Masteroppgave

Juni, 2019

Solveig Frøyland Gomo

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Masteroppgave

Solveig Frøyland Gomo

Mulighetsstudie for bruk av 3D-printing til produksjon av innleggssåler ved Trøndelag Ortopediske Verksted

Juni 2019

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Mulighetsstudie for bruk av 3D-printing til produksjon av innleggssåler ved Trøndelag Ortopediske Verksted

Solveig Frøyland Gomo

Produktutvikling og produksjon - masterstudium (5-årig)
Innlevert: Juni 2019
Hovedveileder: Knut Einar Aasland
Medveileder: Tobias Goihl, Trøndelag Ortopediske Verksted AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Sammendrag

Hensikten med arbeidet i denne oppgaven var å vurdere muligheten av å benytte additiv tilvirkning, også kalt 3D-printing, som metode for å fremstille pasient-tilpassede innleggssåler ved Trøndelag Ortopediske Verksted. Studier av verkstedets tradisjonelle produksjonsmetoder har vist at disse både er tidkrevende og kan gi variasjon i grad av kalitet på endelig produkt. Potensialet for en effektivisering av prosessen er stort.

I oppgaven blir flere ulike 3D-printteknologier, materialer og programvarer studert og vurdert med tanke på effektivt å kunne fremstille individuelt tilpassede innleggssåler. Oppgaven tar også for seg hva som i dag allerede eksisterer av skotøy og såler produsert med 3D-print teknologi. I tillegg er praktiske konseptforsøk med fot-scanning, 3D-modellering og såleprinting utført.

Studien viser at mye har skjedd innen utviklingen av 3D-printere og materialer de siste årene og at flere kommersielle aktører nå bruker teknologien, ikke bare til konseptutvikling og prototyper, med også til kommersielle salgsprodukter. Det er også vist at flere aktører jobber med å utvikle programvare mer spesifikt rettet mot ortopedisk såldedesign, men at det ikke ble funnet noen programvare som ville kunne være en fullverdig erstatning for dagens metoder.

Basert på resultatene konkluderer oppgaven med at det i dag eksisterer additive teknologier og materialer som vil kunne brukes til å produsere en tilfredsstillende, og sannsynligvis bedre, innleggssåle på en mer effektiv måte enn slik det gjøres i dag. Samtidig ser det ut til at det foreløbig ikke finnes et fullverdig dataprogram som kan assistere den digitale designprosessen som kreves i forkant av printing, men at slike programmer trolig ikke ligger langt inne i fremtiden. Ortopedisk verksted bør derfor fortsette å følge med i utviklingen, og om mulig også initiere samarbeid med andre aktører som kan være med å som kan fremskylde en slik utviklingsprosess.

Abstract

The purpose of this study was to assess the possibility of utilizing Additive Manufacuring, also known as 3D-Printing, as a manufacturing method in the production of individual patient-adapted insoles at Trøndelag Ortopediske Verksted. Studies of their traditional manufacturing methods have shown that these are time consuming and subject to process variabilities that may cause quality issues in the final products. The potential of process efficiency improvements is large. In this study, several different 3D printing technologies, materials and software are assessed, and evaluated for their possible potential of making custom-made insoles.

The study also addresses what is already known on this topic, and what manufacturers of footwear and insoles that already use 3D printing technology as manufacturing method. Practical concept development trials using foot scanning, 3D-modeling and insole printing have also been performed.

The study shows that there has been considerable development in the field of 3D-printers and materials over the last few years, and that commercial companies use the technology – not only for concept development or prototyping, but also for regular manufacturing of sellable products. It is also shown that several companies and institutions now work on software development specifically targeted on orthopedic insole design. However, no software has yet been found that fully can replace the current manufacturing methods.

Based on the findings, this study concludes that there today are readily available additive manufacturing methods and materials that may be used to produce insoles that may be just as good as – or even better than currently manufactured insoles, and that also will produce them in a more efficient way. But it also seems like there so far is no software available that fully can assist in the digital design process required prior to printing the desired sole design. However, such a software may not be very far away. Trøndelag Orthopediske Verksted should keep following the development in this field closely, and if possible, also initiate partnerships with others that can boost the development process.

Forord

Jeg ønsker å rette en stor takk til min kontaktperson ved TOV, Tobias Goihl, for å ha lagt så godt til rette for mine besøk hos dem, og for å ha tatt seg tid til gjentatte møter og mailkorresponanser. Jeg takker også øvrige ansatte ved TOV som fikk meg til å føle meg svært velkommen ved alle mine besøk ved bedriften.

Videre vil jeg takke min veileder Knut Einar Aasland for den spennende oppgaven, og for alle de interessante og motiverende oppfølgingssamtalene vi har hatt.

Til slutt vil jeg takke mor og far som alltid er der, og som støtter meg når jeg trenger det.

Innhold

Sammendrag **i**

Abstract **ii**

Forord **iii**

Innholdsfortegnelse **vi**

Figuroversikt **viii**

Forkortelser **ix**

1 Introduksjon **1**

2 Trøndelag Ortopediske Verksted **3**
2.1 Om Trøndelag Ortopediske Verksted 3
2.1.1 Fotsenger vs. innleggssåler 4
2.2 TOVs pasienter og diabetes 4
2.3 Fremstilling av fotsenger 5
2.3.1 Fremstilling av freste fotsenger 5
2.3.2 Fremstilling av vakuumformede fotsenger 6
2.4 Dagens utfordringer 7

3 Additiv tilvirkning **9**
3.1 Definisjon og historie 9
3.2 Arbeidsflyt ved 3D-printing 12
3.3 Additive teknologier 13
3.3.1 Ekstrudering - FDM 15
3.3.2 Fotopolymerisering - SLA, DLP, CDLP 22
3.3.3 Pulversintring - SLS, MJF 26
3.3.4 Material-jetting - MJ 27
3.4 Polymere printmaterialer 27

3.4.1 Potensielle materialer og teknologier for såleprinting 29
3.4.2 Biokompatibilitet 30
3.5 Printerselskaper og printleverandører 31

4 Forskning, utvikling og skoindustri 35
4.1 3D-printede sko 35
4.2 3D-printede innleggssåler 37

5 Programvare- og konseptutprøving 43
5.1 Utvikling av eksempelsåle 43
5.2 DAK og gitterstruktur 45
5.3 FDM printing 49

6 Oppsummering 55

7 Konklusjon 57

Bibliografi 59

Appendix 73

Appendiks 73
A.1 Målskjema fotsenger, SKANN OG FRES 73
A.2 Målskjema fotsenger, vakuumproduksjon 75
A.3 Teknisk datablad - Flexfill 98A 77
A.4 Teknisk datablad - NinjaFlex® 3D Printing Filament 79
A.5 LAuF sluttrapport 81

Figurer

3.1 Menneskeskjelett printet i 30x30x50 mm^3 boks [12] 10
3.2 Modell printet med Hideo Kodamas hurtig-prototyp-maskin [20] 11
3.3 Fem hovedsteg innen 3D-printing [21] 12
3.4 Oversikt over additive tilvirkningsmetoder [24] 14
3.5 Oversikt over additive tilvirkningsmetoder [25] 15
3.6 Eksempel på en typisk FDM-printer [26] 16
3.7 Priseksempler i NOK på FDM-printere funnet på prisguiden.no [28] . . . 17
3.8 da Vinci SUPER av selkapet XYZprinting. Objektvolum på 300x300x300 mm^3 [29] 18
3.9 Graf som illustrerer hvordan printtid av en kube påvirkes av kubens størrelse og fyllprosent. [33] 20
3.10 Fyllmønstre med ulik tetthet. Fra venstre til høyre: 20% ,40% ,60% og 80%. Fra top til bunn: Honeycomb, Concentric, Line, Rectilinear, Hilbert Curve, Archimedean Chords og Octagram Spiral [34] 21
3.11 Gyroid struktur[35] 22
3.12 Skjermutklipp fra programmet OptiMatter som viser materialvalgene tilgjengelig for FDM og SLS [39] 22
3.13 Gradering av printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene PLA, ABS, PET, Nylon, TPU og PC [41] 23
3.14 Radardiagram som vekter printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene PLA, ABS og PET [42] 24
3.15 Radardiagram som vekter printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene Nylon, TPU og PC [43] 24
3.16 Tabell med materialegenskaper for Formlabs Standard Resin [44], før og etter ekstra etterherding. 25
3.17 To retninger av fotopolymeriseringsprinting [45] 25

3.18 Sålen til en Adidas-sko printet med printerselakapet Carbons CDLP-printer [46] 26
3.19 Alle plasttyper tilgjengelig for 3D-printing fra 3D Hubs [60] 28
3.20 Shore-hardhetsdiagram [67] 29
3.21 Tabell med kriterier for biokompatibilitetstester i fra ISO 10993-1[85]. Områdene aktuelle for TOVs såler er markert med gult. 31
3.22 Oversikt over de fire polymer-printteknologiene og et utvalg aktuelle printerprodusenter [87] 32

4.1 Adidas Futurecraft 4D - DLP-printet midtsåle i TPU [116][117] 36
4.2 Peak Future - SLS-printet midtsåle i TPU [122][123] 36
4.3 Bilde av SLS-printet TPU-såle og 3D-strukturer fra prosjektet LAuF ved Fraunhofer Institutt [129] 38
4.4 Imprints av Cadscan - FDM-printet innleggssåle i TPU [135] 39
4.5 Bilder fra utviklingsprosessen til Footworx Clinik. De tre øverste av FDM-printede såler, det nederste trolig av SLS-printede såler. [138] 40
4.6 ScientiFeet konseptet [141] 40
4.7 Glimt av ScientiFeets såledesignprogram i Prodways' demonstrasjonsvideo av deres TPU-sintermateriale. [142] 41
4.8 Utklipp fra Phits' designprogram footscan® [146] 42

5.1 3D-scan av studentens fot gjort tatt av TOVs scanner FOOTin3D 44
5.2 Testsko og endelig sålemal 44
5.3 Bilder fra såledesign i programmet Gensole. 45
5.4 Utklipp fra printforberedelsesprogrammet Netfabb [148] 46
5.5 DEmonstrasjon av lattice-funksjon i NX [151] 47
5.6 Design av gitterstruktur i eksempelsåle med programmet Meshmixer . . . 48
5.7 Tverrseksjon av gitterfylt såle designet i Meshmixer iportert til og snittet i NX. 48
5.8 Problemer med FDM-printing i myke materialer. Venstre og midtre bilde illustrerer oppkveilingsproblemene. Høyre bilde viser inserten, oransje, som ble designet for å løse problemet. 50
5.9 Såle med "honeycomb" og "rectlinear" fyllstruktur i printforberedelsesprogrammet Slic3r PE 51
5.10 Fem FDM-printede såler som er et resultat at gjentatte print-iterasjoner . . 51
5.11 Testkuber kargjort for print. Type fyllstruktur fra venstre til høyre, gyroid, 3D honeycomb, cubic. Fyllprosent fra fremst til bakerst, 5 %, 10 %, 15 % 52
5.12 Printing av testkuber. Printresultat nederst til høyre. 52
5.13 Skisse for designgrunnlag til tykkelse-testmodeller 53
5.14 Printing av og ferdige tykkelse-testmodeller 53

Forkortelser

TOV	=	Trøndelag Ortopediske Verksted
AM	=	Additive Manufacturing
MIT	=	Massachusetts Institute of Technology
ISO	=	International Organization for Standardization
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
FMD	=	Fused Deposit Modeling
FFF	=	Fused Filament Fabrication
SLA	=	Stereolitography
DLP	=	Direct Light Processing
CDLP	=	Continuous Direct Light Processing
SLS	=	Selective Laser Sintering
MJF	=	Multi Jet Fusion
MJ	=	Material Jetting
BJ	=	Binder Jetting
PLA	=	Polylactic Acid
PVA	=	Polyvinyl Alcohol
HIPS	=	High Impact Polystyrene Sheeting
PET	=	Polyethylene Terephthalate
ABS	=	Acrylonitrile Butadiene Styrene
TPE	=	Thermoplastic Elastomer
TPU	=	Thermoplastic Polyurethane
PC	=	Polycarbonate
PS	=	Polystyrene
PP	=	Polypropylene
PEEK	=	Polyether Ether Ketone
PEBA	=	Polyether block amide
EPU	=	Expanded Polyurethane
PETG	=	Polyethylene Terephthalate Glycol
PEI	=	Polyethylenimine
CAD	=	Computer Aided Design
DAK	=	Dataassistert konstruksjon

Kapittel 1

Introduksjon

Trøndelag Ortopediske Verksted (TOV) driver med utvikling, produksjon og vedlikehold av en rekke ortopediske hjelpemiddler. Grunnet den store variasjonen i deres brukeres behov bærer produksjonen et tydelig håndverksmessig preg, noe som i dagens samfunn er både kostbart og mer tidkrevende enn man skulle ønske. I de fleste tilfeller er den møysommelig og håndverksmessige arbeidsmetoden likevel nødvendig for å kunne fremstille tilfredstillende hjelpemidler.

Den avdelingen ved TOV som i dag har størst produksjon av en spesifikk type produkt, er avdelingen som tilvirker innleggssåler. Her er det identifisert et potensiale for standardisering og effektivisering av produksjonen, men med verktøyene verkstedet har tilgjengelig i dag er det begrenset hvor mye som kan endres. Ansatte ved TOV har den siste tiden begynt å interessere seg for hvilke muligheter additiv tilvirkning kan bringe til deres bransje, og har derfor gjennom kontakt med førsteamanuensis ved NTNU og veileder for denne oppgaven, Knut Einar Aasland, foreslått at en problemstillingen kunne formuleres og utforskes gjennom et masterprosjekt.

Problemstillingen ble formulert og lyder som følger: Masteroppgaven skal, etter å ha formidlet dagens utfordringer ved TOV, utforske ulike typer additive tilvirkningsteknologier og materialer, og kartlegge hvilke av disse som vil kunne være egnet til produksjon av ortopediske innleggssåler. Den skal også undersøke hva slags programvare som kreves for å digitalt kunne modellere en tilfredstillende såle, og om et slikt program eksisterer i dag. Videre skal oppgaven gi et innblikk i hvilke printerteknologier, som i dag brukes av relaterte disipliner som skotøy- og såle-industrien, slik at dette kan brukes som ytterligere grunnlag for å evaluere hvilken teknologi som bør satses på om TOV i løpet av de kommende årene skal gjøre en større tenknologi-investering. Det er også ønsket at masterkandidaten, om mulig, fremstiller konseptmodeller som kan gi indikasjoner på om en videre utredning av 3D-printing i bedriften vil være hensiktsmessig.

Oppgavens struktur er satt opp på følgende måte:

- Kapittel 1 introduserer oppgaven
- Kapittel 2 presenterer Trøndelag Ortopediske Verksted og deres brukere, samt dagens produksjonsmetoder og produkter og utfordringene tilknyttet disse.
- Kapittel 3 gir en innføring i 3D printing generelt, og gir en oversikt over hvilke printteknologier og byggematerialer som finnes i dag. Videre gir kapittelet en vurdering av hvilke typer printere, materialer og byggestrukturer som kan være aktuelle for printing av innleggssåler, samt en beskrivelse av styrker og begrensninger ved hver av de aktuelle teknologiene.
- Kapittel 4 gir en oversikt over hva som allerede finnes i verden av sko- og såleproduksjon basert på 3D-printing.
- Kapittel 5 beskriver gjennomføringen av en praktisk produktutviklingsprosess der kandidaten selv har scannet sin egen fot, prøvd ut ulike programvarer for modellering av en spesialtilpasset såle med integrert dempingsgeometri og printet denne i ulike materialer. Kapittelet beskriver også hvilke programvarer som er aktuelle med hensyn på generering av innvendige støtdempingsstrukturer i sålen.
- Kapittel 6 gir en oppsummering av arbeidet
- Kapittel 7 konkluderer oppgaven

Kapittel 2

Trøndelag Ortopediske Verksted

Ettersom denne masteroppgaven først og fremst er skrevet for Trøndelag Ortopediske Verksted har kandidaten gjennom hele semesteret fått god oppfølging gjennom samtaler, besøk og møter med både kontaktperson Tobias Goihl, og andre ansatte ved bedriften. Studenten fikk ved flere anledninger følge både ortopediingeniører og verkstedarbeidere i deres daglige arbeidsoppgaver, og kunnskaper og innsikt fra disse besøkene er alle samlet inn under kapittel 2. Supplerende informasjon innhentet av studenten også lagt til i samme kapittel.

Seksjon 2.1 forteller utenforstående litt om hvem Trøndelag Ortopediske Verksted er og hva de driver med. Videre inneholder seksjon 2.2 informasjon om sykdomen diabetes, og gjengir erfaringer gjort ved et besøkt ved en St. Olavs Hospitals diabetespolyklinikk. Seksjon 2.3 skildrer så hvordan dagens fotsenger blir produsert ved Trøndelag Ortopediske Verksted, før seksjon 2.4 til slutt oppsummerer pasienters utfordringer med dagens såler og hvorfor det er vanskelig for TOV å gjøre noe med dette.

2.1 Om Trøndelag Ortopediske Verksted

Trøndelag Ortopediske Verksted AS (TOV AS eller bare TOV) er *"et aksjeselskap heleid av St.Olavs Hospital HF og kontrollert av St.Olavs Hospital, Helse Nord-Trøndelag og Helse Møre og Romsdal i fellesskap."* [1] De har virksomhet både i Namsos, Ålesund, Levanger og Orkdal, men hovedverkstedet ligger i Trondheim, kun 10 minutters gange fra St. Olavs hospital. Ved hovedverkstedet drives det både med utvikling, fremstilling, tilpasning og vedlikehold av ortopediske hjelpemidler, mens det ved de andre lokasjonene hovedsaklig gjøres tilpasning og vedlikehold av hjelpemidlene. Ortopediske hjelpermiddler defineres hos TOV som *"individuelt tilpassede hjelpemidler som skal erstatte tap av legemsdel, eller gjenopprette eller bedre tapt funksjon i et bevegelsesorgan"* [2]. Dette omfatter både proteser, ortoser og ortopedisk fottøy. TOVs kunder er hovedsakelig pasienter som er blitt henvist fra legen, og de fleste hjelpemidlene TOV selger er delvis finansiert

gjennom folketrygden.

Innen avdelingen for ortopedisk fottøy jobbes det både med å lage og tilpasse spesialsko, og å tilvirke eller tilpasse fotsenger og innleggssåler. I tillegg drifter TOV en liten skobutikk for spesialsko i sine lokaler, men i denne oppgaven vil det kun fokuseres på tilvirkingen ulike typer fotsenger.

2.1.1 Fotsenger vs. innleggssåler

Hos TOV skilles det mellom noe de kaller innleggssåler og noe de kaller fotsenger. Innleggssåler, eller ”profilerte innleggssåler” som det heter på nettsidene deres, er pre-fabrikkerte såler som delvis kan tilpasses brukeren og brukerens sko, og slike såler får pasienter med mindre fotdeformiteter og fotplager. Har man større deformiteter eller plager kan man få spesiallagd fotsenger som er individuelt fremstilt etter modell av foten. I kapittel 2 vil ordene ”innleggssåler” og ”fotsenger” konsekvent brukes slik de brukes ved TOV, men da dette ikke er en øvrig kjent definisjonsforskjell vil ordet ”innleggssåler” i resten av oppgaven bli brukt om alle typer skoinnlegg som ikke opprinnelig følger med sko fra produsenten.

Hvorvidt man har krav på innleggssåler eller fotsenger med støtte fra det offentlige kommer an på graden av funksjonsnedsettelse og hvilken diagnose legen har henvist dem til TOV for. Med en diagnose som gir rett på støtte betaler man kun en egenandel på 450 kr per par enten man skal ha innleggssåler eller fotsenger. Det er også mulig å kjøpe såler uten henvisning. Da koster et par innleggssåler 1 305 kr, mens et par fotsenger koster 2 225 kr. Har man tidligere kjøpt fotsenger og ønsker å kjøpe et nytt par uten rekvisisjon, kan ofte en eksisterende scann eller gipsmodell gjenbrukes og da koster det nye paret 1 450 kr. Prisene skal i snitt dekke utgiftene TOV har med materiale og tilvirking, samt konsultasjon- og kontrolltimer, og gir i hovedsakelig ingen gevinst.

2.2 TOVs pasienter og diabetes

Flere av pasientene som jevnlig får tilvirket såler av TOV lider av den kroniske sykdommen diabetes. Diabetes er en sykdom som kommer som følge av manglende insulinproduksjon eller at insulinet ikke virker tilstrekkelig. Insulin skal få cellene i kroppen til å ta til seg næring i form av sukker, og ved insulinmangel vil man kunne få for høyt blodsukker ved inntak av mat og energiholdig drikke. For høyt blodsukker vil over tid gi skader på de små blodårene i kroppen og øyne, nyrer og perifere nerver er spesielt utsatt. Også de store blodkarene vil kunne bli påvirket, og nedsatt blodstrøm til bena er en annen av senkomplikasjonene sykdomen. De siste tiårene har tidlig oppdaging og forbygging av sykdommen, samt metoder for bedre blodsukkerkontroll, ført til redusert risiko for langtidskomplikasjoner [3].

Ved diabetes type I skyldes sykdommen en genfeil som gjør at immunforsvaret ødelegger de insulinproduserende cellene i bukspyttkjertelen. Det kan ta tid før flertallet av

cellene er ødelagt og man får diabetes, og de fleste som er disponert med genfeilen utvikler aldri diabetes. Det er uvisst hvilke faktorer som må til for å utløse den destruktive immunreaksjonen, men en teori er at den blir trigget av enkelte virusinfeksjoner [4]. Diabetes type II er den typen som ofte blir forbundet med overvekt og livsstilsvaner. Sykdommer kommer av at bukspyttkjertelen ikke klarer å produsere nok insulin og at insulinet i tillegg har dårlig virkning, såkalt insulinresistens. Årsaker til insulinresistens og diabetes type II er nært knyttet til fedme og inaktivitet, men faktorer som arv og oppvekstkår spiller også inn [5]. I 2017 hadde rundt 245 000 personer i Norge diabetes hvorav 10 % hadde type I, mens 90 % hadde type II [3].

Mange av TOVs diabetespasienter kommer selv til verkstedets lokaler for jevnlige konsultasjoner, men enkelte får også hjelp på St. Olvas hospital ved en poliklinikk for diabetikere [6] som hver onsdag besøkes av en av TOVs ortopediingeniører. En av onsdagene fikk masterkandidaten bli med til klinikken for å observere, snakke med pasientene og stille spørsmål til ortopeden underveis i arbeidet. I løpet av dagen fikk kandidaten være til stede både ved måltagning av føtter, sko- og såletilpasninger, sårbehandlinger og generell pasientoppfølging. En av de viktigste lærdommene fra dagen var hvor lett personer med redusert følese og blodsirkulasjon i bena får fotsår, og hvor vanskelig det kan være å få dem til å leges.

Et tydelig eksempel på dette fikk studenten selv overvære da en eldre dame kom for regelmessig kontroll ved poliklinikken. Hun hadde diabetes type I og var ikke overvektig, men hadde både dårlig blodsirkulasjon og redusert nerveføelelse i føttene. Hun hadde allerede flere sår på bena men nå hadde nylig et nytt sår oppstått. For noen dager siden hadde en hjelpepleier vært litt uoppmerksom da hun hjalp den eldre damen med å ta på støttestrømper, og hun oppdaget ikke at strømpen hadde blitt liggende i en liten fold nederst på den ene foten. Neste gang støttestrømpen ble tatt av hadde strømpen gnagd hull i huden og dannet et sår. Den eldre kvinnen hadde selv ikke kunnet føle det begynnende gnagsåret. Da kandidaten etterpå spurte mer om slike sår, fortalte legen at det nok kom til å ta over seks måneder før dette såret var leget, og muligens også lenger. I mellomtiden var det viktig med jevnlig og god sårpleie for at såret ikke skulle bli infisert. Da kunne det fort utvikle seg til et større og mer alvorlig problem.

2.3 Fremstilling av fotsenger

Fotsengene fra TOV blir i dag tilvirket på to forskjellige måter, fresing eller vakuumforming. Hvilken metode som benyttes er avhengig av hvor komplisert pasientens tilfelle er og hva som trengs for å gi tilstrekkelig støtte, demping og korreksjon av vinkler, samt en optimal omfordeling av fotbladets trykkbelastning.

2.3.1 Fremstilling av freste fotsenger

1. Konsultasjon, blekkavtrykk og skumavtrykk av pasientens fot.

2. Scan av skumavtrykk og føring av nødvendige justeringer i ”Målskjema fotsenger, SKANN OG FRES” A.1. Noen ganger lages i stedet et gipsavstøp av skumformen slik at nødvendige korrigeringer kan gjøres på gipsmodellen før den korrigerte modellen av foten scannes.

3. Importering av 3D-scan til dataprogrammet FootMILL, en utvidelse av programmet Rhino, gjøres av en tekniker som basert på scanfilen, standardmaler og målskjema fra ortopediingeniør designer fotsengen. Noen ganger gjøres også dette av ortopediingeniøren selv.

4. Før den ferdigdesignede sålen kan sendes til fresing må filen via programmet ParaMed, dataprogramet TOV benyttet før FootMILL, men som fresene ved verkstedet fremdeles er avhengige av.

5. En skumkloss av riktig størrelse monteres i fresen og fresen startes.

6. Etter omtrent 20 minutter er fresen ferdig. Paret med fotsenger tas ut, overflødig materiale skjæres bort og undersiden av fotsengene blir slipt til spesifisert tykkelse og grovt formslipt langs kantene.

7. De grovslipte fotsengene legges i en boks sammen med tilhørende papirer og lagres på verkstedet til pasienten kommer tilbake for prøving.

8. Pasienten kommer tilbake til klinikken og får prøve fotsengene sammen med skoene de er tiltenkt. Eventuelle justeringer og tilslipinger gjøres.

2.3.2 Fremstilling av vakuumformede fotsenger

1. Konsultasjon, blekavtrykk og skumavtrykk. ”Målskjema fotsenger, vakuumproduksjon” fylles ut.

2. Skumavtrykk brukes for å lage gipsmodell. Gipsmodellen modelleres til korrigert fasong og settes til tørking.

3. Gipsen må tørke i opp til to døgn.

4. Ortopediteknikker bygger, basert på spesifikasjoner fra ortopdeiingeniør, lagvis opp en fotseng med ulike skummaterialer og ekstrainnlegg som kiler og pelott. Teknikeren legger først laget som skal komme i kontakt med foten før nye lag limes oppå. For hvert lag varmes sålen i en varmeovn før den i en vakuumformer legges oppå gipsmodellen som den former seg etter når luften suges ut av vakuumformeren. Liming, varming og forming blir gjort for hvert nye lag som blir lagt til.

5. Overflødig materiale kuttes vekk fra sålen og sålen legges i en boks sammen med tilhørende papirer og lagres på verkstedet til pasientens time for prøving og tilpasning.

6. Pasient kommer tilbake til klinikken og får prøve fotsengene sammen med skoene de er tiltenkt. Eventuelle justeringer og tilslipinger gjøres.

2.4 Dagens utfordringer

Mange av brukerne hos TOV som av ulike årsaker er nødt til å bruke fotsenger, sliter i dag med å finne sko sålene deres passer i og som de samtidig synes er fine. Dette er fordi produksjonsmetoden både ved fresing og vakuumforming resulterer i forholdsvis store og klumpete såler.

For eksempel; hvis TOV skal lage en fotseng med vakuumforming som skal ha karmmer i et stivt materiale for å støtte opp om sidene av foten må de bruke er forholdsvis stivt materiale, men siden dette vil være hardt og ubehagelig å gå på, må de også legge på lag med mykere materialer. Med 3D-design for printing kunne man i stedet ha modellert selve karmen med en tett og stiv struktur, mens man i trykkbelastede områder av sålen kunne lagt inn en luftigere, mykere og dempende gitterstruktur. Slik ville man i mange tilfeller kunnet redusere totaltykkelsen av sålen.

Det er også begrenset hvor mye verkstedteknikkerne kan slipe undersiden av både freste og vakuumformede fotsenger for å ikke gå på kompromiss med sålenes funksjon. Mulighetene deres for å matche innsiden av enkelte typer sko blir dermed begrenset, og dette er med på å utelukke en rekke skotyper fra brukerens allerede begrensede utvalg. Det er heller ikke uvanlig at man må gå opp i skostørrelse for å plass til både fot og ekstrasåle i skoen, og dette er, spesielt blant kvinner, lite populært. Det kan til og med hende at brukeren ved flere anledninger lar være å bruke sålene fordi de ikke ønsker å bli sett i sko de synes er upassende eller stygge, og dette kan over tid få kritiske følger. Med 3D-printing kunne man derimot ha modellert fotsengens underside etter typen sko den er tiltenkt og på den måten reduserdusere omfanget av sålen.

I dag ligger TOVs produksjonskapasitet på rundt 4 par vakuumformede-, og 12 par freste fotsenger til dagen, og da må det til en hver tid være to eller flere ansatte som kontinuerlig arbeider, kun med såleproduksjon. Kvaliteten på vakuumformede fotsenger varierer også alt etter hvem som har produsert dem, da det ikke finnes en standard-prosedyre for sålebyggingen som spesifiserer faktorer som mengde lim, tid i varmeskap og ventetid mellom hvert produksjonssteg. Ved investering i 3D-printingsteknologi vil produksjonen etter all sannsynlighet bli mer effektiv enn i dag, da et stort antall såler vil kunne printes samtidig. De resulterende fotsengene også vil kunne holde en stabilt høy kvalitet.

Kapittel 3

Additiv tilvirkning

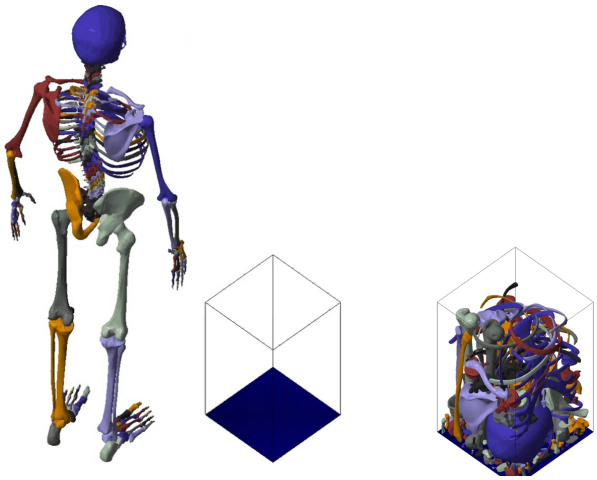
Dette kapittelet åpner med å gi en kort introduksjon av hva additiv tilvirkning er og teknologiens historie, 3.1, etterfulgt av en innføring i grunnleggende arbeidsflyt, 3.2. Videre blir kategoriseringer av grener innenfor teknologien forklart i seksjon 3.3, og de av dem som vil være relevante for en potensiell såleproduduksjon blir beskrevet ytterligere i underkapitler. Seksjonen som følger, seksjon 3.4, ser nærmere på printbare materialer, og her blir det også gjort en vurdering av hvilke materialer og printteknologier som vil kunne være egnet til en fremtidig såleproduksjon hos TOV. Kapittelet additiv tilvirkning blir avsluttet med en oversikt over de mest kjente 3D-printer-produsentene, samt bedrifter som tilbyr 3D-printingstjenester, 3.5.

3.1 Definisjon og historie

Additiv tilvirkning, forkortet AM fra additive manufacturing, eller 3D-printing som det også kalles, er en tilvirkningsmetode som skiller seg fra tradisjonelle metoder ved at produkter fremstilles ved å legge til heller enn å fjerne eller forme materiale slik det gjøres ved de fleste konvensjonelle tilvirkningsmetoder som eksempelvis, stansing, dreiing, fresing, støping og smiing. ISO [7] og ASTM International [8] har utviklet en felles internasjonal standard for denne nye produksjonsprosessen kalt ISO/ASTM52900. Den ble publisert for første gang i 2015 og inneholder definisjoner på generell terminologi, samt inndelinger av ulike teknologiske underkategorier. Standarden definerer produksjonsmetoden som:

> *"**additive manufacturing (AM),** n—process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies."* [9]

En av de andre egenskapene ved additiv tilvirkning er at man man heller ikke trenger å lage flere ulike former, eller andre spesialverktøy for å produsere geometrisk ulike deler og produkter, slik man må med de fleste formative produksjonsmetoder som smiing, støping, stansing, etc. For eksempel kan man i dag med hjelp av AM printe modeller av



(a) 180 cm høyt menneskeskjelett

(b) Skjelett stablet i printers printvolum

Figur 3.1: Menneskeskjelett printet i 30x30x50 mm^3 boks [12]

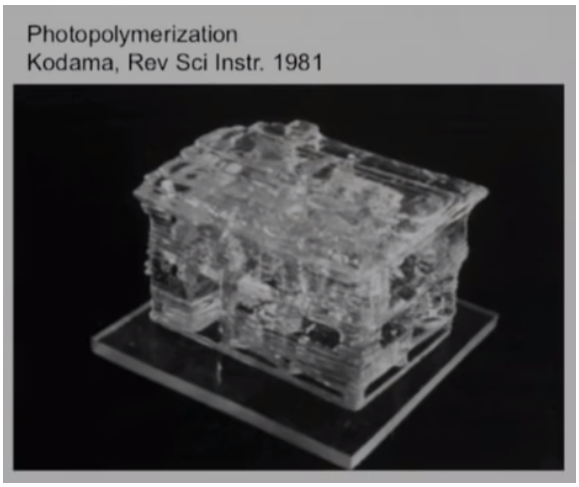
alle ben og knokler til et voksent menneske, samtidig i en enkelt printer, for så å sette dem sammen til en fullskala og anatomisk riktig skjelettmodell. Tradisjonelt har man derimot måttet lage egne støpeformer til hvert enkelt av de 206 bena [10], før man kunne begynne å støpe og bygge en god skjelettmodell [11]. Illustrasjonsbildene i figur 3.1 er hentet fra en videodemonstrasjon [12] av printforberedelsesprogrammet Netfabb sin automatiske stablingaalgoritme.

Det ble ikke funnet en norsk oversettelse av ISO/ASTM52900 da dette ble lett etter blant Standard Norges standarder [13], og mye tydet på at en oversettelse ikke eksisterte. Dette bekreftet senere seniorforsker Klas Boivie, leder for ISO og ASTM Internationals ekspertgruppe, JG51 ”Terminology”, per mailkorrespondanse [14]. Boivie er forøvrig også leder for både ISO, ASTM og SIS (Svenska institutet för standarder)[15], sine komiteer for additiv tilvirkning, henholdsvis ISO/TC261/WG1 ”Terminology”, ASTM F42.91 ”Terminology”og SIS/TK563 Additiv tillverkning, og han skulle derfor ha rimelig god oversikt over dette.

Også mindre offisielle norske terminologiordlister ble etterspurt hos både laboratoriet for additiv tilvirkning (3D print) - Adlabb ved NTNU Gjøvik [16], og Sintef’s avdeling for Additiv tilvirkning (3D-printing) [17], men ingen av disse hadde selv laget eller kjente til slike ordlister [][18]. Studenten har derfor selv oversatt enkelte aktuelle begreper i oppgaven, mens andre er blitt gjengitt på engelsk for å gjøre det lettere for lesere av oppgaven å bruke arbeidet videre.

Additiv tilvirkning er sammenlignet med andre tilvirkningsmetoder svært ung. Det har likevel gått nesten 40 år siden den første tredimensjonale modellen ble printet med en

lagvis laser-fotopolymeriseringsprosess oppfunnet Hideo Kodama i 1981 ved Nagoya Municipal Industrial Research Institute. Kodama fikk desverre aldri gjennom patentsøknaden sin og han regnes derfor ikke som oppfinneren av den første 3D-printeren [19].



Figur 3.2: Modell printet med Hideo Kodamas hurtig-prototyp-maskin [20]

Det var likevel også andre rundt om i verden som på tidlig 80-tall forsket på måter å bygge 3D-modeller av flytende UV-sensitivt polymer. Den første som fikk gjennomslag for sin patentsøknad, og som kalles ”oppfinneren”av 3D-printing, var Charles Hull. Han fikk ideen mens han jobbet ved et møbelfirma, og i 1984 sendte han inn patentsøknad på prototypen sin. Han kalte teknologien ”Stereolitografi”, og to år senere, da patenten ble godkjent, startet han opp selskapet 3D Systems som i dag er et av de ledende selskapene innen 3D-printing [19].

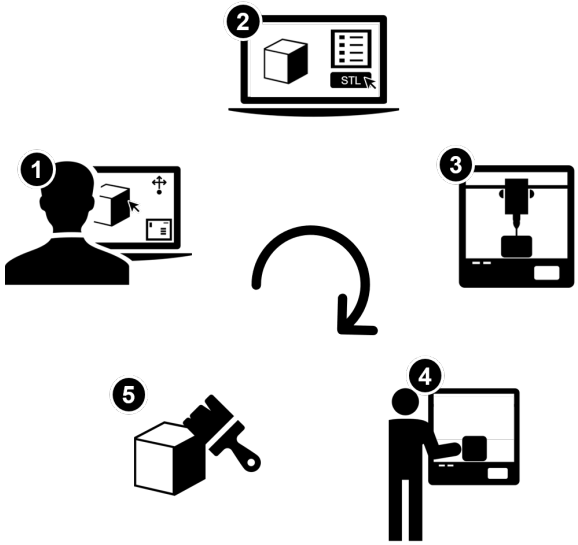
Videre, før 80-tallet var omme, rakk også to andre kjente printemetoder å bli utviklet. I dag er disse kjent som SLS og FDM. Den første pulverprinteren (SLS) kalt ”Betsy”, ble oppfunnet av studenten Carl Deckard ved University of Texas i 1988, og like etter, i 1989 ble patentsøknaden til den første ekstruderings-printeren (FDM) insendt av Scott Crump, medgrunnlegger av printerselskapet Stratasys”. Patenten til Deckards SLS-printer ble godkjent i 1989 og Crumps FDM-printer i 1992.

Utover 90-tallet og frem til i dag ble atter flere måter å additivt bygge tredimensjonale modeller lansert. Dette brakte med seg en rekke nye merkevarenavn og termer, og det sirkulerte stadig flere begreper som beskrev samme teknologi, gjenstand eller funksjon, noe som skapte forvirring og missforståelser. I 2015 gikk derfor ISO og ASTM sammen og utga en standard for terminologi og metoder innen additiv tilvirkning, ISO/ASTM 52900. I denne standarden kategoriseres alle dagens additive tilvirkningsmetoder inn i syv hovedkategorier hvorav SLA, SLS og FDM er tre av dem. Kapittel 3.3 åpner med en oversikt over disse teknologiene, og gir så en innføring i virkemåten til de metodene som potensielt

vil kunne være interessante når det kommer til produksjon av innleggssåler.

3.2 Arbeidsflyt ved 3D-printing

Det finnes som nevnt flere ulike teknologier innenfor additiv tilvirkning og hver av disse metodene baserer seg på ulike produksjonsprinsipper. Likevel er det fem hovedsteg en alltid går gjennom og som gjelder for alle teknologiene. Disse fem stegene vil nå bli kort presentert før kapittel 3.3 ser nærmere på de ulike teknologiene.



Figur 3.3: Fem hovedsteg innen 3D-printing [21]

1. Modellering og fillagring

Første steg mår man skal printe en tredimensjonal modell er at man må skaffe en digital 3D-fil som inneholder modellens geometri. Denne modellen kan man enten modellere fra bunnen av ved dataassistert konstruksjon (DAK), også kjent i fra engelsk som CAD, ”computer-aided design”, eller så kan man benytte seg av omvendt utvikling, eller ”reverse engineering”, hvor man bruker en 3D-scanner for å generere en digital, tredimensjonal rekonstruksjon av en fysisk gjenstand. Sistnevnte blir gjerne også benyttet i kombinasjon med DAK hvor man kan raffinere scanfilen og benytte denne som utgangspunkt for videre modellering.

Etter at man har en ferdig modell, må man lagre denne i et 3D-filformat. Det vanligste filformatet er STL (STereoLitografi), men det finnes også andre filformater som OBJ og 3DP. STL-filer består av en rekke trekanter som representerer overflaten av 3D-modellen

og STL blir derfor noen ganger referert til som Standard Triangle Language eller Standard Tessellation Language.

2. Forberedelse av printfil

Videre når man har en STL- eller annen 3D-fil må man gjøre en såkalt ”slicing” som er en horisontal lagdeling av filen. Dette gjøres for at en 3D-printer skal kunne vite hvordan den skal printe delen. Før delen ”slices”, har man i programmet valgt innstillinger for lagtykkelse og materialvalg, og eventuelt gjort endringer på fyllprosent eller orientering av delen. Den nye filen blir lagret i en g-code-fil. Denne delen av prosessen gjøres som regel i et eget printforberedelsesprogram, som også ofte er spesielt utviklet for en spesifikk printer. I det siste har også flere DAK-programmer fått integrert en egen printforberedelsesfunksjon slik at modeller både kan konstrueres, gjøres klar for print og sendes til en printer, i ett og samme program.

3. Printing

Den ferdige print-filen, eller g-code, lastes opp til printeren hvor eventuelle maskinspesifikke forberedelser gjøres, og delen printes.

4. Fjerning av print

Etter at delen er ferdig printet og nedkjølt fjernes den fra printeren. Hvordan dette gjøres og hvor mye arbeid som kreves varierer mellom de ulike teknologiene.

5. Etterbearbeiding

Hvorvidt den printede delen krever etterbearbeiding kommer an på hvilket material og printermetode som er brukt og hvilke visuelle og mekaniske krav en stiller til delen. Noen deler må etterherdes med UV-lys eller materialegenskaper kan endres med varmebehandling. Har man benyttet støttestrukturer må disse fjernes. Til slutt kan også ulike teknikker for overflatebehandling brukes, enten for å gi ønsket farge, glans, etc. eller for å skjule de karakteristiske ”trappetrinnene” som kommer som en følge den lagvise byggemetoden.

3.3 Additive teknologier

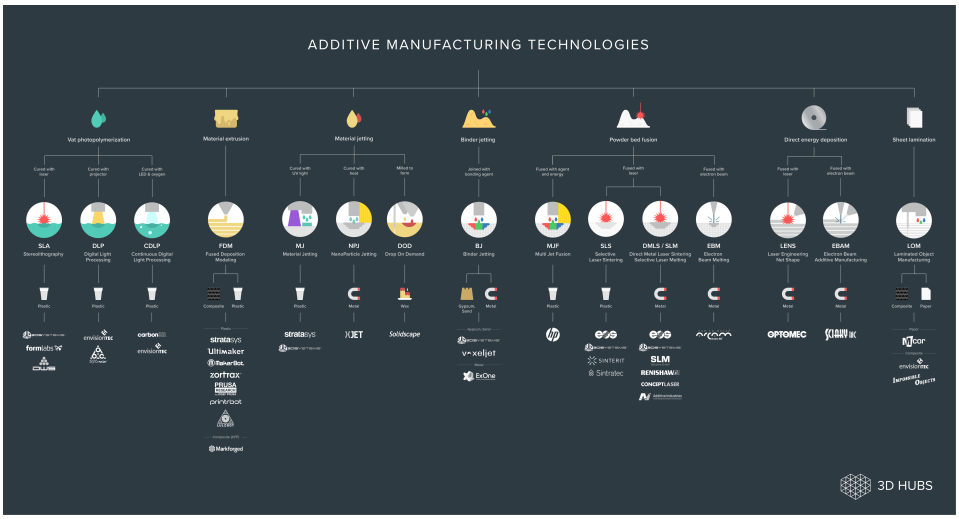
Av de ulike 3D-printerne som er blitt utviklet og finnes på markedet i dag, kan alle sammen i hovedsak plasseres inn under en av syv prosesskategorier definert av ISO/ASTM52900 [9]:

- **Ekstrudering** (Material Extrusion) - ofte referert til som **FDM** eller **FFF**
- **Fotopolymerisering** (Vat Photopolymerization) - referert til som **SLA**, **DLP** eller **CDLP**
- **Pulversintring** (Powder Bed Fusion) - ofte referert til som **SLS**

- **Material-dråpeavsetning** (Material Jetting) - ofte referert til som **MJ**
- **Bindemiddel-avsetning** (Binder Jetting) - ofte referert til som **BJ**
- **Direkte energiavsetning** (Direct Energy Deposition)
- **Laglaminering** (Sheet Lamination)

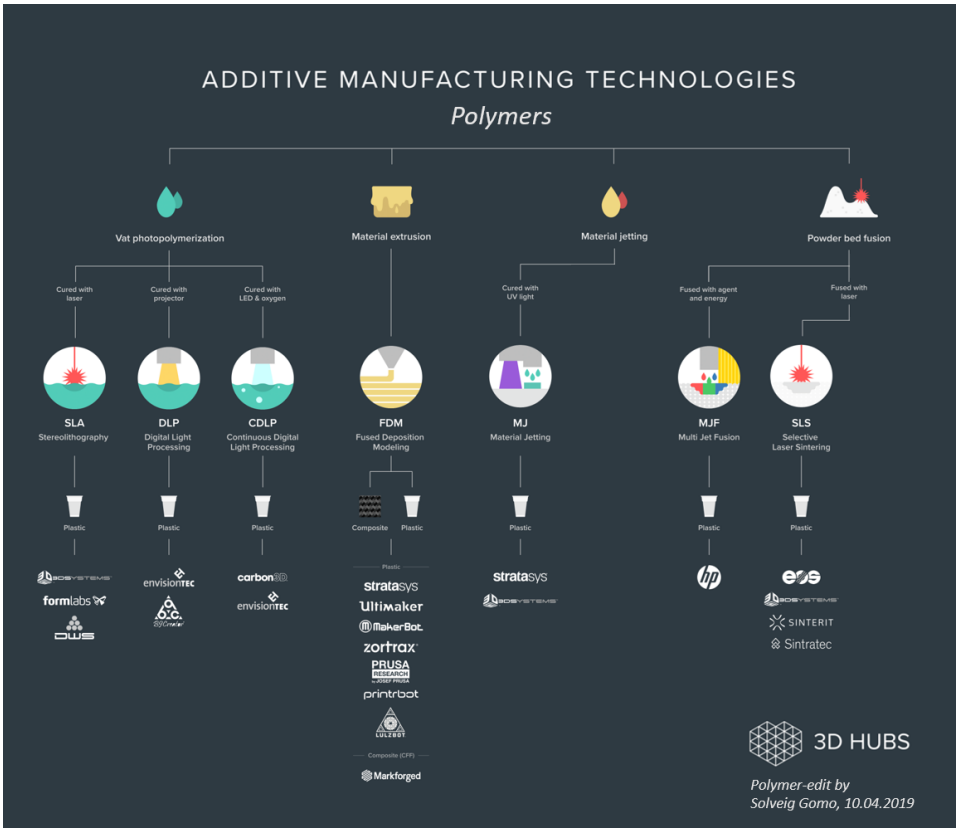
Ser vi kun på polymerprintede deler står ekstruderingsprintere på verdensbasis for nesten 80 % av delene bestilt fra printleverandører over nettet. Videre står SLA og material-jetting for til sammen 12 %, mens SLS og bindemiddel-jetting står for de resterende 8 %. Sammenligner man plast- og metalldeler printes det i antall 100 ganger så mange deler i plast som i metall, noe som kanskje ikke er rart når metallprinting typisk er 35 til 50 ganger dyrere en plastprinting [22].

Nettstedet og produksjonsselskapet 3D Hubs [23] har laget en god illustrasjon over dagens 3D-printing teknologier basert på disse syv ISO/ASTM-kategoriene, og illustrasjonen inkluderer både underkategorier, hvilke materialer de forskjellige teknologiene vanligvis bruker, samt lister over de mest kjente selskape som produserer hver av de ulike printertypene. Illustrasjonen er gjengitt i figur 3.4.



Figur 3.4: Oversikt over additive tilvirkningsmetoder [24]

Ettersom det hos TOV kun vil være polymere materialer som er av interesse er de teknologiene som kan produsere plast-deler samlet i en egen oversiktsfigur, figur 3.5. Disse fire print-teknologiene vil bli presentert i de neste delkapitlene. Første del om ekstrudeingsprinting er mer omfattende enn de tre andre teknologiene da denne metoden også er blitt brukt til konseptutprøving i oppgaven, referer kapittel 5.



Figur 3.5: Oversikt over additive tilvirkningsmetoder [25]

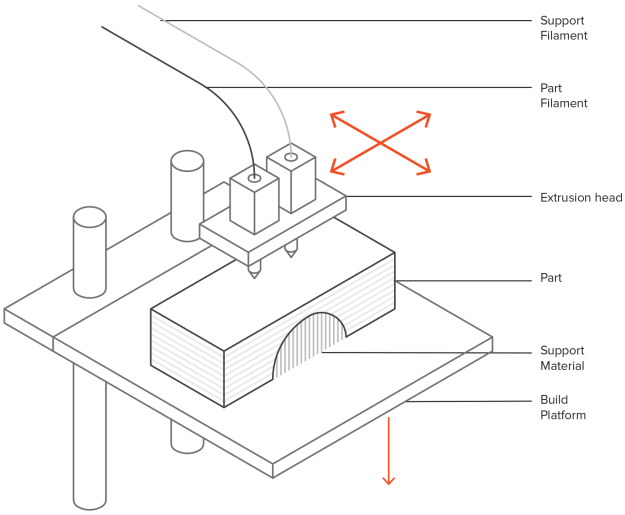
3.3.1 Ekstrudering - FDM

Virkemåte

”Material Extrusion”, eller bare ekstrudering, er kanskje den mest kjente av 3D-print metodene, og er derfor den som vil bli forklart først her. Metoden blir ofte referert til som FDM som står for ”Fused Deposit Modeling”. FDM er egentlig et varemerkebegrep som tilhører selskapet Stratasys, men det er likevel det desidert mest brukte navnet på ekstuderingsprinting. Alternativt kan forkortelsen FFF brukes, ”Fused Filament Fabrication”, men da dette ikke er særlig vanlig blir FDM brukt om ekstruderingsprinting i denne oppgaven.

”Material Extrusion” går som navnet tilsier, ut på at et materiale, som regel en termoplastisk polymertråd oppspunnet på en spole, gjerne kalt filamentet, varmes opp, og ekstruderes ut gjennom en dyse. Dysen befinner seg over en plate kalt ”byggeplaten” (build plate), og dysen og byggeplaten kan bevege seg relativt hverandre i tre retninger, X-Y-Z. Når noe skal printes varmes dysen opp og filamentet blir ekstrudert ned på byggeplaten i et bestemt mønster som vil utgjøre første lag i printet og er likt tverrsnittet til bunnen

av modellen. Når første lag er ferdig tegnet ekstruderes et nytt lag med filamet oppå det forrige og slik fortsetter prosessen lag for lag til hele 3D-modellen er ferdig printet. Det varierer fra printer til printer om det er bevegelse av dysen, platen, eller en kombinasjon av disse som skaper den relative X-Y-Z-bevegelsen. Et eksempel på en FDM-printer hvor dysen beves i X-Y-retning og platen i Z-retning er gitt i figur 3.6.

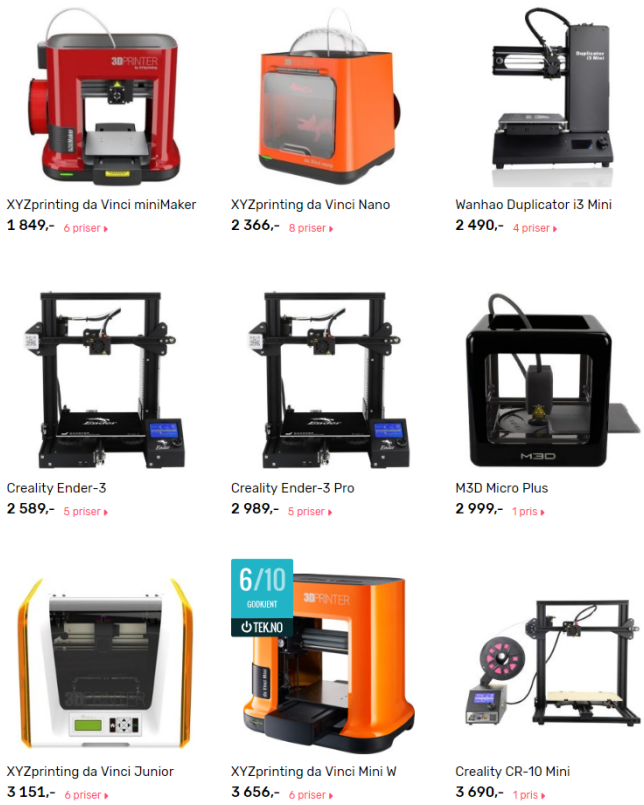


Figur 3.6: Eksempel på en typisk FDM-printer [26]

Pris og dimensjoner

Som nevnt i innledningen av kapittel 3.3 er FDM-printere den mest brukte printerteknologien når det kommer til plastprinting, og dette skyldes nok både både de overkommelige prisene og håndterlige maskinstørrelsene. I Norge kan man i dag kjøpe en printer som ikke tar større plass enn rundt 300x300x300 mm^3, og som kan printe deler på opp til 120x120x120 mm^3, til rundt 2 500 kr [27]. I figur 3.7 ser vi flere printere i samme klasse etter et søk på rimelige FDM-printere hos prisguiden.no gjort den 28.04.2019.

Prisen endrer seg heller ikke drastisk om man ønsker et noe større objektvolum, men det skal nevnes at de fleste store FDM-billig-printerne oftest leveres som enkeltdeler som man må bygge sammen selv. De er også åpne, det vil si at byggeplatformen ikke er innkapslet i et lukket miljø, og grunnet manglende kontroll over temper og luftfuktighet, vil dette kunne påvirke kvaliteten på printet.



Figur 3.7: Priseksempler i NOK på FDM-printere funnet på prisguiden.no [28]

Må man grunnet kvalitetskontroll ha en lukket printer, trenger man likevel ikke nødvendigvis å gå drastisk opp i pris, selv om dette så klart også finnes FDM-printere til både 350 000 kr og oppover. For 16 000 kr (ut i fra dollarkurs pr. 30.04.2019), eller 2 100 USD, kan man få kjøpt printeren da Vinci Super fra XYZprinting med et objektvolum på 300x300x300 mm^3, og som i følge selskapet er kompatibel med en rekke tredjeparts filament. Den har også sikkerhetsfunksjoner som automatisk pausing av print ved åpning av dør og strømbruddsgjenoppretting og kan regnes som en printer for det profesjonelle 3D-printer-markedet.

Er man ute etter FDM-printere som kan printe enda større objekter, kan man også få tak i printere med printvolum på over en kubikk, eksempelvis BigRep PRO, men dette vil ikke være av interesse for denne oppgaven og vil derfor ikke gåes nøyere inn på her.

Ut i fra dette kan man konkludere med at det ikke tenger å koste all verdens å investere i en FDM-printer, også om man trenger noe som kan printe støtte modeller enn 300x300x300 mm^3. Kvaliteten til deler i FDM vil likevel være kunne svært varierende om en ikke har tilstrekkelig kontroll over parametre som bland annet temperatur og luftfuktig-

Figur 3.8: da Vinci SUPER av selkapet XYZprinting. Objektvolum på 300x300x300 mm^3 [29]

het, og en bør derfor heller vurdere SLS, SLA eller MJ om en krever en høy presisjon.

Oppløsning og kvalitet

En annen faktor man må vurdere når man skal velge en 3D-printemetode er hvilke krav man stiller til de printede delenes oppløsning og kvalitet. Mange som har vært borti 3D-printing tidligere har et inntykk av at deler fremstilt med en FDM-printer ofte er grove og med småfeil og at andelen feilmeldinger og feilprint er stor. Dette er ikke uten grunn da feil ofte forekommer, særlig når det benyttes enkle skrivebordsprintere som gjerne flere personer med ulik printerkompetanse benytter seg av. Feilene skyldes som regel enkle ting som skitne eller delvis tette dyser, urene printerplater eller manglende kunnskap om egnede printer-innstillinger. Det er også lite som skal til for at en den fininnstilte kalibreringen av z-aksen blir endret, og varierende luftfuktighet vil påvirke filamentkvaliteten slik at temperaturinstillingene ikke lenger er riktige.

FDM-printere har jevnt over den groveste oppløsningen med lagtykkelser på mellom 50 og 400 mikron. En mikron er det samme som en mikrometer, μm, eller 0,001 m. Også i x-y-retning er oppløsningen til delen begrenset. Her kommer det av at printeren ekstruderer en materialtråd med samme diameter som printerens dyse. De fleste FDM-printerer har dyser med en diameter på 0,4 mm, men man får også tak i både større og mindre dyser, de minste ned i 0,15 mm. Sammenlignet med andre printermetoder som kan ha lagtykkelser og detaljer på ned til 16 mikron ([30], s. 149), gir FDM ganske grove print og kan derfor være uegnet om man skal printe små og detaljerte modeller. Er det kun overflatens visuelle kvaliteten som i gjør FDM uaktuelt, kan dette i flere tilfeller løses med etterarbeid som innebærer ulike kombinasjoner av sliping, epoxy-dypping, sandblåsing og lakkering.

Støttestruktur

Skal man printe en del med overheng vil man i mange tilfeller måtte legge inn en støttestruktur i designet, da man av naturlig årsaker ikke kan printe i løse luften. Strukturen printes vanligvis som en luftig gitterstruktur for å minimere materialbruk og gjøre det lettere å fjerne i etterkant. Å legge inn en slik struktur er noe printforberedelsesprogrammet, eller sliceren, ofte genererer automatisk. Stukturen printes enten i samme materiale som resten av modellen, eller, hvis man har en printer med to dyser, kan man printe strukturen i et vannløselig materiale som PVA eller HIPS. Fordelen med å bruke vannløselige støttestrukturer er at det gir en finere overflate på områdene i kontakt med støttestrukturen ettersom mekanisk fjerning av materiale ofte gir en noe ujevn og røff overflate. Det kan også være lettere å få vekk strukturen fra områder som er vanskelige å komme til som dype hull. Ulempen med å bruke en vannløselig støttestruktur er at det nesten alltid vil være et dyrere alternativ da både PVA og HIPS er dyrere en de fleste andre filament.

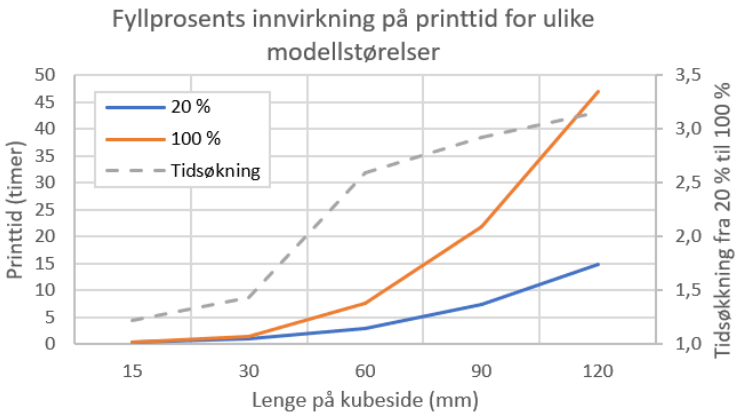
Man kan forsøke å unngå eller minimere buken av støttestruktur for å spare både materialet og etterarbeid ved å endre delens orientering før printing, for eksempel printe den opp ned, eller designe uten for store overheng. Som en tommelfingerregel er det nødvendig med støttestruktur når vinkelen mellom overhenget og horisontalplanet blir mindre enn 45 grader. Også når det skal dras brotråder, såkalt *bridging*, som for eksempel den horisontale linjen i en stående H, kan størrestrukturer være nødvendig. Da er tommelfingerregelen at bropartier på mindre enn 20 mm kan printes uten støtte. Dette er likevel svært avhengig av materialet det printes i, og også printerens innstillinger. Generelt er det vanskeligere å lykkes med ustøttede overheng og broer med myke materialer og materialer som printes ved høye temperaturer.

Indre fyll

I dag blir 3D-printing mye brukt til prototyping og rask fremstilling av visuelle konseptmodeller. I slike tilfeller er det som regel ikke nødvendig at delen er massiv da den ikke skal belastes mekanisk. Ved å i stedet fylle volumet inni skallet av modellen med en gitterstuktur vil man beholde delens geometri, samtidig som man sparer både tid og materiale. Disse fordelene vil til en viss grad gjelde alle printerteknologier, men for FDM vil det være særlig tidsbesparende. Skal man for eksempel bruke et slicer-program til å klargjøre en 60x60x60 mm^3 kube for printing, kan for eksempel programmet med standardinnstillinger og 100 % fylling estimere at det vil ta over 7 og en halv time å printe kuben. Velger man derimot i samme program en fyllprosent på 20 %, vil det ta under 3 timer å printe en skalamodell med samme overflate. I tilegg trenger man kun å bruke 25 m med filament kontra 90 m for den massive modellen. Verdiene til eksempelet ble funnet ved bruk av Slic3r PE versjon 1.41.2+win64. Dette var før programmet den 20. mai 2019, ble oppgradert og relansert under navnet PrusaSlicer 2.0 [31][32].

Hvor mye tid som spares ved å redusere den indre fyllprosenten vil variere fra modell til modell. Modeller med stort volum i forhold til ytre overflate vil ha en større fordel av redusert fyllprosent enn modeller med stor og kronglete overflate uten stort indre volum.

Generelt vil også tidsbesparelsene være større ved printing av større deler. Dette kan man lese ut i fra grafen i figur 3.9 som viser hvor lang tid det vil ta å printe kuber med sidelengder fra 15 til 120 mm med både 20 %, blå linje, og 100 %, oransje linje, fyll. Den grå stiplelinjen indikerer hvor mye lengre tid det vil ta å printe en massiv kube, versus den samme kuben med 20 % fyll.

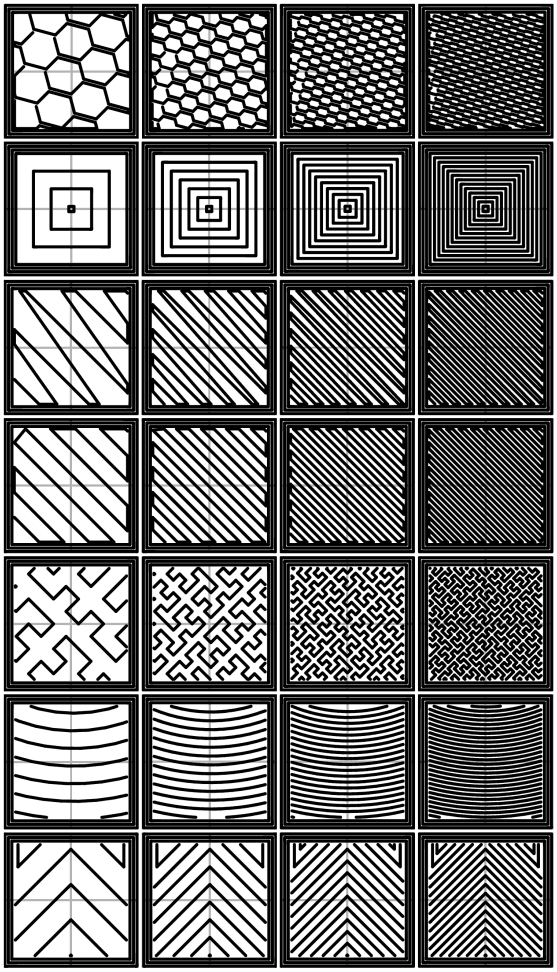


Figur 3.9: Graf som illustrerer hvordan printtid av en kube påvirkes av kubens størrelse og fyllprosent. [33]

Den vanligste måten å fylle det indre volumet av en del som ikke printes massiv er med et rutenett som printes oppå seg selv lag for lag med en 90 graders rotasjon av rutenettet om høydeaksen mellom lagene. Man kan i de fleste slicer-programmer også velge andre mønstre som for eksempel sikksakk-linjer, trekanter, stjerner eller sekskanter. Hensikten kan for eksempel være å øke delens styrke eller redusere printtid, vibrasjon og lyd ved printing. Disse mønstrene vil likevel gjentas likt for alle lagene og kan derfor kalles 2D-fyllstrukturer. Noen programmer, slik som PrusaSlicer, har også mulighet for å velge en tredimensjonal fyllstruktur, altså et fyllmønster som endres gradvis for hvert lag slik at linjene ikke stables oppå hverandre og dermed gir et mykere resultat også i høyderetningen. Noen av 3D-fyllstrukturene tilgjengelig i PrusaSlicer er 3D Honeycomb, cubic, og gyroid, figur 3.11 og disse er også brukt til konseptutprøving i kapittel 5.3. Eksempler på 2D-fyllstrukturer fra PrusaSlicer, er vist i figur 3.10.

Materialer

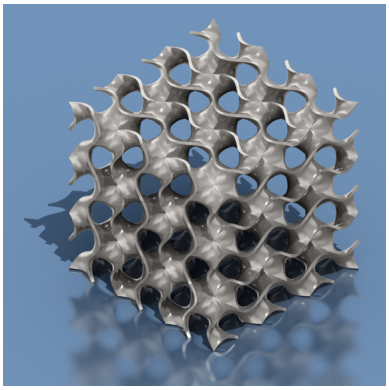
Mekaniske egenskaper, altså ”de egenskapene hos et materiale som angir dets reaksjon på ytre mekaniske krefter”[36], vil for alle produserte deler, avhenge, ikke bare av råmaterialets materialegenskaper, men også av hvilken formgivende produksjonsmetode som er benyttet. Slik er det også for 3D-printing, og en kvantitativ sammenligning av ulike materialer vil derfor ha en stor grad av usikkerhet, eller være svært omfattende fordi man må teste og oppgi de ønskede verdiene for ulike polymere flere ganger, hvor man benytter ulike prin-



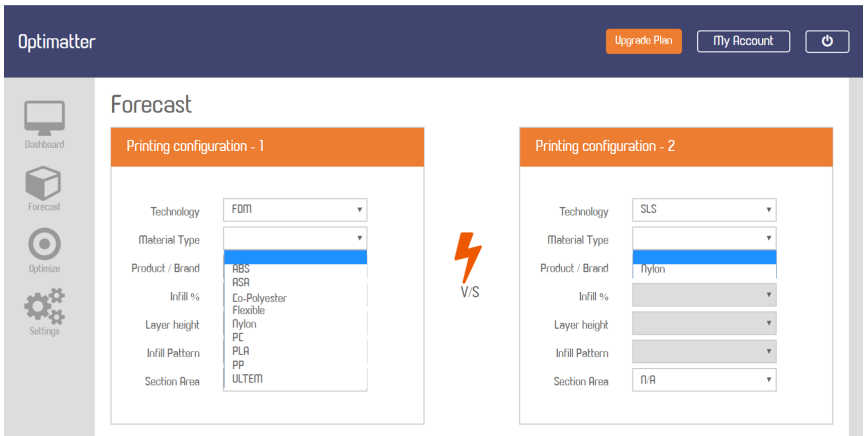
Figur 3.10: Fyllmønstre med ulik tetthet. Fra venstre til høyre: 20% ,40% ,60% og 80%. Fra top til bunn: Honeycomb, Concentric, Line, Rectilinear, Hilbert Curve, Archimedean Chords og Octagram Spiral [34]

terteknologier og også printerparametre som for eksempel printtemperatur og -hastighet.

Et slikt testarbeid har blitt påbegynt av selskapet 3D Matter [37] som driver med forskning på 3D-printede materialer. De har, basert på data fra en rekke materialtester, utviklet et program kalt OptiMatter [38] som kan forutsi materialegenskaper av 3D-printede deler. Ønsker en å sammeligne materialer printet med FDM kan dette være et nyttig verktøy, men materialutvalget er foreløbig begrenset når det kommer til SLS og SLA. Andre printteknologier er foreløbig ikke tilgjengelig per mai 2019. Et utklipp fra programmet er gitt i figur 3.12.



Figur 3.11: Gyroid struktur[35]

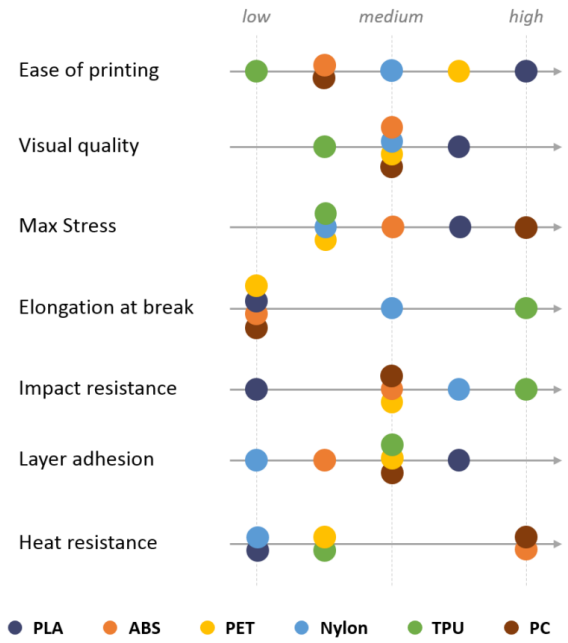


Figur 3.12: Skjermutklipp fra programmet OptiMatter som viser materialvalgene tilgjengelig for FDM og SLS [39]

Testselskapet 3D Matter har også gjennomført en studie og publisert en artikkel, som sammenligner polymerene PLA, ABS, PET, Nylon, TPU og PC [40]. Blant annet rangerer artikkelen kvalitenene printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for de ulike materialene. Figur 3.13 fra artikkelen er gjengitt i figur 3.13. Artikkelen presenterer også hvert av materialene i egne radardiagram hvor de samme kvalitetene blir vurdert. Her er tre og tre av disse diagrammene slått sammen i figur 3.14 og 3.15.

3.3.2 Fotopolymerisering - SLA, DLP, CDLP

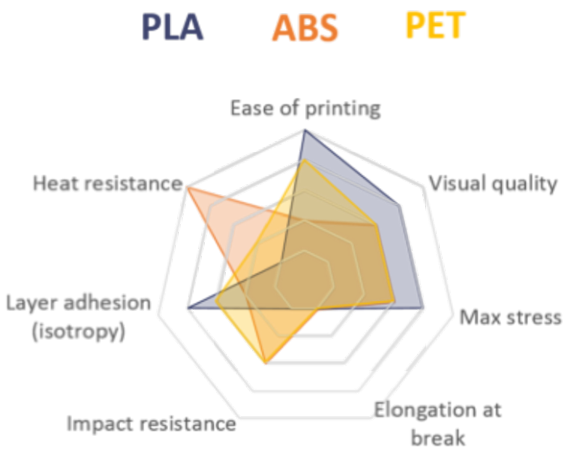
Det finnes ulike typer fotopolymeriseringsprintere, men felles for dem alle er at de består av en tank eller et bad med en flytende lyssensitiv polymer, gjerne kalt resin, som herdes



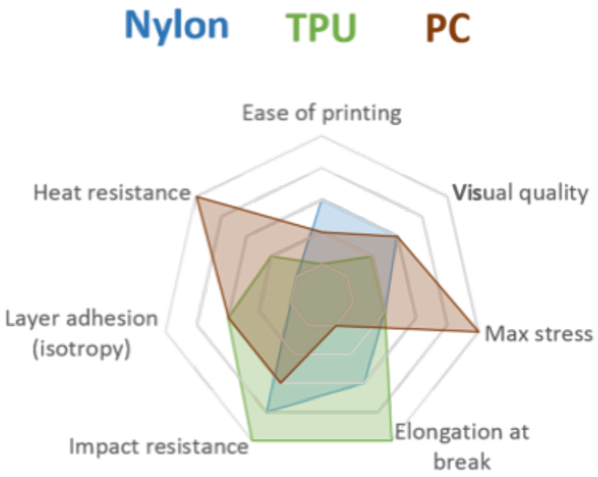
Figur 3.13: Gradering av printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene PLA, ABS, PET, Nylon, TPU og PC [41]

ved å bli utsatt for lys med en bestemt bølgelengde. Lyskilden er enten plassert over eller under karet med resin og man skiller derfor mellom ”ovenfra-ned-” og ”nedenfra-opp-printere”. Etter at delen er ferdig printet må den løsnes fra byggeplaten og støttemateriale fjernes. Noen resiner krever at man etterherder delen i et uv-kammer for å oppnå ønskede materialegenskaper. Et eksempel på hvordan materialegenskapene kan endre seg ved etterherding er gitt i figur 3.16. Man kan også om ønskelig både pusse og overflatebehandle delen med ulike typer oljer, maling og lakk for å oppnå et resultat som med en sprøytestøpt del. Dette er likevel sjeldent nødvendig da fotopolymerisering gir en naturlig glatt og jevn overflate.

En ”ovenfra-ned-printer” vil starte med å la byggeplaten ligger øverst i karet, rett under overflaten på resinen, slik at det første herdede laget fester seg til platen. Platen vil så bevege seg et lite hakk ned og ny resin flyter eller skyves over det som allerede er herdet, før et nytt lag herdes oppå det forrige. Slik fortsetter det til delen er ferdig printet og befinner seg helt nedsunket i karet. Prinsippet er det samme når lyskilden befinner seg under karet, bare at da blir delen trukket ut av resin-badet, istedenfor å senkes ned, og mellom hvert inkrementelle lag må delen rives løs fra bunnen av karet. Figur 3.17 nedenfor illustrerer de to variantene.



Figur 3.14: Radardiagram som vekter printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene PLA, ABS og PET [42]



Figur 3.15: Radardiagram som vekter printbarhet, visuell kvalitet, maksimal spenning, bruddforlengelse, bruddseighet, lagbinding og varmebestandinghet for polymerene Nylon, TPU og PC [43]

Fordelen med en ”nedenfra-opp-printer” er at den krever lite resin ettersom hele delens fulle høyde ikke trenger å få plass nedsunket i karet. Dette medfører også at printeren kan være forholdsvis liten, noe som gjør de billigste fotopolymeriseringsprinterne ofte er ”nedenfra-opp-printere”. Ulempen er på den andre siden at, i tillegg til at et bunnvindu i

Material Properties Data

	METRIC[1]	
	Green[2]	Post-Cured[3]
Tensile Properties		
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa
Elongation at Failure	12 %	6.2 %
Flexural Properties		
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa
Impact Properties		
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m
Temperature Properties		
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C

[1] Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

[2] Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, washed and air dried without post cure.

[3] Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, and post-cured with 1.25 mW/cm^2 of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

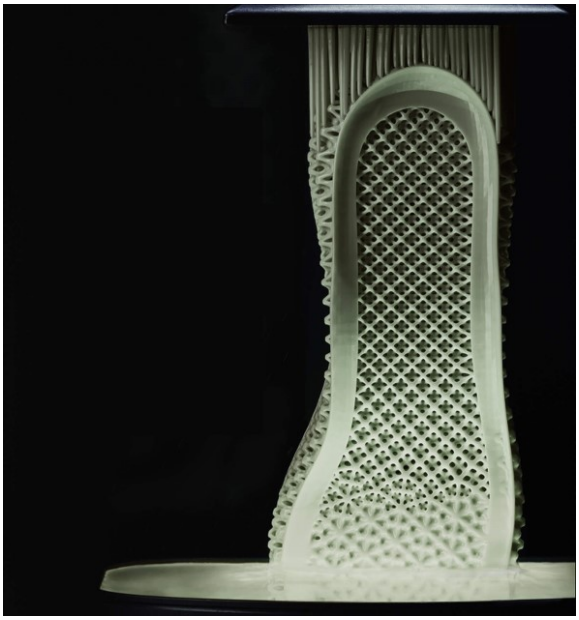
Figur 3.16: Tabell med materialegenskaper for Formlabs Standard Resin [44], før og etter ekstra etterherding.

(a) Ovenfra og ned **(b)** Nedenfra og opp

Figur 3.17: To retninger av fotopolymeriseringsprinting [45]

karet jevnlig må byttes, kan også delen ødelegges eller få kvalitetsfeil under printing når den rives løs fra vinduet. For å redusere denne faren er det viktig å minimere tverrsnittsarealet til delen slik at kreftene involvert i løsrivingen også minimeres. Dette gjøres ofte ved man skråstiller delen. Dette medfører likevel også en økt bruk av støttestruktur, noe som både øker resinforbruket og forlenger printtiden. Et eksempel på en Adidas skosåle som printes med fotopolymerisering er gitt i figur 3.18.

Med ”ovenfra-ned-printere” slipper man denne løsrivingsproblematikken og man regner dem for å være mer pålitelige enn ”nedenfra-opp-printere”. Ulempen er på den andre



Figur 3.18: Sålen til en Adidas-sko printet med printerselakapet Carbons CDLP-printer [46]

siden at printerne ofte er større og dyrere, fordi man som nevnt trenger et stort kar for å printe hele delen. Man må også være svært nøye med kvaliteten og viskositeten til resinen for at den skal fordele seg jevnt over forrige herdede lag ikke gi ujevnheter i printresultatet.

Foruten forskjellen på ovenfra-ned- og nedenfra-opp-printere, deles fotopolymeriseringspritere også opp i tre andre typer forkortet SLA, DLP og CDLP. Det som skiller disse tre variantene resin-printere er lyskilden som får fotopolymeren til å herde. Ved SLA, StereoLitografi, er det en punktlaser som linjevis belyser flaten som skal herdes, mens det ved DLP, Direct Light Processing, er en digital prosjektør som herder hele flater av gangen. Dette gjør at en DLP typisk kan printe raskere enn med SLA.

3.3.3 Pulversintring - SLS, MJF

Mens SLA foregår i et bad av flytende polymer, foregår SLS-prosessen i pulver. For SLS-maskiner som printer i plast er dette et termoplastisk pulver, noe som vil si at det er smeltbart og kan binde seg til omkringliggende partikler ved oppvarming. Også her dekker materialet en byggeplattform, men her blir tørre pulver-partikler smeltet sammen ved hjelp av energien fra en laserstråle. Den lagvise oppbygningen av delen skjer ved at et tynt lag med pulver blir fordelt over byggeplattformen der laserstrålen – som beveger seg i X-Y-planet ”tegner opp” det første laget i modellen. Pulveret som blir truffet av laseren smelter og stivner igjen, og danner dermed et fast plastlag. Byggeplattformen senkes ned ett inkre-

ment i Z-retningen, og et nytt lag pulver strykes over modellen før sintring av neste lag begynner. Typiske lagtykkelser ligger mellom 0,06 og 0,15 mm.

Siden delen som bygges hele tiden befinner seg i et bad av pulver, er det ikke behov for en egen støttestruktur for å støtte opp under overheng, broer og lignende strukturer, da disse blir hold oppe av pulveret under. En annen fordel med SLS-printing er at delene blir relativt homogene, og kan lages i konstruksjonsplaster som blant annet nylon 12. Dette gjør at man kan lage deler med god mekanisk styrke, som i mange tilfeller til og med kan erstatte sprøytestøpte plastdeler i småserieproduksjon.

Ulemper med SLS-produserte deler er at man får en litt ru og sandaktig overflate fordi modellene er bygget med pulver. For enkelte produkter kan det dermed kreves pussing eller annen overflatebehandling dersom glatte overflater er et krav. SLS-maskiner er også fremdeles ganske kostbare, og har derfor ikke enda fått innpass i hjemme- eller kontormarkedet. Det kan likevel være et interessant alternativ for TOV, siden prosessen åpner for intrikate gitterstrukturer og sålefasonger.

3.3.4 Material-jetting - MJ

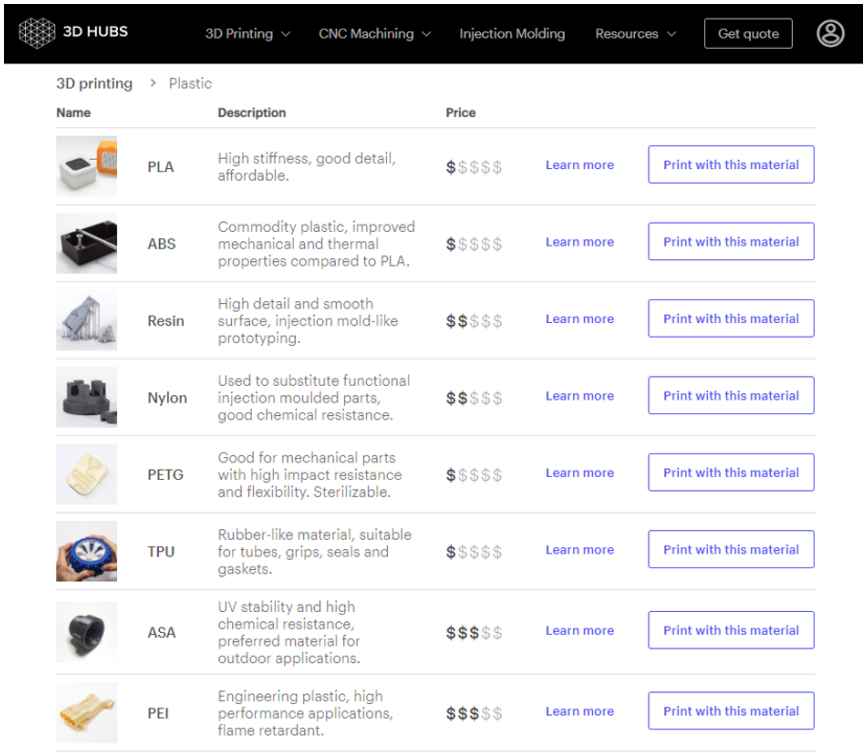
Material jetting prosessen kan best sammenlignes med funksjonen i en vanlig blekkskriver. Her benyttes et printerhode med en tett matrise av ørsmå hull til å avsette små dråper av blekk på papiret. På samme måte avsetter skriverhodet i en MJ printer ørsmå dråper av en polymer, som straks etter avsetning blir herdet av et UV-lys som passerer over byggeflaten. Den lagvise oppbygningen foregår her, som i de andre prosessene vi har sett på, med en trinnvis økning av avstanden mellom en byggeplattform og dysen. Men siden skriverhodet, altså et lang stang med jett-dyser, strekker seg over byggevolumets fulle bredde, kan hvert lag avsettes relativt hurtig.

En fordel med MJ prosessen er at oppløsningen er svært høy, og lagtykkelsen kan bli svært liten, typisk 0.016 til 0.028 mm. Dermed kan man få svært detaljerte deler med glatt overflate. Metoden åpner også for printing i ulike farger og materialer samtidig, og den er derfor svært godt egnet for å fremstille prototyper av plastdeler som senere skal produseres ved 2-komponent sprøytestøping. Som for SLA og FDM er bygging av støttemateriale for overheng nødvendig.

3.4 Polymere printmaterialer

3D-printteknologi, både teknikker, printere og materialer, er i stadig utvikling. Når en skal finne informasjon om materialer til bruk i 3D-printing vil det derfor kunne være hensiktsmessig å gå til oppdaterte nettsider heller enn vitenskapelige artikler, ettersom publikasjoner og artikler aldri vil kunne følge utviklingen like raskt som det skjer. 3D Hubs [23] er en bedrift og nettside som kontinuerlig gir oppdatert informasjon og formiddler tjenester for over 7 000 mindre printtilbydere slik at kunder over hele verden kan laste opp 3D-filer

de ønsker å printe og så få printet det hos sin lokale tilbyder. Selskapet har over 50 ansatte [47][48][49][50], som kontinuerlig jobber med å holde nettsiden og tjenestetilbudene deres oppdatert under videreutvikling. Nettsiden har også en velutviklet kunnskapsdatabase skrevet av tilvirnikngseksperter [51], og siden er dermed en av de mer oppdaterte og pålitelige kildene til informasjon. En liste over plastmaterialene 3D Hubs tilbyr innen 3D-printing er gjengitt i figur 3.19. Listen består av materialene **PLA** (polymelkesyre [52] eller "PolyLactic Acid"[53]), **ABS** (akrylnitril-butadien-styren [54]), ulike **resiner**, **nylon**, **PETG** (polyethyle-terephthalat-glykol [55]), **TPU** (termoplastisk polyuretan [56]), **ASA** (akrylnitril-styren-akrylat) og **PEI** ("Polyetherimide"[57]). Ser vi videre på de ulike resin-materialene finner vi blant annet materialer som skal etterligne både ABS, **PP** (polypropylen [58]) og **gummi** [59].



Figur 3.19: Alle plasttyper tilgjengelig for 3D-printing fra 3D Hubs [60]

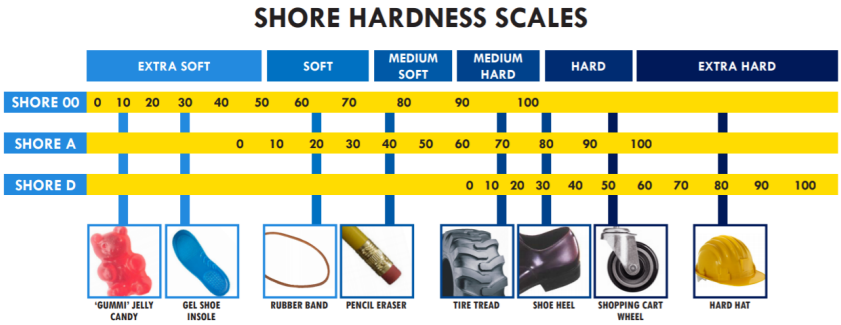
Selv om 3D Hubs sitt utvalg av materialer og 3D-printere er imponerende, har også nettsidene til noen av de største printerselskapene i bransjen blitt oppsøkt for å eventuelt finne flere materialer som kan brukes til 3D-printing. Etter materialsøk på nettsidene til HP [61], EOS [62], Stratasys [63], Carbon [64] og 3D Systems [65] viser det seg at det også er mulig å få printet modeller i materialene PC (polykarbonat), PS (polystyren), PEEK (polyeter-eter-keton), PEBA (polyeter-blokk-amid), Epoxy og Silikon. Carbon har i tillegg

en elastomerisk polyuretan, forkortet EPU, som skal tilsvare kommersiell TPU med shore A hardhet på 70[66]. Listen nedefor gir en oppsummering av kjente konstruksjonsplaster som kan brukes til 3D-printing:

- PLA
- ABS
- Nylon
- PETG
- TPU/EPU
- ASA
- PEI
- PP
- PC
- PS
- PEEK
- PEBA
- Epoxy
- Silikon

3.4.1 Potensielle materialer og teknologier for såleprinting

Det er vanskelig å si hvilke spesifikke mekaniske egenskaper et materiale som skal brukes til å printe en innleggssåle bør ha etterson designet og tettheten til gittestrukturen vil være svært avgjørende for endelig demping og stivhet i sålen. Likevel kan vi fra egne testerfaringer, kapittel **??**, og kunnskap om materialer i fra skoindustrien, kapittel **??**, gå ut i fra at materialet må være forholdsvis mykt og ha en shore A hardet i området 70 til 100. I tillegg bør materialet være biokompitelt etter standeren drøftet i kapittel 3.4.2. Om en ikke er kjent med shore-hardheter kan figur 3.20 gi en ide om hva de ulike verdiene tilsvarer.



Figur 3.20: Shore-hardhetsdiagram [67]

Av polymerene listet i materialkapittelet ovenfor er det kun TPU/EPU og silikon som regnes for å være myke materialer, og som dermed vil være aktuelle å vurdere. Flere aktører i skoindustrien benytter i dag TPU i sine joggesko, og vi kan anta at dette vil fungere også til innleggsåler. Materialise har for eksempel sammen med Adidas prototypet skosåler med SLS i sitt TPU 92A materiale [68] med en SLS-printer [69]. For mer om Adidases utvikling av 3D-printede sko, se kapittel **??**.

Silikon er et av de siste materialene som har sluttet seg til rekken av printbare polymerer, og det er mindre enn tre år siden WACKER Chemie på K 2016 [70], den høyest rangerte messen for polymer og plast [71], som første selskap i verden lanserte en kommersiell 3D-printer som kunne printe i silikon [72]. Printeren, ACEO® Imagine Series K,

er basert på ”drop-on-demand” metoden og regnes dermed som en MJ-printer. I en artikkel publisert av Beamler Additive maufacturing [73] blir materialet blant annet sagt å ha ”impressive elastomer properties, with a high variation of hardness being suitable for applications where a low compression set or high flexibility are required.” [74] Dette hørtes i utgangspunktet svært lovende ut, men etter å ha etterspurt og mottatt tekniske datablad fra ACEO [75] på de ulike silikonene tilhørende printeren, kom det frem at utvalget i hardheter foreløbig var begrenset til shore 20, 30 og 60 A, noe som antageligvis vil være for mykt, om man ser for seg å lage såler med en nogenlunde luftig gitterstruktur. Det kunne naturligvis vurderes om man ønsket en mer kompakt såle, men mulighetene for å samtidig ha både myke og stive soner blir da begrenset. Sålen vil også bli vesentlig tyngre en dagens såler da tettheten til silikonene ligger på 1,05 - 1,15 g/cm3 [76], mot materialene TOV benytter seg av i dag som ligger mellom 0,1 og 0,4 g/cm3.

Et av de mer kjente fotopolymeriserings-printerselskapene Carbon [64] tilbyr også et silikonlignende materiale kalt SIL 30 [77]. Dette er en silikon-uretan, noe som kan høres ut som et aktuelt sålemateriale, men som navnet indikerer har det en hardhet på mellom 30 og 35 shore A, og vil da heller ikke være aktuelt for en gittersåle. Det kan dermed se ut til at silikon før øyeblikket likevel ikke er et egnet materiale til printing av innleggssåler. Støpt silikon kan på den andre siden ha hardheter på opp til 70 Shore D [78], se figur 3.20, og ettesom materialet er såpass nytt på 3D-print-markedet, skal en ikke se vekk i fra at det i nær fremtid vil lanseres nye silikontyper som kan egne seg for en 3D-printet innleggssåle.

Etter at silikon inntill videre ser ut til å være utelukket fra aktuelle sålematerialer sitter vi igjen med TPU og tilsvarende egenutviklede materialer fra printermaterial-selskaper. Vi vet at TPU/EPU kan printes med både FDM, SLS og SLA/DLP/CDLP, referer kapittel 5 og **??**, og da gjenstår det å undersøke om material-dråpeavsettning, MJ, kan printe i egnede materialer. I kapittel 3.5 kan vi se at det hovedsakelig er to selskaper, Stratasys [79] og 3D Systems [80], som produserer MJ-printere. Når en går inn på deres materialsider og ser på materialer kompatible med deres MJ-printere, [63], [65], kan en se at alle deres MJ-materialer har hardheter mellom 26 og 35 shore A. Det kan dermed se ut til at MJ-ikke er en egnet teknologi å satse på om en skal printe gitterbaserte innleggssåler.

3.4.2 Biokompatibilitet

Ettersom ortopediske innleggssåler kan sees på som ”medisinsk utstyr” kan det være nødvendig for TOV å gjøre en risikovurdering av nye 3D-printede såler. De må isåfall se til ISO 10993-1, en standard for evaluering og testing i en risikoanalyseprosess for materialer brukt i medisinsk utstyr som har direkte pasientkontakt. Her finner man i Annex A i[81] en tabell som indikerer hvilke tester en bør gjøre basert på produktkategori. Tabellen, gjengitt i figur 3.21, sier at om innleggssålene kun skal kunne bukes på hud og i perioder på under 24 timer om gangen, holder det å vurdere ”Cytotoxicity”, hvorvidt materialet er giftig for celler [82], ”Sensitization” [83], mulige allergiske reaksjoner, og ”Irritation or intracutaneous reactivity”, hudirritasjon[84]. Det samme gjelder også, som en kan se av tabellen, for hud med sår, ”Breached or compromised surface”. Fotnoten nederst i tabellen sier også at man ikke trenger å utføre alle testene om det allerede foreligger tilstrekkelige

testdata på materialet. Leverandører av de ulike aktuelle materialene skal kunne opplyse om slike data finnes for sine materialer.

Testing and Evaluation Strategies for the Biological Evaluation of Medical Devices submitted for CE Mark and FDA Approval

Table 1: ISO 10993-1 Biocompatibility Testing Selection Criteria

Medical device categorization by			Biological Effect [a]							
Nature of body contact		Contact duration								
Category	Contact	A - limited (≤ 24 h) B - prolonged (> 24 h to 30 d) C - permanent (> 30 d)	Cytotoxicity	Sensitization	Irritation or Intracutaneous reactivity	Systemic toxicity (acute)	Subchronic toxicity (subacute toxicity)	Genotoxicity	Implantation	Haemocompatibility
Surface device	Skin	A	X	X	X					
		B	X	X	X					
		C	X	X	X					
	Mucosal membrane	A	X	X	X					
		B	X	X	X					
		C	X	X	X		X	X		
	Breached or compromised surface	A	X	X	X					
		B	X	X	X					
		C	X	X	X		X	X		
External communicating device	Blood path, indirect	A	X	X	X	X				X
		B	X	X	X	X				X
		C	X	X		X	X	X		X
	Tissue/bone/ dentin	A	X	X	X					
		B	X	X	X	X	X	X	X	
		C	X	X	X	X	X	X	X	
	Circulating blood	A	X	X	X	X				X
		B	X	X	X	X	X	X	X	
		C	X	X	X	X	X	X	X	
Implant device	Tissue/bone	A	X	X	X					
		B	X	X	X	X	X	X	X	
		C	X	X	X	X	X	X	X	
	Blood	A	X	X	X	X	X		X	X
		B	X	X	X	X	X	X	X	X
		C	X	X	X	X	X	X	X	X

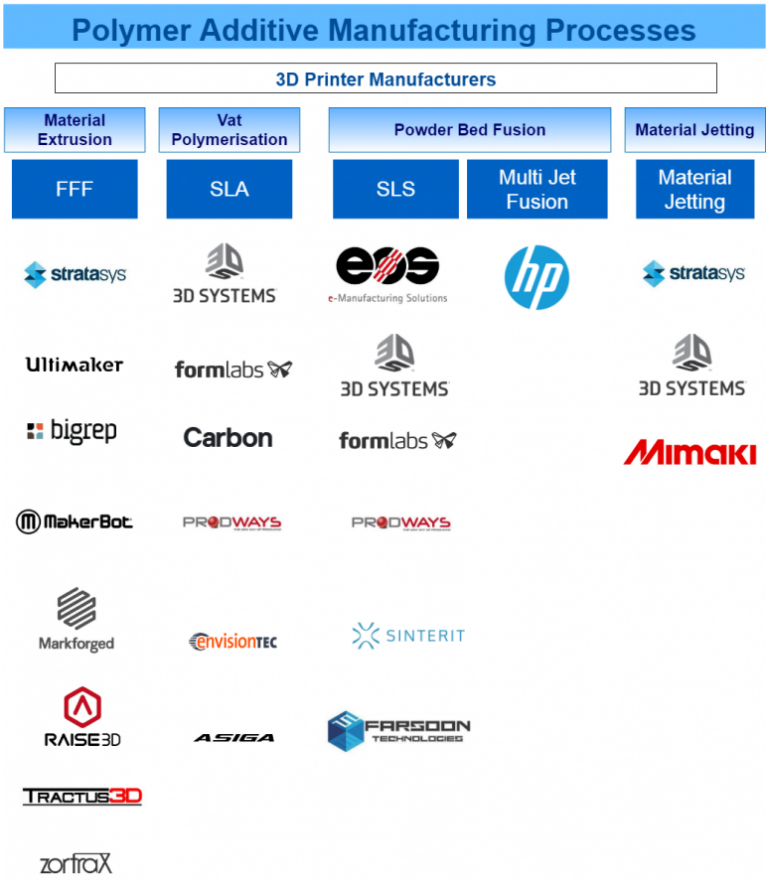
Note:
a The "X" indicates data endpoint that can be necessary for a biological safety evaluation, based on a risk analysis. Where existing data are adequate, additional testing is not required.

Figur 3.21: Tabell med kriterier for biokompatibilitetstester i fra ISO 10993-1[85]. Områdene aktuelle for TOVs såler er markert med gult.

3.5 Printerselskaper og printleverandører

Etter å ha fått en innføring i hvordan de ulike type printerne fungerer, kan det også være greit å få en rask oversikt over hvilke selskaper som produserer de ulike variantene, og eventuelt også hvordan man kan få printet deler uten å selv investere i en printer.

Det er ofte lett å blande selskaper som selv utvikler og selger printere, og selskaper som kjøper inn et stort antall printere for å printe på vegne av bedrifter og privatpersoner, omtrent som en produksjonbedrift. For å skille kan de kalles henholdsvis printerselskaper og printleverandører. Nedenfor er noen av de største printerselskapene innen polymerprinting listet sortert etter teknologi. Listen tar utgangspunkt i 3D Hubs figur over printteknologier [24] og artikkelen ”3D Printing with Polymers: All You Need to Know” publisert januar 2019 [86]. I tillegg har noen av selskapene i ettertid utvidet sitt utvalg av printerteknologier, og disse teknologiene er også tatt med i listen. Videre følger en tilsvarende oversikt over printleverandører sortert etter teknologi, før de samme selskapene presenteres i en ny liste sortert etter lokasjon. For en mer visuell oversikt over teknologier og printerselskaper gjengir figur 3.22 en figur fra artikkelen ”3D Printing with Polymers: All You Need to Know”, men vær oppmerksom på at den ikke mangler enkelte aktuelle selskaper. Konferer derfor også med punktlisten over printerselskaper for en mer fulstendig oversikt.



Figur 3.22: Oversikt over de fire polymer-printteknologiene og et utvalg aktuelle printerprodusenter [87]

Printerselskaper

- **FDM:** Ultimaker[88], Makerbot[89], Stratasys[79], Prusa[90], Zortrax[91], Markforged[92]
- **SLA/DLP/CDLP:** Carbon[93], Formlabs[94], 3Dsystems[80], Stratasys[79], Prodways[95], EnvisionTec[96], Asiga[97]
- **SLS:** EOS[98], HP[99], 3D Systems[80], Sinterit[100], Sintratec[101], Stratasys[79], Prodways[95], Farsoon[102], Formlabs[94]
- **MJ:** Stratasys[79], 3D Systems[80]

Printleverandør

- **FDM:** Norsk 3D Service, Materialise
- **SLA/DLP/CDLP:** Norsk 3D Service, Prototal, Materialise, Protolabs, Arrk, Shapeways, Sculpteo
- **SLS:** Norsk 3D Service, Prototal, Materialise, Protolabs, Arrk, Shapeways, Sculpteo
- **MJ:** Norsk 3D Service, Materialise, Protolabs, Arrk, Shapeways, Sculpteo

Printleverandører - Sortert etter lokasjon

- **Norge:** Prototal (Levanger), Norsk 3D Service (Oslo)
- **Europa:** Materialise (Belgia), Protolabs (England og Tyskland), Arrk (Sverige, England, Nederland, Tyskland), Shapeways (Nederland), Sculpteo (Frankrike)
- **USA:** Protolabs (MN, NC), Shapeways (NY), Sculpteo (CA)

Kapittel 4

Forskning, utvikling og skoindustri

For å finne ut hva som allerede eksisterer av konsepter som knytter sammen additiv 3D-teknologi og fottøy, er det gjennom arbeidet med oppgaven blitt gjort utallige søk på alt i fra 3D-printede joggesko til nyutvikling av ortopediske innleggssåler. Dette ga flere interessante resultater, og de to følgende delkapitlene vil ta for seg noen av de mest interessante funnene. Kapittel 4.1 gir et innblikk i hva som i dag utvikles og produseres innen skoindustrien, mens kapittel 4.2 presenterer ulike selskaper og forskningsprosjekter som jobber med å utvikle en metode for å 3D-printe innleggssåler spesielt rettet mot diabetikere.

4.1 3D-printede sko

Man skal ikke søke lenge på internett før man oppdager at skoindustrien allerede er i full sving med å utforske potensialet til den stadig mer avanserte 3D-print-teknologien. En rekke kjente skomerker som Nike[103], Adidas[104], New Balance[105], Reebok[106], Ecco[107], Under Armour[108], Brooks[109] og Peak Sport[110], har alle pågående prosjekter hvor additiv tilvirkning blir brukt i deler av produksjonsmetoden. Noen av selskapene som Nike, har i første omgang valgt å fokuse på idrettssko til kjente utøvere og lag, men stadig flere selskaper, slik som Adidas og Peak Sport, begynner å rette blikket mot den store forbrukermassen.

Adidas startet å eksperimentere med 3D-printede innleggssåler allerede høsten 2015 [111]. De hadde da inngått et samarbeid med Materialise [112] og brukte deres SLS-printere til å printe midtsåler, altså den støtdempende delen av en skosåle, i TPU. I 2017 inngikk de et nytt samarbeid med printerselskapet Carbon [93], og med Carbons varemerkede DLP-printer, Digital Light Synthesis™ (DLS™), produserte de de første Adidas Futurecraft 4D[113] som er vist i figur 4.1. Skoprodusenten har etter dette fortsatt å lansere stadig nye modeller som alle produseres med Carbons printere. Den siste er ALPHAEDGE 4D som kommer i tre farger. Den ble lansert i mai i år[114], og er tilgjengelig for salg i norske nettbutikker til 3 199 kr.[115].

Figur 4.1: Adidas Futurecraft 4D - DLP-printet midtsåle i TPU [116][117]

Peak Sport er et kinesisk sportsmerke grunnlagt i 1989 som produserer og selger både idrettsklær, sko og tilbehør [118]. De lanserte i mai 2017 Kinas første 3D-printede joggesko, Peak Future i figur 4.2, og som da kostet rundt 188 $ [110]. Skoens såle ble printet i TPU med SLS-printere som selskapet hadde invester i allerede i 2013 [119]. Etter dette har selskapet fortsatt å lansere både SLS-printede basketballsko, august 2017 [120], og volleyballsko, april 2018[121].

Figur 4.2: Peak Future - SLS-printet midtsåle i TPU [122][123]

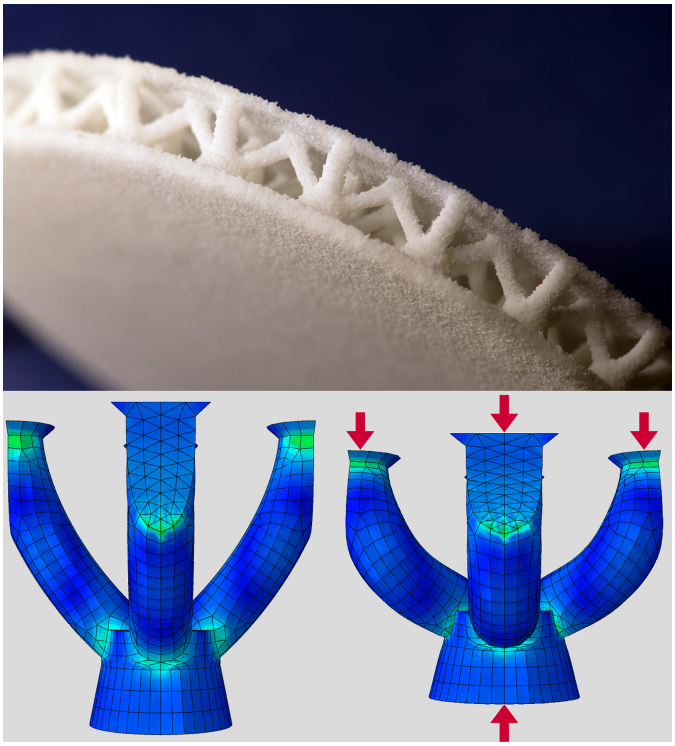
4.2 3D-printede innleggssåler

3D-printing av personlige tilpassede innleggssåler ser ut til å bli stadig mer populært, og flere nyoppstartede selskaper som Wiivv [124] og PODFO [125], tilbyr nå å selge deg såler spesielt utformet til din fot og dine behov, basert på en 3D-scan av foten. Dette skal gjelde enten du trenger såler som gir enklere ortopediske korreksjoner, eller om du er idrettsentusiast og ønsker å få mest mulig ut av treningen ved å optimalisere idrettsutstyret ditt. I samtaler med ortopedisk verksted ble det likevel tidlig klart at slike selskaper på langt nær kan tilby et produkt som vil være tilstrekkelig for de fleste av TOVs pasienter. Kandidaten har likevel funnet enkelte selskap og prosjekter som ser ut til å være mer avanserte enn flertallet. Disse er listet i punktlisten nedenfor sammen med nøkkelinformasjon om hvilket printmateriale og hvilken printteknologi som brukes.

- **Fraunhofer**-Gesellschaft med forskningsprosjektet **LAuF** - TPU med SLS-printer
- **Cadscan** med sålen **Imprints** - TPU med FDM-printer
- **Footworx Clinic** med sålen **SoleMimic** - Ulike materialer med FDM og SLS
- **ScientiFeet**, en Prodways Group produkt-division - TPU og nylon med SLS-printer
- **Phits** med **Phits Insoles** - Nylon med SLS-printer

Prosjektet **LAuF**[126] var et offentlig finansiert samarbeidsprosjekt mellom en rekke parter både fra industrien og akademi for å utvikle en teknikk for å 3D-printe innleggssåler til pasienter med diabetes. Prosjektet startet i 2015 og ble offisielt avsluttet sommeren 2018. Prosjektet jobbet med utvikling av både algoritmer for sålens stivet, Fraunhofer IWM, og nye SLS-materialer, Fraunhofer Umsicht, Covestro, Lehmann Voss. Konklusjonen fra denne delen av prosjektet var at de var i stand til å etterligne ulike typer skumhardheter, kun ved å justere to TPU-baserte grunnstrukturer[127]. Sluttrapporten er vedlagt i appendiks A.5. Selskapet Phoenix Innovations jobbet også med programvare som, basert på resultatene fra de andre forskningsaktørene, skulle generere såler spesielt tilpasset brukerens behov. Dette ble også i følge kontaktpersonen ved Phoenix Industries, Volker Jr., gjennomført, om enn noe etter prosjektets offisielle slutt. På tross av de lovende resultatene ble aldri programvaren ferdig utviklet, men kun en demonstrasjons-versjon, dette grunnet manglende økonomiske midler [128].

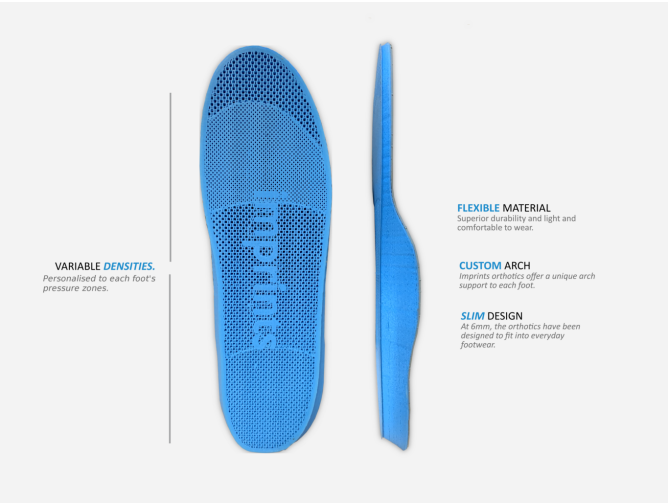
Det britiske selskapet **Cadscan**[130] ble grunnlagt i 2011 for å utvikle rimelige, brukervennlige 3D-scannere av høy kvalitet. I mars 2016 annonserte de på sine nettsider oppstarten av et nytt prosjekt som skulle forsøke å utvikle et rimelig system for å raskt å kunne produsere spesialtilpassede innleggssåler på behov [131]. August året etter kom de med en oppdatering på hvordan prosjektet gikk. De hadde da utviklet et system kalt **Imprints** som bestod av ”Imprints 3D fot-scanner”, ”Imprints proprietære programvare” og ”Imprints 3D-printer”. Scanneren fanger opp både trykksoner og profilen av fotsålen som i programvaren automatisk genererer en profil til innleggssålen. Innleggsålen printes så i TPU med en printer som ut i fra bildene ser ut til å måtte være en FDM-printer [132]. Det kan likevel virke som som det endelige sålen ikke er vesentlig mer avansert enn det en privatperson selv kan få til ved å benytte Gensole, et gratis nettbasert innleggssåle-program



Figur 4.3: Bilde av SLS-printet TPU-såle og 3D-strukturer fra prosjektet LAuF ved Fraunhofer Institutt [129]

som også kandidaten brukte til konseptutprøvinger, se seksjon 5.1. Allmennlege og direktør ved Howbeck Healthcare Limited, Dr. Neil Paul[133], kommenterte i sin blogg i november 2018, etter å ha fått en 15 minutters presentasjon av konseptet at prosjektet virket lovende, men at han ikke helt klarte å se hvor selskapet stod i prosessen mellom utvikling og ferdig produkt [134].

En fotklinikk i England kalt **Footworx Clinic** har også et pågående prosjekt hvor målet er å redusere diabetiske fotsår ved å utnytte det siste innen 3D-scanning og printteknologi [136]. Nettsiden deres beskriver utfyllende om problemer relatert til diabetiske fotsår og hva som er viktig å passe på når en produserer innleggssåler til diabetikkere, men de oppgir ingen informasjon om hvordan en planlagt såle kalt **SoleMimics** er tiltenkt å produseres. Kandidaten kontaktet derfor klinikken og fikk etter en stund et hyggelig men lite konkret svar på hvilke teknologier de så for deg å bruke. Etter videre korrespondanse kom det frem at prosjektet var i en tidlig fase og at de ikke enda hadde bestemt hvilken printteknologi de ønsket å bruke. Både FDM og SLS var under vurdering. De varierte også mellom å bruke både myke og stivere materialer. Kandidaten mottok noen bilder fra prosjektet. De fleste



Figur 4.4: Imprints av Cadscan - FDM-printet innleggssåle i TPU [135]

bildene var av FDM-printede såler, mens ett, det av de hvite og svarte sålene i kollagen 4.5 nedefor, så ut til å kunne være SLS-printet. [137]

ScientiFeet er et fransk selskap opptettet i 2016 som driver med design og produksjon av spesialtilpassede, 3D-printede innleggssåler [139]. Det er 3D-printer og mateialselskapet Prodways [95] som er hovedaksjonær og står bak materialene og printteknologien innleggssålene baseres på. ScientiFeets konsept inkluderer både fotscan, printing og leveranse av ferdig printede såler, figur 4.6. Programvaren som brukes for å designe sålene er nettbasert og skal være tilgjengelig for ortopeder fra ulike lokasjoner. Programmet blir også jevnlig oppdatert og nye funksjoner legges til. Figur 4.7 viser programmet i bruk og den følgende listen inkluderer flere av nøkkelfunksjonene det tilbyr [140]:

- Et utvalg sålemaler i tre bredder fra str. 25 til 55.
- Såletykkelser mellom 1,5 og 2,5 mm
- 7 stivhetsgrader for 14 parametriserte soner
- Mulighet for justerbart undertillegg
- Såleorientering for korreksjon a varus av valgus
- Justerbar støtte av fotbue

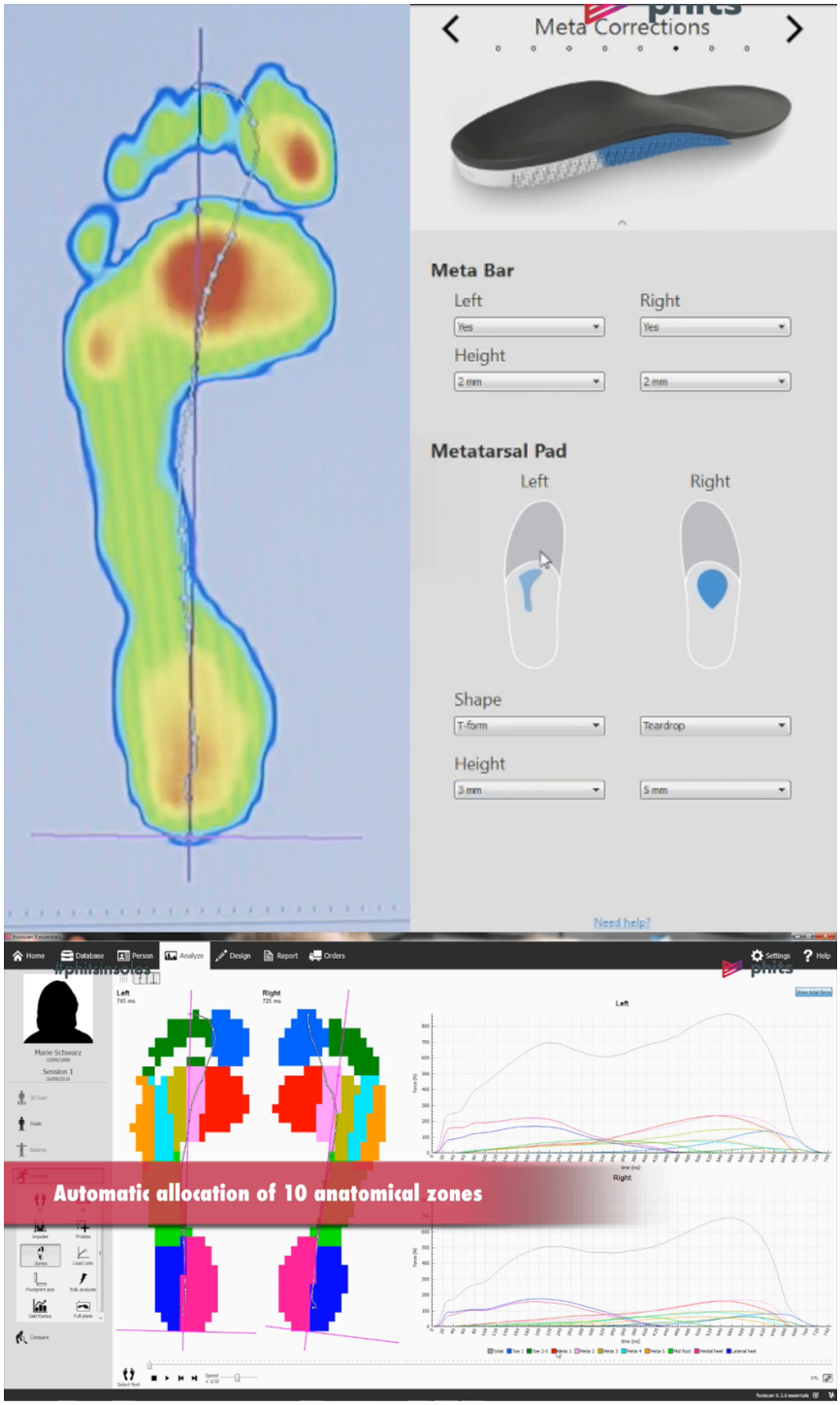
Til sist må også det Belgiske selskapet **Phits** [143] med sine SLS-printede nylonsåler nevnes **Phits Insoles**. De har gjennom årene samarbeidet med både Adidas [144] og Materialise [112] og utviklet både avansert scan-teknologi, design-programvare og printteknologi. Selskapet baserer seg i dag på å selge sine scannere, trykk-sensorer, og programmer til fotklinikker og skoforhandlere over hele verden som så bruker dette for å designe spesialtilpassede innleggssåler til sine kunder. I Trondheim har Fotspesialisten Klinikk Elin [145] inngått et samarbeid med Phits og tilbyr timer hvor kunder kan komme og få scannet sine føtter og ganglag før såler designes av klinikken og printes av Materialise på vegne av Phits. TOV har tidligere sett på Phits' systemer, men konkluderte da

Figur 4.5: Bilder fra utviklingsprosessen til Footworx Clinik. De tre øverste av FDM-printede såler, det nederste trolig av SLS-printede såler. [138]

Figur 4.6: ScientiFeet konseptet [141]

med at det kun var enda et kommersielt selskap rettet mot privatpersoner som er villige til å betale for avansert teknologi. Da kandidaten var inne på Phits' nettsider kunne det likevel se ut til at således designprogramvaren deres footscan® hadde blitt videreutviklet og at den nå var betydelig mer sofistikert enn forrige gang TOV hadde sjekket. Utklipp fra en demonstrasjonsvideo er gjengitt i figur 4.8.

Figur 4.7: Glimt av ScientiFeets såledesignprogram i Prodways' demonstrasjonsvideo av deres TPU-sintermateriale. [142]



Figur 4.8: Utklipp fra Phits' designprogram footscan® [146]

Kapittel 5

Programvare- og konseptutprøving

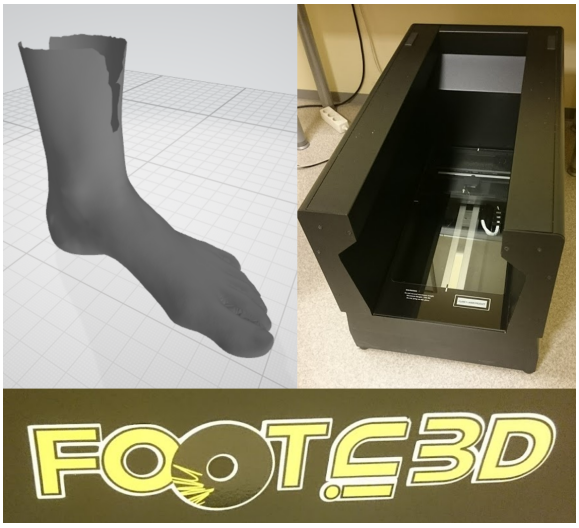
Parallelt med besøkene hos TOV, litteraturstudiet om additiv tilvirkning, søkingen etter nytt fra skoindustrien og pågående diabetesrelaterte forsknings- og utviklingsprosjekter for 3D-printing av innleggssåler, har kandidaten også selv testet ulike måter å modellere og printe innleggssåler på. Dette omfattet design av en egen eksempelsåle, kapittel 5.1, utprøving av ulike 3D-modelleringsprogrammers (DAK) gitterstruktur-funksjoner, kapittel 5.2, og FDM-printing av både eksempelsålen og andre teststrukturer i ulike materialer, kapittel 5.3.

5.1 Utvikling av eksempelsåle

Som nevnt i kapittel 4.2 finnes det et et nettbasert verktøy kalt Gensole [147] som lar privatpersoner designe og printe innleggssåler basert på 3D-scan av sin egen fot. Dette programmet ble brukt av studenten for å lage en modell av en innleggssåle som videre kunne brukes både til å eksperimentere med gitterstrukturfunksjoner i ulike DAK-programmer, og å utforske potensialet til FDM-printere og ulike materialer innen såleproduksjon.

Studenten startet med å besøke TOV for å få scannet føttene slik at studentens egen fot kunne brukes som mal når eksempelsålen skulle designes, se figur 5.1. Da 3D-modellen av foten ble lastet opp til Gensole ville programmet først ikke virke. Kandidaten kontaktet personen som hadde utviklet nettsiden, Steve Wood, som etter å ha sett på scann-filen kunne forklare at filen ikke var fullstendig sammenhengende, den var ikke ”manifold”, og at den også var for detaljert. Filen ble lappet og antallet triangler redusert fra 86 000 til 10 000 triangler. Da virket såleprogrammet.

Neste steg var å bestemme mål til undersiden av innleggssålen slik at sålen ville få plass og kunne testes i et par sko. Kandidaten valgte et av sine egne skopar, et par Converse, ettersom disse skoene har en tilnærmet flat indre skosåle. Etter å ha tatt indre mål av skoen og digitalt tegnet opp en sålesilhuett, printet studenten ut silhuetten på vanlig printerpapir,

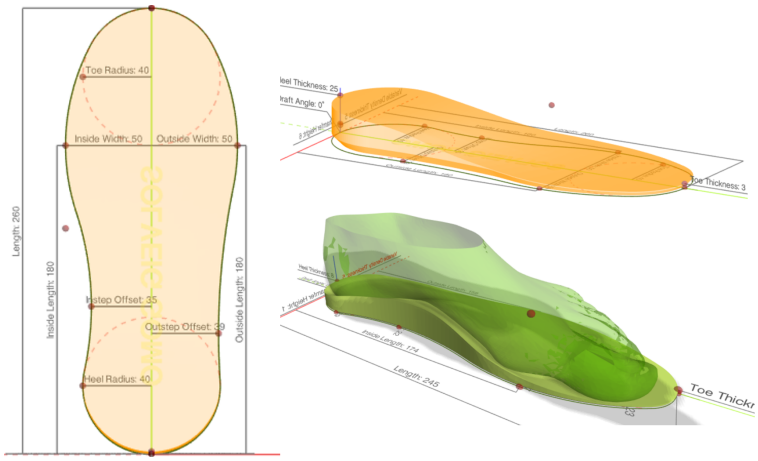


Figur 5.1: 3D-scan av studentens fot gjort tatt av TOVs scanner FOOTin3D

klippet den og prøve den i skoen. Justeringer ble så gjort på den digitale filen før en ny iterasjon ble printet ut. Slik fortsatte studenten å iterere seg frem til en mal som ville passe i skoene. Figur 5.2 viser testskoen og den endelige sålemalen.

Figur 5.2: Testsko og endelig sålemal

Da både såleomrisset og 3D-modellen av foten var klare kunne en innleggssåle designes i programmet Gensole. Parametre for heltykkelse, tåtykkelse og undersidens karmingshøyde ble satt til henholdsvis 25, 3 og 6 mm. Utskråningsvinkel for sålens øvre del ble satt til 0 grader og støtte til fotbuen ble justert etter fotens naturlige bue. Mål av sålens omriss vises i figur 5.3 sammen med bilder fra designprosessen. Sålen var nå ferdig designet og en AMF-fil av sålen ble lastet ned for senere bruk.



Figur 5.3: Bilder fra såledesign i programmet Gensole.

5.2 DAK og gitterstruktur

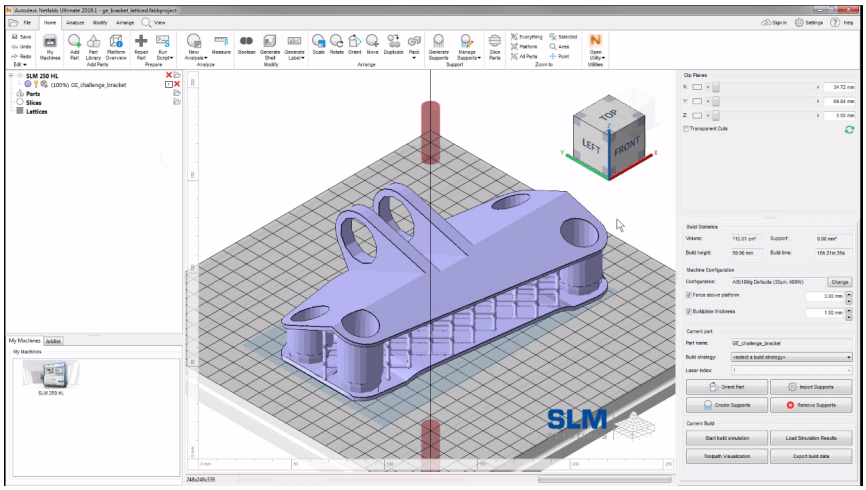
Lattice og gitterstruktur

For å kunne 3D-printe en innleggssåle, må man først lage en digital modell av sålen ved hjelp av 3D-modellerrongsprogram (DAK). Eksempler på slike programmer er Siemens NX, AutoCAD, Inventor, Solid Works, PTC Creo og Rhino. Rhino er for eksempel programmet som TOV i dag bruker til å modellere sine freste innleggssåler. Når man 3D-printer produkter åpner den fleksible produksjonsmetoden for at man kan utnytte DAK-programmet ytterligere ved å ikke bare designe sålens ytre geometri, men også ved å legge inn en fjærende gitterstrukturer eller ”lattice” som det kalles i de fleste DAK- og printforberedelesprogrammer. Gitterstrukturen vil kunne gi ulik demping alt etter hvilken type struktur eller ”lattice” en velger og hvor tett den er. Dette betyr at en kan lage såler som er myke og dempende i enkelte områder, mens de samtidig kan være stivere for å gi støtte i andre. En annen fordel man kan utnytte ved å 3D-printe fremfor å frese innleggssåler er at man i DAK-programmet da også kan designe undersiden av sålen til å passe ulike typer sko. Ved fresing vil undersiden alltid være flat og måtte tilslipes manuelt etterpå.

For å få et forhold til resultatene en kunne oppnå med å printe ulike typer gitterstrukturer, begynte kandidaten å lete etter DAK-programmer som hadde integrerte ”lattice”-funkjsoner for å generere gitterstrukturer. I teorien er det også mulig å lage ulike strukturer ”manuelt” i DAK med å tegne inn og repetere staver eller andre geometriske enheter til de fyller en hel eksempelsåle, men i praksis fungerer dette dårlig da så mange kryssende og repeterende enheter får de fleste datamaskiner til å gå i stå. Det vil i tillegg også være vanskelig å gjøre prosessen repeterebar slik at en har en viss kontroll over den resulterende

standarden på sålene, og uansett vil det også være svært tidkrevende.

Å finne et DAK-program med innebygd funksjon for å mer automatisk kunne generere ”lattice”-strukturer viste seg derimot å være vanskeligere enn først antatt. Resultater etter søk på internett antydet at det skulle finnes flere programmer som hadde slike funksjoner, men det viste seg etterhvert at de fleste av disse programmene ikke var DAK-programmer, men printforberedelsesprogrammer, slik som Netfabb [12] som utklippet i figur 5.4 er hentet fra. Å bruke er slikt program for å designe gitterstrukturen til en ortopedisk såle vil være problematisk av flere årsaker. Den største ulempen er at man etter å ha utformet sålens ytre form i et vanlig DAK-program, har låst seg til denne geometrien, og at man da har begrensede muligheter til å etterpå endre på denne i printforberedelsesprogrammet, for eksempel for å øke tykkelsen i et bestemt område. En annen ulempe er at de fleste slike programmer er laget for spesifikke printere, og om TOV skulle ønske å bruke en ekstern aktør for å gjøre selve printingen av sålene, vil bedriften trolig ikke kunne akseptere filer som er generert i et annet printerforberedelsesprogram.

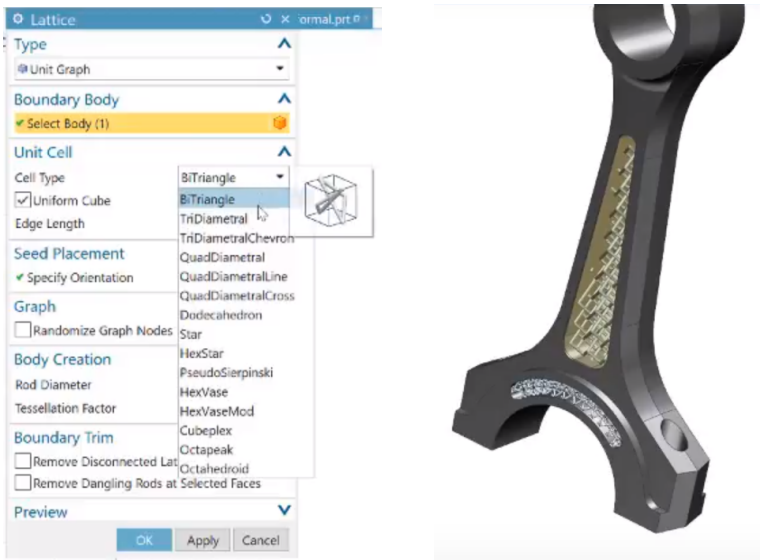


Figur 5.4: Utklipp fra printforberedelsesprogrammet Netfabb [148]

NX og andre testede programmer

I arbeidet med oppgaven ble flere DAK-programmer som tilsynelatende hadde innebygde lattice-programmer undersøkt og programmene PTC Creo, Autodesk Inventor og SIEMENS NX ble installert og testet. Av disse tre viste det seg at det kun var NX som faktisk hadde en avansert lattice-funksjon integrer i programmet, mens man ved de to andre måtte eksportere 3D-modellen man jobbet med til en ekstern modul, som i praksis fungerte som et printforberedelsesprogram.

NXes lattice-funskjon ble lansert for første gang med NX 11.0.2 i januar 2017 [149]



(a) NX Lattice meny **(b)** Veivstang med lattice-struktur

Figur 5.5: DEmonstrasjon av lattice-funksjon i NX [151]

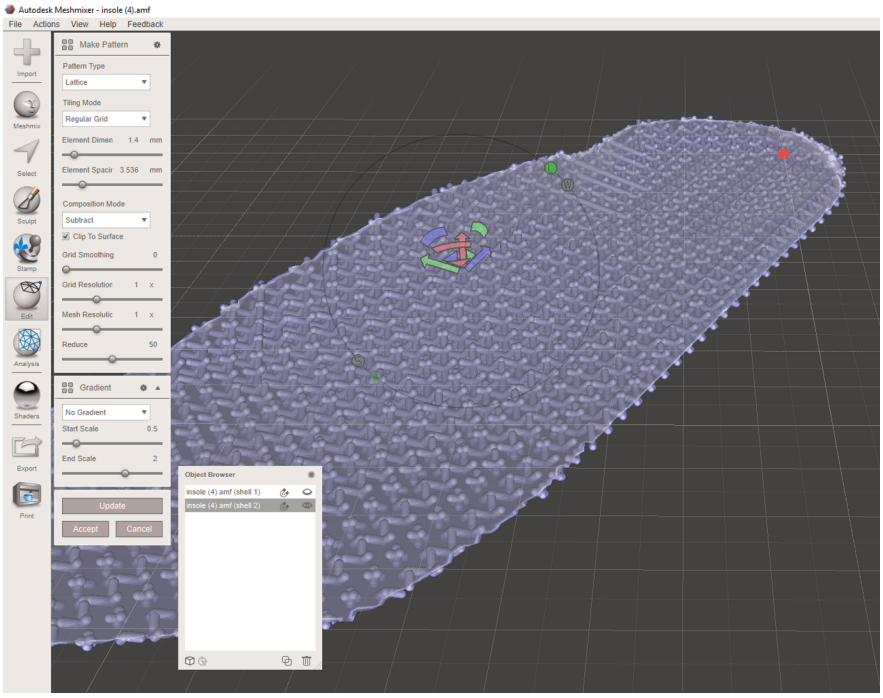
[150]. Utklipp fra en demonstrasjonsvideo publisert av det amerikanske ingeniørselskapet PROLIM er vist i figur 5.5. Videoen viser hvordan man kan bruke denne funksjonen til å generere en gitterstruktur i en veivstang for å gjøre delen lettere uten å vesentlig redusere styrke og integritet.

Dessverre er ikke denne lisensen inkludert i studentlisenspakken NTNU har forhandlet seg frem til. Det ble førsøkt å få tak i en utvidet lisens for å teste funksjonen, men det kom etter hvert frem at dette allerede var blitt forsøkt uten hell høsten i forveien i anledning en annen studentoppgave. Årsaken var at den spesifikke Lattice-funksjonen ble utviklet av en tredjepart på vegne av Siemens, noe som gjorde at forhandleren av NX-lisenser i Norge, ikke kunne tilby NTNU en redusert studentpris. Skulle NTNU betalt for å få en lisens også til Lattice-funksjonen ville det koste mer en det koster dem i dag for hele NX pakken[152].

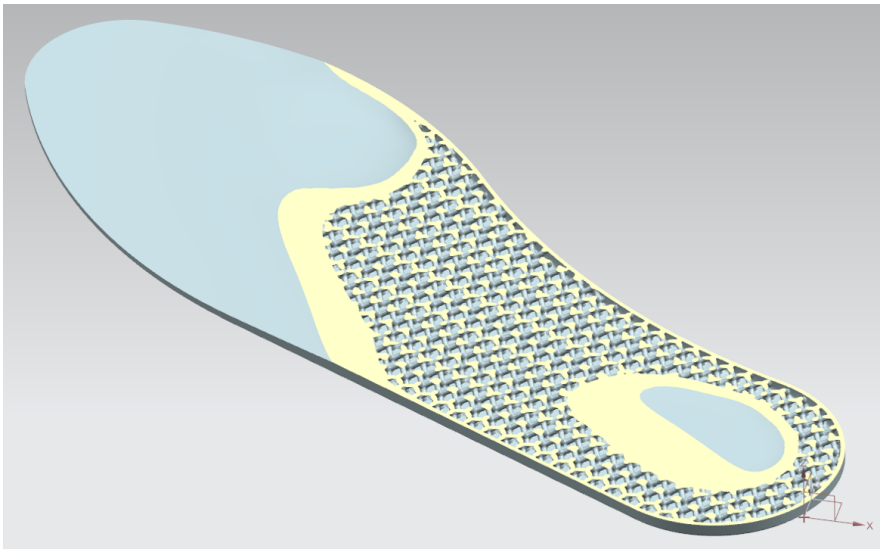
Meshmixer og printforespørsel

Da det det ut til at det ble vanskelig å bruke et DAK-program for å generere gitterstrukturer i den tidligere utviklede eksempelsålen, kapittel 5.1, ble det gratise DAK-programmet Meshmixer [153] brukt til å manuelt legge inn en gitterstruktur. Et utklipp i fra programmet underveis i designprosessen er vist i figur 5.6 og et tversnit av resultatet er vist i figur 5.8.

Denne modellen ble senere printet i TPU med en FDM-printer, se kapittel 5.3. Det norske print-selskapet i Levanger, Prototal [154], ble også forespurt om de ville kunne



Figur 5.6: Design av gitterstruktur i eksempelsåle med programmet Meshmixer



Figur 5.7: Tverrseksjon av gitterfylt såle designet i Meshmixer iportert til og snittet i NX.

printe sålen og hva det isåfall ville koste. Dette var de i utgangspunktet positive til, men de klarte ikke å fjerne bunn og sider som trengtes for å få ut overflødig materiale. Dette hadde studenten også selv forsøkt i NX uten å lykkes. Årsaken var at det store antallet ”huller” som ville oppstå i overflaten av et ”kutt”, gjodre at den automatiske ”hullfyllefunkjonen” ikke virket. Modellen kunne derfor ikke uten videre bli printet i en SLS-printer, da det var nødvendig å få ut usintret materiale fra sålen om det i det hele tatt skulle være noe poeng i gitterstrukturen. Gittersålen fra Meshmixer ble likevel printet med en FDM-printer da den ikke krevde indre støttemateriale.

5.3 FDM printing

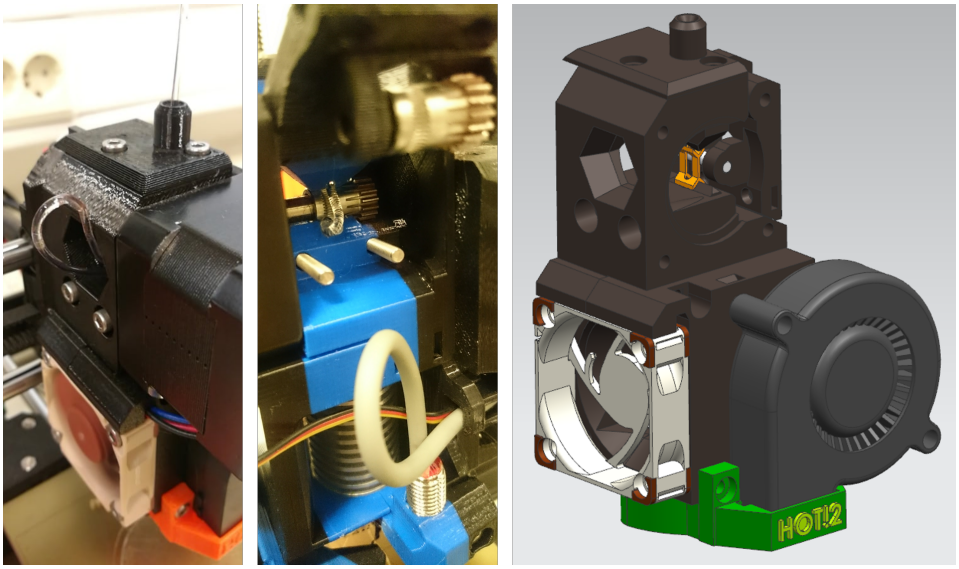
Til printing av eksempelsålen utviklet med Gensole, kapittel 5.1, ble printforberedelsesprogrammet Slic3r PE versjon 1.41.2+win64 [31] og FDM-rinteren Prusa i3 MK3S [155] brukt. Materialene som ble brukt for de ulike iterasjonene var; umerket ufarget PLA tilgjengelig på printlabben, hvit Flexfill 98A og hvit NinjaFlex Shore 85A. Datablad for Flexfill- og NinjaFlex-materiaet er vedlag i henholdsvis appendiks A.3 og appendiks A.4.

Det viste seg å være vanskelig å vellykket printe med de myke materialene, Flexfill og speselt NinjaFlex, da filamentet til stadighet kveilet seg opp inne i ekstruderen som vist til venstre i figur 5.8. Dette kunne ha flere årsaker som; delvis tett dyse, ikke optimal dysetemperatur, feil stramming av skruer som regulerte trykket fra de matende tannhjulene på filamentet, og dårlig opplinjing av filament inne i ekstruderen som kunne initiere en utbøyning og oppkveiling. Disse parameterne ble justert i flere omganger, men det var to tilltak som til slutt så ut til å ha en avgjørende effekt og som gjorde det mulig å få printet myke konseptmodeller:

Det første tiltaket var at studenten designet en liten ”insert” som skulle begrense plassen rundt filamentet inne i dysen og som forhindret filamentet i å komme ut av posisjon. ”Inserten” ble designet i DAK for å passe inn i en 3D-sammenstilling av printerens ekstruder. Sammenstillingsmodellen hadde studenten lastet ned fra nettsiden GrabCAD [156], en nettside som tilbyr nedlasting av gratis 3D-filer [157]. Inserten ble printet i vanlig PLA, også den på en Prusa i3 MK3S, og så satt inn i ekstruderen. Etter dette sluttet filamentet å kveile seg ut under printing. DAK-modellen av inserten i sammenstillingsmodellen er vist til høyre i figur 5.8

Det andre tiltaket som, kombinert med ekstruder-inserten førte til at det lot seg gjøre å printe en hel innleggssåle uten at printeren stoppet, var at ”retraction” ble skrudd av i printoppsettet. Retraction er en funksjon som atomatisk legges inn i printerinnstillingene og som gjør at filamentet trekkes litt tilbake når printerhodet beveger seg mellom punkter hvor det ikke skal ekstruderes materiale. Dette er for å gi et bedre print-
resultat hvor man unngår de små tynne trådene som noen ganger oppstår, såkalt ”stringing”.

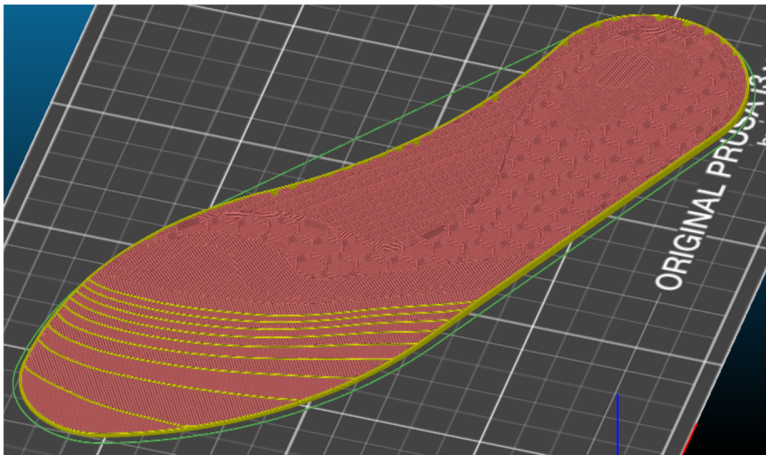
Etter at printerprobleme hadde blitt løst kunne endelig myke konseptsåler printes. Dis-



Figur 5.8: Problemer med FDM-printing i myke materialer. Venstre og midtre bilde illustrerer oppkveilingsproblemene. Høyre bilde viser inserten, oransje, som ble designet for å løse problemet.

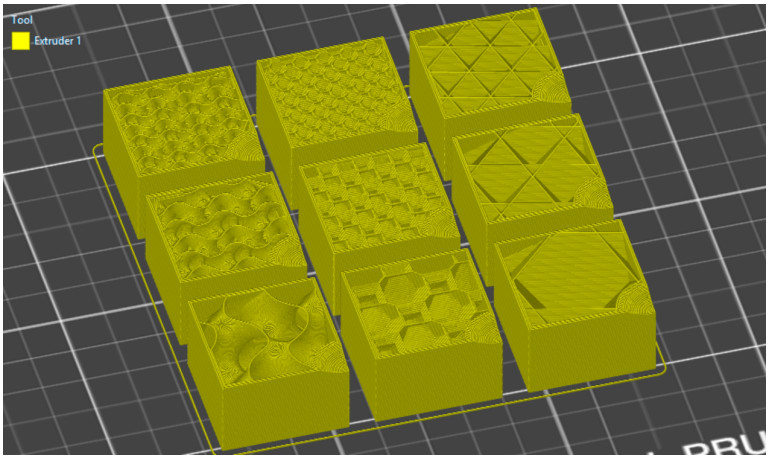
se sålene er blitt vist til Ortopedisk Verksded, og de ønsker om mulig å få dem tilbake etter at denne masteroppgaven har blitt vurdert. Sålene og annet printmateriell blir før dette levert til veileder Knut Aasland, som vil viderebringe dem til sensor. Det ble eksperimentert med ulike fyllstrukturer og tettheter underveis i iterasjonsprosessen, og parametrene for disse, samt hvilket material som er brukt, er oppgitt på de ulike sålene. Figur 5.9 viser innsiden av en av sålene i printforberedelsesprogrammet og figur 3.3 viser resultatet av fem av printforsøkene.

Det ble også printet ni kuber med tre ulike fyllstrukturer, gyroid, 3D honeycomb og cubic, og med tre ulike fyllprosenter 5 %, 10 % og 15 %, for å få et bedre forhold til hvordan disse parameterene påvirket mykheten av kuben. Figur 5.11 viser kubenes indre struktur, mens figur 5.12 presenterer bilder fra printprosessen og endelig printresultat. Da kubene i et møte ble vist frem for TOV, ble det under samme møte laget et nytt designgrunnlag for ytterligere åtte tykkelses-testmodeller, og ved neste besøk hadde studenten med de nye modellene. Designskissen med dimensjoner er gjengitt i figur 5.13 og print av de resulterende modellene er gjengitt i figur 5.14. Også disse modelle har påskrevet fyllparametre og blir levert sammen med sålene. Alle fyllstruktur-testmodellene er printet i NinjaFlex 85A. Datablad ligger i appendiks A.4.



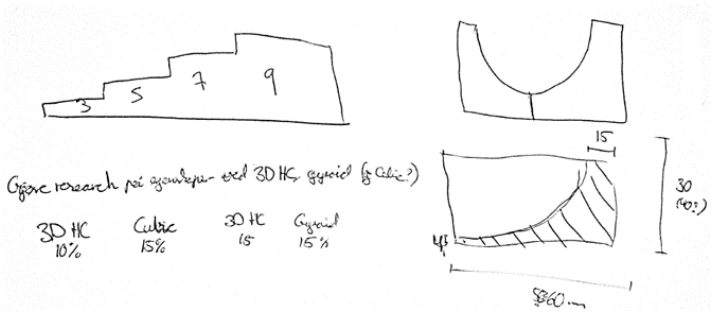
Figur 5.9: Såle med ”honeycomb” og ”rectlinear” fyllstruktur i printforberedelsesprogrammet Slic3r PE

Figur 5.10: Fem FDM-printede såler som er et resultat at gjentatte print-iterasjoner



Figur 5.11: Testkuber kargjort for print. Type fyllstruktur fra venstre til høyre, gyroid, 3D honeycomb, cubic. Fyllprosent fra fremst til bakerst, 5 %, 10 %, 15 %

Figur 5.12: Printing av testkuber. Printresultat nederst til høyre.



Figur 5.13: Skisse for designgrunnlag til tykkelse-testmodeller

Figur 5.14: Printing av og ferdige tykkelse-testmodeller

Kapittel 6

Oppsummering

Det har gjennom denne oppgaven blitt sett på flere ulike aspekter som kan være nyttige for Trøndelag Ortopediske Verksted å ha kjennskap til når de de neste årene skal se på mulighetene for å effektivisere sin produksjon av ortopediske fotsenger.

Gjennom eksempler fra både industrien, 4.1, og egenproduserte prototyper, 5.3, er det vist at det er mulig å printe i materialer myke nok for dempende innleggssåler. Foreløbig er det kun materialet TPU som eksisterer med den ønskede hardheten i området 70-100 shore A, men i framtiden vil muligens også silikon kunne brukes, 3.4.1. Av de fire printteknologiene som er kompatible med printing i polymerer har SLS og SLA begge pekt seg ut som aktuelle produksjonsmetoder, mens MJ ikke kan produsere deler i TPU med riktig hardhet, 3.4.1. FDM kan også ved optimale forhold printe myk TPU, men da komplikasjonene kan være mange, 5.3, og undersiden av en såle i tillegg må være flat, 3.3.1, anbefales det ikke å satse på denne teknologien.

Videre er det blitt sett på ulike metoder og programmer som kan brukes til å genere gitterstrukturer til bruk i innleggssåler, 5.2. Aktører i industrien som ligner TOV er også blitt undersøkt, og programmer og metoder de enten bruker i dag, eller jobber med å utvikle, er blitt presentert, 4.2.

For den eksterne leser har det i tillegg til tema relatert til 3D-printing, også blitt gitt en innføring i sykdommen diabetes og hvofor personer som lider av dette er en relativt stor pasientgruppe hos Trøndelag Ortopediske Verksted, 2.2. Dagens produksjonsmetoder ved verkstedet er også blitt skissert og utfordringer tilknyttet denne og de resulterende produktene er adressert, 2.4.

Kapittel 7

Konklusjon

Av studiene gjennomført i denne oppgaven kan en konkludere med at TOV har gode grunner til å legge om dagens produksjon av fotsenger til fordel for en mer automatisert metode som innebærer 3D-printing. Likevel ser det ut til at det foreløbig ikke eksisterer programvare som vil kreves for å lage fotsenger som tilfredsstiller deres krav. Dette på tross av at velegnede teknologier og materialer er tilgjengelig på markedet. TOV bør derfor fortsette å holde seg oppdatert på utviklingen av egnede programvarer, og om mulig også initiere samarbeid med aktører som kan bidra med å fremskynde en slik utviklingsprosess.

Bibliografi

[1] Trøndelag Ortopediske Verksted AS. Organisering [Internett]. Trondheim, Ålesund og Namsos [hentet 29. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.tov.no/public.aspx?pageid=91799.

[2] Trøndelag Ortopediske Verksted AS. STRATEGI FOR TRØNDELAG ORTOPEDISKE VERKSTED - 2014-2017 [Internett]. [hentet 29. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.tov.no/Customers/tov/documents/Om%20oss/STRATEGI_FOR_TROeNDELAG_ORTOPEDISKE_VERKSTED_2014_2017_vedtatt.pdf.

[3] Åsvold B. diabetes. Store medisinske leksikon [Internett] april 2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sml.snl.no/diabetes.

[4] Åsvold B. diabetes type 1. Store medisinske leksikon [Internett] mars 2018 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sml.snl.no/diabetes_type_1.

[5] Åsvold B. diabetes type 2. Store medisinske leksikon [Internett] desember 2018 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sml.snl.no/diabetes_type_2.

[6] ST. Olavs hospital. Avdeling for endokrinologi [Internett]. Trondheim [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://stolav.no/avdelinger/medisinsk-klinikk/endokrinologi#les-mer-om-avdeling-for-endokrinologi.

[7] ISO International Organization for Standardization. All about ISO [Internett]. Genève: International Organization for Standardization; c2019 [hentet 5. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.iso.org/about-us.html.

[8] ASTM International. About Us [Internett]. West Conshohocke, (PA): ASTM International; c2019 [hentet 9. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.astm.org/ABOUT/overview.html.

[9] ISO og ASTM International. ISO/ASTM 52900. Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology [Internett]. Genève og West Conshohocke, (PA): ISO/ASTM International; 2016 [hentet 10. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900. Lisens kreves.

[10] andreReikerås O. ortopedi. Store medisinske leksikon [Internett] nov 2018 [hentet 12. februar 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sml.snl.no/ortopedi.

[11] OSTA INTERNATIONAL. Model Skulls And Skeletons [Internett]. White Rock, (BC): OSTA INTERNATIONAL; c2019 [hentet 10. mai 2019]. [Seksjon], Model Skulls And Skeletons; [venstre side, omtrent to skjermer ned]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.osta.ca/.

[12] Autodesk Netfabb. netfabb Automatic Packing [Internett]. [publisert 31. oktober 2013;hentet 8. april 2019]. [Video]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.youtube.com/watch?v=2Uzx9BZlGQg&t=0m14s.

[13] standard.no. Nå vises treff i innholdet i standardene for ”additiv [Internett]. Lysaker: Standard Online AS; standard norge; [søk utført 11. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=additiv.

[14] Boivie K. Emne: Norsk 3D-printing - Terminologi. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 7. mai 2019; sitert 11. mai 2019].

[15] SIS Svenska institutet för standarder. Om SIS [Internett]. Stockholm: Svenska institutet för standarder [hentet 11. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.sis.se/om-sis/.

[16] ADDLAB. Additive Manufacturing [Internett]. Gjøvik: Norwegian University of Science and Technology; c2019 [hentet 8. april 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://addlab.no/.

[17] SINTEF. Additiv tilvirkning (3D-printing) [Internett]. Oslo: SINTEF Industri [hentet 8. april 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.sintef.no/additiv#/.

[18] Andreassen E. Emne: Norsk 3D-printing-terminologi [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 11. april 2019; sitert 11. mai 2019].

[19] Gregurić L. History of 3D Printing – When Was 3D Printing Invented? [Internett]. München: All3DP [hentet 10. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/,.

[20] Kodama H. Authomatic method for fabricating a three-dimensional plastic model-with photo-hardening polymer. American Institute of Physics: Rev. Sci. Instrum. 1981;52(11):1770-1773. Figur 7,A house model fabricated by the equipment a; p. 1772.

[21] Ikoner fra PowerPoint.Ink og Freepik. Hentet og gjengitt med tillatelse, komponert av Gomo S. Trondheim [hentet og komponert 8. mai 2019]. Freepik-ikoner tilgjengelig fra:. URL www.flaticon.com.

[22] Bournias-Varotsis A, Schöffer F, Pina B, Bukholt N, Wimmer L, Myerberg J, Heiden P. 3D Printing Trends Q1 2019. 3D Hubs [Internett]. Amsterdam og New York (NY); c2019 [hentet 15. mai 2019]; [s. 15] Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/get/trends/.

[23] 3D Hubs Help Center. How 3D Hubs works [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2018 [hentet 15. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://hubspot.3dhubs.com/help-center/about-3d-hubs/about-3d-hubs.

[24] 3D Hubs. Additive Manufacturing Technologies [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 5. mars 2019]. [Figur], Additive Manufacturing Technologies. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/get/am-technologies/.

[25] 3D Hubs og Gomo S. Additive Manufacturing Technologies, *Polymers* [Internett, redigert]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 og Trondheim [hentet 5. mars 2019; redigert 10. mars 2019]. Originalfigur tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/get/am-technologies/.

[26] Varotsis A. Introduction to FDM 3D printing [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 26. april 2019]. [Figur], Schematic of a typical FDM printer; [omtrent 1/4 nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing.

[27] prisguiden P. XYZprinting da Vinci Nano [Internett]. Oslo: Prisguiden.no; c2019 [hentet 28. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://prisguiden.no/produkt/xyzprinting-da-vinci-nano-336881#detaljer.

[28] prisguiden P. 3D-printer [Internett]. Oslo: Prisguiden.no; c2019 [hentet 28. april 2019]. [Skjermbilde], [9 øverste resultater med filtrene Pris (150-7800), Penn (Nei), FFF]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing.

[29] JUST 3DP. XYZPRINTING DA VINCI SUPER 3D-DRUCKER [Internett]. Möglingen: JUST3DP.com; c2019 [hentet 30. april 2019]. [Figur], [første av 3 produktbilder]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.just3dp.com/xyzprinting-da-vinci-super?bid=185852-81456-&adcref=all3dp.com%2F1%2Fbest-large-3d-printer-large-format-scale-3d-printers%2F.

[30] Redwood B, Schöffer F, Garret B. The 3D Printing Handbook. 1. utg. Amsterdam: Coers Roest; 2017.

[31] Prusa Research. PrusaSlicer [Internett]. Praha: Rrusa Research s.r.o.; c2019 [hentet 30. mai 2019]. [Programvare]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.prusa3d.com/prusaslicer/.

[32] Průša J. PRUSAPRINTERS BLOG. [Internett]. Praha: Rrusa Research s.r.o.; c2019. PrusaSlicer 2.0 release!; 20. mai 2019 [hentet 30. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://blog.prusaprinters.org/prusaslicer-2-release/.

[33] Gomo S. Fyllprosents innvirkning på printtid for ulike modellstørelser. Trondheim [laget 4. mai 2019]. [Graf], [graf laget i Excel.Ink basert på en samling av data fra Slic3r PE]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing.

[34] Hodgson G. Print Settings. Slic3r Manual. [Internett]. [hentet 30. mai 2019]. [Figur], [rett over halveis nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings.

[35] frei. Gyroid surface . Grabcad. [Internett]. 23. februal 2017. [hentet 30. mai 2019]. [Figur], [førte bilde i bildeserie]. Tilgjengelig fra:. URL https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings.

[36] Thaulow C. mekaniske egenskaper. Store norske leksikon [Internett] juli 2015 [hentet 14. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://snl.no/mekaniske_egenskaper.

[37] 3D Matter. About 3D Matter [Internett]. New York (NY): 3D Matter; c2019 [hentet 14. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://my3dmatter.com/about/.

[38] OPTIMATTER. The 3D Printing optimization tool focused on materials [Internett]. OptiMatter; c2019 [hentet 14. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.optimatter.com/.

[39] Optimatter. Forecast [Internett]. 3D Matter Inc.; 2016 [hentet 15. mai 2019]. [Skjermbilde], [sammenlignign av FDM materialer og SLS materialer etter å ha opprettet bruker]. Tilgang til å lage bruker:. URL https://www.optimatter.com/.

[40] 3d Matter. FDM 3D Printing materials compared [Internett] Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 15. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared.

[41] 3D Matter. FDM 3D Printing materials compared [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 15. mai 2019]. [Figur], Research results for all six polymers displayed in one graph; [omtrent 1/4 nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared.

[42] 3D Matter. FDM 3D Printing materials compared [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 15. mai 2019]. [3 figurer kombinert], [omtrent fra 1/4 til 2/4 nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared.

[43] 3D Matter. FDM 3D Printing materials compared [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 15. mai 2019]. [3 figurer kombinert], [omtrent fra 2/4 til 3/4 nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared.

[44] Formlabs. MATERIAL DATA SHEET, Standard Rev 01 [Internett]. Somerville (MA): Formlabs; c2019 [siste revisjon 18. april 2017;hentet 26. mai 2019]. [Figur], Material Properties Data; [øverst s. 2]. Tilgjengelig fra:. URL https://archive-media.formlabs.com/upload/Clear-DataSheet.pdf.

[45] Kickstarter. PLUTO - The world's smallest high-quality 3D Printer [Internett]. New York (NY): Kickstarter, PBC; c2019 [hentet 22. mai 2019]. [Figur], [halvveis nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.kickstarter.com/projects/3devised/pluto-the-worlds-smallest-high-quality-3d-printer.

[46] Carbon. Our Technology [Internett]. Redwood City (CA): Carbon, Inc.; c2019 [hentet 10. juni 2019] [Figur], [baksrunnsbilde]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.carbon3d.com/our-technology/.

[47] Owler. 3D Hubs's Competitors, Revenue, Number of Employees, Funding and Acquisitions [Internett]. San Mateo, (CA): Owler, Inc.; c2019 [Estimerer 54 ansatte] [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.owler.com/company/3dhubs.

[48] LikedIn. 3D Hubs: Om: Oversikt [Internett]. Sunnyvale, (CA): LinkedIn Corporation; c2019 [Estimerer 51-200 ansatte] [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.linkedin.com/company/3d-hubs/about/.

[49] Craft. 3D Hubs: Overview [Internett]. San Francisco, (CA): Craft.co; c2019 [Estimerer 101 ansatte] [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://craft.co/3d-hubs.

[50] Chrunchbase. 3D Hubs: Overview [Internett]. San Francisco, (CA): Crunchbase Inc.; c2019 [Estimerer 51-100 ansatte] [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.crunchbase.com/organization/3d-hubs#section-overview.

[51] 3D Hubs. Knowledge Base [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/knowledge-base/.

[52] Wikipedia: Den frie encyklopedi. Polymelkesyre. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 11. juli 2018] [hentet 20.

mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://no.wikipedia.org/wiki/Polymelkesyre.

[53] Wikipedia: the free encyclopedia. Polylactic acid. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 17. mai 2019] [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid.

[54] Wikipedia: Den frie encyklopedi. Acrylonitrile butadiene styrene. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 5. mai 2019] [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene.

[55] Eagle Plastics. Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) – what is it?! [Internett]. Leicester: Eagle Plastics; c2015 [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.eagleplastics.co.uk/polyethylene-terephthalate-glycol.

[56] Wikipedia: the free encyclopedia. Thermoplastic polyurethane. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 31. mars 2019] [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic_polyurethane.

[57] Wikipedia: the free encyclopedia. Polyetherimide. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 13. mai 2019] [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide.

[58] Wikipedia: Den frie encyklopedi. Polypropen. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 28. mars 2016] [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://no.wikipedia.org/wiki/Polypropen.

[59] 3D Hubs. 3D printing in Resin [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 21. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/3d-printing/plastic/resin/.

[60] 3D Hubs. Plastic 3D printing [Internett]. Amsterdam: 3D Hubs; c2019 [hentet 20. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dhubs.com/3d-printing/plastic/.

[61] hp. HP 3D printing materials [Internett]. Houston (TX): HP Development Company, L.P.; c2019 [hentet 23. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/materials.html.

[62] eos. Material EOS Plastic Materials for Additive Manufacturing [Internett]. München: EOS GmbH Electro Optical Systems [hentet 23. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.eos.info/material-p.

[63] stratasys. OUR MATERIALS [Internett]. Rehovot: Stratasys Ltd.; c2019 [hentet 23. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.stratasys.com/materials/search.

[64] Carbon. A Material World [Internett]. Redwood City (CA): Carbon, Inc.; c2019 [hentet 23. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.carbon3d.com/materials/.

[65] 3D Systems. Material Comparison Guide: Filter: Services: 3D Printing [Internett]. Rock Hill (SC): 3D Systems, Inc.; c2019 [hentet 23. mai 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dsystems.com/materials/plastic.

[66] Carbon. EPU: Elastomeric Polyurethane [Internett]. Redwood City (CA): Carbon, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.carbon3d.com/materials/epu-elastomeric-polyurethane/.

[67] Smooth-On. Durometer Shore Hardness Scale [Internett]. Macungie (PA): Smooth-On, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. [Figur], SHORE HARDNESS SCALES [nederst på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.smooth-on.com/page/durometer-shore-hardness-scale/.

[68] Materialise. TPU 92A-1 [Internett]. Leuven: Materialise; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/tpu-92a-1.

[69] Materialise. adidas Futurecraft: The Ultimate 3D-Printed Personalized Shoe [Internett]. Leuven: Materialises; c2019 [hentet 27. mai 2019]. [Figur], ”bakgrunnsbilde”; [nederst i artikkel]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.materialise.com/en/cases/adidas-futurecraft-ultimate-3d-printed-personalized-shoe.

[70] K 2019. K 2016 - Profile data [Internett]. Düsseldorf: Messe Düsseldorf GmbH [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.k-online.com/en/Home/Fair_Profile_K_2016.

[71] 10times. Top 100 Plastic Polymers Events [Internett]. Noida: Tentimes Online Private Limited.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://10times.com/top100/plastic.

[72] Mashambanhaka F. Silicone 3D Printer – All You Need to Know in 2019 [Internett]. München: All3DP [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/2/silicone-3d-printer-all-you-need-to-know/.

[73] beamler. What is Beamler? [Internett]. Amsterdam: Beamler; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.beamler.com/about/.

[74] beamler. Is 3D Printing with Silicone possible?. [Internett]. Amsterdam: Beamler; c2019 [publisert 5. juli 2018], [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.beamler.com/is-3d-printing-with-silicone-possible/.

[75] ACEO. 3D Printing with Silicones [Internett]. Burghausen: Wacker Chemie AG ACEO [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.aceo3d.com/.

[76] ACEO. Our Silicones At a Glance [Internett]. Burghausen: Wacker Chemie AG ACEO [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.aceo3d.com/silicones/.

[77] Carbon. SIL: Silicone [Internett]. Redwood City (CA): Carbon, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.carbon3d.com/materials/silicone/.

[78] Comeau D, Haines A, Nhem V. Silicone Molding - Design Manual. [Internett]. Leominster (MA): Albright Technologies, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]; [s. 9] Tilgjengelig fra:. URL http://www.silicone.pro/manual.pdf.

[79] stratasys. [Internett]. Rehovot: Stratasys Ltd.; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.stratasys.com/.

[80] 3D Systems. [Internett]. Rock Hill (SC): 3D Systems, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.3dsystems.com.

[81] International Organization for Standardization. ISO 10993-1:2009. Biological evaluation of medical devices — Part 1: Evaluation and testing within a risk management process [Internett]. Genèv: ISO; c2009 [hentet 3. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ISO+10993-1&subscr=1. Lisens kreves.

[82] Wikipedia: the free encyclopedia. Cytotoxicity. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 4. april 2019] [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Cytotoxicity.

[83] Wikipedia: Den fria encyklopedin. Sensitisering. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 13. mars 2016] [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sv.wikipedia.org/wiki/Sensitisering.

[84] English Oxford Lining Dictionaries. intradermal. [Internet]. Oxford: Oxford University Press. [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.oxforddictionaries.com/definition/intradermal.

[85] Peeters J, Malinovski P. Biological Evaluation of Medical Devices [Internett]. Innovative Publishing Co.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. [Figur]; [rett ovenfor 1/2 nede på siden]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.medtechintelligence.com/feature_article/biological-evaluation-of-medical-devices/.

[86] AMFG. 3D Printing with Polymers: All You Need to Know. [Internett]. London: Autonomous Manufacturing Ltd. [hentet 2. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://amfg.ai/2019/01/17/3d-printing-with-polymers-all-you-need-to-know/.

[87] AMFG. 3D Printing with Polymers: All You Need to Know. [Internett]. London: Autonomous Manufacturing Ltd. [hentet 6. juni 2019]. [Figur], An overview of the main Polymer ..., [nest øverste bilde]. Tilgjengelig fra:. URL https://amfg.ai/2019/01/17/3d-printing-with-polymers-all-you-need-to-know/.

[88] Ultimaker. [Internett]. Geldermalsen: Ultimaker BV; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://ultimaker.com/.

[89] Makerbot. [Internett]. Brooklyn (NY): MakerBot Industries; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.makerbot.com/.

[90] Prusa Resarch. [Internett]. Praha: Prusa Research s.r.o.; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.prusa3d.com/.

[91] zortrax. [Internett]. Olsztyn: Zortrax; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://zortrax.com/.

[92] Markforged. [Internett]. Cambridge (MA): Markforged, Inc.; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://markforged.com/.

[93] Carbon. [Internett]. Redwood City (CA): Carbon, Inc.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.carbon3d.com/.

[94] formlabs. [Internett]. Somerville (MA): Formlabs, Inc.; c2019 [hentet 4. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://formlabs.com/.

[95] Prodways Technologies. [Internett]. Paris: Prodways Group (Prodways); c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.prodways.com/en/.

[96] envisionTEC. [Internett]. Gladbeck: ENVISIONTEC, INC.; c2017 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://envisiontec.com/.

[97] ASIGA. [Internett]. Sydney: Asiga; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.asiga.com/.

[98] eos. [Internett]. München: EOS GmbH Electro Optical Systems [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.eos.info/en.

[99] hp. [Internett]. Houston (TX): HP Development Company, L.P.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers.html.

[100] Sinterit. [Internett]. Kraków: Sinterit sp. [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.sinterit.com/.

[101] Sintratec. [Internett]. Brugg: Sintratec AG.; c2019 [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://sintratec.com/.

[102] Farsoon. [Internett]. Changsha: Farsoon Technologies [hentet 6. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://en.farsoon.com/main.html.

[103] Yusuf B. Nike Jumping into 3D Printed Shoes with Prodways. All3DP [Internett]. juni 2017 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/nike-3d-printed-shoes-prodways/.

[104] Watkin H. Adidas Launches Yohji Yamamoto Designed Y-3 RUNNER 4D II Sneakers. All3DP [Internett]. april 2019 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/4/adidas-launches-yohji-yamamoto-designed-y-3-runner-4d-ii-sneakers/.

[105] Freier A. New Balance Installs Russell Finex Compact Sieve To 3D Print Footwear. All3DP [Internett]. januar 2018 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/new-balance-installs-russell-finex-compact-sieve-3d-print-footwear/

[106] Watkin H. Reebok Launches 3D Printed Shoe Called the Liquid Floatride Run. All3DP [Internett]. mars 2018 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/reebok-launches-latest-3d-printed-shoe-called-liquid-floatride-run/

[107] Mensley M. ECCO Shoes to Offer 'Augmented' Quant-U 3D Printed Midsoles. All3DP [Internett]. november 2017 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/ecco-quant-u-3d-printed-midsole/.

[108] Watkin H. Under Armour Releases 3D Printed Sneakers to Celebrate Hall of Fame Induction of Ray Lewis. All3DP [Internett]. august 2018 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/4/armour-release-sneakers-celebrate-hall-fame-linebacker-ray-lewis/.

[109] Watkin H. Brooks Running Uses Connex3 3D Printer for Rapid Prototyping. All3DP [Internett]. september 2017 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/brooks-running-connex3/.

[110] Jones R. This Brand Just Released China's First-Ever 3D-Printed Sneakers. Footwear News [Internett]. mai 2017 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://footwearnews.com/2017/focus/athletic-outdoor/peak-sport-future-3d-printed-sneaker-first-china-351331/.

[111] Adidas News. ADIDAS BREAKS THE MOLD WITH 3D-PRINTED PERFORMANCE FOOTWEAR [Internett]. oktober 2015 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://news.adidas.com/futurecraft/adidas-breaks-the-mold-with-3d-printed-performance-footwear/s/8099a318-f9e7-45d8-9887-42c3dde5e6fd.

[112] Materialise. [Internett]. Leuven: Materialises; c2019 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.materialise.com/.

[113] Adidas News. ADIDAS UNVEILS INDUSTRY'S FIRST APPLICATION OF DIGITAL LIGHT SYNTHESIS WITH FUTURECRAFT 4D [Internett]. april 2017 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://news.adidas.com/futurecraft/adidas-unveils-industry-s-first-application-of-digital-light-synthe
s/20b2ff0a-4c7d-47a2-9beb-3373f6a5dad7.

[114] Adidas News. ADIDAS UNVEILS EVOLVED ALPHAEDGE 4D, FEATURING TRIPLE WHITE AND PARLEY FOR THE OCEANS COLLABORATION [Internett]. mai 2019 [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://news.adidas.com/futurecraft/adidas-unveils-evolved-alphaedge-4d--featuring-triple-white-and-pa
s/27a5256c-a51c-48ed-9379-d7c7bc419419.

[115] Adidas. ALPHAEDGE 4D SKO [Internett]. [hentet 7. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.adidas.no/alphaedge-4d-sko/EF3454.html.

[116] Jones R. Adidas Is Rereleasing Its Futurecraft 4D Sneakers This Week and You Can Sign up to Get Them Now. Footwear News [Internett]. februar 2018 [hentet 7. juni 2019]. [Figur] Adidas Futurecraft 4D. [først i artikkel] Tilgjengelig fra:. URL https://footwearnews.com/2018/focus/athletic-outdoor/adidas-rereleasing-futurecraft-4d-sneakers-this-week-491176/.

[117] Jones R. Adidas Is Rereleasing Its Futurecraft 4D Sneakers This Week ..., Footwear News [Internett]. februar 2018 [hentet 7. juni 2019]. [Figur] Adidas Futurecraft 4D midsole detail. [kvartveis nede på siden] Tilgjengelig fra:, . URL https://footwearnews.com/2018/focus/athletic-outdoor/adidas-rereleasing-futurecraft-4d-sneakers-this-week-491176/.

[118] Wikipedia: the free encyclopedia. Peak Sport Products. [Internet]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Inc. [sist endret 17. mai 2019] [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_Sport_Products.

[119] Global Times. Peak Sport launches China's first 3D printed sneakers. [Internett]. mai 2017 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.globaltimes.cn/content/1046247.shtml.

[120] Watkin H. PEAK Launches the World's First 3D Basketball Boot, Tested by Dwight Howard. All3DP [Internett]. august 2017 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://all3dp.com/peak-launches-world-first-dwight-howard-iii-3d-basketball-boot/.

[121] Zahnd P. PEAK LAUNCHES WORLD'S FIRST 3D PRINTED VOLLEYBALL SHOES. 3D Printing Industry [Internett]. april 2018 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://3dprintingindustry.com/news/milan-design-week-opens-beautiful-3d-printed-house-yet-132374/.

[122] Jones R. This Brand Just Released China's First-Ever 3D-Printed Sneakers. Footwear News [Internett]. mai 2017 [hentet 7. juni 2019]. [Figur] The Peak Future retails for 1,299 renminbi ($188). [midtveis nede på siden] Tilgjengelig fra:. URL https://footwearnews.com/2017/focus/athletic-outdoor/peak-sport-future-3d-printed-sneaker-first-china-351331/.

[123] Jones R. This Brand Just Released China's First-Ever 3D-Printed Sneakers. Footwear News [Internett]. mai 2017 [hentet 7. juni 2019]. [Figur] The 3D-printed midsole of the Peak Future. [kvartveis nede på siden] Tilgjengelig fra:. URL https://footwearnews.com/2017/focus/athletic-outdoor/peak-sport-future-3d-printed-sneaker-first-china-351331/.

[124] Wiivv. [Internett]. Vancouver (BC): Wiivv; [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://wiivv.com/.

[125] PODFO. About us [Internett]. Newcastle: PODFO; c2019 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://podfo.com/.

[126] Fraunhofer. 3D printing: customized insoles for diabetes patients [Internett]. oktober 2016 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2016/november/3d-printing--customized-insoles-for-diabetes-patients.html.

[127] Blömer J. Emne: 3D printing: customized insoles for diabetes patients. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 15. mars 2019; sitert 8. juni 2019].

[128] Volker Jr. Emne: LAUF software for orthopeadic insoles. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 18. mars 2019; sitert 8. juni 2019].

[129] Fraunhofer. 3D printing: customized insoles for diabetes patients [Internett]. oktober 2016 [hentet 8. juni 2019]. [Figur] 3D structures made of TPU for insoles ... [1/3 nede på siden] Tilgjengelig fra:. URL https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2016/november/3d-printing--customized-insoles-for-diabetes-patients.html.

[130] cadscan. About us [Internett]. Chester: Cadscan Limited; c2017 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://cad-scan.co.uk/about/.

[131] cadscan. Bespoke, on-demand insoles [Internett]. mars 2016 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://cad-scan.co.uk/bespoke-on-demand-insoles/.

[132] cadscan. 3D printed orthotics: Imprints [Internett]. august 2017 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://cad-scan.co.uk/3d-printed-insoles/.

[133] Dr Neil Paul's Blog [Internett]. About Me [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.drneilpaul.blog/about-me/.

[134] Dr Neil Paul's Blog [Internett]. Cadscan – 3d printing of insoles for Diabetic patients to reduce pressure ulcers; november 2018 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.drneilpaul.blog/cadscan-3d-printing-of-insoles-for-diabetic-patients-to-reduce-pres

[135] Jones R. Adidas Is Rereleasing Its Futurecraft 4D Sneakers This Week ..., Footwear News [Internett]. februar 2018 [hentet 7. juni 2019]. [Figur] Adidas Futurecraft 4D midsole detail. [kvartveis nede på siden] Tilgjengelig fra:, . URL https://footwearnews.com/2018/focus/athletic-outdoor/adidas-rereleasing-futurecraft-4d-sneakers-this-week-491176/.

[136] Footworx. 3D Printing [Internett]. Banbury: Footworx Clinic; c2019 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.footworxclinic.co.uk/specialist-services/3d-printing/.

[137] Houlton D. Emne: 3d printing insoles. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 20. mars 2019; sitert 8. juni 2019].

[138] Houlton D. Emne: 3d printing insoles. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 20. mars 2019; gjengitt 8. juni 2019] [Bildevedlegg].

[139] SientiFeet. GENERAL PRESENTATION [Internett]. Paris: Scientifeet; c2019 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.scientifeet.com/en/home/about-us/.

[140] SientiFeet. CREATE 3D INSOLES [Internett]. Paris: Scientifeet; c2019 [hentet 8. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.scientifeet.com/en/home/documentation-en/create-3d-insoles/.

[141] SientiFeet. [Internett]. Paris: Scientifeet; c2019 [hentet 8. juni 2019]. [Figur] FOOT SCAN - 3D DESIGN - SHIPPIGN [1/3 nede på siden] Tilgjengelig fra:. URL https://www.scientifeet.com/en/.

[142] Prodways Group. Prodways innovative 3D printing laser sintering powder TPU [Internett]. [publisert 4. april 2018;hentet 8. juni 2019]. [Video]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.youtube.com/watch?v=Bb7EoXGFx3w&t=0m42s.

[143] Phits. ABOUT PHITS [Internett]. Beringen [hentet 9. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.phits.be/en/about-phits.

[144] Adidas. ADIDAS AT A GLANCE [Internett]. Herzogenaurach: ADIDAS AG; c2019 [hentet 9. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.adidas-group.com/en/group/profile/.

[145] Fotspesialisten Klinikk Elin. OM OSS [Internett]. Trondheim: Fotspesialisten AS; c2018 [hentet 9. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://fotspesialisten.no/om-oss/.

[146] Phits. PHITS EXPERT WORKFLOW – FROM SCAN TO INSOLES [Internett]. Beringen [hentet 9. juni 2019]. [Video] Utklipp fra "Phits Insoles: creating the perfect 3D-printed orthotics for you!" [Tilgjengelig fra:. URL http://www.phits.be/en/rs-print.

[147] gensole. What is Gensole? [Internett]. Gyrobot Ltd.; c2018 [hentet 09. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://gensole.com/about/.

[148] Autodesk Netfabb. What's New in Netfabb 2019.1: Release Highlights [Internett]. [publisert 17. desember 2018;hentet 10. juni 2019]. [Video]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.youtube.com/watch?v=4Jwk92DlelE&t=1m14s.

[149] Reyes A. Introducing Lattice in NX. SIEMENS [Internett]. juni 2017 [hentet 09. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://community.plm.automation.siemens.com/t5/NX-Design-Knowledge-Base/Introducing-Lattice-in-NX/ta-p/419418.

[150] The NX Team. NX 11.0.2 Release Notes. SIEMENS [Internett]. januar 2017. Plano (TX): Siemens Industry Software; c2019 [hentet 09. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://docs.plm.automation.siemens.com/docs/nx/11.0.2/en_US/release_notes.pdf.

[151] PROLIM. Creating Lattice Structures in NX CAD [Internett]. [publisert 18. april 2018;hentet 3. april 2019]. [Video]. Tilgjengelig fra:. URL https://www.youtube.com/watch?v=Y-hhQ2BOHhs&t=1m36s.

[152] Guadiamos L. Emne: Re: NTNU-SD0958805 Utvidet NX-lisens. [Internett] Epost til Gomo S. ¡solveig.gomo@gmail.com¿ [mottatt 25. mars 2019; sitert 9. juni 2019].

[153] Autodesk Meshmixer. [Internett]. Autodesk, Inc.; c2017 [hentet 9. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.meshmixer.com/.

[154] Prototal. Om oss i Prototal [Internett]. Levanger [hentet 9. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL http://www.prototal-norge.no/om-oss.

[155] Prusa Research. Original Prusa i3 MK3S kit [Internett]. Praha: Rrusa Research s.r.o.; c2019 [hentet 10. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/180-original-prusa-i3-mk3-kit.html?gclid=CjwKCAjw__fnBRANEiwAuFxET43rHB4Jx_P5RSm6JJqhZBqVNB2uGgBK3Ab2QswP9soaLdtZvwbzXhoCLGUQAvD_BwE.

[156] Kayne. J. Prusa i3 MK3 SolidWorks . GrabCAD Community. [Internett]. Cambridge (MA): GrabCAD; c2019 [lastet opp 7. desember 2017;lastet ned 14. mars 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://grabcad.com/library/prusa-i3-mk3-solidworks-1.

[157] GrabCAD. About GrabCAD. [Internett]. Cambridge (MA): GrabCAD; c2019 [hentet 10. juni 2019]. Tilgjengelig fra:. URL https://grabcad.com/library/prusa-i3-mk3-solidworks-1.

Appendiks

A.1 Målskjema fotsenger, SKANN OG FRES

Målskjema fotsenger, SKANN OG FRES

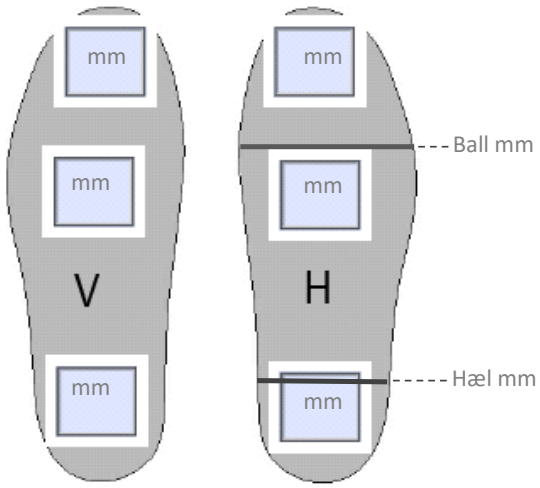
Pasientnavn:	T G	Skanner:	Materiale:
		☐ FOOTMILL	☐ A30 (30shore)
Ordrenr:	201902475	☐ SKUMBOKS	☐ A30+ (35shore)
		☐ GIPS	☐ A40 (40+shore)
Ordrenr:		☐ A40+ (35+shore)	
			☐ A50
Pasientnr:	75833		☐ A30/50
Ordreansvarlig:	Klikk her for å skrive ordreansv.		☐ Ulike avtrykk
Pasient innkalt:	Velg dato	Annet: Klikk her for å skrive inn tekst	

Skostørrelse:	Side (hvis *ikke* bilateral):	
☐ Lav sålemal	☐ Normal sålemal	☐ Høy sålemal

☐ Ingen pelotte	Kiler venstre	Kiler høyre
☐ Standard pelotte		☐som venstre
☐ T-Pad	☐Medial kile Klikk mm	☐Medial Klikk mm
☐ Sommerfugl	☐Lateral kile Klikk mm	☐Lateral Klikk mm
Høyde Klikk mm	☐Kun forfot	☐Kun forfot
	☐Kun hæl	☐Kun hæl

Modelleringsnotat:
Klikk her for å skrive inn tekst.

Tykkelse: Tykkelse: Bredde:



A.2 Målskjema fotsenger, vakuumproduksjon

Målskjema fotsenger, vakuumproduksjon

Pasientnavn: T G

Fødselsnr: 10047523378

Ordrenr: 201902475

Ordrenr:

Pasientnr: 75833

Ordreansvarlig:

Annet:

Pasient innkalt: Velg dato.

Materialer:
- ☐ Multiform 3mm
- ☐ Multiform 5 mm
- ☐ PPT (Action)
- ☐ Lunairflex
- ☐ Lunasoft SL
- ☐ Lunatec SE
- ☐ Multikork
- ☐ EVA
- ☐ Therrox

Vekt: Klikk her for å skrive vekt

Skostørrelse: Klikk her for å skrive skostørrelse

Type sko: Klikk her for å skrive type sko

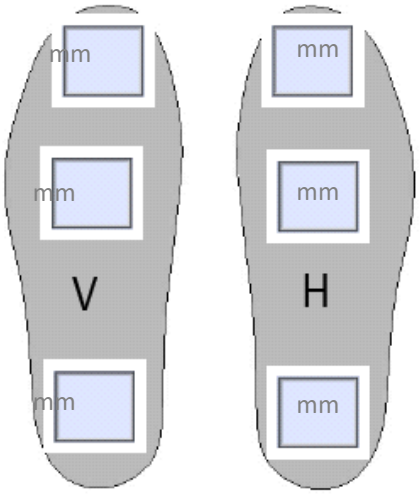
Side:
- ☐ Høyre
- ☐ Venstre
- ☐ Bilateralt

Tilslipningsgrad:
- ☐ Grov
- ☐ Medium
- ☐ Fin

Kiler:
- ☐ Medial kile
- ☐ Lateral kile
- ☐ Kun forfot
- ☐ Kun hæl
- ☐ Karming hæl

Modelleringsnotat:

Tykkelse: Tykkelse:



A.3 Teknisk datablad - Flexfill 98A

Datasheet

Flexfill 98A

Description:

Flexfill 98A is semi-flexible filament that offers great mechanical properties. High tear and tensile strength and wear performance guarantee the durability of 3D printed products.

It has high abrasion resistance, toughness, great chemical and thermal resistance. The filament is good for printing of dynamically stressed parts, for example sealings.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,10 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,23 g/cm^3	ISO 1183-1	
Diameter tolerance	± 0,10 mm		
Weight	500 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	53,7 MPa	DIN 53504	at break, 200 mm/min
Tensile stress	12,1 MPa	DIN 53504	10% elongation, 200 mm/min
	22,1 MPa	DIN 53504	50% elongation, 200 mm/min
	28,4 MPa	DIN 53504	100% elongation, 200 mm/min
	37,8 MPa	DIN 53504	300% elongation, 200 mm/min
Elongation at break	318 %	DIN 53504	200 mm/min
Hardness	98 Shore A	ISO 7619-1	
	60 Shore D	ISO 7619-1	
Tear strength	170 kN/m	ISO 34-1	500 mm/min
Abrasion	23 mm^3	ISO 4649	method A

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	220-240 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object. Try your own optimization before printing.
Hot pad	50-60 °C	
Bed adhesive	Magigoo	For easy removing of the object.

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.
The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulin
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

A.4 Teknisk datablad - NinjaFlex® 3D Printing Filament

NinjaTek *Technical Specifications*

NinjaFlex® 3D Printing Filament

Flexible Polyurethane Material for FDM Printers

NinjaFlex flexible filament leads the industry with superior flexibility and longevity compared to non-polyurethane materials. Its consistency in diameter and ovality (roundness) outpaces other polyurethane materials. Made from a specially formulated thermoplastic polyurethane (TPU) material, this patented technology contains a low-tack, easy-to-feed texture. The result is uniquely flexible, strong prints ideal for direct-drive extruders.

General Properties	Test Method	Imperial	Metric
Specific Gravity	ASTM D792	1.19 g/cc	1.19 g/cc
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.22 %	0.22 %

Mechanical Properties			
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	580 psi	4 Mpa
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	3,700 psi	26 Mpa
Tensile Modulus	ASTM D638	1,800 psi	12 Mpa
Elongation at Yield	ASTM D638	65%	65%
Elongation at Break	ASTM D638	660%	660%
Toughness (integrated stress-strain curve; calculated stress x strain)	ASTM D638	12,000 in·lbF/in^3	82.7 m*N/m^3 x10^6
Hardness	ASTM D2240	85 Shore A	85 Shore A
Impact Strength (notched Izod, 23C)	ASTM D256	2.0 ft.lbf/in^2	4.2 kJ/m^2
Abrasion Resistance (mass loss, 10,000 cycles)	ASTM D4060	0.08 g	0.08 g

Thermal Properties			
Melting Point (via Differential Scanning Calorimeter)	DSC	420° F	216° C
Glass Transition (Tg)	DSC	-31° F	-35° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 10.75psi/ 0.07 MPa	ASTM D648	140° F	60° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 66psi/ 0.45 MPa	ASTM D648	111° F	44° C

NinjaTek filament is capable of being printed by a variety of printers in a variety of configurations. This specification sheet gives results as they pertain to the defined test standard and specimen details. Different slicing and/or printing configurations, test conditions, ambient environments, etc. may result in different results.

Impact Strength and Heat Deflection Temperature results were both provided by an accredited university testing laboratory. Specific Gravity and Hardness are innate characteristics of the material. Moisture Absorption, values associated with the Tensile Strength tests, Melting Point and Glass Transition data were prepared by Fenner Drives, Inc.

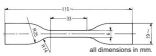
NinjaTek makes no warranties of any type, express or implied, including, but no liited to, the warranties of fitness for a partuclar application.

Test Specimen Details (by ASTM Test Number)
All printed specimens were created using the TAZ5 printer 0.75mm nozzle. For ASTM D638 tests, the extrusion multiplier is 1.05.

Specific Gravity (D792): Results determined by nature of material.

Moisture (D570): 30g of filament tested in moisture analyzer evaluated at 125°C until the mass change is < 0.005% over 1 minute.

Tensile (D638): Dogbone Style IV, 100% fill, diagonal line fill. Dimensions: 5mm thick. See drawing for other dimensions.



Hardness (D2240): Solid testing block.

Dimensions:
2"L x 2" H x 0.75" W

Impact (D256): Un-notched test specimen, notch added post print by testing facility.

Dimensions:
2.5" L x 0.125" H x 0.5" W

Abrasion (D4060): Rectanglar block sized to fit tabor abrader.

Dimensions:
5" L x 0.5" H x 0.5" W

HDT (D648): Bar shape.

Dimensions:
7.5" L x 0.125" H x 0.5" W

A.5 LAuF sluttrapport

Title:

Additive Manufacturing in urban areas: An orthopaedic example.

Abstract: (150 Words)

Additive Manufacturing (AM) offers completely new digital process chains in the Industry 4.0 context: We show an insole for people with diabetic foot syndrome as example. This sole must have a varying local stiffness to decrease the load at damaged areas of the foot. In the approach, many small elastic elements with individual pre-calculated stiffness are 3D-printed in the sole. The project aims to reach finer resolution, good reproducibility, easy changeability and a quick production compared to manual production. The project utilises SLS technology, due to the required high resolution of the fine elastic elements. Desktop SLS machines are available - lowering the threshold to realize local process chains. New elastic powder materials for SLS are developed and tested. AM technology will not be disruptive for (mass) production processes in general. However, in areas where the strength of AM can be fully utilised, it will be a game changer.

Keywords:

Selective Laser Sintering, material, TPU, elastic, process chain, orthopaedics, insole, diabetic foot syndrome

Text:

Introduction

In Germany, approx. 5.9 million adults are suffering from diabetes. This number will increase by 1.5 million until 2030 due to the impact of »modern« lifestyle and food habits. Diabetes already causes a major part of the costs in the public health sector.

Many diabetes patients are affected by diabetes foot syndrome: The diabetics loose the sense abilities in the foot and therefore do not feel pain or recognise an overload of certain areas of the foot. Furthermore, healing is slower for diabetics due to reduced blood circulation. Therefore, if the skin becomes damaged often ulcer relapses develop which lead to further deformations of the foot, which make the foot even more prone to injury. In the end, this results in approx. 40 000 amputations of foot per year in Germany.

To avoid diabetes foot syndrome (DFS), patients are supplied with tailor made shoes and so called diabetes-adapted foot insoles. The core of these insoles is an elastic layer with locally varying stiffness. Nowadays, these soles are put together from small pieces of foams with different stiffness: Soft foams to release the pressure from damaged zones and harder foams where the foot can still carry the load. Nowadays, orthopaedic shoemakers produce the insoles by hand.

In the project, Selective Laser Sintering (SLS) is used to manufacture the insoles **(Fig. 1)** Compared to other AM methods SLS offers several advantages, which makes it the dominating method for manufacturing functional plastic parts by AM technologies in industry [GEBHARD2013]. The ratio of functional parts to prototyping already reached approx. 50% for SLS and further increases. SLS uses thermoplastic materials, which offer long-term stability, contrary to »like« materials of resin based methods (SLA, DLP, MJF, CLIP). A drawback is that the number of materials is still limited for SLS. Therefore, in this project new elastomeric materials for SLS are investigated. Furthermore, compared to FDM, no support is required for SLS parts, which is essential for the sophisticated elastic structures in the soles. Further drawbacks of the SLS method are rough surfaces of the final parts, the more laborious handling of the powder materials and the higher costs of the machines. However, these are considered not to be essential for the case here. Nowadays, Desktop SLS machines become available, e.g. offered by Sintratec, SinterIT or Formlabs, which might be suited to establish local production of SLS parts. This avoids long transports and reduces the time to finalize the part. The materials developed are tested on a Sintratec Kit desktop machine.

Materials

For all AM technologies, the properties like elasticity and strength of the final part are not only determined by the properties of the bulk material used but can also be influenced by the design of the elements and structures in the part, because complexity is not an issue for AM technologies (»Complexity for free«). These are so called digital material properties.

Nevertheless, the material properties and digital properties should match as closely as possible to obtain good properties of the parts. The dominating material for SLS is polyamide 12 (PA12) [Schmidt 2015, Wohlers2017] which is not suited for insoles due to its stiffness and brittleness. Besides PA12, the number of materials for SLS is limited, because the material must combine with different properties: The powder must be free flowing, especially at elevated temperatures. The polymer must form smooth melt layers without any external force except gravity, which requires a low zero-shear viscosity and a low surface tension of the melt.

Therefore, in this project thermoplastic elastomers based on polyurethane (TPE-U or TPU) are used as basic materials. Some types with a Shore hardness of 92A or 97A are already commercially available. However, these materials are still quite stiff and therefore, new materials are investigated with a ShoreA hardness as low as 83A. The difference seems low; however, the Young’s modulus, which can be calculated from the Shore hardness, is lowered by approx. 50%. [Kunz2006]. Furthermore, a hydrolysis-stabilized version of TPU with a Shore hardness of 92A is developed and tested, because the insole needs to fulfil high hygienic standards, i.e. cleaning with hot water must be possible. With both materials, it is possible to produce small sample parts. **Figure 2** shows tension bars made of TPU 83A and in **Fig. 3** a stress-strain diagram of TPU83A is presented showing the outstanding elastic properties: Strains up to 600% are possible. However, so far the flowability of the powder is sufficient for small samples only. For a reliable and reproducible printing on a professional scale, the processing properties of the material must be improved further.

Technology

In the beginning of the development of new SLS materials in laboratory scale, often only very small quantities are available not sufficient to fill even a small commercial SLS machine (e.g. EOS Formiga P110). Therefore, a test rig is developed and realized, which offers the same process conditions as commercial machines regarding laser power, powder handling and temperatures, while it requires 500g auf powder only to produce a few specimen for material tests **(Fig. 4).** Furthermore, the test rig can easily modified to test new concepts of SLS hardware, e.g. new powder handling devices are tested which can handle less flowing powders **(Fig. 5).**

Reproducibility

Due to the limited space available inside the sole, the elastic elements have to be very thin. In the prototypes, structures with a thickness or a diameter of 1 to 2 mm are considered. This is close to the lower limit (0.7mm) of the SLS process, keeping in mind a maximum particle size of <125 micron for TPU and a laser spot size of approx. 300 to 400 micron. The accuracy of SLS is typically assumed to be 0.1 mm. This is sufficient in most cases. However, in our case, it already means a relative deviation of 10%, due to the small dimensions of the elastic elements (1mm). Furthermore, this is equivalent to a deviation of the area by 21%. Even worse, the elastic elements are mostly loaded by bending forces and the moment of inertia of a (straight) bending bar depends on the diameter powers four, causing a deviation of 46% in the stiffness of the bending bar. This deviation is too high from a medical point of view, because the real stiffness of the sole must be close to the calculated and desired value. Therefore, the development of materials with reduced bulk stiffness is beneficial, because than the thickness of the elastic elements could be increased holding the total stiffness constant while reducing the relative error.

The main reason for the deviation is the boundary layer between the molten part and the surrounding powder bed. The influence of the boundary layer is investigated by printing specimen with different thickness but same width. The strength of the samples is examined by tension or bending tests **(Fig. 6).** Fitting the results and extrapolating the regression curve to zero load, a thickness of about 0.2 mm remains. This is assumed twice the boundary layer which does not contribute to the stiffness of the part. The part thickness has to be increased by this thickness to obtain the desired stiffness of the elements. The specimen were built on different machines of EOS and 3DSystems, which uses slightly different scanning strategies, and with different orientations in the build chamber. This results in different properties of the elastic elements. Therefore, to establish a reliable process chain and to obtain results expected, it is essential to define detailed rules for the manufacturing process and to carefully calibrate and maintain each machine regularly. It is not possible to manufacture the part at varying, arbitrary service providers.

It is possible to produce specimen of TPU materials with the Sintratec Kit desktop SLS machine. The machine can handle the material. However, in the moment the machine cannot yet deliver the required high reproducibility and precision.

Design and Digital material properties

The foot of the diabetics is 3D scanned to obtain the contour. This contour is not sufficient to form the insole, yet, because it has to be modified and adapted according to the medical needs of the diabetics by an orthopaedic expert. Finally, this determines the upper surface of the insole. The bottom surface has to fit to the shoe and is usually flat. The minimum thickness of the sole is 6mm in the area of the toes. The sole is divided in irregular cubes with a size of approx. 5x5x5 mm^3 and each cube contains an elastic element, whose stiffness is chosen according to the medical needs and the stiffness required at this position **(Fig. 7)** **[**ZIEGLER2016].

Each element consists of two Tripods on top of each other **(Fig. 8).** These structures allow large deformations compared to their length. Furthermore, the two tripods can be designed differently, resulting in more sophisticated stress – strain relations. **Figure 9** shows that the structures develop a plateau where the stress is constant for a large strains, which is beneficial for a good load distribution of the insole. The elements are parametrized and the stiffness of the elements is pre-calculated for different sets of parameters. The algorithm then chooses an element with the correct parameters for the stiffness desired at this position, considering the effects of the boundary layer **(Fig. 10).**

Cost & Ecologic Impact

Usually, the production rate of AM processes is very low compared to common mass production. E. g. a large industry-scale SLS machine (EOS P770) typically can produce 1 to 5 kg of plastic parts a day, resulting in a production rate of 0,04 to 0,2 kg/hr. Allwood et al. [Allwood2011] showed, that in general energy efficiency dramatically drops when the production rate becomes low irrespective of the production method while for production rates above 10kg/hr the energy consumption is quite constant **(Fig 11)**. This means, that additive manufacturing is not sustainable per se as often proclaimed and it causes much higher costs compared to conventional manufacturing methods. If an AM process is suitable, depends heavily on the special application and has to be checked carefully in each case. However, if the potential of AM can be fully utilized, AM can be beneficial to the ecologic footprint and the cost.

Summary

The use of Selective Laser Sintering for the manufacturing of individual insoles for patients with diabetic foot syndrome is shown. The use of AM technologies is very feasible in this area, due to the fact, that each insole is an individual part but the general form of the insole does not vary too much. The insoles require a precision at the limit of actual SLS machines.

However, if the process chain is established carefully, the printing of insoles will be realizable in the near future.

This is an example utilizing the strength of an AM manufacturing process. However, due to high costs and low throughput AM technology will not and cannot compete with methods of mass production. It is not a disruptive technology for general mass production and going to replace it. Instead, it should be considered as a technology parallel to conventional production methods. It should be used where its advantages are fully utilized. On the contrary, AM will compete more with areas, which are nowadays dominated by manual work and highly individualized processes and parts.

Acronyms

CLIP Continuous Liquid Interphase production

DLP Digital Light Processing

FDM Fused Deposition Moulding (also called FFF)

MJF Multi jet Fusion (Inkjet technology)

SLS Selective Laser Sintering

SLA Stereo Lithography

Acknowledgement

An Acknowledgement is required for the public founding and mentioning the other partners of the project.

References and Notes:

[ALLWOOD2011] J. M. Allwood, M. F. Ashby, T. G. Gutowski and E. Worell: Material efficiency: A white paper; Resources, Conservation and Recycling 55 (2011) 362-381

[GEBHARD2013] A. Gebhard: Generative Fertigungsverfahren [German]; Hanser (2013)

[KUNZ2006] Kunz; Determining the Modulus of Elasticity in Compression via the Shore A Hardness; Kunststoffe International; 2006 (Available in English and German)

[SCHMIDT2015] M. Schmidt: Selectives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse, Werkstoffe [German]; Hanser (2015)

[WOHLERS2017] T. Wohlers: Wohlers Report; (2017, published annually)

[ZIEGLER2016] T. Ziegler, R. Jaeger, C. Koplin: A design, mechanical rating, and load adaptation method for cellular components for additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-10. (2016).

Tables, figure captions and figures:

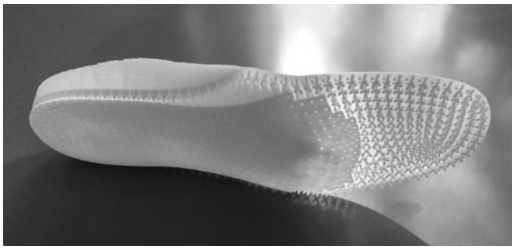


Fig. 1: Prototype of diabetic foot insole

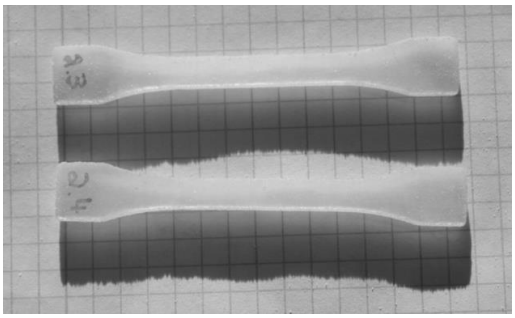


Fig. 2: Tension bars of TPU83A

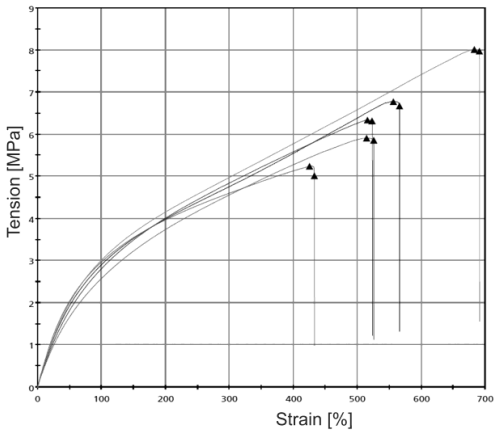


Fig. 3: Stress-Strain-diagram of TPU83A

Fig. 4: Test rig for quick testing of SLS materials

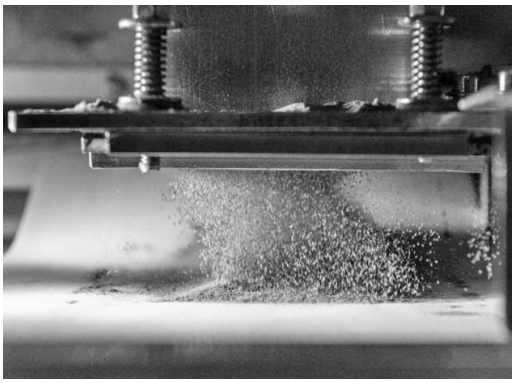


Fig. 5: New powder handling device

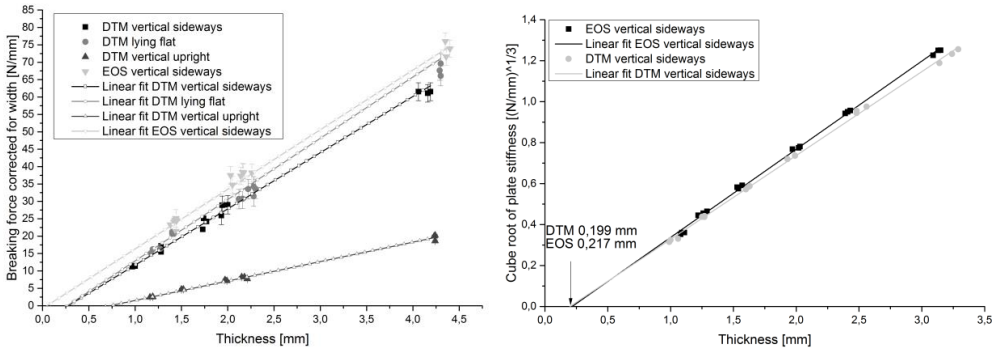


Fig 6: Influence of the boundary zone; Stiffness vs Thickness of the plate (Left: Tension experiment, right: bending experiment)

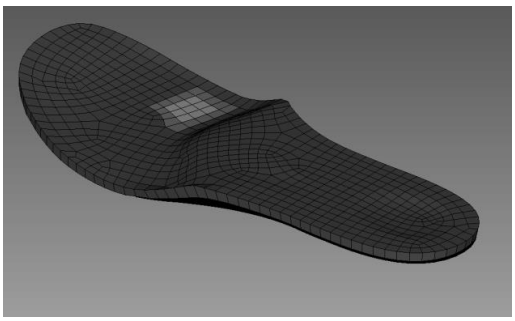


Fig 7: Insole with boxes for the elements. The marked area is filled with elements of reduced stiffness.

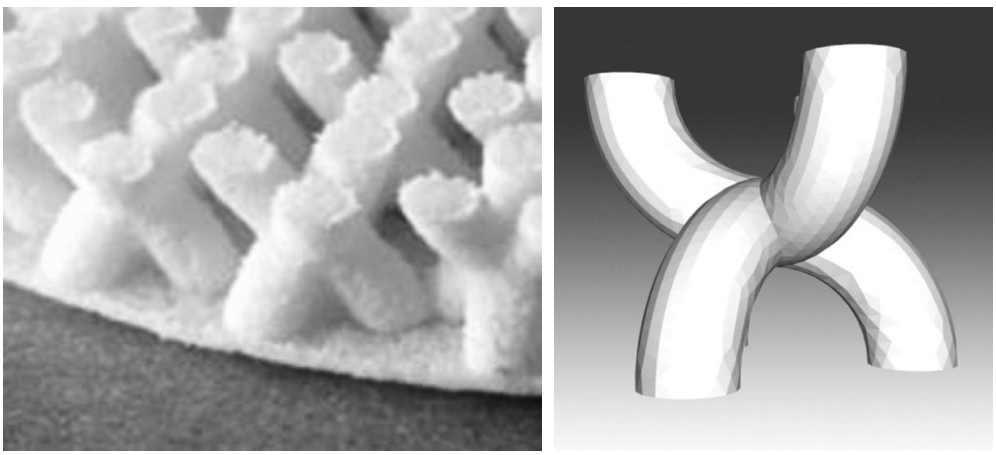


Fig 8: Tripod structure (elastic element); Real parts and digital model

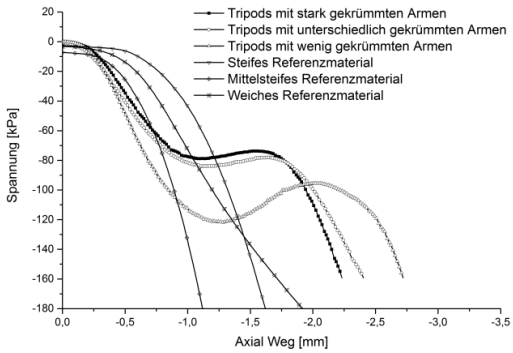


Fig. 9: Stress strain relations of Tripod elements.

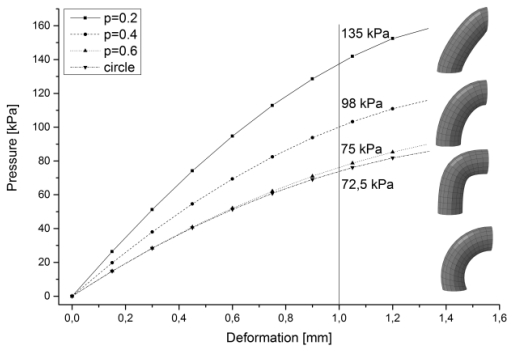


Fig. 10: Stiffness of various parametric designs of elastic elements

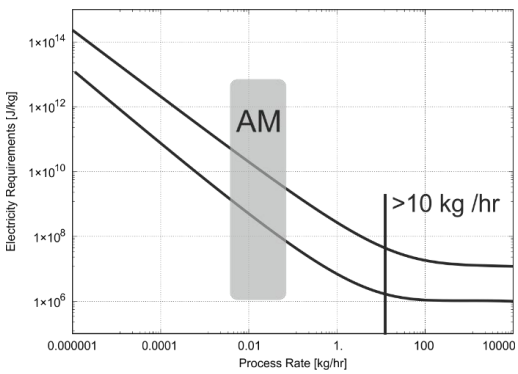


Fig. 11: Energy Consumption vs. Process Rate for various production processes. Data taken from Allwood et al. [Allwood2011] and modified