

# Spenninger og deformasjoner i additivt tilvirkede komponenter

**Jan Erik Arendal**

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: januar 2014

Hovedveileder: Knut Sørby, IPK

Medveileder: Klas Boivie, SINTEF Raufoss Manufacturing

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk



**MASTEROPPGAVE**  
**Høst 2013**  
**for stud.techn. Jan Erik Arendal**

**Spenninger og deformasjoner i additivt tilvirkede komponenter**  
**Stress and deformations in additive manufacturing components**

Ved bygging av metallkomponenter ved hjelp av additiv tilvirkning kan det oppstå indre spenninger i materialet, spesielt i en hybrid prosess i overgangen mellom den maskinerte basedelen og den additivt byggede delen. Spenningene kan gi deformasjoner, og det kan oppstå sprekker som gir redusert motstand mot utmatting. Ved utvikling av den hybride cellen ved NTNU/SINTEF har man av materialtekniske og prismessige årsaker valgt å fokusere på ståltypen MARLOK C1650, både som pulver og som materiale til basedelen. Dette materialet har tidligere vært lite benyttet i additiv tilvirkning, og det er ønskelig å skaffe mer kunnskap om egenskapene med hensyn til spenninger og deformasjoner. Oppgaven går ut på å studere spenninger i hybrid tilvirkede komponenter og vurdere metoder for å hindre deformasjoner, spesielt for MARLOK C1650. Oppgaven skal omfatte følgende:

- Det skal gjøres et litteraturstudium på spenninger og deformasjoner i additivt/hybrid tilvirkede metallkomponenter.
- Det skal bygges komponenter i IPKs ConceptLaser-maskin, for å studere og kvantifisere deformasjoner og dannelse av sprekker.
- Det skal utvikles en teoretisk metode som estimerer deformasjoner og mulighet for sprekker.
- Det skal foreslås retningslinjer for å redusere indre spenninger ved hybrid tilvirkning.

Oppgaveløsningen skal basere seg på eventuelle standarder og praktiske retningslinjer som foreligger og anbefales. Dette skal skje i nært samarbeid med veiledere og fagansvarlig. For øvrig skal det være et aktivt samspill med veiledere.

Innen tre uker etter at oppgaveteksten er utlevert, skal det leveres en forstudierapport som skal inneholde følgende:

- En analyse av oppgavens problemstillinger.
- En beskrivelse av de arbeidsoppgaver som skal gjennomføres for løsning av oppgaven. Denne beskrivelsen skal munne ut i en klar definisjon av arbeidsoppgavenes innhold og omfang.

- En tidsplan for fremdriften av prosjektet. Planen skal utformes som et Gantt-skjema med angivelse av de enkelte arbeidsoppgavenes terminer, samt med angivelse av milepæler i arbeidet.

Forstudierapporten er en del av oppgavebesvarelsen og skal innarbeides i denne. Det samme skal senere fremdrifts- og avviksrapporter. Ved bedømmelsen av arbeidet legges det vekt på at gjennomføringen er godt dokumentert.

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

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare eller fysisk utstyr er en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen.

Eventuelle reiseutgifter, kopierings- og telefonutgifter må bære av studenten selv med mindre andre avtaler foreligger.

Hvis kandidaten under arbeidet med oppgaven støter på vanskeligheter, som ikke var forutsett ved oppgavens utforming og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette straks tas opp med instituttet.

**Oppgaveteksten skal vedlegges besvarelsen og plasseres umiddelbart etter tittelsiden.**

Innleveringsfrist: 12. januar 2014.

Besvarelsen skal innleveres i 1 elektronisk eksemplar (pdf-format) og 2 eksemplar (innbundet).



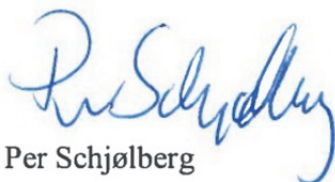
Ansvarlig faglærer/veileder:

Knut Sørby  
Telefon: 73 59 03 74  
Mobiltelefon: 918 97 328  
E-post: knut.sorby@ntnu.no

Veileder ved SINTEF Raufoss Manufacturing:

Klas Boivie  
Telefon: 73 59 29 05  
Mobiltelefon: 473 41 399  
E-post: klas.boivie@sintef.no

**INSTITUTT FOR PRODUKSJONS-  
OG KVALITETSTEKNIKK**



Per Schjølberg  
førstemanuensis/instituttleder

---



Knut Sørby  
faglærer

# Forord

Denne rapporten er en del av masteroppgaven ved Institutt for Produksjon og Kvalitetsteknikk i masterstudieprogrammet Produktutvikling og Produksjon, Fakultet for Ingeniørvitenskap og Teknologi, NTN. Veileder og ansvarlig faglærer for oppgaven er professor Knut Sørby. Medveileder er seniorforsker Klas Boivie ved SINTEF Raufoss Manufacturing. Oppgaven har blitt gjennomført i tidsrommet mellom 19. august 2013 og 12. januar 2014.

Arbeidet med oppgaven har vært spennende og lærerikt. I tillegg har det økt min interesse og fasinasjon for additiv tilvirkning og hvilke muligheter som ligger i denne teknologien.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Knut Sørby og medveileder Klas Boive for god oppfølging og konstruktiv tilbakemelding gjennom hele oppgavens varighet. En stor takk går også til Xiaobo Ren ved SINTEF Materialer og kjemi, for hjelp med simuleringsprogrammet Abaqus. Jeg vil også takke Vegard Brøtan for hans innspill og hjelp med M2-maskinen.

## Sammendrag

Additiv lagvis tilvirkning (ALM) har etablert seg og revolusjonert produktutvikling og produksjonsteknologier i dagens industri. ALM kan i dag brukes til å lage fullverdige ferdige komponenter. Oppgaven ser på ALM der man bygger komponenter opp fra metallpulver ved bruk av lasersmelting. Dette er en svært kompleks prosess med mange parametere som blant annet varmeoverføring, masseflyt og kjemiske reaksjoner. Lasersmeltingen og påfølgende lag med pulver bygges opp i et relativt høyt tempo der smelting, størkning og krymping skjer i løpet av kort tid. Det vil derfor oppstå spenninger i komponentene. Disse spenningene kan igjen føre til deformasjoner og sprekkdannelser som påvirker den pågående byggingen av komponenten. Det er derfor ønskelig å redusere de indre spenningene som oppstår i denne prosessen mest mulig.

Oppgaven har laget en finite element modell med formål å undersøke hvordan restspenninger kan være med på å deformere komponenter som bygges additivt. Programvaren ABAQUS med tilleggspakken Abaqus Welding Interface ble benyttet for å generere og kjøre en koplet varmesimulering med mekanisk simulering. Lagvis deponering av pulver over tid og smelting av dette ble simulert ved hjelp av “element birth and death”-teknikken. Oppgaven studerte spesifikt materialet MARLOK C1650. Dette materialet ble benyttet i simuleringene og ved produksjon av komponenter for eksperimentelle undersøkelser.

Komponenter ble produsert ved hybrid tilvirkning ved bruk av konvensjonell fresing og den additive tilvirkningsteknologien LaserCUSING. Geometrien på komponentene ble valgt slik at deformasjoner ble provosert frem. Etter produksjon av komponentene ble de nøye målt og analysert for kvantifisering av deformasjoner. Det ble verifisert at alle delene var deformerte og at deformasjonene ble tydeligere med økende additivt påbygg. Hardhetsmålinger på det additive påbygget viste at hardheten på smeltet pulver ligger mellom 25 – 26 HRC.

Gjennom litteraturstudiet ble det presentert generiske metoder for å redusere de indre spenningene som måtte oppstå ved additiv tilvirkning. Metoder som forvarming og forskjellige skanneteknikker er blant de viktigste funnene.

## Abstract

Additive layered manufacturing (ALM) has established itself and revolutionized product development and manufacturing technologies in today's industry. ALM can now be used to directly create finished parts from metal powder. The thesis examines ALM where building of parts is done by melting metal powder using a laser. This is a very complex process with many parameters including heat transfer, mass flow and chemical reactions. Laser fusion of powder layers build up in a relatively fast pace where melting, solidification and shrinkage occurs in a short time creates internal stresses. These stresses can lead to deformation and cracks which affect the ongoing construction of the component. It is therefore desirable to reduce the internal stresses arising in the process as much as possible.

The thesis has developed a finite element model with the aim to investigate how residual stresses can deform components built additively. The software ABAQUS with the add-on Abaqus Welding Interface is used to generate and execute a coupled thermal-structural simulation. Layered deposition of powder over time and melting of this was simulated using “element birth and death” technique. The thesis studied the specific material MARLOK C1650. This material was used in the simulations and the production of components for experimental investigations. Components have been produced by hybrid production using conventional milling and the additive manufacturing technology LaserCUSING.

Components were produced by hybrid production using conventional milling and the additive manufacturing technology LaserCUSING. The geometry of the components was chosen to provoke deformations. After production of the components they were carefully measured and analysed to quantify deformations. It was verified that all of the parts were deformed and that the deformation was more pronounced with increasing additive layers. Hardness measurements on the additive layers showed that the hardness of the melted powder is between 25 to 26 HRC.

Through the literature study a generic methods to reduce the internal tensions that arise by additive manufacturing is presented. Preheating and different scanning techniques are among the most important methods for reducing residual stresses.

# Innhold

Forord .....	iv
Sammendrag.....	v
Abstract.....	vi
Innhold .....	vii
Figurliste .....	x
Tabellfortegnelse .....	xii
Forkortelser.....	xiii
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemformulering.....	1
1.3 Formål med oppgaven .....	1
2 Litteraturstudium og bakgrunnsteori .....	2
2.1 Introduksjon.....	2
2.2 Additiv lagvis tilvirkning.....	2
2.3 ALM-systemer.....	2
2.3.1 Væskebaserte systemer.....	2
2.3.2 Solid materialbaserte systemer.....	2
2.3.3 Pulverbaserte systemer.....	3
2.4 Lasersmelting av metallpulver.....	3
2.4.1 Laserbasert ALM med metallpulver.....	5
2.4.2 Hybrid produksjon med ALM.....	6
2.5 Restspenninger .....	7
2.5.1 Temperaturgradientmekanismen.....	8
2.6 Måleteknikker for restspenninger.....	8
2.6.1 Hullboring og ringkjerneboring.....	9
2.6.2 Dyphulls boring .....	10
2.6.3 “The Slitting Method” .....	11
2.6.4 “The Countour Method”.....	12
2.6.5 Røntgendiffraksjon.....	13
2.6.6 Andre diffraksjonsmetoder .....	14

2.6.7	Magnetiske metoder .....	14
2.6.8	Optiske metoder .....	14
2.7	Termodynamikk .....	15
2.8	Geometriske faktorer .....	15
3	Materialegenskaper .....	17
3.1	Introduksjon .....	17
3.2	MARLOK C1650 .....	17
4	Utvikling av numerisk modell .....	19
4.1	Introduksjon .....	19
4.2	Teoretisk modellering .....	19
4.2.1	Modellering av SLM .....	19
4.3	Simuleringer .....	21
4.4	Undersøkelser ved bruk av Abaqus .....	22
4.4.1	Element Birth and Death Technique .....	23
4.4.2	Design av del .....	23
4.4.3	Materialparametre .....	25
4.4.4	Mesh .....	27
4.4.5	Simuleringsparametere .....	28
4.4.6	Analysen .....	30
4.5	Eksperimentell simulering ved bruk av Abaqus .....	30
4.5.1	Varmeoverføringsanalysen .....	30
4.5.2	Koplet spenningsanalyse .....	31
5	Eksperimentelle undersøkelser .....	33
5.1	Introduksjon .....	33
5.2	Produksjon av komponenter .....	33
5.3	Målinger .....	35
5.4	Resultater fra produserte prøver .....	36
6	Diskusjon .....	41
6.1	Videre arbeid .....	41
7	Oppsummering .....	42
7.1	Konklusjon .....	42
8	Referanser .....	43
9	Appendiks .....	45
	Appendiks A: Målinger .....	45



Appendks B: Matlabscript for tolking og plotting av rå måledata .....	49
Appendks C: Hardhetsmåling .....	50
Appendks D: Tegning av basedel .....	51

## Figurliste

Figur 2.1 - Skjematisk presentasjon av varmeoverføring (I. A. Roberts, Wang, Esterlein, Stanford, & Mynors, 2009).....	5
Figur 2.2 - Typisk SLM-oppsett (Kruth, Mercelis, Vaerenbergh, Froyen, & Rombouts, 2005).....	6
Figur 2.3 - eksempel på hvordan restspenningene fordeler seg og kan eksistere uten en ekstern last (Schajer & Ruud, 2013).....	7
Figur 2.4 - TGM induserer restspenninger (Mercelis & Kruth, 2006).....	8
Figur 2.5 – Målemetoder (Schajer & Ruud, 2013).....	9
Figur 2.6 - Tverrsnitt av hullboring i prøve. (a) Før hullboring og (b) etter hullboring (Schajer & Whitehead, 2013).....	9
Figur 2.7 - Strekkklapper ved (a) hullboring og (b) ringkjerneboring (Schajer & Whitehead, 2013).....	10
Figur 2.8 - Dyphulls boring prosedyre fra start(venstre) til slutt (høyre)(Smith, 2013).....	11
Figur 2.9 - Oppsett for typisk "slitting method"(Hill, 2013).....	12
Figur 2.10 - Skjema av diffraksjonsmetoden for å finne atomavstander i a) upåvirket tilstand og b) under lastpåvirkning (Murray & Cevdet Noyan, 2013).....	13
Figur 2.11 - Prinsippskisse av "kanteffekten"(Craeghs et al., 2011).....	16
Figur 2.12 - Eksempel på kanteffekten(Craeghs et al., 2011).....	16
Figur 4.1 - Forenklet teoretisk modell av SLM (Mercelis & Kruth, 2006).....	19
Figur 4.2 - Mål på designet del før ekstrudering.....	24
Figur 4.3 - Modellen etter ekstrudering og partisjonering.....	24
Figur 4.4 LaserCUSING av prøver. Et ferdig skannet lag på en prøve kan ses nederst til høre. I midten foregår skanningen på en annen del. Legg merke til “øyteteknikken”.....	25
Figur 4.5 - Mesh.....	27
Figur 4.6 Kontroll av mesh.....	27
Figur 4.7 - To blokker på ett skritt som bestråles av laseren.....	28
Figur 4.8 - Grensebetingelser, komponenten låses fast i fire punkter.....	29
Figur 4.9 - Laseroppvarmet område i simuleringen etter 0,3 sekunder.....	30
Figur 4.10 - Første lag (30 µm) fullstendig skannet.....	31
Figur 4.11 - Spenninger i samme område som vist i Figur 4.9 etter 0,35 sekunder.....	31
Figur 4.12 - Trykkfordelingen i prøven etter endt simulering.....	32
Figur 4.13 - Nærbilde av effekter.....	32
Figur 5.1 - Bildet av komponentene etter produksjon. Additivt påbygg fra topp til bunn; 20 mm, 5 mm, og 0,09mm.....	34
Figur 5.2 - Måling av prøver med Leitz PMM-C 600.....	35
Figur 5.3 - Måleprobens bane for målingene av overflaten.....	36
Figur 5.4 - Bilde av produsert komponent med 3 lag med bunnsiden vendt opp.....	36
Figur 5.5 - MATLABplott fra målinger av komponent med 3 lag additivt maskinert.....	37
Figur 5.6 Bilde av produsert komponent med 5 mm additivt påbygg med bunnsiden vendt opp.....	37
Figur 5.7 - MATLABplott fra målinger av del med 5 mm additivt påbygg.....	38
Figur 5.8 - MATLABplott i profil fra målinger av del med 5 mm additivt påbygg.....	38

Figur 5.9 - Bilde av produsert komponent med 20 mm additivt påbygg med bunnsiden vendt opp .....	39
Figur 5.10 - MATLABplott fra målinger av del med 20 mm additivt påbygg.....	39
Figur 5.11 - MATLABplott i profil fra målinger av del med 20 mm additivt påbygg .....	40

# Tabellfortegnelse

Tabell 1 – Klassifisering av lasere ((Das, 1991) .....	4
Tabell 2 - Kjemisk sammensetning av noen verktøystål ("MARLOK® Longer die life -Better quality," 2008) .....	17
Tabell 3 – Temperaturavhengig varmeledningsevne.....	26
Tabell 4 - Materialdata for MARLOK C1650.....	26
Tabell 5 - DIN 1.2709 parametere.....	26
Tabell 6 - Filmkoeffisienter.....	26
Tabell 7 - Parametere til Abaqus .....	26

## Forkortelser

3DP - 3D Printing

ALM - Additive Layer Manufacturing (Additiv lagvis tilvirkning)

AWI - Abaqus Welding Interface

CNC - Computer Numerical Control (Numerisk datastyring av maskiner)

DML - Direct Metal Laser Sintering

EBM - Electron Beam Manufacturing

FDM - Fused Deposition Modelling

FEM - Finite Element Method

FEA - Finite Element Analysis

HAZ - Heat Affected Zone (Varmepåvirket sone)

LOM - Laminated Object Manufacturing

RP - Rapid prototyping

SAPH - Selective Adhesive Hot Passing

SLM - Selective Laser Melting (Selektiv lasersmelting)

SLS - Selective Laser Sintering (Selektiv lasersintring)

TGM - Temperature Gradient Mechanism

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Additiv lagvis tilvirkning (ALM) har etablert seg og revolusjonert produktutvikling og produksjonsteknologier i dagens industri. Det siste tiåret har rapid prototyping (RP) blitt et velkjent begrep innen produktutviklingssyklusen. De første bruksområdene til RP var produksjon av prototyper i plast som hadde meget begrenset bruksområde. I hovedsak ble disse brukt til presentasjoner av kommende produkter. I dag brukes additiv tilvirkning til mye mer enn produksjon av presentasjonsmodeller. ALM kan i dag brukes til å lage fullverdige ferdige deler. Som en del av produktutviklingssyklusen kan en nå få ut fullverdige deler i forskjellige materialer, inkludert metall. Dette kan være til stor hjelp dersom man ønsker å gjøre endringer på et tidlig stadium i utviklingsprosessen, hvor endringer er billigere å foreta.

## 1.2 Problemformulering

Instituttet for Produksjon og Kvalitetsteknikk(IPK) ved Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) har siden 2007 hatt en M2 LaserCUSING maskin. Mye eksperimentering og forskning har vært utført på denne maskinen, men enkelte aspekter av produksjonen i denne maskinen har fremdeles ikke blitt belyst.

Lasersmelting av metallpulver og Selektiv Lasersmelting (SLM) brukes om hverandre og er to begreper som beskriver den samme prosessen. Det er en variant av denne teknologien som benyttes i maskinen ved IPK og som vil bli studert nærmere i denne oppgaven. Teknologien kalles for LaserCUSING og vil bli beskrevet nærmere i kapittel 2.

Prosessen med å bygge deler opp fra metallpulver ved bruk av lasersmelting er en svært kompleks prosess med mange parametere som blant annet varmeoverføring, masseflyt og kjemiske reaksjoner. Lasersmeltingen og påfølgende lag med pulver bygges opp i et relativt høyt tempo der smelting, størkning og krymping skjer i løpet av kort tid. Det vil derfor oppstå spenninger i komponentene. Disse spenningene kan igjen føre til deformasjoner og sprekkdannelser som påvirker den pågående byggingen av komponenten. Det er derfor ønskelig å redusere de indre spenningene som oppstår i denne prosessen mest mulig.

## 1.3 Formål med oppgaven

Denne oppgaven skal utrede hvordan indre spenninger påvirker additivt tilvirkede komponenter i MARLOK C1650. Målet er å utarbeide en teoretisk metode som kan estimere dannelsen av restspenninger i en additivt produsert komponent. Det skal også gjøre et litteraturstudium på indre spenninger i den additive prosessen SLM. Arbeidet skal igjen brukes for å foreslå retningslinjer for å redusere indre spenninger ved hybrid tilvirkning.



## **2 Litteraturstudium og bakgrunnsteori**

### **2.1 Introduksjon**

Dette kapittelet tar for seg det teoretiske grunnlaget for oppgaven. Det vil fokuseres på teori som er relevant for ALM ved hjelp av lasersmelting. Bakgrunnsteori om smelteprosessen av metallpulver, varmeoverføring og spenninger som følge av termiske prosesser blir presentert. Oppgaven gir også en oversikt over andre teknologier for additiv tilvirkning. Kapittelet vil også ta for seg hvordan en kan bruke finite element metoden (FEM) til å forutse spenninger som vil oppstå i additiv produksjon ved SLM.

### **2.2 Additiv lagvis tilvirkning**

Additiv lagvis tilvirkning (ALM) referer til en rekke spesifikke teknologier som bygger prototyper, verktøylaging og komponenter fra tre-dimensjonale CAD-modeller. CAD-modellen oversettes til en lagvis fremstilling for den produksjonstypen som er aktuell. De tredimensjonale modellene produseres ved bruk av væske, pulver eller tynne plater. Dagens teknologiske fremskritt innen laser, optikk og materialteknologi har ført til utvikling av ALM-teknologi som har gjort det mulig å bruke den i stadig flere fagfelt. ALM har fordeler i forhold til konvensjonelle maskineringsmetoder. Deler kan bli maskinert uten hensyn til geometrisk kompleksitet eller krav til komplekst maskinoppsett. Dessuten kan komponenter bli bygget opp av flere forskjellige materialer, kompositter eller bli trindelt på en kontrollert måte slik at ønskede materialegenskaper i komponenten oppnås (Yakovlev, Trunova, Grevey, Pilloz, & Smurov, 2005).

### **2.3 ALM-systemer**

Additiv lagvis maskinerte systemer kan deles inn i tre grupper basert på utgangsmaterialets form i begynnelsen av prosessen. Det vil være enten væskebasert, fast, eller i pulverform.

#### **2.3.1 Væskebaserte systemer**

I væskebaserte ALM-systemer bygges komponentene opp av en fotosensitiv væske eller resin. Materialet størkner når det blir eksponert for tilstrekkelig ultrafiolett lys, vanligvis i form av en laser. Denne ideen ble oppfunnet av Munz på 1950-tallet. Han patenterte en metode for å bygge deler ved fotoemulsjon ved bruk av projisert lys. Selve byggingen gjøres lagvis, der hvert lag skannes av et optisk system. Lagtykkelsen blir kontrollert av en hevemekanisme. De to vanligste væskebaserte systemene er Stereolitografiske Apparaturer (SLA) og Solid Objekt Ultrafiolett Plotter.

#### **2.3.2 Systemer basert på faste materialer**

Dette er systemer basert på lagvis additiv bygging av tredimensjonale geometrier ved å binde sammen solide, eller semi-solide materialer enten ved endring av fase eller andre sammenføyningssteknikker. De vanligste systemene basert på solide materialer er blant annet

Fused Deposition Modelling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), 3D Printing (3DP), Multijet Modelling og Selective Adhesive Hot Passing (SAHP)

### **2.3.3 Pulverbaserte systemer**

Disse systemene er basert på å sammenføre pulverpartikler lag for lag enten ved sintring eller smelting ved bruk av laser. De viktigste pulverbaserte systemene inkluderer Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), LaserCUSING og Electron Beam Manufacturing (EBM). Alle disse systemene har flere fellesnevner og forskjellen mellom teknologiene er små. Samtlige metoder bortsett fra EBM benytter seg av en laser som kilde til å smelte pulver. EBM benytter i stedet en elektronstråle (også kalt katodestråle) til å smelte pulveret. Alle systemene gjør dette lagvis. For hvert lag smeltes pulveret på bestemte områder, slik at ønsket geometri oppnås.

## **2.4 Lasersmelting av metallpulver**

Ordet laser er en forkortelse for Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. I følge (Oakley, 1992) dukket laseren opp første gang i 1960. Den ble demonstrert av Maiman, som baserte seg på en rekke oppdagelser og teknologiske fremskritt gjort kjent tidligere av andre personer. I nyere tid har laserbaserte teknologier utviklet seg til å bli viktige i flere sammenhenger. Industrielle anvendelsesområder som kutting og sveising er dominert av laserbasert teknologi (Schaaf, 2010).

Lasere kan deles inn etter operasjonsmåte: kontinuerlige bølglasere eller pulserende lasere. I kontinuerlige bølglasere er effekten av laseren relativt konstant og varierer ikke særlig over tid. Pulserende lasere vil derimot gi variasjoner og maksimal effekt er styrt av frekvensen som laseren pulserer ved. Pulserende lasere kan igjen deles inn i forskjellige kategorier; etter måten de fungerer på eller fasen til materialet som generere lyset. Eksempler på dette er gasslasere, faststofflasere, kjemiske lasere, excimerlaser eller halvlederlaser.

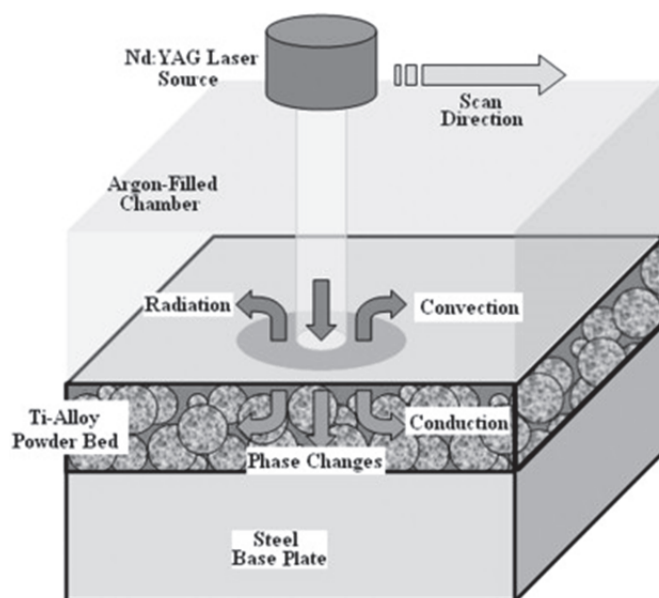
I ALM-systemer er det to typer lasere som i all hovedsak benyttes; Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet laser (Nd:YAG) og CO<sub>2</sub> lasere. En oversikt over gasslasere og andre lasere er gitt i Tabell 1.

Tabell 1 – Klassifisering av lasere ((Das, 1991)

Gas lasers			
Gas used	Wavelength range	Excitation	Comments
He-Ne	3.39 $\mu\text{m}$ 0.6328 $\mu\text{m}$ (0.543 $\mu\text{m}$ ) 1.15 $\mu\text{m}$	Electrical	Pulsed
CO <sub>2</sub>	10.6 $\mu\text{m}$ (9.17–10.91 $\mu\text{m}$ ) 9.6 $\mu\text{m}$	Electrical highest efficiency and power	CW/pulsed
Ar <sup>+</sup>	0.4880 $\mu\text{m}$ 458 514	Electrical	CW
Nitrogen	0.337 $\mu\text{m}$	High power	Pulsed
Far infrared different gases	40 $\mu\text{m}$ –1.2 mm	CO <sub>2</sub> pumped	CW and pulsed
Kr <sup>+</sup>	0.675 $\mu\text{m}$ 0.647 $\mu\text{m}$ 0.58 $\mu\text{m}$	Electrical	
Xe	2.02 $\mu\text{m}$	Electrical	
He-Se	24 visible lines		
He-Cd	0.442 $\mu\text{m}$ 0.325 $\mu\text{m}$	Electrical	CW
Other lasers			
Type	Wavelength range	Excitation	Comments
Ruby	0.7 $\mu\text{m}$	Optical flash lamp	Pulsed
Nd <sup>3+</sup> : YAG	1.06 $\mu\text{m}$ 0.53 (using doubler)	Optical flash lamp	Pulsed and CW
Junction lasers			
GaAs	0.8 $\mu\text{m}$	Electrical	CW/pulsed
InP	0.9 $\mu\text{m}$		
InAs	3.1 $\mu\text{m}$		
GaInAsP	1.5 $\mu\text{m}$		
Organic dye dye solvent	0.217–0.96 $\mu\text{m}$	Optical laser pumped	CW/pulsed shortest width $\sim 10^{-15}$
Excimer laser			
KrF	0.248 $\mu\text{m}$	Electrical/optical	Pulsed
KrCl	0.222 $\mu\text{m}$		
ArF	0.193 $\mu\text{m}$		
XeF	0.351 $\mu\text{m}$		
XeCl	0.308 $\mu\text{m}$		
Ar <sub>2</sub> <sup>*</sup>			
K <sub>2</sub> <sup>*</sup>			
Metal vapor laser gold and copper	0.628 $\mu\text{m}$ UV-IR	Electrical	CW

### 2.4.1 Laserbasert ALM med metallpulver

Laserbaserte ALM-prosesser som bruker metallpulver utnytter den termiske energien fra en laser til både å smelte og sammenføye metallpartikler. Både SLS og SLM har som fellesnevner at materialet som brukes er i pulverform og at størkningsprosessen er en termisk og ikke en kjemisk prosess. En CO<sub>2</sub> eller Nd:YAG-laser som opererer i det infrarøde spekteret varmer opp pulveret. Dette forårsaker lokal sammensmelting som binder de individuelle kornene i pulveret sammen. Laseren skanner overflaten av pulverlaget i en passende fart, slik at pulveret blir varmet opp til ønsket temperatur og ønsket område av pulveret smeltes. Prinsipielt sett kan et hvilket som helst sveisbart metall benyttes i denne teknologien. Forskjellen mellom SLS og SLM består i stor grad av at pulveret som benyttes i SLS er belagt med et bindemateriale som har lavere smeltepunkt enn metallet. Dette bindematerialet smeltes av laseren og gjør at partiklene henger sammen i et porøst mønster, i motsetning til SLM som lager faste deler direkte fra pulverform.

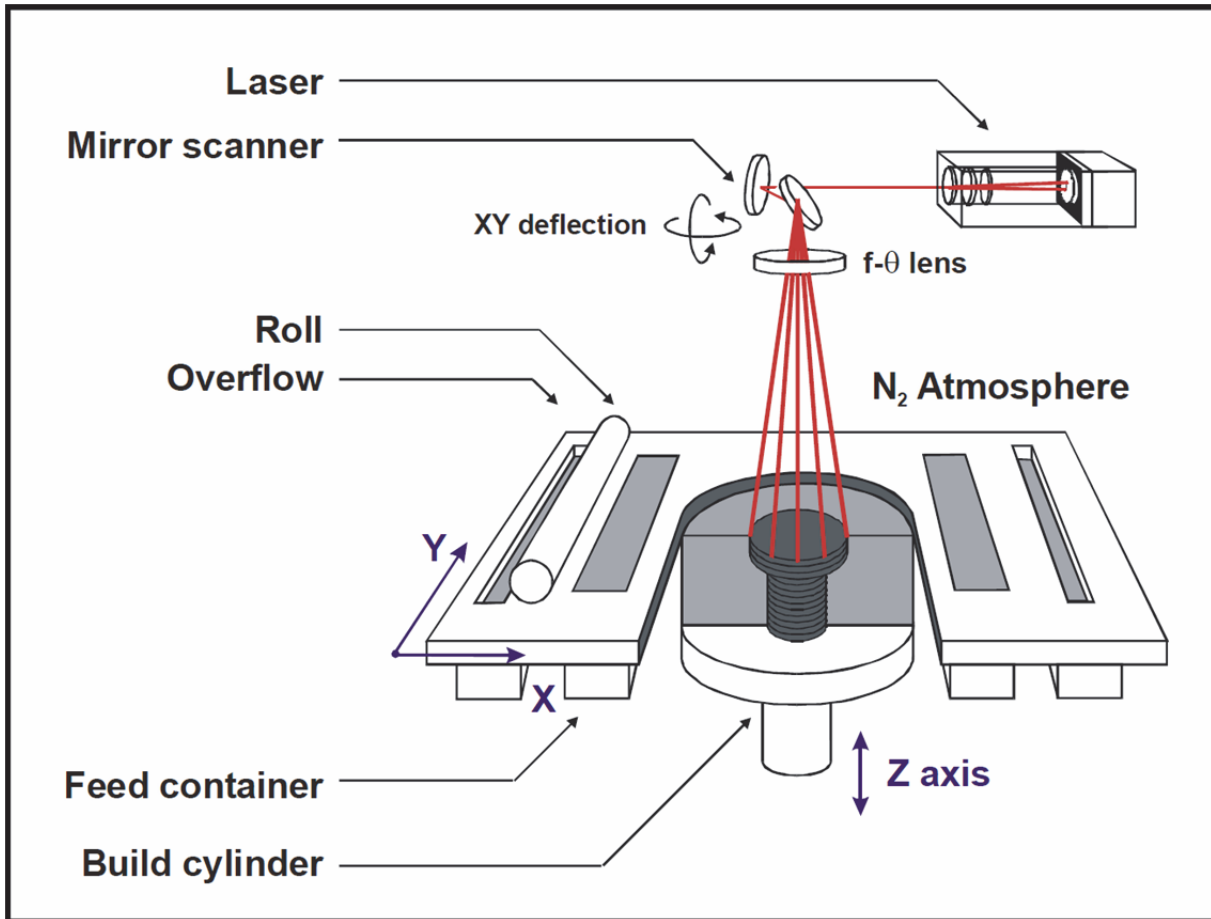


Figur 2.1 - Skjematisk presentasjon av varmeoverføring (I. A. Roberts, Wang, Esterlein, Stanford, & Mynors, 2009)

Ved bruk av SLM og LaserCUSING har en full smelting av metallet, noe som gir tilnærmet full tetthet i metallet etter smelting. Figur 2.1 har en grå ring rundt laseren. Dette kalles for "Heat Affected Zone" eller HAZ. Dette er området rundt det oppvarmede punktet der varmen påvirker materialet. Alle sveisbare materialer er i teorien mulige å bruke i en additiv prosess med metall. Av praktiske årsaker, som for eksempel lukket og avgrenset atmosfære, behandling av materialene og lignende, er det ikke alle materialer som egner seg til ALM. For laserbasert ALM, som for eksempel SLM og SLS, brukes typisk en pulverseng der metallet sammenføres, også kalt "powder bed fusion". Dette er der hvor pulveret deponeres plant utover før laseren skanner over de ønskede områdene som skal smeltes i henhold til geometrien på produktet. SLM, SLS og LaserCUSING er alle teknologier som bruker "powder bed fusion".

Selve deponeringen foregår litt forskjellig alt etter maskin og teknikk som benyttes. En av de mest dominerende metodene som brukes er en rulle som fordeler pulveret jevnt over "pulversengen". En annen teknikk er å bruke en kniv som skyver pulveret ut, som gir samme resultat som rullen. Det benyttes en kniv i M2-maskinene til ConceptLaser.

Den additive prosessen foregår i en lukket og kontrollert atmosfære for å unngå forurensing fra oksygen i metallet som smeltes fra pulverket. Atmosfæren kan og bør endres etter hvilket material som benyttes. Nitrogen benyttes ofte til stållegeringer. Additiv tilvirkning med andre metaller, som for eksempel titan, er det anbefalt å benytte argon for å unngå antenning av pulverket.



Figur 2.2 - Typisk SLM-oppsett (Kruth, Mercelis, Vaerenbergh, Froyen, & Rombouts, 2005)

Når laseren har skannet over pulverket i et bestemt mønster, senkes plattformen med pulverket tilsvarende tykkelsen på ett lag med pulver. Samtidig som plattformen senkes heves karene med pulver slik at rullen kan “dytte” pulverket over til plattformen og fordele et jevnt lag. Overflødig pulver som måtte bli med rullen eller kniven faller ned i et hull i enden av plattformen.

#### 2.4.2 Hybrid produksjon med ALM

Hybrid produksjon betyr at man benytter to produksjonsmetoder for å ferdigstille produktet. Den vanligst hybride produksjonsmetoden for ALM i metall er en kombinasjon av ALM og multiakset fresing.

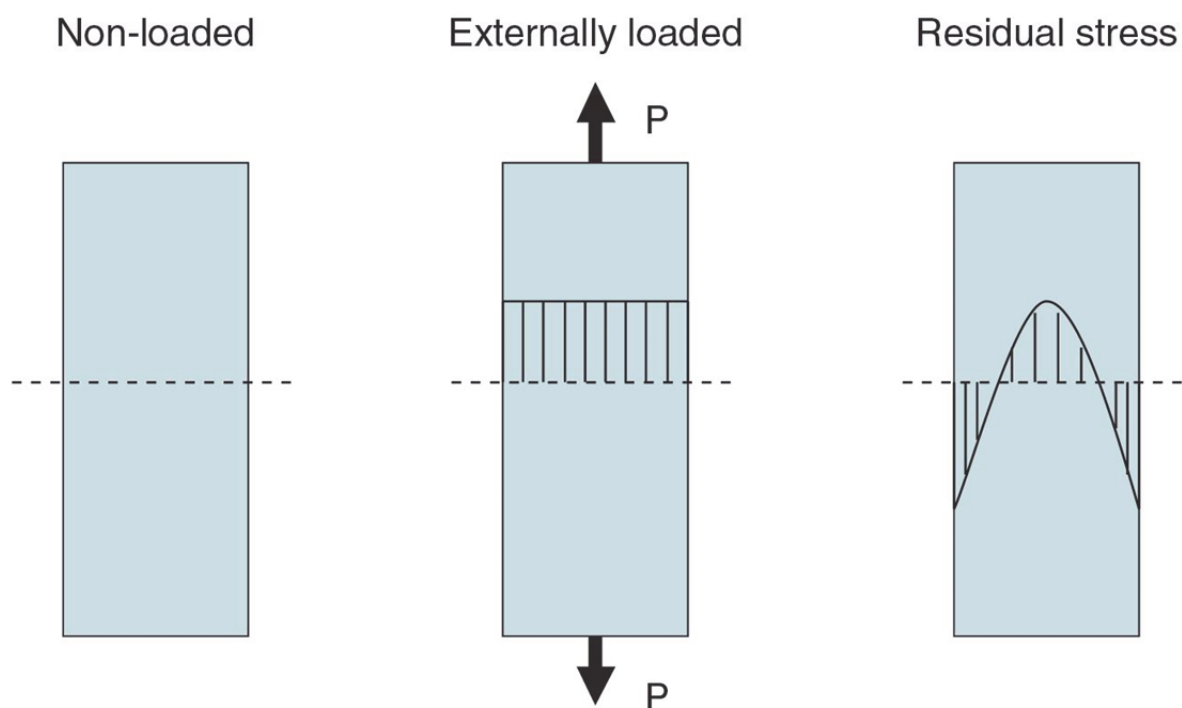
Dette har flere fordeler:

- Fresing er en mye raskere metode enn ALM. Dette betyr at dersom man kan frese deler av produktet før man fortsetter med ALM kan det spares tid. Omstillingstiden fra fresemaskinen til den additive maskinen må også vurderes.

- ALM kan produsere geometrier som ikke er mulig med andre produksjonsteknikker. Ved å la de komplekse geometriene være igjen etter fresing kan man fortsette i den additive maskinen og lage komponenten ferdig slik.
- Fresing er også en mer nøyaktig metode en ALM, og kan dermed brukes som etterbehandling av overflatene etter additiv produksjon.

## 2.5 Restspenninger

Restspenninger er krefter som er «låst inn» i materialet og strukturen, uavhengig av ytre krefter og laster. Summen av spenningene og moment som følge av restspenninger i et materiale er null, dvs at restspenningene opptrer lokalt i materialet de befinner seg i (Schajer & Ruud, 2013). Dette er illustrert i Figur 2.3 hvordan restspenningene fordeler seg og kan eksistere uten en ekstern last.



Figur 2.3 - eksempel på hvordan restspenningene fordeler seg og kan eksistere uten en ekstern last (Schajer & Ruud, 2013)

Det er vanlig å kategorisere restspenninger etter avstanden de virker over. Type I er makrorestspenninger som går over avstander i størrelsesorden av millimeter og oppover. Dette er typiske restspenninger som en finner i maskinerte komponenter og er den typen restspenninger det vil fokuseres på i denne oppgaven. Type II er microrestspenninger som virker over distanser på mikrometer, for eksempel mellom korn i metall. Type III er restspenninger som oppstår på atomisk skala. Type II og III er meget vanskelige å måle.

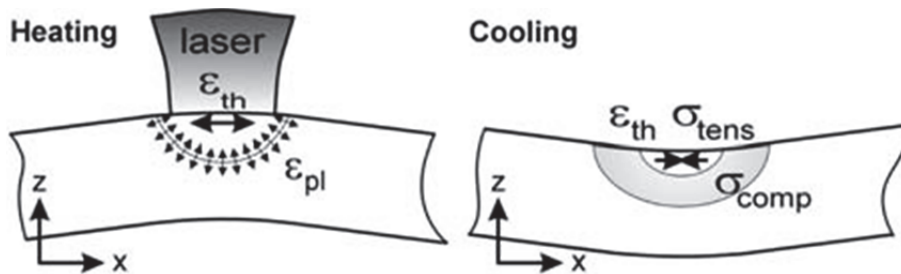
I følge (Gusarov, Pavlov, & Smurov, 2011) er de maksimale spenningene ved ALM i tverrgående retning tilnærmet halvparten av spenningene i samme retning som skanningen foregår. Formen av det omsmeltede lasersporet har veldig liten innvirkning på den maksimale restspenningen. Restspenningene er proporsjonale med differansen mellom omgivelsestemperaturen og smeltetemperaturen. Forhåndsvarming av kammer og materiale er en metode som reduserer



spenning (Mercelis & Kruth, 2006). De viste også at ved å dele overflaten inn i mindre deler senker en restspenninger.

### 2.5.1 Temperaturgradientmekanismen

Mekanismen som i hovedsak skaper de indre restspenningene ved ALM kalles for “Temperature gradient mechanism (TGM)” eller temperaturgradientmekanismen på norsk. Mekanismen oppstår av de store termiske gradientene som oppstår rundt laserens fokuspunkt. Det er vanlig å bruke TGM for laserbøyning av plater langs rette linjer. På grunn av den hurtige oppvarmingen og den relativt sett lave varmeledningen oppstår denne høye temperaturgradienten. Materialets styrke reduseres samtidig som følge av at temperaturen stiger. Ekspansjonen av det øvre laget er hindret av underliggende lag, dermed induseres elastiske trykkrefter i materialet. Når materialets flytegrense er nådd vil topplaget ha nådd materialets plastisitetgrense. I fravær av mekaniske restriksjoner vil materialet bøyes bort i fra laseren. Under kjøling vil det plastisk komprimerte topplaget krympe. Dette fører igjen til en bøyning mot laseren (Mercelis & Kruth, 2006).

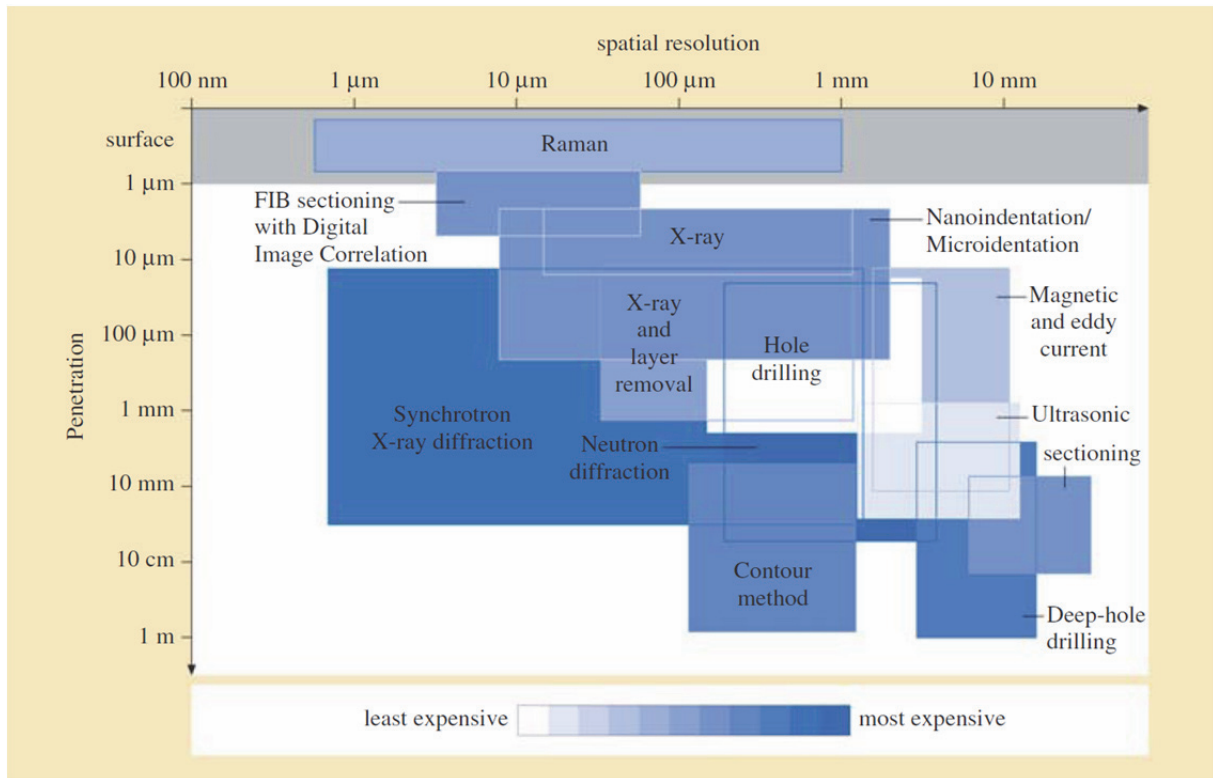


Figur 2.4 - TGM induserer restspenninger (Mercelis & Kruth, 2006)

En annen mekanisme som introduserer restspenninger i ALM for SLM og LaserCUSING foregår i nedkjølingsfasen av topplagene. Materialet vil være i flytende form og gå over til fast form. Dette fører til krymping som følge av termisk sammentrekning. Denne deformasjonen er, som med TGM, hindret av underliggende lag, som igjen fører til at strekkspenninger introduseres i topplaget og kompressive spenninger i underliggende materiale.

## 2.6 Måleteknikker for restspenninger

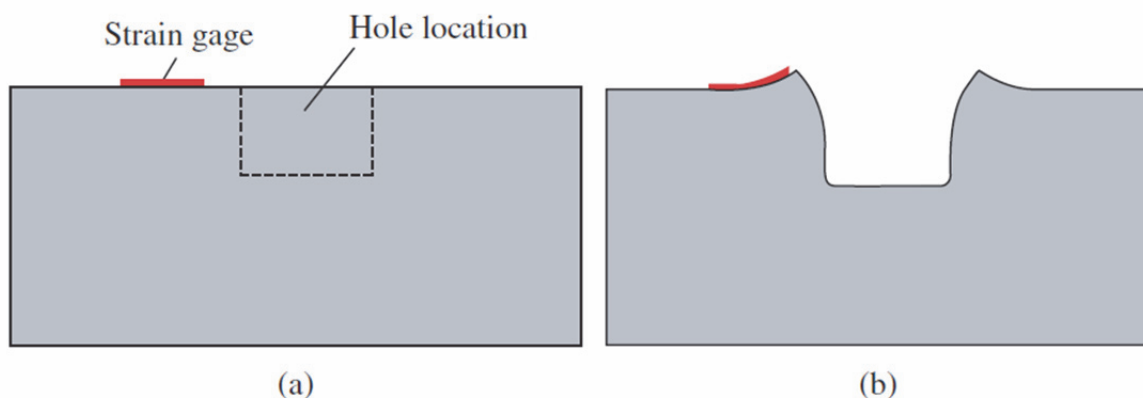
Det finnes flere måter å måle restspenninger på. De neste avsnittene presenterer noen av de mest benyttede metodene for måling restspenninger av type I. Det er svært ressurskrevende å få til gode målinger av restspenninger av type II og III. En oversikt over målemetoder for dette er gitt i Figur 2.5.



Figur 2.5 – Målemetoder (Schajer & Ruud, 2013)

### 2.6.1 Hullboring og ringkjerneboring

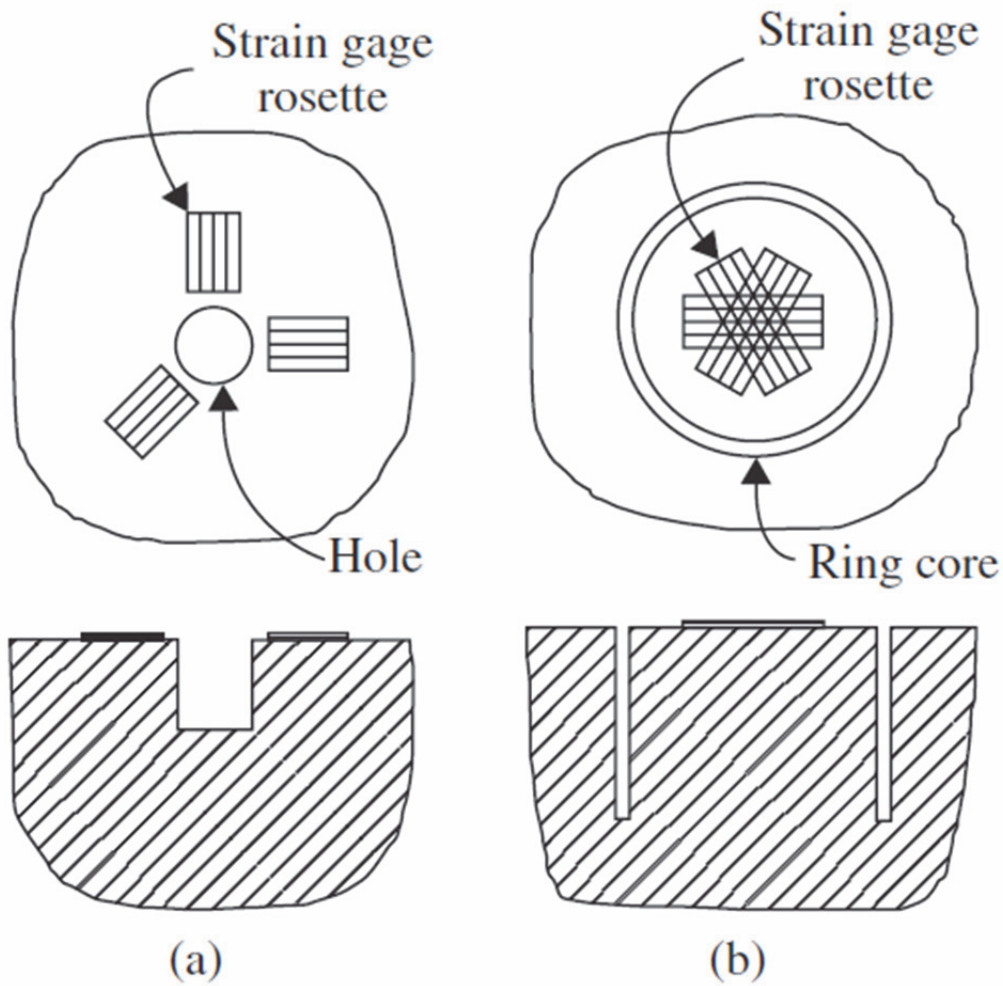
Hullboringmetoden er den mest brukte generelle metoden for å måle restspenninger i materialer. Den er lett å bruke, har standardiserte prosedyrer og den har god nøyaktighet og pålitelighet. Testprosedyren innebærer noe skade på prøven, men en slik skade er ofte akseptabel eller lar seg reparere. Metoden omtales ofte av denne grunn som “semi-ødeleggende” og er illustrert i Figur 2.6.



Figur 2.6 - Tversnitt av hullboring i prøve. (a) Før hullboring og (b) etter hullboring (Schajer & Whitehead, 2013)

Ringkjerneboring Figur 2.7 (b) er på mange måter en omvendt metode av hullboringmetoden. Her måles det i midten og “hullet” bores i en ring rundt. Fordelen med ringkjerneboring er at en får fjernet store mengder spenninger og kan dermed lettere måle høye

restspenninger nærmere materialets flytegrense. Ulempen med denne metoden er at den er noe mer tungvint å utføre og ødelegger mer enn vanlig hullboringemetode.

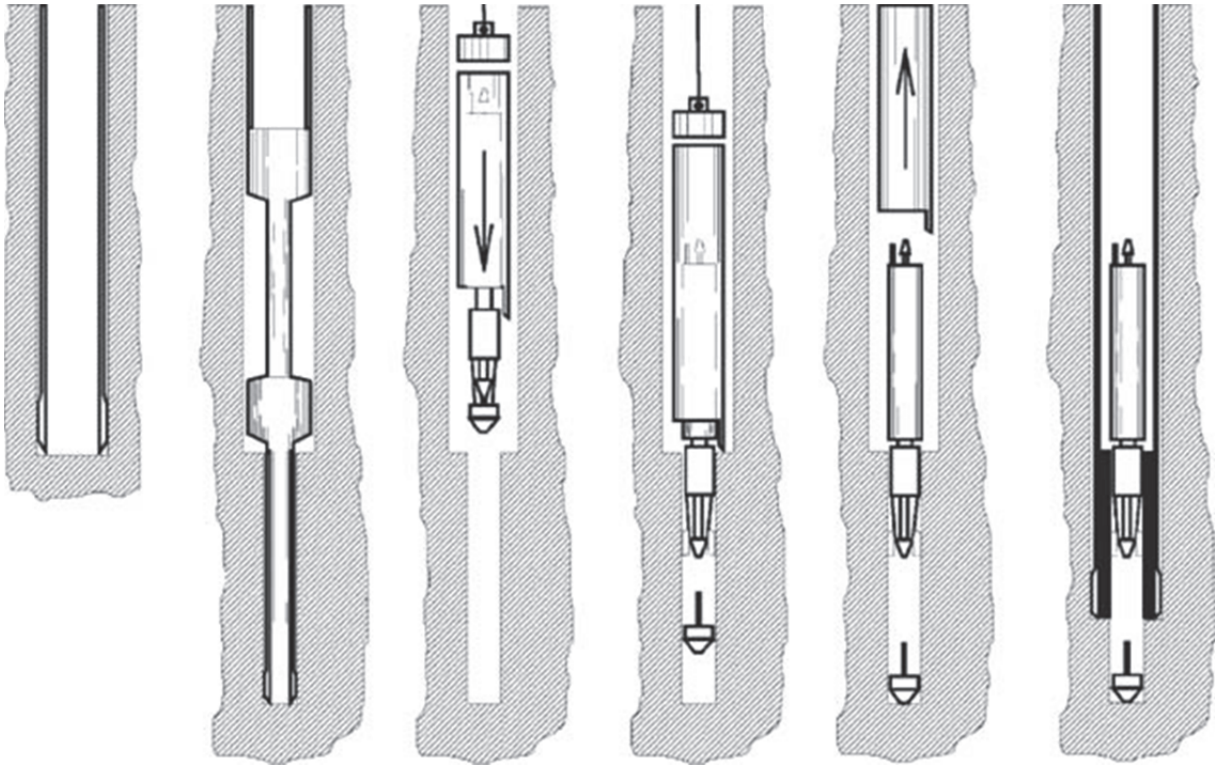


Figur 2.7 - Strekkapper ved (a) hullboring og (b) ringkjerneboring (Schajer & Whitehead, 2013)

Strekkapp-rosettene som benyttes ved hullboringprøver inneholder typisk tre målesensorer i et rektangulært format ( $0^\circ - 135^\circ - 270^\circ$  eller  $0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ ) for å identifisere tre spenningskomponenter  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\tau_{xy}$  i samme plan (ASTM, 2008).

### 2.6.2 Dyphullsboring

Dyphullsboring (Deep Hole Drilling) er en mekanisk stressavlastingsmetode som benyttes til å måle restspenninger i materialer. Metoden brukes til måling av spenninger i for eksempel steinblokker, broer, betongkonstruksjoner og også i enkelte tilfeller stålbjelker.



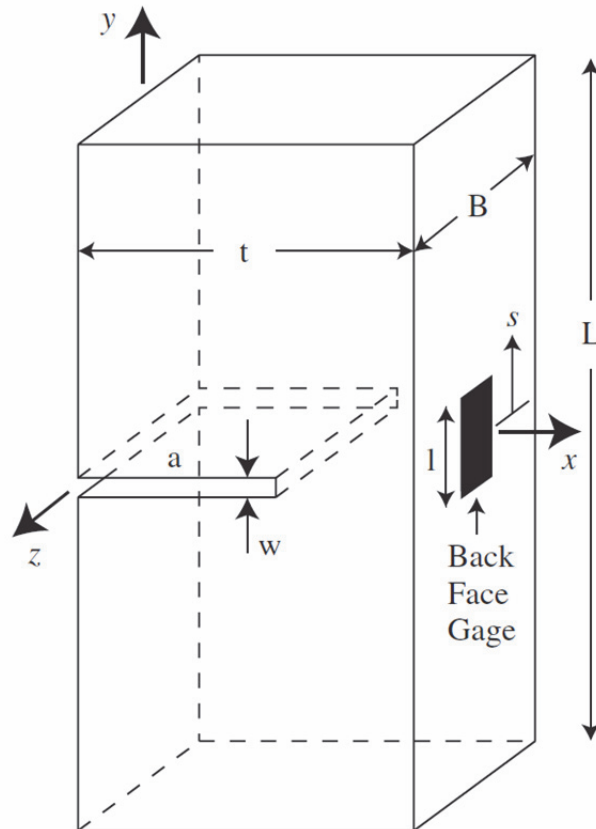
Figur 2.8 - Dyphullsboring prosedyre fra start(venstre) til slutt (høyre)(Smith, 2013)

Prosedyren for dyphullsboring kan ses på Figur 2.8 over. Første skritt starter med å bore seg ned til der prøven skal utføres. Dette hullet bores med en diameter på 76 mm. Deretter bores det videre ett pilothull med et 36 mm diameter bor. Neste skritt er så å senke installasjonsverktøyet som brukes til å plassere måleproben. Naturlig nok er neste skritt å installere proben og måleutstyr. Nest siste steg er å heve ut installasjonsverktøyet.

Metoden kan skaleres etter behov. Den kan brukes til å bore flere hundre meter ned i jordens overflate, eller flere millimeter inn i metall. Bruksområder som er uegnet for metoden vil være sveisede metalkomponenter, der store hull ikke er særlig ønskelig (Smith, 2013).

### 2.6.3 “The Slitting Method”

I denne metoden kutter man en plan spalte inkrementelt i materialet. Etter hvert som man kutter dypere vil komponenten bli mer og mer avlastet. Videre vil dette igjen føre til deformasjoner i området rundt spalten. Dette kan måles som en funksjon av dybden og brukes til å beregne restspenningene som eksisterte i komponenten normalt på spalten før kuttet fant sted (Hill, 2013).



Figur 2.9 - Oppsett for typisk "slitting method" (Hill, 2013)

Det vanligste oppsettet for denne metoden innebærer at man fester en strekkklapp på motsatt side av der hvor man gjør det inkrementelle innkuttet for å lage spaltet. Vanlig praksis når man utfører denne metoden på metalliske objekter er å bruke en trådgnisting (EDM) for å gjøre inngrepet i komponenten som måles.

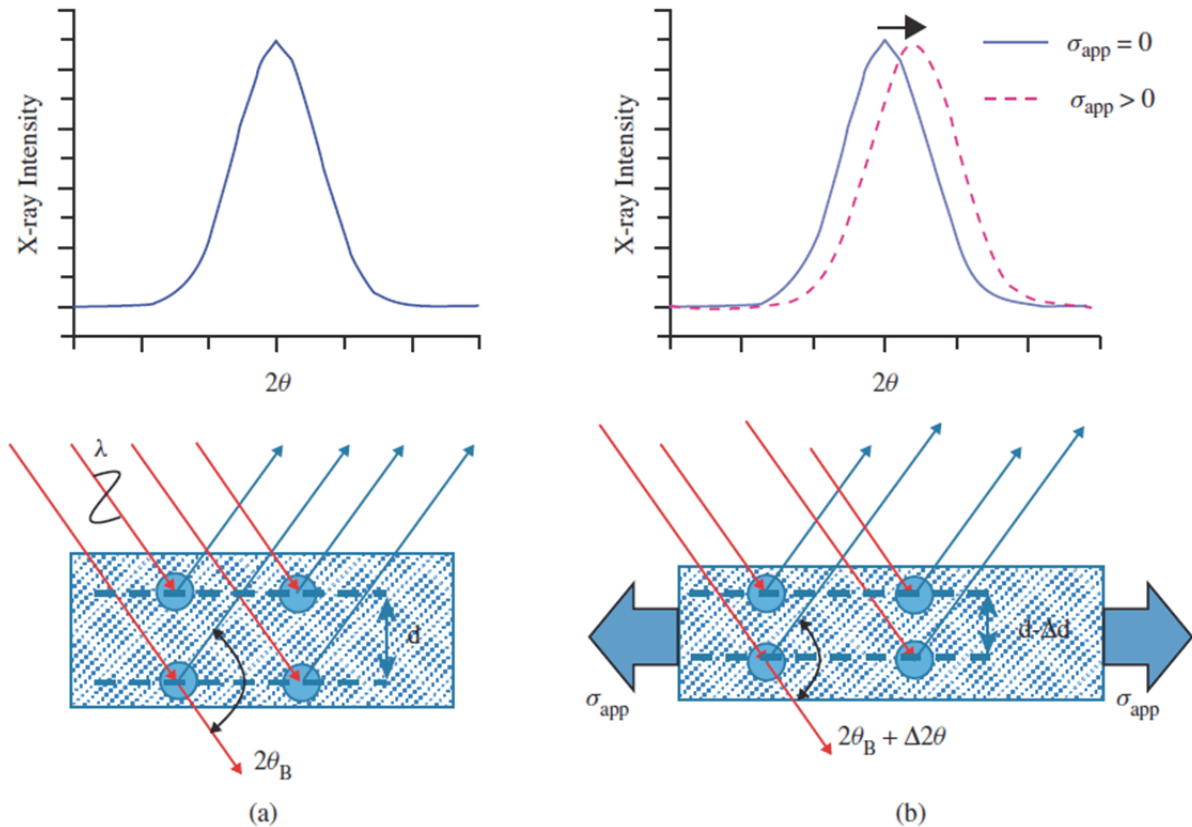
#### 2.6.4 “The Countour Method”

“The Countour Method” eller konturmetoden, som det kan oversettes til, går ut på å dele prøven som skal måles i to deler. Dette vil redistribuere de interne spenningene og føre til deformasjoner. Ved å måle disse deformasjonene veldig nøyaktig kan man lage en modell av hvordan komponenten nå ser ut i et FE-program. Deretter kan man benytte seg av Bueckners superposisjonsprinsipp i FE-simuleringen for å finne de nødvendige spenningene som må være i komponenten for å oppnå den deformasjonen som man har målt. En forutsetning er selvsagt at man har den originale geometrien til prøven, før en laget kuttet. Til kuttet er det vanligst å bruke trådgnisting (EDM). Konturmetoden er en av de yngste metodene for måling av restspenninger. Det er derfor ikke godt dokumentert hva beste praksis er på området. Metoden egner seg godt for målinger av restspenninger i deler med kompleks geometri (Prime & DeWald, 2013).



### 2.6.5 Røntgendiffraksjon

Alle diffraksjonsteknikker for måling av restspenninger benytter samme rammeverk som basis. Teknikkene er ikke destruktive. Diffraksjon, avbøyning av stråler, brukes til å måle atomiske avstander. Dette gjøres ved å observere konstruktiv interferens i bølgene som sendes mot prøven. For at dette skal skje må bølglengden være like store som avstanden mellom atomene. For de fleste materialer ligger bølglengden som kan brukes i røntgenregionen av det elektromagnetiske spektrumet. Typisk benyttes fotoner med energi på mellom 5-120 keV. Når fotonene treffer og interfererer med atomene flytter atomene seg til nye likevektsposisjoner, som resulterer i en endring av diffraksjonstopper som en kan se skjematisk i Figur 2.10.



Figur 2.10 - Skjema av diffraksjonsmetoden for å finne atomavstander i a) upåvirket tilstand og b) under lastpåvirkning (Murray & Cevdet Noyan, 2013)

Endringen i diffraksjonstopperne kan så brukes videre til å kalkulere spenningene ved å bruke passende formler for det mekaniske problemet. Det finnes to metoder for å beregne homogene spenninger ved røntgendiffraksjon:

1. Bruke et diffraktometer for å avgjøre de elastiske spenningene ved å måle gitteravstandene i materialet i forskjellige retninger. Deretter kan en regne seg frem til spenningene ved egnet versjon av Hook's lov.
2. Den lokale og globale kurvaturen av en enkeltkrystalsprøve kan avgjøres ved å følge orienteringen av en krystallretning som en funksjon av posisjon inne i prøven. Dette skjer ved bruk av et goniometer utstyrt med et omsettingstrinn. Dersom kurvaturen skyldes elastiske påførte spenninger internt i prøven, er det mulig å beregne spenningene ved å bruke forskjellige likninger som for eksempel Stoney formelen (Murray & Cevdet Noyan, 2013).



### **2.6.6 Andre diffraksjonsmetoder**

Av andre diffraksjonsmetoder finner en synkrotron røntgendiffraksjon og nøytrondiffraksjon. Synkrotron røntgendiffraksjon skiller seg fra “vanlig” røntgendiffraksjon ved at røntgenstrålene i synkrotron røntgendiffraksjon har mye høyere energi. Dette gjør at de i motsetning til røntgendiffraksjon kan penetrere flere mm eller cm inn i materialer. En kan også måle hyppigere, da strålingen har en høyere intensitet. Ulempen er at utstyret som trengs blir vesentlig større (Withers, 2013).

Nøytrondiffraksjon er den diffraksjonsmetoden som kan penetrere dypest ned i prøver. Opptil flere hundre mm i noen tilfeller. Dette kan gi 3D-bilder av stressprofilen i prøven. På samme måte som synkrotron røntgendiffraksjon trenger også nøytrondiffraksjon mye og avansert utstyr, noe som gjør det lite portabelt og relativt kostbart å gjennomføre (Holden, 2013).

### **2.6.7 Magnetiske metoder**

Ferromagnetiske metaller som jern, nikkel og kobolt er naturlig magnetiske og kan magnetiseres ved eksponering til et magnetisk felt, for eksempel fra en elektromagnetisk spole. Indusert magnetisme i en prøve reagerer med målrettede magnetiske felt i små uregelmessige hopp, samsvarende til magnetiske endringer i små lokale regioner av materialet. Disse magnetiske hoppene kan indusere pulser av spenning gjennom en sensorspole, kjent som magnetisk Barkhausenstøy. Noen av disse pulsene kan lage tilfeldig induksjonsstøy. Dersom restspenninger eksisterer i materialet vil induksjonsstøyen bli påvirket på en slik måte at de lokale magnetiske effektene som oppstår kan gjentas. Dermed er det mulig å måle spenningene som er tilstede i det ferromagnetiske materialet (Buttle, 2013).

### **2.6.8 Optiske metoder**

Optiske metoder for måling av restspenninger blir mer og mer populære. Fortrinnene med disse teknikkene er at de ikke er i kontakt med prøvene og at man dermed slipper å bruke tid på å sette opp sensorer og annet måleutstyr. Flere metoder er tilgjengelige, hver av dem med særegne trekk. Kort fortalt er basisen for måten disse teknikkene fungerer på, at en måler deformering av massen og kan evaluere stressprofilen gjennom kalkulasjoner ut i fra disse dataene (Nelson, 2013).

## 2.7 Termodynamikk

Termodynamikken som foregår i pulveret når laseren skanner over det kan deles inn i tre kategorier:

- Energiabsorbering
- Varmedissipasjon
- Fasetransformasjon

Dersom en ser på hvordan varmeenergien fordeles i prosessen kan en sette opp og skrive om termodynamikkens 1. lov.

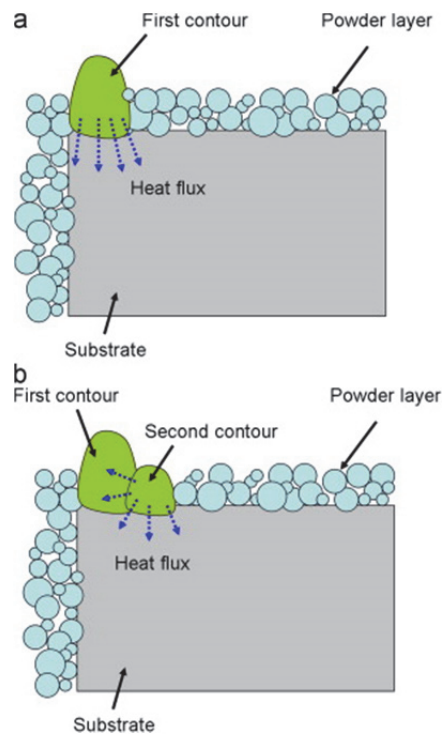
$$\bar{Q}_L = \bar{Q}_{CD} + \bar{Q}_{CV} + \bar{Q}_R + \bar{Q}_S \quad (2-1)$$

Der  $\bar{Q}_L$  er laserens strålingsenergi,  $\bar{Q}_R$ ,  $\bar{Q}_{CV}$ ,  $\bar{Q}_{CD}$  er hhv stråling, konveksjon og varmeledningsenergi mellom pulversengen og omgivelsene.  $\bar{Q}_S$  er varmen som går med til smelting av pulver eller faseendring (Ibiye Aseibichin Roberts, 2012). For en mest mulig korrekt modell i forbindelse med simulering, bør det velges egnede algoritmer som simulerer disse problemene korrekt i forhold til materialet som benyttes.

## 2.8 Geometriske faktorer

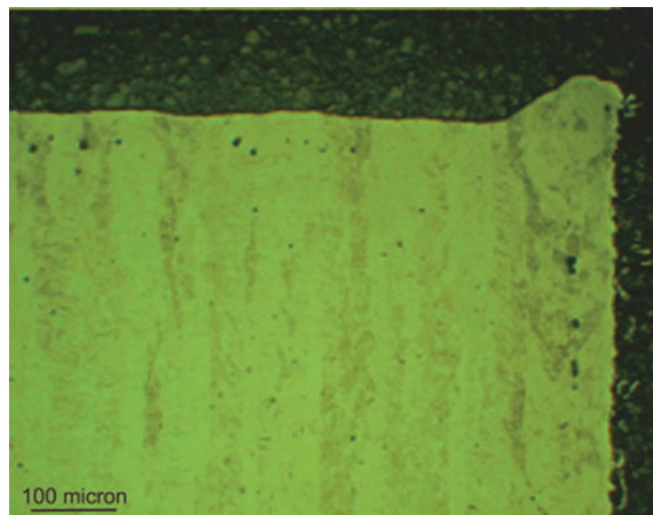
En mer praktisk tilnærming til problemet med restspenninger og hvordan en kan motvirke dem kan løses med et sett med regler som implementeres i designfasen av deler. Flere har allerede sett på hvordan man kan finne ut hvilke geometrier som er gunstige og hvilke som bør unngås. Studier av smeltebassenget som dannes av laseren i additive prosesser ved hjelp av utstrålingssensorer har blitt brukt av (Craeghs et al., 2011). Grunnen til akkurat denne tilnærmingen er at alle problemene som kommer senere kan observeres allerede på smeltebassengets oppførsel. Denne teknikken har avdekket en rekke fenomen som kan oppstå i additive prosesser som for eksempel kanteffekten (edge-effect).

## Kapittel 2: Litteraturstudium og bakgrunnsteori



Figur 2.11 - Prinsippkisse av "kanteffekten"(Craeghs et al., 2011)

Denne oppstår når den første linjen som skannes er ved kanten, se Figur 2.11a. Da vil smeldebassenget blir noe større enn resten. Siden smelten ikke kan støtte seg til noen av siden vil overflatespenningene gi den en sylindrisk form.



Figur 2.12 - Eksempel på kanteffekten(Craeghs et al., 2011)

### 3 Materialelegenskaper

#### 3.1 Introduksjon

Ved fullstendig lasersmelting av metallpulver går pulveret over i flytende form, for så å gå over til fast form igjen. Hva som skjer i disse trinnene kan studeres nærmere for å få en bedre forståelse for hva som skaper indre spenninger. En nærmere studie av materialelegenskapene til metallet som er brukt i denne oppgaven er viktig for en helhetlig forståelse av prosessene som skjer i LaserCUSING. Riktig input for materialelegenskapene viktig i simuleringene som skal gjennomføres i oppgaven. I dette kapitlet gis det en oversikt over materialparametre for MARLOK C1650 som brukes i simuleringene som er beskrevet i kapittel 4.2. Noen av egenskapene til materialet blir også beskrevet.

#### 3.2 MARLOK C1650

Denne oppgaven tar eksplisitt for seg materialet MARLOK C1650. Dette er en martensittisk stållegering utviklet spesielt for å brukes i støpeformer med høye termiske svingninger. Stålet skal være veldig enkelt å bearbeide før det herdes. I tillegg har det nesten ikke noe karboninnhold, i motsetning til tradisjonelle og konkurrerende verktøystål. Dette gjør at MARLOK blant annet har gode egenskaper for sveising ("MARLOK® Longer die life -Better quality," 2008). Disse egenskapene gjør dette materialet attraktivt for industrien. Dette er bakgrunnen for at nettopp dette materialet ble valgt i denne oppgaven. Materialet har blitt introdusert ved IPK og er forholdsvis nytt, noe som gjør at ikke alle egenskapene til materialet er blitt avdekket enda. SINTEF har også vurdert materialet som et gunstig alternativ i additiv lagvis tilvirkning (ALM).

Tabell 2 - Kjemisk sammensetning av noen verktøystål ("MARLOK® Longer die life -Better quality," 2008)

		<b>MARLOK ® C1650</b>	<b>18 Ni 300 W.-Nr. 1.2709</b>	<b>AISI H-11 W.-Nr. 1.2343</b>	<b>AISI H-13 W.-Nr. 1.2343</b>
<b>C</b>	<b>wt-%</b>	<b>&lt; 0.008</b>	<b>&lt; 0.03</b>	<b>0.3 - 0.4</b>	<b>0.3 - 0.4</b>
<b>Cr</b>	<b>wt-%</b>	<b>&lt; 0.30</b>	<b>&lt; 0.30</b>	<b>4.8 - 5.5</b>	<b>4.8 - 5.5</b>
<b>Mo</b>	<b>wt-%</b>	<b>4.50</b>	<b>4.5 -5.2</b>	<b>1.1 - 1.4</b>	<b>1.2 - 1.5</b>
<b>Ni</b>	<b>wt-%</b>	<b>14.00</b>	<b>17.0 -19.0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Co</b>	<b>wt-%</b>	<b>10.50</b>	<b>7.0 - 9.0</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Ti</b>	<b>wt-%</b>	<b>0.20</b>	<b>0.80 -1.20</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Si</b>	<b>wt-%</b>	<b>&lt; 0.10</b>	<b>&lt; 0.10</b>	<b>0.8 - 1.2</b>	<b>0.8 - 1.2</b>
<b>Mn</b>	<b>wt-%</b>	<b>&lt; 0.10</b>	<b>&lt; 0.10</b>	<b>0.2 - 0.4</b>	<b>0.2 - 0.4</b>

Tabell 2 viser at MARLOK C1650 skiller seg fra flere av de tradisjonelle verktøystålene på flere områder. Det er verdt å merke seg at legeringsinnholdet i "W.-Nr. 1.2709" eller DIN 1.2709 som den også betegnes som, likner mest på MARLOK C1650 i kjemisk sammensetning. I forbindelse med simulering benyttes materialparametre for DIN 1.2709 der det ikke finnes data for MARLOK C1650. DIN 1.2709 brukes også i M2 maskinen og er et materiale der IPK har mer kunnskap og erfaring.

### *Kapittel 3: Materialeegenskaper*

Ett av de største fortrinnene til MARLOK C1650 er at det krymper veldig lite ved varmebehandling. Varmebehandlingen er uniform og gir forutsigbare geometriske endringer. Maksimal krymping ved herding på 525 °C i 6 timer er 0,05 %.

## 4 Utvikling av numerisk modell

### 4.1 Introduksjon

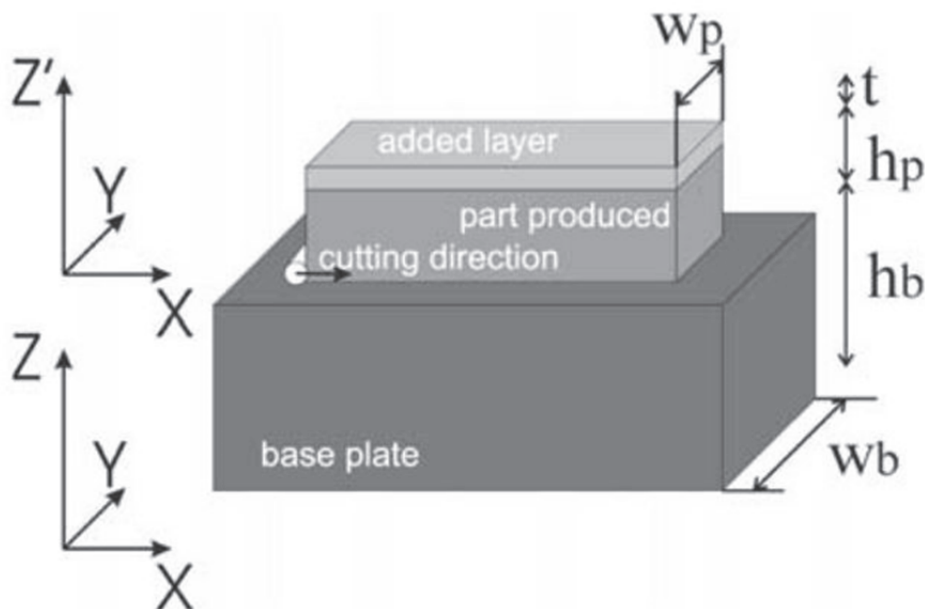
I dette kapittelet vil det fokuseres på hvordan en kan modellere den additive produksjonsteknikken. Teknikker og metoder for både matematiske utregninger og simuleringer med numeriske analysemetoder presenteres. Et eksempel ved bruk av simuleringprogramvaren Abaqus og resultatene fra simuleringen presenteres også.

### 4.2 Teoretisk modellering

Simulering er veldig nyttig og viktig verktøy innen områder som termodynamisk varmebehandling av metaller. Det er forholdsvis billig og relativt raskt å gjennomføre. Dette gjelder selvsagt ikke pionerprosjekter. Etablerte simuleringverktøy kan hjelpe til å avdekke problemer før de oppstår, noe som igjen betyr at en kan effektivisere designfasen av et produkt ved god simulering. Selve nøkkelen til en god simulering ligger i hvordan man klarer å representere problemet som skal simuleres. Suksesskriteriet ligger i hvor godt man kan representere virkeligheten ved å bruke numeriske modeller. Ofte kan også en forenklet modell gi verdifull tilbakemelding.

#### 4.2.1 Modellering av SLM

Det er viktig å starte med en modell for å få en ide om hvordan profilen til restspenningene i SLM-komponenter vil se ut. Man kan bruke (Mercelis & Kruth, 2006) sin metode. Dette er en enkel modell som antar at en del blir bygget opp på en baseplate med høyde  $h_b$ . Komponenten som bygges har høyde  $h_p$  og lagtykkelsen  $t$ , se Figur 4.1.



Figur 4.1 - Forenklet teoretisk modell av SLM (Mercelis & Kruth, 2006)

## Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell

Denne enkle modellen antar følgende:

- At baseplaten og komponenten bygges i romtemperatur.
- Det øvre laget induserer spenning på grunn av krymping ( $\alpha\Delta T$ ); strekkspenningen er lik materialets flytegrense  $\sigma$  (siden kraftpåvirkning fra  $\alpha\Delta T$  ville resultert i spenninger mye større enn materialets flytegrense).
- Spenningene  $\sigma_{xx}$  er uavhengige av y-koordinaten, som vil si at f.eks. normalspenninger neglisjeres.
- Generell bjelketeori er gjeldene.
- Ingen eksterne krefter virker på verken komponenten eller baseplaten.

Likevektslikningene for kraft (4-1) og moment (4-2) er gyldige siden det ikke er noen eksterne krefter som virker på systemet:

$$\int \sigma_{xx} \cdot (z) dz = 0 \quad (4-1)$$

$$\int \sigma_{xx} \cdot (z)z dz = 0 \quad (4-2)$$

Den samme deformasjonen fra baseplaten er antatt videre i komponenten oppover i kombinasjon med den additive delen:

$$\epsilon_{xx}(z) = az + b \quad (4-3)$$

Dersom det er forskjell i stivhet mellom baseplaten og den additivt produserte komponenten vil det gi forskjellige spenningsnivåer. Spenningsprofilen vil gi et hopp i overgangen på grensen mellom baseplaten og komponenten. Dersom man antar at  $m$  er forholdet mellom baseplaten og komponentens stivhet får man:

$$m = \frac{E_{base}}{E_{del}} \quad (4-4)$$

Med denne antagelsen kan man skrive om likevektslikningene til:

$$\int_0^{h_b} m(az + b)dz + \int_{h_b}^{h_b+h_p} (az + b)dz + \int_{h_b+h_p}^{h_b+h_p+t} \bar{\sigma} dz = 0 \quad (4-5)$$

$$\int_0^{h_b} m(az + b)zdz + \int_{h_b}^{h_b+h_p} (az + b)zdz + \int_{h_b+h_p}^{h_b+h_p+t} \bar{\sigma} z dz = 0 \quad (4-6)$$

Fra disse likningene kan man videre finne koeffisienten  $a$  og  $b$ :

$$a = -6\bar{\sigma}t \frac{(2mh_b h_p + mh_b h_p t + h_p^2 + h_p t + mh_b^2)}{(4mh_b^3 h_p + h_p^4 + m^2 h_b^4 + 6mh_b^2 h_p^2 + 4mh_b h_p^3)} \quad (4-7)$$

$$b = \bar{\sigma} t \frac{(2mh_b^3 + 6h_p mh_b^2 + 3mh_b^2 t + 6h_b h_p^2 + 6h_b h_p t + 2h_p^3 + 3h_p^2 t)}{(4mh_b^3 h_p + h_p^4 + m^2 h_b^4 + 6mh_b^2 h_s^2 + 4mh_b h_p^3)} \quad (4-8)$$

Likning (4-7) og (4-8) antar at basedelen og den additive delen er like brede. Vanligvis er baseplaten størst. Dette vil i virkeligheten gi en høyere  $m$ -faktor:  $m = E_{base} \omega_{base} / E_{del} \omega_{del}$  som igjen viser at man kan simulere dette med en høyere E-modulus for baseplaten.

Etter produksjon av komponentene er det vanlig å kutte dem av baseplaten. Dette kan simuleres ved å introdusere en avslappingsspenning og kalkulere denne inn i komponenten. Denne avslappingsspenningen har en lineær profil ( $z' = z - h_b$ , Figur 4.1):

$$\sigma_{relaxation}(z') = cz' + d \quad (4-9)$$

Den konstante delen av avslappingsstresset kommer av en uniform krymping av komponenten som blir fjernet fra baseplaten. Dette resulterer i at komponenten krummes. Koeffisientene  $c$  og  $d$  kan bestemmes ved å rekalkulere likevektsbetingelsene for den produserte komponenten (med  $h_c$  som høyden av komponenten i det nye koordinatsystemet  $X, Y, Z'$ ) (se Figur 4.1):

$$c = +6 \frac{-2 \int_0^{h_c} z' \sigma(z') dz' + h_c \int_0^{h_c} \sigma(z') dz'}{h_c^3} \quad (4-10)$$

$$d = 2h_c \frac{\int_0^{h_c} \sigma(z') dz' - 3h_c \int_0^{h_c} z' \sigma(z') dz'}{h_c^2} \quad (4-11)$$

Denne metoden har et relativt begrenset bruksområde på grunn av geometriske begrensninger og det faktum at metoden er en forenklet modell i seg selv. For en mer fullstendig analyse av restspenninger og krefter som virker på additivt produserte deler kan man bruke forskjellige dataprogrammer.

### 4.3 Simuleringer

Det er en rekke faktorer som må overveies ved modellering av komponenter og bruk av parametre i denne oppgaven. Komponentene og produksjonen av denne kan i utgangspunktet simuleres som en rekke sveiseoperasjoner, men med en del andre egenskaper i tillegg. Man må ta hensyn til randbetingelser for den termiske overføringen fra laser til pulver og videre til komponenten som er under oppbygging. Videre må man kople den termiske modellen med metallurgiske endringer og deretter mekaniske tøyninger i det elastiske materialet. I denne



## *Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell*

oppgaven vil man ikke se på fasetransformasjoner i metallet, men i stedet presentere en meget forenklet modell av virkeligheten.

Det finnes en rekke programvarer for numeriske beregninger ved bruk av “Finite Element Method” (FEM-simulering) på markedet. Programvaren gjør det mulig å kjøre “Finite Element Analysis” (FEA) som er en måte å utføre FEM-simuleringer. FEM går ut på å representere problemet man har matematisk, ved et sett med differensiallikninger med randbetingelser. Når en så bruker FEA-verktøy, så tar man en numerisk representert geometri og deler den opp i mange stykker. Dette kalles for et “mesh”. Punktene som binder sammen delene i meshet kalles for noder. Hver node er koblet sammen med flere andre noder. Når programvaren kjører, kalkulerer den og løser grenseverdiproblemet for hver node og setter deretter dette sammen til en helhetlig representasjon av løsningen.

Det finnes flere populære program på markedet som kan utføre FEA, Abaqus og ANSYS er mye brukt. Mange som jobber med veldig spesielle problemstillinger utvikler sine egne programvarer for FEM-simulering. Andre bruker FEM-programmene som motor i en del av programvaren deres. WELDSIMS er et slikt alternativ. For problemstillingen i denne oppgaven ville WELDSIMS være meget egnet da det tar for seg faseendringer i metallet, diffujonskontrollerte fasetransformasjoner, samt simulering av den martensittiske dannelsen i metallet (Fjær, Aune, M'Hamdi, & Akselsen, 2009). WELDSIM har også støtte for sprekksimuleringer. Programmet er dessverre noe tungvint å bruke og har begrenset med dokumentasjon, så det må påregnes en viss opplæringstid. Programmet har heller ikke noe grafisk brukergrensesnitt og er avhengig av Abaqus for grafisk tolkning av både geometrisk modell og resultatene av simuleringen. Dette hadde trolig vært et svært velegnet program for en større oppgave med lengre varighet. I stedet ble programmet Abaqus valgt. Det ble i samråd med SINTEF Materialer og kjemi vurdert til å dekke behovet i denne oppgaven.

### **4.4 Undersøkelser ved bruk av Abaqus**

Dette kapittelet fokuserer på hvordan en kan simulere additiv tilvirkning ved å bruke FEA. Abaqus/CAE versjon 6.12-1 fra Dassault Systèmes Simulia Corp. brukes til analysen. Dassault Systèmes Simulia Corp. er samme leverandør som står bak de kraftige CAD-programmene SOLIDWORKS og CATIA. Komponenten som modelleres er en rektangulært parallelepipedformet baseplate i MARLOK C1650 som det maskineres additivt oppå med MARLOK C1650 i pulverform. Det additive som bygges på baseplaten har en rektangulær form som fyller hele toppflaten til baseplaten. En rekke forenklinger gjøres og oppgaven vil fokusere simuleringen mot en koplet prosess med varmeoverføring og mekanisk analyse. Dette gjøres med en teknikk som kalles for “Element Birth and Death Technique”, som beskrives i kapittel 4.4.1. Varmeoverføring, fasetransformasjon i metallet, kjemiske prosesser, herding og mekaniske fenomener er blant de faktiske fysiske prosessene som finner sted i en additiv produksjon, som SLM for å nevne noen.

Det er også en rekke parametere som vil påvirke den additive prosessen. Trinnene i denne simuleringen vil være;

## *Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell*

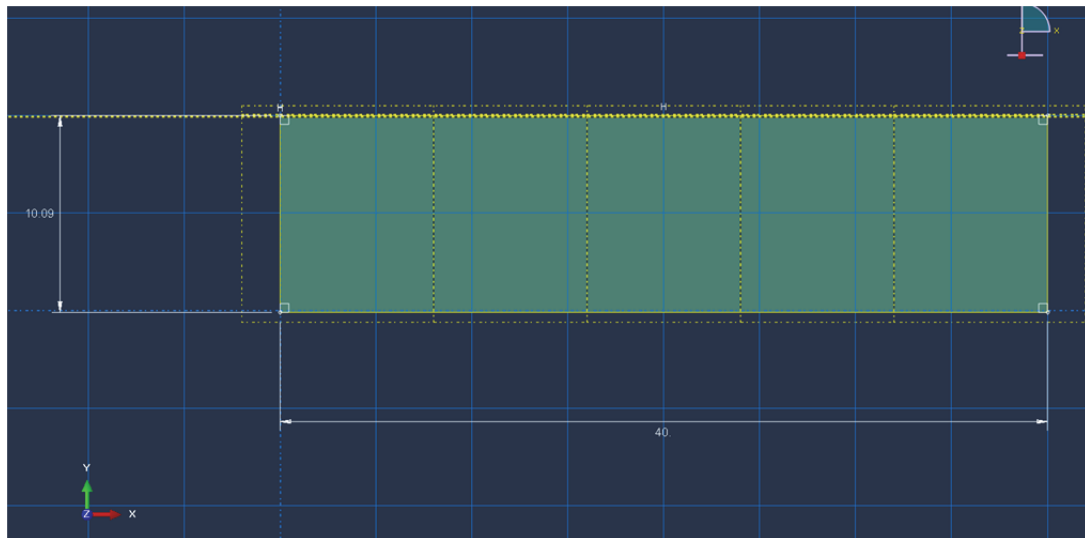
1. Alle sveisepasseringene blir brutt ned i mindre biter avhengig av enten geometrien eller meshet til komponenten. Banen til varmekilden i sveisepasseringen (laseren) blir så representert gjennom hvilke biter som varmes opp og hvordan bitene legges ned over tid.
2. Varmekilden simuleres ved å belaste grensesjiktet mellom bitene i gjeldene sveisepassering med en forhåndsdefinert temperatur som er lik smeltepunktet til materialet eller noe høyere. I en 3D-simulering vil varmefluxen kunne spre seg i omkringliggende biter som allerede har blitt plassert, samt baseplaten.
3. Biter som ikke hører til gjeldende sveisepassering er ikke til stede i modellen idet varmekilden anvendes. Bitene aktiveres gjennom “modellendringen” i et eget skritt for gjeldene sveisepassering.
4. Varmekildens påføring analyseres gjennom ett forbigående varmeoverføringsskritt.
5. Alle bitene er til stedet når den mekaniske simuleringen foregår, utenom de bitene som enda ikke har blitt deponert. Dette gjør at bitene kan bevege seg med modellen uten å påvirke beregningene før de er “aktivert”. For å sikre at bitene som introduseres er spenningsfrie blir bitene i en sveisepassering fjernet og re-introdusert i et veldig kort skritt i simuleringen.
6. Materialeegenskapene for sveisematerialet (pulveret) må defineres over et sett med temperaturer for best resultat.

### **4.4.1 Element Birth and Death Technique**

Deponering av pulvermaterialet i lagvis maskinering som foregår i flere operasjoner kan simuleres med teknikken “Element Birth and Death Technique” eller løst oversatt “Elementfødsel/dødteknikken”. Prosedyren involverer aktivering (fødsel) av elementer på det tidspunktet de trengs. Etter at programmet har utført kalkuleringene i skrittet, blir elementet deaktivert (dør). Ved denne teknikken sikrer man at pulver som ikke er blitt deponert enda, ikke blir påvirket før det skal.

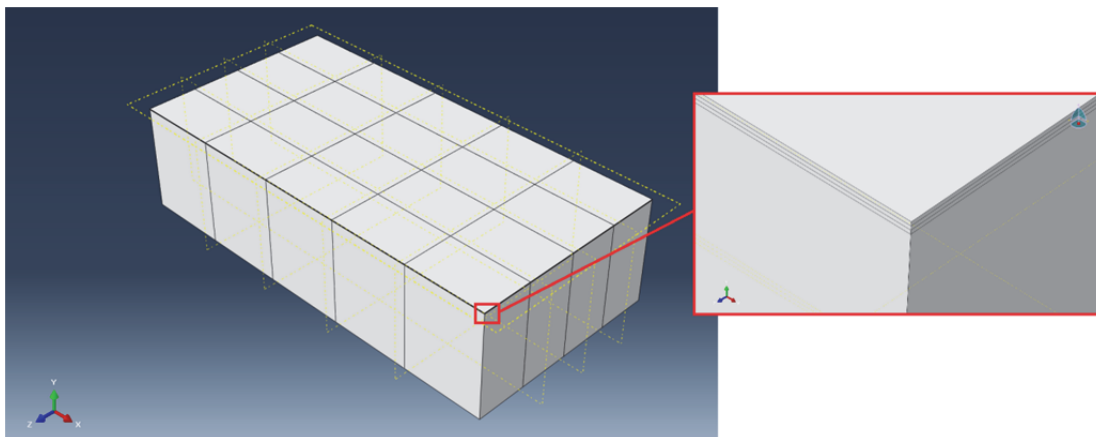
### **4.4.2 Design av del**

Abaqus programvaren har, i likhet med SOLIDWORKS og CATIA, en god CAD-modul. Det ble valgt en del med rektangulær parallelepipedisk geometri for komponenten i oppgaven. Komponentens måles opp rektangulært og ekstruderes ut. Det er viktig å merke seg at modellen i utgangspunktet må inneholde alle lag som skal maskineres opp på basedelen. En må altså designe det ferdige produktet. De additive lagene blir senere fjernet og lagt på i rett rekkefølge med Element Birth and Death Technique.



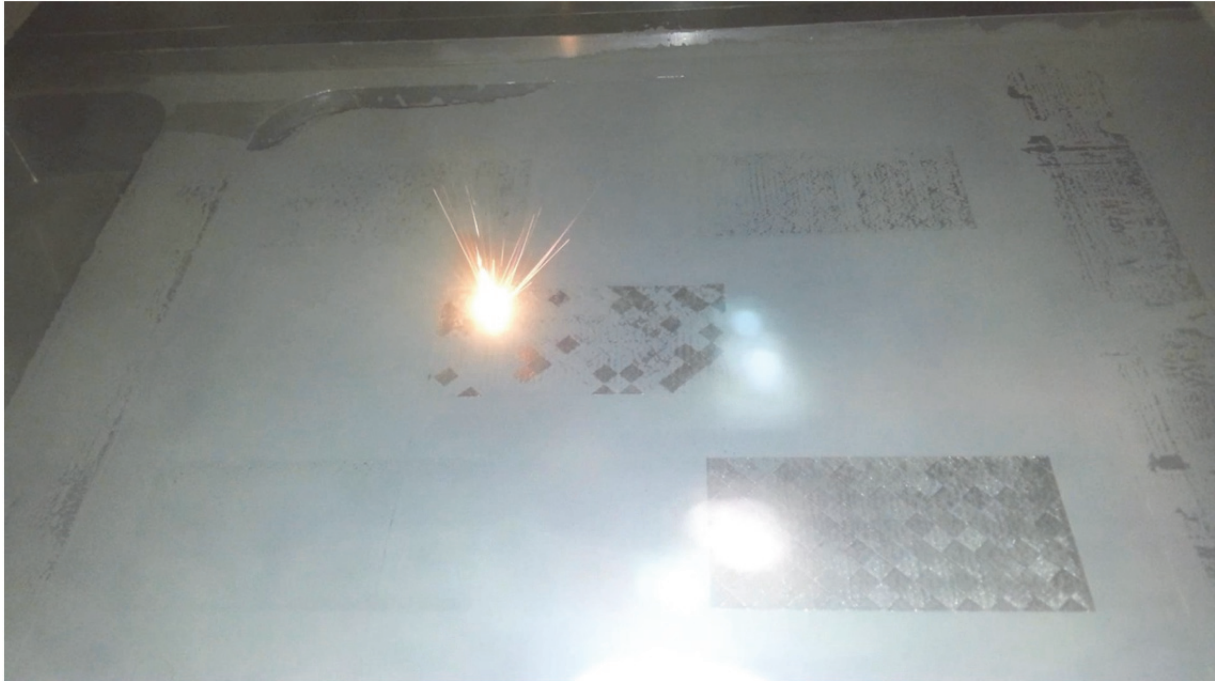
Figur 4.2 - Mål på designet del før ekstrudering

I denne simuleringen benyttes målene 40 x 10,09 mm. Deretter ekstruderes komponenten 20 mm slik at det blir en kloss på 40 x 20 x 10,09 mm. Grunnen til at det brukes en høyde på 10,09 mm er at i dette tilfellet vil det simuleres at 3 lag bygges additivt oppå en basedel med målene 40 x 20 x 10 mm. Hvert lag er altså 30  $\mu\text{m}$ .



Figur 4.3 - Modellen etter ekstrudering og partisjonering

Etter ekstrudering av klossen partisjoneres komponenten slik at lagene skilles fra hverandre og områdene som laseren skal skanne over blir delt opp (Figur 4.3). LaserCUSING skiller seg fra SLM ved at laseren skanner over pulveret på en spesiell måte. Pulverflaten som skal skannes deles opp i små kvadrater. Deretter velges enkelte firkanter som utgangspunkt for skanningen. Disse firkantene kalles for “øyer”, se Figur 4.4.



**Figur 4.4** LaserCUSING av prøver. Et ferdig skannet lag på en prøve kan ses nederst til høre. I midten foregår skanningen på en annen del. Legg merke til “øyteteknikken”.

Laseren skanner så en og en firkant rundt øyene i rekkefølge helt til alle kvadratene er skannet. Dette blir dermed en “semi-tilfeldige” algoritme for skanneområdene. På grunn av denne teknikken deles komponenten som skal simuleres opp i kvadrater for de additive lagene, slik at det senere kan velges i hvilken rekkefølge kvadratene skal varmes opp. Det er dette som gir den karakteristiske rutete overflaten på deler produser i M2 maskinen fra ConseptLaser. Etter partisjoneringen av de 3 lagene, som skal maskineres additivt, er geometrien på komponenten ferdig. Det skal nevnes at det ble forsøkt å modellere med hull og gjenger for skruefeste, men dette viste seg å skape problemer for simuleringen og blir derfor neglisjert videre. Dette vil utdypes nærmere i avsnittet om meshet til modellen.

I simuleringen benyttes tilleggspakken Abaqus Welding Interface (AWI) som er utviklet av SIMULIA Southern and Erie regional offices til bruk sammen med Abaqus. Tilleggspakken hjelper til med å generere banene til laseren og hvordan materialet(pulveret) blir deponert i simuleringen. AWI har også en rekke variabler for å styre overflatebelegg og varmestraling. I utgangspunktet ble programvaren utviklet med tanke på å løse problemer knyttet til sveising. Simuleringen består derfor av en rekke små sveiseoperasjoner som blir manipulert slik at de likner mest mulig på den additive prosessen.

Varmeoverføringslementer av typen DC3D8I benyttes i simuleringen. Dette er en 8-nodes lineær varmeoverføringsblokk. I spenningsanalysen bruker elementer av typen C3D8. Dette er en 8-nodes lineær blokk.

### 4.4.3 Materialparametre

Både basedelen og den additive delen er i MARLOK C1650 bruker de samme materialparametrene. Alle materialene antas å være homogene. Der hvor man har temperaturavhengige data, antas dataene i mellom å kunne finnes ved lineær interpolasjon. Dessverre har det ikke lyktes å oppdrive alle nødvendige materialparametere fra produsent eller

## Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell

andre som benytter seg av materialet. Det viste seg også å være for tidkrevende og kostbart å eksperimentelt finne de manglende parameterne på egenhånd. Derfor er parametre fra materialet “W.-Nr. 1.2709” eller DIN 1.2709 benyttet. Dette er et materiale med lignende legeringselementer som MARLOK C1650, også beskrevet i kapittel 3. Dokumentasjonen for denne legeringen er mye bedre og vil derfor benyttes i simuleringene der andre materialparametere ikke foreligger. Dette kan være en feilkilde og bør vurderes i videre arbeid.

Variablene som er kjent er oppgitt i Tabell 3 og Tabell 4:

Tabell 3 – Temperaturavhengig varmeledningsevne

Temperatur [°C]	MARLOK C1650 [W/(m*°C)]
200	26
600	34

Tabell 4 - Materialdata for MARLOK C1650

Massetetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Elastisitetsmodul [GPa]	Termisk utvidelseskoeffisient alfa [1/°C]
8,09	186	10*10 <sup>-6</sup>

Materialdata for DIN 1.2709 som benyttes i simuleringen er oppgitt i Tabell 5:

Tabell 5 - DIN 1.2709 parametere

Spesifik varekapasitet [J/kg*°C]	Poisson's Ratio	Spesifik varmekapasitet [J/kg*°C]	Latent varme [kJ/kg]	Smeltepunkt [°C]	Frysepunkt [°C]
460	0,275	460	275	1510	1450

I tillegg er filmkoeffisienter mellom blokkene og baseplaten oppgitt i Tabell 6:

Tabell 6 - Filmkoeffisienter

Region	Filmkoeffisient [W/m <sup>2</sup> *°K]
Blokker	0,025
Basedel	0,025

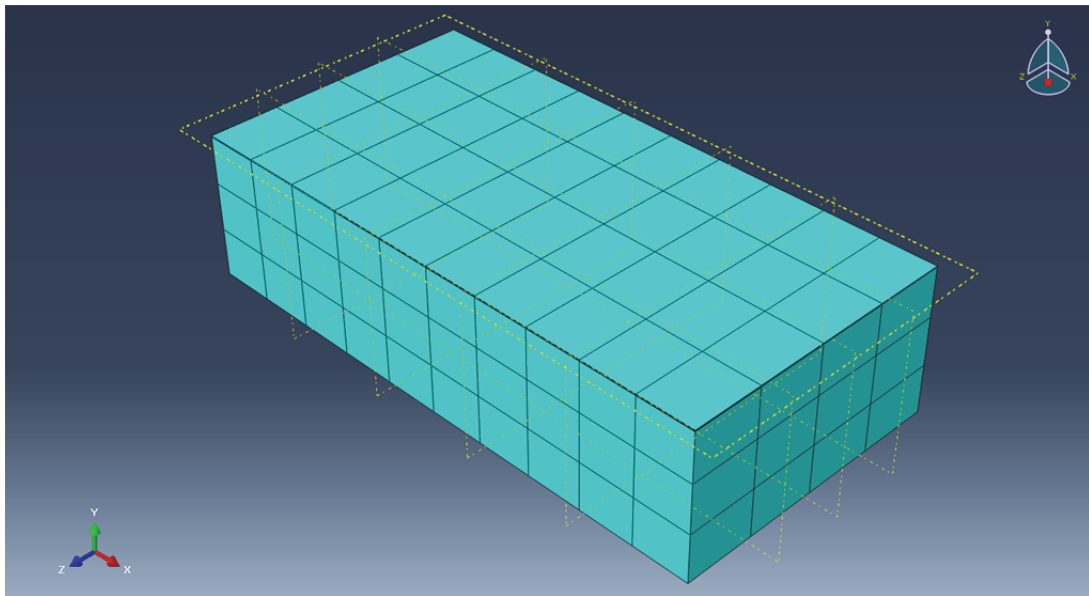
Andre parametere som fylles inn og benyttes av Abaqus i simuleringene er oppgitt i Tabell 7:

Tabell 7 - Parametere til Abaqus

Absolutt nullpunkt [°C]	Stefan-Boltzmann konstanten [W/(m <sup>2</sup> *K <sup>4</sup> )]	Begynnelsestemperatur [°C]	Oppvarmingstemperaturen i blokkene [°C]
-273,15	5.669E-011	21,1	1600

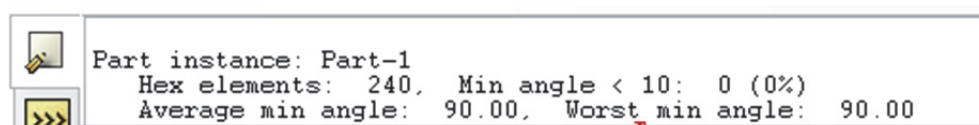
### 4.4.4 Mesh

I FEM-simuleringer er meshet, eller nettet, det som avgjør hvor tett elementene står i modellen. Et finere mesh betyr en høyere oppløsning på utregningene. I praksis betyr dette at flere utregninger må utføres av datamaskinen og simuleringen tar derfor lengre tid med et fint mesh enn med et grovt. Valg av mesh for denne modelleringen blir relativt grovt for å lette simuleringstiden.



Figur 4.5 - Mesh

Meshet som benyttes er hexagonalt og strukturert slik at det har minst mulig forvrengninger. Verifisering av meshet utført med Abaqus gav ingen feilmeldinger, advarsler eller identifiserte uegnede elementer, se Figur 4.6.



Figur 4.6 Kontroll av mesh

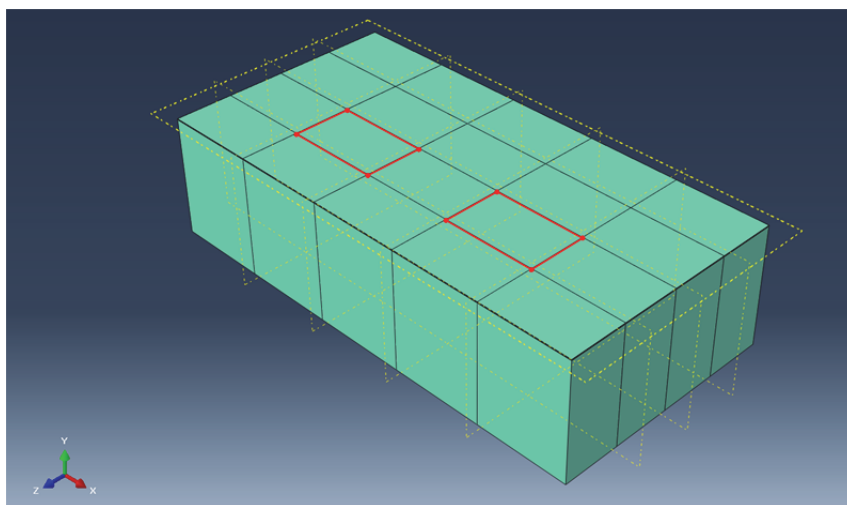
En annen grunn til å bruke et strukturert mesh er måten AWI deler inn sveisebaner. Tilleggspakken AWI kan ekstrudere seg frem til sveisebaner dersom meshet er strukturert. Dette er en stor fordel i geometriske problemer med mange blokker i sveisebanene, slik som eksempelet i denne oppgaven.

I tidligere versjoner av modellen ble det eksperimentert med simulering av et oppdelt mesh som inkluderte de fire hullene i modellen. Dette skapte ugyldige overganger for simuleringen i grensene mellom de forskjellige meshene, noe som gjorde at simulering ble avbrutt på grunn av konvergeringsproblemer i simuleringen. Hullene er derfor ikke med i videre simuleringer da de forårsaket konvergeringsproblemer. De ble simulert ved bruk av grensebetingelser. Dette er beskrevet i kapittel 4.4.5.

### 4.4.5 Simuleringsparametere

All simulering i Abaqus foregår ved Abaqus-steg. Ett steg kan ha mange iterasjoner og kan variere i modellert tid. Når et steg blir kalkulert knytter Abaqus sammen utregningene med materialparametere for det endelige resultatet. For en mer komplett analyse av ALM er det derfor anbefalt for videre arbeid å implementere subrutiner i Abaqus. Dette kan kontrollere alt i fra modellering av fasetransformasjoner til en kontrollert egendefinert algoritme for varmegenerering. Alt dette kan gjøre modellen mer presis, men også mer kompleks. Arbeidet til (Yaakoubi, Kchaou, & Dammak, 2013) har vist hvordan dette kan gjøres. De konkluderer med at det er mulig å simulere temperaturfordeling, mikrostruktur, hardhet og restspenninger ved signifikant nøyaktighet. Gjennom subrutiner kan en også modellere sprekkdannelse.

Etter at AWI har delt inn det additive laget i sveisebaner kan brukeren bestemme hvordan blokkene skal “legges ned”. Med det menes i hvilken rekkefølge pulveret skal bli bestrålt av laseren. For simuleringen sin del betyr dette hvilken blokk varmefluxen skal gå gjennom til hvilken tid. Siden LaserCUSING benytter en egen teknikk med semi-tilfeldig bestråling av pulveret, benyttes et mønster der to og to blokker bestråles samtidig med mellomrom mellom blokkene. Dette er ikke det samme som øyeteknikken til LaserCUSING, men er en forenkling. I tillegg sparer det simuleringstid ved å deponere to blokker i samme steg.



Figur 4.7 - To blokker på ett skritt som bestråles av laseren

Siden elementfødsel/død-teknikken gjør at det lages en egen modell for strukturberegningene, må eventuelle ekstra steg defineres før AWI generer alle stegene. For denne simuleringen er det derfor viktig å få med egendefinerte skritt for pausen det tar mellom hvert lag for å fordele ut neste lag med pulver. Dette løses med et egendefinert skritt på 10 sekunder. Det siste trinnet i simuleringen blir et langt skritt på 10000 sekunder for å få med nedkjølingen.

Tillegspakken AWI kjører en stor matrise med alle variabler som ble valgt. Deretter genereres to jobber for Abaqus. En jobb for varmeoverføringsanalysen og en for den koplede mekaniske analysen. I alt er det definert 36 sveisebaner for de tre lagene med pulver. Det gir 12 sveiseoperasjoner per lag, med 5 x 4 blokker i hvert lag. De 8 første bevegelsene per lag blir derfor deponert parvis og siste raden blir blokkene deponert en og en. Dette for å simulere en

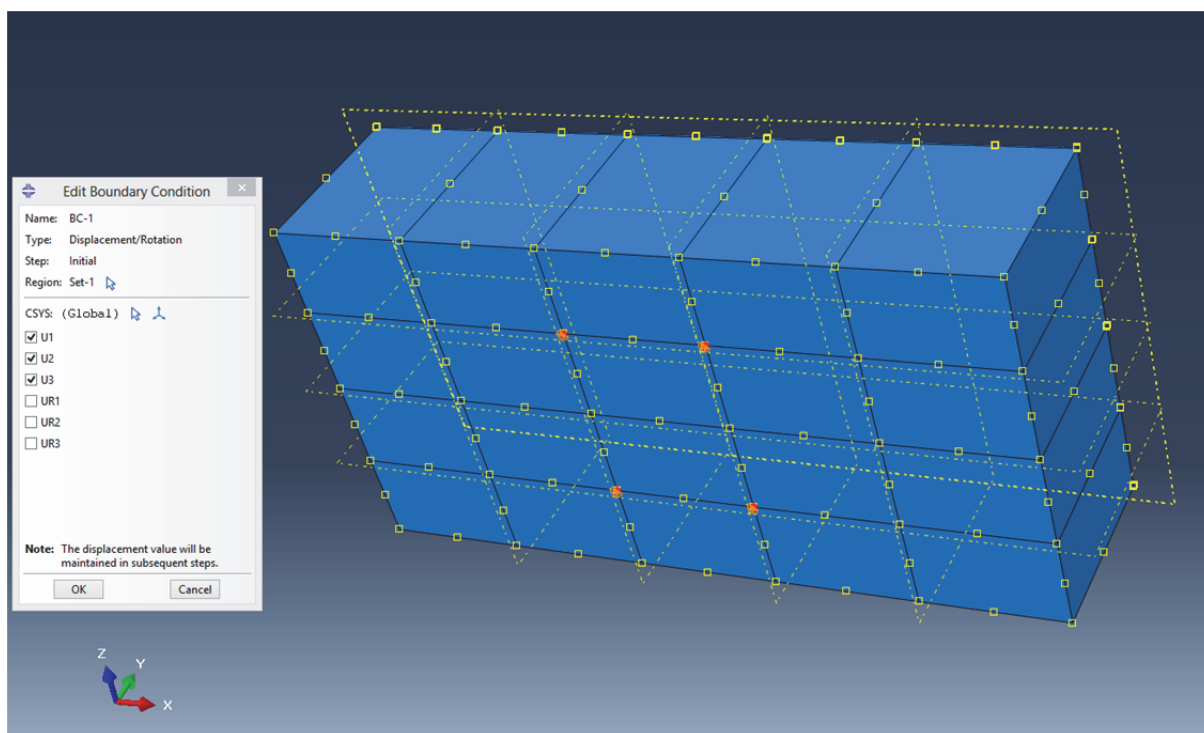


## Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell

forenklet øyeffekt. For en slik jobb tar det om lag 2 minutter for algoritmen til AWE å generere alle stegene å lage de to jobbene. Større jobber begynner fort å nærme seg begrensningene til programvaren. 36 sveisebaner gir, med de tre egendefinerte stegene, 77 og 112 Abaqus-steg i henholdsvis varmeoverføringsmodellen og den strukturelle modellen.

Siste steg før simulering er å legge på grensebetingelser som hindrer at komponenten beveger seg bort fra utgangspunktet sitt. Komponentene er festet med M3 skruer som har kontakt på undersiden i et gjenget hull som går 8 mm inn i komponenten. I virkeligheten er det fire hull under hver del da flere gjengetapper knakk under gjenging og ble sittende igjen inne i hullet. Det var derfor nødvendig å bore et sett med nye hull for å holde komponenten på plass til platen.

Eksperimentelt ble det forsøkt å sette grensebetingelsene til samme posisjon som de to hullene der skruenefestene er. Grensebetingelsene her ble satt til ingen forskyvning i X, Y eller Z retning og ingen rotasjon om disse aksene. Den mekaniske simuleringen resulterte i store dislokasjoner av modellen. Modellen og grensebetingelsene ble vurdert på nytt og deretter basert på erfaringer fra SINTEF Materialer og kjemi ble det valgt fire punkter i stedet for to på bunnplaten. I tillegg ble det satt begrensninger i X, Y og Z på alle punktene, men ingen begrensning på rotasjon da dette ikke skal være mulig med et slikt oppsett (se Figur 4.8). Grunnen til at komponenten i utgangspunktet ble festet med bare to skruer og ikke fire var for at komponentens sider skulle kunne deformeres mest mulig fritt. Tanken bak var at dette ville provosere frem mer ekstreme resultat. Innspenningen med fire punkter hindrer dette til en viss grad og det er verdt å notere seg at det kan være en feilkilde for analysen.



Figur 4.8 - Grensebetingelser, komponenten låses fast i fire punkter



### 4.4.6 Analysen

Det er viktig å kjøre jobben for varmeanalysen før en starter jobben for stressanalysen. Dette er fordi stressanalysen benytter seg av data fra varmeanalysen. Det er også viktig å sjekke at alle ekstra egenskaper som skal modelleres er med. Den strukturelle modellen bygges opp fra bunnen av. Tilleggspakken AWI og gjør at alle ekstra egenskaper som kan kjøres fra Abaqus må legges inn etter at den har generert skrittene.

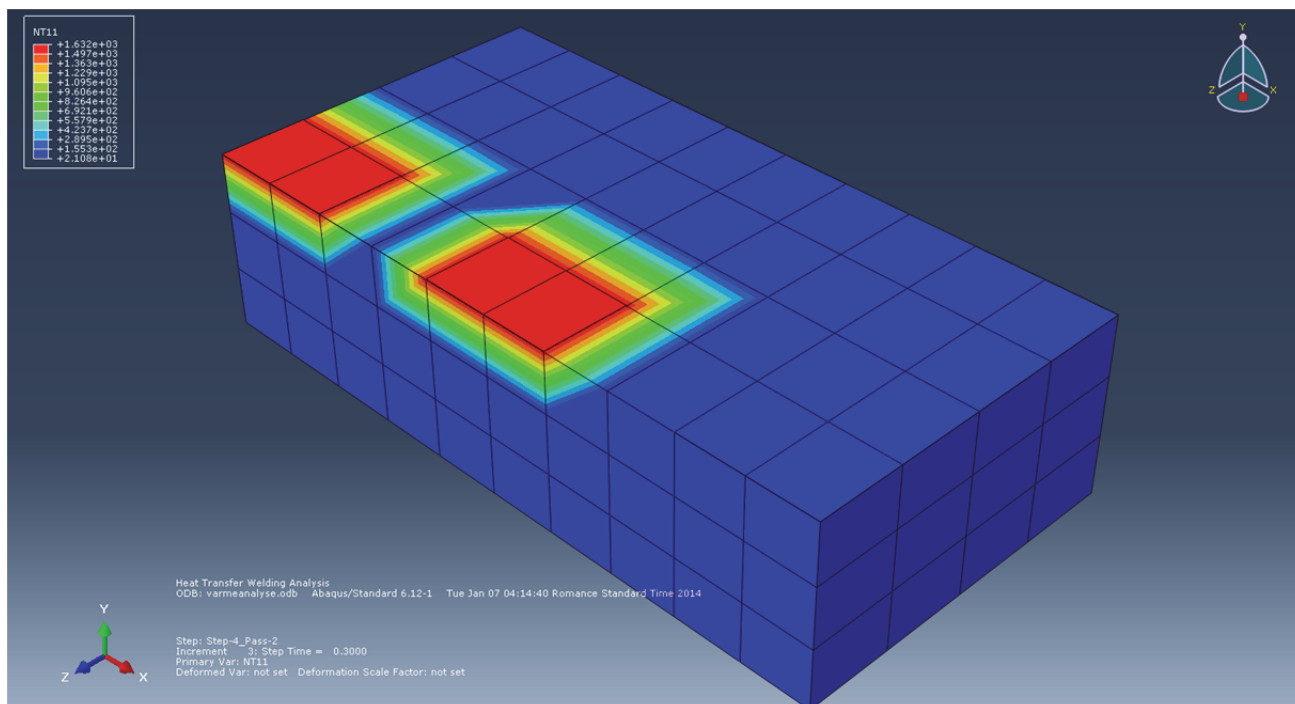
Tiden det tar for jobben å kjøre, variere med antall skritt og hvor fint mesh som er valgt. I dette eksempelet tok det om lag 10 minutter for varmeanalysen og om lag 50 minutter for stressanalysen å kjøre ferdig.

## 4.5 Eksperimentell simulering ved bruk av Abaqus

Første del av simulering med Abaqus er varmeanalysen. Simuleringen er ment å representere laseren i ALM ved teknikken LaserCUSING.

### 4.5.1 Varmeoverføringsanalysen

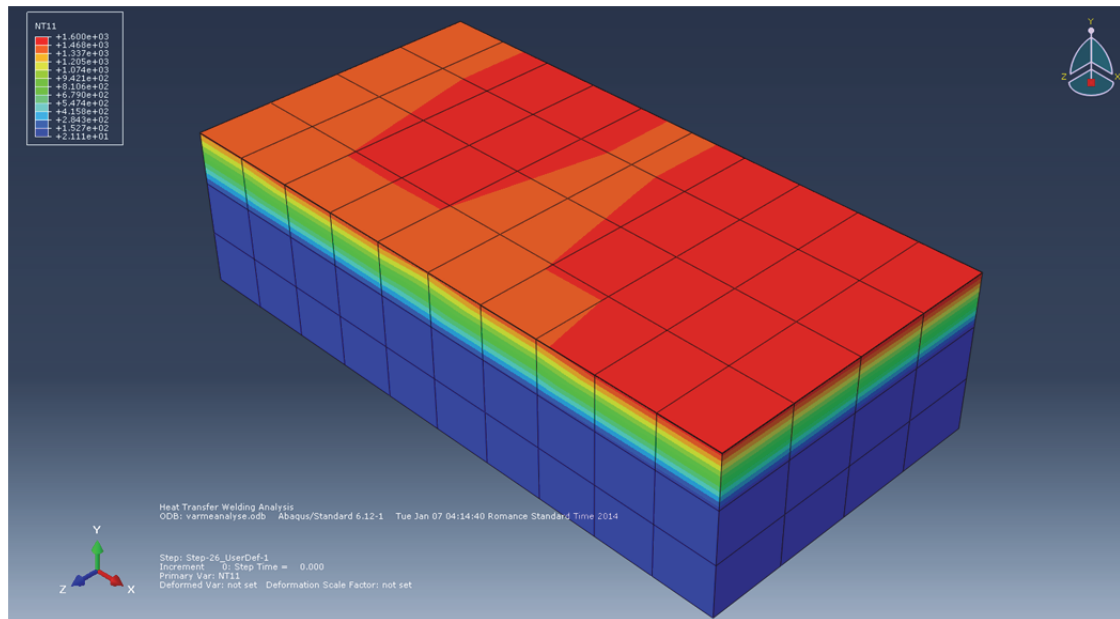
Oppvarmingen skjer hurtig opp til 1600 °C. Man kan se på Figur 4.9 hvordan varmen bres utover området der varmefluxen introduseres. Resten av materialet er på 21,1 °C.



Figur 4.9 - Laseroppvarmet område i simuleringen etter 0,3 sekunder

Etter hele det første laget er blitt skannet ser det ut som vist på Figur 4.10. Maksimal temperatur ligger her på 1600 °C. Varmen når om lag 3 mm ned i materialet.

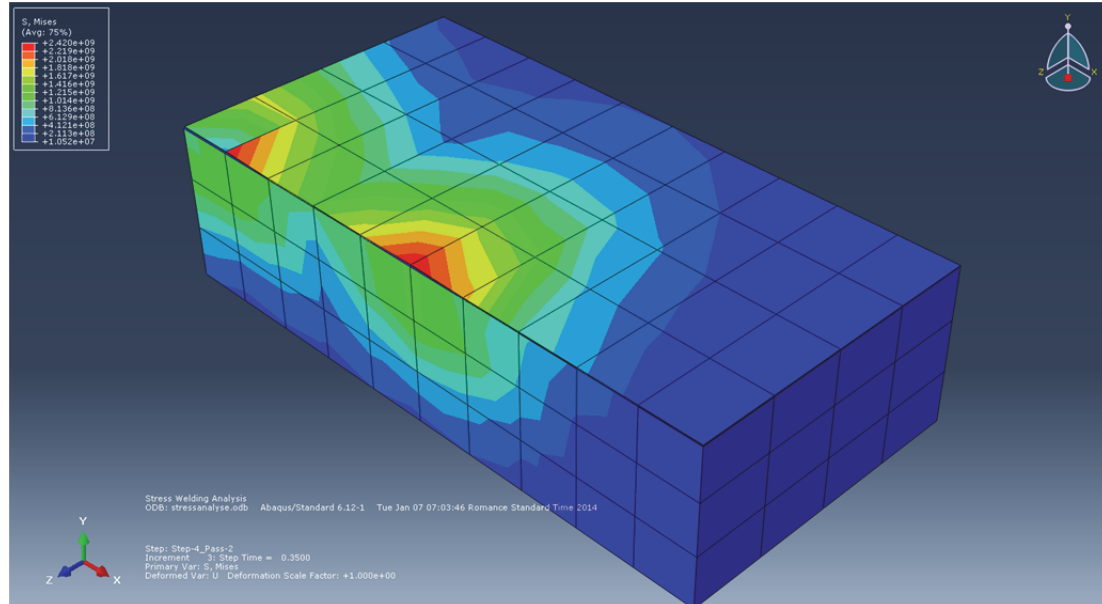
## Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell



Figur 4.10 - Første lag (30  $\mu\text{m}$ ) fullstendig skannet

### 4.5.2 Koplet spenningsanalyse

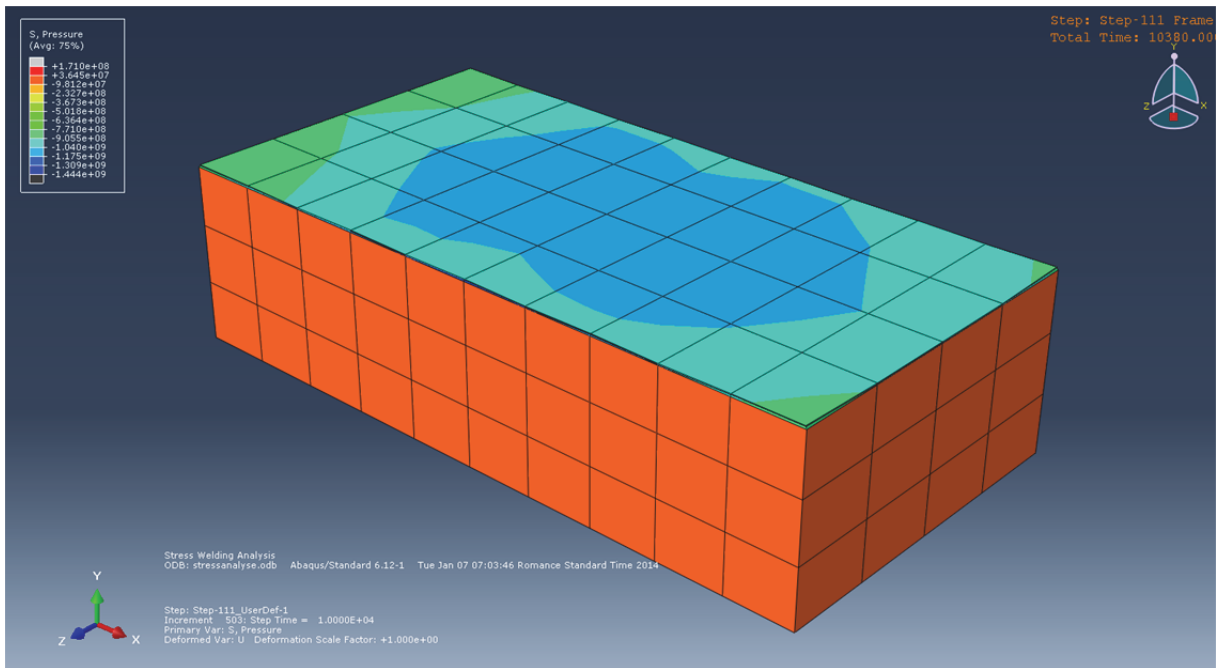
Resultatene fra spenningsanalysen bør ses i sammenheng med den termiske analysen, da den er basert på data fra denne. Figur 4.11 viser hvordan de indre spenningene i materialet fordeler seg etter 0,35 sekunder i simuleringen. Dette er like etter laseren har skannet området som vist i Figur 4.9.



Figur 4.11 - Spenninger i samme område som vist i Figur 4.9 etter 0,35 sekunder

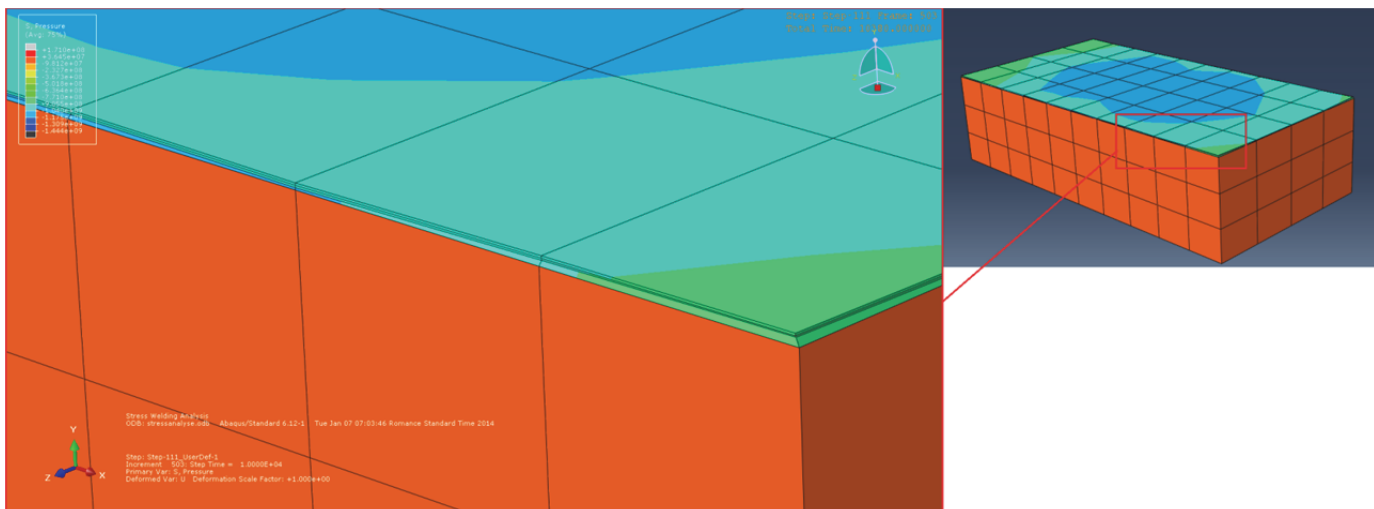
Etter at alle lagene er deponert, skannet og avkjølt viser Figur 4.12 hvordan trykkfordelingen er i delen. En kan se negativt trykk i topplaget og positivt i basedelen.

## Kapittel 4: Utvikling av numerisk modell



Figur 4.12 - Trykkfordelingen i prøven etter endt simulering

Nærmere observasjoner av modellen som etter endt simulering viser en bølget effekt av det additive påbygget, se Figur 4.13. I tillegg kan krymp og deformasjon av topplaget observeres.



Figur 4.13 - Nærbilde av effekter

Skannemønsteret kan være skyld i effektene som oppstår. Dette er diskutert av (Dai & Shaw, 2002).

## **5 Eksperimentelle undersøkelser**

### **5.1 Introduksjon**

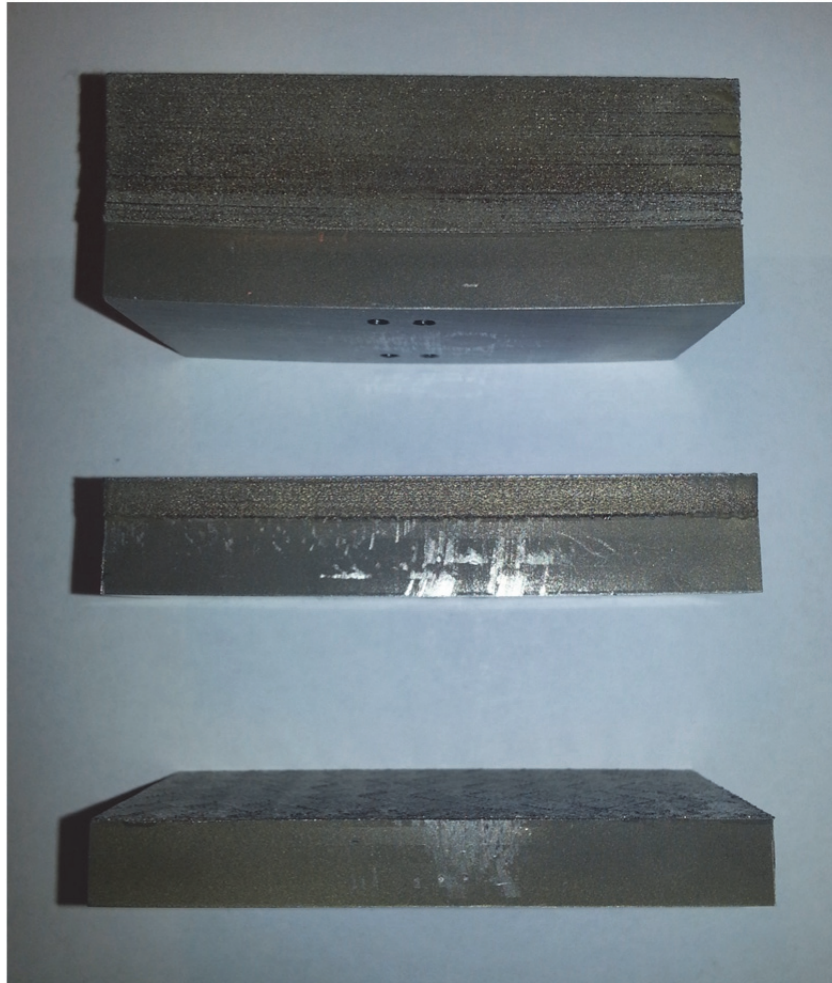
Målet for arbeidet har vært å produsere komponenter som det er mulig å måle deformasjoner på, samt eventuelle dannelser av sprekker. De er produsert additivt i IPKs egen additive maskin, M2 fra ConceptLaser. Komponentene er produsert i MARLOK C1650. Det har blitt valgt geometri på komponentene som forventes å gi store indre spenninger og dermed deformasjoner som kan måles. Dette kapittelet beskriver hvordan komponentene ble produsert, målemetoden som ble benyttet, behandling av måleresultatene og deretter er måleresultatene presentert.

### **5.2 Produksjon av komponenter**

Utgangspunktet var 17 kg MARLOK C1650 med mål på omtrent 205 x 110 x 82 mm. Denne ble kuttet i plater av størrelse 80 x 40 x 10 mm (L x B x H), se Appendix D: Tegning av basedel. Trådgnisting og sliping ble benyttet under produksjonen av platene for å minimere introduksjon av spenninger. Det ble boret to hull på undersiden av platene, hullene ble gjenget opp. Disse hullene var 8 mm dype og boret ut i en treakset fresemaskin for M3 gjenger. Flere gjengetapper knakk i forsøk på å gjenge opp hullene, så to nye hull ble boret på alle platene for å sikre at alle platene var like. Platene(baseplatene) ble så festet til en 20 mm tykk plate som deretter ble montert til oppspenningsjiggene til M2-maskinen.

Det ble bygget additivt oppå de fem baseplatene med forskjellige tykkelser for hver av dem. Den ene komponenten hadde tre lag (90  $\mu\text{m}$ ), de andre hadde additivt påbygg på 5, 10, 15 og 20 mm. Det ble benyttet en hybrid metode der man kombinerer en fresemaskin med probeverktøy sammen med oppspenningsjiggen til M2-maskinen for å definere referansepunkt for M2-maskinen. Metoden er under utvikling som en del av forskning på hybrid produksjon med ALM og fresing hos IPK. Metoden går ut på å frese av et fint lag for å få en kjent høyde på prøvene samtidig som overflaten blir ru nok til at laseren absorberes effektivt i det første laget. Ved å overføre dataene fra målingen i fresemaskinen samtidig som en beholder prøvene innspent i jiggen, får en et nøyaktig nullpunkt som utgangspunkt for den additive tilvirkningen. Selve produksjonen i M2-maskinen foregikk på normal metode. Dette innebærer at det første laget med pulver skannes tre ganger for å sikre full heft mellom basematerialet og pulveret.

Platen som ble benyttet som oppspenningsjigg dekket dessverre ikke hele pulverkammeret, noe som førte til at det ble et lite mellomrom mellom platen og enden på kammeret. Dette førte igjen til at når kniven gikk over for å fordele et pulverlag, så forsvant en del av pulveret ned i dette mellomrommet. Dette førte til at de komponentene lengst til venstre i kammeret (se Figur 4.4 i kapittel 4.4.2) ikke fikk tilstrekkelig med pulver for hvert lag. Komponentene med additivt påbygg på 15 mm måtte derfor forkastes. Komponentene med planlagt additivt påbygg på 10 mm ble stoppet på 5 mm da denne komponenten også viste seg å ikke få nok pulver. Den oppnådde ikke tilstrekkelig tykkelse på det ene hjørnet i et område på om lag 20 x 20 mm. Denne komponenten ble senere brukt til hardhetsmålinger. Resten av komponentene ble produsert som planlagt med tykkelse 90  $\mu\text{m}$ , 5 mm og 20 mm.



Figur 5.1 - Bildet av komponentene etter produksjon. Additivt påbygg fra topp til bunn; 20 mm, 5 mm, og 0,09mm



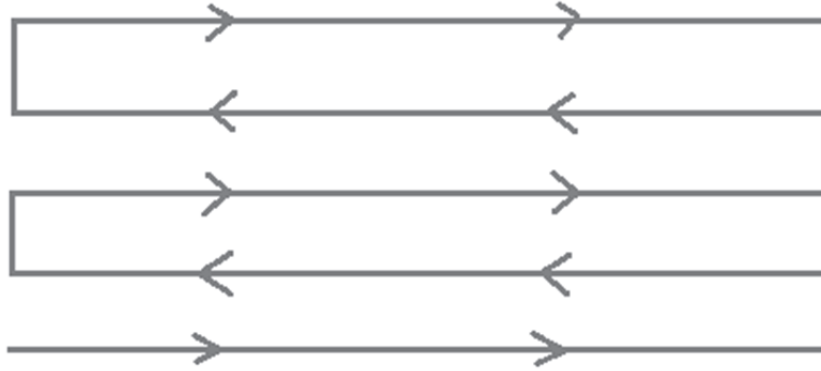
### 5.3 Målinger

Geometriske målinger av komponentene ble foretatt ved IPKs eget målelaboratorium. Målemaskinen som ble benyttet til målingene var en Leitz PMM-C 600. Dette er en høypresisjons koordinatmålemaskin som står plassert i et eget målerom med god temperaturregulering for minst mulig forstyrrelser på målingene. Dataene fra målingene ble eksportert i kommaseparerte verdier i klartekst. For videre analysering og plotting av disse dataene ble MATLAB benyttet.



**Figur 5.2 - Måling av prøver med Leitz PMM-C 600**

Prøvene ble plassert med toppflaten ned og baseplaten underside opp for måling som vist i Figur 5.2. Årsaken til dette er at toppflaten på prøvene var såpass ru av den additive produksjonen at målingene kunne bli unøyaktige. Undersiden var derimot fremdeles glatt fra slipingen. Prøvene ble holdt fast med kitt under måling for ikke å introdusere spenninger som kan oppstå med annen type oppspenning. En annen grunn til at målingene ble utført på undersiden var at man visuelt kunne se at denne siden var krummet, mens topplaget var mer plant. Figur 5.3 viser måleprobens bane for målingene.



Figur 5.3 - Måleprobens bane for målingene av overflaten

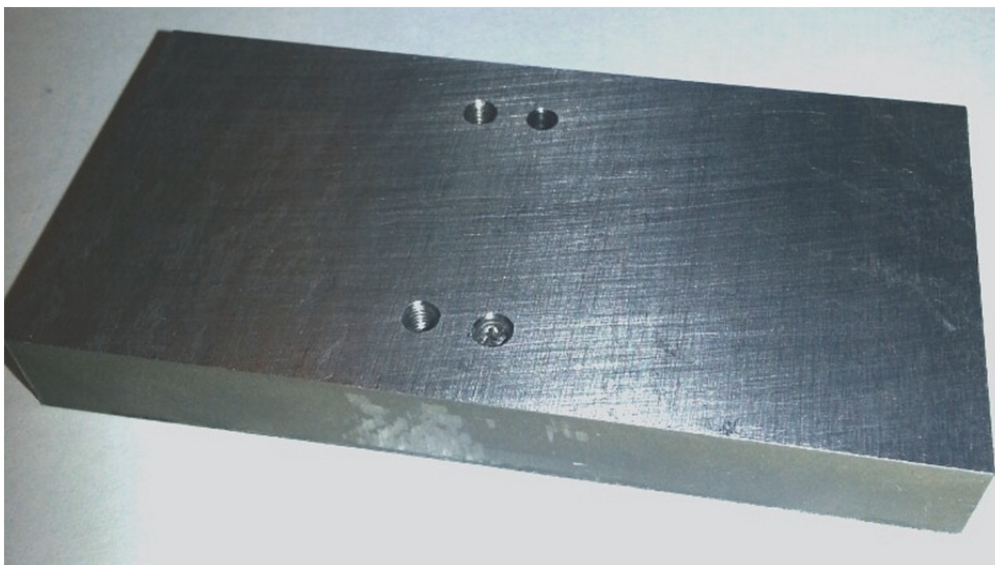
Det ble laget et script i MATLAB for å organisere dataene slik at de kunne plottes på en tilfredsstillende måte. MATLAB plotter data fra venstre mot høyre, linje for linje, så to av målelinjene måtte speilvendes. Deretter ble MATLABs plottfunksjon “surf” benyttet for å generere et bilde av overflaten basert på dataene fra målingene. Dataene ble så fargelagt som funksjon av høyden som ble målt. Måleresultatene er presentert i kapittel 5.4.

Det ble gjennomført hardhetsmåling på komponenten som var delvis ødelagt på grunn av manglende pulver (komponent med planlagt additivt påbygg på 10 mm). Resultatet av denne testen viste en hardhet på 542-546 Leeb D = 25-26 HRC (se Appendks C: ).

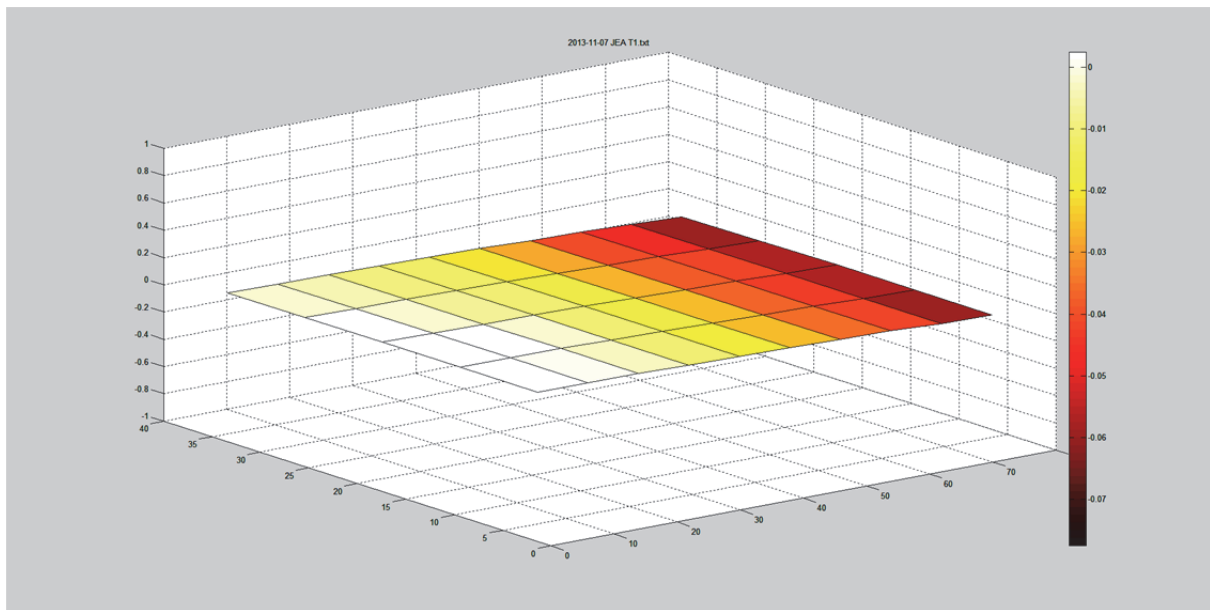
#### 5.4 Resultater fra produserte prøver

Målingene av de produserte komponentene viser at de alle er deformerte. Desto flere additive lag desto større er deformasjonene.

Komponenten med additivt påbygg på 90  $\mu\text{m}$  hadde svært små deformasjoner. Den er avbildet i Figur 5.4 og målingene er presentert i Figur 5.5.

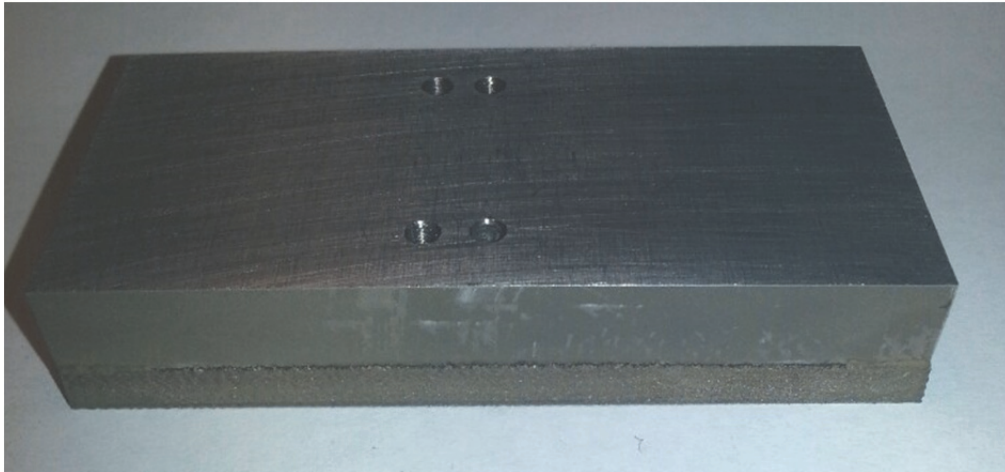


Figur 5.4 - Bilde av produsert komponent med 3 lag med bunnsiden vendt opp



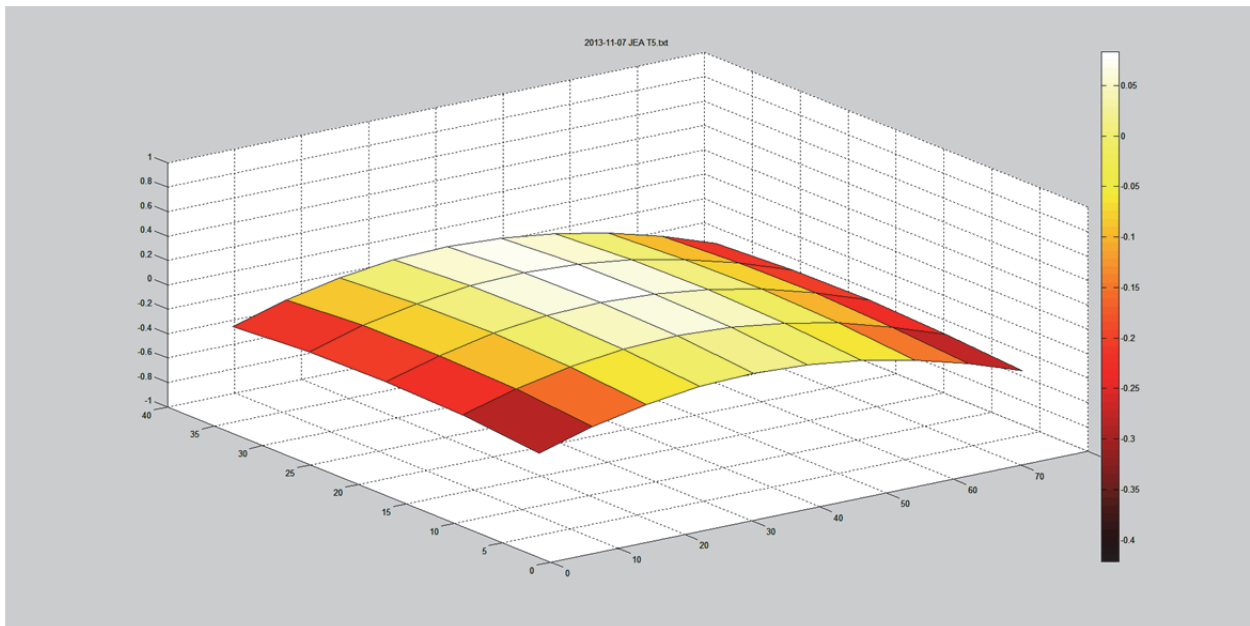
Figur 5.5 - MATLABplott fra målinger av komponent med 3 lag additivt maskinert

Komponenten med additivt påbygg på 5 mm hadde tydelige deformasjoner som kunne observeres visuelt. Den er avbildet i Figur 5.6. Målingene er presentert i Figur 5.7 og Figur 5.8.

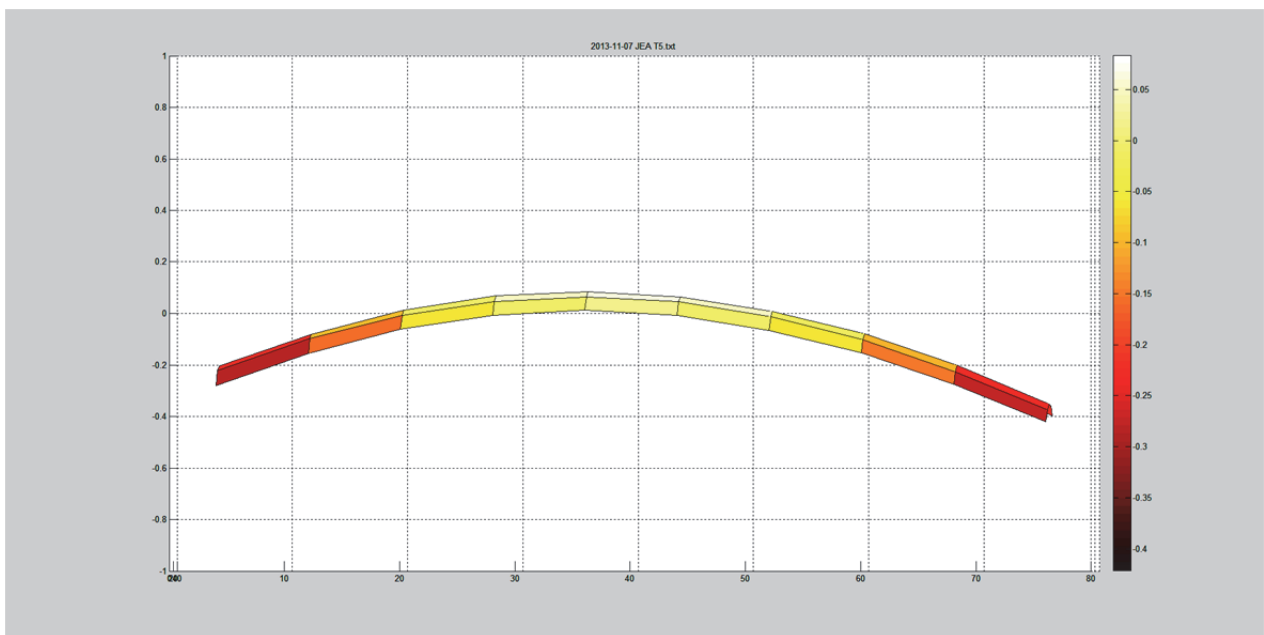


Figur 5.6 Bilde av produsert komponent med 5 mm additivt påbygg med bunnsiden vendt opp





Figur 5.7 - MATLABplott fra målinger av del med 5 mm additivt påbygg

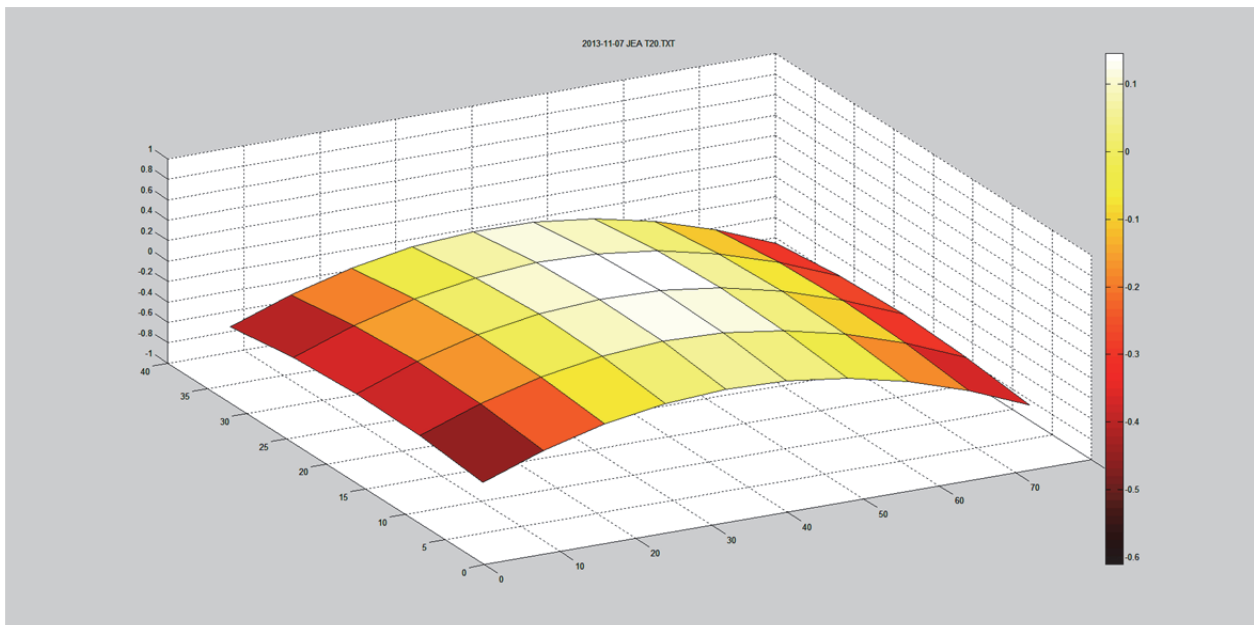


Figur 5.8 - MATLABplott i profil fra målinger av del med 5 mm additivt påbygg

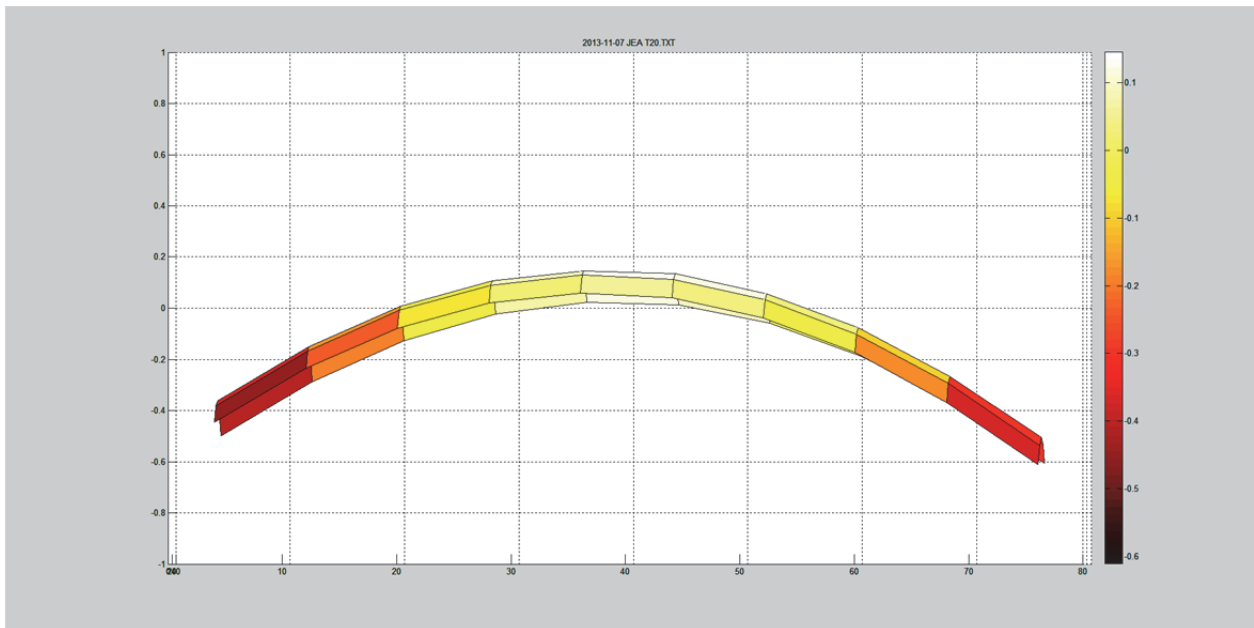
Komponenten med additivt påbygg på 20 mm hadde tydelige deformasjoner som kunne observeres visuelt. Den er avbildet i Figur 5.9. Målingene er presentert i Figur 5.10 og Figur 5.11.



Figur 5.9 - Bilde av produsert komponent med 20 mm additivt påbygg med bunnsiden vendt opp



Figur 5.10 - MATLABplott fra målinger av del med 20 mm additivt påbygg



Figur 5.11 - MATLABplott i profil fra målinger av del med 20 mm additivt påbygg

Av Figur 5.11 ser en at forskjellen mellom høyeste og laveste måling på over 0,7 mm. Den deformerte formen vises tydeligst på prøven med 20 mm additivt påbygg. Dette ble observert på samtlige prøver.

Observasjoner fra målingene:

- Mer deformasjon for økende tykkelse i det additive påbygget.
- Deformasjoner fra komponentene med 5 mm og 20 mm additivt påbygg kan observeres visuelt
- Det ble målt en høydeforskjell på alle komponentene fra den ene kortsiden til den andre. Høydeforskjellen ser ut til å være lik på alle de tre komponentene (om lag 0,1 mm).

## **6 Diskusjon**

De fysiske målingene av komponentene viser klart at komponentene er sterkt deformerte. Dette er kvantifisert gjennom nøyaktige målinger og kan ses med det blotte øyet på de mest deformerte komponentene. Deformasjonene er størst for komponentene med størst additivt påbygg.

Analysen med Abaqus indikerer samme oppførsel. Modellen som er utviklet i Abaqus kan brukes til å estimere deformasjoner. En videreutvikling av modellen vil kunne bidra til å estimere mulighet for sprekkdannelser forårsaket av restspenninger.

Hardhetsmålingene av de hybrid additivt produserte komponentene viser at hardheten er så lav som 25 HRC. Målingene er gjennomført på det additive påbygget av komponenten.

Materialegenskapene til MARLOK C1650 ("MARLOK® Longer die life -Better quality," 2008) oppgis å ha en hardhet på 28-32 HRC. Resultatene viser at det ikke foregår noen herding som følge av varmen i den additive prosessen der en smelter MARLOK C1650 i pulverform. Det er forventet å oppnå en hardhet mellom 47 og 51 HRC ved herding på 525 °C over 6 timer. Dette viser at komponentene må herdes etter at produksjonen er fullført.

De viktigste funnene fra litteraturstudiet når det gjelder muligheter for å redusere indre spenninger ved hybrid tilvirkning var å benytte forvarming av baseplate og pulver, samt oppdeling av skannemønster under produksjon. Disse metodene kan videreutvikles for å etablere spesifikke retningslinjer.

Fra simuleringen er det observert en bølget effekt. Dette kan være som følge av skannebanen til laseren i simuleringen.

### **6.1 Videre arbeid**

For videre arbeid er det en del å hente på å utvide Abaqus modellen. Ved å introdusere subrutiner kan man mye mer nøyaktig simulere ALM. Dette fordi man får introdusert noen flere aspekter av simuleringen som ikke tas med i den nåværende modellen. En videreutvikling av modellen vil kunne bidra til å estimere mulighet for sprekkdannelser forårsaket av restspenninger.

Det er også en god tanke å utføre fysiske målinger av prøvene for å kvantifisere restspenningene. Dessverre var det ikke midler tilgjengelig ved dette prosjektet for gjennomføring av fysiske målinger for restspenninger. For måling av restspenninger kan flere av metodene i kapittel 2.6 benyttes.

## **7 Oppsummering**

### **7.1 Konklusjon**

Det er blitt gjennomført et litteraturstudium på spenninger og deformasjoner i additivt/hybrid tilvirkede komponenter. Flere av mekanismene som gir restspenninger er avdekket i litteraturstudiet. Spesielle effekter som kan gi deformasjoner er også blitt redegjort for i oppgaven.

Deler er blitt produsert komponenter i IPKs ConceptLaser-maskin. Disse komponentene er blitt målt på overflaten og studert. Det er også tatt hardhetsmålinger av materialet som er bygget additivt. Et MATLABscript for tolkning av rå måledata og plotting av disse er laget.

En teoretisk metode for estimering av restspenninger og deformasjoner er demonstrert ved bruk av FEM-simuleringsverktøyet Abaqus. Her ble tilleggsmodulen Abaqus Welding Interface benyttet til å kjøre en koplest analyse av temperatur og krefter ved bruk av “element death and birth”-teknikken. Videre er det diskutert hvordan denne modellen kan utvides for å bli mer nøyaktig og omfatte flere effekter som oppstår i ALM.

Flere metoder for å redusere indre spenninger ved hybrid tilvirkning er gjennomgått i litteraturstudiet. Det er ikke mulig å etablere spesifikke retningslinjer basert på funnene i oppgaven. Videre arbeid er anbefalt for å nå dette målet.

## 8 Referanser

- ASTM. (2008). E837, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Buttle, D. J. (2013). Magnetic Methods *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 225-258): John Wiley & Sons, Ltd.
- Craeghs, T., Clijsters, S., Yasa, E., Bechmann, F., Berumen, S., & Kruth, J.-P. (2011). Determination of geometrical factors in Layerwise Laser Melting using optical process monitoring. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(12), 1440-1446. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.06.016>
- Dai, K., & Shaw, L. (2002). Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns. *Rapid Prototyping Journal*, 8(5), 270-276.
- Das, P. (1991). *Lasers and optical engineering*. New York: Springer.
- Fjær, H., Aune, R., M'Hamdi, M., & Akselsen, O. (2009). Modeling the development of stresses during single and multi-pass welding of a ferritic steel in an instrumented restraint cracking test. *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes-XII*, 571-578.
- Gusarov, A. V., Pavlov, M., & Smurov, I. (2011). Residual Stresses at Laser Surface Remelting and Additive Manufacturing. *Physics Procedia*, 12, Part A(0), 248-254. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.032>
- Hill, M. R. (2013). The Slitting Method *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 89-108): John Wiley & Sons, Ltd.
- Holden, T. M. (2013). Neutron Diffraction *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 195-223): John Wiley & Sons, Ltd.
- Kruth, J. P., Mercelis, P., Vaerenbergh, J. V., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26-36.
- . MARLOK® Longer die life -Better quality. (2008). In M. M. T. Oy (Ed.). <http://www.metso.com/MEP/home.nsf/FR?ReadForm&ATL=/MEP/info.nsf/WebWID/WTB-051025-22570-A42E5>.
- Mercelis, P., & Kruth, J.-P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 254-265. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540610707013>
- Murray, C. E., & Cevdet Noyan, I. (2013). Applied and Residual Stress Determination Using X-ray Diffraction *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 139-161): John Wiley & Sons, Ltd.
- Nelson, D. V. (2013). Optical Methods *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 279-302): John Wiley & Sons, Ltd.
- Oakley, P. J. (1992). *Laser processing in manufacturing*: Springer.
- Prime, M. B., & DeWald, A. T. (2013). The Contour Method *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 109-138): John Wiley & Sons, Ltd.
- Roberts, I. A. (2012). *Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing*. University of Wolverhampton. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2436/254913>
- Roberts, I. A., Wang, C. J., Esterlein, R., Stanford, M., & Mynors, D. J. (2009). A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), 916-923. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.07.004>
- Schaaf, P. (2010). *Laser Processing of Materials: Fundamentals, Applications and Developments*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schajer, G. S., & Ruud, C. O. (2013). Overview of Residual Stresses and Their Measurement *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 1-27): John Wiley & Sons, Ltd.
- Schajer, G. S., & Whitehead, P. S. (2013). Hole Drilling and Ring Coring *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 29-64): John Wiley & Sons, Ltd.

## *Kapittel 8: Referanser*

- Smith, D. J. (2013). Deep Hole Drilling *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 65-87): John Wiley & Sons, Ltd.
- Withers, P. J. (2013). Synchrotron X-ray Diffraction *Practical Residual Stress Measurement Methods* (pp. 163-194): John Wiley & Sons, Ltd.
- Yaakoubi, M., Kchaou, M., & Dammak, F. (2013). Simulation of the thermomechanical and metallurgical behavior of steels by using ABAQUS software. *Computational Materials Science*, 68(0), 297-306. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.10.001>
- Yakovlev, A., Trunova, E., Grevey, D., Pilloz, M., & Smurov, I. (2005). Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), 15-24. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.070>

## 9 Appendiks

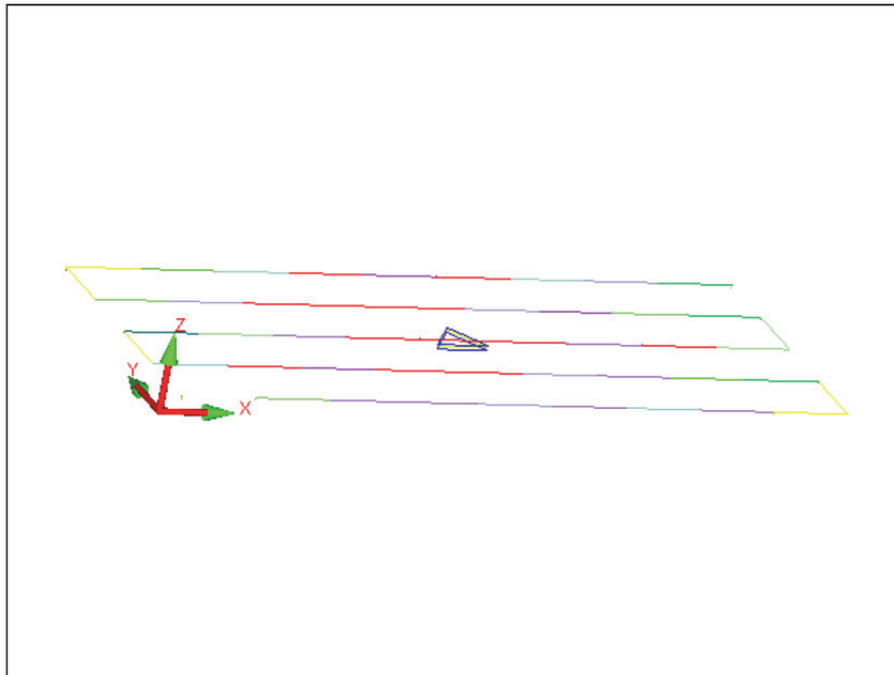
### Appendiks A: Målinger



Institutt for produksjons-  
og kvalitetsteknikk

DATE=07.11.2013                      TIME=18:09:40  
PART NAME : 2013-11-07 JEA  
REV NUMBER :  
SER NUMBER : T1  
STATS COUNT : 1

AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	0.0000	0.0183	0.0100	0.0000	0.0183	0.0083	



PN=2013-11-07 JEA                      END OF MEASUREMENT FOR                      SN=T1  
TOTAL # OF MEAS =1                      # OUT OF TOL =1                      # OF HOURS =00:02:42

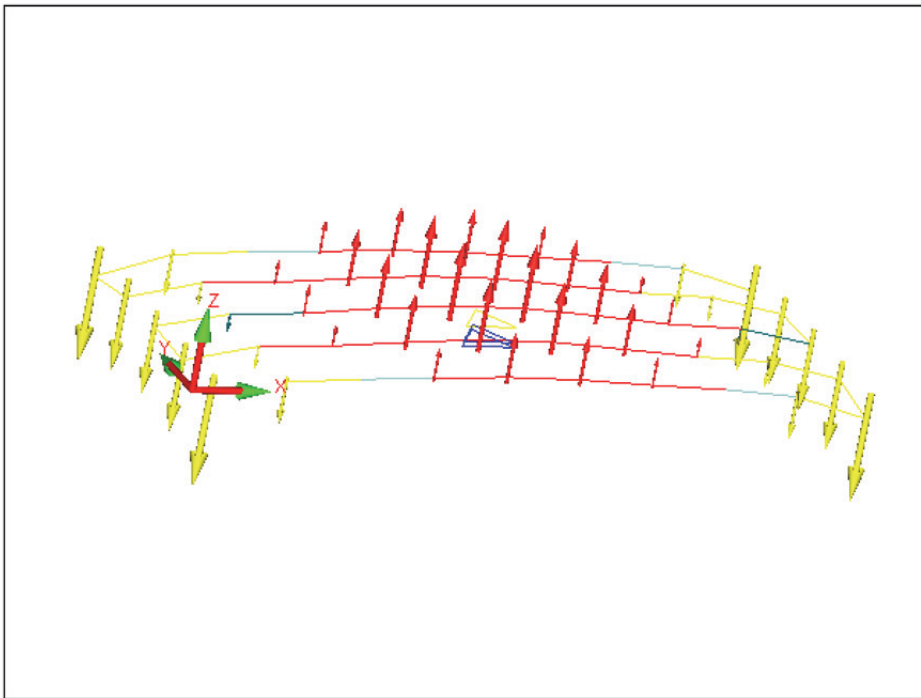




Institutt for produksjons-  
og kvalitetsteknikk

DATE=07.11.2013  
PART NAME : 2013-11-07 JEA  
REV NUMBER :  
SER NUMBER : T5  
STATS COUNT : 1  
TIME=17:46:34

MM	DIM FLAT_1= FLATNESS OF PLANE PLN_1					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M	0.0000	0.4246	0.0100	0.0000	0.4246	0.4146



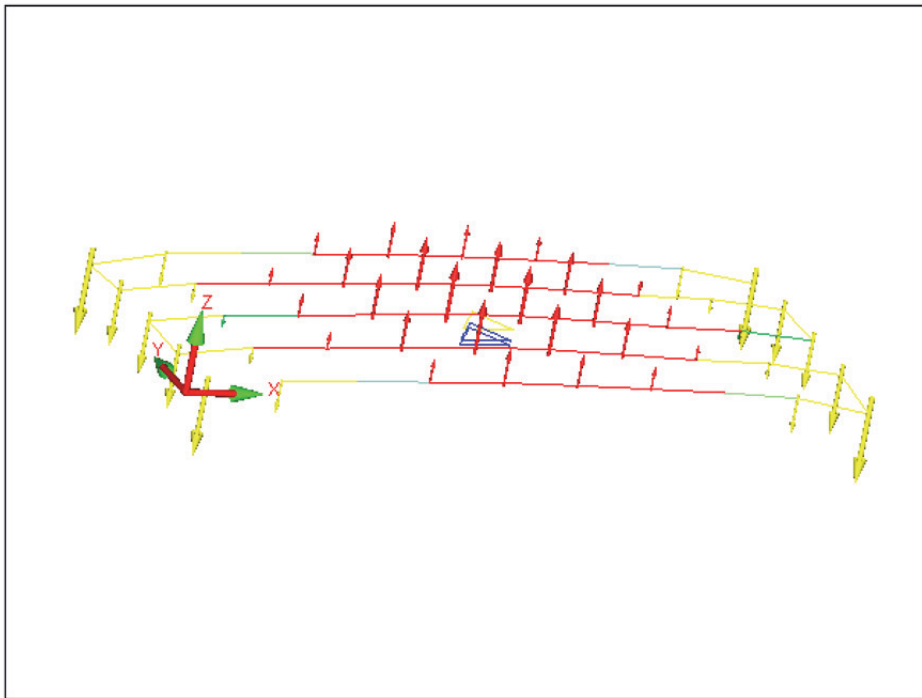
PN=2013-11-07 JEA  
TOTAL # OF MEAS =1  
END OF MEASUREMENT FOR  
DWG=  
# OUT OF TOL =1  
SN=T5  
# OF HOURS =00:02:45



Institutt for produksjons-  
og kvalitetsteknikk

DATE=07.11.2013 TIME=18:02:54  
PART NAME : 2013-11-07 JEA  
REV NUMBER :  
SER NUMBER : T5-slip  
STATS COUNT : 1

MM	DIM FLAT_1= FLATNESS OF PLANE PLN_1					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M	0.0000	0.3244	0.0100	0.0000	0.3244	0.3144



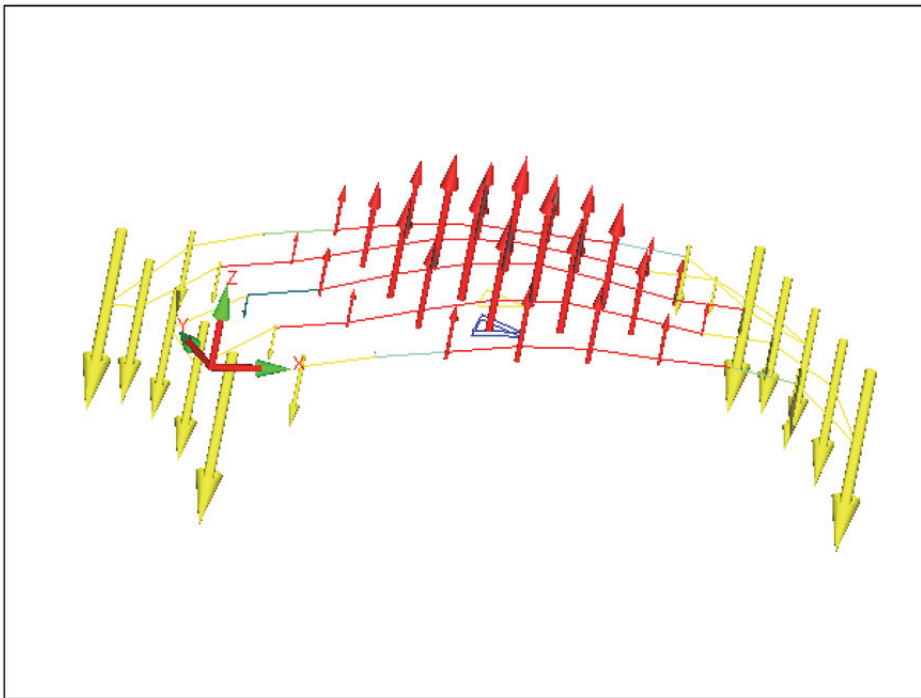
END OF MEASUREMENT FOR  
PN=2013-11-07 JEA DWG= SN=T5-slip  
TOTAL # OF MEAS =1 # OUT OF TOL =1 # OF HOURS =00:02:39



Institutt for produksjons-  
og kvalitetsteknikk

DATE=07.11.2013  
PART NAME : 2013-11-04 JEA  
REV NUMBER :  
SER NUMBER : T20  
STATS COUNT : 1  
TIME=17:34:55

MM	DIM FLAT_1= FLATNESS OF PLANE PLN_1					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M	0.0000	0.6979	0.0100	0.0000	0.6979	0.6879



PN=2013-11-04 JEA  
TOTAL # OF MEAS =1  
END OF MEASUREMENT FOR  
DWG=  
# OUT OF TOL =1  
SN=T20  
# OF HOURS =00:02:11

### **Appendks B: Matlabscript for tolking og plotting av rå måledata**

% Skript for å gjøre om data fra kommaseparert .txt-fil til matlabvariabler for deretter å plotte opptil 4 filer samtidig i ett vindu. Skriptet har grafisk brukergrensesnitt.

```
clc
clear all
close all

for teller=1:4

[filename, directory] = uigetfile('../*.txt');
cd(directory)
num=importdata(filename);

data(:,1)=num.data(:,7);
data(:,2)=num.data(:,8);
data(:,3)=num.data(:,9);

k=1;
for i=1:5
    for j=1:10
        x(i,j)=data(k,1);
        k=k+1;

    end
end

x(2,:)=fliplr(x(2,:));
x(4,:)=fliplr(x(4,:));

k=1;
for i=1:5
    for j=1:10
        y(i,j)=data(k,2);
        k=k+1;
    end
end

y(2,:)=fliplr(y(2,:));
y(4,:)=fliplr(y(4,:));

k=1;
for i=1:5
    for j=1:10
        z(i,j)=data(k,3);
        k=k+1;
    end
end

z(2,:)=fliplr(z(2,:));
z(4,:)=fliplr(z(4,:));

%endre disse kommandoene hvis du vil ha annerledes grafikk
```

## Kapittel 9: Appendiks

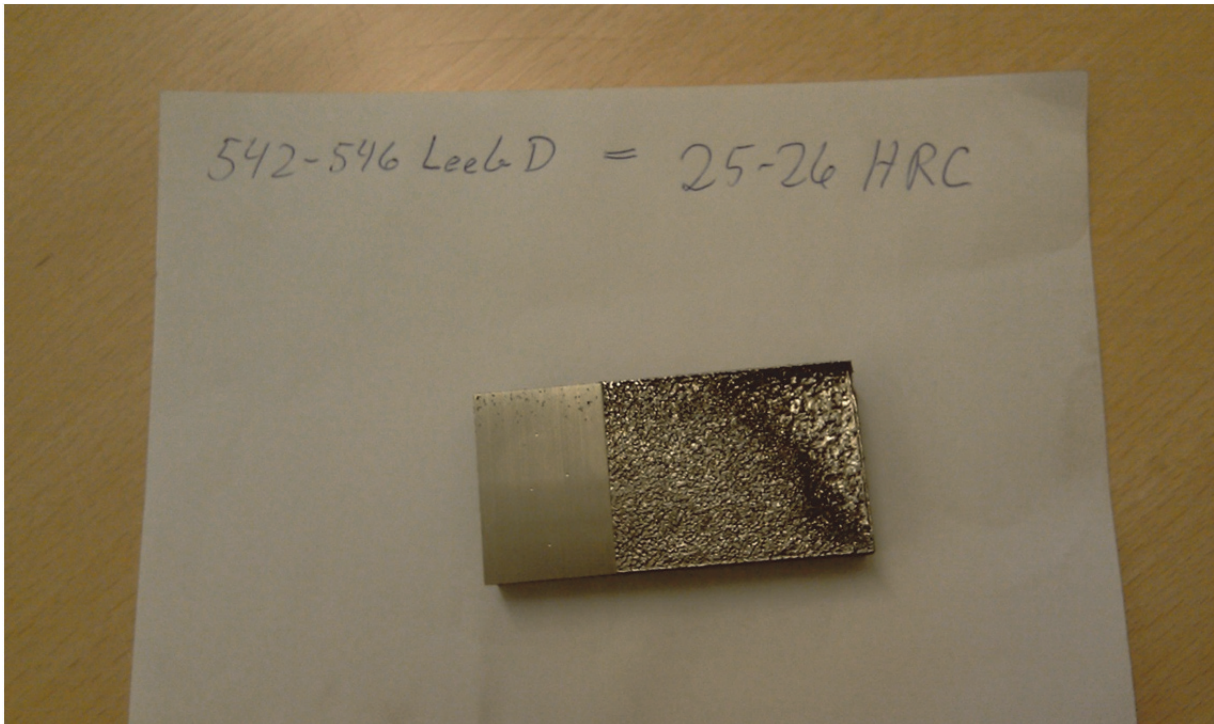
```
subplot(2,2,teller)
surf(x,y,z)
hold on
grid on
axis([0 80 0 40 -1 1])
title(filename)
colormap(hot)

if teller~=4
% Construct a questdlg with three options
choice = questdlg('Vil du plotte flere filer samtidig?', ...
    'Plotte flere filer?', ...
    'Ja','Nei','Ja');
% Handle response
switch choice
    case 'Ja'
        nyrunde = 1;
    case 'Nei'
        nyrunde = 0;
end
end

if nyrunde==0;
    break
end

end
```

### Appendiks C: Hardhetsmåling



Appendks D: Tegning av basedel

