunikasjon og eksterne innspill har vist seg å være relevant for å få innspill fra flere fagområder. Muligheten til å kunne kontakte eksperter med erfaringer utover sin egen tydeliggjør hvor viktig ekspertteam er for å kunne svare på tverrfaglige problemstillinger.
- Gjennom prosessen har jeg blitt flinkere til å jobbe systematisk mot et mål, og planlegge hvordan jeg skal få gjennomført disse.
- En viktig lærdom er at alle forskningsartikler kommer med muligheten til å laste ned referansen, og denne kan enkelt kopieres over til kildelisten.

### 15.2. Drøfting av prosesstrinnene

#### Forprosjektet

- Forprosjektet var enkelt å gjennomføre, og det var enkelt å finne forskningsartikler om relevante temaer.
- Forprosjektet gikk i stor grad ut på å definere oppgaven, finne problemstilling, hovedmål og delmål. Denne prosessen gikk greit etter at forskningsartikler ble samlet inn.
- For å få et godt overblikk over dagens situasjon for teknologien ble det bestilt to fagbøker. Disse var relevante og bidro til en god teknologiutredning.

#### Markedsvurdering

- Denne delen av prosessen gikk forhåndsvits greit. Med fagbøker på plass ble det lagt et godt grunnlag for å skape et overblikk av dagens situasjon for teknologien. Det var også mulig å finne viktige faktorer for markedet, og litt teori rundt bakgrunnen for rapid prototyping.
- Det var rikelig med forskningsartikler og nettsider på dette området som gjorde markedsvurderingen enkel å gjennomføre.
- Fagbøker og artikler var tydelig på fordelene rundt AM-produksjon og RP-teknologi, og det var enkelt å identifisere fordelene og nytteverdier for bedrifter ved å investere i teknologien.

### Teoretisk utredning

- Denne delen av prosessen ble preget av mangel på begrensninger. Oppgaven ble for sent avgrenset til MEX produksjon, og dette førte til at oppgaven hadde et for bredt omfang av arbeidet for lenge. Dette førte til litt flyt i milepælene, men etter at oppgaven ble begrenset var det enkelt å gjøre en utredning av relevant teknologi.
- Utredningen og dybden på teorien gjorde det enkelt å sette opp en nullhypotese og alternativhypotese basert på funnene i teoridelen.

### Ekstern tilbakemelding

- Denne delen av oppgaven gikk greit. Det var enkelt å få kontakt med eksperter/sakkyndig personer innenfor flere områder, og dette ga nyttige innspill på oppgaven og relevante problemstillinger som burde undersøkes.
- Det var ikke mulig å få gjort en undersøkelse blant endekonsumenter siden denne gruppen var vanskelig å få tak i, og tidsavgrensningen til prosjektet. Det ble derfor ikke gjennomført en spørreundersøkelse for å validere preferansene til kundegruppen.

### Forsøksdesign og forsøk

- Design av forsøk var utfordrende, men etter at det ble funnet en artikkel som testet materialeegenskaper basert på produksjonsorientering ble det enkelt definert et forsøk.
- Det var interessant å se på to forskjellige, og hvordan AM-produksjon påvirker materialeegenskapene forskjellig.

### Gjennomføring av forsøk

- Gjennomføringen av forsøket for strekkprøver var preget av påskeferie og koordinering med en PHD student som brukte samme maskin med et annet oppsett.
- Oppsettet til forsøket førte til forlengelse i prøvestaven utenfor testområdet, og forsøket ble begrenset til flytegrense som følge av eksogene faktorer som påvirket forlengelsen til prøvestaven.
- Det burde blitt designet en egen innspenning til forsøket, men dette ble ikke gjort på grunn av tidsrammene til prosjektet.

### Tolkning og visualisering av data

- Denne delen var enkelt gjennomført med Python, Jupyter notebook, seaborn og matplotlib
- Dataene lot seg enkelt illustrere, og det kommer tydelig frem hvilke data som tilhører de forskjellige gruppene under orientering.
- Tidligere erfaringer på området gjorde det enkelt med gjenbruk av kode og kjennskap til tilleggspakker.
- Hypotesetestene lot seg enkelt gjøre med python, og etter at signifikansnivå og ønskede lister var plottet inn i funksjonen som utførte hypotesetesten.

## Diskusjon og konklusjon

- Teorien ga et godt underlag for diskusjonen, og det var mulig å koble opp teoridelen og resultatene fra forsøket.
- Resultatene var interessante og stemte overens med hva som kunne forventes etter teoriutredningen.

## Ferdigstillingsfase

- Denne delen av prosessen har gått greit, og har vist hvor viktig denne delen av prosessen er for å nyansere, definere og formidle tankeprosessen gjennom oppgaven.

## 15.3. Sluttdrøfting av forhold ved forsøk og analyser

Resultatene fra strekkprøvene har vist at det er en signifikant forskjell på flytegrensen som følge av orienteringen av produksjon, om ekstremmålingen fjernes fra datasettet. Alle faktorene under forsøket var like, og den isolerte forskjellen har vært orienteringen under produksjonene.

Videre kommer det frem at produksjonsmetoden påvirker de forventede materialegenskapene til materialet. For flytegrensen vil det være en relativ lav utnyttelse av materialet med verdier helt ned til 19% av referanseverdien. For den beste mulige produksjonsorienteringen vil utnyttelsesgraden være 76%. Hardheten har en litt mer konsekvent utnyttelsesgrad som varierer mellom 72-86%.

Sammenhengen her vil trolig være sammensmeltningen mellom lagene, og det totale arealet med kovalente bånd. I prøvestavene som er produsert stående langs Z-aksen vil det være et mindre areal som holder strukturen sammen, og dette vil føre til en høyere stressakkumulering enn i de andre prøvestavene. I de andre prøvestavene vil arealet bindinger være langs hele prøvestaven. Siden det har blitt brukt et infill på 100% vil det være tre forskjellige arealer som kan brukes til å beregne stresset i det kritiske området.

$$A_1 = b * h = 40 \text{ mm}^2 \quad (15.1)$$

$A_1$  vil være arealet som materialet er bundet sammen med på det tynneste punktet i prøvestaven. For prøvestaven som er produsert langs Z-aksen vil dette være arealet som får dannet de kovalente båndene under produksjonsprosessen. Siden det er brukt 100% infill i produksjonsprosessen blir dette forenklet med at det dannes kovalente bånd i hele tverrsnittet.

For det andre arealet vil det bli sett på kontaktarealet for prøvestavene som er produsert stående vertikalt på XY-planet. Dette arealet vil være tykkelsen på prøvestaven ganget med lengden. Grunnen til dette er at alle lagene vil være i kontakt med hverandre for hele dette arealet.

$$A_2 = h * l = 680 \text{ mm}^2 \quad (15.2)$$

$A_2$  utgjør da arealet med kovalente bånd for prøvestavene som er produsert vertikalt på XY-planet, og dette arealet vil bli brukt videre for å regne ut stresset i det kritiske arealet. Her vil

alle lagene være med å binde sammen med samme areal, og det blir sett på et enkelt lag for å illustrere forskjellen i stresset. Det siste relevante arealet er litt vanskeligere å regne ut, men dette arealet har blitt funnet ved hjelp av Solidworks.

$$A_3 = 800mm^2 \quad (15.3)$$

$A_3$  vil være bindepunktene mellom tverrsnittet av prøvestaven i det tynneste området. Hvert lag blir lagt oppå hverandre, og det vil kunne dannes kovalente bånd over dette tverrsnittet til prøvestaven.

Siden kraftpåvirkningen vil være den samme, men arealet varierer vil stresset bli større i stavene som har blitt produsert stående. For å illustrere dette har det blitt satt en tilfeldig kraft på 1000N. Ved å kombinere denne lasten med arealene som er bundet sammen vil det være mulig å se på forskjellen i stresset materialet vil oppleve.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{1000N}{40mm^2} = 25 MPa \quad (15.4)$$

$$\sigma_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{1000N}{680mm^2} = 1.47 MPa \quad (15.5)$$

$$\sigma_3 = \frac{F}{A_3} = \frac{1000N}{800mm^2} = 1.25 MPa \quad (15.6)$$

Spenningsene vil være størst i tverrsnittet til prøvestaven som har blitt produsert stående langs Z-aksen. Prøvestavene som har blitt produsert vertikalt på XY-planet har også mer stress i bindingsarealet enn prøvestavene som har blitt liggende på byggeplattformen. Et interessant funn med disse antagelsene er at prøvestaven som er produsert stående på XY-planet viste seg å ha en høyere flytegrense, og en høyere bruddspenning enn prøvestavene som ble produsert liggende på byggeplattformen. Dette tyder på at det er andre faktorer som også påvirker hvor mange bånd som dannes mellom lagene. Dette kan være faktorer som temperatur på lagene under byggeprosessen, avkjølingsrate på polymere og sammensmeltingen mellom lagene.

For å se nærmere på temperaturpåvirkningen som det tidligere ekstrudatet på bindeprosessen blir det sett på hva teorien sier. Formelen som beskriver sammenhengen mellom ekstrudatets bredde og forskjellen i temperatur mellom ekstrudat og temperatur på ekstrudatet i tidligere lag vil det være mulig å anta at kjøleprosessen vil være en påvirkning på materialegenskapene og bindingene mellom lagene. Dette er beskrevet i formel (4.16)

Her kommer det frem at jo høyere temperatur nabolagene har jo lavere vil  $S_1$ , og denne faktoren er med på å påvirke bindeprosessen som er beskrevet i likning (4.14). Det vil med andre ord være en sammenheng mellom avkjølingen av tidligere laget og det siste produserte laget. Jo raskere denne avkjølingen skjer, jo lavere vil bindingspotensialet være.

Videre har det kommet frem at ekstremmålingen påvirker resultatene fra hypotesetesten. Ved å inkludere utstikkeren i datasettet vil det ikke være mulig å bevise at det er noen forskjell i



mellom prøvestaver som er produsert vertikalt på XY-planet og prøvestaver som har blitt produsert liggende på byggeplattformen. Hvis ekstremmålingen fjernes fra datasettet vil dette resultere i at det er en statistisk signifikant forskjell i dataene med et signifikansnivå på 0.05. Dette tyder på at det er noe usikkerhet i målingene, og antall tester bør økes for å kunne etterprøve resultatene.

Ved å øke antall målinger vil forventningsverdien til gjennomsnittet gå mot det reelle gjennomsnittet, og verdien vil i mindre grad være forutinntatt mot ekstremmålinger. Siden det er vanskelig å vite om denne utstikkeren er en ekstremmåling vil det ikke være mulig å konkludere med at det er en forskjell i disse to produksjonsmetodene uten videre testing og økning av antall målinger.

En annen stor utfordring handlet om forventningsrettede estimatorer når det kom til gjennomsnittet. Det var vanskelig å vite om gjennomsnittene for dataene er representative, og om utvalget er stort nok til å kunne si noe om resultatene. Siden det også var ekstremmålinger i datasettet var det vanskelig å vite om disse var reelle målinger, eller om dette kunne forklares med eksogene variabler som feil under produksjon el.

Presisjonen til produksjonsmetodene er også noe som er et suksesskriterier for AM-produksjon, og for MEX vil det være mange faktorer som kan påvirke hvor presis produksjonen er. Det er faktorer fra produksjon av STL-filene, resultater fra meshing av CAD-modellene, produksjonsparametere, størrelse på dyser i ekstruderingshode og størrelsen til filamentet som brukes i produksjonsprosessen. Som det blir diskutert i teoriutredningen vil det være en avveining mellom produksjonstid og presisjon. Volumstrømmen av ekstrudat på vei ut av dysen i ekstruderingshode vil være en faktor som påvirker produksjonstiden, men om denne dysen er for stor vil dette gå på bekostning av presisjonen til produksjonen.

Kostnadsbildet til AM produksjon viser at det er mange muligheter for produksjonsmetoden fra et økonomisk ståsted. Muligheten til å nå en lavere gjennomsnittskostnad raskere med et mer agilt produksjonsverktøy er veldig gunstig. Videre er det også lite som skal til for å kunne forsvare investeringen i produksjonsutstyret hvis det brukes i en større produksjonsserie. Forsyningskjedene, og innsparingsmulighetene rundt dette er også en gyllen mulighet for AM-teknologi. Ved å kunne kutte kostandene til en forsyningskjede med 30% vil dette være en enorm fordel.

Bærekraftperspektivet for AM-teknologien er også veldig gunstig. En MEX produsert prøvestav var 3.6 ganger mer miljøvennlig enn en prøvestav som var produsert med støpeform og smeltet polymerblanding. Dette er dessverre isolert til klimagasser, og tar ikke opp eksternaliteter av produksjonen som mikroplast og andre faktorer som kan påvirket miljøet negativt. Disse utslippene vil være relatert til en samfunnskostnad, men siden det er mangel på forskning som beviser disse sammenhengene er det vanskelig å gjøre en konklusjon på området.

## 16 KONKLUSJON

*I denne delen av oppgaven vil det bli konkludert med resultatene fra forsøk og analyser, og hvorvidt disse resultatene svarer til hovedmålsetningene og delmålsetningene som ble definert for oppgaven.*

### 16.1. Overordnet måloppfyllelse

For best mulig å kunne kvittere på sammenhengene mellom oppdragsrammen og hovedmålsettingen i oppgaven og arbeidet som har blitt planlagt og gjennomført, listes først viktige hovedelementene for å dokumentere gjennomføringsgrad:

- Produksjonsegenskaper for RP-teknologi har blitt utredet, undersøkt, testet og dokumentert.
- Flytegrensen og hardheten til produktene har blitt testet og dokumentert gjennom forsøk.
- Det har blitt gjennomført en økonomisk utredning og bærekraftsanalyse av AM-produksjon
- Analyser, funn og resultater har blitt dokumentert ved trinnvis rapportering og det har blitt gjort anbefalinger for videre arbeid.

Videre ble det satt opp en rekke delmål for prosessen som det også er kvittert på som følger:

- Det har blitt formulert en faglig bakgrunn for oppdraget, fokus for oppgaven og markedsaspekter ved produksjonsmetoden har også blitt vurdert og dokumentert.
- Det har blitt utredet sentrale aspekter knyttet til eksisterende metoder for hurtig prototyping (RP) og additiv produksjon (AM).
- Prosjektet har blitt planlagt med mål og tidsplaner og relevant metodikk har blitt kartlagt.
- Oppgaven har blitt avgrenset til en RP-teknologi, og MEX ble valgt
- Relevant teori, markedsaspekter og muligheter har blitt undersøkt og dokumentert
- Forsøk har blitt planlagt, gjennomført og dokumentert for å undersøke materialeegenskaper og faktorer som påvirker materialkvaliteten
- Alle data har blitt undersøkt med en deskriptiv analyse og visualisert. Det har blitt gjennomført en grundig EDA
- Det har blitt utarbeidet en kostnadsanalyse og utredet rundt økonomiske aspekter av valgt produksjonsmetode.
- Det har blitt gjennomført en bærekraftsanalyse av valgt produksjonsmetode, og denne har blitt sammenlignet med en annen RP-teknologi
- Det har blitt gjort en komparativ analyse av produksjonsmetoden og dette har blitt målt opp mot alternative produksjonsmetoder.
- Rapporten har blitt ferdigstilt, og er klar for levering. Det er også forberedt en muntlig prosjektpresentasjon.

## 16.2 Resultater og anbefalinger

Resultater fra utredningsresultater:

- Utredningen viser at faktorer som temperatur, polymerblanding og avkjøling vil ha en innvirkning på materialegenskapene
- Det finnes etterbehandlingsmetoder som bedrer materialegenskapene til AM-produserte deler. Disse metodene vil kunne forbedre flytegrense, overflaterøffhet og utmattelsesegenskaper.

Resultater fra ekspertsamtaler:

- Samtaler med eksperter viser at det er viktig at produksjonsutstyret er pålitelig, og at antall feilproduksjoner bør minimeres.
- Dane Cékov og Sigurd Berstad mener at et agilt produksjonsverktøy vil gjøre det enklere for selskaper og tilpasse utstyret til produksjonsprosesser. Dette er noe som vil være gunstig for bedrifter som produserer flere forskjellige varer.

Resultater fra forsøk:

- Forsøkene viser at det ikke er noen statistisk signifikant forskjell mellom de forskjellige produksjonsorienteringene når det kommer til hardhetsprøvene. Det viser seg også at utnyttelsesgraden av materialets hardhet er lavere etter at materialet har gått igjennom en AM-produksjon.
- Resultatene fra strekkforsøkene viser at det ikke er en statistisk signifikant mellom to av produksjonsmetodene, men om ekstremmålingen fjernes vil det være en statistisk signifikant forskjell. Utnyttelsesgraden av materialene er lavere for flytegrensen, og varierer veldig med produksjonsorientering. Dette fører til at en produsent bør ta hensyn til et produkts orientering under byggeprosessen. Hvis ikke komponenten blir produsert i en gunstig retning vil dette få store konsekvenser for komponentens egenskaper og levetid.

Resultater fra kostnad-/bærekraftsanalyse:

- Resultatene fra bærekraftsanalysene viser at MEX-produksjon har potensialet for å være mer bærekraftig enn tradisjonell produksjon
- Am-teknologi sitter med et komparativt fortrinn der gjennomsnittskostnaden per enhet faller raskere enn det gjør i injeksjonsstøpning.
- AM-teknologi og andre produksjonsmetoder vil gi mindre firmaer en mer agil tilnærming til markedet. Det vil også være mulig å få stordriftsfordeler inn i bedriftene på et tidligere tidspunkt som følge av diversifiseringsmulighetene til produksjonsutstyret.

## 16.3. Videre arbeid

### Fra ekspertsamtalene

- Det bør gjøres en grundig sensitivetsanalyse for å se hvordan markedssjokk påvirker profittmarginene til bedrifter som bruker AM-produksjon. Dette vil også ta opp endringer i råvareprisen og ressursene som blir brukt i produksjonen
- Det bør gjøres en analyse av hvordan renteendringer påvirker avkastningskravene til bedrifter.
- Det bør gjøres en grundig utredelse av hvilket ansvar bedrifter sitter med for sine produserte varer, og hvordan AM-produksjon påvirker feilproduserte varer. Det burde også letes frem rettspraksis på relevante områder så det er mulig å gjennomføre en konsekvensutredning rundt valg av produksjonsmaskineri.
- Det må gjøres en spørreundersøkelse med end brukere i markedet for å verifisere de antatte preferansene til konsumgruppen.

### Fra kostnad og bærekraftsanalyse

- Det burde gjøres et kvalitativt studie på en bedrift som driver med AM-produksjon for å se hvordan kostandskalkylene blir utført, og hvor mye AM-produksjon kan effektivisere produksjonen.
- Det bør gjøres en grundig analyse av forsyningskjedene for å finne ut hvor kostnadsbesparende en lokal produksjon vil være.
- Det bør utføres en grundig LCA analyse av forsyningskjedene og produksjon av et spesifikt produkt for å se hvor mye CO<sub>2</sub> utslipp som kan kuttes ved å produsere produkter mer lokalt.

### Fra resultattolkning og EDA

- Det burde utvikles et godt datasett som inneholder resultater fra forskjellige RP-teknologier, forskjellige materialer og referanseverdier. Dette vil gjøre det mulig å måle materialutnyttingsgraden til de forskjellige produksjonsmetodene.
- Videre arbeid burde bestå av å utvikle et datasett med forskjellige parametere for å kunne lage en predikativ modell basert på prosessparametere og orientering under produksjon.
- Antall målinger i datasettet bør økes for å se hvordan dette påvirker resultatene fra hypotesetestingen av strekkprøvene.
- Det burde gjøre videre tester for å få et overblikk over materialeegenskapene i sin helhet. Ved å kartlegge andre parametere knyttet til utmatting, termisk konduktivitet ol. vil det kunne gi et bedre bilde på bruken av AM-produksjon i sin helhet.
- Det bør gjøres en grundig kostnadsanalyse der forskjellige produksjonsmetoder sammenlignes. Dette burde gjøres med en homogen vare for å se de isolerte forskjellene.
- Det burde undersøkes i større grad hvordan optimalisering av design og spesialtilpasninger kan kobles opp mot andre teknologier som maskinlæring.

## 17. REFERANSER

### 17.1. Skriftlige kilder

- [11] Gabrielsen, Kristine Falk (2017). 3D-skanning og 3D-printing som metode for produksjon av prøvehylser til overekstremiteter. NMBU
- [12] Petersen-Øverleir, Eivind. (2015) Effect of 3D printing on the microstructure and mechanical properties of an Inconel 718 Nickel-alloy (UNS N07718) UiS
- [13] Kultorp, Espen. (2012) Kompositt materialer: verifisering av material- og styrkeegenskaper til bruk i motorsykelchassis. NMBU
- [14] Levchenko Anastasia (2015) Additive manufacturing as a mean of rapid prototyping: from words to actual model. Saimaa University of applied sciences
- [15] Liu, Chen-yo (2013) A comparative study of rapid prototyping systems. University of Missouri.
- [17] Gibson, Ian. Rosen, David. Stucker, Brent. Khorasani, Mahyar. (2021) Additive manufacturing technologies (Third edition ) Springer. 675 sider
- [18] Liou, Fuewen Frank (2019), Rapid prototyping and engineering applications (Second edition) Taylor & Francis group. 529 sider
- [19] Gao, Wei. Zhang, Yunbo. Ramanujan, Devarajan. Karthik, Ramani. Chen, Yong. Williams, Christopher B. Wang, Charlie C.L, Shin, Yung C. Zhang, Song, Zavattieri, Pablo D. (2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering.
- [20] Rolstadås, Asbjørn. Olsson, Nils. Johansen, Agnar. Langlo, Jan Alexander. (2014) Praktisk Prosjektledelse. Fagbokforlaget, Oslo, 420 sider
- [21] Hunt, D. V.: Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development (Executive Breakthrough Series), Wight (Oliver) Publications Inc., Sacramento, California, USA, 1993, 256 s.
- [22] Magrab, Edward B: Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process, Second Edition (Environmental & Energy Engineering), 2nd Edition, CRC Press, New York, USA, 2009, 304 s.
- [23] Eversheim, W.: Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning (RWTH-edition), 1st edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Tyskland, 2009, 444 s.

- [25] Serrat, Olivier (2017). The SCAMPER technique. Chicago School of professional psychology
- [26] Baxter, M: Product Design (Design Toolkits), 2nd Reprint, CRC Press, (1995)/ Nelson Thorne Ltd, Cheltenham, United Kingdom, 2001, 308 s.
- [27] Shrivastava, Praveen (2016), House of Quality: An Effective Approach to Achieve Customer Satisfaction & Business Growth in Industries. International Journal of science and research
- [28] Dieter, G. E., Schmidt, L.: Engineering design, Fifth Edition, McGraw-Hill International Edition, New York, USA 2013, 825 s. + vedlegg.
- [30] Varian, Hal R. (2014). Intermediat microeconomics (Ninth edition) W. W. Norton & Company, New York. 758 Sider.
- [31] Cowell, Frank. (2005) Microeconomics principles and analysis. Oxford university press, United Kingdom, 628 sider
- [32] Løvås, Gunnar. G. Statistikk for universitet og høyskoler (2013) Universitetsforlaget, Oslo, 542 sider
- [34] Raschka, Sebastian. Mirjalili, Vahid. (2019) Python machine learning (Third edition) Packt, Birmingham, Mumbai. 741 sider.
- [35] Johansen, Henning (2010) Mekaniske egenskaper og testing av dem. HIG, Gjøvik. 134 sider
- [36] William D. Callister, JR. David G. Rethwisch . (2015) Material Science and engineering (Ninth edition). John Wilet & Sons, Singapor 905 sider
- [40] Bassi, A.C. Casa, F. Mendichi, R. (1987). Shore A hardness and thickness. Polymer Testing
- [41] Surange, Vinod G. Gharat, Punit (2016) Printing process using fused deposition modelling (FDM).
- [42] Mostafaei, Amir. Elliott, Amy M. Barnes, John E. Li, Fangzhou. Tan Wenda. Cramer, Corson L. Nandwana, Peeyush. Chimielus, Markus. (2020) Binder Jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges

- [43] Mekonnen, B.G., Bright, G., Walker, A. (2016). A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM). In: Mandal, D.K., Syan, C.S. (eds) CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, New Delhi.
- [44] Feygin, Michael. Hsieh, Brian. (1991) Laminated object manufacturing (LOM): A simpler process. The university of Texas , USA, Austin. Sider 123-130
- [45] Dermeik, B. and Travitzky, N. (2020), Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Adv. Eng. Mater.*, 22: 2000256
- [46] Schmidleithner, Christina. Kalaskar, Deepak M. (2018) Stereolithography
- [47] Tee, Yun Lu. Peng, Chenxi. Pille, Philip. Leary, Martin. Tran, Phuong (2020) Polyjet 3d printing of composite materials: Experimental and modelling approach. APICAM 2019.
- [52] Bremen, Sebastian. Meiners, Wilhelm. Diatlov, Andrei (2012) Selectiv laser melting a manufacturing technology of the future?. Rapid manufacturing. GmbH & co. KGaA Weinheim
- [53] Pattanayak, Deepak K. Fukuda, A. Matsushita, T. Takemoto, M. Fujibayashi, S. Sasaki, K. Nishida, N. Nakamura, T. Kukubo, T. (2010) Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: Fabrication by selective laser melting and chemical treatments. Sagawa printing co. Ltd., Kyoto, Japan
- [54] Zhang, Jinliang, Song, Bo. Wei, Qingsong, Bourell, Dave. Shi, Yusheng (2018). A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends.
- [55] Zäh, M.F., Lutzmann, S. Modelling and simulation of electron beam melting. *Prod. Eng. Res. Devel.* 4, 15–23 (2010).
- [56] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines. *Materials (Basel, Switzerland)*, 10(6), 672.
- [58] Zhang, Kai. Liu, Weijun, Shang, Xiaofeng (2005). Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping
- [59] Quaresma Ramalho, Francisco Miguel & Alves, Maria & Correia, Mário & Vilhena, Luís & Ramalho, Amílcar. (2020). Study of Laser Metal Deposition (LMD) as a Manufacturing Technique in Automotive Industry.

- [60] i Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, Pablo D. Zavattieri,(2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,
- [61] M Bhuvanesh Kumar, P Sathiya, (2020) Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges,
- [62] Sadettin C. Altıparmak, Victoria A. Yardley, Zhusheng Shi, Jianguo Lin, (2021). Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing,
- [63] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui, (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,
- [64] Wei Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, Pablo D. Zavattieri,(2015).The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,
- [65] Haghdad, N., Laleh, M., Moyle, M. et al. (2021). Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. *J Mater Sci* 56, 64–107
- [70] Produktansvarsloven. 1988. Lov om produktansvar av 01.01.1989
- [71] Kalina, Tomáš. (2020). Determination of mechanical properties of materials used for 3D printing. *Manufacturing Technology*.
- [76] Erfan Maleki, Sara Bagherifard, Michele Bandini, Mario Guagliano, (2021). Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities,
- [78] Berg, Terje. (2021) Grunnleggende økonomistyring. (2. Utgave) Cappelen Damm akademiske. Oslo. 477 sider
- [79] Berk, Jonathan. DeMarzo, Peter. (2017) Corporate Finance (Fourth edition) Pearson education limited. Essex. 1167 sider.
- [81] Weiwei Cui, Yiran Yang, Lei Di, Fadwa Dababneh, (2021). Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure,



- [82] Yao Li, Guozhu Jia, Yang Cheng & Yuchen Hu (2017) Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study, *International Journal of Production Research*, 55:5, 1498-1515
- [83] Adindu Emelogu, Mohammad Marufuzzaman, Scott M. Thompson, Nima Shamsaei, Linkan Bian, (2015). Additive manufacturing of biomedical implants: A feasibility assessment via supply-chain cost analysis,
- [84] Peng Liu, Samuel H. Huang, Abhiram Mokasdar, Heng Zhou & Liang Hou (2014) The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis, *Production Planning & Control*, 25:13-14, 1169-1181
- [85] Killi, Steinar & Kempton, William & Morrison, Andrew. (2015). Design issues and orientations in additive manufacturing. *International Journal of Rapid Manufacturing*. 5. 289.
- [86] Simon Ford, Mélanie Despeisse, (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges,
- [87] Karel Kellens, Raya Mertens, Dimos Paraskevas, Wim Dewulf, Joost R. Duflou, (2017). Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?,
- [88] Walter, A., & Marcham, C. (2020). Environmental Advantages in Additive Manufacturing. *Professional Safety/ASSP*, 65(01).
- [89] Khalid, Marwan & Peng, Qingjin. (2020). Sustainability and Environmental Impact of Additive Manufacturing: A Literature Review. 328-332.
- [90] Mohd Shuaib, Abid Haleem, Sanjay Kumar, Mohd Javaid, (2021). Impact of 3D Printing on the environment: A literature-based study,
- [91] Malte Gebler, Anton J.M. Schoot Uiterkamp, Cindy Visser, (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies,
- [92] Vislie, Jon. Christiansen, Vidar. Holtsmark, Katinka & Strøm, Steinar. (2015). Effektivitet, fordeling og økonomisk politikk (2. utgave) Universitetsforlaget, Oslo 378 sider.
- [93] Mankiw, N, Gregory. Taylor, Mark P. (2014) *Microeconomics*. Cengage Learning EMEA, Hampshire United Kingdom. 447 sider

- [94] Rich, Nathaniel. The lawyer who became DuPont's worst nightmare. The New York times magazine (2016).
- [95] Yee, Maxine S.-L., Ling-Wei Hii, Chin K. Looi, Wei-Meng Lim, Shew-Fung Wong, Yih-Yih Kok, Boon-Keat Tan, Chiew-Yen Wong, and Chee-Onn Leong. 2021. "Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health" *Nanomaterials* 11, no. 2: 496.
- [96] Guessasma S, Zhang W, Zhu J, Belhabib S & Nouri H (2015) : Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective. *Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim.*
- [97] Wei Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, Pablo D. Zavattieri, (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,
- [98] Saraçyakupoğlu, Tamer. (2019). The Additive Manufacturing Technologies in the Aviation Industry with the Perspective of Weight Reduction.
- [99] Saraçyakupoğlu, Tamer. (2021). Usage of Additive Manufacturing and Topology Optimization Process for Weight Reduction Studies in the Aviation Industry. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 6. 815-820.
- [100] Gausemeier, Jürgen & Schmidt, Michael & Anderl, Reiner & Schmid, Hans-Joachim & Leyens, Christoph & Seliger, Günter & Winzer, Petra & Kohlhuber, Martina & Kage, Martin & Karg, Michael. (2017). Additive Manufacturing.

## 17.2. Personlige referanser

- [5] Førsteamanuensis Jan Kåre Bøe, Realtek NMBU
- [16] Senioringeniør Øyvind Hansen, Prototypeverkstedet til NMBU
- [66] Senioringeniør Henrik Folke Holmberg. Realtek NMBU
- [67] Siviløkonom Dane Cekov, Analytiker i nordea markeds, og tidligere Norges bank, M. Sc i finans fra BI Business school.
- [68] Siviløkonom Sigurd Berstad. Pricing and profitability controller. Santander, MBA fra NHH
- [69] Advokatfullmektig Svein gjørtz, Lund & co. Jussgrad fra UiB

### 17.3. Nettkilder

- [1] Braathen, Frøydis. Ditt neste hus kan bli 3D-printet. Aftenposten. 2016
- [2] González, Carlos M. Infographic: The history of 3D printing. The American society of mechanical engineering (ASME). 2020
- [3] Olsen, Claude. Kreativ produktutvikling. Teknisk ukeblad. 2003.
- [4] Sundlisæter, Tale. NTNU har en av verdens mest avanserte 3D-printere. Teknisk ukeblad 2013.
- [6] Norsk Titanium. [Internett]. [oppdatert 2022; Hentet 10. Mai 2022]
- [7] Tronrud Engineering. [Internett]. [oppdatert 2022; Hentet 10. Mai 2022]
- [8] Protolab [internett]. [oppdatert 2021; Hentet 10.Mai 2022]
- [9] Protolabs Manufacturing Accelerated. [internett]. [oppdatert 2022; Hentet 10.Mai 2022]
- [10] Hellios [internett]. [oppdatert 2022; Hentet 10.Mai 2022] Hentet fra:
- [24] Simple PDH [internett]. (Oppdatert 07.05-15; Hentet 12 Mai 2022) Principles of integrated product development.
- [29] Battles, Christofer [internett]. (Oppdatert 23.04-2010; Hentet 12 Mai 2022) Full\_HOQ\_0.9.
- [33] Glen, Stephanie [internett]. (Oppdatert 11.05-2016; Hentet 12 Mai 2022) IID Statistics: Independent and identically distributed definition and examples.
- [37] Lohne, Otto [internett]. (Oppdatert 16.06-2020; Hentet 12 mai 2022) SNL: Flytegrense:
- [38] Thaulow, Christian [internett]. (Oppdatert 11.09-2019; Hentet 12. mai 2022) Bruddfasthet (mekanikk)
- [39] Emco test [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) Other test procedures: Shore test.
- [48] EOS [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) Selective laser sintering. What is SLS?

- [49] 3D printerly [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) how long does a 3D printer last? Creality ender 3 & others.
- [50] Marlin steel [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Sintering vs melting: what's the difference?
- [51] Kolbeinsen, Leiv [internett]. (Oppdatert 2019, Hentet 12. Mai 2022) SNL: Sintring.
- [57] Trumpf [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Laser Metal deposition (LMD)
- [72] Matplotlib [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Matplotlib: Visualization with python.
- [73] Seaborn [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Seaborn: Statistical data visualization.
- [74] S-polytec. [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Technical data sheet PETG sheet (Transparent).
- [75] RS components. [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). Clear plastic sheet
- [77] 3D printerly [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) How long does a 3D printer last? Creality ender 3 & others.
- [80] 3Dinsider. [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022). How much does a 3D printer cost?
- [101] Stratasys [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) FDM 2000/3000/8000
- [102] Prusament [internett]. (Oppdatert 2022; Hentet 12. mai 2022) Technical data sheet prusament PETG.

## 18 VEDLEGG

Vedlegg 1: Jupyter Notebook for analyse av flytegrense

Vedlegg 2: Jupyter Notebook for analyse av hardhet

Vedlegg 3: Detaljtering av NS ISO 527-2:2012 prøvestav

```
In [1]: import math
import statistics
import numpy as np
import scipy.stats
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import stats
```

```
In [2]: liggende = [44.5,
43.4,
46,
42.2,
43.7]

stående = [20.3,
15.4,
18.8,
16.9,
24.1]

horizontal_xy = [48.9,
49.7,
49.6,
38.8,
49]
```

```
In [3]: mean_liggende = statistics.mean(liggende)
mean_stående = statistics.mean(stående)
mean_horizontal_xy = statistics.mean(horizontal_xy)

print(mean_liggende)
print(mean_stående)
print(mean_horizontal_xy)

43.96
19.1
47.2
```

```
In [4]: median_liggende = statistics.median(liggende)
median_stående = statistics.median(stående)
median_horizontal_xy = statistics.median(horizontal_xy)

print("Liggende: ", median_liggende)
print("stående: ", median_stående)
print("Vertikal på XY-planet: ", median_horizontal_xy)

Liggende: 43.7
stående: 18.8
Vertikal på XY-planet: 49
```

```
In [5]: var_liggende = statistics.variance(liggende)
var_stående = statistics.variance(stående)
var_horizontal_xy = statistics.variance(horizontal_xy)

print("Liggende: ", var_liggende)
print("stående: ", var_stående)
print("Vertikal på XY-planet: ", var_horizontal_xy)

Liggende: 1.9829999999999974
stående: 11.265000000000004
Vertikal på XY-planet: 22.175000000000002
```

```
In [6]: print("Liggende: ", var_liggende**0.5)
print("stående: ", var_stående**0.5)
print("Vertikal på XY-planet: ", var_horizontal_xy**0.5)

Liggende: 1.408190328045182
stående: 3.3563372893676826
Vertikal på XY-planet: 4.709033871188444
```

```
In [7]: from scipy.stats import skew
print("Liggende: ", skew(liggende))
print("stående: ", skew(stående))
print("Vertikal på XY-planet: ", skew(horizontal_xy))

Liggende: 0.30050020879650646
stående: 0.4834771678621976
Vertikal på XY-planet: -1.4789030862143155
```

```
In [8]: from scipy.stats import kurtosis
print("Liggende: ", kurtosis(liggende))
print("stående: ", kurtosis(stående))
print("Vertikal på XY-planet: ", kurtosis(horizontal_xy))

Liggende: -0.8461983592762388
stående: -0.9365595096462602
Vertikal på XY-planet: 0.22191354768680815
```

```
In [9]: t_value, p_value = stats.ttest_ind(horizontal_xy, liggende)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))
print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value <= alpha:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '<', 'alpha(=%f)%alpha, 'We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties μ1 = μ2 at %2f level of significance.%alpha)
else:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '>', 'alpha(=%f)%alpha, 'We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties, μ1 ≠ μ2 at %2f level of significance.%alpha)

Test statistic is 1.474007
p-value for two tailed test is 0.178707
Conclusion n Since p-value(=0.178707) > alpha(=0.05) We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties, μ1 ≠ μ2 at 0.05 level of significance.
```

```
In [10]: t_value, p_value = stats.ttest_ind(horizontal_xy, stående)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))
print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value <= alpha:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '<', 'alpha(=%f)%alpha, 'We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties μ1 = μ2 at %2f level of significance.%alpha)
else:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '>', 'alpha(=%f)%alpha, 'We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties, μ1 ≠ μ2 at %2f level of significance.%alpha)

Test statistic is 10.865712
p-value for two tailed test is 0.000005
Conclusion n Since p-value(=0.000005) < alpha(=0.05) We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties μ1 = μ2 at 0.05 level of significance.
```

```
In [11]: t_value, p_value = stats.ttest_ind(stående, liggende)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))
print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value <= alpha:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '<', 'alpha(=%f)%alpha, 'We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties μ1 = μ2 at %2f level of significance.%alpha)
else:

    print('Conclusion', 'n', 'Since p-value(=%f)%p_value, '>', 'alpha(=%f)%alpha, 'We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties, μ1 ≠ μ2 at %2f level of significance.%alpha)

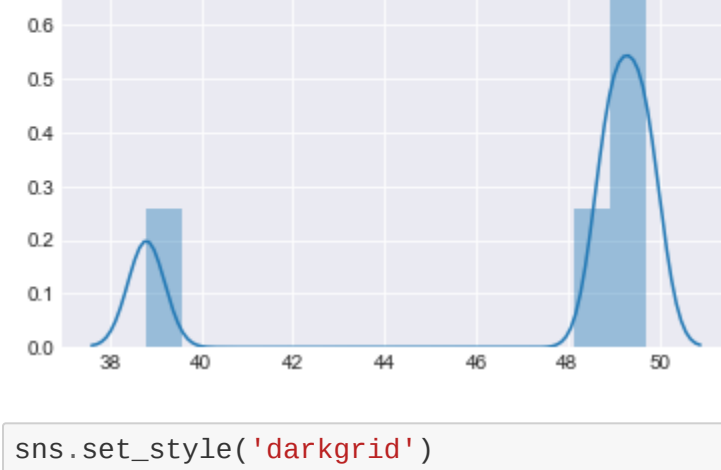
Test statistic is -15.272529
p-value for two tailed test is 0.000000
Conclusion n Since p-value(=0.000000) < alpha(=0.05) We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties μ1 = μ2 at 0.05 level of significance.
```

```
In [12]: # https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/07/t-test-performing-hypothesis-testing-with-python/
```

```
In [13]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(horizontal_xy)

/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```

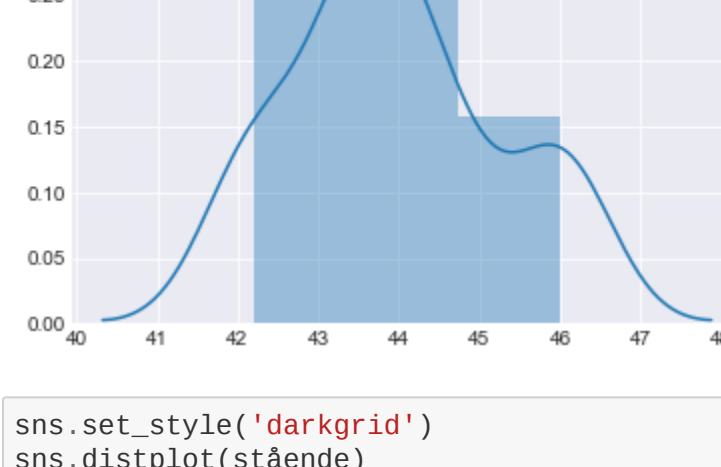
```
Out[13]: <matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7fa07599a128>
```



```
In [14]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(liggende)

/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```

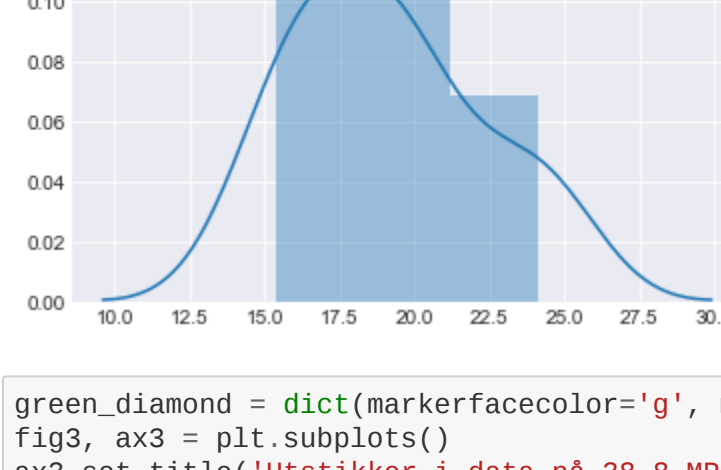
```
Out[14]: <matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7fa075387c50>
```



```
In [15]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(stående)

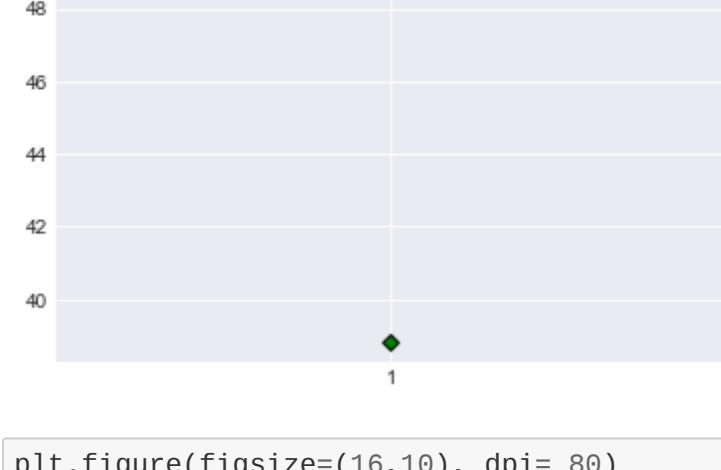
/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```

```
Out[15]: <matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7fa0754b1588>
```



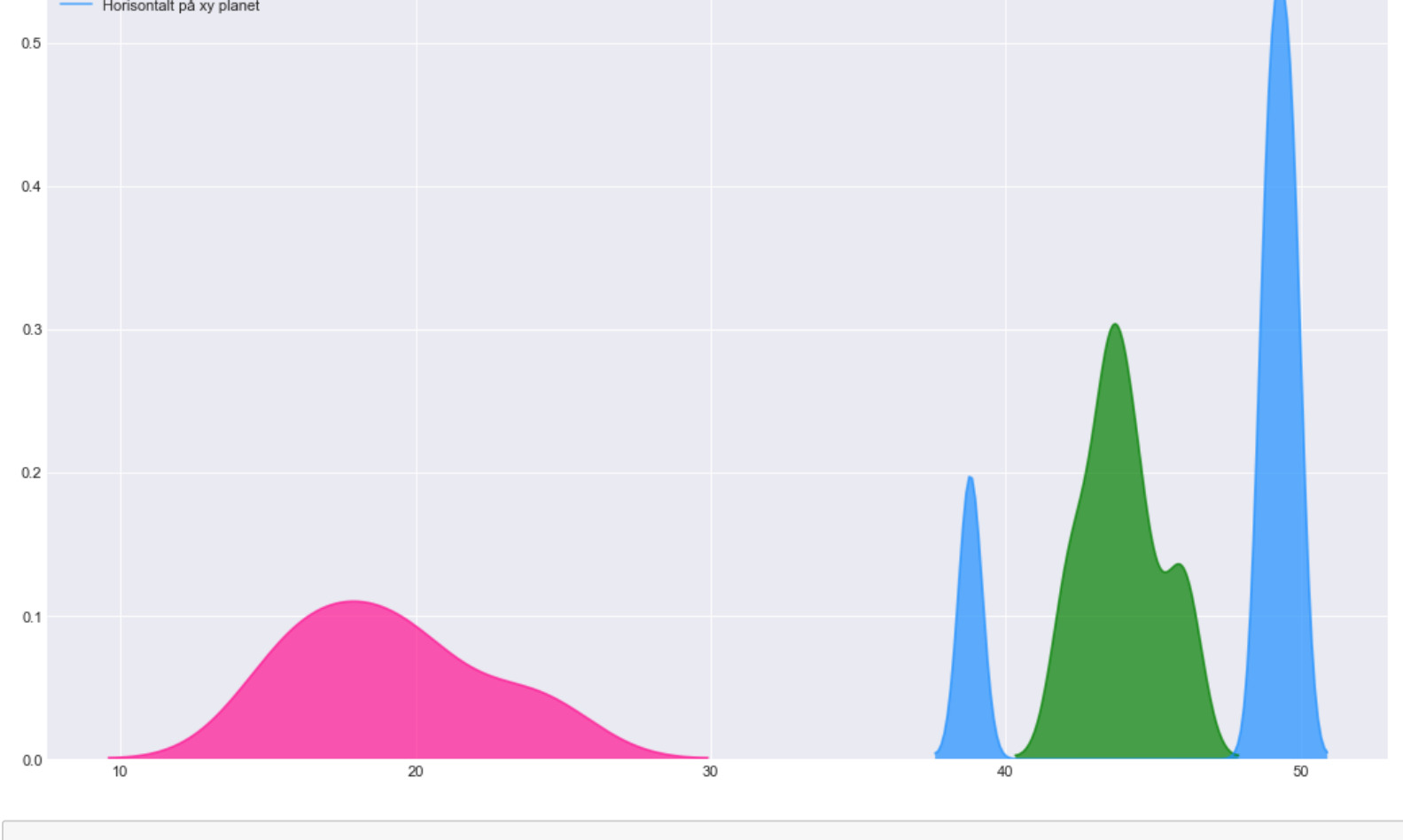
```
In [16]: green_diamond = dict(markerfacecolor='g', marker='D')
fig3, ax3 = plt.subplots()
ax3.set_title('Utstikker i data på 38.8 MPa')
ax3.boxplot(horizontal_xy, flierprops=green_diamond)
```

```
Out[16]: {'whiskers': [
```



```
In [17]: plt.figure(figsize=(16,10), dpi=80)
sns.kdeplot(liggende, shade=True, color="g", label="liggende", alpha=.7)
sns.kdeplot(stående, shade=True, color="deeppink", label="stående", alpha=.7)
sns.kdeplot(horizontal_xy, shade=True, color="dodgerblue", label="Horisontalt på xy planet", alpha=.7)

# Decoration
plt.title('Fordeling av data bassert på orientering under produksjon', fontsize=22)
plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]:
```

```
In [1]: import math
import statistics
import numpy as np
import scipy.stats
import pandas as pd
import seaborn as sns
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
In [2]: # Resultater fra Shore d test

liggende = [69,
            72,
            73,
            71,
            71]

stående = [70,
          71,
          70,
          69,
          73]

horizontal_xy = [61,
                73,
                69,
                65,
                69]
```

```
In [3]: mean_liggende = statistics.mean(liggende)
mean_stående = statistics.mean(stående)
mean_horizontal_xy = statistics.mean(horizontal_xy)

print(mean_liggende)
print(mean_stående)
print(mean_horizontal_xy)

71.2
70.6
67
```

```
In [4]: median_liggende = statistics.median(liggende)
median_stående = statistics.median(stående)
median_horizontal_xy = statistics.median(horizontal_xy)

print(median_liggende)
print(median_stående)
print(median_horizontal_xy)

71
70
69
```

```
In [5]: var_liggende = statistics.variance(liggende)
var_stående = statistics.variance(stående)
var_horizontal_xy = statistics.variance(horizontal_xy)

print(var_liggende)
print(var_stående)
print(var_horizontal_xy)

2.1999999999999997
2.3
16
```

```
In [6]: print(var_liggende**0.5)
print(var_stående**0.5)
print(var_horizontal_xy**0.5)

1.4832396974191324
1.51657508881031
4.0
```

```
In [7]: from scipy.stats import skew
print(skew(liggende))
print(skew(stående))
print(skew(horizontal_xy))

-0.3700366501636253
0.750030204401415
-0.6288941186718158
```

```
In [8]: from scipy.stats import kurtosis
print(kurtosis(liggende))
print(kurtosis(stående))
print(kurtosis(horizontal_xy))

-0.7830578512396653
-0.6361058601134082
-1.0468750000000004
```

```
In [9]: t_value,p_value=stats.ttest_ind(horizontal_xy,liggende)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))

print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value<=alpha:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'<','alpha(=%f)%alpha','We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties  $\mu_1 = \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

else:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'>','alpha(=%f)%alpha','We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

Test statistic is -2.201398
p-value for two tailed test is 0.058865
Conclusion n Since p-value(=0.058865) > alpha(=0.05) We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at 0.05 level of significance.
```

```
In [10]: t_value,p_value=stats.ttest_ind(horizontal_xy, stående)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))

print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value<=alpha:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'<','alpha(=%f)%alpha','We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties  $\mu_1 = \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

else:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'>','alpha(=%f)%alpha','We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

Test statistic is -1.881750
p-value for two tailed test is 0.096645
Conclusion n Since p-value(=0.096645) > alpha(=0.05) We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at 0.05 level of significance.
```

```
In [11]: t_value,p_value=stats.ttest_ind(stående,liggende)

print('Test statistic is %f'%float("%.6f").format(t_value))

print('p-value for two tailed test is %f'%p_value)

alpha = 0.05

if p_value<=alpha:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'<','alpha(=%f)%alpha','We reject the null hypothesis H0. The conclusion is that the orientation during production has a significant impact on the material properties  $\mu_1 = \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

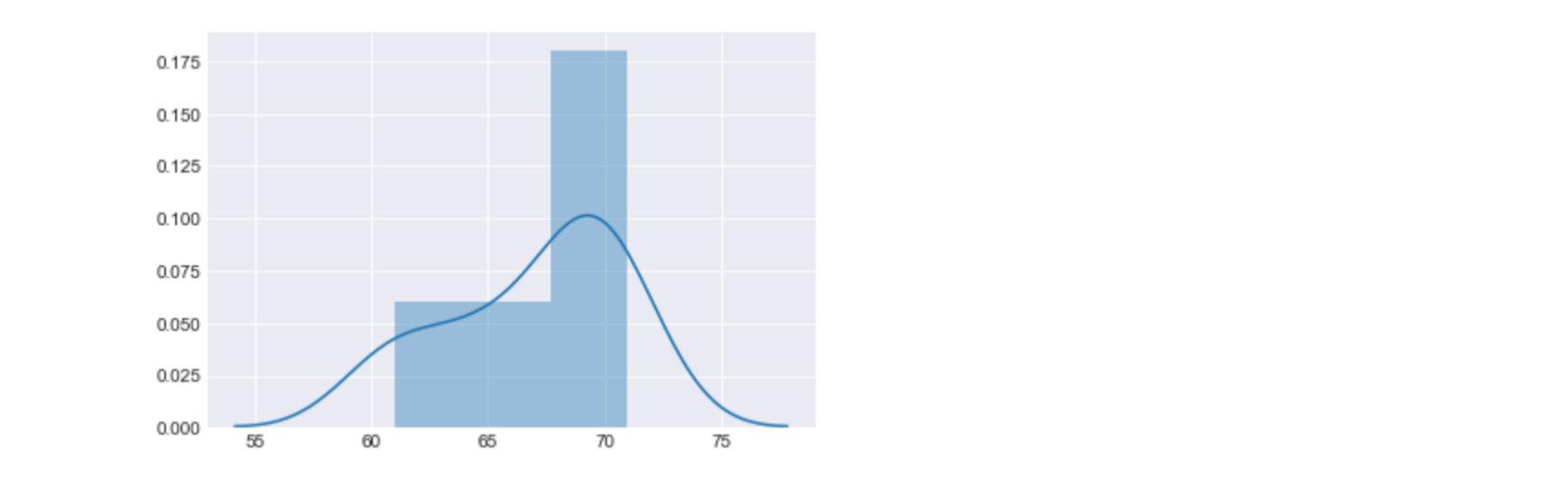
else:

    print('Conclusion','n','Since p-value(=%f)%p_value,'>','alpha(=%f)%alpha','We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at %2f level of significance.'%alpha)

Test statistic is -0.632456
p-value for two tailed test is 0.544737
Conclusion n Since p-value(=0.544737) > alpha(=0.05) We do not reject the null hypothesis H0. So we conclude that the orientation during production does not impact the material properties,  $\mu_1 \neq \mu_2$  at 0.05 level of significance.
```

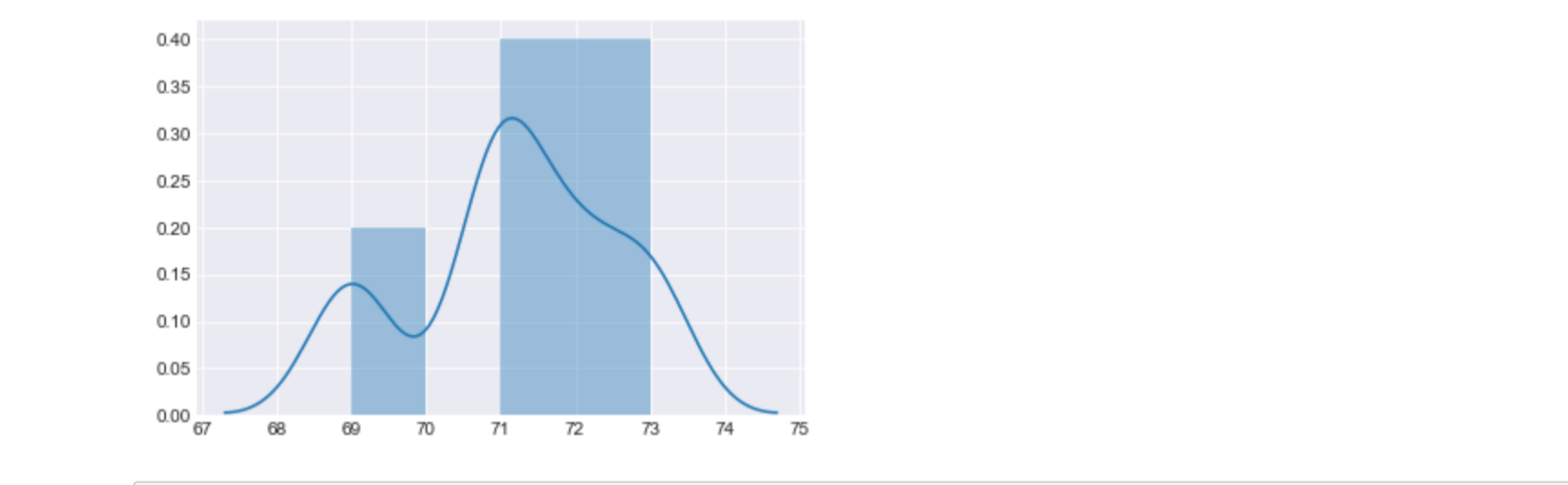
```
In [12]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(horizontal_xy)

/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```



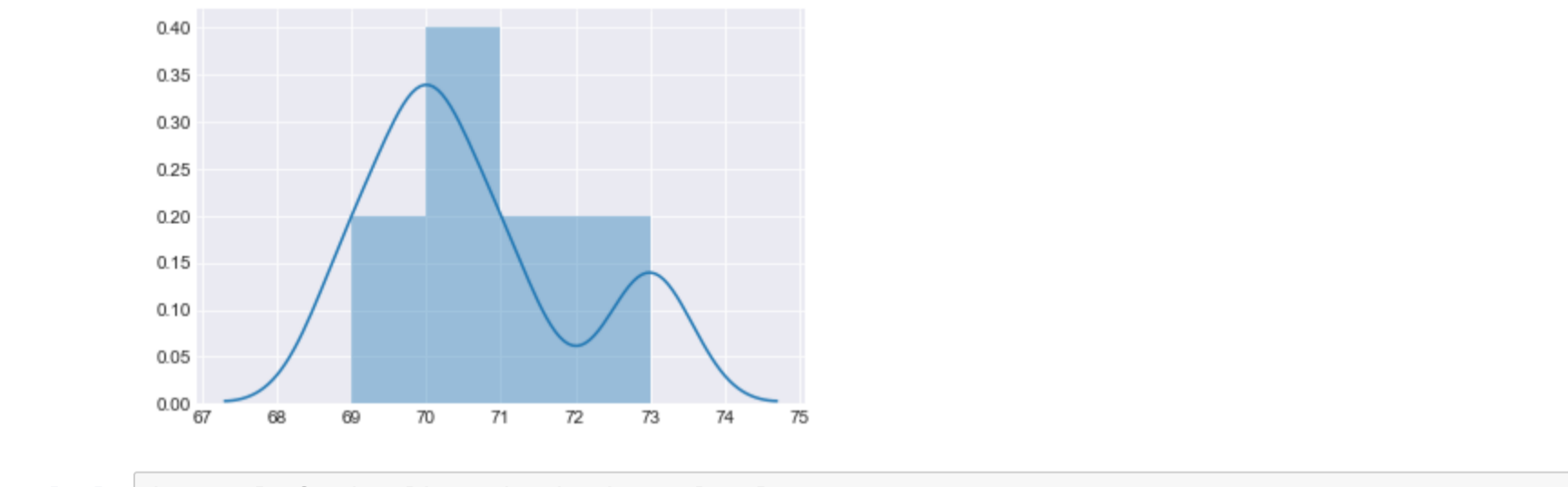
```
In [13]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(liggende)

/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```

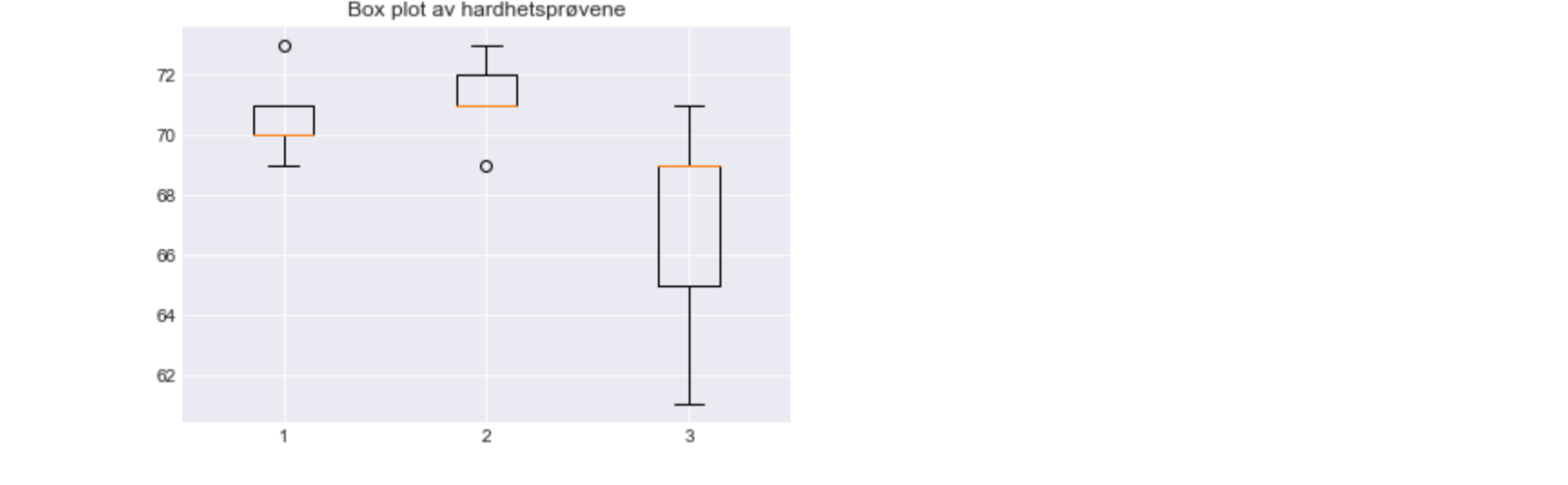


```
In [14]: sns.set_style('darkgrid')
sns.distplot(stående)

/Users/borgehoysaeter/anaconda3/lib/python3.6/site-packages/matplotlib/axes/_axes.py:6462: UserWarning: The 'normed' kwarg is deprecated, and has been replaced by the 'density' kwarg.
warnings.warn("The 'normed' kwarg is deprecated, and has been "
```

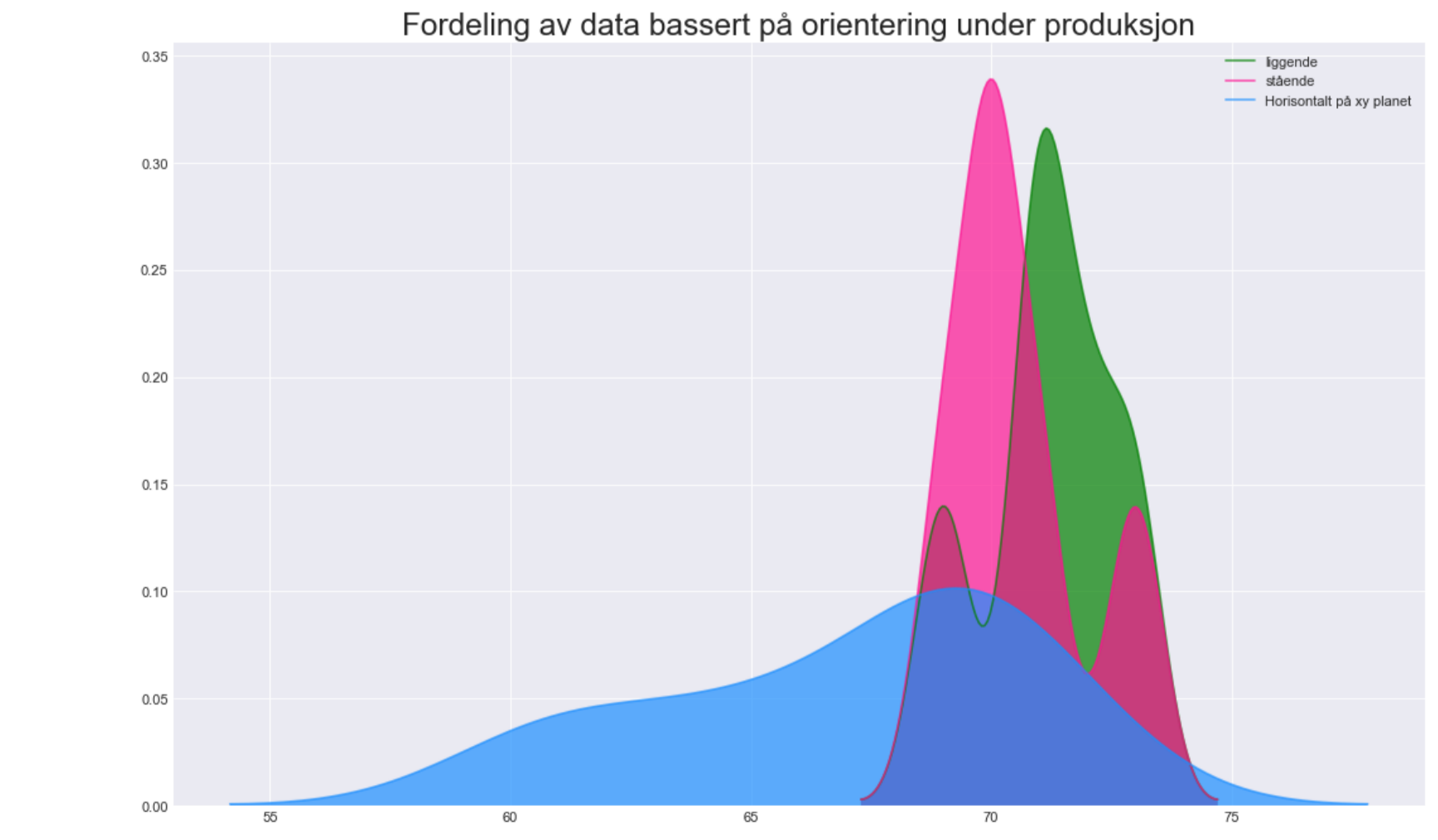


```
In [15]: data = [stående, liggende, horizontal_xy]
fig, ax7 = plt.subplots()
ax7.set_title('Box plot av hardhetsprøvene')
ax7.boxplot(data)
plt.show()
```



```
In [16]: plt.figure(figsize=(16,10), dpi= 80)
sns.kdeplot(liggende, shade=True, color="g", label= "liggende", alpha=.7)
sns.kdeplot(stående, shade=True, color="deeppink", label="stående", alpha=.7)
sns.kdeplot(horizontal_xy, shade=True, color="dodgerblue", label="Horizontalt på xy planet", alpha=.7)

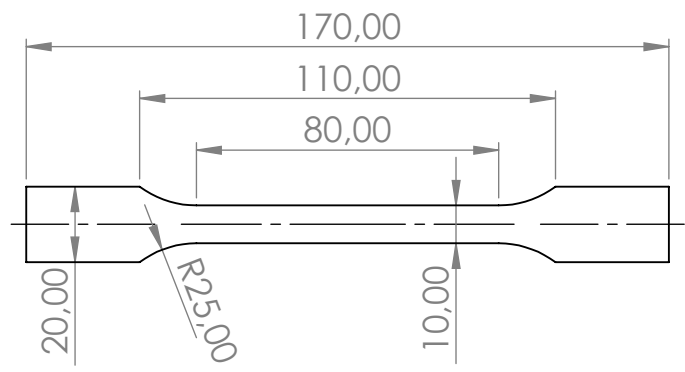
# Decoration
plt.title('Fordeling av data bassert på orientering under produksjon', fontsize=22)
plt.legend()
plt.show()
```



4 3 2 1

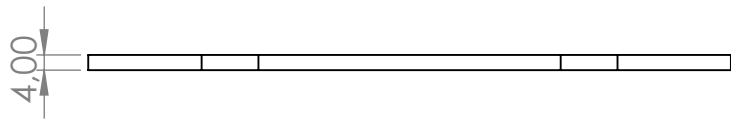
F

F



E

E



D

D

C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NMBU

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	B.F.H		22.3-22
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	ISO 527-2/1A
DWG NO.	
MATERIAL:	PETG
WEIGHT:	
SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

A

A

4 3 2 1





Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet