

# Additiv Tilvirkning som Produksjonsmetode for Verktøyholdere

**Erling Grøstad**

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Knut Sørby, IPK

Medveileder: Vegard Brøtan, IPK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk



## Forord

Denne masteroppgaven har blitt skrevet som avslutningen på et 2-årig sivilingeniørstudium på Produktutvikling og Produksjon ved Institutt for Produksjons- og Kvalitetsteknikk (IPK), fakultet for Ingeniørvitenskap og Teknologi (IVT) ved Norges Tekniske og Naturvitenskaplige Universitet (NTNU). Masteroppgaven teller 30 studiepoeng og har blitt gjennomført våren 2016. Hovedveileder for prosjektet var Professor Knut Sørby og medveileder PhD. Vegard Brøtan ved IPK. Masteroppgaven ble gjort som en videreføring av arbeid gjort i sammenheng med fordypningsprosjekt høsten 2015, og omfatter additiv tilvirkning som produksjonsmetode av skjærhoder til dreining. Arbeidet har vært svært lærerikt og inspirerende og jeg ønsker å rette en stor takk til mine veiledere for hjelpen jeg har fått.

Min kontaktperson i Sandvik Teeness, Kristoffer Østvik Bjørnstad, har vært til stor hjelp med både praktisk og teoretisk arbeid. Jeg vil derfor å rette en stor takk til både han og andre ansatte ved Sandvik Teeness som har bistått med hjelp og råd.

Trondheim, 10.06.2016

---

Erling Grøstad

## Sammendrag

Additiv tilvirkning (AM) er en produksjonsmetode der en lagvis bygger opp komponenter basert på informasjon fra en 3-dimensjonal modell uten behov for å først produsere verktøy som for eksempel støpeformer eller ekstruderingsdyser. AM har en høy geometrisk frihet og metoden er spesielt egnet til å produsere komplekse indre geometrier og kanaler ikke mulig å produsere ved bruk tradisjonelle metoder.

Hensikten med dette arbeidet har vært å undersøke hvordan AM kan benyttes som en produksjonsmetode for å lage verktøyholdere til dreining, såkalte skjærhoder. Arbeidet har blitt gjort i samarbeid med bedriften Sandvik Teeness som produserer vibrasjonsdempende verktøyholdere under varemerket Silent Tools®. Under maskinering av vanskelige materialer kan det være kritisk for et godt resultat med god smøring og kjøling av skjæresonen. Det ble i arbeidet undersøkt om den geometriske friheten knyttet til AM kunne brukes til å bedre fremføringen av skjærevæske til skjærspissen. Ved å ikke være bundet til tradisjonelle designhensyn kan man ved AM i større grad utforme produkter slik at man bedre balanserer egenskapene styrke og vekt. Redusert vekt for et skjærhode vil kunne bedre dempeegenskapene til borstangen den er festet til.

Første del av arbeidet gikk ut på å vurdere ytelsen til additivt tilvirkede dyser (AM-dyser) opp mot finmaskinerte dyser (HP-dyser) som brukes i enkelte av dagens produkter. Et forsøk ble gjennomført der fem ulike AM-dyser ble sammenliknet mot en HP dyse påsatt skjærevæsketrykk mellom 10 og 70 bar. Væskestrålene produsert ble så vurdert opp mot hverandre. Ytelsen til AM-dysene ble vurdert som tilstrekkelig til bruk i små skjærhoder der det ikke er rom for å montere HP-dyser og der avstanden mellom dyseåpning og skjærspiss er kort. Videre ble det utviklet et skjærhodedesign med lavere vekt utformet ved hjelp av verktøy for topologi-optimalisering og konstruksjon av lettvektstrukturer. Skjærhodet ble designet med en innebygget spylekanal og dyse rettet mot skjærspissen. Prototyper av dette skjærhodet ble bygget, maskinert og testet. Testene viste dårligere spyleegenskaper enn for dysene produsert innledningsvis.

En produksjonsprosess foreslått for skjærhodet som ble designet og det ble gjennomført et kostnadsestimat av produksjonen. Flere ulike løsninger for hvordan produksjonen skulle gjennomføres med tanke på optimalt samspill mellom additiv og subtraktiv tilvirkning ble vurdert. Den beste løsningen ble vurdert som en hybrid prosess der man maskinerer deler av skjærhodet i forkant av AM prosessen for så å bygge videre på dette. Produksjonen dro nytte av et pallsystem for å hurtig og nøyaktig kunne spenne opp skjærhodene for maskinering etter avsluttet AM-prosess.

## Summary

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing technology building components layer by layer from 3-dimensional models without the need for part specific tooling. AM have a high degree of geometrical freedom and is in particular suited for the manufacture of complex internal structures and channels not possible to manufacture using traditional methods.

This work has been aimed at investigating how AM can be utilized as a to produce end-use parts, and specifically tool holders for lathes. The project has been conducted in collaboration with Sandvik Teeness, a local manufacturing business, producing dampened tools under the trademark Silent Tools®. When working with hard-to-machine materials sufficient cooling and lubrication of the cutting zone can be crucial. It was investigated how the geometric freedom achievable by AM could be utilized to improve the delivery of cutting fluid to the tool tip. As a result of not being chained by the manufacturing constraints of traditional manufacturing components formed by AM can to a higher degree reduce weight without compromising strength. A reduction of weight in a tool holder will affect the performance of the dampened boring bar the tool head is mounted to.

Firstly, the performance of additively manufactured nozzles (AM-nozzles) were compared to high performance nozzles (HP-nozzles) that are implemented in some of Sandvik Teeness' current tool heads. Five different AM-nozzles and one HP-nozzle were built and tested with cutting fluid at pressures between 10 and 70 bar. The fluid spray of the tested nozzles was measured and compared. The performance of the AM-nozzles was considered sufficient for use in small tool heads where the distance from the nozzle orifice to tool tip is short and there is not enough space to implement HP-nozzles. Secondly, a lightweight tool holder design suitable for AM was developed utilizing topology optimization software and software for design of lightweight structures. An AM coolant nozzle directed towards the tool tip was also built into the tool holder. Prototypes of this tool holder was build, machined and tested. The nozzle performance in the prototypes was observed as lower compared to the preliminary nozzle test.

A production process was developed for the manufacture of the optimized tool holder and a cost estimate was conducted. Several possible solutions were investigated aimed at streamlining the production and balancing the additive and subtractive processes. The preferred solution was a hybrid process where a part of the tool holder is machined in advance of the AM process, and the remaining geometry is built additively on top of this. The production uses a pallet system allowing fast and repeatable work holding of several tool holders simultaneously in a 5-axis mill after the AM build is finished.

## Innhold

Forord .....	i
Sammendrag .....	ii
Summary .....	iii
Figurliste .....	vi
Tabelliste .....	vii
Forkortelser .....	viii
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Dagens løsning .....	1
1.3 Dagens produksjon .....	2
1.4 Oppgavens fokusområder .....	3
1.5 Problemstillinger .....	3
1.6 Formål .....	3
2 Litteraturstudie .....	4
2.1 Additiv tilvirkning .....	4
2.1.1 Innledning .....	4
2.1.2 Pulverbad teknikk (PBF) .....	4
2.1.3 Byggeprosessen og prosessparametere .....	5
2.1.4 Postprosessering .....	6
2.1.5 Hybrid tilvirkning .....	8
2.1.6 Prosess- og kvalitetskontroll .....	9
2.1.7 Standardisering av AM .....	10
2.1.8 Programvare og filformater .....	10
2.2 Materialvalg .....	12
3 Additiv tilvirkning av dyser .....	14
3.1 Introduksjon .....	14
3.2 Teori dyser .....	15
3.3 Praktisk dyseforsøk .....	18
3.3.1 Valg av pumpesystem: .....	18
3.3.2 Dyseutforming .....	20
3.3.3 Bygging av dyser .....	20
3.3.4 Gjennomføring av forsøk og resultater .....	21

3.3.5	Diskusjon .....	27
3.3.6	Konklusjon dyseutforming .....	29
4	Design av nytt skjærhode.....	30
4.1	Innledning .....	30
4.2	Topologi-optimalisering av skjærhode .....	30
4.3	Lettveiktsstruktur .....	36
4.4	Eksport for FEA .....	39
4.5	Diskusjon.....	41
5	Produksjon av prototyp .....	44
5.1	Testing av prototyp.....	46
5.1.1	Metode .....	46
5.1.2	Resultater og diskusjon .....	46
6	Utvikling av AM produksjonsprosess for skjærhoder .....	48
6.1	Prosessplanlegging for skjærhodeproduksjon .....	49
6.1.1	Produksjonskrav ( <i>Manufacturing requirements</i> ).....	49
6.1.2	Teknologivalg.....	50
6.1.3	Prosessvalg .....	50
6.1.4	Maskinvalg.....	52
6.1.5	Delprosesser .....	52
6.1.6	Setups.....	53
6.1.7	Oppspenning (Work holding) .....	53
6.1.8	Gjennomføringsrekkefølge.....	56
6.2	Preparering .....	57
6.2.1	Deposition model (NNS Near net shape) .....	57
6.2.2	Oppspenningspreparering.....	58
6.2.3	Maskinerings-preparering.....	59
6.2.4	AM preparering .....	60
6.2.5	Preparering varme- og overflatebehandling.....	60
6.3	Produksjon .....	61
6.4	Fordeler og ulemper med produksjonsprosessen.....	61
6.5	Produksjonskostnad .....	63
7	Videre arbeid.....	66
8	Konklusjon.....	68

9	Referanser.....	69
10	Vedlegg.....	71

## Figurliste

Figur 1.1, (a) 16 mm skjærhode med spylespor, (b) skjærhode med vinklede kanaler, (c) skjærhode med rettlinjert spylekanal. ....	2
Figur 2.1 PBF prosessen. (Gibson, 2015).....	5
Figur 2.2, Grafisk fremstilling av sammenhengen mellom overflateruhet og orientering (Thomas, 2009).....	7
Figur 2.3, Den typiske arbeidsflyten ved hybrid produksjon av innsats til sprøytstøping. De forberedende operasjonene til AM byggingen markert med * er anbefalt å holde til et minimum, eller unngå fullstendig. (Bovie, 2011).....	9
Figur 2.4, Hardhet og flytegrense for ulike materialer kommersielt tilgjengelig for AM ( <a href="http://www.metal-am.com/introduction_to_metal-additive_manufacturing/Metal_powders">http://www.metal-am.com/introduction_to_metal-additive_manufacturing/Metal_powders</a> 19.11.15).....	12
Figur 2.5, Anbefalt varmebehandling for CL 50WS (a) og tilhørende kurve for hvordan herdetemperatur påvirker hardhet (b) (Concept-Laser, 2011).....	13
Figur 3.1, Skjærhode med HP-dyser.....	14
Figur 3.2, Dysegeometri (McCarthy and Molloy, 1974).....	15
Figur 3.3, Adapter for slangekobling. (Kristoffer Bjørnstad, 2016).....	19
Figur 3.4, Sprengtegning av dyse og slangekobling. ....	19
Figur 3.5, Korrodert dyse etter trådgnisting sammenliknet med trådgnistet og sandblåst dyse. ....	21
Figur 3.6, Måling av spredningsvinkel dyse 3 ved 40 bar.....	23
Figur 3.7, Målinger av spredningsvinkelen til hoveddelen av strålen for dyse 1-6 mellom 10 og 70 bar.....	23
Figur 3.8, Målinger av spredningsvinkelen til tåkedelen av strålen for dyse 1-6 mellom 10 og 70 bar.....	24
Figur 3.9, Fotografering av væskestråle ved 10 bar. Dyse 1-6 fra toppen.....	24
Figur 3.10, Fotografering av væskestråle ved 70 bar. Dyse 1-6 fra toppen.....	25
Figur 3.11, Dyse 1 (a), dyse 2 (b), dyse 3 (c), dyse 4 (d), dyse 5 (e) og dyse 6 (f).....	26
Figur 4.1, Sammenlikning av 16mm skjærhode og M2,5 HP-dyse. (a) ovenfra, (b) isometrisk tegning.....	30
Figur 4.2, Ikke-designområdene på skjærhodet (a), utgangspunkt for topologi-optimalisering inkludert designområdet (b). ....	32
Figur 4.3, Resultat av topologi-optimalisering i Inspire, TOPO(10).....	34
Figur 4.4, Forskyvning av STL overflate i forhold til optimalisert modell. (Materialise, 2016)	34
Figur 4.5, Før (a) og etter (b) utjevning av topologi-optimalisert skjærhode (uten spylekanaler). ....	35
Figur 4.6, Skjærhode med (a) og uten lukket hulrom (b).....	35
Figur 4.7, De fundamentale kubiske celletypene basert på rette stenger i en fagverksstruktur. (Rehme and Emmelmann, 2006).....	36



Figur 4.8, (a) Under stoff, (b) just-stoff, (c) over-stoff struktur.....	37
Figur 4.9, Dodekahedron enhetscelle .....	38
Figur 4.10, Konstruksjon av lettvektstruktur i 3-maticSTL. Til venstre lettvektstruktur som graf, i midten konvertert til STL, og til høyre etter boolsk addisjon mellom lettvektstruktur og skjærhode.....	38
Figur 4.11, Tverrsnitt av skjærhode etter generering av volumelementer. ....	39
Figur 4.12, von Mises spenning i skjærhode eksportert fra 3-maticSTL.....	40
Figur 4.13, Spenningskonsentrasjoner i skjærhode. ....	40
Figur 4.14, Spenningskonsentrasjoner i lettvektstruktur.....	41
Figur 5.1, Skjærhodeprototyper på byggeplaten .....	44
Figur 5.2, Tverrsnitt av skjærhode (a) og komplett skjærhode før maskinering (b).....	45
Figur 5.3, Maskinert skjærhode .....	45
Figur 5.4, Testing av spylekanal hode 1 ved 40 bar. ....	46
Figur 5.5, Testing av stråle hode 2 ved lavt trykk.....	47
Figur 6.1, Prosessplanlegging for additiv tilvirkning (Hamilton, 2016) .....	49
Figur 6.2, Eksempel på inndeling av hybrid skjærhode (a) og bunnplate til hybridproduksjon (b) .....	51
Figur 6.3, Skjærhode i chuck med tre bakker.....	54
Figur 6.4, Idemyldring rundt utforming av oppspenningsflater.....	54
Figur 6.5, Hybrid tilvirkning på stangemner .....	55
Figur 6.6, Montering av bunnplate til byggeplate.....	56
Figur 6.7, Maskinering av hybride skjærhoder. ....	56
Figur 6.8, Erowa PowerChuck P med pall (Erowa) .....	58
Figur 6.9, Sprengtegning av monteringslist med ferdig bygde hybride skjærhoder .....	59
Figur 6.10, Byggeplate med 6 paller og 108 skjærhoder. ....	61
Figur 6.11, Oversikt over kostnader knyttet til AM (Ruffo et al., 2006) .....	64
Figur 6.12, Produksjonstid som en funksjon av antall skjærhoder på byggeplaten .....	65
Figur 6.13, Kostnadsfordelingen for den hybride skjærhode produksjonen.....	66

## Tabelliste

Tabell 1, Innsnevringdiameter i forhold til innsnevringlengde for dyse 3-6.....	20
Tabell 2, Ruhetsmåling av dyse nr.6.....	22
Tabell 3, Målte og kalkulerte verdier fra måling av volumstrøm.....	27
Tabell 4, Materialeegenskaper CL 50WS og HSS. (Concept-Laser, 2011), (AZOMaterials, 2016) .....	33
Tabell 5, Resultater fra topologi-optimaliseringer og styrkeberegninger i Inspire.....	33
Tabell 6, Overordnet produksjonsplan.....	57
Tabell 7, Fordeler og ulemper for hybrid produksjon av skjærhoder .....	61

## Forkortelser

AM	Additive manufacturing (additiv tilvirkning)
CAD	Computer aided drawing
CAM	Computer aided manufacturing
DED	Directed energy deposition
DMLS	Direct metal laser sintering
EBM	Electron beam melting
FEA	Finite element analysis
FEM	Finite element method
HSS	High speed steel
IPK	Institutt for Produksjons- og Kvalitetsteknikk
IVT	Fakultet for Ingeniørvitenskap og Teknologi
LPS	Liquid Phase sintering
NTNU	Norges Tekniske og Naturvitenskaplige Universitet
PBF	Powder bed fusion (pulverbad teknikk)
SL	Serration lock
SLM	Selective laser melting
SLS	Selective laser sintering
SW	SolidWorks
TO	Topologi-optimalisering

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Sandvik Teeness produserer dempede borstenger for dreining og fresing under varemerket Silent Tools®. Dempesystemet gjør det mulig å oppnå høye toleransekrav og øke produktiviteten ved maskinering av lange overheng. Vibrasjon er ofte den begrensende faktoren når man forsøker å øke produktiviteten i maskinen. Et godt resultat avhenger også av kjøling og smøring av skjæret spesielt ved dype kutt, stor mating og med høye hastigheter. Silent Tools borstengene leveres i en rekke tykkelser og lengder og har et universalsystem for innfesting av skjærhoder. Festesystemet gjør at man for en gitt diameter kan montere en stor mengde skjærhoder med ulike egenskaper. Den tynneste dempede borstangen med en slik innfestning har en diameter på 16mm. Det er ved bruk av tradisjonelle produksjonsmetoder i dag ikke mulig å implementere høypresisjonsdyser for skjærevæske i disse skjærhodene på grunn av plassmangel.

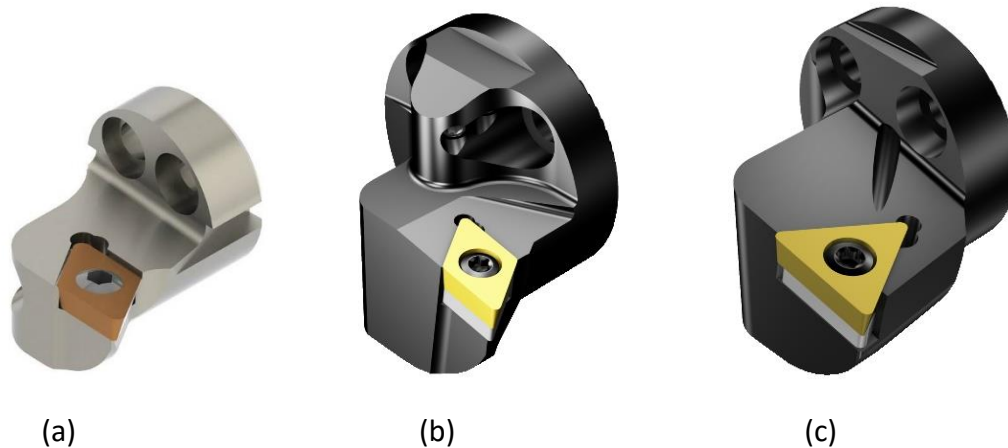
Det er rimelig å anta at man ved additiv tilvirkning kan utforme skjærhodene og skjærevæskekanalene på en slik måte at det også på de minste skjærhodene kan være mulig å oppnå god smøring og kjøling i skjæresonen. Enten gjennom mulighet for montering av høypresisjonsdyser eller ved å bygge inn dyser i skjærhodet additivt med en mer gunstig plassering og orientering. Dempesystemets effekt er i stor grad avhengig av vekten på skjærhodet som sitter ytterst på borstangen. Additiv tilvirkning muliggjør stor geometrisk kompleksitet og bygging av indre strukturer ikke mulig å maskinere med tradisjonelle metoder. Disse egenskapene kan utnyttes til å bygge indre lettvektstrukturer i skjærhodene som reduserer vekten uten å gjøre kompromisser på styrke og stivhet.

Sandvik Teeness er ikke fremmed med produksjonsmetoden additiv tilvirkning og det pågår i per dags dato et arbeid med å få sine første additivt tilvirkede produkter på markedet. I Sandviken i Sverige har Sandvik gruppen opprettet et forsknings- og utviklingscenter for additiv tilvirkning. Det er også kjent at konkurrenter av Sandvik Teeness også nærmer seg lanseringen av sine første additive produkter. Produksjonsmetoden har potensiale til å benyttes på flere av produktene Sandvik Teeness leverer. Dersom man kan finne smarte løsninger for å implementere metoden inn i den eksisterende produksjonen for ett produkt vil veien til nye additive produkter være vesentlig kortere.

## 1.2 Dagens løsning

Et 16mm SL skjærhode ble valgt som utgangspunkt for videre forbedring (se Figur 1.1a). Den spesifikke modellen har på grunn av plassmangel, spylekanaler som to spor på utsiden av flensen til skjærhodet. Skjærevæsken ledes da gjennom senter av borstangen og dempesystemet før væskestrømmen deles i to ved forstykket, og ledes ut to åpninger som sammenfaller med sporene på skjærhodet. Borstangen har da et annet forstykke enn dersom væsken skal ledes inn i senterhullet. Det må være fri tilgang til monteringshullene på en rett linje opp fra bunnplaten for å kunne føre inn monteringskruer og komme til med verktøy. På

skjærhoder med større innfestingsdiameter utformes spylekanalene noe annerledes. Når avstanden mellom monteringshullene er stor nok, kan man spylekanalene lages ved å bore flere kryssende kanaler slik at dyseåpningen blir rettet mot skjæret (se Figur 1.1b). Alternativt kan man bore kun en rett kanal fra senterhullet, men skjærevæsken vil da ikke treffe skjæret på en optimal måte (se Figur 1.1c).



Figur 1.1, (a) 16 mm skjærhode med spylespor, (b) skjærhode med vinklede kanaler, (c) skjærhode med rettlinjett spylekanal.

Flere skjærhoder leveres også med høypresisjonsdyser (HP-dyser), som illustrert i Figur 3.1. Å implementere muligheter for montering av HP dyser i 16 mm skjærhodene vil være spesielt krevende da dette krever enda større plass.

### 1.3 Dagens produksjon

Dagens produksjon av skjærhoder gjennomføres i en Stama flerfunksjonsmaskin med to dreiespindler og en fresespindel. De to dreiespindlene gjør at maskinen kan bytte grep under maskineringen slik at alle sidene av skjærhodet kan nås. Et stangemne mates inn i hovedspindelen. Først maskineres undersiden av skjærhodet med rillebilde, senterhull og tre hull for festeskruer. Subspindelen griper så tak rundt flensen og skjærhodet freses av stangemnet med en pinnefres. Skjærhodet flyttes over til den andre siden av maskinen og de resterende konturene freses ferdig, skruerhullene forsenkes. Dersom skjærhodet har spylekanaler bores og freses disse ut underveis i prosessen. Det kan være nødvendig med flere kryssende oppboringer for å få orientert spylekanalens utløp slik at væskestrålen treffer skjæret, gjøres dette må overfløydige hull plugges i etterkant. Til slutt stikkes enden på stangemnet av og ferdig skjærhode føres ut av maskinen. Prosessen er da klar for å starte på nytt ved at stangemnet mates videre inn i maskinen.

Maskineringstiden for hvert 16 mm skjærhode er omtrent 10 minutter. Av det konkrete skjærhodet som benyttes som utgangspunkt i dette arbeidet selges det årlig omkring 170 enheter årlig. Samlet salg av 16 mm skjærhoder er ca. 3600 enheter årlig, fordelt på 25 ulike artikler.

## 1.4 Oppgavens fokusområder

Gjennom arbeidet med prosjektoppgaven vil additiv tilvirkning som produksjonsmetode vurderes for produksjon av skjærhoder. Det vil vurderes hvordan produksjonsmetoden kan benyttes for å forbedre egenskapene til Teeness sine 16 mm skjærhoder med tanke på vekt og fremføring av skjærevæske.

Additivt tilvirkede komponenter uten overflatebearbeiding eller finmaskinering møter ikke de strenge toleransekravene som stilles til viktige overflater på skjærhodene. For at additiv produksjon skal kunne implementeres i produksjonen er det viktig med god tilpasning mellom additiv tilvirkning og sponfraskillende bearbeiding. Det vil derfor undersøkes hvordan skjærhodene best mulig bør utformes og bygges for en enklest mulig etter-maskinering.

Mulighetene knyttet til geometrisk kompleksitet ved additiv tilvirkning har til en viss grad gjort gårsdagens CAD programvare utdatert. Tradisjonell CAD programvare har tidligere også manglet funksjoner og gjør det lettere å oppdage problematiske geometrier med tanke på additiv tilvirkning. Det vil gjennom arbeidet med prosjektoppgaven derfor være naturlig å se nærmere på programvare spesifikt rettet mot design av additive komponenter. NTNU har nylig gått til innkjøp av en lisens på en slik programvare, kalt *3-maticSTL* levert av Materialise. *3-maticSTL* vil sammen med SolidWorks benyttes gjennom prosjektarbeidet.

Dersom det for Sandvik Teeness skal være aktuelt å ta i bruk additiv tilvirkning som produksjonsmetode må det være kostnadsmessig konkurransedyktig sammenliknet med tradisjonell produksjon. Det vil derfor også være naturlig å se nærmere på produksjonskostnadene knyttet til additiv produksjon av skjærhodene.

## 1.5 Problemstillinger

- Er det mulig å implementere presisjonsdyser også på de minste skjærhodene til Sandvik Teeness?
- Er det mulig å bygge dyser additivt som har en tilfredsstillende presisjon?
- Er det mulig å redusere vekt på 16mm skjærhodet ved additiv tilvirkning?
- Hvordan bygge skjærhoder additivt for å enklere muliggjøre ettermaskinering?

## 1.6 Formål

- Vurdere mulighetene for additivt tilvirkede dyser i forhold til finmaskinerte dyser.
- Produsere en test blokk additivt med ulike dyseutforminger for å vurdere spredning av strålen
- Legge frem et forslag på additivt design av 16mm skjærhode med spylekanal som er siktet inn mot skjæresonen
- Bygge og maskinere en prototyp av skjærhodet og gjennomføre enkle tester av dette
- Gjennomføre en kostnadsestimering av additiv tilvirkede skjærhoder

## 2 Litteraturstudie

### 2.1 Additiv tilvirkning

#### 2.1.1 Innledning

Additiv tilvirkning (AM) er et fellesbegrep for alle produksjonsmetoder basert på å bygge material lag for lag, i motsetning til tradisjonell subtraktiv tilvirkning som baseres på fjerning av materiale. Ved å bygge lagvis er ikke lenger alle begrensingene knyttet til geometrisk utforming ved tradisjonell tilvirkning gjeldende. Prosessen er ikke avhengig av verktøybaner for sponfraskillende arbeid eller slippvinkler og begrensinger knyttet til støpeprosesser.

Det finnes en rekke ulike leverandører av maskiner til additiv tilvirkning i metall. Det er i hovedsak to kategorier de fleste teknologiene kan deles inn i, pulverbad teknikk (PBF) og directed energy deposition (DED). PBF kan igjen deles inn i to ulike grupper basert på om det benyttes laser eller elektronstråle som energikilden for å smelte pulvermaterialet (Everton et al., 2016). På Institutt for Produksjons- og Kvalitetsteknikk på NTNU har man en laser-PBF maskin fra Concept Laser og arbeidet i dette prosjektet vil derfor fokusere på denne produksjonsmetoden.

Teknologien har utviklet seg gjennom mer enn 20 år, og ble i de første stadiene stort sett brukt til å produsere prototyper, gjerne omtalt som «rapid prototyping» (RP). Det er fortsatt slik at RP dominerer AM-markedet, utviklingen av additiv tilvirkning i metall har og andre funksjonelle materialer har åpnet mulighetene for produksjon av ikke bare funksjonelle prototyper, men også produkter for salg til sluttbruker. Additiv tilvirkning som produksjonsmetode omtales gjerne som «rapid manufacturing» (RM). En tredje betydelig del av markedet er det som kalles «rapid tooling» (RT), der en bruker AM-teknologi til å produsere tilpasset form- og støpeverktøy. Det er i dag få bedrifter som driver med additiv tilvirkning som produksjonsmetode på stor skala. Suksesshistoriene fra bransjen er gjerne knyttet til tilpassede produkter i medisinsk sektor eller for produksjon av utstyr til luft- og romfart (Mellor et al., 2014).

#### 2.1.2 Pulverbad teknikk (PBF)

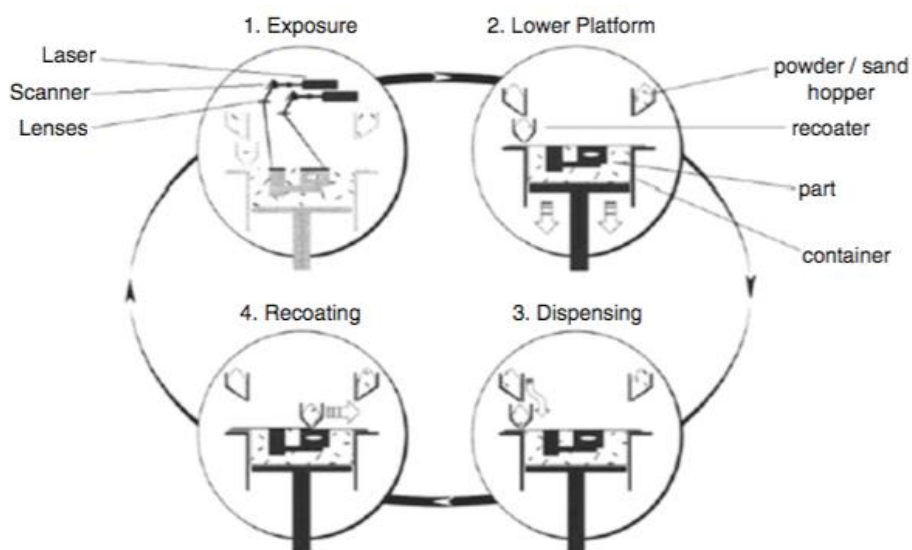
PBF var blant de første AM prosessene som ble kommersialisert. Det er noen fellestrekk for ulike maskiner som benytter PBF. Prosessen inneholder en eller flere varmekilder for å binde sammen pulverpartiklene, en mekanisme som styrer varmekilden slik at de kun de definerte områdene bindes sammen, og mekanismer for å legge ut pulver i et jevnt lag. Pulverbad-teknikken kan benyttes med et bredt spekter av materialer som metaller, polymere, keramer og kompositter.

Navnebruken for ulike typer og teknologier kan være forvirrende og enkelte begreper brukes om hverandre. Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), LaserCusing er alle begreper som benyttet av ulike produsenter av pulverbadmaskiner for metall, og beskriver til dels overlappende teknologier. I denne oppgaven brukes samlebegrepene additiv tilvirkning (AM) for beskrivelser på et mer

overordnet plan og pulverbad-teknikk (PBF) for beskrivelser som er overførbare mellom de ulike pulverbad prosessene beskrevet her.

### 2.1.3 Byggeprosessen og prosessparametere

PBF prosessen er illustrert i Figur 2.1 og kan beskrives som en syklus der et blad eller en rulle legger ut et tynt pulverlag til spesifisert tykkelse (20-100  $\mu\text{m}$ ) på en byggeplate. En laser skanner deretter over pulveret definert av avtrykket til delen som skal bygges og smelter det fast til den underliggende platen. Når det materialet som tilhører delen er ferdig skannet flyttes plattformen ned tilsvarende lagtykkelsen som er spesifisert. Bladet eller rullen kan deretter stryke ut en nytt pulverlag over byggeplaten. Pulvermaterialet mates fra en beholder ved siden av byggeplaten og overflødig materiale skyves videre ned i en oppsamlingsbeholder på motsatt side. Når et nytt lag er lagt ut kan laseren begynne å skanne det neste laget i modellen. Slik fortsetter byggingen helt til hvert eneste lag i delen har blitt skannet. Man kan benytte seg av forskjellige skannestrategier. En vanlig strategi er å dele området opp i mindre "øyer" som skannes i en delvis tilfeldig rekkefølge og i ulike retninger. Årsaken til en slik strategi er å unngå en forhåndsbestemt orientering av restspenninger i materialet. Omriset av skanneområdet skannes som et eget trinn i prosessen, enten før og/eller etter fyllmønsteret er skannet. Omriset skannes for å ha bedre kontroll på overflatestruktur og nøyaktigheten til komponenten. Hele produksjonsprosessen foregår under en beskyttende atmosfære. Hva slags atmosfære avhenger av maskintype og hvilket materiale det skal bygges med. For PBF i for eksempel stål og aluminium kan  $\text{N}_2$ -gass benyttes som dekk-gass. Med lagtykkelser på så lite som 20  $\mu\text{m}$  vil selv små komponenter være sammensatt av en stor mengde lag. Det er da åpenbart at PBF syklusen vil være en tidkrevende prosess sammenliknet med tradisjonell sponfraskillende bearbeiding (Gibson, 2015).



Figur 2.1 PBF prosessen (Gibson, 2015).

Etter at byggeprosessen er fullført ligger komponenten fullstendig innkapslet i pulvermateriale. Pulveret må fjernes før byggeplaten kan løsnes og løftes ut av maskinen. Beskyttelsesutstyr som maske og hansker bør benyttes for å skjerme operatøren mot de negative helseeffektene som kan oppstå av å puste inn det finkornete metallpulveret. Forskjellige maskinleverandører har løst dette ulikt og i enkelte maskiner er denne delen av prosessen lukket og automatisert i stor grad. Ved å benytte en sil kan mesteparten av overskuddsmaterialet gjenvinnes.

For å få et optimalt byggeresultat er det en rekke parametere knyttet til prosessen som må settes korrekt. Det er i hovedsak fire kategorier parametere som kan justeres: laserparametere, skannerparametere, pulverparametere og temperaturparametere. Typiske laserparametere som kan endres for å påvirke byggeprosessen er laserens fokusområde, effekt, pulsvarighet og frekvens. Hastigheten laseren skanner over pulveret, avstanden mellom linjene som skannes og mønsteret laseren følger er typiske skanneparametere. Størrelsen, formen, tettheten og fordelingen av pulverpartiklene påvirker også byggeprosessen. Lagtykkelsen er også en veldig sentral pulverparameter. Enkelte maskintyper muliggjør temperaturregulering av pulverbadet som en metode for å redusere restspenninger i materialet som oppstår på grunn av de høye temperatursvingningene. Prosessparameterne er nært knyttet til hverandre og kan ikke optimaliseres i isolasjon, men må ses på som en helhet. Justerer man for eksempel skannehastigheten opp vil dette føre til en reduksjon i den absorberte energimengden per areal, som da vil påvirke hvor god innsmeltingen av pulvermaterialet blir. For å kompensere for dette kan for eksempel lasereffekten justeres opp. En grundig vurdering av hvordan de ulike parameterne påvirker byggeresultatet bør alltid gjøres dersom parameterne skal justeres. Avhengig av type PBF maskin vil det være en rekke prosessparametere det går an å tilpasse. Enkelte maskiner tillater stor grad av tilpasning av parametere, mens andre kun tillater bruk av spesifiserte materialer og har forhåndsinnstilte parameterpakker for disse der kun mindre endringer er mulig (Gibson, 2015).

#### 2.1.4 Postprosessering

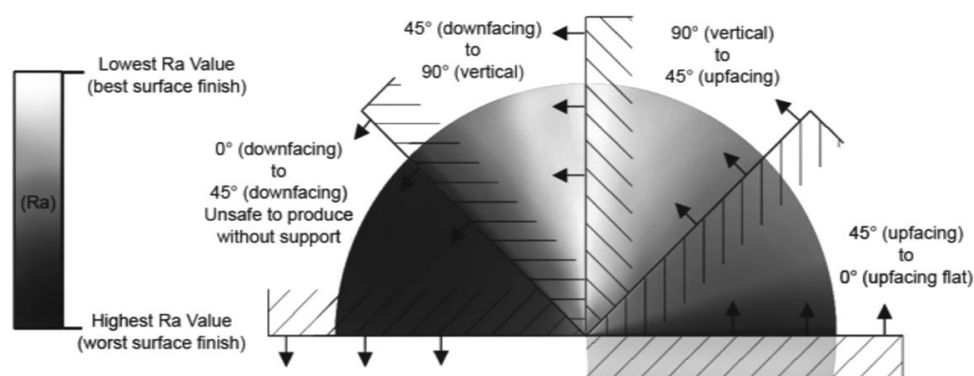
Postprosessering refererer til de avsluttende trinn med bearbeiding for å gjøre komponentene klar til å tas i bruk. Som tidligere nevnt må byggeplaten fjernes fra PBF-maskinen for at videre bearbeiding skal være mulig. Delene er også forankret i byggeplaten og må løsnes fra denne. Fjerning av komponenter fra byggeplaten kan gjøres ved bruk av ulike metoder og maskiner. Er delene bygget direkte på byggeplaten vil det vanligste være å kutte dem av med enten en trådnister eller båndsag. Eventuelt kan delene også bygges på en støttestruktur som gjør at de kan bankes av med en hammer.

Er det støttestruktur andre steder på delen for å forankre eller støtte opp kritiske områder og overhengende overflater må denne fjernes. For PBF av metaller er støttestrukturen som oftest for solid til å kunne fjernes med hendene. Den må derfor fjernes ved bruk av fres, båndsag, trådnistring, eller andre metoder. Overflater som har vært koblet til støttestruktur vil etter fjerning av denne bære merker etter kontaktpunktene (Gibson, 2015).



Avhengig av hvilket materiale man har benyttet kan det være store indre spenninger i komponenten som er bygget. Spenningene kan føre til deformasjoner når komponenten fjernes fra byggeplaten, derfor kan det være nødvendig med varmebehandling for å redusere spenningene i materialet før videre maskinering. Termisk behandling som anløpning og herding kan også være nødvendig avhengig av materiale som brukes og krav til styrke og duktilitet i ferdig komponent.

Overflatene på additivt fremstilte deler varierer i ruhet og tekstur avhengig av «trappetrinns effekten» og uønsket pulver som delvis smeltes fast til overflaten. Trappetrinns effekten er direkte koblet til lagtykkelsen og vinkelen overflaten har i forhold til underlaget (Vandenbroucke and Kruth, 2007). Löber et al. (2013) gjennomførte en sammenlikning av ulike overflatebehandlinger for komponenter produsert med 316 rustfritt stål ved SLM. Metodene han undersøkte var mekanisk pussing og polering, glass- og sandblåsing, elektroplering og plasmapolering. En kombinasjon av mekanisk pussing med enten elektroplering eller plasmapolering gav de laveste Ra-verdiene. Pussing og polering er kun mulig å på flater eller svært enkle overflater, mens additivt tilvirkede komponenter har gjerne komplekse former og overflater. For komplekse overflater er glass- og sandblåsing bedre egnet, på tross av en noe høyere Ra-verdi. Kombinert med elektro- eller plasmapolering gav også dette svært lave Ra-verdier (Löber et al., 2013).



Figur 2.2, Grafisk fremstilling av sammenhengen mellom overflateruhet og orientering (Thomas, 2009)

Produksjonsmetoden bærer fortsatt preg av sitt opphav som prototypeverktøy og når den skal benyttes til RM øker kompleksiteten og antall trinn i prosessen betraktelig (Mellor et al., 2014). Stort sett all additiv tilvirkning i metall vil kreve en eller annen form for subtraktive prosesser i etterkant. Det kan være nødvendig å maskinere hele eller kun spesifikke detaljer på produktet. En god kobling mellom additive og subtraktive prosesser er derfor viktig for å redusere den totale produksjonstiden og å sikre god kvalitet i produktene som lages. En grundig gjennomgang av planleggingsprosessen for å sette oppe en produksjon som knytter sammen både additive og subtraktive prosesser blir presentert og anvendt på skjærhoder i Kapittel 6.

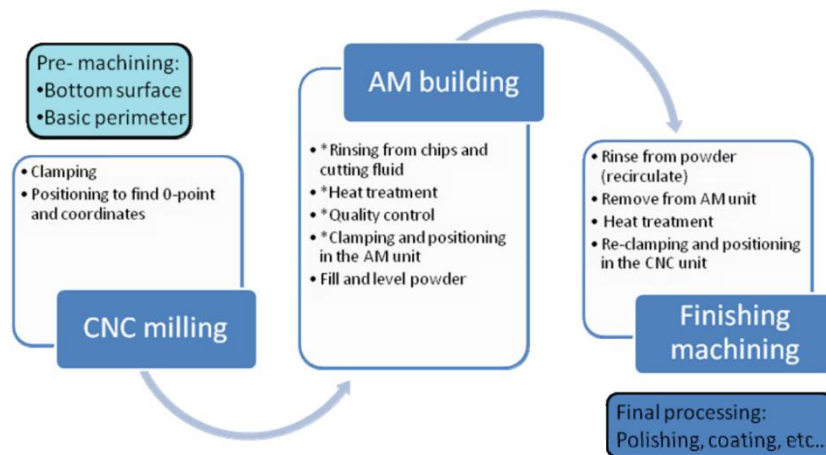
### 2.1.5 Hybrid tilvirkning

AM er som tidligere nevnt en kostbar og tidkrevende produksjonsmetode, og egner seg derfor dårligere for produksjon av større objekter. Hybrid tilvirkning er det å benytte subtraktive prosesser for å produsere deler av produktet, for så benytte den maskinerte delen som substrat for videre additiv bygging. Ved å benytte tradisjonelle maskineringsmetoder på mindre komplekse og større deler av komponenten og AM på de mindre delene som kun kan produseres additivt kan man omgå dette problemet til en viss grad.

Hybrid Manufacturing Technologies (Hybrid) var den første bedriften til å lansere et produkt for å integrere additiv produksjon i CNC-maskiner. Hybrid selger et verktøy av DED typen som kan ettermonteres i praktisk talt hvilket som helst CNC-maskineringscenter for å gi muligheten til også å produsere additivt. Med verktøyet installert kan man bytte fra additivt til subtraktivt ved kun et enkelt verktøybytte. Flere produsenter har nå integrert en slik løsning i sine produkter blant annet Mazak og DMG Mori (Zelinski, 2015). Det er en hurtig og spennende utvikling på dette området, men ettersom det på NTNU fokuseres på additiv produksjon ved pulverbad teknikk (PBF) vil også fokuset i denne oppgaven være rettet mot PBF.

Bovie et al. (2011) beskriver utviklingen av et hybrid produksjonssystem som integrerer PBF med CNC maskinering. Prosessen er basert på en Erowa pall for fastspenning av arbeidsstykket som er kompatibel med både additiv- og CNC-maskinen. En såkalt PowerChuck holder fast pallen i maskinen ved hjelp av kraftige fjærer og løsnes ved å påføre trykkluft. Figur 2.3 viser en foreslått arbeidsflyt ved hybrid produksjon. Det er foretrukket at komponenten etter AM bygging behøver minst mulig maskinering, alt som kan maskineres ferdig før prosessen starter bør derfor maskineres med en gang. Bunnflaten må også maskineres for en nøyaktig montering på byggeplaten. Etter oppspenning må arbeidsstykket måles opp og nullpunkt og koordinatsystem bestemmes. Deretter finmaskineres arbeidsstykket og den øvre flaten planfreses. Nøyaktigheten og overflatestrukturen på den øvre flaten er svært viktig ettersom dette skal bli substratet for den additive byggingen. Overflaten det skal bygges på bør være litt ru for å sørge for god utstrykning av pulver. Overflaten bør også ikke være for blank, da dette vil motvirke god laserabsorpsjon under smeltingen av det første laget. Vanligvis sandblåses byggeplaten som brukes i PBF, men for hybrid tilvirkning vil ikke dette være egnet. Et alternativ er å skrape overflaten med et skarpt freseverktøy, dette kan gjøres som et steg i planfresingen. Etter maskinering må pallen gjøres klar for å monteres i PBF maskinen. Klargjøringen består av fjerning av spon og eventuell skjærevæske, det kan også være nødvendig med kvalitetskontroll av arbeidsstykket. Avhengig av hvilket grunnmateriale man benytter kan varmebehandling også være nødvendig før innspenning i PBF maskinen. Når pulver er lagt inn i maskinen og første lag er strøket utover kan byggingen starte. Etter ferdig bygging må det resterende pulveret som innkapsler komponenten fjernes, deretter kan pallen kobles løs fra M2 maskinen. Før finmaskinering må den additivt bygde komponenten varmebehandles for å fjerne spenninger og for å oppnå ønsket hardhet i materialet. Til slutt kan pallen på nytt spennes fast i CNC-maskinen for finmaskinering til endelige dimensjoner. Det ble konkludert med at det presenterte hybride systemet har signifikante fordeler

sammenliknet med dagens løsninger for hybrid tilvirkning. Konseptet har rom for videre utvikling og forbedring, og det legges også vekt på ønsket om å kutte ned på antallet operasjoner i prosessen (Bovie, 2011).



Figur 2.3, Den typiske arbeidsflyten ved hybrid produksjon av innsats til sprøytstøping. De forberedende operasjonene til AM byggingen markert med \* er anbefalt å holde til et minimum, eller unngå fullstendig (Bovie, 2011).

#### 2.1.6 Prosess- og kvalitetskontroll

Det er i hovedsak tre ting som holder tilbake vekst og aksept av additiv tilvirkning som produksjonsmetode i industrien; repeterbar kvalitet av deler, pålitelighet og produksjonshastighet (Everton et al., 2016). Den lag-vise inndelingen av byggingen muliggjør også at kvaliteten til produktet ikke bare kan variere fra produkt til produkt, men også fra lag til lag. Den ekstreme oppvarmingen og nedkjølingen under byggeprosessen gjør det vanskelig å forutse mikrostrukturer og utmattingssegenskapene til materialet. Man kan i hovedsak dele inn i tre kategorier av systemer for kvalitetskontroll i AM maskiner:

- Måling og kontrollering av maskinens tilstand ved hjelp av sensorer
- Teknikker for å oppdage defekter og uregelmessigheter på overflaten av pulverbadet samt lagtykkelsen til pulveret som legges ut
- Direkte måling av smeltebadet

Flere av de store maskinleverandørene har i dag modulbaserte kvalitetsystemer med pakker som inneholder ulik funksjonalitet knyttet til de to første punktene. Men det er først nå nylig systemer for kontinuerlig overvåking av smeltebadet har blitt inkludert i systemene. Kapabiliteten på slik overvåking er fortsatt lav men det foregår omfattende forskningsarbeid på området. Flere av de tilgjengelige løsningene i dag gir ikke informasjon om prosessen i sanntid og da heller ikke muligheten for lukket-sløyfe feedback til byggeprosessen. Informasjonen som samles i disse systemene brukes i dag i større grad til å få en dypere forståelse av prosessen, fremfor å brukes som et verktøy til kvalitetssikring.

Det arbeides med løsninger for å kontinuerlig overvåke byggeprosessen, temperatur, nedkjølingsrater, restspenninger og dimensjonsmålinger inne i byggekammeret. For å kunne benytte slike målinger for direkte prosesskontroll må informasjonen som samles inn analyseres i høy hastighet. Å bruke denne informasjonen til å kontrollere og reparere defekter som porøsitet og mikrosprekker under bygging vil være utfordrende (Huang et al., 2015).

### 2.1.7 Standardisering av AM

Det er et stort behov for standardisering innenfor additiv tilvirkning. Et samarbeid mellom International Organization for Standardization (ISO) og American Society for Testing and Materials (ASTM) har blitt opprettet med mål om å utvikle felles AM standarder blant annet på områdene terminologi, standard testmetoder, krav til innkjøpte AM deler, designretningslinjer, kvalifikasjon, kvalitetssikring og postprosessering av PBF bygde deler, og ND-testing av AM deler (Everton et al., 2016). Det finnes mye kunnskap og erfaring ute i bedrifter som var tidlig til å implementere teknologien og hos maskinleverandørene. En større grad av deling av kunnskap og åpenhet er nødvendig for at additiv tilvirkning skal kunne vokse og utvikles som produksjonsmetode.

### 2.1.8 Programvare og filformater

#### 2.1.8.1 Filformater

Enhver additivprosess begynner med utformingen av en CAD modell av komponenten som skal bygges. Neste steg er å konvertere CAD-filen til en STL fil. Forkortelsen STL er avledet fra STereoLithography, som var den første kommersielle additive tilvirkningsteknologien. En STL fil beskriver CAD modellen kun basert på dens geometri. All data om konstruksjon, modelleringshistorikk osv. fjernes og modellens overflate tilnærmes med triangulære overflater. Størrelsen på trianglene bestemmer oppløsningen på modellen. Konverteringen fra CAD til STL skjer i CAD-programmet. Det er ikke uvanlig at feil oppstår i STL-filen i denne prosessen, enten at triangler ikke er koblet sammen eller at normalvektoren til overflaten peker i feil retning. Det er da nødvendig å reparere STL-filen.

STL formatet som nå har vært industristandard i over 25 år. Den hurtige utviklingen i bransjen har på mange måter gjort filformatet utdatert. ASTM startet i 2009 en komite for å finne det nye standardformatet til å erstatte STL formatet. Resultatet av dette arbeidet ble AMF et XML basert åpent format som inneholder informasjon om fem hovedelementer: dimensjoner, materiale, struktur, sammenstilling og metadata. AMF formatet har på tross av alle fordelene ikke fått en bred aksept i markedet, dette kan i stor grad forklares med at flere av de store CAD leverandørene har brukt lang tid på å implementere støtte av formatet (Gibson, 2015).

Microsoft utviklet 3MF formatet parallelt som utviklingen av Windows 8.1 og Windows 10 med ønsket om å skape en bedre flyt og høyere kvalitet i 3D printing prosessen for forbrukere og produsenter. I 2015 lanserte Microsoft et samarbeidsprosjekt for å få hjelp til å utvikle filformatet som et integrert format på kryss av plattformer, printere og programvarer. Bedriftene Autodesk, Dassault Systemes, HP, Materialise, NetFabb, Shapeways, Siemens, SLM Solutions, Stratasys og 3D Systems ble tidlig involvert i samarbeidet. 3MF er som AMF også et

XML-basert format, og representerer geometrien på en tilsvarende måte, men i et mer kompakt format (Keinhaus, 2015).

#### 2.1.8.2 Additivt spesifikk programvare

Det er en stor mengde programvare rettet mot additiv tilvirkning på markedet, både gratisprogrammer og mer kostbare profesjonelle programmer. Arbeidsflyten fra tidlig modell til byggingen kan starte innebærer bruk av en rekke ulike plattformer som delvis krever ulike filformater. Konverteringer mellom ulike filformater er ikke problemfritt. Munguia et al. (2008) gjennomførte en undersøkelse der de spurte ingeniører og operatører involvert i AM om vanlige problemer som oppstår ved konvertering mellom ulike filformater. Det vanligste problemet var delvis tap av informasjon, deretter filer som ikke kunne åpnes og endringer i modellen (Munguía et al., 2008). Andelen som svarte at de ikke hadde registrert problemer var 0 %. Dette belyser behovet for et felles filformat, eller en forenkling av arbeidsflyten med færre plattformer. Etter eksport til additivt format må modellen klargjøres for printing. Verktøy som finnes i slike programmer for klargjøring av CAD modeller til printing er blant annet:

- Reparasjon av STL filer
- Redigering av STL-filer
  - o Omgjøring av materiale til gitterstruktur
  - o Overflatetekstur
  - o Uthuling
  - o Oppdeling av større komponenter til seksjoner
- Lokalisere problemområder (minste veggtykkelser, overheng etc)
- Konstruksjon av støttestruktur
- Plassering på byggeplate
- Valg av produksjonsparametere

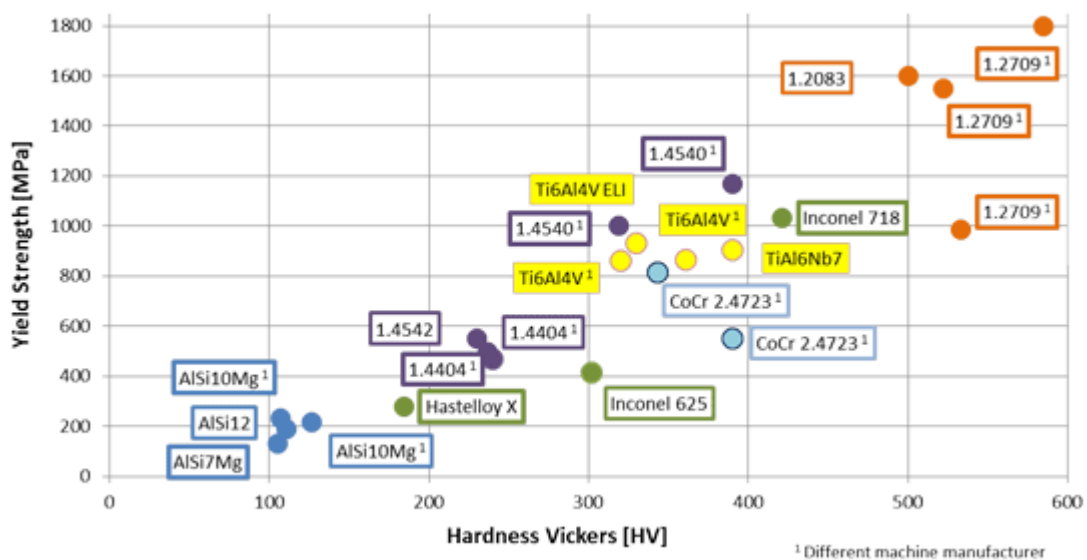
Materialise er den største programvareleverandøren som spesifikt retter seg mot AM markedet, og som også leverer noen av de mest avanserte men også dyreste verktøyene. Netfabb er en annen stor aktør i det profesjonelle AM-programvare markedet.

Flere programvareleverandører har anerkjent at arbeidsflyten i dag er altfor tungvint og at sporbarheten og integreringen mellom ulike steg i prosessen er for dårlig. Denne problemstillingen adresseres på ulike måter. Materialise har for eksempel kommet med *3-maticSTL* som trekker avansert CAD-funksjonalitet inn i på STL nivå, slik at behovet for å konvertere frem og tilbake mellom CAD og STL skal reduseres. Granta Design og Selvol har nylig lansert en omfattende database over AM maskiner og materialer. Databasen inneholder detaljert informasjon om over 550 maskiner og 700 materialer. Databasen skal knytte materialene og maskinene sammen med prosessparameterne og materialeegenskapene (MetalAM, 2016).

Kompleksiteten og antall steg i prosessen øker dersom man i tillegg ønsker å benytte seg av programvare for å optimalisere delen med tanke på for eksempel styrke og vekt. En slik metode og arbeidsflyten knyttet til denne vil forklare nærmere i Kapittel 4.2.

## 2.2 Materialvalg

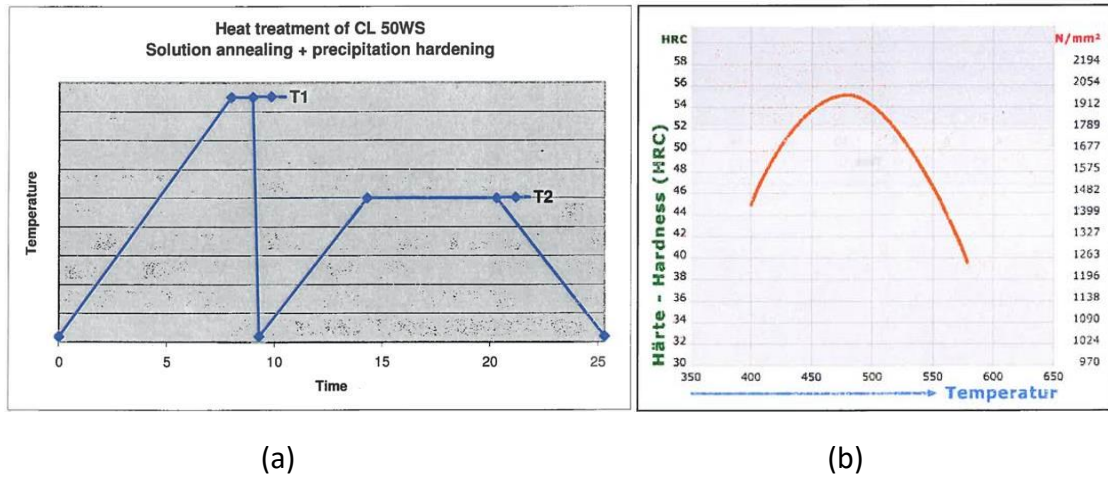
Å bygge additivt fører med seg begrensinger for hvilke materialer man kan benytte. Ikke alle metaller er egnet for AM. Prosessen kan på mange måter sees på som en mikrosveiseteknikk. Som en tommelfingerregel kan sies det at materialer som har en god sveisbarhet også kan være egnet for additiv tilvirkning. Byggematerialet blir utsatt for voldsomme temperatursvingninger når laseren smelter pulverpartiklene som hurtig kjøles ned igjen av det omkringliggende materialet. Mengden tilgjengelige materialer for additiv tilvirkning vokser kontinuerlig, og det finnes nå en rekke materialer med ulike egenskaper. En tendens i bransjen er at maskinleverandørene også er materialleverandører for dem som har investert i maskiner. Dette kan forklare med at teknologien er på relativt tidlig stadium. Flere av maskinleverandørene har også begrensninger i garantibetingelsene dersom andre materialer enn standardmaterialene benyttes (Mellor et al., 2014). Figur 2.4 viser en oversikt over de vanligste tilgjengelige materialene til PBF.



Figur 2.4, Hardhet og flytegrense for ulike materialer kommersielt tilgjengelig for AM (<http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing/Metal-powders-19.11.15>)

Under det innledende arbeidet med fordypningsprosjektet ble verktøystålet til Concept Laser kalt CL 50WS identifisert som et egnet materiale for additiv tilvirkning av skjærhoder. CL 50WS er et maredingsstål med W.Nr 1.2709 også kalt DIN X3NiCoMoTi18-9-5 eller AISI Grade 18Ni (300). I Figur 2.4 er materialer av typen 1.2709 plassert lengst oppe til høyre med svært høy hardhet og flytegrense. CL 50WS har et svært lavt karboninnhold og et høyt nikkelinhold. Materialet har god sveisbarhet og termisk stabilitet. På grunn av nikkelinholdet vil stålet under oppløsningsanløping (solution annealing) alltid omvandles til martensitt uavhengig av hvordan nedkjølingen foregår. Elding (utfellingsherding) utføres i etterkant av anløping for å øke styrken til materialet ytterligere. Både før og etter herdig er materialeegenskapene svært

gode. Etter bygging er materialet seigt og sterkt, men duktilt (35-40 HRC) nok til enkelt å kunne bearbeides ved hjelp av sponfraskillende teknikker, etter herding har materialet høy flytegrense (1550 MPa) og hardhet (opptil 55 HRC). Ytterligere egenskaper og informasjon finnes i databladet til materialet i vedlegg A. Figur 2.5 viser leverandørens anbefalte varmebehandling samt en kurve for hvordan temperaturen under utfellingsherdingen påvirker hardheten i materialet (Grøstad, 2015).

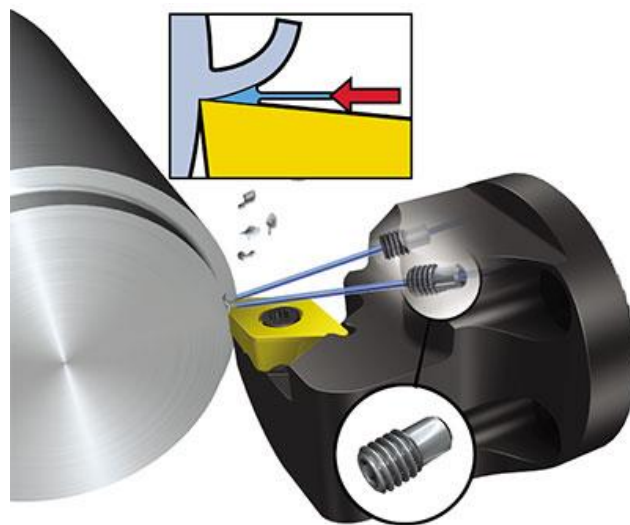


Figur 2.5, Anbefalt varmebehandling for CL 50WS (a) og tilhørende kurve for hvordan herdetemperatur påvirker hardhet (b) (Concept-Laser, 2011)

### 3 Additiv tilvirkning av dyser

#### 3.1 Introduksjon

Sandvik Teeness lager i dag kanaler for skjærevæske ved å bore opp rettlinjede kanaler i skjærhodet. Hvis det er nødvendig for å nå frem til riktige områder bores det kryssende kanaler der overflødige åpninger i etterkant må plugges. Er kanalens utløp langt i fra skjæresonen eller stilles det ekstra høye krav til presisjon av væskestrålen benyttes utskiftbare finmaskinerte dyser. En presis og konsentrert stråle med skjærevæske mot skjæresonen er gunstig med tanke på nedkjøling av skjæret og med tanke på sponbryting. En konsentrert stråle har mye kinetisk energi som kan bryte opp sponet i kortere deler. Ved innvendig dreining av lange overheng er det gunstig med korte spon da disse lettere kan transporteres ut ved siden av borstangen. Dårlig spontransport kan føre til oppsamling av spon mellom borstang og arbeidsstykke som gir skraper og defekter i overflaten. På de minste skjærhodene til Sandvik Teeness er det både vanskelig å få plass til rette borede kanaler og høypresisjonsdyser (HP-dyser). HP-dyser kan også være aktuelle å benytte på additivt byggede skjærhoder, men dette krever både mer plass og maskinering av gjenger ved utløpet til kanalen. Mål på HP-dyser av ulike størrelser er oppsummert i Vedlegg B. Den geometriske friheten som følger med additiv tilvirkning er svært gunstig med tanke orienteringen av kanalene gjennom skjærhodet. Det vil være interessant å undersøke muligheten for at også dysene på spylekanalene bygges additivt (AM-dyser). Dersom AM-dyser kan gi ønsket presisjon og ytelse vil det forenkle produksjonsprosessen ved å kutte ned på antall maskineringsoperasjoner. Et viktig spørsmål som må besvares for å på riktig grunnlag kunne bestemme egnetheten av produksjonsmetoden er hvorvidt væskestrålen som produseres fra additivt bygde kanaler og dyser har en tilfredsstillende nøyaktighet. Overflatene til additivt fremstilte komponenter har en høy ruhet sammenliknet med maskinerte overflater. Dette vil trolig ha en stor innvirkning på strømningsegenskapene til skjærevæsken som strømmer gjennom kanalene.



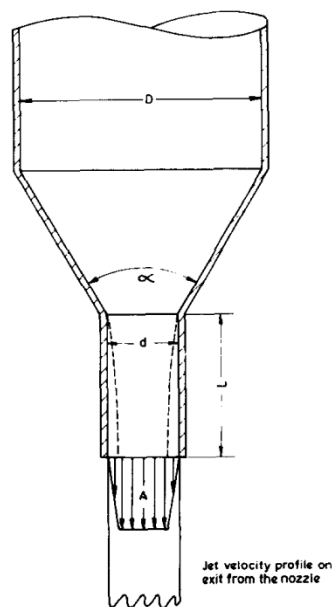
Figur 3.1, Skjærhode med HP-dyser.



### 3.2 Teori dyser

Hensikten med en dyse er å kontrollere utstrømningen av væske eller gass under trykk. Gjennom innsnevring av utgangsrørets tverrsnitt omsettes trykkenergi til bevegelsesenergi ved at hastigheten på væsken eller gassen økes (Johnson, 2015). Å spraye en væskestråle fra en dyse ut i et gassfylt rom er naturlig ustabil. Væskestrålen vil da brytes opp i dråper på størrelse med dysens åpning eller en variasjon av dråpestørrelser. (Lin and Reitz, 1998) Krefter mellom den omkringliggende luften og væskestrålen forsterker uregelmessighetene i strålens overflate. Forstyrrelsen får til slutt strålen til å brytes opp. Når væskestrålen brytes opp vil den kinetiske energien fordeles mellom en stor mengde små dråper. Dette gjør at muligheten for å overføre den kinetiske energien videre minker (Vahedi Tafreshi and Pourdeyhimi, 2003).

En væskestråle kan brytes opp på fire ulike måter, på engelsk «Rayleigh breakup», «1<sup>st</sup> wind induced breakup», «2<sup>nd</sup> wind induced breakup» og atomisering. Hvilken type oppbrytning av strålen man vil få avhenger av turbulens, viskositet og overflatespenning. Ved høyere Reynoldstall brytes strålen opp nærmere dyseåpningen, og dråpene som dannes er mindre, dette er såkalt 2<sup>nd</sup> wind induced breakup. Dersom man har strømning med svært høyt Reynoldstall vil man få atomisering av væskestrålen. Ved atomisering går væskestrålen umiddelbart i oppløsning like etter dysens utløp (Lin and Reitz, 1998). Det er rimelig å anta at man ved væskestrømning ved høyt trykk i additivt tilvirkede kanaler vil få en svært turbulent strømning og atomisering av strålen like etter utløpet. Vahedi og Pourdeyhimi (2003) undersøkte i hvilken grad dysens utforming hadde en innvirkning på hva slags oppbrytning av væskestrålen man fikk ved samme Reynoldstall.



Figur 3.2, Dysegeometri (McCarthy and Molloy, 1974)

For en kon-kapillær dyse, altså en gradvis innsnevring som går over i en rettlinjet tynn passasje, vil det være det være fem geometriske faktorer som påvirker væskestrålens totale hastighetsfordeling ved dysens utløp dersom man antar væskeegenskaper og hastighet antas

konstante. Disse faktorene er dysens innsnevringforhold ( $\beta$ ), lengde/diameter forhold ( $AR = L/d$ ), innsnevringvinkel ( $\alpha$ ), strømlinjeforming av innsnevring og overflateruheten til dysen. Det finnes ulike meninger om i hvilken grad de ulike faktorene påvirker spredningen av væskestrålen (McCarthy and Molloy, 1974).

*Innsnevringforholdet* er forholdet mellom dysens diameter etter og før innsnevring, ( $\beta = d/D$ ). En reduksjon i  $\beta$  vil resultere i generelt redusert mengde turbulens i væskestrålens senter.

*Lengde/diameter forholdet (AR)* gir forholdet mellom dysens smaleste punkt og lengden dette smaleste punktet vedvarer gjennom dysen. Forlengelse av det smaleste punktet i dysen fører til at en forandring av hastighetsfordelingen til væskestrømmen. Væskepartiklene nærmest dyseveggene bremses ned og hastighetsprofilen blir ikke-uniform ved dyseåpningen. Dersom innsnevringen er tilstrekkelig lang man ende opp med fullt utviklet rørstrømning. Dette prinsippet kan benyttes for å stabilisere strømningsforholdene og å effektivt isolere væskestrålen fra forstyrrelser oppstrøms i systemet. Men denne metoden vil på den andre siden ikke være den mest effektive måten å konvertere den potensielle energien i form av trykk over til kinetisk energi (McCarthy and Molloy, 1974).

*Innsnevringvinkel ( $\alpha$ )* kan ligge mellom  $180^\circ$  og  $0^\circ$ , der  $0^\circ$  betyr at det ikke er noen innsnevring. Valg av riktig vinkel vil være en balansegang der man ved lav vinkel vil få økt friksjon på grunn av at større del av dysen har liten diameter, ved høy vinkel vil det føre til økt dannelse av virvelstrømmer og separasjon fra grensesjiktet i begynnelsen av innsnevringen. Separeres strømmingen fra grensesjiktet vil hovedstrømmingen følge en kurvet bane rundt det separerte området. Dersom hastigheten er stor nok vil trykkfallet i bakevjen kunne bli så stort at damptrykket til væsken nås og det oppstår kavitasjon. Kavitasjon kan forstyrre stabiliteten i væskestrømmingen i stor grad (Vahedi Tafreshi and Pourdeyhimi, 2003). Theobald referer til forsøk gjennomført av Yoshizawa et al. (1965) som foreslo at optimal innsnevringvinkel ligger mellom  $100^\circ$  for lave strømningshastigheter og  $30^\circ$  for veldig høye hastigheter (Theobald, 1981).

*Strømlinjeforming* av dysens kan på tilsvarende måte som innsnevringvinkelen også motvirke dannelsen av turbulente virvelstrømmer som skarpe kanter kan forårsake langs dyseveggen. Det er lite litteratur som kommer med konkrete retningslinjer for strømlinjeforming av dyser, og i praksis blir det i stor grad designet ut i fra hva som ser ut som en naturlig strømningslinje (Theobald, 1981).

Det er begrenset med litteratur som dekker i hvilken grad *overflateruhet* påvirker strømningsegenskapene i dyser. McCarthy henviste til undersøkelser gjennomført av Rouse et al. Antydning at overflateruheten i dyser har en begrenset innvirkning på dysens effekt så lengde det ikke eksisterer noen store uregelmessigheter i overflaten. På den andre siden har forsøk gjennomført av Dodu vist til en reduksjon av strålespredning på 25% ved kun å polere overflatene inne i dysen (Taylor et al., 2006).

Den faktiske innvirkning overflateruheten har på væskestrømning i rør er fortsatt ikke fullstendig forstått, men realistiske modeller har blitt utviklet som gir gode tilnærminger. Det er vist at det ikke er ruheten i seg selv men forholdet mellom ruhet og diameteren på røret væsken strømmer gjennom som påvirker strømningsegenskapene (Taylor et al., 2006). Mye forskning omfatter kun lave relative ruhetsverdier og vil ikke være gjeldende for høyere verdier slik som vi kan observere ved tynne kanaler bygget additivt.

Relativ ruhet regnes ved (absolutt ruhet/diameter). Der absolutt ruhet ( $\varepsilon$ ) er et mål på høyden på irregularitetene i overflaten.  $\varepsilon$  er basert på forsøk gjort av Nikuradse (1933) der ruhetsverdien samsvarte med gjennomsnittsstørrelsen på sandkornene som ble limt fast på overflaten av røret. Dette målet på ruhet er ikke direkte overførbart til moderne ruhetsmålinger. Ved praktisk bruk finner man typisk verdier for absolutt ruhet som tabellverdier for rør i ulike materialer, disse tabellverdiene representerer da en ekvivalent sand-størrelse som er funnet eksperimentelt. Det har blitt foreslått enkle algoritmer for å konvertere ruhetsverdier som aritmetisk middelvei ( $Ra$ ), kvadratisk middelvei ( $Rq$ ) og tipunks dybden ( $Rzd$ ) til  $\varepsilon$  som gir bedre tilnærminger enn direkte bruk av ruhetsverdiene målt med profilometer. Av de tre gav  $Ra$  målingene den dårligste tilnærmingen til  $\varepsilon$  i forhold til de eksperimentelt bestemte verdiene, og verdiene var i alle tilfellene lavere enn den eksperimentelle verdien. (Adams et al., 2012)

$$\varepsilon = 5.863Ra \quad (1)$$

$$\varepsilon = 3.100Rq \quad (2)$$

$$\varepsilon = 0.978Rzd \quad (3)$$

Den relative ruheten sammen med Reynoldstallet benyttes til å kalkulere friksjonstapet i rørstrømning. Dette gjøres vanligvis ved å bruke det såkalte Moody-diagrammet som er et plot av Darcys friksjonsfaktor som en funksjon av Reynoldstall over relativ ruhet. Darcys friksjonsfaktor kan benyttes i Darcy-Weisbachs likning for trykktap i rørstrømning. Moody-diagrammet er kun gjeldende for relative ruhetsverdier mellom 0 og 0,05. Effekten av ruhet ble vist til å være veldig liten for laminær strømning. For turbulent strømning derimot viste ruheten å ha stor innflytelse. Kanaler i størrelsesorden  $3\text{mm} > D_h > 200 \mu\text{m}$  omtales som «Mini-channels», forholdet mellom diameter og ruhet blir svært annerledes ved disse dimensjonene sammenliknet med større rør. Formen, mellomrommet mellom og størrelsen på irregularitetene i overflaten har da en annen innvirkning på trykkfallet og væskestrømningen generelt. Ved høye relative ruhetsverdier kan strømningen over irregularitetene føre til re-sirkulasjon og separasjon av væskestrømmen (Taylor et al., 2006). Senere arbeid av Kandlikar et al. har undersøkt systemer med relativ ruhet opp til 14%. De fant at  $\varepsilon$  ikke var tilstrekkelig til å beskrive innvirkningen av ruhet når den relative ruheten økte. En høyere nøyaktighetsgrad av ruhetsmålingene ble funnet nødvendig, hvor elementer som maksimal profilhøyde, gjennomsnittlig avstand mellom topper og avstand fra gjennomsnittslinjen til snittet av alle verdiene under snittet (Kandlikar et al., 2005).

Utløpskoeffisient ( $C_d$ ) er et mål på forholdet mellom faktisk utløp mot teoretisk utløp av væske fra en dyse, og kan brukes til å vurdere motstanden dysen gir væskestrømmen.  $C_d$  kan regnes ut med formelen:

$$C_d = \frac{4\dot{m}}{\pi D^2 \sqrt{2P\rho}} \quad (4)$$

Der  $\dot{m}$  er massestrømmen,  $D$  er diameteren på dysens smaleste punkt,  $P$  er trykket og  $\rho$  er tettheten til væsken. Utløpskoeffisienten er et sentralt mål på hvor effektiv en dyse er i å konvertere potensiell energi til kinetisk energi, og forteller noe om hvor store friksjonstap som er i dysen (Ghassemieh et al., 2006).

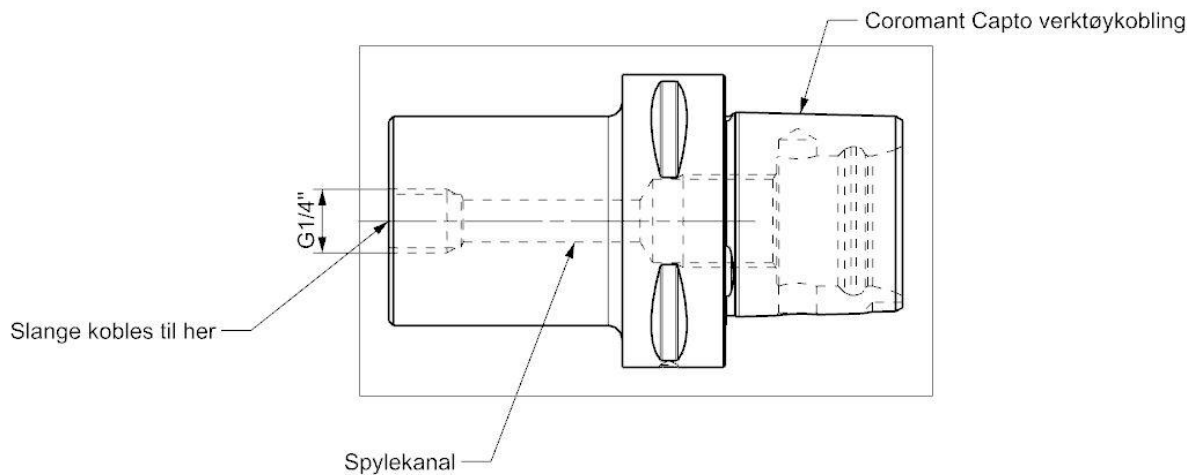
Alternativt er det også mulig å utforme dyser av kon-kapillærtypen med en motsatt rekkefølge, altså at en skarp innsnevring kommer først, og at en konisk utvidelse følger. En slik dyse omtales gjerne som en kon-ned dyse. En kon-ned dyse kan skape en innsnevret stråle på grunn av separasjon fra dyseveggene gjennom hele dysens lengde. Dette gjelder ikke i alle tilfeller, vibrasjoner i dysen, variasjon i væsketrykket og urenheter i overflaten kan føre til at væskestrålen på nytt oppnår kontakt med dyseveggene. Den store overflateruheten i produkter tilvirket ved PBF produksjon gjør trolig denne typen dyse til en lite egnet løsning (Vahedi Tafreshi and Pourdeyhimi, 2003).

### 3.3 Praktisk dyseforsøk

#### 3.3.1 Valg av pumpesystem:

For å gjennomføre forsøket behøves en trykkilde som kan levere skjærevæske eller vann til dysene. Skjærhoder kan påføres et væsketrykk på så mye som 100 bar i enkelte maskiner. Det er ønskelig å gjennomføre forsøket med et væsketrykk representativt for det som benyttes ved virkelige dreieoperasjoner. Sandvik Teeness stilte til disposisjon en *Mori Seiki NT 4200 DCG* flerfunksjonsmaskin der testene kunne gjennomføres. Denne maskinen har et pumpesystem som kan levere skjærevæske fra 10 til 70 bar med 10 bars trinnvis justering.

Sandvik Teeness designet og produserte en slangekobling for å koble slangen fra dysen mot en CNC-maskin. Utformingen av slangekoblingen er vist Figur 3.3 og er bygget opp rundt en *Coromant Capto* verktøykobling. *Coromant Capto* er et modulbasert hurtigkobling for enkelt å kunne bytte verktøy. Adapteren for slangekoblinger har derimot ikke noe verktøy, men kun en spylekanal og en gjenget slangekobling i motsatt ende.



Figur 3.3, Adapter for slangekobling. (Kristoffer Bjørnstad, 2016)

Med nevnte adapter som utgangspunkt kunne den ytre geometrien til dysene bestemmes. Begrensninger for utformingen var i hovedsak størrelsen på slangekoblingen (G1/4"). To hovedretninger ble vurdert for utformingen av dyseblokken, en stor blokk med flere dyser eller enkeltblokker med egen innkobling til hver dyse. Å koble flere dyser direkte på en slangekobling vil være lite hensiktsmessig ettersom det da er vanskelig å bestemme trykkfallet over hver dyse. Løsningen som ble valgt bestod derfor av separate dyseblokker med slangekobling i den ene enden og dyseutløp i motsatt ende. For å enkelt kunne spennes fast under testing ble dyseblokkene utformet med rettvinklede vegger og en kvadratisk grunnflate. For å spare tid og pulvermateriale under bygging ble unødvendig materiale fjernet fra fremre del av dyseblokken.

Med en slik utforming kan forsøket gjennomføres ved å påføre væsketrykk i en og en dyse for så å fotografere væskestrålen fra siden. De ulike dysene kan så testes etter tur med samme kameraoppsett for en direkte sammenlikning av spredning og retning. Det er også interessant å undersøke volumstrømmen som dysen klarer å levere. Det ble derfor utformet en slangekobling for å kunne samle opp og vurdere væskestrømmen over tid. Slangekoblingen ble 3D-printet i ABS-plast. På koblingen er det mulig å montere en 25mm slange som videre leder væskestrømmen ned i en beholder (se Figur 3.4). Koblingen holdes fast på dysen ved friksjonen som oppstår når den spennes opp i skrustikken.



Figur 3.4, Sprengtegning av dyse og slangekobling.

### 3.3.2 Dyseutforming

For å få et godt sammenlikningsgrunnlag var det viktig at flere ulike dyseutforminger ble bygget og testet. Additivt tilvirkede dyser bør også sammenliknes med de minste høypresisjonsdysene som Teeness benytter som er aktuelle å benytte på de minste skjærhodene.

Det ble bygget 6 dyser med ulik utforming. Felles for alle dysene er ytre geometri, slangekoblingen og spylekanalen med en diameter  $\varnothing 1,9$  mm. Dyse 1 har gjenget utløp for montering av høypresisjonsdyser (HP-dyser) med M3 gjenger. Dyse 2 har ingen innsnevring ved utløpet av spylekanalen og vil kunne sammenliknes med enkle borede spylekanaler. De resterende fire dysene er variasjoner over to ulike mål for henholdsvis diameter på minste tverrsnitt og lengde på minste tverrsnitt. De to diametermålene er 1 mm (liten) og 1,4 mm (stor) og lengdemålene er 0,89 mm (kort) og 1,71 mm (lang). Dyse 3 har kombinasjonen «stor-lang», dyse 4 har kombinasjonen «stor-kort», dyse 5 har kombinasjonen «liten-lang» og dyse 6 «liten-kort». Kombinasjonene er vist i matrisen i Tabell 1.

Tabell 1, Innsnevringdiameter i forhold til innsnevringlengde for dyse 3-6.

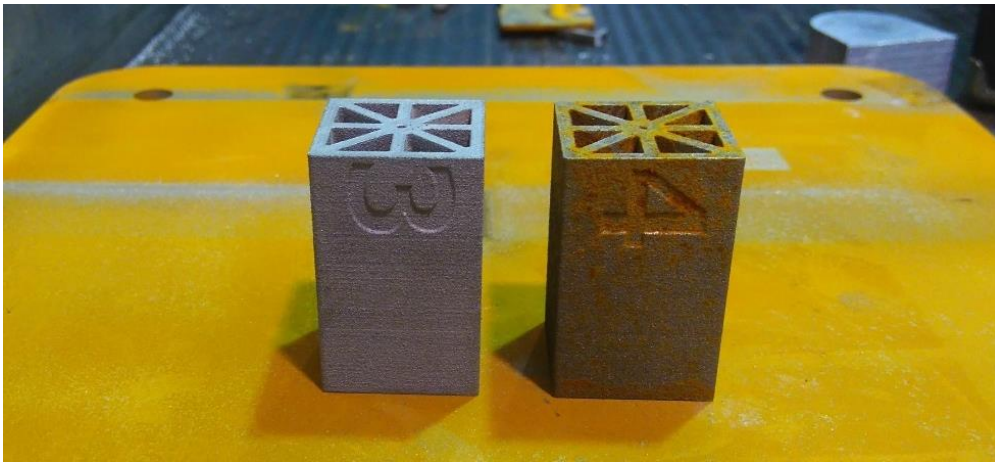
	Liten	Stor
Kort	Dyse 6	Dyse 4
Lang	Dyse 5	Dyse 3

De resterende målene på dysene er like for dyse 3-6 hva gjelder innsnevringvinkel og skråfas i utløp. Målene er valgt på bakgrunn av mål på HP-dysene som benyttes i dag, dette for å kunne sammenlikne resultatene fra additivt bygde dyser opp mot maskinerte dyser med tilsvarende geometri. Innsnevringvinkelen i HP dysene var  $30^\circ$ , og stemte derfor også godt overens med teorien på optimal innsnevringvinkel for høye hastigheter, presentert i kapittel 3.2. Samtlige dyser fikk også samme radius på avrundingene for strømlinjeformingen av dysene. Detaljerte arbeidstegninger av dysene kan finnes i Vedlegg C. Vertikale hull med diameter på 1 mm var den minste diameteren som var mulig å bygge med repeterbare resultater ifølge Kruth et al. (2005). Forsøkene han gjennomførte viste at hull med en mindre diameter ikke ville bygges som modellert på grunn av at overskuddsvarmen fra veggene i den trange kanalen førte til at innkapslet pulvermateriale smeltes fast til overflaten. (Kruth et al., 2005) Prosessparameterne og utstyret benyttet i forsøkene er ikke identisk som det som vil benyttes for byggingen av dysene, men gir en indikasjon på at dyseåpninger med diameter på 1 mm kan være en passende nedre grense.

### 3.3.3 Bygging av dyser

Dysene ble bygget i materialet CL50 WS, som tidligere ble vurdert som en egnet kandidat for produksjon av skjærhoder. Uten varmebehandling er materialet relativt duktilt (30 HRC), men etter aldri blir det svært hardt (opptil 55 HRC). Det er ikke behov for varmebehandling av dysene før testing. Den høye duktiliteten etter bygging gjør det relativt enkelt å maskinere gjenger for HP-dyse og slangekoblinger. Dysene ble bygget i NTNU sin Concept Laser M2

maskin med anbefalte prosessparametere for materialet CL 50WS (Se vedlegg D). Dysene ble bygget direkte på byggeplaten og måtte derfor kuttes av denne etter å ha blitt fjernet fra PBF-maskinen. Metoden som ble benyttet var trådgnisting. Trådgnisting benytter en trådelektrode til å kutte i elektrisk ledende materialer og kan gjøre svært nøyaktige kutt. Siden trådelektroden er svært tynn fjernes lite materiale under kuttingen. Dette er gunstig for additivt bygde komponenter ettersom bygge hastigheten er langsom, og det er ønskelig å bygge så lite unødvendig materiale som mulig. Trådgnistingen foregår i vannbad og komponentene som kuttes er satt under spenning, dette fører til korrosjon på overflaten av komponentene. Det var nødvendig å sandblåse alle dysene etter trådgnistingen for å fjerne korrosjon fra overflaten. Figur 3.5 viser hvor korrodert dyse 4 var etter trådgnisting og dyse 3 viser utseende etter sandblåsing. Etter sandblåsing ble gjengespor for slangekobling og montering av HP-dyse maskinert hos Sandvik Teeness.



*Figur 3.5, Dyse 3 trådgnistet og sandblåst, dyse 4 før korrosjonen etter trådgnistingen ble fjernet ved sandblåsing.*

### 3.3.4 Gjennomføring av forsøk og resultater

#### 3.3.4.1 Overflateruhet

Det ble gjennomført målinger av overflateruhet på en av dysene etter sandblåsing. Målingene ble utført med et Mahr Perthometer M2. Det ble gjort tre målinger på den ytre veggen og tre målinger inne i senterhullet. Evalueringsslengden for ruhetsmålingene ( $L_t$ ) var 5,6 mm, og referanselengden ( $L_c$ ) 0,8 mm.

Som vist i tabell var det liten forskjell i  $R_a$  verdi mellom indre og ytre måling. Det var heller ikke store forskjellene i  $R_q$ -verdi. Standardavviket på både innvendig og utvendig  $R_t$  verdi var svært høy. Forskjellen i gjennomsnittlig  $R_t$ -verdi mellom innvendig og utvendig måling var 12,10  $\mu\text{m}$ , altså lavere enn standardavviket. Det er dermed ikke mulig å skille innvendig og utvendig  $R_t$ -måling.

Tabell 2, Ruhetsmåling av dyse nr.6

	#	<i>Ra</i> [µm]	<i>Rq</i> [µm]	<i>Rt</i> [µm]
<b>Utvendig</b>	1	13,2	16,7	84,7
	2	11,8	15,2	88,5
	3	10,1	13,2	126
<b>Gj.snitt utv.</b>		11,7	15,0	99,7
<b>Std</b>		1,6	1,8	22,8
<b>Innvendig</b>	4	11,6	14,1	67,2
	5	11,9	15,2	88,7
	6	11,8	15,0	107
<b>Gj.snitt innv.</b>		11,8	14,7	87,6
<b>Std</b>		0,1	0,6	19,9
<b>Gj.snitt totalt</b>		11,7	14,9	93,7
<b>Std. Totalt.</b>		1,0	1,2	20,3

Det er viktig å påpeke at referanselengden som ble benyttet er betydelig kortere enn anbefalt for måling av overflater med  $Ra > 10$ . I henhold til ISO4288 skal referanselengden da være 8mm og målelengden 40mm. På grunn av størrelsen på dysen og dybden på senterhullet var det ikke mulig å gjennomføre en så lang måling.

Relativ ruhet ble kalkulert ut i fra det totale gjennomsnittet av *Ra*-målingene med algoritmen presentert av Adams et al. (2012) til å være 0,05.

#### 3.3.4.2 Fotografering av væskestråle

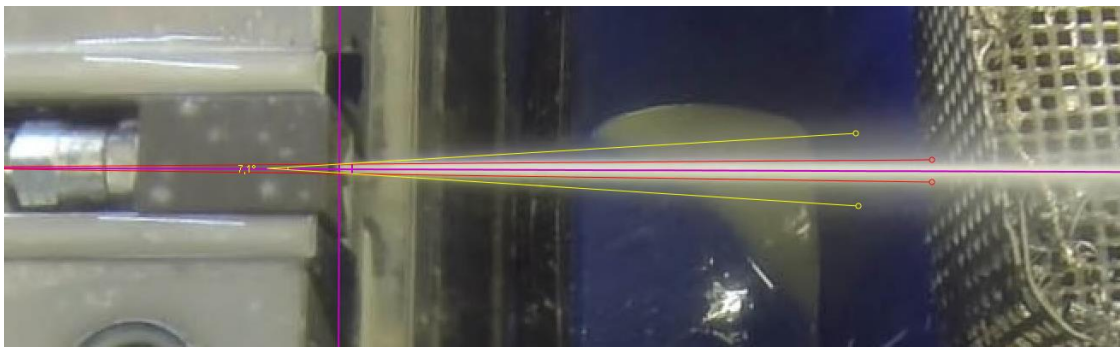
Skjærevæsken som ble benyttet var *Fuchs Ecocool TOP*, en vannløselig semisyntetisk skjærevæske med tetthet ( $\rho$ ) på 1,01 g/ml ved 15°C og en kinematisk viskositet ( $\nu$ ) på 37 mm<sup>2</sup>/s. Ytterligere informasjon om skjærevæsken finnes i vedlegg E. CNC-maskinen har et justerbart væsketrykk mellom 10 bar og 70 bar. Avlest trykk fra manometer på slangekoblingen avvirket noe fra innstilt maskintrykk.

For å vurdere kvaliteten på væskestrålen ble den filmet med en *GoPro* kamera montert inne i CNC-maskinen i et vanntett kamerahus. Linsekompensering ble lagt på alle bilder hentet fra filmklippene for å motvirke forvridningene av bildet som vidvinkelen på *GoPro*-kameraer skaper.

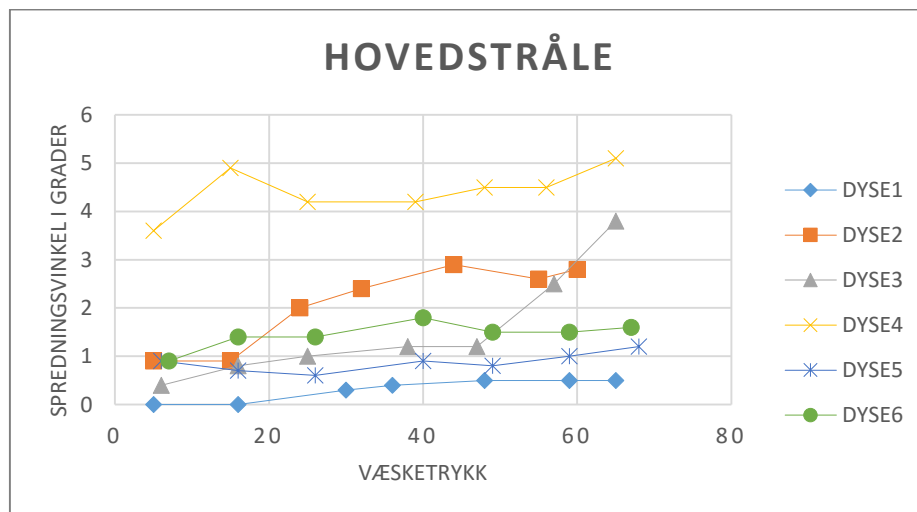
Vinkelmålinger av spredningen i de ulike dysene ble gjennomført i analyseprogrammet *Tracker* og en kvalitativ vurdering ble gjort for hver dyse. Det ble plottet to verdier for hver måling. Den en vinkelmålingen var av spredningen å på hoveddelen av væskestrålen. Den andre vinkelmålingen var av spredningen til den tåkeaktige sprayen som omkranset hovedstrålen. Vinkelmålingene for dysene er plottet mot væsketrykk i Figur 3.7 og Figur 3.8. Testene viste at væskestrålen produsert av HP-dysen hadde en minimal spredning sammenliknet med de additivt fremstilte dysene. For HP-dysen ble det kun observert små



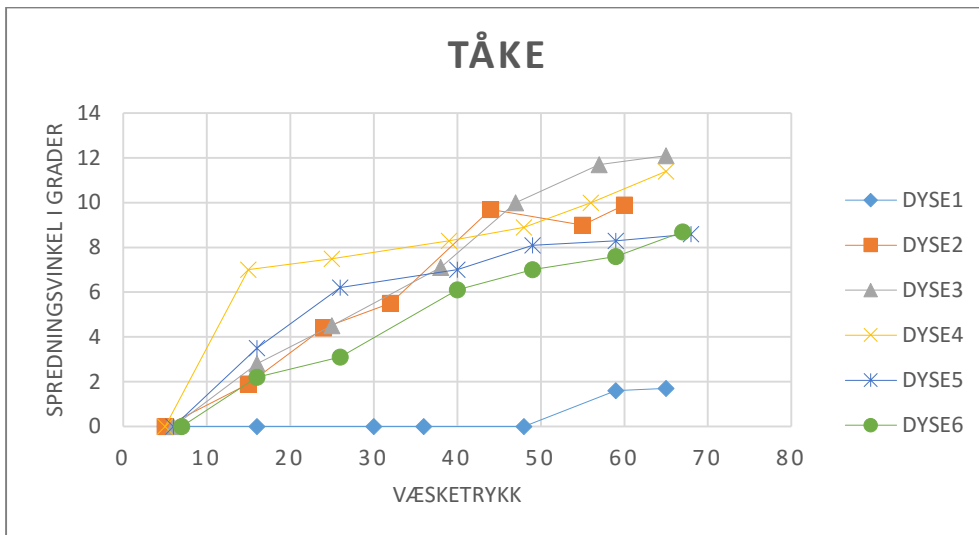
endringer i spredningen av væskestrålen ved økende trykk. Til sammenlikning viste samtlige additivt bygde dyser en tydelig økende spredning av strålen ved økende væsketrykk. Ved 10 bar var forskjellene mellom spredningen i de ulike dysene liten, med unntak av dyse 4. Dyse 4 hadde en delvis todelt væskestråle med en kraftig og en mindre kraftig stråle ved alle de ulike trykkene. Under målingen av spredningsvinkelen til dyse 4 ble begge de to strålene vurdert som én enkelt hoved stråle. Retningen på væskestrålen fra dyse 5 avvirket noe i forhold til senterlinjen gjennom dysen. På grunn av manglende referansepunkter på bildene og linseforstyrrelser forårsaket av vidvinkelen på kameraet er det ikke mulig å tallfeste dette avviket. Det er også mulig at mindre avvik i retning forekom ved de resterende dysene. Det ble observert store forskjeller i væskedistribusjonen til de ulike strålene. Man kan på bildene se at enkelte av strålene er mer fokusert enn andre og at tåke-spredningen rundt hovedstrålen har ulik tetthet ved ulike avstander fra hovedstrålen. Tåkespredningen er også på enkelte dyser noe ute av akse i forhold til hovedstrålen.



Figur 3.6, Måling av spredningsvinkel dyse 3 ved 40 bar.



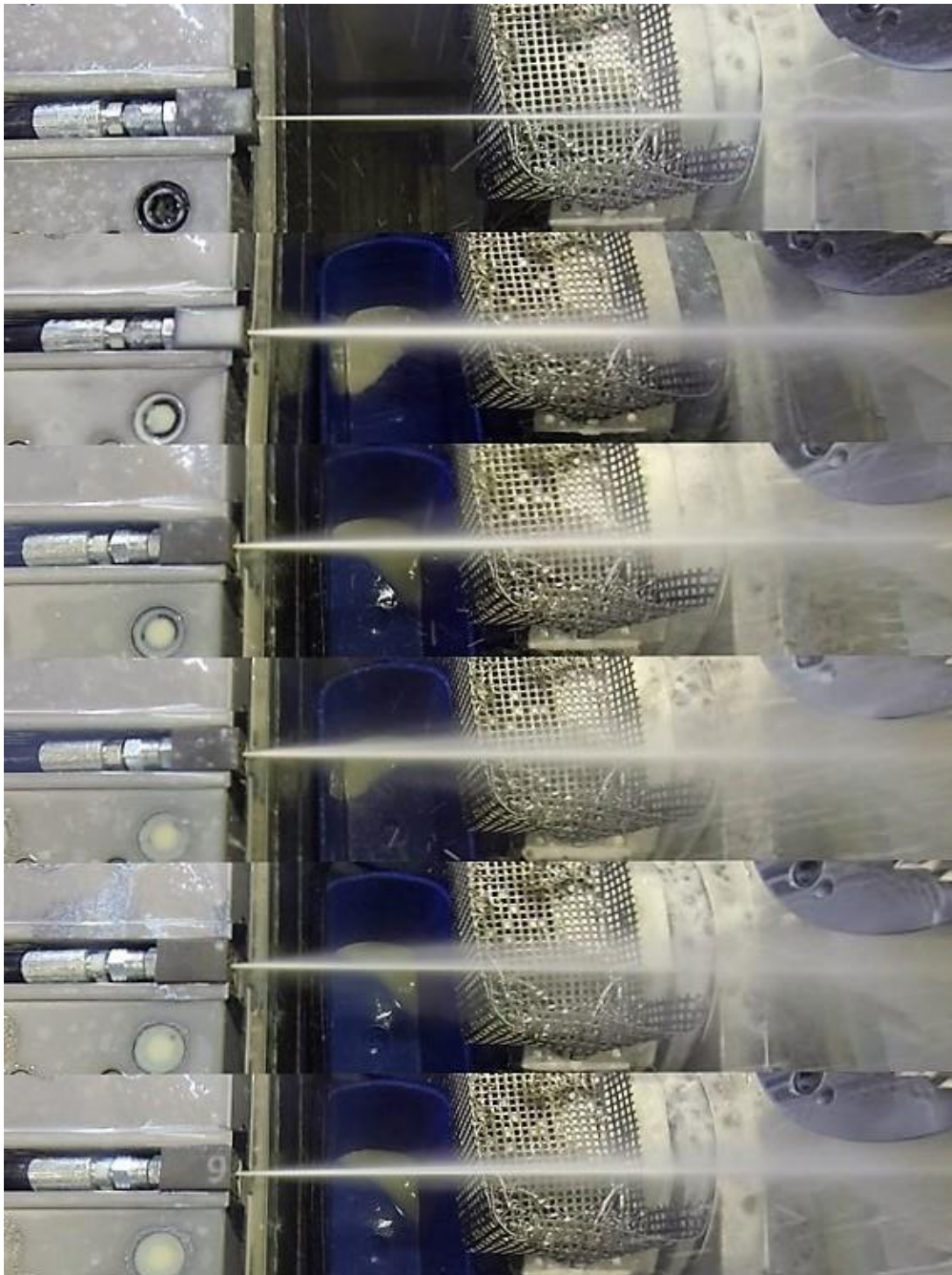
Figur 3.7, Målinger av spredningsvinkelen til hoveddelen av strålen for dyse 1-6 mellom 10 og 70 bar



Figur 3.8, Målinger av spredningsvinkelen til tåkedelen av strålen for dyse 1-6 mellom 10 og 70 bar



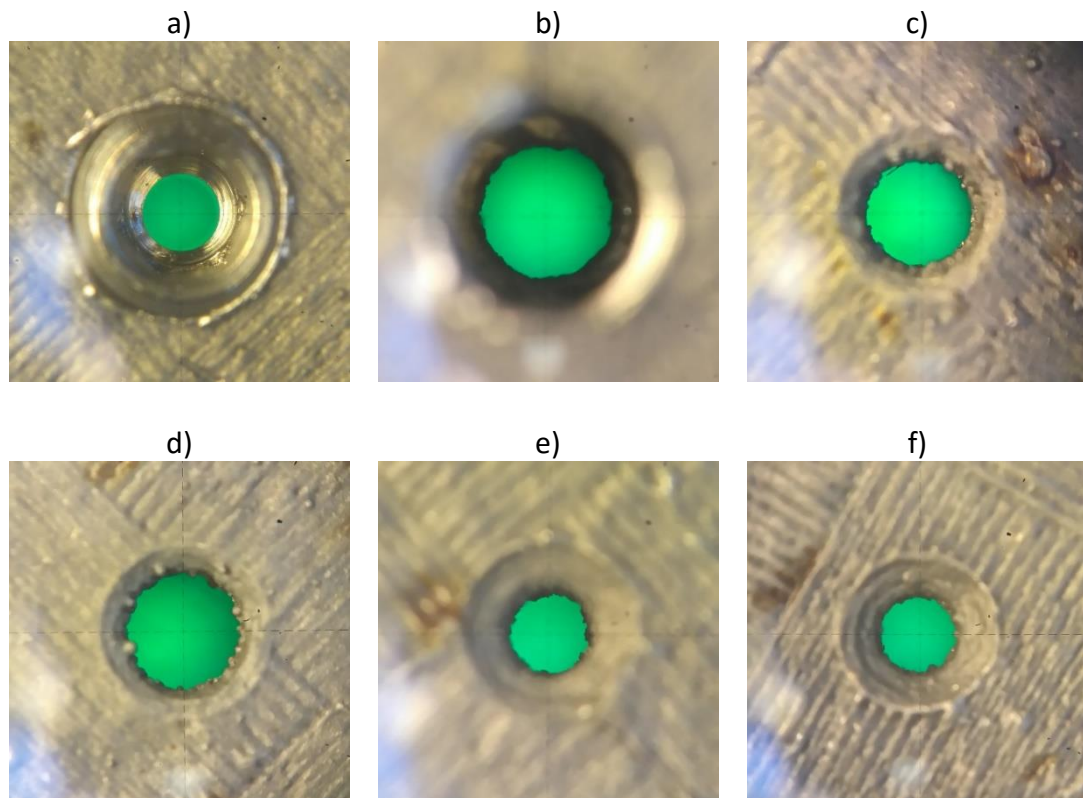
Figur 3.9, Fotografering av væskestråle ved 10 bar. Dyse 1-6 fra toppen.



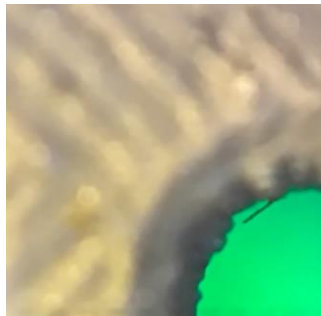
*Figur 3.10, Fotografering av væskestråle ved 70 bar. Dyse 1-6 fra toppen.*

#### *3.3.4.3 Fotografering av dyseåpning*

Etter gjennomført forsøk ble dysene fotografert gjennom et lysmikroskop for å undersøke overflatestrukturen inne i den smaleste åpningen. Det ble observert tydelige ujevnheter ved alle de additivt tilvirkede dysene i form av fastgrodde pulverpartikler. Dyse 3 hadde en nåleformet defekt observerbar i Figur 3.12, dette er trolig skyggen av sponrester som sitter igjen etter maskineringen. Til sammenlikning hadde HP-dysen en glatt overflate i åpningen uten tegn til ujevnheter. Etersom dyse 2 ble gjenget opp i utløpet ved en feiltakelse er fokuset flyttet bakover for å se konturen av overflaten inne i kanalen der diameteren er 1,9 mm.



Figur 3.11, Dyse 1 (a), dyse 2 (b), dyse 3 (c), dyse 4 (d), dyse 5 (e) og dyse 6 (f).



Figur 3.12, Nåleformet defekt observert i dyse 3

#### 3.3.4.4 Måling av volumstrøm

Væskestrømmen gjennom samtlige dyser ble målt med maskinen stilt inn på 40 bar trykk over en periode på 30 sekunder. På bakgrunn av disse målingene samt diameteren på dysene ble volumstrøm, utløpshastighet og utløpskoeffisient kalkulert, verdiene er oppført i Tabell 3. Sammen med den kinematiske viskositeten til skjærevæsken kan vi med disse verdiene også gjøre et overslag på Reynoldstallet til væsken i dysen med formelen:

$$Re = u \frac{d_h}{\nu} \quad (5)$$

Der  $u$  er hastighet,  $d_h$  er hydraulisk diameter og  $\nu$  er kinematisk viskositet. For et rør med sirkulært tverrsnitt er  $d_h$  lik  $D$ .

Tabell 3, Målte og kalkulerte verdier fra måling av volumstrøm.

Dyse nr.	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Målt trykk [bar]	36	36	39	40	40	40
Diameter [mm]	1	1,9	1,4	1,4	1	1
Volumstrøm [l/min]	6,4	15,4	11,2	10,8	5	5,6
Hastighet åpning [m/s]	136	91	121	117	106	119
Utløpskoeff. Cd	0,50	0,34	0,43	0,41	0,37	0,42
Reynoldstall utløp	6974141	4648622	6226912	6004522	5448548	6102373

### 3.3.5 Diskusjon

Det var liten forskjell i overflateruhet for de ytre og indre målingene av dysen. Begge overflatene er bygget og målt i samme retning, og senterhullet er relativt stort, så store forskjeller var ikke ventet. Trolig er det nok større forskjeller på overflaten inne i den innsnevrede delen av kanalen. Det var med det tilgjengelige utstyret ikke mulighet til å gjøre ruhetsmålinger inne i spylekanalen. Overskuddsvarmen fra det smeltede materialet rundt den tynne kanalen vil der være betydelig høyere, noe som kan føre til at uønsket pulvermateriale i nærheten smeltes fast til overflaten (Thomas, 2009). Som beskrevet i Kapittel 2.1.4 er overflateruhet ved AM sterkt avhengig av overhengsvinkel, og den beste overflatekvaliteten oppnår man på vertikale vegger. Samtlige dyser som ble produsert og testet ble bygget med spylekanalen orientert i z-aksen (vertikalt). I et skjærhode vil spylekanalene og dysene ikke være orientert vinkelrett på underlaget, men med en vinkel tilpasset dysens plassering i forhold til skjærsonen. Resultatene fra spyletestene med disse dysene kan derfor avvike fra hvordan dyseegenskapene vil være på et additivt bygget skjærhode med innvendige spylekanaler.

Den relative ruheten ble kalkulert til å være 0,05 ut i fra  $Ra$ -verdiene som ble målt. Verdien var altså helt i grenseområdet for hva som beskrivelse av friksjonsfaktor ved Moody-diagrammet. Det bør også påpekes at  $\epsilon$ -verdier beregnet fra  $Ra$  målinger viste en tydelig trend på å gi for lave resultater i forhold til eksperimentelle verdier i forsøkene til Adams et al. (2012) og at den absolutte ruhetsverdien derfor trolig er høyere enn 0,05. Denne verdien er også kalkulert med  $Ra$ -verdier målt på utsiden av dysekroppen og inne i åpningen på baksiden. Som tidligere nevnt vil trolig ruheten i trangere kanaler være høyere enn i områdene der disse målingene ble gjennomført. Dette er nok en faktor som tyder på at den relative ruheten i virkeligheten er enda høyere.

Dyse 5 og 6 har den minste innsnevringen av dysen (1 mm) og vil i henhold til undersøkelsene til Kruth (2005) være på kanten av hva som er mulig å bygge med et tilfredsstillende resultat. Undersøkelsene i mikroskopet viste ingen markant forskjell på dysene med 1 mm diameter og dysene med 1,4 mm diameter med tanke på gjengroing. For begge størrelsene var det mulig å observere uregelmessigheter i overflaten som fastsmeltede pulverpartikler.

Det er ikke mulig å se noen sammenheng på hvordan lengden på innsnevringen og diameteren på åpningen påvirker væskestrålen ut i fra testene gjennomført. Resultatene vist i Tabell 3 viser en økning i utløpskoeffisient ved økende lengde for dysene med  $\varnothing 1,4$  mm. For dysene med  $\varnothing 1$  mm ble utløpskoeffisienten derimot redusert ved økende lengde av innsnevringen. Trykkmåleren var plassert like etter verktøykoblingen, trykktapet mellom måleren og dyseutløpet vil dermed gi en lavere utløpskoeffisient enn dersom målingen hadde blitt tatt like før dysen. Men ettersom avstanden mellom måleren og dysen er lik for alle testene vil  $C_d$  verdiene kunne brukes til å sammenlikne ytelsen til dysene mot hverandre. Ikke overraskende hadde HP-dysen den høyeste utløpskoeffisienten av alle dysene. Dysen med lavest  $C_d$  var dyse 2, dysen uten innsnevring. Dyse 3, 4 og 6 viste små forskjeller, og dyse 5 var noe lavere. Det ble observert positiv korrelasjon mellom væsketrykk og strålespredning. Økningen i spredningsvinkelen var størst for målingen av vinkelen til tåken rundt hovedstrålen (se Figur 3.7 og Figur 3.8). Det var egenskaper ved de ulike strålene som ikke reflekteres i vinkelmålingene knyttet til retningen og stråledistribusjonen. Spesielt dyse 4 og 5 hadde væskestråler som ikke var symmetriske om hovedstrålen. Spredningen i dyse 4 ble observert til å være størst, det er derimot vanskelig å skille dyse 4 fra de andre AM-dysene med tanke på mengden ujevnheter som ble fotografert inne i dysen. Det kan tenkes at ved en lengre innsnevring er arealet, og dermed sannsynligheten også større, for at en eller flere større defekter i er til stede på overflaten som kan redusere ytelsen til dysen. De to dysene som presterte best med tanke på både spredning og utløpskoeffisient var dyse 3 og 6. Dyse 6 hadde en noe lavere spredningsvinkel for tåken ved høyt trykk.

Som vist i Tabell 3 er det i alle dysene snakk om strømning med svært høyt Reynoldstall ( $\sim 10^6$ ). Dette er ikke overraskende ettersom dimensjonene på dysene og kanalene er mini-nivå, og trykket er høyt. Væskestrømmen ble også for HP-dysen ledet gjennom en additivt tilvirket spylekanal med høy relativ ruhet før den entret dysen. På tross av dette presterte HP-dysen utmerket og beholdt en konsentrert stråle helt opp til 70 bar. Dette viser at ruheten i spylekanalene er mindre viktig, og at det er ruheten inne i dysen som i størst grad avgjør spredningen til væskestrålen.

En svakhet med måten forsøket ble gjennomført på var det at det ikke var noen mulighet til å kvantitativt bestemme i hvilken grad væskestrålens retning samsvarer med den retningen til dysen. Det er mulig at dysene som hadde en konsentrert stråle likevel presterte dårlig med tanke på treffsikkerhet. Monteringen av kameraet inne i CNC-maskinen var ikke lik under testingen av alle dysene, årsaken til dette var at det måtte byttes batteri på kameraet to ganger i løpet av forsøket. Det var også problemer med den trådløse styringen av kameraet som gjorde at kameraet måtte skrus av og på manuelt flere ganger mellom testene som ble gjort, kameraet ble da vridd litt ut av posisjon. Noen sammenliknende målinger mellom de ulike dysene med tanke på strålens retning var derfor ikke mulig.

På grunn av en feilmelding knyttet til et luftfilter i M2-maskinen stoppet byggeprosessen flere ganger. Arbeidet måtte da gjenopptas, men det førte til at byggeprosessen tok betydelig lengre tid enn først anslått. Det kan tenkes at det under de gjentatte omstartene kan ha skjedd

variasjoner i prosessen som påvirket byggeresultatet. Trolig er effektene av denne feilen minimal hva gjelder overflatekvalitet.

Det var under trådnistingen av dysene problemer med at tråden hang seg fast i det den kom i kontakt med pulveret som lå innkapslet i senterhullet. Selv om pulveret ikke var helt innestengt var det ikke mulig å fjerne pulveret gjennom den trange dyseåpningen før trådnistingen. Dette førte til at prosessen stoppet gjentatte ganger og måtte startes på nytt. Løsningen viste seg å være å skru ned kuttehastigheten til et minimum, men selv da var det problemer. Dette førte til at dysene ble liggende i vannbadet med påført spenning i flere dager, som igjen førte til at overflaten på dysene ble korrodert. Mengden korrosjon som oppsto under denne prosessen kan ha påvirket overflatene inne i dyseutløpet som videre kan ha påvirket resultatet av spyletestene.

Skjærevæsken skummet noe etter å ha blitt sprutet gjennom dysen. Da det ville tatt for lang tid å gjennomføre forsøket dersom man skulle ventet til alt skummet hadde løst seg opp er trolig volummålingene påvirket av dette og noe høyere enn faktisk volum.

### 3.3.6 Konklusjon dyseutforming

Det er vanskelig å trekke konklusjoner om hvordan dysenes lengde-/diameterforhold påvirker væskestrålen. Det ble observert en betydelig mer samlet væskestråle fra HP-dysen sammenliknet med de additivt tilvirkede dysene. Forskjellene i strålespredning mellom AM-dysene var derimot liten.

Forsøket viste at det på tross av svært høy overflateruhet inne i spylekanalene var mulig å oppnå en konsentrert stråle ved bruk av HP-dyser, dette tyder på at det i størst grad er overflateruheten i dysen som har en innvirkning på spredningen av væskestrålen.

I praktisk bruk på et skjærhode vil avstanden mellom dyse og skjærsonen være kort, spesielt på de minste 16 mm skjærhodene. De første centimeterne etter dyseåpningen var forskjellene mellom HP-dysen og AM-dysene mindre. Innad mellom AM-dysene var forskjellene i dette området svært små. Dette betyr at i situasjoner der avstanden mellom dyse og skjærspiss er kort eller kravene for nøyaktighet er lavere så kan AM-dyser være tilstrekkelig.

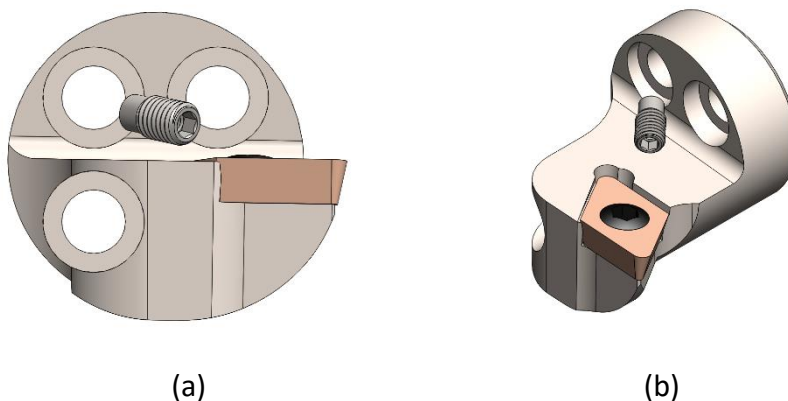
Basert på målingene og en kvalitativ vurdering av film og fotografier av væskestrålene ble dyse 6 vurdert som den som presterte best av de additivt tilvirkede dysene i dette forsøket. Det bør påpekes at nyansene mellom dyse 6 og dyse 3 var svært små.

## 4 Design av nytt skjærhode

### 4.1 Innledning

Det er hovedsakelig to områder der additiv tilvirkning kan bidra med å forbedre dagens design av skjærhodet. Først og fremst er måten spylekanaler bores og plasseres i dagens produksjon problematisk, spesielt på de minste skjærhodene. Lite plass gjør at det ikke er mulig å maskinere spylekanaler som treffer skjæresonen fra en gunstig vinkel. AM tillater som tidligere forklart en friere plassering og orientering av indre kanaler som ikke er begrenset av verktøyene de skal produseres med. Et annet område der det er rom for forbedring er vekten til skjærhodet. Under bruk monteres skjærhodet ytterst på en dempet borstang. Lavere vekt ytterst på borstangen vil føre til forbedret ytelse av dempesystemet.

I første omgang ble det gjort en vurdering om det skal gjøres et forsøk på å implementere HP dyser i AM-hodene. Figur 4.1 viser en sammenlikning av størrelsen på den minste HP-dysen Sandvik Teeness benytter og et 16 mm skjærhode. På figuren er dysen orientert slik at væskestrålen ville truffet tuppen av skjæret. Ettersom det kreves en kanal som leder væsken inn i bakkant av dysen i tillegg til materiale rundt dysen for å kunne lage et gjenget hull er det tydelig at det ikke vil være mulig å montere en HP-dyse uten å hindre tilkomsten til monteringshullene. Selv ikke dersom HP-dysen var orientert parallelt med monteringshullene var det nok materiale til et hull med M2,5 gjenger. Det er derfor rimelig å konkludere med at det ikke er mulig å finne en plassering av spylekanalen som gjør det mulig å unngå monteringsboltene samtidig som væskestrålen treffer skjæret på en gunstig måte. Videre vil det derfor fokuseres kun på skjærhoder med AM-dyser. Basert på resultatene fra forsøket gjennomført i forrige kapittel ble det bestemt at dyseutformingen skulle være av «liten-kort», altså diameter på 1 mm og lengde på innsnevring 0,89 mm.



Figur 4.1, Sammenlikning av 16mm skjærhode og M2,5 HP-dyse. (a) ovenfra, (b) isometrisk tegning.

### 4.2 Topologi-optimalisering av skjærhode

Topologi-optimalisering ble av forfatteren vurdert som en lovende metode for design av skjærhoder til dreining. Metoden viste en mulighet til å redusere den totale massen til et 40 mm skjærhode samtidig som styrkeegenskapene ble bevart. Spylekanaler ble også



implementert i dette skjærhodet, men disse ble lagt til som et separat steg i prosessen (Grøstad, 2015). Metoden vil derfor benyttes som et verktøy i utformingen av et 16 mm skjærhode tilpasset additiv tilvirkning med noen modifikasjoner i forhold til tidligere arbeid.

Topologi-optimalisering er en matematisk metode for å bestemme material fordelingen i et designområde under gitte betingelser for at sluttresultatet skal tilfredsstill definerte designkrav. Metoden brukes stort sett på konsept nivå i designprosessen for å bestemme designløsninger som senere kan finjusteres med tanke på ytelse og produserbarhet.

Det finnes flere metoder for topologi-optimalisering. I arbeidet gjort i sammenheng med denne oppgaven er det benyttet en volumbasert tetthetsmetode. Komponenten som skal optimaliseres deles opp i et sett med volumelementer. Hvert volumelement har en tetthetsverdi mellom 0 og 1. En tetthet på 1 betyr at materialet har en maksimal tetthet, mens en tetthet på 0 betyr at det ikke er noe materiale til stede. Volumelementer med tetthetsverdier i området mellom 0 og 1 er elementer som representerer fiktivt materiale ikke behøver en fullstendig tetthet for å tåle belastningen gjennom den. Tetthetsverdiene brukes til å skalere stivhetsverdien til volumelementene i FEA modellene som brukes under optimaliseringen, og stivheten til materialet antas å være lineært avhengig av tettheten.

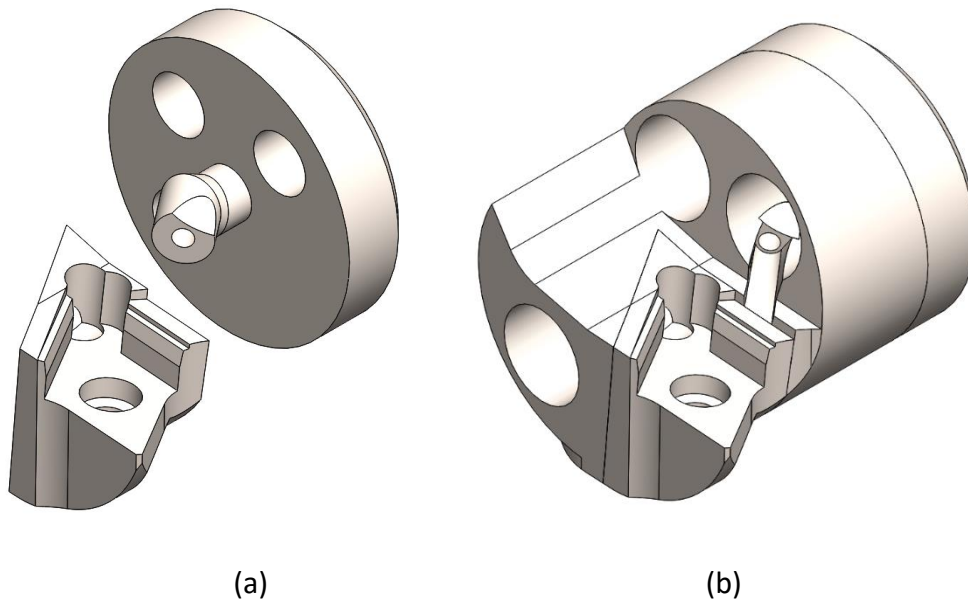
Som en designer er det nødvendig å gjøre en skjønnsmessig vurdering av resultatet og sette en grenseverdi for hvor stor tetthet et volumelement må ha for å inkluderes i designet. For eksempel kan man si at alle elementer med en tetthet lavere en 50% skal fjernes. Et iso-plot av elementtetthetene er et hjelpemiddel for å visualisere hvordan grenseverdien påvirker formen til modellen.

Det kan også defineres ulike produksjonsspesifikke bestemmelser for hvordan resultatet av optimaliseringen kan være. Dette kan være i henhold til for eksempel maskinerbarhet for å være mulig å frese ut fra en eller flere bestemte sider. Mulighet for å fjernes fra en støpeform kan også bestemmes i dette steget, eller ekstruderingsretning. Gruppering av mønstre kan være hensiktsmessig for å sikre at ønskede forsterkende geometrier dannes som symmetrier over ett eller flere plan. De produksjonsspesifikke styringene kan kombineres etter eget ønske men det advares mot å over bestemme problemet og at det kan føre til at løsningsrommet for modellen blir veldig lite (Altair, 2015).

Resultatene som kommer ut av en topologi-optimalisering er sjelden direkte produserbare, heller ikke ved hjelp av additive produksjonsmetoder. Det varierer mellom ulike programvarer hvor glatte overflater som produseres. Geometrien som eksporteres ut fra optimaliserings programvaren må da brukes som en mal for et redesign av komponenten. Avhengig av hvor grov den eksporterte geometrien er og kravene for nøyaktighet kan man velge å enten fikse opp på den eksporterte filen eller å utforme en ny CAD modell basert på hovedtrekkene fra resultatet. Et problem dersom man arbeider videre med den eksporterte geometrien er at integreringen på tvers av programvareplattformer varierer. Eksportert geometri er gjerne i et standardisert format som STEP eller IGES. Konvertering mellom filformater kan som nevnt i

Kapittel 2.1.8 føre til feil i kryssende overflater og åpninger mellom overflater som i ettertid må repareres manuelt. Dette reparasjonsarbeidet kan være tidkrevende.

Ulik programvare ble benyttet under utformingen av skjærhodet. En CAD-fil fra Sandvik Teeness av det aktuelle skjærhodet ble benyttet som utgangspunkt for videre arbeid, og importert i *SolidWorks*. Her ble det også utformet den modellen som skulle være utgangspunktet og designområdet for topologi-optimaliseringen, vist i Figur 4.2.



Figur 4.2, Ikke-designområdene på skjærhodet (a), utgangspunkt for topologi-optimalisering inkludert designområdet (b).

Det er viktig under defineringen av modellen som skal være utgangspunkt for topologi-optimaliseringen at man har et så stort design område som mulig for at programvaren skal ha mulighet til å komme frem til den beste løsningen. Det er samtidig viktig at man definerer modellen slik at viktige geometriske detaljer ikke går tapt. Flater eller punkter der krefter skal påføres modellen kan ikke defineres som design område. På skjærhodet ble området rundt skjærleiet, spylekanalen og bunnplaten med hull definert som ikke-designområde. Designområdet ble laget så stort som praktisk mulig for å fylle ut det resterende volumet mellom og rundt ikke-design områdene. I tidligere arbeider benyttet forfatteren en tilsvarende metode for utforming av et skjærhode ved topologi-optimalisering. To ulike metoder for orientering a spylekanalene ble presentert, men da som et separat steg etter topologi-optimaliseringen og effektene av hvordan spylekanalene påvirket styrkeegenskapene til skjærhodet var dermed vanskelig å forutse. Som en forbedring av denne prosessen bli det derfor lagt inn en spylekanal i ikke-designområdet, slik at optimaliseringen også tar hensyn kanalens plassering og trykk (Grøstad, 2015).

Programvaren *SolidThinking Inspire*, levert av *Hyperworks*, ble brukt til å gjennomføre optimaliseringene. Programmet er ment for å være et brukervennlig verktøy designere og

ingeniører kan benytte for å raskt utvikle konseptdesign. *Hyperworks* leverer også en mer avansert programpakke med støtte for topologioptimalisering i programmet *Optistruct* der man i større grad kan skreddersy optimaliseringen og analysen. Dette programmet ble i tidligere arbeider benyttet av forfatteren, men på grunn av begrensninger i studentlisensen som var tilgjengelig var det ikke mulig å gjennomføre en tilfredsstillende analyse av skjærhodet i dette programmet.

Kreftene påført skjærhodet i analysen ble satt til 1000 N hovedskjærkraft ( $F_t$ ), 500 N matingskraft ( $F_f$ ) og 200 N radiell kraft. Dette lastsenarioet ble vurdert som noe høyere enn for et tilsvarende skjærhode under normal bruk. Kreftene ble påført ved skjærspissen. De indre veggene i spylekanalene ble påført et trykk på 70 bar, tilsvarende maksimaltrykket benyttet under dysetesten.

Materialeegenskapene til CL 50WS ble definert for selve skjærhodet, mens skjæret fikk materialeegenskapene til et høyhastighetsstål (HSS) som brukes i skjæreverktøy. Materialeegenskapene til de to stålene er listet opp i Tabell 4.

*Tabell 4, Materialeegenskaper CL 50WS og HSS. (Concept-Laser, 2011), (AZOMaterials, 2016) og (Ledbetter and Read, 1977)*

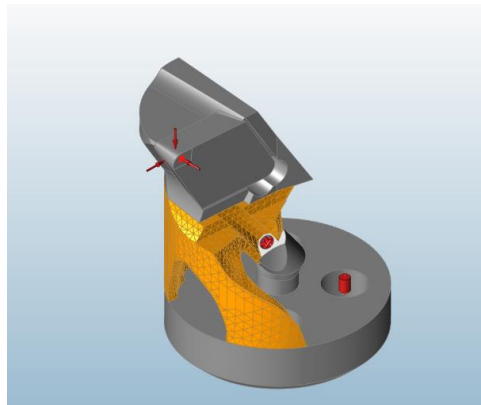
<b>Materiale</b>	<b>E</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>Tetthet <math>\rho</math></b>	<b>Flytegrense</b>
CL 50WS	200 000 MPa	0,325	8,050 g/cm <sup>3</sup>	1550 MPa
HSS	210 000 MPa	0,290	8,160 g/cm <sup>3</sup>	3250 MPa

Etter å ha gjennomført en FEM analyse av skjærhodet kunne topologi-optimaliseringen starte. Flere optimaliseringer ble gjennomført med ulike parametere for minste veggtykkelse og maksimalt volum i forhold til det opprinnelige designområdet. Resultatene fra de ulike optimaliseringene ble sammenliknet og er oppført i Tabell 5.

*Tabell 5, Resultater fra topologi-optimaliseringer og styrkeberegninger i Inspire*

<b>Run</b>	<b>Max Displacement [mm]</b>	<b>Min Factor of Safety</b>	<b>Mass Total (uten skjær) [g]</b>	<b>Max von Mises Stress [MPa]</b>	<b>Volume fraction %</b>	<b>Thickness constraint [mm]</b>
TOPO (1)	0,05	1,2	17,5	2053	100	-
TOPO (2)	0,07	1,9	9,7	816	20	2
TOPO (4)	0,09	2,1	9,2	744	15	2
TOPO (6)	0,06	2,4	10,7	644	30	2
TOPO (8)	0,09	2,2	9,7	706	20	1,5
TOPO (10)	0,10	2,2	9,2	707	15	1,5
TOPO (12)	0,12	0,9	8,7	1715	10	1,5
Original	0,06	1,5	13,4	1192	-	-

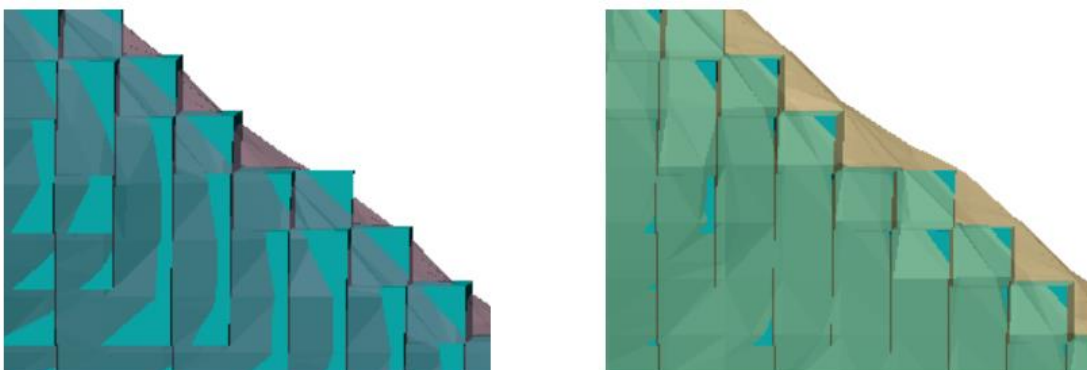
Basert på resultatene i Tabell 5 ble modellen som ble valgt til å arbeide videre med TOPO (10). Den maksimale von Mises spenningen var i dette skjærhodet blant de laveste, men med en noe høyere avbøying enn snittet. Denne modellen ble utformet med en volumbegrensning på 15 % og en minste veggtykkelse på 1,5 mm. Første steg av postprosesseringen ble gjennomført i *Inspire* ved å benytte funksjonen «Fit» for å gjøre om resultatet fra optimaliseringen fra volumelementer til sammenkoblede overflater. *Inspire* har også kompatibilitet å pakke inn modellen i NURBS-overflater, som gjøre det mulig å glatte over ujevnheterne etter optimaliseringen. Denne funksjonaliteten viste seg å fungere dårlig på skjærhodets geometri og ble derfor ikke benyttet.



Figur 4.3, Resultat av topologi-optimalisering i *Inspire*, TOPO(10)

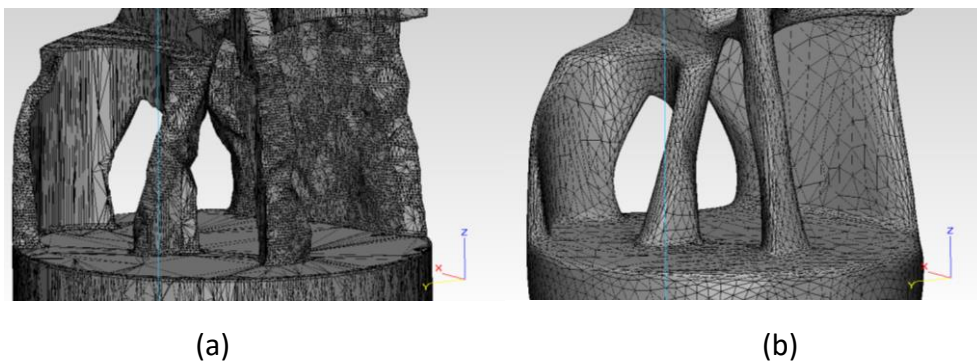
Materialise *3-maticSTL* har støtte for postprosessering av resultater fra topologi-optimaliseringer. Den valgte modellen fra *Inspire* ble derfor eksportert som en STL-fil og importert for videre bearbeiding i *3-maticSTL*.

Første steg i postprosesseringen av topologi-optimaliseringen var å pakke inn modellen i en ny STL-overflate. I dette prosessstrinnet kan man definere grensen for hvor små detaljer som skal tas hensyn til samt forskyvningen av overflaten i forhold til gjennomsnittsflaten. Ved å justere forskyvningen kan man kontrollere at man ikke mister deler av volumelementer fra den optimaliserte modellen.



Figur 4.4, Forskyvning av STL overflate i forhold til optimalisert modell. (Materialise, 2016)

En iterativ prosess ble benyttet for å jevne ut de grove overflatene etter optimaliseringen. Stegene i prosessen var først å redusere mengden trekkanter i modellen, deretter dele trekkanter inn i mindre trekkanter for så å bruke funksjonen «smooth» til å glatte over ujevnheter. Desto flere ganger man går gjennom denne prosessen, desto jevnere blir overflatene. Dersom metoden benyttes på hele modellen og ikke bare designområdet, vil man miste nøyaktigheten til viktige detaljer på ikke-design områdene. En enkel løsning for å gjenopprette detaljene er å gjennomføre en boolsk subtraksjon mellom den bearbejdede modellen og modellen som ble brukt som utgangspunkt for topologi-optimaliseringen. Figur 4.5 viser en sammenlikning av STL overflaten til et topologi-optimalisert skjærhode før og etter postprosessering i *3-maticSTL*.



Figur 4.5, Før (a) og etter (b) utjevning av topologi-optimalisert skjærhode (uten spylekanaler).

Modellen i Figur 4.5 er en tidlig versjon der spylekanaler skulle tegnes inn etter optimaliseringen. På grunn av et ønske om å fylle tomrommet i midten av skjærhodet med lettvektstruktur ble det av praktiske årsaker bestemt at tomrommet måtte lukkes for å forhindre spon i å hekte seg fast å skape problemer. Selv om *3-maticSTL* har CAD-funksjonalitet viste det seg lettere å heller bygge opp skjærhode med lukket hulrom fra bunn i *SolidWorks*. Ikke-design områdene ble lagt inn som SW-filer, og resultatet fra optimaliseringen ble lagt inn og brukt som en skygge overflatene kunne bygges rundt. Ulike alternative utforminger av veggene ble vurdert, men valget endte til slutt på en variant med vertikale vegger

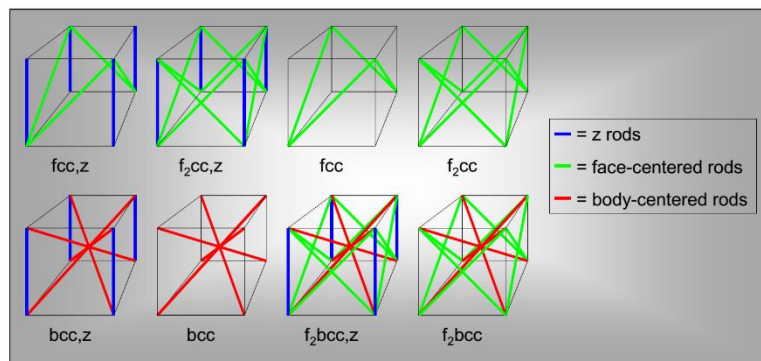


Figur 4.6, Skjærhode med (a) og uten lukket hulrom (b).

### 4.3 Lettvektstruktur

Additiv tilvirkning og PBF muliggjør produksjon av strukturer umulige eller svært vanskelige å fremstille ved tradisjonelle produksjonsmetoder. Lettvektstrukturer bestående av tynne fagverk eller andre gjentakende geometriske mønstre er en slik type struktur. Hovedfordelene med denne typen materialer er et høyt styrke-/vekt forhold. Vibrasjonsdempende egenskaper og termiske isolasjonsegenskaper kan også bygges inn i materialet. Additiv tilvirkning er en tidkrevende prosess der det tas i bruk kostbare materialer, ved å kunne bygge lettere komponenter med lavere materialbruk kan man også redusere produksjonstiden og materialkostnader (Yan et al., 2012).

Lettvektstrukturer kan utformes på forskjellige måter. Mest vanlig er det å bygge den opp av kubiske celler. Figur 4.7 viser de fundamentale kubiske celletypene basert på rette fagverk. Strukturen kan da lett beskrives ved hjelp av kun to mål, cellestørrelse og stangdiameter. Det er her sett bort i fra horisontale fagverk ettersom disse ikke er mulige å bygge additivt uten støtte (Rehme and Emmelmann, 2006).



Figur 4.7, De fundamentale kubiske celletypene basert på rette stenger i en fagverksstruktur. (Rehme and Emmelmann, 2006)

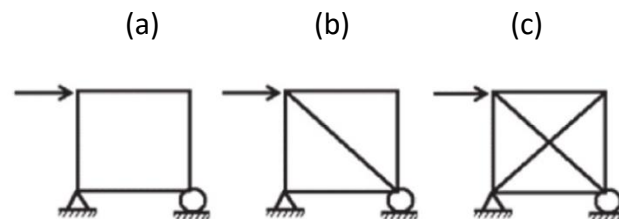
Strukturer med 15 % volumfraksjon og en cellestørrelse mellom 2 og 8 mm ble produsert og undersøkt i arbeidet gjennomført av Yan et al. (2012). Det ble vist at mindre cellestørrelser oppnår en høyere materialtetthet og dermed en høyere styrke sammenliknet med større cellestørrelser. Dette ble forklart med at en tynnere struktur gir bedre innsmelting av pulvermaterialet og en høyere tetthet i stengene i gitteret (Yan et al., 2012).

De mekaniske egenskapene til en lettvektstruktur er avhenging av cellens topologi, grense- og lastbetingelser, og relativ tetthet ( $\rho/\rho_s$ ). Relativ tetthet er lettvektstrukturens tetthet i forhold til tettheten til det solide materialet. De mekaniske egenskapene er sterkt avhengig om stengene i strukturen er strekk- eller bøyedominert under last. For å forutse hvordan en lettvektstruktur vil oppføre seg under last kan stangkoblinger og antall frihetsgrader kvantifiseres ved å regne ut Maxwelltallet ( $M$ ). For en 3-dimensjonal struktur kan  $M$  regnes ut ved formelen:

$$M = s - 3n + 6 \quad (6)$$

Der  $s$  er antall sammenkoblede stenger ved  $n$  antall noder. Maxwelltallet kategoriserer lettvektstrukturen i tre ulike egenskaper:

- Under-stiff hvis  $M < 0$ . En slik struktur har ikke nok stenger til å være statisk bestemt og vil fungere som en mekanisme dersom moment ikke overføres i nodene. En under-stiff struktur vil være bøye-dominert under last.
- Just-stiff hvis  $M = 0$ . En just-stiff struktur har kun det minimale antall stenger for å være statisk bestemt og er dermed ikke avhengig av at moment overføres i nodene. Strukturen er strekk-dominert og har en høy strukturell effektivitet.
- Over-stiff hvis  $M > 0$ . En slik struktur har flere stenger en nødvendig for å oppnå statisk likevekt. En over-stiff struktur har svært høy stivhet og styrke, og har en strekk-dominert oppførsel under last. Stor grad av overfløydige stangelementer gir økt styrking av strukturen.



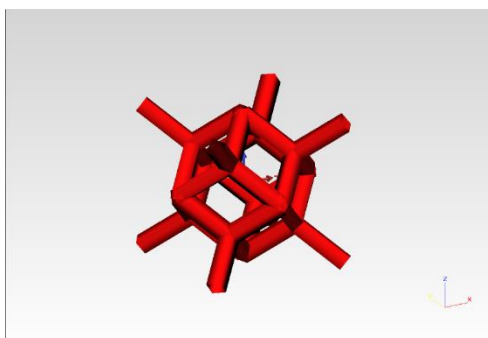
Figur 4.8, (a) Under stiff, (b) just-stiff, (c) over-stiff struktur.

En annen viktig faktor for å vurdere en lettvektstrukturens egnethet for additiv tilvirkning er produksjonsvennligheten den innebærer. Strukturer med lange overhengende elementer og dårlige evner for varmetransport kan være vanskelige eller umulige å produsere additivt. Hvilke strukturer som er mulig å produsere er også prosess og maskinavhengig. Minste mulige cellestørrelse, stangdiameter og laveste overhengsvinkel må bestemmes eksperimentelt for å sikkert kunne vite hva som gjelder hvilke maskintyper. For et kubisk celleelement plassert normalt i forhold til overflaten, med rette stangelementer vil mulige overhengsvinkler være  $0^\circ$ ,  $35.26^\circ$ ,  $45^\circ$  og  $90^\circ$ . Leary et al (2016) gjennomførte forsøk der blant annet byggekvaliteten ved de ulike overheng for stangelementene ble undersøkt. Forsøkene ble utført med AlSi12Mg og viste at det for hverken 0.5, 1, 2 eller 3 mm stangdiameter var mulig bygge med  $0^\circ$  overheng i en lettvektstruktur med 7,5 mm cellestørrelse.

De nedover-pekende overflatene av stangelementene har større overflateruhet enn de oppover-pekende og vertikale overflatene. Lavere overhengsvinkel gir høyere overflateruhet på den nedoverpekende overflaten. Peak-to-peak-verdien ( $R_z$ ) til sideflatene og de oppoverpekende flatene var ikke mulig å skille statistisk. (Leary et al., 2016)

Lettvektstrukturens som ble bygget i prototypen av skjærhodet var av typen rombisk dodekahedron Figur 4.9, en ferdig struktur i 3-maticSTL. Maxwelltallet til en enhetscelle med dodekahedronstruktur er:

$$M = 32 - (3 * 14) + 6 = -4 \quad (7)$$

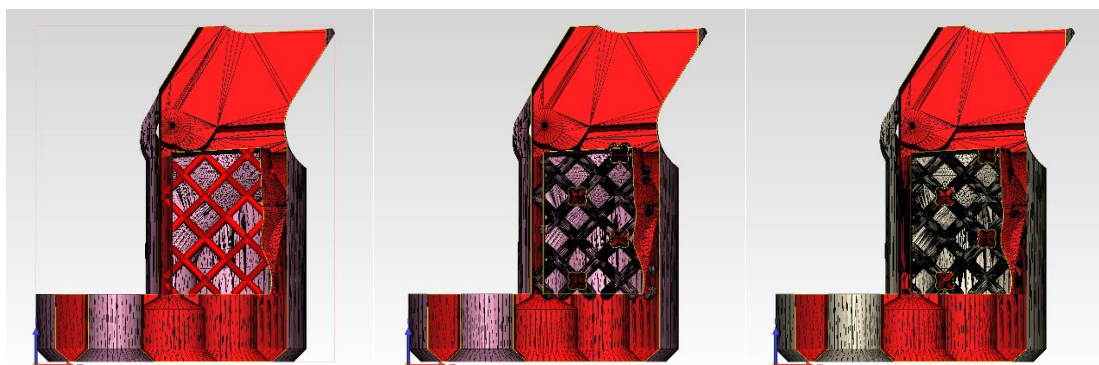


Figur 4.9, Dodekahedron enhetscelle

Dodekahedron-strukturen er altså under-stiff. Til sammenlikning har ingen av de kubiske enhetscellene; BCC, BCCZ, FCC, FCCZ eller FBCCZ positiv  $M$  verdi uten horisontale stangelementer. FBCCZ har det høyeste Maxwelltallet av disse på  $-5$ . Periodiske strukturer sammensatt av rigide enhetsceller vil være stive. Periodiske strukturer av ikke-rigide enhetsceller kan derimot både være stive og ikke-stive, avhengig av hvordan enhetscellene støtter opp hverandre i sammenkoblet tilstand (Deshpande et al., 2001).

Cellestørrelsen på skjærhodet ble satt til 5 mm med en stangdiameter på 0,7 mm og koblingstykkelse 0,35 mm. Dodekahedron-strukturen gir tilsvarende som for BCC-strukturen også en laveste overhengsvinkel lik  $35,3^\circ$ . Strukturen vil være interessant å studere med tanke på produserbarhet av lave overhengsvinkler i verktøystål ettersom testene til Leary (2016) kun ble gjennomført med AISi12Mg.

En av de store fordelene med *3-matic*STL ved design av lettvektstrukturer er at man arbeider med og redigerer strukturen som en graf før man i det avsluttende steget gir strukturen en tykkelse og konverterer til STL overflater. Ved å arbeide med grafer er belastningen på datamaskinen blir betydelig lavere, spesielt ved store gitterstrukturer som ville resultert i millioner av triangler i STL overflatene.



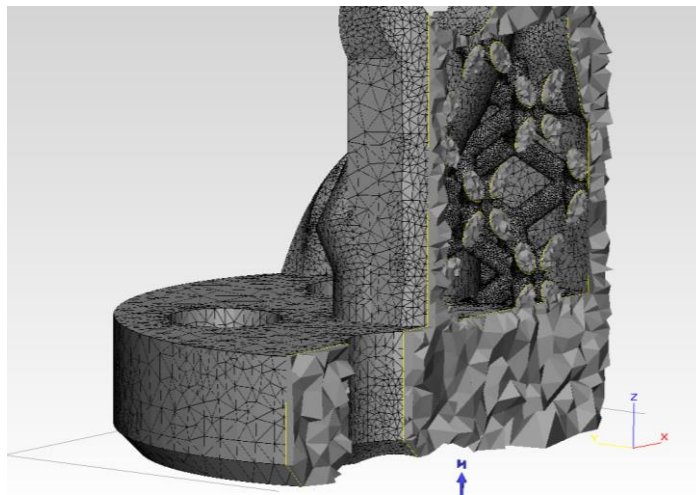
Figur 4.10, Konstruksjon av lettvektstruktur i *3-matic*STL. Til venstre lettvektstruktur som graf, i midten konvertert til STL, og til høyre etter boolsk addisjon mellom lettvektstruktur og skjærhode.



Ved additiv tilvirkning med PBF må man dersom det bygges en indre lettvektstruktur i komponenten sørge for en mulighet for å fjerne det resterende pulvermaterialet etter bygging. Det er derfor viktig at lettvektstrukturen ikke består av lukkede celler og at det er en åpning pulvermaterialet kan fjernes gjennom. Bikubestruktur eller liknende lukkede strukturer som benyttes i stor grad ved 3D printing med for eksempel FDM teknologi, egner seg derfor dårlig som lettvektstruktur for PBF. Det ble tegnet inn to kanaler gjennom bunnplaten for å kunne fjerne pulveret inne i hulrommet.

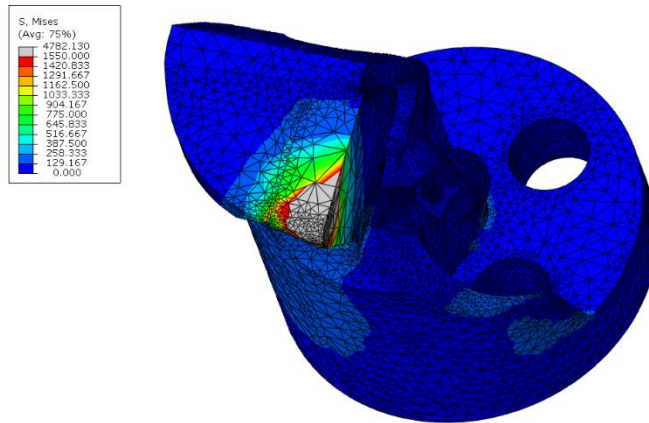
#### 4.4 Eksport for FEA

*3-maticSTL* muliggjør også generering av volum-mesh basert på den triangulerte overflaten. Volumelementene kan eksporteres til videre analyse i flere ulike formater tilpasset vanlige FEA program som *Abaqus*, *ANSYS*, *Nastran* etc. Før generering av volumelementer er det viktig med en overflate-mesh med høy kvalitet. Overflaten må være fri for defekter som kryssende, overlappende triangler, hull eller inverterte overflater. Det høye detaljnivået spesielt i gitterstrukturen krever at trianguleringen her gjøres med en høyere oppløsning enn andre områder på skjærhodet.



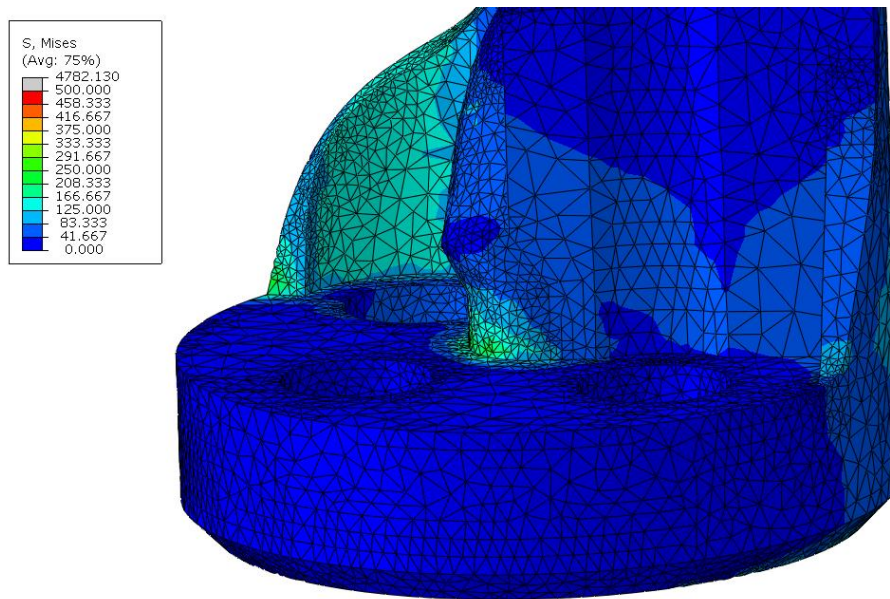
Figur 4.11, Tverrsnitt av skjærhode etter generering av volumelementer.

En forenklet analyse ble gjennomført i *Abaqus* for å vise funksjonaliteten. Skjærhodet ble i dette tilfellet analysert med kun ett materiale i motsetning til de tidligere analysene hvor skjæret var en separat del i HSS stål. Kreftene og opplagringene ble ellers definert på samme måte som tidligere. Figur 4.12 viser kalkulert von Mises spenning i skjærhodet med lettvektstruktur analysert i *Abaqus*. Fargeskalaen har satt 1550 MPa som øvre grense da dette er flytegrensen til *CL 50WS*. Alle trianglene markert som høyere enn denne grensen i modellen var i selve skjæret.

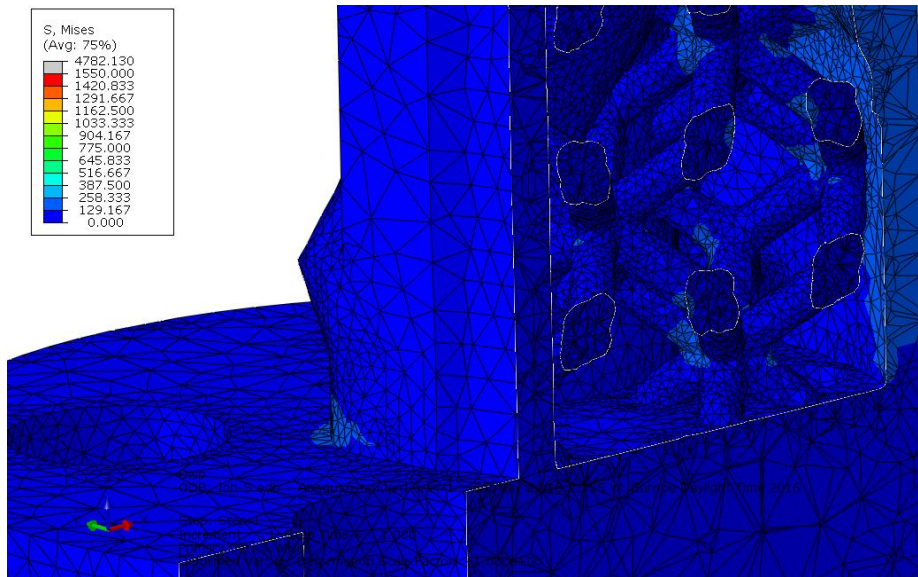


Figur 4.12, von Mises spenning i skjærhode eksportert fra 3-maticSTL

Spenningskonsentrasjoner ble observert der spylekanalen møter bunnplaten og der den fremre vegg møter bunnplaten vist til venstre i Figur 4.13. Fargeskalaen er i Figur 4.13 skalert mellom 0 og 500 MPa for å få frem flere detaljer i spenningsbildet. Figur 4.14 viser von Mises spenningen i deler av lettvektstrukturen. Det er i kontaktpunktene mellom de ulike stengene i gitteret man kan se enkelte spenningskonsentrasjoner.



Figur 4.13, Spenningskonsentrasjoner i skjærhode.



Figur 4.14, Spenningskonsentrasjoner i lettvektstruktur.

Avrundingene ble forsøkt lagt til i *3-maticSTL*. Denne funksjonaliteten viste seg å være lite forutsigbar og gav dårlige resultater. På sirkulære hull og enkle former ble det dannet jevne avrundinger, men for avrundinger mellom overflater med kanter og hjørner oppsto det feil i trianglene som måtte repareres manuelt. Det var heller ikke mulig å lage avrundinger som gradvis ble avsluttet. Det var derfor nødvendig å gå inn å manuelt fikse på endene av avrundingene for å fjerne skarpe kanter. Sammenliknet med tradisjonell CAD-programvare var prosessen tungvint og lite forutsigbar. Nok en gang viste det seg lettere å gjennomføre designendringene i *SW* for så å gå gjennom de avsluttende trinnene i *3-maticSTL* på nytt fremfor å benytte CAD-funksjonaliteten i *3-maticSTL*.

Den endelige utformingen av skjærhodet med lettvektstruktur og avrundinger, men med samme forenklinger av skjærleiet og bunnplate som benyttet i topologioptimaliseringen hadde en masse på 10,2 g og et totalt volum på 1266 mm<sup>3</sup>. Et ferdig maskinert skjærhode med rillebilde og gitterstruktur vil ha en masse på 9,9 g. Sammenliknet med skjærhodet som ble brukt som et utgangspunkt tilsvarer dette en vektreduksjon på 3,2 g, som vil si en reduksjon på 23,9 %.

#### 4.5 Diskusjon

Det var ikke mulig å orientere spylekanalen på en slik måte at det var tilstrekkelig med materiale til å montere en HP-dyse på skjærhodet. Dette betyr at man på 16 mm skjærhodene er avhengig av at additivt tilvirkede dyser er tilstrekkelig for å kontrollere væskestrålen. Et konsept for orientering av spylekanaler ble presentert, konseptet baserte seg på å tegne kanalene som rør i ikke-designområdet til topologi-optimaliseringen. Spylekanalene må være orientert slik at rørveggen ikke stikker utenfor det som er definert som skjærhodets designområde. Så lenge kanalene tilfredsstiller dette kravet kan de i prinsippet orienteres fritt. Flere spylekanaler vil også kunne kombineres med en slik metode for å for eksempel legge inn

kanaler for bakspyling. Dersom det er plass til det kan flere kanaler rettes mot skjærspissen, men dette vil være mer aktuelt for større skjærhoder en 16 mm.

Proessen med å utarbeide et skjærhodedesign gjennom topologi-optimalisering resulterte i en utforming godt egnet for additiv tilvirkning. Dersom man ser bort i fra lettveksstrukturen som ble lagt til skjærhodet i etterkant av optimaliseringen var designet likevel uegnet for produksjon ved hjelp av tradisjonelle subtraktive metoder. Det ble ikke lagt til produksjonsspesifikke begrensninger i optimaliseringen og er maskineringsvennlig resultat var derfor heller ikke ventet.

Massereduksjonen på 3,2 g som ble oppnådd ved topologioptimalisering og indre lettveksstruktur høres kanskje lite ut, men ettersom massen til skjærhodet er så lav i utgangspunktet utgjør det en betydelig prosentandel (23,9%). En redusert vekt ytterst på borstangen vil gjøre at dempesystemet presterer bedre. Det var ikke innenfor denne oppgavens omfang å vurdere hvor stor forbedring av demperegenskaper som kan oppnås ved vektreduksjon av skjærhodet.

Styrkeberegningen som ble gjennomført i *Abaqus* inneholdt forenklinger som ikke ble gjort under styrkeberegningen av det opprinnelige skjærhodet og de topologi-optimaliserte skjærhodene. Verdiene hentet fra analysen er derfor ikke direkte sammenliknbare med verdiene fra de andre analysene. Resultatet av analysen i *Abaqus* ble derfor kun benyttet som et verktøy for å lokalisere spenningskonsentrasjoner i skjærhodet med lettveksstruktur. Alle skjærhodene som ble simulert hadde den høyeste spenningskonsentrasjonen i skjærspissen. Dersom man ignorerte spenningen i skjæret var den høyeste spenningskonsentrasjonen på alle skjærhodene på tuppen av skjærleiet like bak skjærspissen. Denne observasjonen stemte overens med erfaringer fra en av operatørene hos Sandvik Teeness som forklarte at hvis et skjærhode ble skadet under bruk var det i dette området skaden vanligvis oppstod. Skjærleiet og området rundt ble for AM skjærhodet designet på nøyaktig samme måte som det originale skjærhodet fra Sandvik Teeness. Det andre stedet spenningskonsentrasjoner ble observert var i overgangen mellom bunnplate og spylekanal. Størrelsen på spenningene i dette området var betydelig lavere enn flytegrensen til CL 50WS, men det ble for sikkerhetsskyld laget av avrunding i denne overgangen samt i overgangen mellom den fremre veggen og bunnplaten.

Designprosessen som ble beskrevet inkluderte fire ulike typer programvare for å komme frem til det endelige designet. Utformingen startet med CAD-modellerering i *SolidWorks*, modellen utarbeidet her ble topologi-optimalisert *SolidThinking Inspire*. *3-maticSTL* ble brukt til å fylle skjærhodet med en lettveksstruktur. Fra *3-maticSTL* ble modellen eksportert som en volumemesh som ble analysert i *Abaqus*. I prinsippet skulle det være mulig å bevege seg lineært gjennom designprosessen fra med eventuelle designendringer etter både topologi-optimalisering og avsluttende styrkeberegninger i *3-maticSTL*. Det viste seg likevel at CAD-funksjonaliteten i programmet var tungvint å bruke og resultatene var tidvis uforutsigbare. For gode resultater var det nødvendig å hele tiden ha full kontroll på stl-overflaten og kvaliteten på trianglene. *3-maticSTL* er ikke-parametrisk programvare så det er ikke mulig å gå

tilbake å gjøre endringer i tidligere steg uten å starte på nytt. Programvaren er kraftig med en stor mengde funksjoner, men ettersom programvaren er ny på markedet og har en begrenset mengde brukere er det også en begrenset mengde erfaring og tips som deles på nettet. Det var derfor i hovedsakelig opplæringsmaterialet fra Materialise i form av en bruksanvisning og noen få instruksjonsvideoer som måtte brukes som grunnlag for å lære seg arbeidsflyten og funksjonene i programmet.

Stegene det var nødvendig å repetere i *3-maticSTL* ved gå tilbake å gjennomføre endringene i *SW* var i tilfellet med skjærhodet relativt enkle. Det ble både ved postprosesseringen av resultatet fra topologi-optimaliseringen og de mindre endringene etter FEM analysen vurdert som hurtigere sikrere med tanke på nøyaktighet å gå tilbake til CAD-modellen. I en mer komplisert modell ville kanskje ikke dette vært tilfellet.

## 5 Produksjon av prototyp

CAD modellen av det ønskede ferdig-produktet må forvandles til en avsetningsmodell ofte omtalt som en «Near Net Shape» modell (NNS). NSS-modellen er beskriver den geometrien som faktisk skal bygges additivt inkludert arbeidsmonn for maskinering og referanseflater for oppspenning. Det er kun to områder på skjærhodet der det er helt nødvendig å maskinere overflatene for å nå toleransekravene. Rundt skjærleiet og på bunnplaten må det legges til ekstra arbeidsmonn for å ta hensyn til dette. På prototypen ble det lagt på 0,7 mm i skjærleiet og skruehullet for å montere skjæret ble fjernet helt fra modellen. Bunnplaten ble gjort 1mm tykkere for å ta hensyn til at overflaten er nedover-pekende. Monteringshullene og senterhullet ble gitt 0,5 mm arbeidsmonn. Dette trinnet kan gjennomføres i både *SW*, *3-maticSTL* og *Magics*. I dette tilfellet ble NSS modellen utformet i *SW* før den ble eksportert til *3-maticSTL* hvor lettvektstrukturen ble lagt til på nytt. Årsaken til at denne rekkefølgen ble brukt er at det kan oppstå problemer når man forskyver stl-overflater. Det var også kun lettvektstrukturen som skulle legges til, en operasjon som kun tok noen minutter å gjennomføre på nytt.

Orienteringen av skjærhodene var med bunnplaten parallelt med byggeplaten. I denne orienteringen er det ingen overhengs vinkler under 45 grader. Skjærhodene ble rotert noe rundt sin egen akse slik at ingen rette kanter var parallelle med bladet, dette for å minke sannsynligheten for at bladet skulle kolliderer med en bred kant. Skjærhodene ble bygd på en 3 mm høy støttestruktur. Det ble brukt en blokk-struktur med tett mønster for å forankre skjærhodet godt. En tett struktur gjør at det er mange kontaktpunkter med den lille overflaten. Maskinparametere som ble brukt var standardparameterne for *CL 50WS* og er beskrevet i vedlegg D.



Figur 5.1, Skjærhodeprototyper på byggeplaten

Samtlige skjærhoder ble produsert uten problemer. Det var på i enkelte områder litt skjegg på skarpe kanter. Dette tyder på at det burde ha vært større diameter på avrundingene i disse områdene. Den ene overflaten på baksiden av skjærhode med størst overheng (45°) var

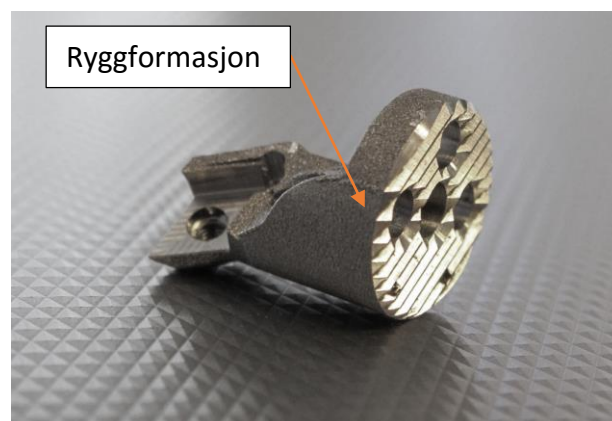
overflaten tydelig dårligere enn de vertikale flatene. For syns skyld burde dette overhengen kanskje vært fjernet eller gjort mindre, ettersom det har liten strukturell betydning for skjærhodet. På to av skjærhodene var det en uregelmessighet i form av en liten rygg på sylinderflaten til bunnplaten. Uregelmessigheten sammenfalt med en høy konsentrasjon av lange tynne triangler i stl-modellen av skjærhodet. Det ble ikke funnet noen kryssende eller overlappende triangler i *3-maticSTL* i dette området. Det er likevel mulig at feil kan ha oppstått i etterkant da det ble gjort noe automatisk reparasjon av filen i Materialise *Magics* under forberedelsen av modellen. Uregelmessigheten kan observeres i Figur 5.3

I det åpne skjærhodet var det mulig å studere lettvektstrukturen. Strukturen har som tidligere nevnt et overheng på 35°. Overflaten på stengene ble observert som dårligere og mer gjengrodd enn de ytre flatene. Alle stengene var sammenhengende og det ble ikke observert noen andre tydelige defekter i strukturen.



Figur 5.2, Tverrsnitt av skjærhode (a) og komplett skjærhode før maskinering (b).

Maskineringen av tre av skjærhodene ble gjennomført av Sandvik Teeness. Først ble rillebilde, senterhull og monteringshull maskinert i en *Deckel Maho DMF 360*. Skjærhodene ble spent opp i en chuck med tre tilpassede bakker. Skjærleiet ble maskinert i en *Makino A66*. Skjærhodene ble da montert på en fikstur med rillebilde spent fast i maskinen. Den ene av disse maskinene hadde nylig vært involvert i en krasj og ventet på spindelbytte.



Figur 5.3, Maskinert skjærhode

## 5.1 Testing av prototyp

### 5.1.1 Metode

En borstang ble modifisert for å stenge igjen spylekanalene ut mot sidene. Et av skjærhodene ble deretter montert i en *Mori Seiki NT4200 DCG* hvor det ble kjørt tre kutt i en hylse i SS2541 stål. De tre kuttene ble gjort med henholdsvis 0,5 mm, 1 mm og 1,5 mm kuttdybde og en mating på 0,1 mm. Hylsen hadde en indre diameter på 50 mm, altså betydelig større enn skjærhodet. Kuttene ble gjort med 40 bar væsketrykk.

Spylingen på alle tre skjærhodene ble testet for å se om det var noen åpenbare forskjeller i ytelsen. Borstangen som hadde blitt plugget viste seg å ikke være helt tett og det var noe lekkasje ut mellom skjærhodet og borstangen, og ut gjennom monteringshullene. Mesteparten væsken gikk likevel gjennom spylekanalen. Senterhylsen mellom skjærhodet og borstangen skal egentlig være limt fast i skjærhodet, det var den ikke under dette forsøket, dette er også en del av årsaken bak lekkasjene.

### 5.1.2 Resultater og diskusjon

De to første kuttene gav gode maskineringsresultater, men kuttet med 1,5 mm kuttdybde viste tegn til noe ustabilitet og produserte ikke en like fin overflate.



*Figur 5.4, Testing av spylekanal hode 1 ved 40 bar.*

På Figur 5.4 kan man se at væskestrålen er delt inn i tre deler. Den nedre delen av strålen treffer omtrent på tuppen av skjæret, men de to resterende delene er siktet betydelig høyere. Det er her også mulig å se at deler av væskestrålen ikke treffer skjæret i det hele tatt, men er siktet for langt ut fra skjæret. Liknende strålekarakteristikker ble observert for begge de andre skjærhodene. Når trykket ble skrudd ned kunne man som vist i Figur 5.5 tydeligere se hva som var hovedretningen til strålen.





*Figur 5.5, Testing av stråle hode 2 ved lavt trykk.*

Det finnes flere mulige forklaringer på hvorfor strålen ikke treffer tuppen av skjæret:

- Veggene etter dyseåpningen er for nærme strålen
- For kort rett strekning før utløp av dysen
- Unøyaktighet i maskinering
- Skjæret har mindre neseradius og er dermed lengre enn det som ble modellert
- Ujevnheter i dyseåpning
- Væskestrålen kommer i kontakt med væske som har lekket gjennom andre åpninger

En sannsynlig årsak til avviket er at veggene som ligger rundt strålen like etter dyseåpningen ligger for nærme strålen. Når væsken forlater dysen vil den umiddelbart begynne å spre seg utover. Som vist i dysetestene beskrevet i Kapittel 3.3 er det gjerne en sky eller tåke som brer seg ut med en større vinkel enn hoveddelen av strålen som holder seg relativt samlet. Det er mulig at denne tåken treffer veggene etter dyseåpningen og bremses ned og skifter retning slik at hoveddelen av væskestrålen også påvirkes.

En annen mulighet er at avstanden fra den siste svingen i spylekanalen til dyseåpningen er for kort. Væskestrømmen bytter retning to ganger før den når dyseåpningen. Fra den siste svingen til åpningen er det en avstand på kun 2,2 mm. Det er mulig dette ikke er tilstrekkelig for å stabilisere retningen på væskestrålen. De to svingene i kanalen skal både styre retningen på strålen nedover og innover. Hovedretningen til strålene som ble observert var som tidligere forklart for høy og for langt ut, dette stemmer over ens med en situasjon der strålens retning ikke rekker å stabiliseres.

At strålen var svært lik de tre skjærhodene i mellom tyder på det ikke er tilfeldige ujevnheter på grunn av for eksempel innsmelting av omkringliggende pulvermateriale i dyseåpningen. Dette betyr også at det bør være mulig å rette opp i feilen ved å justere på utformingen av skjærhodet og spylekanalen.

I modelleringen av skjærhodet ble det brukt et skjær med større nesoradius enn det skjæret som ble bruk i testene. En mindre nesoradius gjør at skjæret blir lengre enn et tilsvarende skjær med større nesoradius. Modellen som ble utformet har da justert dyseretningen tilpasset et kortere skjær og vil dermed sikte for høyt. Denne effekten vil utgjøre omtrent 0,5 mm avvik dersom ingen andre effekter virker inn på strålen. Avvikene som ble observert var betydelig større enn 0,5 mm og dette kan dermed ikke forklare avviket alene.

Maskineringen av skjærhodene inneholdt to separate oppspenninger, og en av maskinene som ble benyttet hadde nylig vært involvert i en krasj. Dette kan ha påvirket nøyaktigheten på maskineringen i form av at skjærleiet ikke ligger akkurat der det er tiltenkt.

Lekkasjen gjennom monteringshullene som kom i kontakt med væskestrålen kan ha påvirket retningen og spredningen av strålen. I Figur 5.4 kan man se at det er skum på store deler av skjærhodet, også like over dyseåpningen.

Skjærevæsketilførselen slik den ble observert i de tre skjærhodene vil trolig gi en god kjøling under bruk, derimot vil avviket i retning og spredningen av væskestrålen ikke gi god sponbryting. Avvikene som ble observert i retning og spredning av strålen var svært like for alle de tre dysene som ble testet. Strålene var også mindre konsentrert enn resultatene som ble observert under forsøkene i Kapittel 3.3.4. Dette er et tegn på at man ved kun å gjøre mindre endringer i modellen av skjærhodet kan forbedre ytelsen til spylingen. Det er likevel bemerkelsesverdig at det er nødvendig med en prøve- og feile prosess for å komme frem til en tilfredsstillende orientering av dysene og spylekanalene.

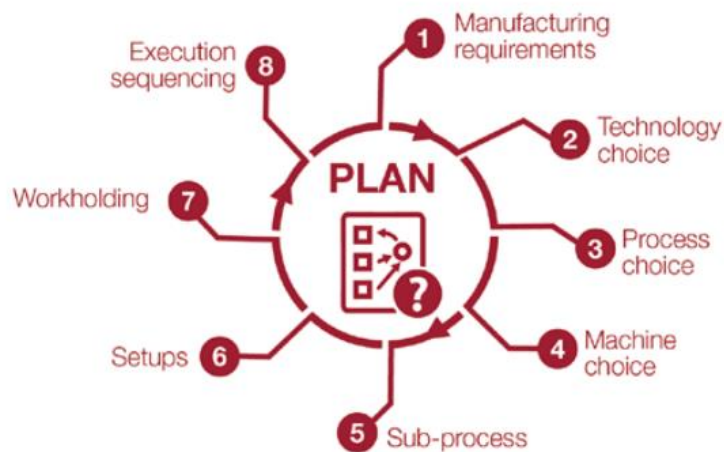
## 6 Utvikling av AM produksjonsprosess for skjærhoder

I det bransjemagasinet Metal Additive Manufacturing ble erfaringer fra produksjonsprosessen ved kombinerende av additiv og subtraktiv produksjon grundig forklart av K. Hamilton fra selskapet Delcam. Artikkelen legger trykk på viktigheten av en omfattende planleggingsprosess for å oppnå ønsket kvalitet av additivt bygde komponenter. En 8-trinns prosess blir presentert i Figur 6.1, der rekkefølgen på nødvendige steg i planleggingsprosessen er illustrert. Veien fra en CAD-modell til ferdig produkt produsert i en optimal produksjonsprosess kan oppsummeres ved de tre P'ene, på engelsk, *planning*, *preparing* og *producing*. I denne teksten vil de norske begrepene «planlegging», «preparering» og «produsering» benyttes (Hamilton, 2016). Med bakgrunn i det optimaliserte skjærhode-designet vil det i de påfølgende kapitlene beskrives utviklingen av en potensiell prosessprosess for additiv tilvirkning av 16mm skjærhoder. Basert på resultatene av prototypetestingen beskrevet i Kapittel 5.1 vil i det videre arbeidet antas at det er mulig å tilpasse skjærhodemodellen og spylekanalene på en slik måte at væskestrålen bedre treffer skjærleiet, og at det ikke er nødvendig med ytterligere bearbeiding av dysene etter bygging dersom modellen har blitt justert for å kompensere for avvikene observert i de foregående testene. De tre P'ene vil brukes som et rammeverk for utviklingen av planen. Selv om den trinnvise beskrivelsen av planleggingen og prepareringen på papiret virker som en lineær prosess, er de fleste valgene tatt under innflytelse av senere

steg. Planleggingsprosessen påvirkes også av prepareringen, da det kan oppdages ting som må endres i planleggingen når prosessen videre spesifiseres på detaljnivå.

### 6.1 Prosessplanlegging for skjærhodeproduksjon

Planleggingsprosessen er dynamisk og knyttet til produktutviklingen og veien fra tegning til ferdig produkt er dermed en iterativ prosess. Valg som blir tatt i planleggingsfasen vil kunne påvirke hva som er hensiktsmessig utforming av produktet, dermed vil man måtte gå gjennom planleggingsprosessen på nytt for å oppdatere prosessplanen for å ta høyde for forandringene i design. En beslutning i planleggingsprosessen som ved første øyekast kan virke enkel, kan ha stor innvirkning nedstrøms i prosessen. For å oppnå et best mulig resultat av planleggingsprosessen må man trekke inn kunnskap og erfaring fra eksperter innen de ulike prosessene som skal benyttes (Hamilton, 2016).



Figur 6.1, Prosessplanlegging for additiv tilvirkning (Hamilton, 2016).

#### 6.1.1 Produksjonskrav (*Manufacturing requirements*)

Som et første steg i planleggingsprosessen må kravene som stilles til produktet og produksjonen kartlegges. Dette gjelder, men er ikke begrenset til, ting som standarder, toleranser, materiale, mekaniske egenskaper og overflateegenskaper.

For skjærhodet er det spesielt to områder der toleransekravene er spesielt viktige. Disse to områdene er skjærleiet og oppspenningen mot borstangen. Kontroll på plasseringen av skjærleiet og skjærevinkler og geometri er viktig for at skjærhodet skal gi gode maskineringsresultater i bruk. Det samme gjelder oppspenningen mot borstangen, her må rillebildet, monteringshullene og senterhullet ha en høy nøyaktighet for at utgangspunktet for bruk av skjærhodet i dreieoperasjoner skal være riktig. Monteringen av skjæret krever også et gjenget hull med M3 fin-gjenger.

Ett sett med krav til produksjonsprosessen ble også satt opp. Som beskrevet i kapittel 6.5 er det nødvendig for å kunne drive en lønnsom produksjon er det viktig å utnytte kapasiteten i

PBF maskinen så godt som mulig. Produksjonsprosessen må dermed ha en høy utnyttelse av byggevolumet. For å gjøre produksjonen minst mulig komplisert bør det være færrest mulig oppspenninger og manuelle inngripener i og mellom prosessene. Produksjonsmengden for det spesifikke skjærhodet i denne prosjektoppgaven er relativt moderat. En produksjonsprosess bør være overførbar mellom ulike modeller innenfor samme størrelsesgruppe. Dersom man inkluderer andre varianter av 16 mm skjærhoder, samt 20 mm skjærhoder blir mengden betydelig større. Det bør derfor også være mulig å maskinere flere skjærhoder samtidig for at antallet oppspenningsoperasjoner ikke skal bli for høyt.

### 6.1.2 Teknologivalg

Etter å ha oppsummert produksjonskravene må det gjøres en vurdering av hvilke produksjonsteknologier som er nødvendige å ta i bruk for å oppfylle kravene. Det bør legges frem en begrunnelse for hvorfor additive produksjonsmetoder er nødvendig. Er det behov for subtraktive prosesser, overflatebehandling eller varmebehandling bør dette begrunnes.

For å kunne produsere de ønskede spylekanalene er det nødvendig å benytte seg av additiv tilvirkning. Additiv tilvirkning vil derimot ikke gi en tilstrekkelig fin overflate og gode nok toleranser for ferdigstilling av skjærleiet og oppspenningsflaten. Det vil derfor være nødvendig å ta i bruk subtraktive prosesser.

I tillegg til den konvensjonelle metoden å bygge additive produkter direkte opp fra byggeplaten er det også mulig å bygge produktet hybrid på en allerede maskinert bunnplate, som beskrevet i kapittel 2.1.5. Begge de to produksjonsmetodene er aktuelle og interessante å undersøke nærmere for produksjonen av skjærhoder og vil derfor diskuteres videre i planleggingen.

### 6.1.3 Prosessvalg

Av de teknologiene som ble funnet nødvendig i steg 3 må det spesifiseres grundigere hva slags type prosesser som skal benyttes. Som tidligere nevnt finnes det flere ulike typer additive produksjonsprosesser som for eksempel pulverbad teknikk med laser eller elektronstråle. Alternativt kan også directed energy deposition (DED) systemer benyttes hvis dette er mer egnet for produktet. Er det besluttet at subtraktive prosesser behøves må det spesifiseres hvorvidt det bør gjøres i CNC-fres, -dreiebenk, flerfunksjonsmaskin eller annet. Er det nødvendig med 5-kapabilitet for eksempel må dette spesifiseres her. Det kan være nødvendig å kutte produktet løs fra byggeplaten i etterkant av byggingen. Både EDM og båndslag er mye anvendte prosesser og har begge sine fordeler og ulemper som bør vurderes i forhold til situasjonen.

Av de ulike AM-prosessene er pulverbad teknikken den som egner seg best for byggingen av skjærhoder. PBF muliggjør bygging av små detaljer og indre kanaler og geometrier, så fremt man har en metode for å fjerne det overflødig pulvermaterialet i etterkant.

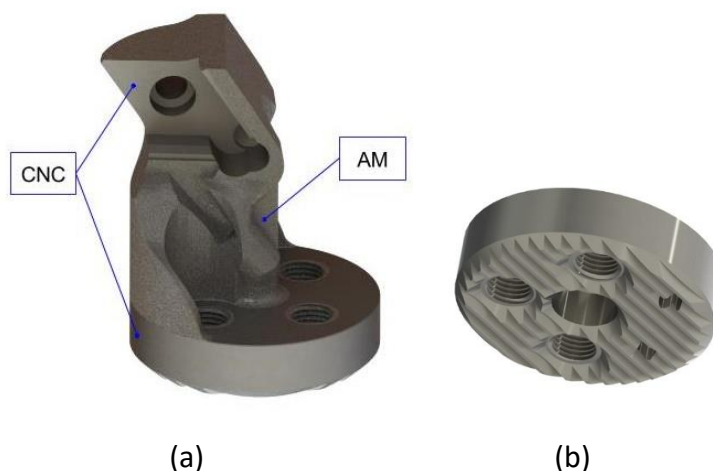
De subtraktive prosessene som kreves for å få et funksjonelt skjærhode er fresing av rillebilde og boring av monteringshull og senterhull i bunnplaten, fresing av skjærleiet og boring og

gjenging av skruehullet til skjæret. Avhengig av ønsket overflatekvalitet på resten av skjærhodet er det også mulig å maskinere de resterende flatene. Ettersom det ikke er strengt nødvendig at samtlige flater er maskinert vil det i det videre arbeidet fokuseres på en løsning der kun de nødvendige detaljene maskineres.

Etter AM bygging må skjærhodene fjernes fra byggeplaten ettersom det ikke er tilstrekkelig med plass for å kunne maskinere skjærhodene på den fylte byggeplaten. Ulike metoder kan benyttes til dette. Muligheten som gjør fjerningen av skjærhodene lettest er å bygge hodet på en støttestruktur. To andre gode alternativer er trådgning (EDM) eller båndsag. Bruk av båndsag krever noe mer arbeidsmann enn EDM, men har til gjengjeld ikke de samme problemene med å kutte gjennom lommer med innkapslet pulvermateriale. Ettersom det vil være nødvendig å fjerne pulvermateriale fra indre geometrier i skjærhodet gjennom små hull vil det være lite gunstig om pulvermaterialet kommer i kontakt med vann før det skal fjernes. Dersom pulveret kommer i kontakt med vann inne i åpningene vil det pakke seg sammen og bli svært vanskelig å fjerne senere. Dersom skjærhodene bygges på støttestruktur kan de relativt lett bankes av byggeplaten med en liten hammer slik at man slipper problematikken med innkapslet pulvermateriale. Det er da også mulig å legge kanalene for å fjerne pulveret i gitterstrukturen gjennom hull i bunnplaten, slik som det ble gjort på prototypen.

Ved en hybrid produksjonsløsning vil det ikke være nødvendig å kutte skjærhodene løs fra byggeplaten slik som det er ved ren PBF produksjon. Derimot vil det være nødvendig å maskinere bunnplatene skjærhodene som skal fungere som substrat under PBF byggingen. Bunnplatene kan da være utstyrt med gjengede monteringshull som gjør det mulig å spenne dem fast i byggeplaten eller andre fiksturer. Bunnplatene med sin sirkulære form vil være mest hensiktsmessig å produsere i en flerfunksjonsmaskin som både kan dreie, frese og lage gjengespor.

CL 50WS oppnår sine optimale materialegenskaper etter varmebehandling. Herdeprosessen må derfor legges til som en av de nødvendige prosessene.



Figur 6.2, Eksempel på inndeling av hybrid skjærhode (a) og bunnplate til hybridproduksjon (b)

For å oppnå en uniform overflatestruktur på de additivt bygde overflatene kan skjærhodene sandblåses. Andre overflatebehandlinger som også kan også være aktuelle er for eksempel tromling eller shot peening. Sandvik Teeness gjennomfører en overflatebehandling kalt brunering på enkelte av sine produkter for å øke korrosjonsmotstanden og gi delene et estetisk løft. Denne prosessen kan også være anvendelig for additiv produksjon av produkter i stål.

#### 6.1.4 Maskinvalg

De konkrete maskinene som skal benyttes må spesifiseres. Dette vil da være avhengig av hva man har tilgang til av maskiner og utstyr. Har ikke maskinene bedriften disponerer kapabilitet til å utføre de ønskede operasjonene må man benytte seg av en ekstern 3. part eller revurdere prosessvalget.

Dersom man bygger hele skjærhodet additiv vil det være nødvendig å maskinere skjærhodet fra to sider etter bygging. Ideelt sett er det ønsket en løsning der man kun behøver en oppspenning av skjærhodet for maskinering. Det var vanskelig å finne noen god løsning som fungerer på skjærhodet uten behov for større modifikasjoner eller tillegg til skjærhodets design. En tilsvarende flerfunksjonsmaskin som benyttes i dagens produksjon vil være en mulig kandidat.

Aktuelle AM maskiner for produksjonen vil være PBF maskiner egnet for produksjon med mareldingsstål. De fleste laser-baserte PBF maskiner støtter mareldingsstål. EBM maskiner kan også i prinsippet bygge i mareldingsstål, men er ikke en del av standard materialene som leveres av EBM-maskinleverandøren Arcam per mai 2016. Et laserbasert PBF maskin levert av for eksempel Concept Laser, SLM Solutions, EOS eller liknende vil derfor være å foretrekke.

Produksjonen av bunnplatene til hybride skjærhoder kan gjennomføres i tilsvarende maskinen som benyttes til å maskinere konvensjonelle skjærhoder i dagens produksjon. På samme måte som for skjærhodene kan bunnplatene mates inn i en flerfunksjonsmaskin som et stangemne.

For maskineringen av skjærleiet ved hybrid tilvirkning vil det kunne være tilstrekkelig med en 3-akse fres ettersom det kun behøver maskinering fra en side. Det kan likevel være lettere med tanke på oppspenning å benytte en 5-akse fres slik at det kan kompenseres for orienteringen av skjærhodet.

#### 6.1.5 Delprosesser

Prosessene valgt i steg 3 må brytes ned til delprosesser med et høyere detaljnivå. Dette kan for eksempel være drilling og gjenging av hull, overflatefresing. Støttestruktur og pulvermateriale som må fjernes kan behøve egne delprosesser.

Uavhengig av om skjærhodene produseres hybrid eller ikke vil prosessen stort sett bestå av de samme delprosessene men i en noe annerledes rekkefølge.

- Klargjøring av byggeplate/substrat (planfresing/sandblåsing)
- Fylle pulver i PBF maskin, justere høyde

- Fjerne pulver fra maskin og ta ut byggeplate
- Fjerne hoder fra byggeplate (ved AM)
- Fjerne pulver fra hulrom
- Frese rillebilde, monteringshull (med gjenger ved hybrid), senterhull
- Stikke av bunnplate (ved hybrid)
- Frese skjærleie og gjenget skruehull
- Varmebehandling
- Sandblåsing

#### 6.1.6 Setups

Hva slags klargjøring kreves i hver maskin, prosess og underprosess? En 3-akse fres vil kunne kreve 3 oppspenninger for en prosess som en 5-akse maskin kan klare på én oppspenning.

Antallet setups er i stor grad avhengig av oppspenningen som benyttes. Som tidligere nevnt er det et ønske om færrest mulig setups i produksjonsprosessen, med tanke på nøyaktighet og forenkling av prosessen. Det vil uansett være en setup i fres for planfresing av byggeplaten.

Det ble ikke funnet noen god metode for å maskinere både skjærleiet og rillebildet i samme setup. Fresing av rillebilde, senterhull og monteringshull kan gjennomføres i en setup i fresen. Maskineringen av skjærleiet og gjengespør kan også gjennomføres i en setup. Det kan være mulig å lage løsninger der CNC maskinen selv bytter grep på skjærhodet mellom maskineringsoperasjonene.

For produksjonen av bunnplater vil det kun være nødvendig med én setup til produksjonen av et stort antall bunnplater. Etter-maskineringen av de hybride skjærhodene vil kun kreve én enkelt setup fresen ettersom de kun behøver å maskineres fra en side.

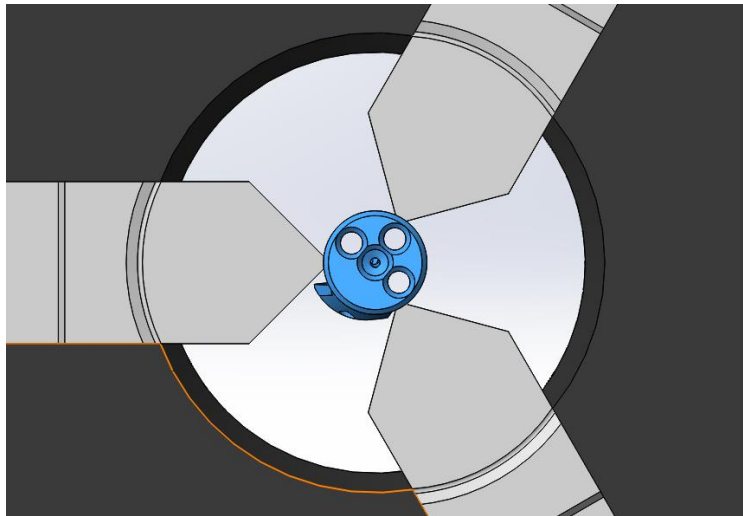
#### 6.1.7 Oppspenning (Work holding)

Nært knyttet til steg 6 skal detaljene for hvordan oppspenningen skal gjøres defineres i steg 7. Det kan hende produktet som bygges er lite gunstig utformet med tanke på oppspenning og at det dermed er behov for spesielle fiksturer tilpasset produktet, eller å bygge inn oppspenningsflater som senere kan maskineres bort.

En av de største utfordringene for både ren AM produksjon og hybrid produksjon av 16 mm skjærhoder er oppspenningen for maskinering. Den små dimensjonene gjør at det er lite plass til å gripe fast i skjærhodet og at utstikket fra en eventuell oppspenning i chuck vil være svært lite. Mye tid ble brukt til å vurdere ulike muligheter å løse oppspenningen på, noen av disse er blir beskrevet her.

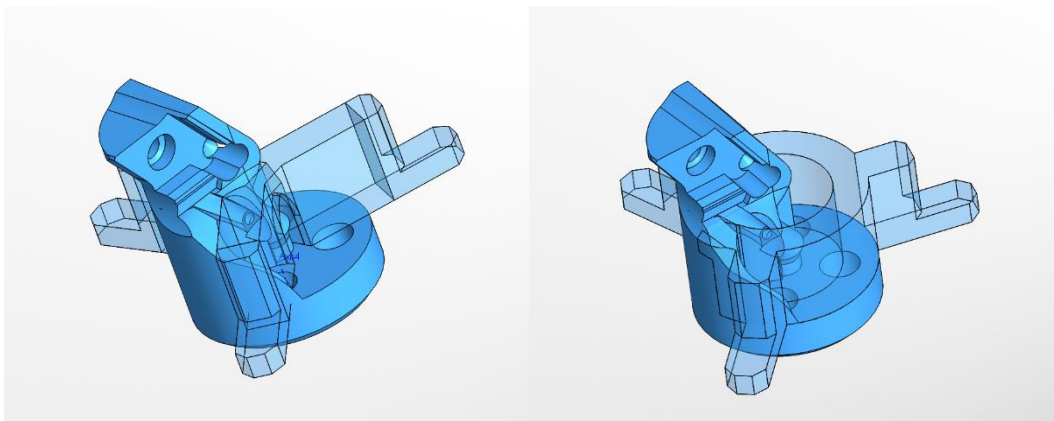
Som tidligere nevnt er det nødvendig å kunne spenne opp skjærhodet fra to sider for å kunne nå de ønskede flatene under maskineringen. Sylinderflaten rundt bunnplaten ble vurdert som en mulig oppspenningsflate. Dersom man benytter en chuck med tre bakker vil det dersom bakkene i CNC maskinen er smale nok i prinsippet være mulig å spenne opp skjærhodet mot flensen fra begge sider uten at bakkene treffer andre overflater på skjærhodet, se Figur 6.3. Bakkene kan også tilpasses ved å til å gjøre plass til tuppen av skjærleiet i form av et spor. Men

ettersom flensen på skjærhodet kun er noen millimeter tykk vil kontaktflaten bli svært liten og gi et dårlig grep om flensen.



*Figur 6.3, Skjærhode i chuck med tre bakker.*

I Stama maskinen som benyttes i dagens produksjon benyttes det en hylsechuck. En slik chuck vil ikke tillate at skjærhodet spennes fast mot sylinderflaten på bunnplaten fra begge sider. For at dette skal være mulig må det bygges ut oppspenningsflater som stikker lengre ut fra overflaten enn tuppen av skjærleiet. Et par eksempler på slike referanseflater er vist i Figur 6.4. En slik løsning vil kreve store modifikasjoner av NNS modellen i form av ekstra materiale som vil måtte maskineres bort i etterkant. Metoden gir heller ingen god løsning på hvordan man skal finne nullpunkts referansen til skjærhodet og vil kreve betydelig manuelt oppspenningsarbeid. Det var også nødvendig med et utstikk fra hylsechucken på omtrent 80 mm i Stama flerfunksjonsmaskinen som benyttes i dag. En løsning med AM-hoder tilpasset dagens prosess vil derfor være lite gunstig.

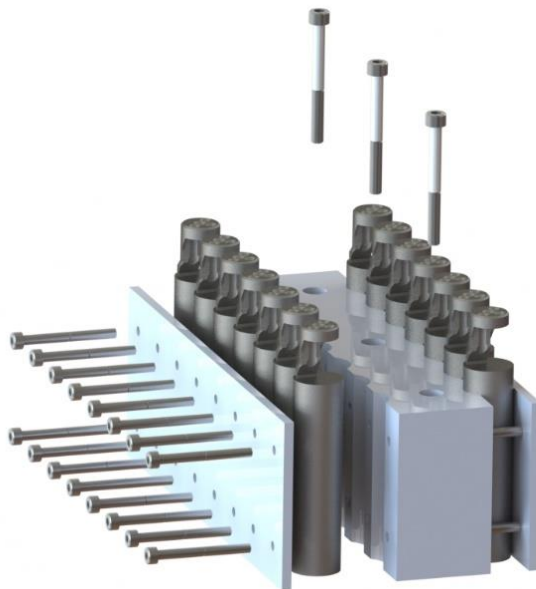


*Figur 6.4, Idemyldring rund utforming av oppspenningsflater.*

En metode for hybrid tilvirkning som vil løse problemet med nødvendig utstikk fra hylsechucken ble også vurdert. Denne metoden baserte seg på å benytte et stangemne som

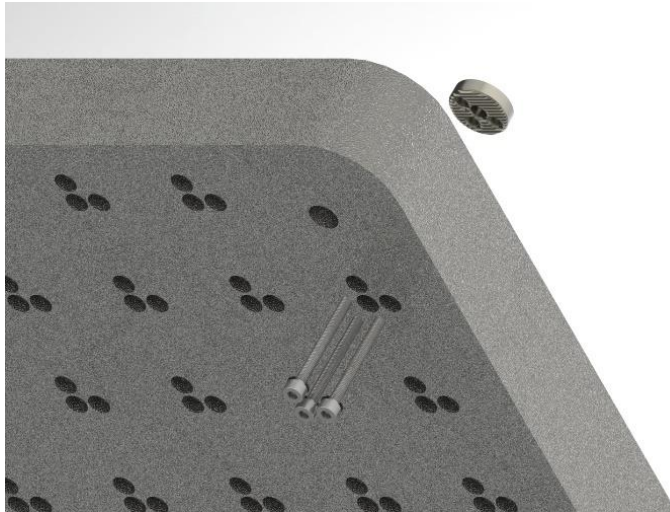


substrat til byggingen i PBF maskinen. Skjærhodet vil da kunne maskineres ut av stangemnet på samme måte som vanlige skjærhoder. Flere stangemner kan spennes opp i en fikstur for eksempel som vist i Figur 6.5, denne fiksturen kan igjen skrus fast i byggeplaten. Det ville trolig vært mulig å bygge skjærhodene på denne måten, men det vil bli en produksjonsprosess med mange separate steg og oppspenninger. Skjærhodene må også bygges opp ned for at bunnplaten skal kunne maskineres først. Dermed vil det være behov for en del støttestruktur eller redesign av skjærhodet for å støtte opp hodet under bygging. Stangemnene vil kunne brukes om igjen flere ganger ettersom det kun er litt materiale som fjernes hver gang et hode stikkes av. Det vil likevel være et behov for å produsere og resirkulere et stort antall stangemner for å opprettholde en slik produksjon. Metoden ble dermed ikke utforsket videre.



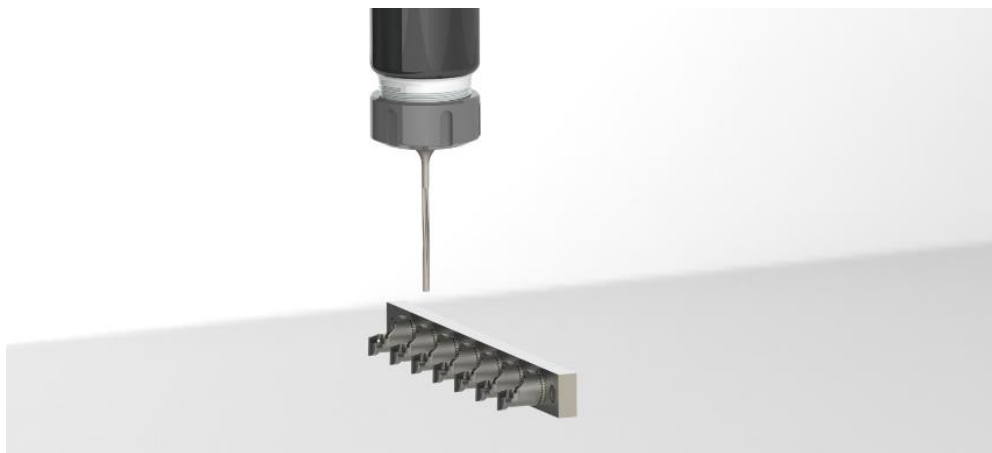
*Figur 6.5, Hybrid tilvirkning på stangemner*

Hovedårsaken til ønsket om å bygge skjærhodene hybrid var å forenkle oppspenningsarbeidet for etter-maskineringen. Den første løsningen som ble foreslått var å lage gjengespor i monteringshullene i baseplaten kan disse brukes til å spenne dem fast til byggeplaten, både under maskinering og AM bygging. Oppspenningen vil kreve en tilpasset byggeplate med monteringshull og rillebilde. På en byggeplate fylt med skjærhoder vil det ikke være mulig å komme til med verktøy for å maskinere skjærleiet og skruehullet. Det vil derfor være nødvendig å fjerne samtlige skjærhoder fra byggeplaten for en ny oppspenning på en tilpasset fikstur enten en og en eller flere ved siden av hverandre.



*Figur 6.6, Montering av bunnplate til byggeplate*

Som et alternativ for å fjerne dette prosenstrinnet ble en modulbasert løsning foreslått. Etersom skjærhodene kun behøver maskinering fra en side etter AM bygging flere skjærhoder plasseres på en rekke rotert i samme retning. Ved å montere bunnplatene til en avlang list som igjen monteres på byggeplaten kan man etter bygging løsne listen og spenne denne opp direkte i CNC maskinen uten å røre skjærhodene. Denne løsningen ble vurdert som den mest lovende og det er derfor kun den modulbaserte løsningen som vil utredes ytterligere.



*Figur 6.7, Maskinering av hybride skjærhoder.*

#### 6.1.8 Gjennomføringsrekkefølge

En gunstig rekkefølge for de planlagte prosessstegene og delprosessene kan settes opp når alle de innledende stegene i planleggingsprosessen er gjennomført.

Hybrid produksjon basert på ferdigmaskinerte bunnplater ble valgt som metoden å undersøke videre. En overordnet gjennomføringsrekkefølge ble satt opp og er beskrevet kort i Tabell 6. Det bør påpekes at denne planen er generell og at en videre spesifisering på detaljnivå kreves for å oppdage hvordan de ulike stegene påvirker hverandre, og hvor problemer kan oppstå. Detaljnivået øker når man går inn i den forberedende fasen.

Tabell 6, Overordnet produksjonsplan

Steg	Beskrivelse	
1	Produksjonsforberedelse	Lage NNS modell
2	Maskineringsforberedelse	Bestemme skjæredata, program med verktøybaner, instruksjoner til operatør etc.
3	Maskinering	Maskinere bunnplater som tilfredsstillere kravene til overflateruhet og nøyaktighet.
4	AM forberedelse	Plassere NSS modellen på de riktige koordinaten og stille inn produksjonsparameterne.
5	AM bygging	Bygge skjærhodene
6	Maskinering	Maskinere skjærleiet
7	Fjerne pulver	Blåse ut usmeltet pulver fra lettvektstrukturen
8	Varmebehandling	Herdeprosess for mareldingsstål
9	Sandblåsing	Forbedre overflatekvaliteten på flatene som ikke er maskinert og fjerne eventuelt glødeskall.

## 6.2 Preparering

Med en detaljert produksjonsplan satt opp kan forberedelsen av produksjonen starte. Forberedelsene består av å vurdere hver enkelt prosess og under-prosesser fra planleggingen for å forstå hvordan de vil påvirke det ferdige produktet. Spesielle hensyn må tas for å veie opp for innvirkningene de ulike prosessene har ved å benytte prinsipper for produksjonsvennlig design og utforming. Det er mange likhetstrekk med AM og forberedelsene som kreves ved støpning av produkter (Hamilton, 2016).

### 6.2.1 Deposition model (NNS Near net shape)

En ny NSS-modell må defineres for det hybride skjærhodet. Hamilton (2016) identifiserte fire trinn som ofte inngår i utarbeidelsen av NNS-modellen:

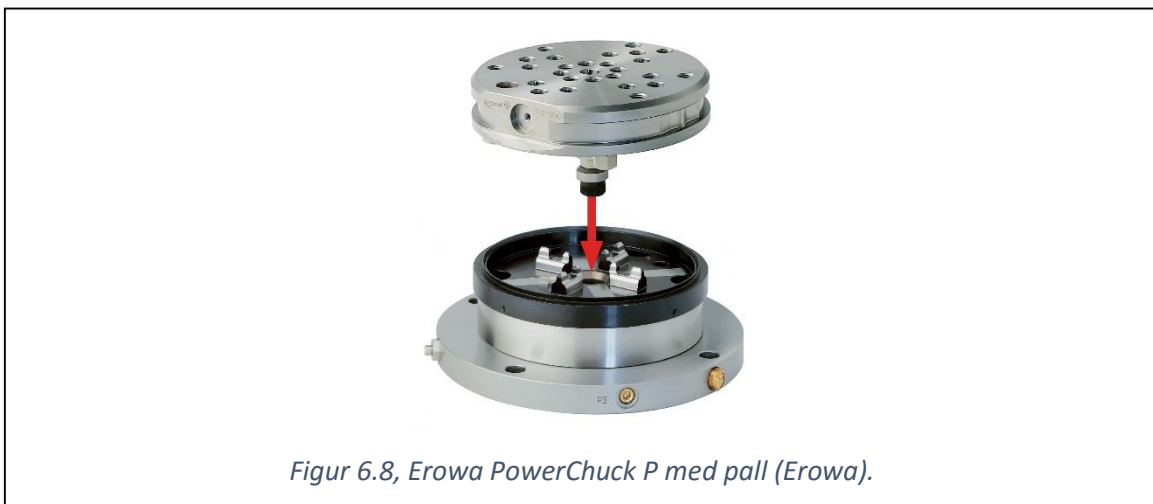
- Detaljutelatelse ved for eksempel å fjerne hull som må drilles for å oppnå ønsket nøyaktighet.
- Detaljmodifisering, for eksempel å legge ekstra arbeidsmonn på flater som skal maskineres.
- Detaljtillegg, oppspenningsflater
- Strukturelle tillegg som nullpunktsreferanser på byggeplaten som ikke er en del av produktet, men som kan brukes dersom maskineringen skal gjennomføres mens produktet fortsatt er festet til byggeplaten.

NSS-modellen skal være et resultat av alle valgene som er tatt under forberedelsene av hvert prosessstrinn. Første del av utarbeidelsen av NNS-modellen er å fjerne bunnplaten ettersom den ikke skal bygges additivt. Etter innspill fra eksperter hos Sandvik Teeness ble arbeidsmonnet i skjærleiet redusert til 0,5 mm, sammenliknet med 0,7 mm som ble bygget på prototypen. Videre ble hullet for monteringen av skjæret fjernet helt. Videre tillegg eller modifiseringer av skjærhodet er ikke nødvendig ved den hybride produksjonen.

### 6.2.2 Oppspenningspreparering

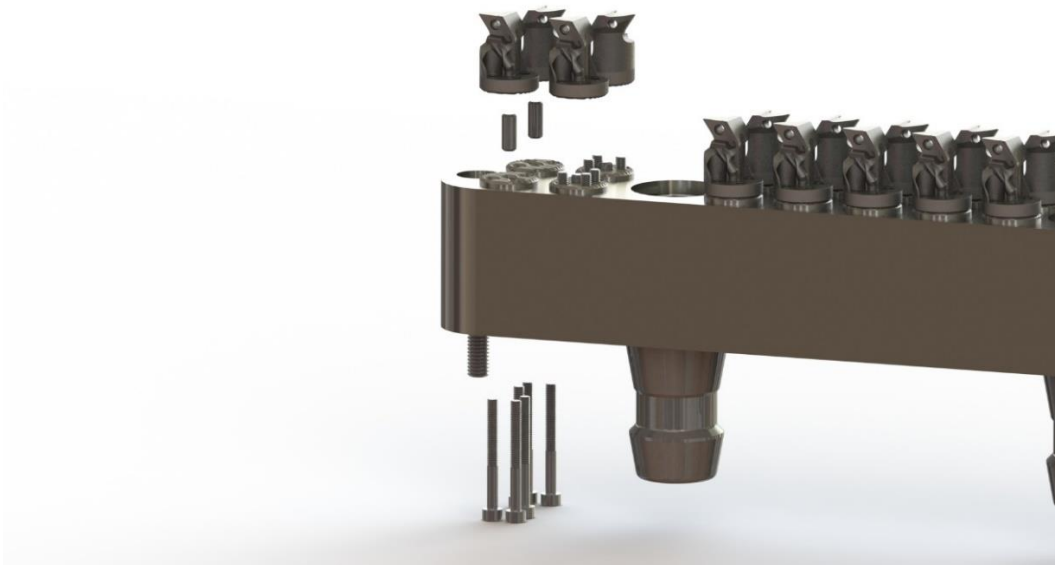
Bunnplatene vil være gjenget slik at de kan skrus fast i byggeplaten fra undersiden. Boltene som benyttes til monteringen av skjærhodet til borstangen har M3 grovgjenger. Ved å lage M4 fingjenger i bunnplaten vil det gi nok klaring for at M3 grovgjenger vil kunne rotere fritt i åpningen under montering på borstang. M4 innvendige fingjenger har en minimumsdiameter på 3,459mm.

For å kunne få enda flere skjærhoder maskinert i en oppspenning ble det plassert to rekker med skjærhoder på hver list med skjærleiet vendt motsatt vei. På denne måten kan man nå skjærleiene på begge sider kun ved å rotere listen de er festet på. Et system for å hurtig og presist kunne flytte skjærhodene mellom de ulike prosessene var ønsket. Det finnes flere systemer på markedet rettet mot å forenkle oppspenningen og flytting av arbeidsstykker mellom ulike maskiner, såkalte pallsystemer. Concept Laser tilbyr et system levert av Erowa (Figur 6.8) der en pall kan monteres under byggeplaten som gjør at den lett kan flyttes mellom PBF-maskinen og CNC-maskiner der tilsvarende chuck er montert. Et slikt system kan benyttes til planfresingen av bunnplatene før byggeplaten flyttes inn i PBF-maskinen. Det samme systemet vil derimot ikke fungere på hver enkelt list i det modulbaserte systemet. Dersom man ønsker å utnytte plassen i byggekammeret best mulig vil listene måtte være smale og plasseres tett inntil hverandre. Chucker til palettsystemer tar gjerne en del plass og det vil ikke være hensiktsmessig å montere flere chucker på byggeplaten.



Enkelte av leverandører av pallsystemer tillater også å tilpasning av egne paller hvor man selv monterer pluggen som selges løst. For hurtig oppspenning i fresen kan man utstyre monteringslistene med pluggen tilpasset et pallsystem slik at den blir en spesialtilpasset pall. For å festes til byggeplaten kan pallen skrus fast med vanlige bolter og orientere dem nøyaktig med styrepinner. Det finnes som sagt flere ulike leverandører av slike systemer på markedet. Pluggene har gjerne en diameter mellom 25 og 40 mm. Siden bunnplatene til skjærhodene monteres med bolter fra undersiden av platen fører dette til at det ikke vil være mulig å plassere skjærhoder direkte over pluggen. Forslaget til monteringslist tilpasset pallsystem som ble utarbeidet tok utgangspunkt i Erowas *MTS Zero-Point* system, som har pluggen med liten

diameter. Små plugger gjør det lettere å fylle pallen med flest mulig skjærhoder. Til dette systemet leveres også en dobbel innspenningsbase med 120mm avstand mellom chuckene, noe som passer bra for de 250 mm lange monteringslistene. Repeterbarheten ved dette systemet er oppgitt til å være mindre enn 0,005 mm (EROWA, 2016). I et slikt system vil man få plass til 18 skjærhoder på en pall, og 6 paller på en byggeplate, totalt 108 skjærhoder.



*Figur 6.9, Sprengtegning av monteringslist med ferdig bygde hybride skjærhoder*

For å få plass til pluggene vil listene enten måtte heves over byggeplaten eller det lages forsenkninger i platen som pluggene kan føres ned i. For å sikre repeterbar montering av listene på byggeplaten bør det brukes styrepinner i tillegg til boltene.

### 6.2.3 Maskinerings-preparering

Forberedelsene til maskineringsoperasjonene kan for det hybride skjærhodet deles i tre deler, en for maskineringen av bunnplaten, en til planfresingen av skjærhodene før bygging, og en for maskineringen av skjærleiet etter AM-bygging. Stegene i forberedelsesprosessen for maskineringen består i hovedsak av å lage CAM programmene som behøves for å styre maskinene. Verktøybanene må bestemmes i samsvar med materialet som skal maskineres. CL 50WS er relativt duktilt i uherdet tilstand, og derfor lite problematisk å maskinere. Det er også viktig å ta hensyn til oppspenningen og pallsystemet med tanke på vibrasjoner og defleksjon under maskineringen. Det må tas hensyn til monteringen av skjærhodene til pallen. Kuttedybden og matingen må ikke være så stor at det er fare for at boltene som holder fast skjærhodet deformeres eller svikter. De spesifikke verktøyene som skal brukes må spesifiseres. I henhold til forsøkene gjennomført av Bovie et al. (2011) bør planfresingen av substratet til hybrid tilvirkning gjennomføres uten skjærevæske for ikke å forurense pulveret under bygging. Sandblåsing for å gjøre overflaten matt før bygging er heller ikke egnet for hybrid produksjon og overflatene bør heller skrapes med et skarpt freseverktøy i sammenheng med planfresingen for å oppnå ønsket ruhet (Bovie, 2013).

Hvordan chucken til pallsystemet skal monteres i fresen må bestemmes og CAM-programmet må tilpasses dette. Pallen må løftes høyt nok opp til at skjærleiene i begge rekkene med skjærhoder kan nås når pallen roteres.

#### 6.2.4 AM preparering

Forberedningen til AM byggingen består av å bestemme orienteringen av skjærhodene, hvordan de skal posisjoneres i forhold til hverandre, vurdere hvordan posisjoneringen påvirker pulverspredningen, i hvilken grad det er nødvendig med støttestruktur og hvordan denne eventuelt skal utformes. Man må også kartlegge om det er behov for å bygge referansegeometrier i tillegg til dele som skal bygges.

En vurdering av skjærhodet har blitt gjennomført og det er ikke noen ytre overflater som har en lavere overhengsvinkel enn  $45^\circ$  når skjærhodet er plassert med bunnplaten parallelt med byggeplaten, støttestruktur er dermed ikke nødvendig. Deler bør ikke orienteres slik at store overheng peker i retning mot den bladet beveger seg når den stryker ut pulveret. Dersom krumming oppstår og blir så kraftig at det overhengende laget bøyes opp like høyt som lagtykkelsen vil bladet kollidere med bygget. Dersom krummingen er i motsatt retning av den retningen bladet beveger seg vil det i større grad kunne stryke over defekter uten større problemer. Det mest markante overhenget på skjærhodet er tuppen av skjærleiet. Skjærhodene på hver sin rekke på en pall må monteres motsatt vei. Det vil dermed være to mulige orienteringer i forhold til utstrykningsbladet, på langs med pallene og på tvers av pallene. Stryk pulveret ut på langs med pallene vil halvparten av skjærhodene få overhenget på tuppen av skjærleiet rettet mot strykeretningen. Stryk pulveret på tvers av pallene er det ingen store overheng og denne orienteringen vil derfor være bedre.

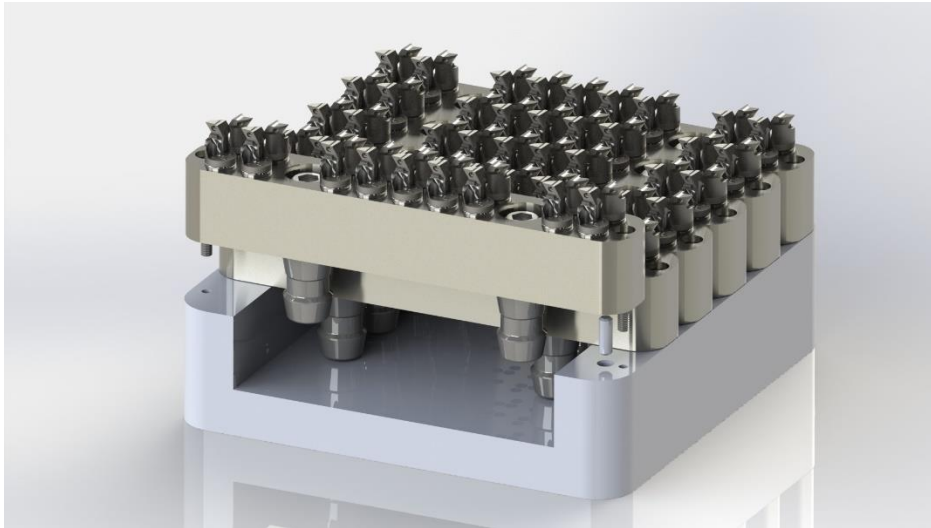
Det må gjøres et forberedelsesarbeid i programvaren knyttet til AM-maskinen. I NTNU sitt tilfelle er dette Materialise og styringssystemet i M2-maskinen. Koordinatene til hver enkelt bunnplate må være kjent slik at modellene kan plasseres i forhold til disse i programmet. Plasseringen av skjærhodene og måten oppspenningssystemet er utformet vil påvirke pulverspredningen. Det er svært viktig at det ikke er noen store gliper mellom pallene der pulver kan renne ned. Mindre gliper kan kompenseres for ved å øke pulvermatingen i maskinen. Laser- og skanneparameterne må bestemmes. Ved bruk av Concept Laser sitt eget materiale vil det da være naturlig å også benytte de anbefalte innstillingene til materialet. For CL 50WS er disse parameterne summert i Vedlegg D.

#### 6.2.5 Preparering varme- og overflatebehandling

Varmebehandlingsprosessen må for ikke å skade pallen gjennomføres etter at skjærhodene er fjernet fra denne. Det kreves ingen oppspenning av skjærhodene under varmebehandlingen. Noe glødeskall vil oppstå i løpet av herdeprosessen, dette bør fjernes både av estetiske og funksjonelle årsaker. Lett sandblåsing av overflatene er en metode som kan brukes for å fjerne glødeskallet. Det kan være nødvendig å gå over gjenger som har blitt maskinert i forkant av varmebehandlingen på nytt for å fjerne glødeskall også her. Dette steget vil ikke være lett å ta høyde for i metoden som har blitt lagt frem her, og vil dersom det blir vurdert nødvendig å gjennomføre i en CNC maskin kreve en ny montering av skjærhodene på pallen.

### 6.3 Produksjon

Etter å ha gjennomført hele planleggings- og prepareringsprosessen vil man i prinsippet være klar for produksjon. Det vil først være nødvendig å produsere de spesifiserte fiksturene og pallsystemene, deretter kan produksjonen av skjærhoder settes i gang for fullt. Det var dessverre ikke mulig innenfor tidsbegrensingen til dette arbeidet å få gjennomført testing av en hybrid skjærhodeproduksjon.



Figur 6.10, Byggeplate med 6 paller og 108 skjærhoder.

### 6.4 Fordeler og ulemper med produksjonsprosessen

Prosessen som har blitt presentert er ikke absolutt og alle aspektene knyttet til den er ikke fullstendig utredet, men den representerer et lovende konsept å bygge videre på. Fordeler og ulemper ved produksjonsprosessen har blitt oppsummert i Tabell 7 og vil utdypes i de kommende avsnittene.

Tabell 7, Fordeler og ulemper for hybrid produksjon av skjærhoder

Fordeler	Ulemper
Mulighet for maskinering av flere skjærhoder samtidig	Mange trinn i hybridprosessen som må samkjøres
Repeterbar oppspenning	Fortsatt en del manuelt arbeid
Pallsystem ikke modellsesifikt, men kan brukes til alle skjærhoder med samme SL-diameter	Pallsystemet kommer til å veie mye slik det er designet kan være vanskelig å håndtere
Pallsystemet kan benyttes til andre prosesser når det ikke brukes i skjærhodeproduksjonen	Ikke mulig å maskinere alle overflater
Pallsystemet kan benyttes til produksjon med ulike materialer	Mulighet for at gjenger må gåes over på nytt etter varmebehandling
	Gjenger for montering av bunnplater kan ikke fjernes

Pallsystemet som prosessen i stor grad er bygget opp rundt har en rekke positive sider. Viktigst er kanskje muligheten for å spenne opp flere skjærhoder samtidig under maskineringen av skjærleiet. Pallsystemer slik som er presentert i denne prosessen kan ha svært høy repeterbarhet ved oppspenning. Når skjærhodene spennes oppe ved hjelp av rillebildet maskinert i forkant av AM prosessen, vil man ha god kontroll på nøyaktigheten til plasseringen av skjærleiet i forhold til rillebildet.

En annen viktig fordel med pallsystemet er det at det ikke er spesifikt tilpasset det enkelte skjærhodet tilknyttet dette prosjektarbeidet. Pallene er kun knyttet til SL-innfestingssystemet og uavhengig skjærhodets. Et slikt modulbasert system gjør det også mulig å kombinere paller tilpasset forskjellige SL-diametere i samme byggeprosess. Systemet er heller ikke eksklusivt knyttet til produksjon med mareldingsstål, men kan brukes med andre materialer dersom bunnplatene er maskinert til samme mål og det ikke er behov for omfattende varmebehandling mellom AM prosessen og maskineringen av skjærleiet.

Slik pallsystemet er modellert i Figur 6.10, vil den samlede massen til systemet bli svært høy dersom det lages i stål, omtrent 40 kg. Når pallen skal flyttes fra fres til PBF maskinen etter at substratet har blitt forberedt for bygging, må hele systemet flyttes som en enhet. Den høye vekten vil da gjøre pallen vanskelig å håndtere. Tykkelsen på pallene er satt ut i fra anbefalingene fra leverandøren for montering av pluggene til pallsystemet. Det er ikke gjennomført noen vurdering av den nødvendige styrken til pallene med tanke på kreftene de vil utsettes for under maskinering, men den totale vekten til systemet kan trolig reduseres med flere kilogram uten at det går ut over stabiliteten. Etter at PBF prosessen er fullført er det ikke lenger nødvendig å flytte hele systemet samlet. Når pulveret er fjernet fra maskinen kan en og en pall løsnes og flyttes over til CNC-maskinen som skal maskinere skjærleiet.

Pallsystemet som produksjonen baserer seg på må kjøpes inn dersom bedriften ikke allerede disponerer et slikt system. Når chuckene er montert i CNC maskinen vil disse kunne benyttes til en rekke andre produkter. Kostnaden av en slik investering kan spres ut på en mengde produkter som ikke nødvendigvis er knyttet til AM prosessen. Det kan da tenkes at man også kan øke lønnsomheten i andre områder av produksjonen.

Selv om det har blitt forsøkt redusert så mye som mulig, inneholder prosessen fortsatt en god del trinn og manuelt arbeid. I en hybrid produksjonsprosess vil det være ønskelig med så få steder som mulig der det er nødvendig for en operatør å manuelt gjøre inngripen. Enkelte av stegene i denne prosessen er vanskelig å bli kvitt, som for eksempel monteringen av bunnplatene på pallene og fjerningen av pulvermateriale fra lettvektsstrukturen. I prosessen som har blitt presentert kan det spennes opp 18 skjærhoder med SL-diameter på 16 mm på hver pall. Det ultimate målet som det burde siktes mot er likevel en prosess der alle skjærhodene kan maskineres i en oppspenning. Den hybride cellen som produksjonen tar utgangspunkt i, innebærer en del arbeid for å samkjøre prosessene. Trolig vil dette arbeidet forenkles i framtiden ved at det forskes videre på prosessen, og at maskinleverandører øker fokuset på samkjøring av ulike prosesser.

Slik skjærhodene er montert på pallene er det mulig å nå mange, men ikke alle overflatene for maskinering. I dette arbeidet ble det valgt å fokusere på en løsning der kun de absolutt



nødvendige overflatene ble maskinert. Det kan likevel hende at en høyere overflatekvalitet er ønsket på de resterende overflatene på skjærhodet. For å tilrettelegge for at alle overflatene skal kunne maskineres med en slik produksjonsprosess som presenterer her vil det være nødvendig å gjøre endringer i utformingen på skjærhodet. Det er heller ikke optimalt at gjengene som benyttes til å spenne bunnplatene fast til pallen ikke kan fjernes under den avsluttende maskineringen. Ønsket om fjerning av gjengene er i hovedsak av estetiske årsaker.

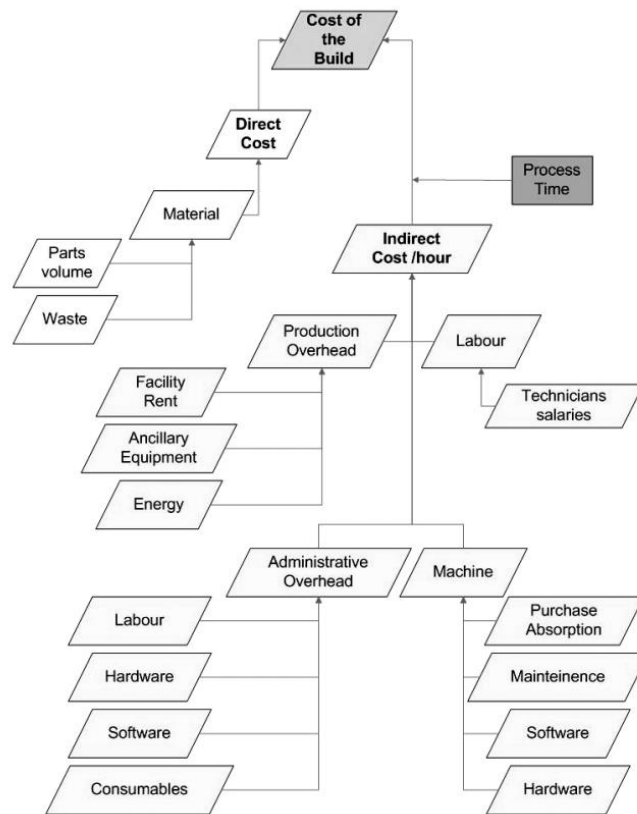
Varmebehandlingen av maredingsstålet fører som tidligere nevnt til at det oppstår noe glødeskall på overflaten av materialet. Dette kan dersom det ikke fjernes påvirke gjengene til monteringen av skjæret. Det kan være nødvendig å gå over gjengene på nytt etter varmebehandlingen. Dersom det viser seg at dette ikke kan unngås vil det føre til nok et tidkrevende steg i prosessen. Alternative metoder for fjerning av glødeskall bør undersøkes nærmere.

## 6.5 Produksjonskostnad

Ved at man i stor grad har fjernet behovet for komponentspesifikke verktøy og fikturer, har AM lagt til rette for økonomisk lønnsom produksjon av seriestørrelser helt ned til ett enkelt produkt (Manogharan et al., 2016). For å vurdere lønnsomheten ved AM må man ta hensyn til at byggevolumet kan benyttes til å bygge flere ulike produkter parallelt. En god utnyttelse av byggevolumet er viktig for å få en effektiv operasjon av maskinen (Baumers et al., 2016). Man må også ta hensyn til kostnaden av å bygge støttestruktur og andre elementer som vil fjernes fra komponenten før ferdigstilling. Figur 6.11 viser en grafisk fremstilling av kostnadene knyttet til AM prosessen. Totale byggekostnader for AM prosessen  $C_{Build}$  kan uttrykkes på følgende måte:

$$C_{Build} = (\dot{C}_{Indirect} \times T_{Build}) + (m \times Price_{raw\ material}) + (E_{Build} \times Price_{Energy}) \quad (8)$$

$C_{Indirect}$  er totale indirekte kostnader per time, og omfatter en stor mengde kostnader som vist i modellen til Ruffo et al. (2006) illustrert i Figur 6.11. I denne modellen er også strømkostnadene inkludert i de indirekte kostnadene i motsetning til modellen til Baumers (2016).  $T_{Build}$  er total byggetid og  $E_{Build}$  er energien som kreves for å drive maskinen i gjennom hele byggeprosessen.  $m$  er masse til alle delene samt støttestruktur. Inkludert i dette må også pulvermateriale som blir innkapslet i komponenten medregnes. Pulveret inne i lettvektstrukturen i skjærhodet må fjernes etter siste steg i produksjonen og vil være vanskelig å samle opp, dette materialet må dermed regnes som svinn. Volumet til det innkapslede materialet ble beregnet til 251 mm<sup>3</sup>.  $Price_{raw\ material}$  er kostnaden til pulvermaterialet som benyttes i produksjonen per kilogram. Modellen til Baumers viste at maskinproduktivitet er en av hoveddriverne til byggekostnaden per enhet. Denne observasjonen er også en indikasjon på at stordriftsfordeler også eksisterer ved additiv tilvirkning. Maskinproduktivitet som en av kostnadsdriverne virker som et hinder for implementering av teknologien i industrien ettersom det tar tid å komme opp på et produksjonsnivå der man utnytter kapasiteten fullt (Baumers et al., 2016).



Figur 6.11, Oversikt over kostnader knyttet til AM (Ruffo et al., 2006).

For å vurdere kostnaden av å produsere skjærhoder ved produksjonsprosessen beskrevet tidligere i Kapittel 6 innebærer det en mengde overslag og kvalitative vurderinger. Overslagene som er benyttet i utregningen er gjort i samarbeid med eksperter fra de ulike prosessene.

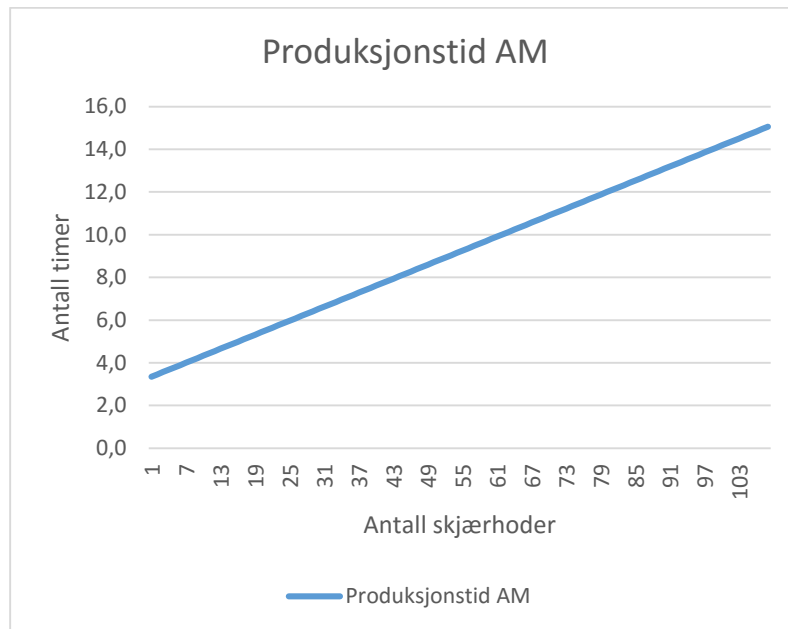
Et estimat av byggetid i sekunder kan gjøres ved bruk av likning 9. Likningen er delt inn i tre ledd, hvor det første beregner tiden for å smelte pulvermaterialet inne i hvert lag. Ledd nummer to beregner tiden for å skanne konturen til komponenten, og ledd nummer tre beregner tiden brukt mellom hvert lag. Likningen er en tilnærming hvor man antar at hvert lag har det samme arealet, og at konturen rundt hvert lag også er lik.

$$T = \frac{V}{Lt \times Ss \times Ds} + \frac{4h \times \sqrt{V}}{Lt \times Ss} + \frac{h \times Ct}{Lt} \quad (9)$$

Der V er volumet til komponenten som skal bygges additivt, Lt er lagtykkelsen, Ss er skannehastigheten, Ds er avstand mellom skannelinjene (hatching), h er høyden til komponenten, og Ct er tiden som brukes fra et lag er ferdig skannet til det neste laget begynner å skannes.

Den totale produksjonstiden i AM-maskinen som en funksjon av antall skjærhoder på byggeplaten ble beregnet. Det ble funnet at tiden for å bygge ett enkelt skjærhode var

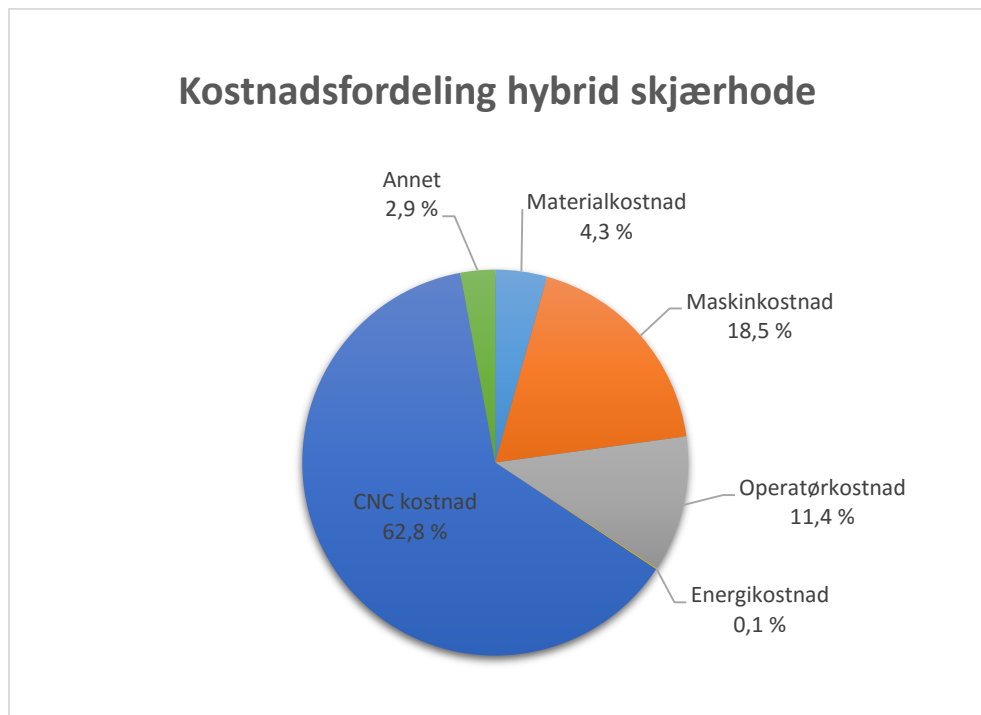
omtrent 3 timer og 20 minutter. Til sammenlikning var ble tiden til å bygge en full byggeplate med 108 hybride skjærhoder omtrent 15 timer og 6 minutter. Sammenhengen mellom additiv produksjonstid og antall skjærhoder er vist i Figur 6.12. Verdiene brukt i utregningene er oppgitt i vedlegg F.



Figur 6.12, Produksjonstid som en funksjon av antall skjærhoder på byggeplaten

Kostnadene knyttet til de additive prosessene må legges sammen med kostnadene til de resterende prosessene i produksjonsplanen for å få det fullstendige kostnadsbildet. Det i samarbeid med Sandvik Teeness ble det gjort et overslag på hvor store kostnader som vil være knyttet til produksjonen av bunnplatene skjærhodene skal bygges på og maskineringen av skjærleiet. Medveileder på NTNU bidro med et overslag på tidsbruken for forberedelse og postprosesseringsarbeidet knyttet til AM prosessene, samt kostnadene for å sandblåse skjærhodene. Kostnadsestimatet som ble utregnet gav en kostnad på 157 kr per skjærhode. Det bør merkes at alle administrasjonskostnader, leie av lokaler og varmebehandling ikke er inkludert i estimatet. Kostnadsestimatet kan studeres i sin helhet i vedlegg G. Det er bemerkelsesverdig at kostnadene knyttet til CNC maskineringen av bunnplatene og finmaskineringen utgjør nesten 64 % av det totale kostnadene knyttet til skjærhodet. Energiforbruket til AM maskinen derimot utgjør bare 0,1 % av de totale kostnadene. Utregningene av CNC-kostnadene er i dette tilfellet basert på grove estimater som inkluderer både maskinkostnad, operatørkostnad og verktøykostnad, men illustrerer likevel viktigheten av å ikke se på additiv tilvirkning som en separat produksjonsprosess. Produksjonsprosessen som ble presentert i Kapittel 6 muliggjør oppspenning og maskinering av flere skjærhoder samtidig. Skulle skjærhodene blitt spent opp og maskinert enkeltvis ville operatørkostnaden knyttet til dette arbeidet økt betydelig. Selv med en ekstremt hurtig oppspenningsmetode ville det blitt kostbart fordi maskineringstiden er så lav at operatøren ikke kan forlate prosessen for å arbeide med andre ting mens maskineringen foregår. På tross av en svært høy

kilopris for CL 50WS er materialkostnadene er også relativt små (4,3 %). Additiv tilvirking reduserer relevansen av materialkostnaden sammenliknet med tradisjonell bearbeiding der materialkostnaden utgjør en større andel. Ved maskinering er det gjerne en stor mengde materiale som skjæres bort og som da må skrotes eller resirkuleres, for kostbare materialer vil dette utgjøre en betydelig kostnad. AM derimot har som tidligere nevnt en høy resirkuleringsgrad og kostnadsdifferansen mellom en del tilvirket i titan sammenliknet med en i aluminium vil være minimal sammenliknet med tilsvarende deler produsert ved sponfraskillende bearbeiding.



Figur 6.13, Kostnadsfordelingen for den hybride skjærhode produksjonen

## 7 Videre arbeid

Flere ulike problemstillinger ble undersøkt i løpet av arbeidet med denne masteroppgaven. Når det ble forsøkt å finne svar på problemstillingene, dukket det opp flere spørsmål underveis i prosessen. Det har ikke vært tid eller ressurser til å utforske alle disse videre.

Det ble identifisert noen mangler med måten undersøkelsene presentert i Kapittel 3.3 ble gjennomført på. Forsøket gjorde det mulig å observere og sammenlikne spredningsvinkelen mellom ulike dyser, men det var ikke mulig å kvantifisere avviket til væskestrålens retning i forhold til dysens orientering.

Samtlige dyser ble produsert med samme orientering i forhold til byggeplaten. Det ville vært interessant å undersøke dyser som ikke er bygget vertikalt. En dyse i et reelt skjærhode vil ikke være orientert vertikalt med mindre hele skjærhodet roteres under bygging. Derfor bør det undersøkes om spredningen av stråler til dyser bygget på skrå, avviker fra resultatene som ble innsamlet gjennom dette arbeidet.

Skjærhodene som ble produsert og testet viste lovende resultater under maskinering. Væskestrålen fra dysen på skjærhodet var ikke like konsentrert som strålene som ble produsert under forsøkene presentert i Kapittel 3.3. Det ble vurdert som lovende at samtlige tre skjærhoder viste svært lik ytelse under spyletesten. Dette er et tegn på at det trolig er mulig å tilpasse dysen og spylekanalen på en slik måte at strålens retning og spredning forbedres.

Vektreduksjonen som ble oppnådd ved topologi-optimalisering og lettvektstruktur, var på tross av den relativt høye prosentandelen, kun 3,2 g. Fysikken sier at en mindre masse i enden av en dempet borstang vil gjøre at dempingen fungerer bedre. Det bør likevel gjøres en vurdering i hvilken grad en reduksjon på 3,2 g vil påvirke kvaliteten på maskineringen under bruk. Kompleksiteten av skjærhodets geometri øker ved vektreduksjonen oppnådd ved topologi-optimalisering og lettvektstruktur, men dette påvirker ikke kostnaden av den faktiske produksjonen i noen nevneverdig grad. Lavere vekt betyr at materialbruken under bygging vil være lavere og dette vil redusere produksjonskostnadene. På den andre siden vil et lukket hulrom inne i skjærhodet kreve en mulighet til å fjerne det overflødig pulveret etter bygging. Arbeidet med å fjerne pulveret er tar kort tid, men er en manuell prosess og med dette vil det være knyttet en kostnad.

Skjærhodet som ble designet og produsert hadde kun en spylekanal. Metoden som ble brukt for å designe skjærhodet vil også kunne brukes til å legge inn flere spylekanaler med andre orienteringer. Dersom det skal bygges nye additive skjærhoder for grundigere undersøkelser av maskinerings-egenskapene, bør det også bygges inn kanaler for bakspyling for å fremme sponevakuasjon.

En produksjonsprosess ble foreslått for hybrid produksjon av 16 mm skjærhoder. Arbeidet med å planlegge prosessen ble gjennomført i henhold til anbefalingene presentert av Hamilton (2016). Prosessen muliggjør en hurtig og repeterbar oppspenning i 5-akse fres av flere skjærhoder samtidig. Ikke alle stegene i planleggings- og prepareringsprosessen har blitt utredet like grundig, og det gjenstår noe arbeid knyttet til varme- og overflatebehandling. Produksjonsprosessen har kun blitt evaluert med 16 mm skjærhoder. I prinsippet vil den også være overførbart til skjærhoder i andre størrelser, så lenge de har SL-innfesting. Det har ikke blitt vurdert hvordan man på best mulig måte kan bruke systemet til å produsere skjærhoder av ulik størrelse i samme byggeprosess, og hvordan plassutnyttelsen da kan gjøres så effektiv som mulig. En grundig vurdering av hvor mye boltene som holder fast skjærhodene til pallen tåler bør gjennomføres. Styrken til boltene vil avgjøre hvordan maskineringen gjennomføres.

Hele prototypen som ble laget i sammenheng med dette arbeidet ble additivt og kritiske geometrier ble maskinert i etterkant. Det bør også produseres prototyper av hybride skjærhoder for å vurdere om de presterer som ønsket. Det må også undersøkes om det er mulig å la være og gå over gjengene etter varmebehandlingen slik som antatt.

## 8 Konklusjon

I arbeidet som har blitt presentert er det blitt vurdert hvorvidt additiv tilvirkning kan være en egnet produksjonsmetode for skjærhoder til dreining. Fokuset har vært spesielt rettet mot de minste skjærhodene i Sandvik Teeness sin produktportefølje med såkalt «Serration Lock» innfesting. Det ble vurdert som ikke mulig å implementere ferdigmaskinerte høypresisjonsdyser (HP-dyser) i disse skjærhodene, da det er for lite plass til å kunne lage en spylekanal med en gjenget åpning i riktig størrelse.

De additivt tilvirkede dysene som ble testet viste dårligere ytelse enn tilsvarende HP-dyse, men innenfor den rekkevidden som vil være aktuell for dyser til spylekanaler på små skjærhoder er ytelsen trolig tilstrekkelig.

Det var ikke mulig å identifisere en enkelt årsak til at dysene ikke presterte like godt som under den dedikerte dysetesten i Kapittel 3. Observasjoner og fotografier fra testingen tyder på at avviket i retning kan kompenseres for ved å endre kanalen og dysens orientering, og ved å gjøre mindre endringer på skjærhodet i området rundt dyseåpningen. Additivt tilvirkede kanaler vil da gjøre det mulig å føre skjærevæske tettere på skjærsonen enn dagens løsning med å skjære spor i flensen på skjærhodet.

Det ble designet et skjærhode som dro nytte av den geometriske friheten knyttet til additiv tilvirkning. For å utarbeide et skjærhode med et høyest mulig styrke/vekt-forhold, ble det benyttet verktøy for topologi-optimalisering og indre lettvektstrukturer. Skjærhodet som ble designet var 3,2 g lettere enn et tilsvarende konvensjonelt bearbeidet skjærhode. Denne besparelsen tilsvarer en vektreduksjon på 23,9 %.

Programvaren *3-maticSTL* fra Materialise skulle gjøre det unødvendig å gå tilbake til CAD-modellen for å gjennomføre endringer og tilpasninger etter at filen hadde blitt konvertert til STL-format. Det viste seg likevel at for skjærhodet som ble utviklet i denne oppgaven var det mer lettvent og forutsigbart å gå tilbake til CAD-modellen for å gjøre endringer. Muligheten til å generere komplekse lettvektstrukturer og senere eksportere til simuleringsverktøy som en mesh var betydelig lettere enn å gjennom tradisjonell CAD-programvare.

Ulike produksjonsprosesser ble vurdert for å finne en prosess som både var strømlinjeformet og som ville gi repeterbare kvalitet i skjærhodene produsert i prosessen. Forslaget som ble presentert baserte seg på hybrid produksjon med et pallsystem som vil gjøre det mulig å hurtig kunne spenne opp 18 skjærhoder samtidig for avsluttende maskinering. En kostnadsanalyse av produksjonsprosessen estimerte en kostnad per skjærhode på 156 kr. Kostnader knyttet til maskineringen både før og etter AM prosessen utgjorde 62,8 % av de totale kostnadene. Kostnadsfordelingen belyser viktigheten av å ikke studere den additive tilvirkning isolert, men som det den er, ett steg i en produksjonsprosess.

## 9 Referanser

- ADAMS, T., GRANT, C. & WATSON, H. 2012. A simple algorithm to relate measured surface roughness to equivalent sand-grain roughness. *Journal ISSN*, 2929, 2724.
- ALTAIR 2015. Practical Aspects of Structural Optimization, A Study Guide. 2nd ed.
- AZOMATERIALS. 2016. *M2 Molybdenum High Speed Tool Steel (UNS T11302)* [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6174> [Accessed 12.03 2016].
- BAUMERS, M., DICKENS, P., TUCK, C. & HAGUE, R. 2016. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193-201.
- BOVIE, K. 2013. *Metals: An Overview of Processes and Materials* [Online]. Kista: SINTEF Raufoss Manufacturing. Available: <http://3dp.se/wp-content/uploads/2013/09/Klas-Boivie-Sintef.pdf> [Accessed].
- BOVIE, K., SØRBY, K., BRØTAN, V., YSTGAARD, P 2011. Development of a hybrid manufacturing cell; Integration of Additive Manufacturing with CNC Machining.
- CONCEPT-LASER 2011. CL 50WS Hot-work steel. Hofmann Innovation Group.
- DESHPANDE, V., ASHBY, M. & FLECK, N. 2001. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49, 1035-1040.
- EROWA. 2016. *Products - Workholding Systems* [Online]. EROWA AG. Available: <http://www.erowa.com/en/products/workholding-systems/prodnav/PPM-Standardization/mts-tooling.html> [Accessed 31.05 2016].
- EVERTON, S. K., HIRSCH, M., STRAVROULAKIS, P., LEACH, R. K. & CLARE, A. T. 2016. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 95, 431-445.
- GHASSEMIEH, E., VERSTEEG, H. K. & ACAR, M. 2006. The effect of nozzle geometry on the flow characteristics of small water jets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220, 1739-1753.
- GIBSON, I. R., DAVID. STUCKER, BRENT. 2015. *Additive Manufacturing Technologies*, USA, Springer.
- GRØSTAD, E. 2015. *Design for additiv tilvirkning*. MSc Fordypningsprosjekt, NTNU.
- HAMILTON, K. 2016. Planning, preparing and producing: Walking the tightrope between additive and subtractive manufacturing. *Metal AM*. UK: Inovar Communications Ltd.
- HUANG, Y., LEU, M. C., MAZUMDER, J. & DONMEZ, A. 2015. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137, 014001-014001.
- JOHNSON, D. G. 2015. *Dyse* [Online]. Store Norske Leksikon. Available: [www.snl.no/dyse](http://www.snl.no/dyse) [Accessed 15.02 2016].
- KANDLIKAR, S. G., SCHMITT, D., CARRANO, A. L. & TAYLOR, J. B. 2005. Characterization of surface roughness effects on pressure drop in single-phase flow in minichannels. *Physics of Fluids*, 17, 100606.
- KEINHAUS 2015. 3MF Consortium launches to advance 3d printing technology. Wakefield, Mass. USA.
- KRUTH, J.-P., VANDENBROUCKE, B., VAERENBERGH, V. J. & MERCELIS, P. 2005. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques.
- LEARY, M., MAZUR, M., ELAMBASSERIL, J., MCMILLAN, M., CHIRENT, T., SUN, Y., QIAN, M., EASTON, M. & BRANDT, M. 2016. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design*, 98, 344-357.
- LIN, S. P. & REITZ, R. D. 1998. DROP AND SPRAY FORMATION FROM A LIQUID JET. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30, 85-105.
- LÖBER, L., FLACHE, C., PETTERS, R., KÜHN, U. & ECKERT, J. 2013. Comparison of different post processing technologies for SLM generated 316l steel parts. *Rapid Prototyping Journal*, 19, 173-179.

- MANOGHARAN, G., WYSK, R. A. & HARRYSSON, O. L. A. 2016. Additive manufacturing—integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29, 473-488.
- MATERIALISE 2016. 3-maticSTL 10.0 Tutorial. Belgium.
- MCCARTHY, M. J. & MOLLOY, N. A. 1974. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. *The Chemical Engineering Journal*, 7, 1-20.
- MELLOR, S., HAO, L. & ZHANG, D. 2014. Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194-201.
- METALAM. 2016. *Granta and Sencol collaborate on Additive Manufacturing processes and materials database* [Online]. Metal AM. Available: <http://www.metal-am.com/news/003944.html> [Accessed 25.05 2016].
- MUNGUÍA, J., CIURANA, J. D. & RIBA, C. 2008. Pursuing successful rapid manufacturing: a users' best-practices approach. *Rapid Prototyping Journal*, 14, 173-179.
- REHME, O. & EMMELMANN, C. Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting. 2006. 61070K-61070K-12.
- RUFFO, M., TUCK, C. & HAGUE, R. 2006. Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220, 1417-1427.
- TAYLOR, J. B., CARRANO, A. L. & KANDLIKAR, S. G. 2006. Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow—past, present, and future☆. *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 962-968.
- THEOBALD, C. 1981. The effect of Nozzle design on the stability and performance of turbulent water jets. *Fire Safety Journal*, 4, 1-13.
- THOMAS, D. 2009. *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. Ph. D, University of Wales Institute, Cardiff.
- VAHEDI TAFRESHI, H. & POURDEYHIMI, B. 2003. The effects of nozzle geometry on waterjet breakup at high Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 35, 364-371.
- VANDENBROUCKE, B. & KRUTH, J. P. 2007. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13, 196-203.
- YAN, C., HAO, L., HUSSEIN, A. & RAYMONT, D. 2012. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38.
- ZELINSKI, P. 2015. Highlighting Hybrid Manufacturing. *Additive Manufacturing*.



## 10 Vedlegg

Vedlegg A – Datablad CL 50WS

Vedlegg B – Tegning og mål på høy-presisjonsdyser

Vedlegg C – Tegninger av additivt tilvirkede dyser

Vedlegg D – Prosessparametere CL 50WS

Vedlegg E – Datablad Fuchs Ecocool TOP

Vedlegg F – Beregning av produksjonstid

Vedlegg G – Produksjonskostnader hybrid skjærhode

*Vedlegg A* – Datablad CL 50WS

## CL 50WS Hot-work steel

Hot-work steel 1.2709 (powder)

CL 50WS is a powder material for the production of components for tool inserts with conformal cooling. These tool inserts can be used for series injection moulding as well as for die-casting. Furthermore the material can also be used for functional components.

26

Fe

55,847

### CHEMICAL COMPOSITION

Component	Indicative value (%)
Fe	Balance
C	≤ 0,03
Si	≤ 0,10
Mn	≤ 0,15
P	≤ 0,010
S	≤ 0,010
Cr	≤ 0,25
Mo	4,50 - 5,20
Ni	17,0 - 19,0
Ti	0,80 - 1,20
Co	8,50 - 10,0

## RANGE OF APPLICATION

Tool inserts with conformal cooling in the area of injection moulding and die-casting as well as functional components.

## TECHNICAL DATA AFTER RECOMMENDED HEAT TREATMENT

Yield Point $R_e^1$	1.550 N/mm <sup>2</sup>
Tensile Strength $R_m^1$	1.650 N/mm <sup>2</sup>
Elongation A <sup>1,2</sup>	2-3 %
Young's modulus <sup>3</sup>	approx. 200 · 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Thermal conductivity $\lambda^3$	approx. 20 W/mK
Hardness <sup>4</sup>	up to 52 HRC

<sup>1</sup> Tensile test at 20°C according to DIN EN 50125

<sup>2</sup> By using a special heat treatment a higher elongation can be achieved.

<sup>3</sup> Specification according to the material manufacturer's data sheet.

<sup>4</sup> Hardness test according to DIN EN ISO 6508

## CL 50WS

Hot-work steel

1.2709

## MICROSECTION

Test piece (x 20 magnification)



Test piece (x 100 magnification)



## HEAT TREATMENT

Heat up with 100°C/h up to 540°C. Maintain temperature for 6-10 hours. Allow the components to cool down in the oven with 100°C/h.

## MICROSTRUCTURE

Components made from hot-work steel CL 50WS display a homogeneous, dense structure after they are manufactured by means of the metal laser melting process LaserCUSING®.

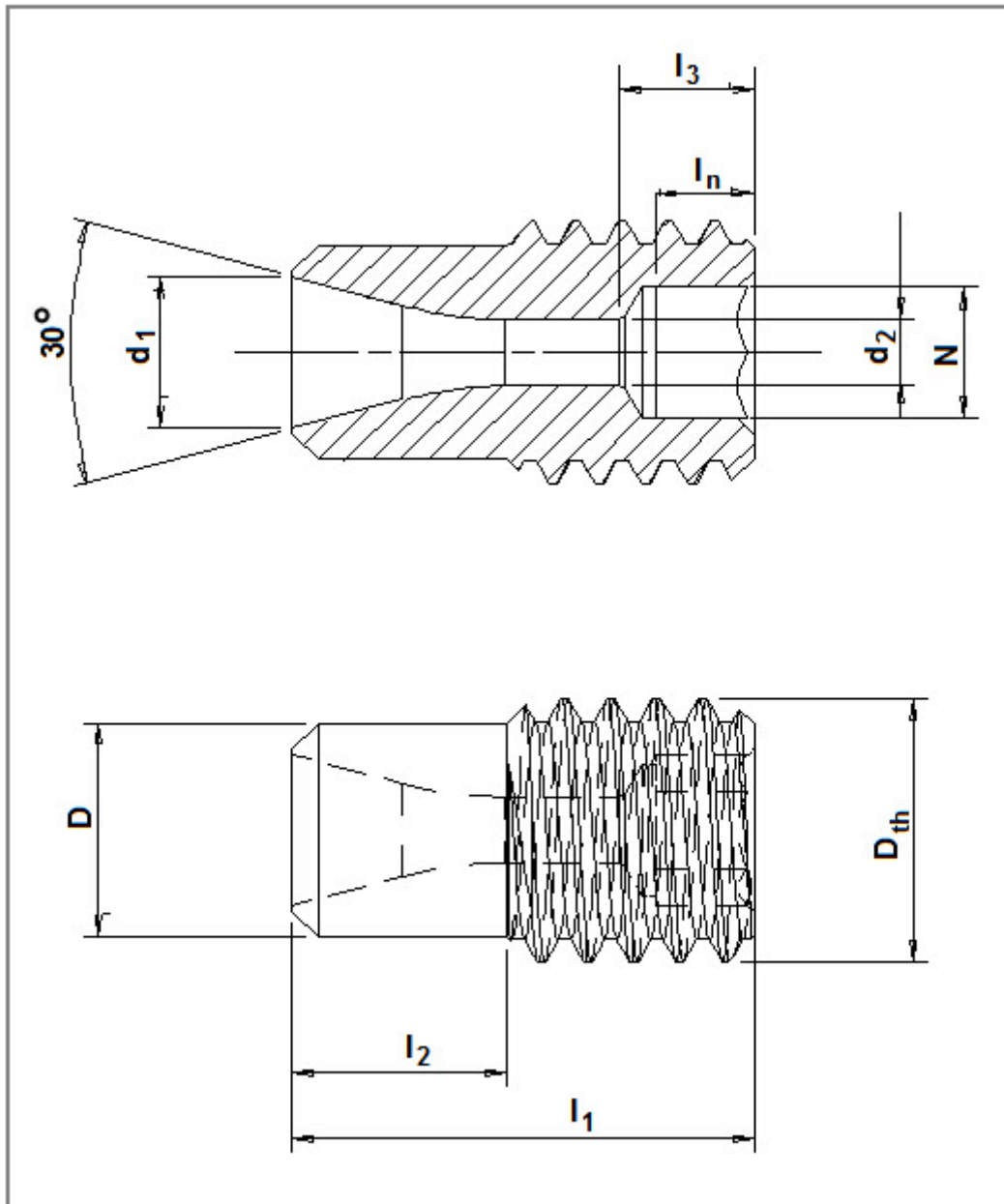
**Concept Laser GmbH**  
An der Zeil 8  
D 96215 Lichtenfels

**Sales Department**  
info@concept-laser.de  
T: +49 (0)95 71.949 238  
F: +49 (0)95 71.949 249

A company of

**HOFMANN**  
innovation group

*Vedlegg B* – Tegning og mål på høy-presisjonsdyser



<b>D</b>	<b>D<sub>th</sub></b>	<b>d<sub>1</sub></b>	<b>d<sub>2</sub></b>	<b>l<sub>1</sub></b>	<b>l<sub>2</sub></b>	<b>l<sub>3</sub></b>	<b>l<sub>n</sub></b>	<b>N</b>
3,25	M4	2,3	1	7	3,25	2,1	1,5	2
2,45	M3	1,9	1	5	2,25	1,5	1,2	1,5
2	M2,5	1,7	1	4,5	1,5	1,15	1	1,3

*Vedlegg C* – Tegninger av additivt tilvirkede dyser

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

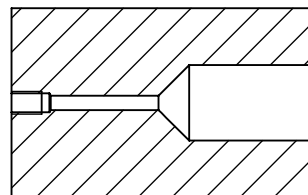
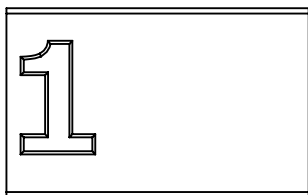
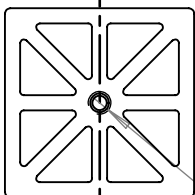
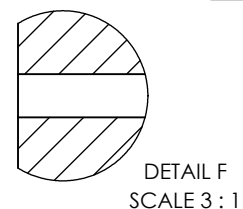
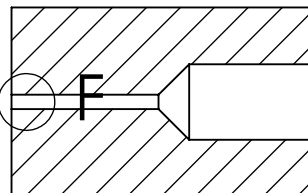
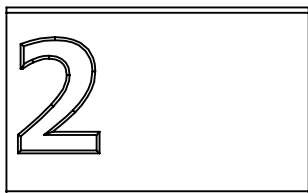
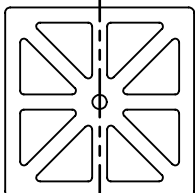
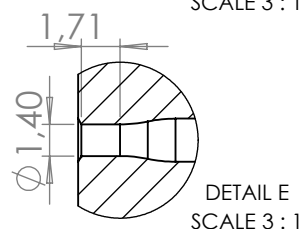
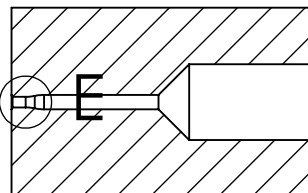
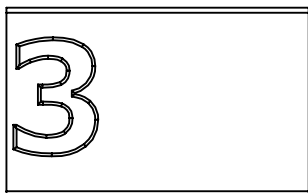
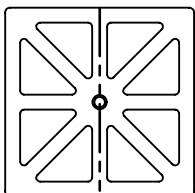
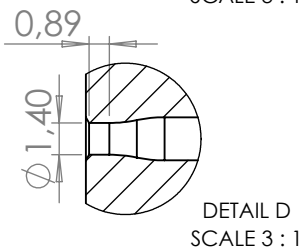
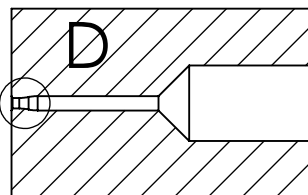
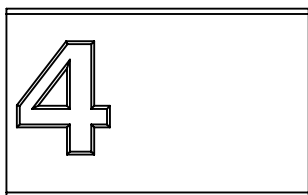
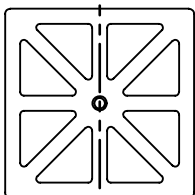
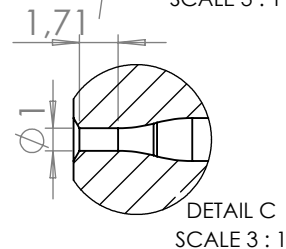
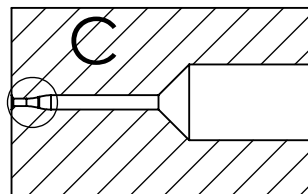
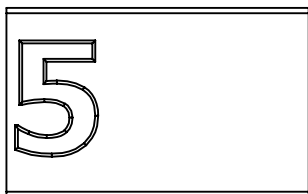
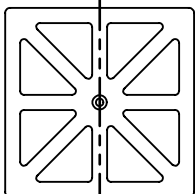
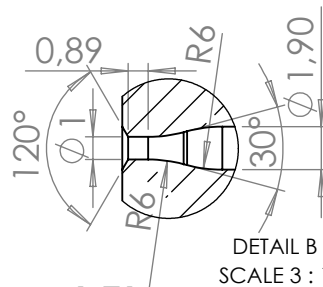
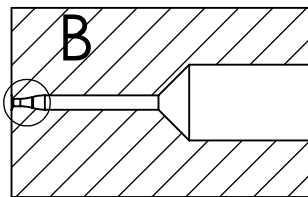
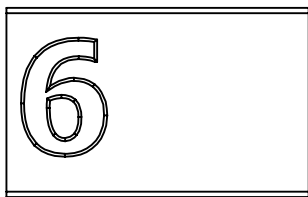
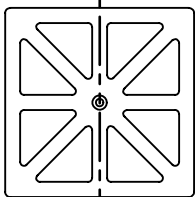
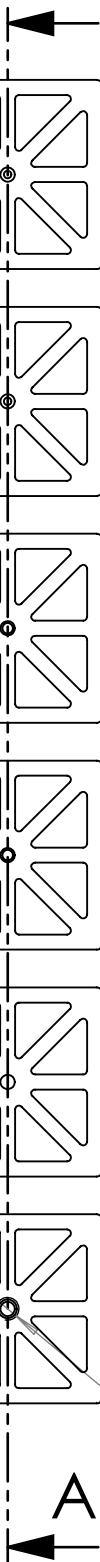
C

C

B

B

A



M3x0,5

# SECTION A-A

SCALE 1 : 1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHK'D		
APPV'D		
MFG		

TITLE:

**SOLIDWORKS Student Edition.**  
**For Academic Use Only.**

DWG NO.

# Dyser

A4

WEIGHT:

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1

4

3

2

1



Vedlegg D – Prosessparametere for Concept Laser CL 50WS

Parameter	Verdi
Lagtykkelse	30 $\mu\text{m}$
Laser styrke	180 W
Hastighet	600 mm/s
Fokus diameter	150 $\mu\text{m}$
Hatching	70 % - (105 $\mu\text{m}$ )
$\emptyset$ y-størrelse	5x5 mm

## PRODUCT INFORMATION



### ECOCOOL TOP

#### Description

ECOCOOL TOP is a mineral oil-based water-miscible cutting fluid multifunctional usable for machining of cast iron, modular iron, steel and all other popular aluminum alloys. When used with critical aluminum alloys we suggest a compatibility test.

The Micro emulsion generated during preparation summarizes the benefits of the clear-sightedly of the cutting fluids with the partly synthetically products.

Because of the use of special amines it achieves good skin care even with high pH-volumes.

ECOCOOL TOP is free of secondary alkanolamines / -amides and conforms to German TRGS 611.

#### Application

The product is low foaming within the commonly used mixtures, low misting and has an excellent settling out for milling abrasion.

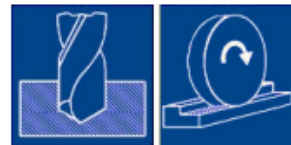
Because of special ingredients with high pressure absorbing capacity ECOCOOL TOP is usable for turning, drilling, milling and grinding. Especially high performance grinding operations with high quality surfaces and economical wheel durability will be achieved.

In combination with ECOCOOL TOP-HD the lubrication can be improved and also suitably for high alloyed materials.

Closer information takes please from the technical data sheet ECOCOOL MODULAR SYSTEM.

#### Benefits

- reduce grinding burns with special additives
- reduce grinding wheel consumption
- increase grinding wheel life
- produce outstanding surface finishes
- optimum wetting, cooling and flushing performance
- good washing effect keeps machines clean
- low foaming
- good filterability
- established formulation in wide application fields
- low misting
- universally applicable for machining and grinding



PI 1-4025e, Page 1 / PM 1 / 11.09

While the information and figures given here are typical of current production and confirm to specification, minor variations may occur. No warranty expressed or implied is given concerning the accuracy of the information or the suitability of the products.

**FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH**  
Friesenheimer Straße 15  
68169 Mannheim/Germany

Telefon: +49 621 3701-0  
Telefax: +49 621 3701-570  
E-Mail: zentrale@fuchs-europe.de



## ECOCOOL TOP

### Typical chemical and physical properties

Property	Unit	Data	Test method
Density at 15 °C	g/ml	1,01	DIN 51 757
Kinematic viscosity at 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	37	DIN 51 562-1
Corrosion test emulsion $\geq 3$ %	Korr.-grad	0 – 0	DIN 51 360-2
pH-value 5 % emulsion		9,6	DIN 51 369
Handheld refractometer factor (Testroe)		1,5	FLV-T 5 *)

\*) FLV = Test procedure of FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH

#### Application Concentration:

To ensure the optimum corrosion protection, we recommend a concentration of at least  $\geq 3$  %.

If the lubrication for the machining process is not sufficient please add step wise 0,5 % - 3 % ECOCOOL TOP-HD to obtain the ultimate concentration.

However, the ultimate concentration must also be compatible with the materials involved.

Closer information takes please from the technical data sheet ECOCOOL MODULAR SYSTEM.

#### Mixing Temperatures:

The optimum mixing temperature for water and concentrate is 15 – 20 °C.

Our Application Engineers will be pleased to advice you regarding specific applications.

Changes in the colour of the water-miscible cutting fluid concentrate have no detrimental effect on the quality or the performance of the product.

As regards application, please observe current German VDI-Guidelines 3035, 3397 Sections 1 – 3 for perfect results.

**Storage conditions:** Protect from frost!

PI 1-4025e, Page 2 / PM 1 / 11.09

While the information and figures given here are typical of current production and confirm to specification, minor variations may occur. No warranty expressed or implied is given concerning the accuracy of the information or the suitability of the products.

**FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH**  
Friesenheimer Straße 15  
68169 Mannheim/Germany

Telefon: +49 621 3701-0  
Telefax: +49 621 3701-570  
E-Mail: zentrale@fuchs-europe.de



The information contained in this product information is based on the experience and know-how of FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH in the development and manufacturing of lubricants and represents the current state-of-the-art. The performance of our products can be influenced by a series of factors, especially the specific use, the method of application, the operational environment, component pre-treatment, possible external contamination, etc. For this reason, universally-valid statements about the function of our products are not possible. The information given in this product information represents general, non-binding guidelines. No warranty expressed or implied is given concerning the properties of the product or its suitability for any given application.

We therefore recommend that you consult a FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH application engineer to discuss application conditions and the performance criteria of the products before the product is used. It is the responsibility of the user to test the functional suitability of the product and to use it with the corresponding care.

Our products undergo continuous improvement. We therefore retain the right to change our product program, the products, and their manufacturing processes as well as all details of our product information sheets at any time and without warning. With the publication of this product information, all previous editions cease to be valid.

Any form of reproduction requires express prior written permission from FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH.

© FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH. All rights reserved.

PI 1-4025e, Page 3 / PM 1 / 11.09

While the information and figures given here are typical of current production and confirm to specification, minor variations may occur. No warranty expressed or implied is given concerning the accuracy of the information or the suitability of the products.

**FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH**  
Friesenheimer Straße 15  
68169 Mannheim/Germany

Telefon: +49 621 3701-0  
Telefax: +49 621 3701-570  
E-Mail: zentrale@fuchs-europe.de

## Vedlegg F – Beregning av produksjonstid AM

Dette vedlegget omfatter beregningen av byggetid for AM prosessen til det hybride skjærhodet.

<b>Produksjonstid</b>	
Recoating time, Ct [s]	22,0
Skannehastighet, Ss [mm/s]	600,0
Avstand mellom skannelinjer, Ds[mm]	0,1
Høyde AM, h [mm]	15,9
Lagtykkelse, Lt [mm]	0,0
Antall lag, NI	529,7
Totalt smelteareal [mm <sup>2</sup> ]	23346,7
T, ett skjærhode [h]	3,3
<b>T, byggeplate full [h]</b>	<b>15,1</b>

Vedlegg G – Produksjonskostnader hybrid skjærhode

AM prosess	
Direkte kostnader	
Materialkostnad [NOK/kg]	900
Materialforbruk [mm <sup>3</sup> ]	700,4
Svinn [mm <sup>3</sup> ]	251
Tetthet [g/mm <sup>3</sup> ]	0,00805
Materialforbruk [g]	7,7
<b>Materialkostnad pr hode [NOK]</b>	<b>6,9</b>
Indirekte kostnader	
Produksjonstid prosess	15,1
Antall skjærhoder pr plate	108
Maskinpris [NOK]	5000000
Avskrivningstid [år]	7
Avskrivning per år [NOK/år]	714286
Vedlikeholdskostn. [NOK/år]	100000
Vedlikehold programvare [€/år]	3360
Valutakurs [NOK/€] (per 09.06.16)	9,23
Programvarekostn [NOK/år]	31013
Timer pr år [h]	8760
Maskintid pr år [h]	4000
Maskinkostnad per time [NOK/h]	211,3
Maskinkostnad per prosess [NOK]	3182
<b>Maskinkostnad per skjærhode [NOK]</b>	<b>29,5</b>
Montering av substrat [h]	1,0
Foreberedelsestid Operatør [h]	0,5
Postprosesseringstid	1,0
Sum operatørtid [h]	2
Lønn operatør [NOK/h]	800
Operatørkostnad [NOK]	1960
<b>Operatørkostnad per skjærhode [NOK]</b>	<b>18,1</b>
Strømpris [NOK/kWh]	0,27
Strømforbruk [kW]	4
Strømkostnad per prosess [NOK]	16,1
<b>Strømkostnad per skjærhode [NOK]</b>	<b>0,1</b>
CNC prosesser	
Kostnad bunnplateproduksjon [NOK]	200
<b>Kostnad per bunnplate [NOK/stk]</b>	<b>1,9</b>
<b>Maskinering av skjærleie [NOK/stk]</b>	<b>100</b>
Andre prosesser	
Kostnad sandblåsing	500
<b>Kostnad sandblåsing [NOK/stk]</b>	<b>4,6</b>
<b>Kostnad per skjærhode</b>	<b>156,5</b>