



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)

Tarkkuutta vaativan 3D-tulostimen valinta ja sen vertailua alihankinta- vaihtoehtoihin

Janne Ellonen

Opinnäytetyö, kesäkuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2023
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Janne Ellonen

Nimeke
Tarkkuutta vaativan 3D-tulostimen valinta ja sen vertailua alihankintavaihtoehtoihin

Toimeksiantaja
Medisize Oy

Tiivistelmä

Työssä selvitettiin 3D-tulostuksen mahdollisuutta hyvää mittatarkkuutta vaativien mitausjigien valmistukseen. Prototyypit tulivat aiemmin CNC-koneistettuna alihankkijoilta. Ongelmana olivat toimeksiantajasta riippumattomat pitkät toimitusajat. Tavoitteena oli valita yritykseen mahdollisesti hankittava oma tulostin, sekä verrata tätä tulostinta alihankintavaihtoehtoihin.

Valintamenetelminä käytettiin ominaisuusprofiiliperusteista valintamenetelmää. Työssä tutkittiin myös kustannuksia eri vaihtoehtojen välillä. 3D-tulostetut testitulosteet olivat suuressa roolissa vertailuissa ja niitä testattiin niiden varsinaisessa käyttötarkoituksessaan. Tulosteilla mitattuja mittatuloksia verrattiin CNC-koneistetulla vastaavalla mittausjigillä mitattuihin tuloksiin.

Laitevertailussa parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitunut laite omaksi 3D-tulostimeksi osoitautui alihankintaa paremmaksi vaihtoehdoksi. Tulosten perusteella 3D-tulosteilla voidaan korvata osittain koneistettuja prototyyppijä.

Kieli
suomi

Sivuja 49
Liitteet 4
Liitesivumäärä 29

Asiasanat
3D-tulostus, hankinta, prototyypit



THESIS
June 2023
Degree Programme in Machine Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author (s)
Janne Ellonen

Title
Selecting a 3D printer which requires precision and comparing it to the subcontracting options
Commissioned by
Medisize Oy

Abstract

The thesis investigated the possibility of 3D printing for the manufacture of measuring jigs that require high dimensional accuracy. The prototypes previously came CNC-machined from subcontractors. The main problem was the long delivery times independent of the client. The goal was to choose a printer that could be purchased for the company, as well as to compare this printer with subcontractor options.

A feature profile-based selection method was used as the selection methods. The work also examined the costs between the different options. 3D-printed test prints had major role in comparisons and those were tested for their actual purpose of use. The measurement results measured with the prints were compared with those measured with a CNC machined equivalent measuring jig.

In the device comparison, the device chosen as the best alternative for the own 3D printer proved to be a better alternative than subcontracting. Based on the results, 3D prints can be used to replace partially machined prototypes.

Language
Finnish

Pages 49
Appendices 4
Pages of Appendices 29

Keywords
3D-printing, Acquisition, Prototypes

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Yleistä 3D-tulostamisesta	6
2.1	Perusasioita	6
2.2	Tulostusmenetelmät	9
2.2.1	Nestepohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät	9
2.2.2	Kiinteäpohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät	11
2.2.3	Jauhepohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät.....	13
2.3	3D-tulostus prototyyppien valmistuksessa	16
3	3D-tulostimen valintaprosessi	18
3.1	Mittausjigi.....	18
3.2	Prototyypiltä vaadittavat ominaisuudet	18
3.3	Valintaprosessi	19
3.3.1	Tuotteen tehtävän ja toimintojen kartoitus, vaatimusprofiilin laadinta, sekä esivalinta.....	19
3.3.2	Ominaisuusprofiilin laadinta ja painokertoimien määrittäminen	21
3.3.3	Demomallien valmistus ja uudelleenarvioinnit	24
4	Demomallien testaus	26
4.1	Testausmenetelmät	26
4.2	Ensivaikutelmat ja havainnot.....	26
4.3	Demotulosteiden värimallien vertailu	30
4.4	Toiminnallinen testaus	32
4.5	Materiaalit	35
4.6	Oman 3D-tulostimen vertailu alihankintaan	36
5	Kustannukset ja hintavertailua	38
5.1	Toimitusajat	38
5.2	Koneistus alihankintana.....	39
5.3	3D-tulosteet alihankintana	39
5.4	Oma 3D-tulostuslaitteisto.....	40
6	Tulokset	40
6.1	3D-tulostimen valinnan vertailuluvut	40
6.2	Alihankinnan vertailuluvut	41
6.3	Toiminnallisten testausten tulokset	42
6.4	Tulosten luotettavuuden arviointia	44
6.5	Johtopäätöksiä tuloksista.....	45
7	Pohdinta.....	45
	Lähteet.....	48

Liitteet

- Liite 1 3D-tulostustavan valintapuu.
- Liite 2 Vaatimus- ja ominaisuusprofiilien lähtöarvot sekä ominaisuuskohtaisia lukuja vertailulukujen määrittämistä varten.
- Liite 3 Kuvia ja värimalleja demojigeistä.
- Liite 4 Mittaustuloksia demojigien mittauksista.

1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Kontiolahdella sijaitseva Medisize Oy. Yritys on osa kansainväliseen Koch Industries -konserniin kuuluvaa Molexia. Yrityksen historia Pohjois-Karjalassa alkoi 1970-luvulla, kun muovialan yritys Perlos Oy avasi ensimmäisen tehtaansa Joensuuun. Yritysjärjestelyjen myötä Kontiolahden yksikkö eriytyi emoyhtiöstä ja sai myöhemmässä vaiheessa nykyisin käytössä olevan nimensä. Yritys tunnetaan paremmin toimintanimellään Phillips-Medisize, jonka Kontiolahden tehtaot valmistavat muovikomponentteja ja -koonpanoja sopimusvalmistajana kansainvälisille lääketeollisuuden yrityksille. (Phillips-Medisize 2023.)

Yrityksessä on herännyt kiinnostus 3D-tulostimen hankkimiseen tarkkuutta vaativien mittausjigien prototyyppien tulostukseen. Prototyypit tulevat tällä hetkellä alihankkijoilta koneistettuina, ja toimitusajat vaihtelevat päivistä useisiin viikkoihin. Kustannuksia syntyy sekä alihankinnasta, että toimitusajoista johtuvista projektien aikataulujen venymisistä. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selvittää, millainen 3D-tulostin olisi sopiva hyvää mittatarkkuutta vaativien prototyyppien valmistamiseen ilman jälkikäteen tapahtuvaa koneistusta. Työn tarkoitus on myös vertailla kustannuksia alihankintana valmistettuihin 3D-tulosteisiin. Työn ulkopuolelle on rajattu takaisinmaksuaikojen tai muiden taloudellisten laskelmien laskeminen.

Työssä on vertailun vuoksi myös melko yleisesti käytössä olevalla FFF-menetelmällä toimivalla Ultimaker 3 -laitteella tulostetut vertailukappaleet. Kappaleet on valmistettu tukirakenteineen PLA-muovista. Laitteella on mahdollista myös käyttää erillistä vesiliukoista materiaalia tukirakenteiden valmistamiseen. Sanotakoon, että kyseisellä laitteella on mahdollista valmistaa jonkin verran parempi-laatuksiakin tulosteita.

3D-tulostamisesta käytetään myös nimityksiä ”ainetta lisäävä valmistus”, ”materiaalia lisäävä valmistus”, sekä näiden englanninkielisiä nimityksiä ”Additive

Manufacturing”, lyhennettynä AM. Englanninkielisissä yhteyksissä käytetään myös usein lyhennettä 3DP, mikä on lyhenne sanoista 3 Dimension Printing. Tässä työssä tulen selkeyden nimissä puhumaan 3D-tulostamisesta.

2 Yleistä 3D-tulostamisesta

2.1 Perusasioita

Perusprosessi tulostamisen suurimmalle osalle laitteista on viisivaiheinen, joka muodostuu CAD-mallin tekemisestä, sen muuttamisesta STL-tiedostomuotoon, STL-mallin viipaloinnista, tulostamisesta, sekä tulostetun mallin puhdistamisesta ja viimeistelystä (Noorani 2018, 5). STL-mallin viipalointi tulostamista varten tarkoittaa mallin muuntamista 2D-kerroksiksi, joista ohjelma muodostaa G-koodin jokaiselle kerrokselle tulostamista varten. G-koodi on numeerinen ohjelmointikieli, jota käytetään automatisoitujen valmistusprosessien, kuten 3D-tulostimen tai CNC-koneistuskeskuksen ohjaamiseen. (Redwood, Shöffler & Garret 2017, 10.)

Tulostimen valinnassa tulee lähteä liikkeelle huomioimalla neljä osa-aluetta, jotka ovat terveys ja ympäristö, prosessi ja materiaali, 3D-tulostimen ominaisuudet, sekä hinta. Tulosteelta vaadittavien ominaisuuksien pitää olla ohjaavana tekijänä valintaprosessissa (Noorani 2018, 198).

3D-tulostimista lähtevä äänitaso ei lähtökohtaisesti aiheuta ongelmia, mutta osa tulostusmenetelmistä aiheuttaa myrkyllisiä huuruja, joten ilmanvaihto tulee huomioida tarvittaessa. Tuloste saattaa olla kuuma tulostuksen jäljiltä, joten se voi aiheuttaa palovammariskin. (Noorani, 2018, 198.) EU-alueella myytäviltä 3D-tulostimilta vaaditaan CE-hyväksyntä, sillä laitteet kuuluvat Euroopan unionin määrittämän konedirektiivin 2006/42/EY alaisuuteen. CE-merkinnän edellytyksenä on, että laite täyttää konedirektiivissä määritetyt turvallisuus- ja terveysvaatimukset. (European Commission, 2020.)

Tulostimia on useilla eri menetelmillä toimivia ja tulostusprosessin, sekä materiaalin valinnalla on erittäin suuri vaikutus lopputuotteeseen. Esimerkiksi Fused Deposition Modeling (FDM) -tulostimet ovat lähtökohtaisesti edullisempia Stereolitografia (SLA) tai Selective Laser Sintering (SLS) -tulostimiin nähden. SLA-menetelmällä päästään puolestaan tulosteen osalta parempaan pinnanlaatuun ja mittatarkkuuteen FDM-menetelmään nähden. SLS-menetelmällä valmistetut kappaleet ovat yleisimmin valmistettu polyamidipohjaisista jauheista. Menetelmällä on mahdollista valmistaa myös metallikappaleita. Huomioitavaa on myös se, että toiset tulostimet pystyvät tulostamaan useilla materiaaleilla, kun taas joillakin voidaan tulostaa ainoastaan yhtä materiaalia. Tämän takia on tärkeää perehtyä tarkasti siihen, millaisia materiaaleja milläkin tulostimella on mahdollista käyttää, ja mitkä ovat kunkin materiaalin hyvät ja huonot puolet. (Noorani 2018, 198.)

Ominaisuuksista kannattaa kiinnittää huomiota tulostimen nopeuteen, sekä resoluutioon. Mitä tarkempi resoluutio on, sitä parempia tulosteita pystytään teoriassa valmistamaan. Tarkka resoluutio ei suoraan kerro tulostimen tarkkuutta, sillä esimerkiksi pursotusmenetelmillä valmistetuilla tulosteilla esiintyy jäähtymisestä johtuvaa kutistumista. Myös laitteiden käyttöjärjestelmäversiolla voi olla vaikutusta tulosteiden laatuun. Laittevalmistajilta voi yleensä tilata valmiita mallitulosteita lähempää tarkastelua varten. Prototyypitulosteissa tulee kiinnittää huomiota tulosteiden mittatarkkuuteen, pinnanlaatuun, sekä kestävyteen. Näissä ominaisuuksissa esiintyy eniten vaihtelua eri materiaalien, sekä valmistusmenetelmien välillä. (Noorani 2018, 199.) Laitteiden tarkkuudet ovat lähtökohtaisesti eriävät Z- sekä YX-suunnissa.

3D-tulostimien hintahaitari liikkuu muutamista sadoista euroista aina miljooniin euroihin asti. Hankintahintaan vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa tulostustilavuus, laitteen laatu ja tärkeimpänä tekijänä laitteen käyttämä tulostusmenetelmä. Uusia innovaatioita ja uudenlaista tekniikkaa sisältävät laitteet ovat lähtökohtaisesti kalliimpia kuin jo pitkään markkinoilla olleen menetelmän laitteet. Itse laitteen lisäksi tulee hankkia myös tulostusmateriaalit ja mahdolliset

ohjelmistot. Laitteesta aiheutuvat piilokulut tulee myös huomioida. Näitä ovat esimerkiksi käytön aikaiset kustannukset, huollot ja tulosteen jälkikäsittelyyn liittyvät laitteistot. Huomioitavaa on myös se, että laitteen hankinta voi vaatia sijoitettavaan tilaan muutoksia. Laite tulisi sijoittaa tilaan, jossa ei ole tärinää. Lämpötila ja ilmankosteus tulisi olla kontrolloituja, jotta ulkoisten tekijöiden vaikutus tulosteisiin saataisiin minimoitua. (Noorani 2018, 199–200.)

Termistö alalla on kirjavaa, mutta sille on olemassa standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 mukaiset suomennokset, jotka on listattu taulukossa 1. Taulukon mukaan englanninkielinen termi *material jetting* voi tarkoittaa sekä suihkutusta, että materiaalin suihkutusta suomennettuna. Yhdistämistyyppi on suihkutuksessa terminen ja materiaalin suihkutuksessa se puolestaan on kemiallinen. Taulukossa mainittujen polymeeripohjaisten materiaalien prosessiluokitusten lisäksi on olemassa erilliset prosessiluokitukset metallisille, sekä keraamisille 3D-tulostusmenetelmille. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2021, 25–27.)

<i>Tulostusmenetelmän prosessi- luokka englanniksi</i>	<i>Tulostusmenetelmän prosessi- luokka suomeksi</i>
Material extrusion	Pursotus
Material jetting	Suihkutus
Powder bed fusion	Jauhepetisulatus
Binder jetting	Sideaineen suihkutus
Material Jetting	Materiaalin suihkutus
Vat photopolymerization	Valokovetus
Sheet lamination	Kerroslaminointi

Taulukko 1. Standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 määrittämät suomenkieliset termit polymeerien tulostusmenetelmille. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2021, 25 & 58).

2.2 Tulostusmenetelmät

Tulostusmenetelmiä on lukuisia, mutta ne voidaan jaotella kolmeen pääkategoriaan. Nämä ovat neste-, kiinteä- ja jauhepohjaiset menetelmät. Taulukossa 2 on listattuna tarkkuuksia tulostusmenetelmittäin. Taulukon tiedot antavat hyvän suuntaa antavan kuvan, millaisilla tarkkuusalueilla milläkin menetelmällä liikutaan. Kuitenkin saman menetelmän sisällä voi esiintyä suuriakin vaihteluita laite- ja valmistajakohtaisesti.

<i>Tulostusmenetelmä</i>	<i>Tarkkuus</i>
FFF	+/- 0,5 %, alimmillaan +/- 0,5 mm
SLA/DLP	+/- 0,5 %, alimmillaan +/- 0,15 mm
SLS	+/- 0,3 %, alimmillaan +/- 0,3 mm
Material Jetting	Alimmillaan +/- 0,1 mm

Taulukko 2. Tulostusmenetelmien tarkkuuksia menetelmäkohtaisesti.

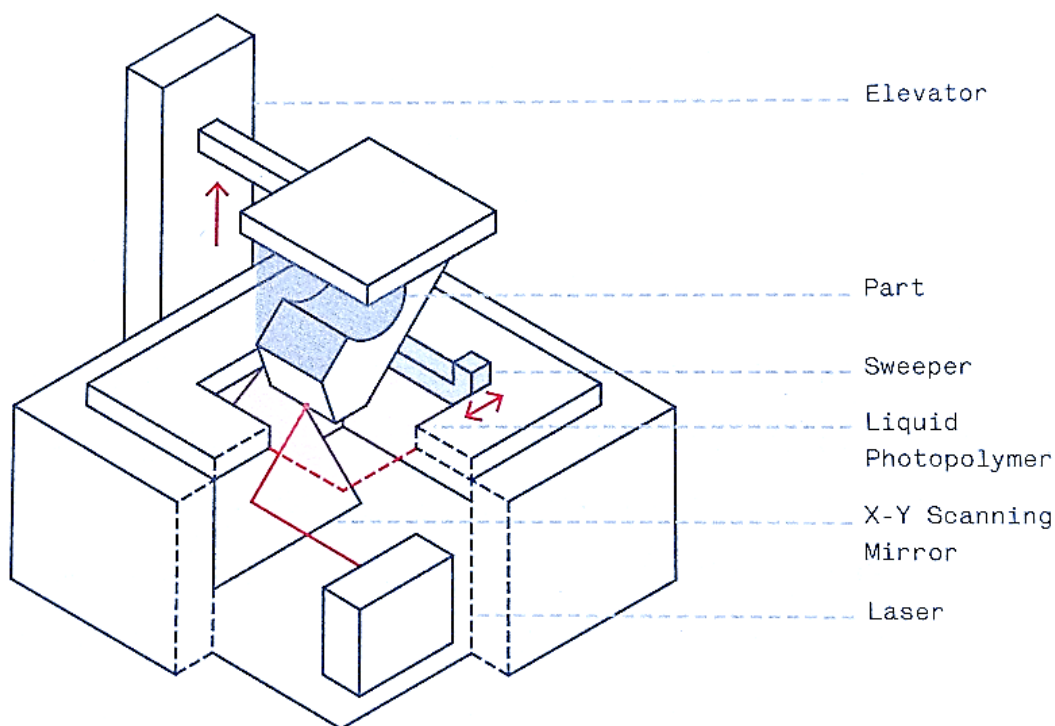
(Redwood ym. 2017, 34, 63, 81, 97)

2.2.1 Nestepohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät

Nestepohjaisten menetelmien toimintaperiaate perustuu lähtökohtaisesti neste-muodossa olevien fotopolymeerien kovettamiseen tietyllä valon aallonpituudella. Neste voi olla tulostimessa altaassa, tai se voidaan suihkuttaa tulostuspään kautta mustesuihkutulostukseen verrattavissa olevalla tavalla. Tämän jälkeen fotopolymeerejä sisältävä neste kovetetaan käyttäen vaadittua valon aallonpituutta. (Chee & Kah 2017, 37.) Näillä menetelmillä tukirakenteen uusio-käyttäminen ei ole mahdollista.

Näistä menetelmistä ehkä tunnetuin on kuvassa 1 oleva yhdysvaltalaisen 3D Systems'sin vuonna 1986 kehittämä valokovetus, mikä tunnetaan paremmin SLA-menetelmänä. SLA on lyhenne englanninkielisistä sanoista stereolithography apparatus. Menetelmässä neste on tulostimen altaassa ja se kovetetaan käyttäen UV-valoa. (Chee & Kah 2017, 37.)

Tämän menetelmän etuja valmistuksen näkökulmasta ovat mm. hyvä tarkkuus ja pinnanlaatu, sekä useat eri materiaalit. Heikkous liittyen SLA-menetelmään on puolestaan tukirakenteet, jotka on poistettava tulostuksen jälkeen. Tällä menetelmällä valmistetut kappaleet vaativat myös jälkikovuksen. Käytännön tasolla tämä tarkoittaa tulosteen altistamista jälkikäteen UV-valolle esimerkiksi tunnin ajaksi, jotta kovetusprosessi loppuu. (Chee & Kah 2017, 48–49.)



Kuva 1. SLA-menetelmän toimintaperiaate. (Redwood ym. 2017, 54)

Stratasys'n PolyJet-menetelmässä neste suihkutetaan tulostuspään kautta mustesuihkutulostukseen verrattavissa olevalla tavalla ja UV-valo kovettaa

nesteen kiinteäksi. Täten menetelmä on prosessiluokaltaan materiaalin suihkutusta. PolyJet-menetelmän tarkkuus Z-suunnassa voi olla jopa 16µm, minkä takia pinnanlaatu on hyvä ilman jälkikäsitteilyäkin. Fotopolymeerineste on ”kase-teissa”, joista se kulkeutuu letkuja pitkin tulostuspäähän. Täten käyttäjä ei joudu tekemisiin nesteen kanssa. Suurin etu muihin menetelmiin nähden on se, että usean eri materiaalin yhdistäminen samaan tulosteeseen on mahdollista tällä menetelmällä. Huonoina puolina mainittakoon, että tällä menetelmällä tukimateriaali on vesiliukoista, joten sen poistaminen tapahtuu käyttämällä vesisuihkua, mikä voi vahingoittaa kappaletta. (Chee & Kah 2017, 56–59.) Stratasys on kehittänyt tähän ongelmaan uuden vesiliukoisen WSS150 materiaalin, joka ei vaadi vesisuihkua, vaan vesialtaaseen upottaminen riittää tukimateriaalin liuottamiseksi (Stratasys 2021, 1).

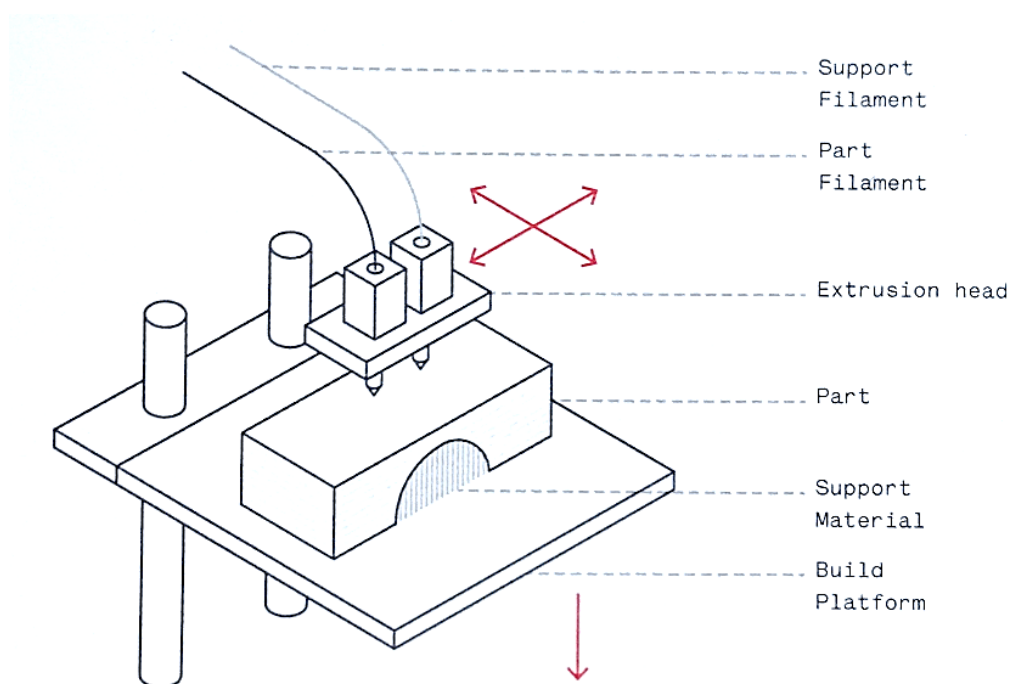
MultiJet Printing (MJP) -menetelmä on verrattavissa PolyJet-menetelmään, joten prosessiluokituksena on materiaalin suihkutusta. Suurimmat erot käyttäjän näkökulmasta tulevat siitä, että tällä menetelmällä ei voida yhdistää useaa eri materiaalia samaan tulostukseen. Lisäksi materiaalivalikoima on suppeampi verrattuna PolyJet-menetelmän laitteisiin. (Chee & Kah 2017, 60–68.)

2.2.2 Kiinteäpohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät

Nimensä mukaisesti näillä menetelmillä toimivien tulostimien tulostusmateriaali on lähtötilanteessa kiinteässä muodossa. Tämä tarkoittaa yleensä sitä, että materiaali on lankamaisessa muodossa kelalla. Menetelmän mukaan materiaali voi olla myös esimerkiksi arkkeina tai rakeina. (Chee & Kah 2017, 109.)

Kiinteäpohjaisista menetelmistä tunnetuin on Stratasys'n vuonna 1989 kehittämä Fused Deposition Modelling (FDM) (Chee & Kah 2017, 109). Tästä menetelmästä käytetään myös nimitystä Fused Filament Fabrication (FFF) (Redwood ym. 2017, 28). Prosessiluokkana puhutaan pursotuksesta, sillä lähtöaineena oleva materiaali on filamenttimuodossa. Tulostuspää sulattaa filamentin, jonka

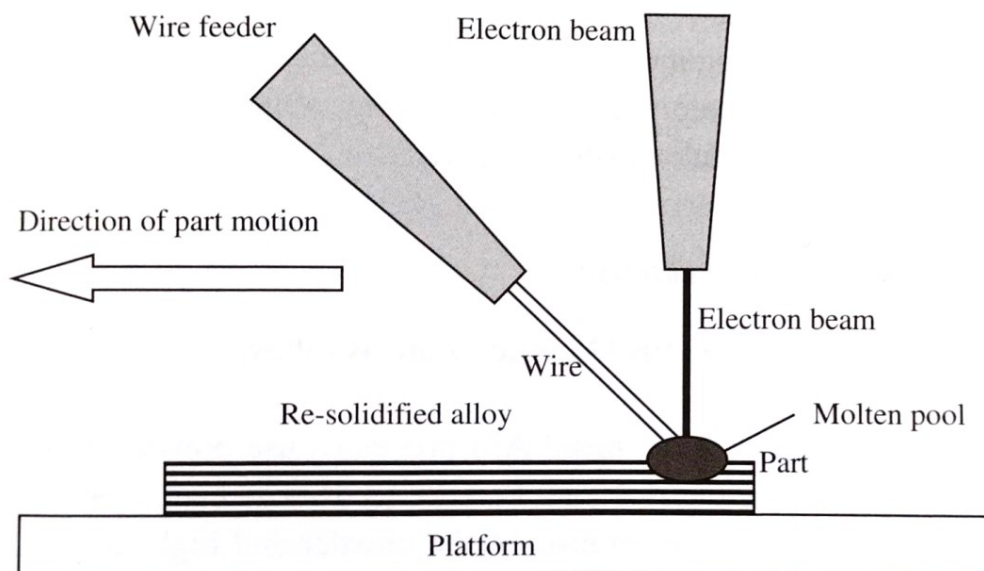
jälkeen sula materiaali pursotetaan suuttimen läpi (Redwood ym. 2017, 28). Tällä menetelmällä voidaan valmistaa täysin toimivia prototyyppisiä, koska esimerkiksi ABS-muovista valmistetuilla tulosteilla on hyvin samankaltaiset ominaisuudet, kuin ruiskupuristuksella valmistetuilla. FDM-menetelmällä ABS-muovista valmistettujen tulosteiden kestävyys on noin 85 % ruiskupuristettuihin kappaleisiin nähden. Erikoisfilamenteilla voidaan päästä vielä lähemmäksi ruiskuvaluttujen osien ominaisuuksia. Myös jälkikäsittelyn tarve on pieni ja materiaalien vaihto on helppoa tällä menetelmällä. Suurin heikkous on tulosteiden mittatarkkuus. Ongelmia aiheuttavat lisäksi karkea pinnanlaatu sekä jäähtymisestä aiheutuvat vaikeasti ennakoitavat kutistumaerot. (Chee & Kah 2017, 109–119.)



Kuva 2. FDM-menetelmän toimintaperiaate. (Redwood ym. 2017, 28)

Metallin tulostaminen on mahdollista Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) -menetelmällä. SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 (2021) standardin sivulla 25 määritetty prosessiluokitus on suorakerrostus. Kuvan 3 mukaisesti EBAM-menetelmällä syötetään metallilankaa, johon kohdistetaan elektronisäde, mikä sulattaa langan. Etuihin lukeutuu laaja materiaalikirjo, sekä erityisesti metallin tulostamisen näkökulmasta edullisemmat käyttökustannukset verrattuna

jauhepohjaisiin tulostusmenetelmiin. EBAM-menetelmällä ei kuitenkaan ole mahdollista tulostaa tarkkoja yksityiskohtia, eikä pinnanlaatu ole kovin hyvä. Hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi tuloste joudutaan koneistamaan jälkikäteen. (Chee & Kah 2017, 124–129.)



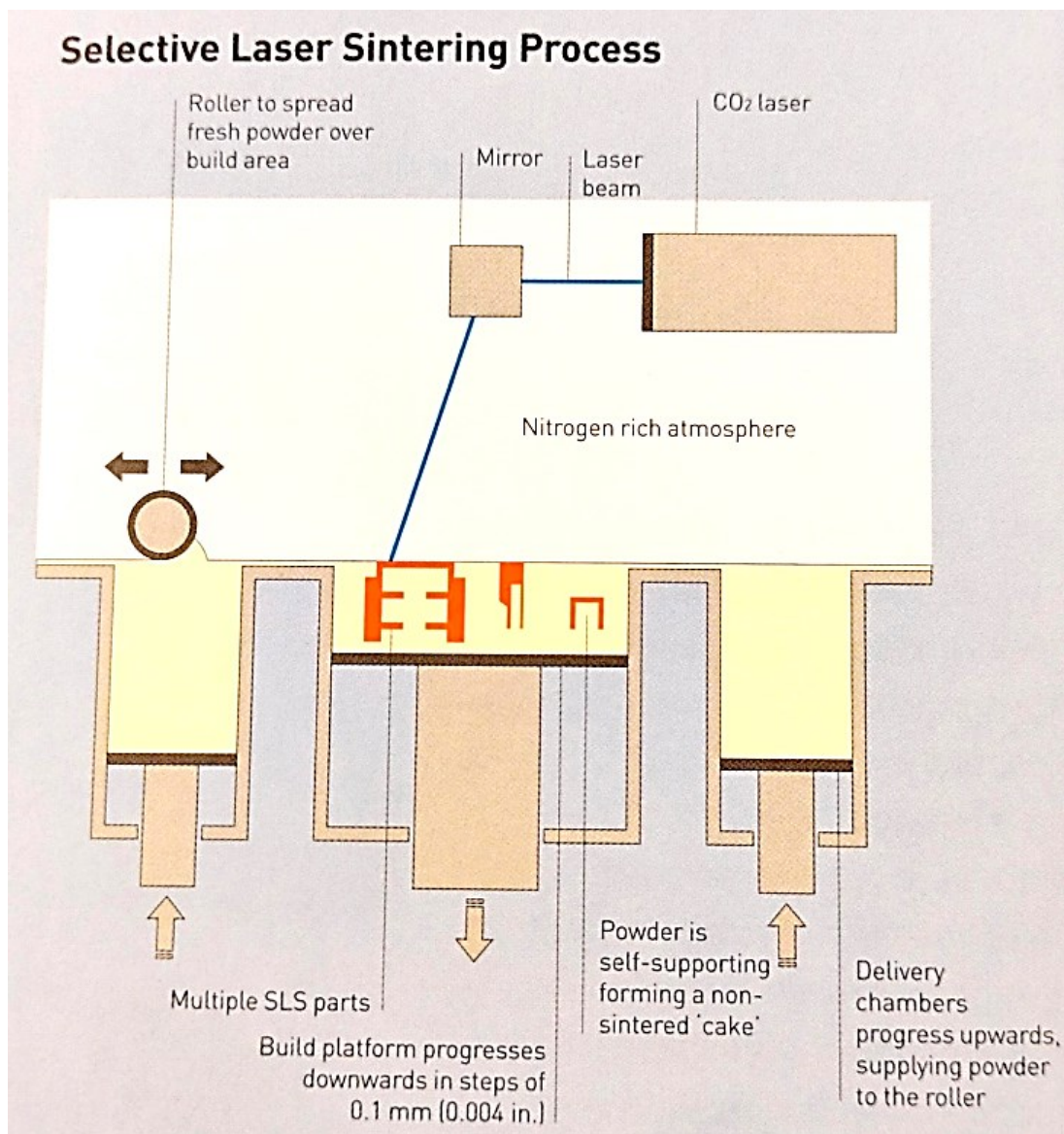
Kuva 3. EBAM-prosessi. (Chee & Kah 2017, 127)

Mainittakoon vielä Mcor Technologies'n vuonna 2005 Selective Deposition Lamination (SDL) menetelmä. Tämä tunnetaan myös nimellä paperin 3D-tulostus. Tässä raaka-aineena on paperi, joka tulostetaan, leikataan muotoon, ja kerrokset liimataan toisiinsa kolmiulotteisen mallin saamiseksi. (Chee & Kah 2017, 119–123.)

2.2.3 Jauhepohjaiset materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmät

Edellä mainituista menetelmistä eroten seuraavissa menetelmissä raaka-aine on jauhemaisessa muodossa ennen tulostusprosessia. Jauhemainen raaka-aine sulatetaan muotoonsa kerros kerrallaan. (Chee & Kah 2017, 137.)

Kuvassa 4 oleva yleisin jauhepohjainen tulostusmenetelmä on 3D Systems'n kehittämä SLS, eli jauhepetisulatus. SLS-menetelmällä jauhe tasataan rullalla, jonka jälkeen laserilla sintrataan kappale kerros kerrallaan. (Chee & Kah 2017, 138.)

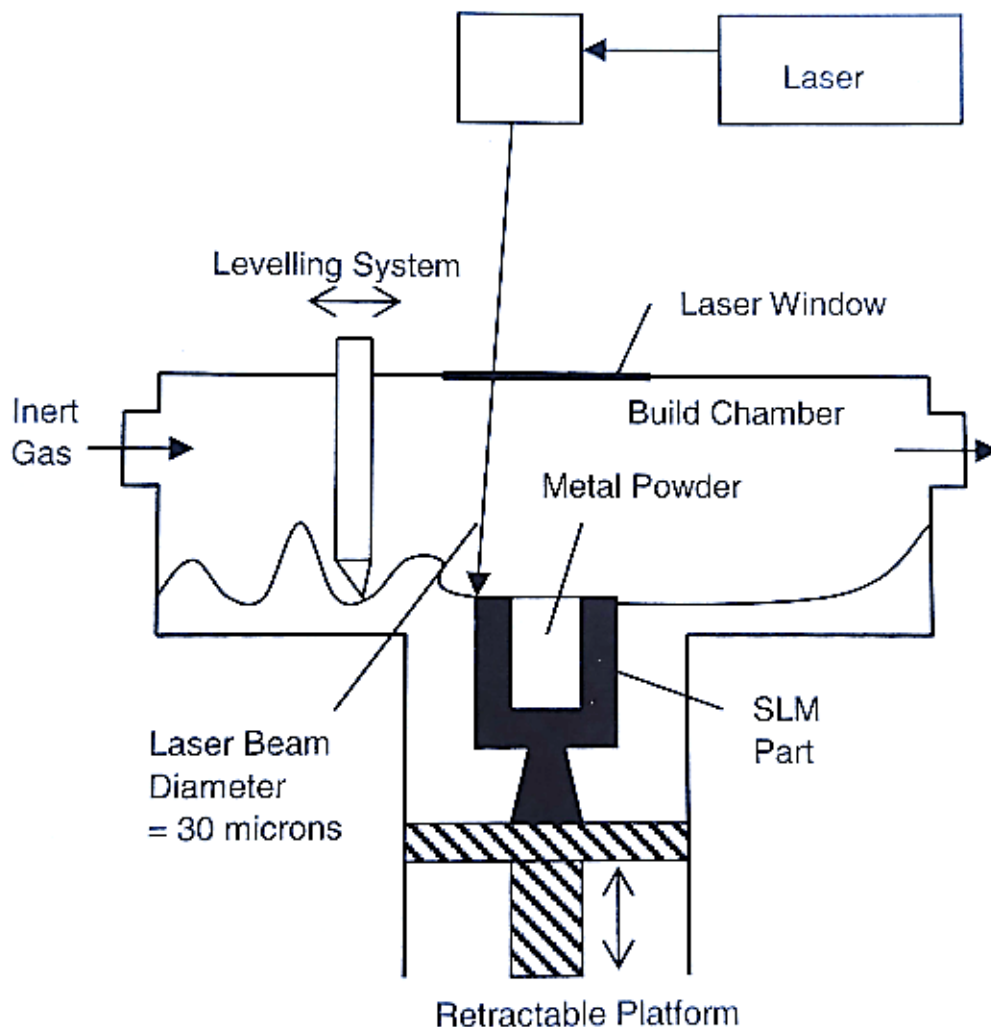


Kuva 4. SLS-menetelmän toimintaperiaate. (Thompson 2007, 235)

SLS-menetelmällä ei ole tarvetta erillisille tukirakenteille, koska kappale valmistuu jauheen sisään. Täten käyttämätön jauhe toimii itsessään tukirakenteena. Menetelmällä on käytettävissä erittäin laaja materiaalivalikoima, sillä periaatteessa kaikkia jauhemaisessa muodossa olevia materiaaleja pystytään käyttämään lähtöaineena SLS-menetelmällä. Lähtökohtaisesti materiaalikirjoa

rajoittava tekijä on laite, mikä rajaa käytettävissä olevan materiaalivalikoiman esimerkiksi muutamiaan polyamidipohjaiseen materiaaliin. Jälkikövetusta tulosteille ei ole tarvetta tehdä, mutta ne tulee puhdistaa käyttäen esimerkiksi paineilmaa tai lasikuulapuhallusta. Pinnanlaatu ei ole yhtä tasainen SLA-menetelmään nähden. SLS-laitteiden virrankulutus on yleensä suurta, johtuen sintraukseen käytettävän laserin vaatimasta korkeasta tehosta. Laitteet ovat myös melko suuria verrattuna muilla menetelmillä toimiviin 3D-tulostimiin. (Chee & Kah 2017, 138–148.)

Selective Laser Melting (SLM) -menetelmässä on yhtäläisyyksiä SLS-menetelmään. Kuvan 5 mukaisen toimintaperiaatteen omaava SLM kuuluu prosessiluokitukseltaan jauhepatisulatukseen. Suurimpana erona SLS-menetelmään on se, että tällä menetelmällä metallijauhe sulatetaan, jolloin tulosteen tiheydeksi tulee lähes 100 %. Näin ollen kappaleiden mittatarkkuus, sekä kestävyys ovat parempia verrattuna SLS-menetelmään. Käytettäviä jauhemuodossa olevia metallimateriaaleja on paljon. Tälläkin menetelmällä haittapuolina ovat laitteiden suuret koot, sekä suuri sähkön kulutus. (Chee & Kah 2017, 140–152.)



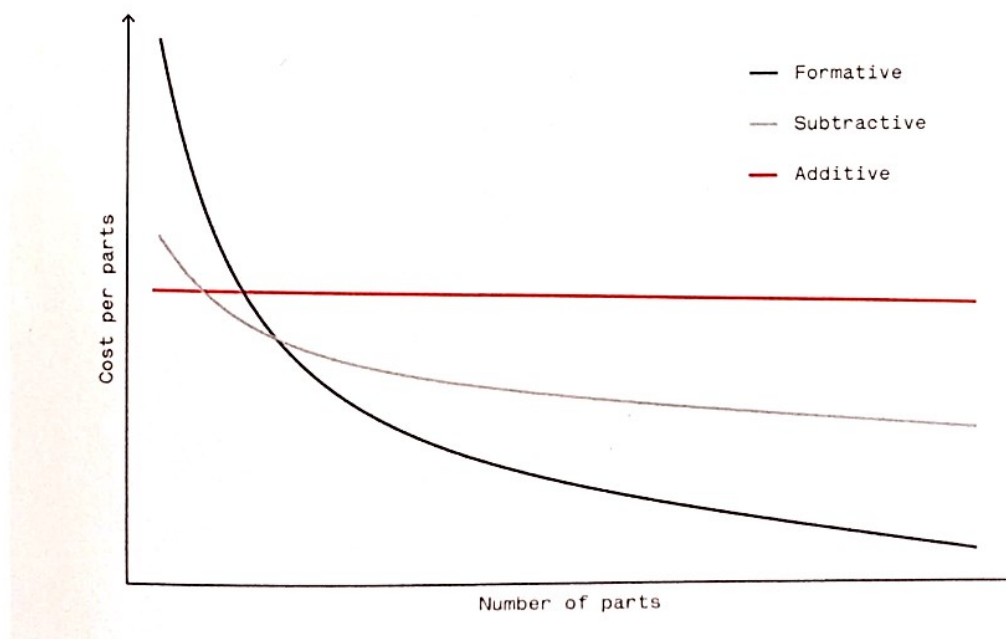
Kuva 5. SLM-menetelmän toimintaperiaate (Chee & Kah 2017, 151).

Hewlett-Packardin vuonna 2014 esitellyllä MultiJetFusion (MJF) -menetelmällä HP lupaa tulosteille korkeaa mittatarkkuutta ja tarkkoja yksityiskohtia. Rajoittavana tekijänä on materiaalivalikoima, joka rajoittuu lähinnä muutamaa nylon-pohjaiseen materiaaliin. (Chee & Kah 2017, 140–152.)

2.3 3D-tulostus prototyyppien valmistuksessa

Prototyypit ovat aina yksittäis- tai piensarjavalmistaisia, joten niiden tuottaminen ainetta lisävin menetelmin on kuvan 6 mukaisesti kustannustehokkain vaihtoehto. Kuvasta 6 ilmenee myös, että kappalemäärien kasvaessa muut

valmistusmenetelmät olisivat 3D-tulostukseen nähden kustannustehokkaampia vaihtoehtoja.



Kuva 6. Muovaavien, ainetta poistavien ja ainetta lisäävien menetelmien valmistusmäärien vaikutus kappalehintaan. (Redwood ym. 2017, 9)

3D-tulostuksen etuihin lukeutuu muun muassa se, ettei valmistettavan kappaleen geometrialla ole vastaavia valmistuksellisia rajoitteita, mitä muilla menetelmillä on. Hankinta ei vaadi panostusta kalliisiin työkaluihin, mikä omalta osaltaan vähentää tuotannon aloituskustannuksia. Suurin haittapuoli puolestaan on se, ettei 3D-tulostamalla voida materiaalien ominaisuuksien puolesta päästä samalle tasolle muovaavien- tai materiaalia poistavien tekniikoiden kanssa. Tulostuksen haasteena on myös toistettavuus. Tämä voi esiintyä sattumanvaraisina pieninä mittamuutoksina tai vääntyilyinä johtuen jäähtymisestä tai jälkikovetuksesta. (Redwood ym. 2019, 7–9.)

3 3D-tulostimen valintaprosessi

3.1 Mittausjigi

Mittausjigi on kiinnitinratkaisu, jonka tarkoituksena on asemoida mitattava kappale kiinnittimeen toistuvasti yhtenevällä tavalla. Mikäli mitattava kappale ei asemoidu jokaisella kerralla riittävän yhtenevällä tavalla, mittatuloksia ei voida pitää luotettavina. Luotettavuutta voidaan arvioida esimerkiksi mittaamalla samaa kappaletta useasti samassa jigissä. Mikäli kappale ei asemoidu samalla tavalla, saadaan jokaisella mittauksella eroava tulos edelliseen mittaukseen nähden.

Lähtökohtaisesti voidaan sanoa, että mikäli yritys valmistaa massatuotantona viidestä erilaisesta osasta muodostuvaa kokoonpanoa, tarvitaan parhaimmillaan viisi erilaista mittausjigiä. Näiden lisäksi voidaan tarvita vielä kuudes valmiin kokoonpanon mittaamiseksi. Näistä jokainen on suunniteltava ja valmistettava yksilöidysti mitattavan kappaleen piirustuksessa määritettyihin tärkeisiin mittaposi-tioihin perustuen. Kuitenkin, mikäli esimerkiksi kaksi mitattavaa osaa tai komponenttia on hyvin samankaltaisia, on hyvällä suunnittelutyöllä mahdollista käyttää yhtä jigä kummankin mittaamiseen.

3.2 Prototyypiltä vaadittavat ominaisuudet

Laitteen valinta tulee aloittaa listaamalla prototyypiltä vaadittavia ominaisuuksia. Tulostusmenetelmien rajaamisen apuna käytän liitteessä 1 olevaa päätöspuuta. Ruiskuvalettujen osien mittausjigien prototyypeiltä vaaditaan mahdollisimman tarkkaa toleranssia ja tasaista pinnanlaatua, joten liitteen 1 mukaisen päätöspuun perusteella valitaan tarkempaan tarkasteluun Material Jetting- ja SLA-menetelmät. Tarkoitus on selvittää myös tämän työn ulkopuolelta mahdollisuus valmistaa mittausjigejä prototyypikäytön lisäksi pidempiaikaiseen käyttöön. Tämän takia vertailuun on otettu myös mukaan SLS-menetelmä.

3.3 Valintaprosessi

Valintaprosessi on usein hankala ja aikaa vaativa vaihe, mutta siihen kannattaa panostaa, jotta lopputulos olisi varmasti onnistunut. Prosessin tavoitteena on löytää tuote, joka täyttää mahdollisimman hyvin siltä vaaditut ominaisuudet. (Koivisto, Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, Tuomikoski 2008, 249)

Valintamenetelmiä on olemassa useita, mutta seuraavissa vaiheissa käytetään ominaisuuksien painokertoimiin perustuvaa menetelmää sovellettuna. Tämä menetelmä muodostuu alla listatuista vaiheista:

- tehtävän ja toimintojen kartoitus
 - vaatimusprofiilin laadinta
 - valintastrategian päättäminen
 - esivalinta
 - ominaisuusprofiilin valinta
 - vaatimusten ja ominaisuuksien yhteensovittaminen
 - prototyypin tai tuotteen valmistus
 - käyttöseuranta
 - mahdolliset uudelleen arvioinnit ja paluu johonkin aiempaan vaiheeseen.
- (Koivisto ym. 2008, 249)

3.3.1 Tuotteen tehtävän ja toimintojen kartoitus, vaatimusprofiilin laadinta, sekä esivalinta

Ensimmäinen vaihe on kartoittaa halutut vaatimukset, jonka jälkeen niistä muodostetaan vaatimusprofiili. (Koivisto ym. 2008, 249) Vaatimuksien kartoittaminen on pohja koko vertailulle ja asetettavat vaatimukset voivat esimerkiksi 3D-tulostimen kohdalla pohjautua sekä tulosteelta vaadittaviin ominaisuuksiin, että käytettävyyteen liittyviin asioihin.

Vaatimusprofiiliin tulee nimensä mukaisesti olla listattuna kaikki laitteelta vaadittavat ominaisuudet, perustuen vaatimusten kartoitukseen. Listaus tulee

suorittaa aihealueittain. Vaatimuksien aihealueina voivat olla esimerkiksi toimintojen, ympäristön, valmistuksen, sekä kustannusten asettamat vaatimukset. Näiden aihealueiden alle tulee kirjata haluttuja vaatimuksia. Vaatimuksien alle puolestaan tulee kirjata ylös tarkemmin, miten kyseinen vaatimus ilmenee. (Koivisto ym. 2008, 249–250.) 3D-tulostimen valinnan kohdalla vaatimusprofiili muotoutui kuvan 7 mukaiseksi.

Vaatimusprofiili 3D-tulostimelle

<p>Toimintojen vaatimukset</p> <p><u>Mittatarkkuus</u> Tulosteiden toleranssit tulee olla mahdollisimman lähellä nominaaliarvoa.</p> <p><u>Pinnanlaatu</u> Pinnan oltava mahdollisimman tasainen.</p> <p><u>Käyttöikä, tuloste</u> Tulosteiden tulee kestää kevyttä mekaanista käyttöä noin vähintään 6kk. Toivomus käyttöiälle väh. 12kk.</p> <p><u>Käyttöikä, laite</u> Laitteen tulee kestää kevyellä käytöllä vähintään viisi vuotta.</p> <p><u>Materiaalivalikoima</u> Laitetta tulee pystyä hyödyntämään myös muihin käyttötarkoituksiin.</p>
<p>Ympäristön vaatimukset</p> <p><u>Helppokäyttöisyys</u> Tulostamisen käyttö tulee onnistua tarvittaessa pienellä opastuksella keneltä tahansa.</p> <p><u>Jälkikäsittelyn määrä</u> Mahdollisimman vähän aktiivista työaikaa vaativa tulostusmenetelmä.</p>
<p>Kustannukset</p> <p><u>Hankinnan kustannukset</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Laitteen hinta Käyttöönoton kustannukset Käyttökoulutuksen määrä Jälkikäsittelylaitteistot Tilojen muutostyöt <p><u>Käyttökustannukset</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Tulostusmateriaali Huoltokulut Hukkamateriaalin määrä

Kuva 7. Vaatimusprofiili 3D-tulostimelle.

Seuraavana olevassa esivalintavaiheessa jätetään pois kaikkein epätodennäköisimmät vaihtoehdot. (Koivisto ym. 2008, 251) 3D-tulostinta valittaessa tässä vaiheessa voidaan rajata ulkopuolelle laitteita esimerkiksi materiaalien, tulostusmenetelmän tai hinnan perusteella.

3.3.2 Ominaisuusprofiilin laadinta ja painokertoimien määrittäminen

Ominaisuusprofiili on aina tapauskohtainen ja se ilmaisee, miten hyvin kukin vaihtoehto vastaa määrättyjä vaatimuksia. Ominaisuusprofiilin tulee antaa vastaus siihen, mitä ominaisuuksia asetetut vaatimukset edellyttävät sekä millainen minimikin ominaisuuden painoarvo on. Ominaisuusprofiilin tulee muuttaa vaatimukset vertailukelpoiseen muotoon. Kuvan 8 mukaisesti 3D-tulostimen osalta esimerkiksi hyvän pinnanlaadun ominaisuudeksi on määritetty kerrospaksuus. Näin on saatu määritettyä lukuarvo, jotta eri laitteita pystytään vertailemaan toisiinsa. Helppokäyttöisyys puolestaan on sellainen käsite, jonka jokainen kokee henkilökohtaisesti eri tavalla. Tällaisen vaatimuksen pukeminen numeraaliseen muotoon on hankalaa, mutta sen osalta voidaan käyttää arviointiasteikkona kokemukseen perustuvaa tietoa ja arvioida laitteita siihen perustuen. (Koivisto ym. 2008, 251.)

Ominaisuusprofiili 3D-tulostimelle

Vaatus	Ominaisuus
Toiminnot	
Mittatarkkuus	Tulosteen toleranssialue (mm).
Pinnanlaatu	Tulosteen kerrospaksuus (mm).
Käyttöikä, tuloste	Tulostusmenetelmä, SLS:n käyttöikä pidempi, kuin valokovetteisilla. Oletettu käyttöikä (kuukausia).
Käyttöikä, laite	Oletettu käyttöikä (vuosia).
Materiaalivalikoima	Saatavilla olevien materiaalien lukumäärä (kpl).
Käyttöympäristö	
Helppokäyttöisyys	Perustuen yleiseen tietämykseen. Arviointiasteikko: 1=Vaikein, 10=Helppoin.
Jälkikäsitteilyn määrä	Arvio yleisen tietämyksen perusteella. Aktiivista työaikaa vaativa jälkikäsitteilyaika (minutteina).
Kustannukset	
Hankinnan kustannukset	Oletettu hinta laitteelle vaadittavine oheislaitteineen käyttövalmiina (lukuarvona).
Käyttökustannukset	Tulostusmateriaalin hinta (lukuarvona).
Hukkamateriaalin määrä	Hyödynnettävän materiaalin suhde kokonaismateriaalikulutuksesta. Arvio (%).

Kuva 8. Ominaisuusprofiili 3D-tulostimen valintaa varten.

Ominaisuuksien lukuarvojen määrittämisessä voidaan joutua käyttämään arvioita, mikäli kyseistä ominaisuutta ei voida varmuudella määrittää. Tässä vaiheessa esimerkiksi mittatarkkuus joudutaan arvioimaan laitekohtaisesti valmistajien

tietoihin perustuen. Mikäli testausvaiheessa huomataan merkittäviä eroja arvioihin, tulee lähtöarvot päivittää todellista tilannetta vastaaviksi. Liitteessä 3 olevina arvoina on käytetty värimalleihin perustuvaa todellista mittatarkkuutta, joka on määritelty kunkin laitteen onnistuneimman tulosteen mukaan.

Taulukko tulee muodostaa kirjaamalla vasempaan reunasarakkeeseen ominaisuudet. Tämän jälkeen samat ominaisuudet kirjataan ylimmälle vaakariville.

Vertailussa verrataan kahta vaakarivillä olevaa ominaisuutta pystysarakkeessa olevaan ominaisuuteen, joista tärkeämpi kirjataan taulukkoon. Mikäli ominaisuudet ovat yhtä tärkeitä, kirjataan molemmat. Erityisen tärkeän ominaisuuden kohdalla voidaan painotusta tälle lisätä entisestään kirjaamalla tämä ominaisuus taulukkoon esimerkiksi muodossa 2A. Ominaisuustaulukossa on suotavaa käyttää esimerkiksi kirjaimia, jotta taulukko pysyy selkeämmin luettavana. Lopuksi taulukosta lasketaan alimmaisena olevalle riville kunkin ominaisuuden painoarvo. Tämä muodostuu laskemalla yhteen kunkin kirjaimen kokonaislukumäärä taulukosta. (Koivisto ym. 2008, 253.) 3D-tulostimelta vaadittujen ominaisuuksien kohdalla painokertoimet muodostuivat taulukon 3 mukaisiksi.

<u>Ominaisuus</u>	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Tulosteen mittatarkkuus (A)		A	A	A	A	A	A	A	A	A
Tulosteen pinnanlaatu (B)			A	B	B	B	B	B	B	B
Tulosteen vaatima jälkikäsitte- lyn määrä (C)				D	E	F	G	C	I	J
Tulosteen käyttöikä (D)					D	F	DG	D	D	J
Hukkamateriaalin määrä tulos- tettaessa (E)						EF	EG	E	E	E
Laitteen käyttöikä (F)							FG	F	F	F
Laitteen hankintahinta (G)								G	G	G
Materiaalikustannukset (H)									H	J
Helppokäyttöisyys (I)										J
Materiaalivalikoiman laajuus (J)										
Yhteensä, eli painokerroin	10	7	1	5	6	7	7	1	1	4

Taulukko 3. Ominaisuuksien painokertoimien määrittäminen.

Taulukon 3 mukaan suurimmat painoarvot määräytyvät mittatarkkuudelle, laitteen käyttöiälle, sekä laitteen hankintahinnalle. Vertailulukujen määrittämisessä ominaisuudet arvioitiin asteikolla nolasta kymmeneen. Parhaimman tuloksen omaavalle laitteelle annettiin määrittämisessä painoarvoksi kymmenen. Muiden vaihtoehtojen lukuarvot, sekä vertailuluvut laskettiin taulukossa 4 olevan kaavan mukaisesti. Käytetyt lähtöarvot ovat liitteessä 2.

Ominaisuus	Ominaisuuden painokerroin	Ominaisuus lukuarvona	Vaihtoehto A	Vaihtoehto B
1	W_1	M_1	$W_{1A} * M_{1A}$	$W_{1B} * M_{1B}$
2	W_2	M_2	$W_{2A} * M_{2A}$	$W_{2B} * M_{2B}$
3	--	--	--	--
n	W_n	M_n	$W_{nA} * M_{nA}$	$W_{nB} * M_{nB}$
Vertailuluvut			$\sum_{i=1}^n W_i M_{iA}$	$\sum_{i=1}^n W_i M_{iB}$

$M_i =$ ominaisuusprofiiliin kuuluvan ominaisuuden lukuarvo

$W_i =$ ominaisuuden painokerroin

$f =$ parhaimman vertailtussa olevan vaihtoehdon ominaisuuden arvo

$h =$ ominaisuuden arvo

$$M_i = 10 * \frac{f}{h}$$

Taulukko 4. Vertailulukujen määrittäminen

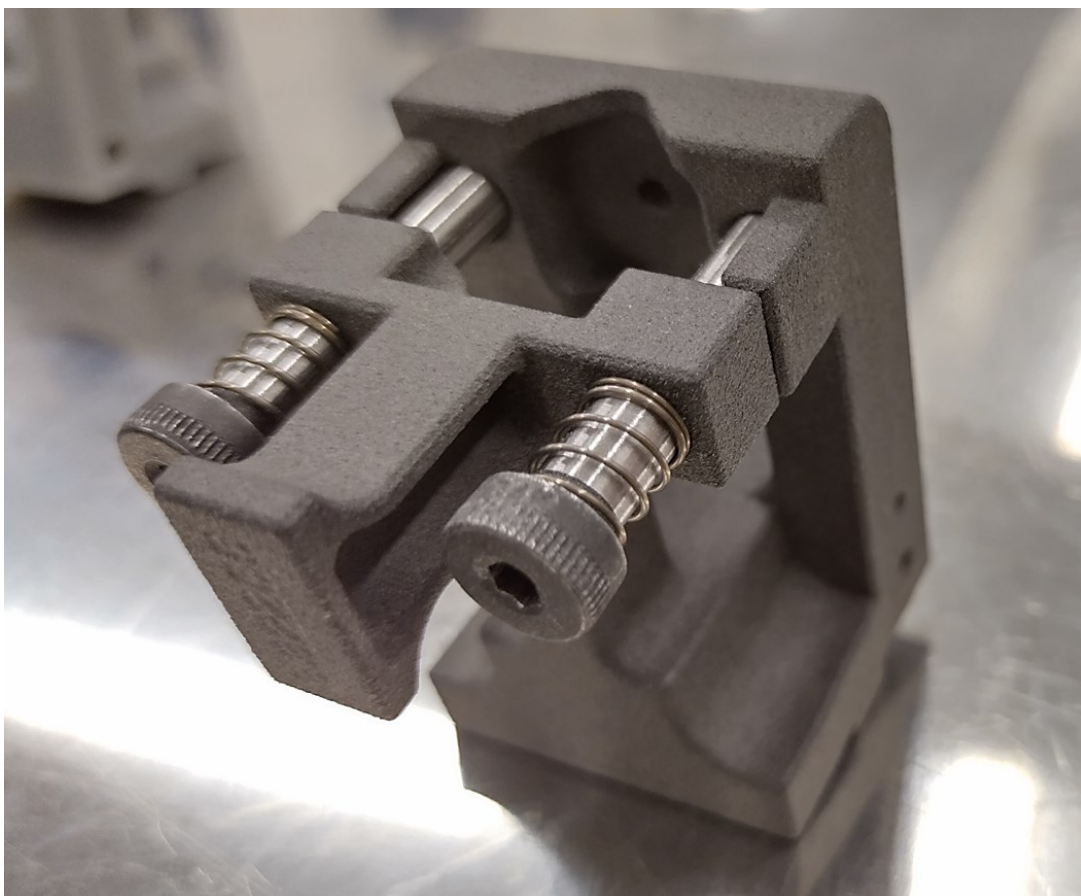
Taulukon 4 mukaisesti lopullinen vaihtoehtokohtainen vertailulukua saadaan, kun vaihtoehtokohtaiset ominaisuuksien lukuarvot kerrotaan ominaisuuden painokertoimella ja saadut luvut lasketaan yhteen.

3.3.3 Demomallien valmistus ja uudelleenarvioinnit

Tärkeä vaihe laitteen hankinnassa on demomallien tulostus parhaiksi osoittuneilla laitteilla. Näin voidaan varmistua siitä, että laite kykenee valmistamaan käyttökohteeseen sopivia tulosteita. Useat yritykset tarjoavat ennalta tulostettuja mallikappaleita, mutta on suositeltavaa kysyä mahdollisuutta lähettää oma

demomalli tulostettavaksi. Näin voidaan varmistua siitä, ettei laitteiden parametrejä ole optimoitu mahdollisimman hyvän lopputuloksen saamiseksi. Demomallissa kannattaa olla viisteitä, kulmia, sekä muita hankalasti valmistettavia piirteitä useassa eri suunnassa, jotta demomalleista tulee ilmi laitekohtaiset erot.

Demomallin pohjaksi valikoitui jo valmiiksi toteutettu jigiratkaisu, johon on lisätty reikiä ja pyöristyksiä. Toiminnan kannalta kriittiset piirteet säilyivät ennallaan, jotta demomalleilla mitattuja tuloksia pystyttiin vertailemaan koneistettuna valmistetun jigiratkaisun tuloksiin.



Kuva 7. SLS-menetelmällä valmistettu demotuloste. (Kuva: Ellonen J, 2023)

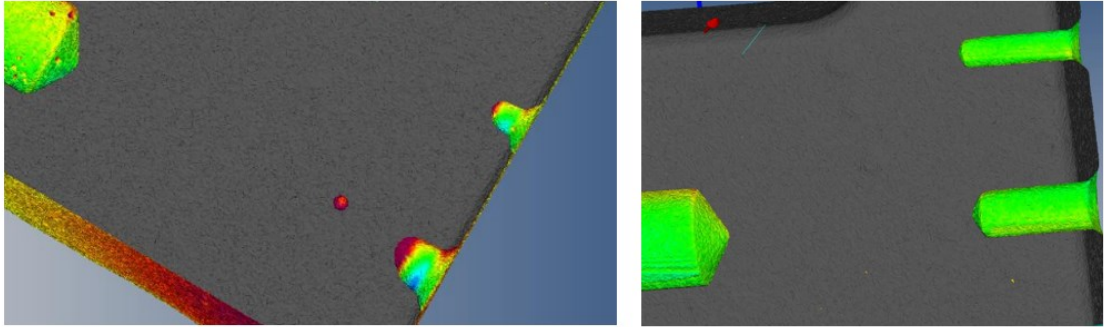
4 Demomallien testaus

4.1 Testausmenetelmät

Testausprotokolla toteutettiin jokaiselle demomallille yhtenevällä tavalla. Kaikki demomallit skannattiin Zeiss Metrotom 800 CT-skannerilla yhdenmukaisin ajo-parametrein käyttäen 0,5 mm paksuista kuparifilteriä. Sähkövirtana käytettiin 250 mikroampeerin arvoa, ja jännitteenä 120 kilovolttia. Metrotom 800 on röntgenskannauslaite, jolla voidaan skannata muoveja, sekä matalan tiheyden omaavia metallikappaleita (Zeiss, 2011, 90). Tämän jälkeen demomalleista muodostettiin liitteessä 2 olevat värimallit vertaamalla skannaamalla saatua pistepilveä CAD-malliin Calypso 2020-mittausohjelmassa. Lopuksi mallit kokoonpantiin, jonka yhteydessä hiottiin ohjaustappien aukkoja hieman suuremmiksi, jotta vastinosa liukuu jouhevasti. Toimivuuden takaamiseksi kierteet kierteitettiin käyttäen kierretappia.

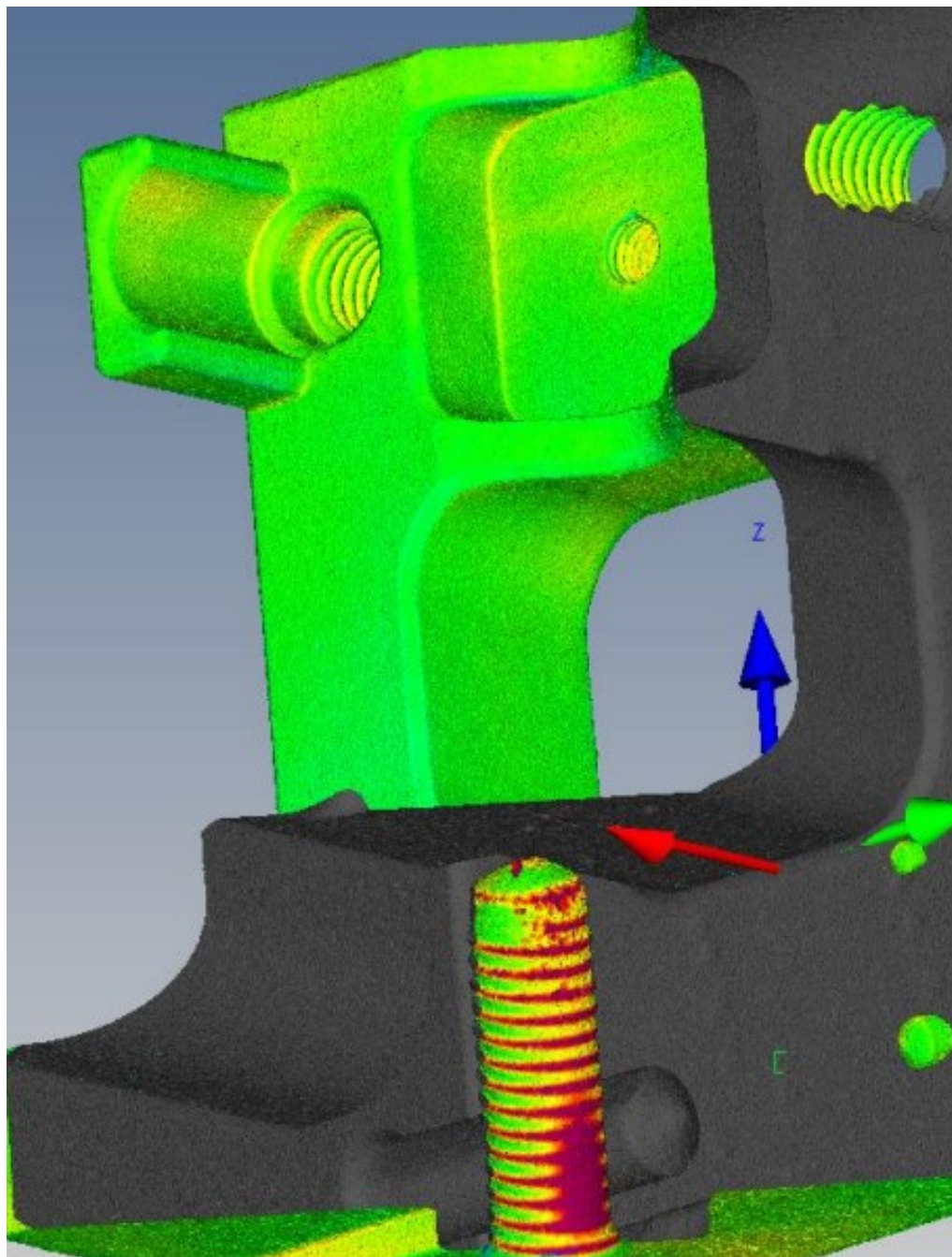
4.2 Ensivaikutelmat ja havainnot

SLA-menetelmällä Formlabs Form 3+ -laitteella valmistettujen mallien pinnoilla oli havaittavissa irrotetusta tukirakenteesta jääneitä yhtymäsaumoja. Yhdessä mallissa tukirakenteet oli tarkoituksella jätetty paikalleen. Ensisijaisena käyttö-tarkoituksena 3D-tulosteteilla on testata prototyyppien toimivuutta, eikä ulko-näöllisillä tekijöillä näin ollen ole suurta merkitystä. Havaintona oli, että laitetta käytettäessä tulee olla sijoittamatta tukirakenteiden yhtymäpisteitä kriittisille pinnoille. Kaikissa tulosteissa pienet ja jyrkät viisteet sekä terävät nurkat olivat hieman pyöristyneitä. Muista materiaaleista poiketen Tough 1500 -materiaalilla pienet ja syvät reiät olivat umpeutuneet kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. 1,6 mm, 2,5 mm ja 5 mm reiät. Vasemmalla materiaalina Tough 1500 ja oikealla Rigid 10K. (Kuva: Ellonen J, 2023)

Valmiiksi mallinnetut M6-kierteet tulostuivat Form 3+ -laitteella kohtuullisen hyvin materiaaleista riippumatta. Pientä kutistumaa oli havaittavissa kierteiden alueella, mutta lähtökohtaisesti kierteet olivat sellaisia, joita olisi voinut käyttää suoraan. Rigid 10K -materiaali teki tässä poikkeuksen, johtuen materiaalin erittäin matalasta joustavuudesta. Tämä materiaali oli muita kovempaa ja lasimaisempaa. Kappaleeseen oli tästä syystä vaikeampaa tehdä kierteitystä verrattuna muihin materiaaleihin. Valmiiksi mallinnettu M3-kierre oli haasteellisin, mutta esitehdyt kierteet pystyttiin jälkikäteen kierteittämään toimiviksi.



Kuva 9. Rigid 10K materiaalin kierre. Kierre on määrättyä mitta pienempi. Tämä ilmenee punaisena värinä alhaalla olevan kierteen pinnassa.
(Kuva: Ellonen J, 2023)

SLS-menetelmällä Formlabs Fuse 1 -laitteella valmistetun demomallin ensivai-
kutelma oli, että laite kykenee lähes ammattilaislaatuisten tulosteiden valmistuk-
seen. Pinnanlaatu oli karkeampi verrattuna SLA-menetelmän tulosteisiin. Lä-
hemmässä tarkastelussa ilmeni, että kappaleiden sivupinnoilla oli vääristymää.
Syy tähän oli se, että kappale oli hieman liikahanut tulostuksen aikana.

Valmistaja toimitti reklamoinnin jälkeen uudemmalla Fuse 1+ -laitteella valmistetun tulosteen. Tämä tuloste oli silmämääräisesti onnistunut ja pinnanlaatu oli samaa tasoa, kuin Fuse 1 -laitteella tulostetun kappaleen. Kierteet tulostuivat kohdullisina, mutta kierteiden puhdistus kierretapilla suoritettiin toimivuuden takamiseksi.

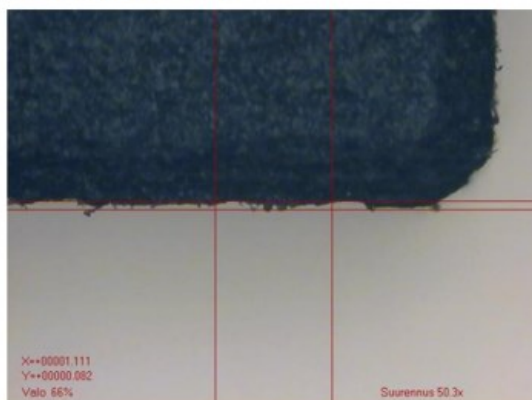
PolyJet-menetelmällä Stratasys J35 Pro -laitteella valmistettujen tulosteiden laatu oli silminnähtävää parempaa verrattuna SLA-tulosteisiin. Kappaleet oli esikäsitelty liottamalla tukimateriaali pois. Valmistajalta saatiin vertailuun myös tuloste, jossa tukimateriaali oli paikallaan. Tämä tuloste laitettiin vesiastiaan, johon tukimateriaali oli liuennut yön aikana. Ensisijaiset kokemukset olivat helpot ja korkea laatu. Pieninkin M3-kierre tulostui suoraan M3-ruuville sopivana, joten jälkikierteitykselle ei ollut ollenkaan tarvetta.

Täysin XY-akselien suuntaiset pohja- ja yläpinta olivat tulostuneet erilaisella pinnanlaadulla muihin pintoihin verraten. Kuva 12 on Vero Ultra White -materiaalista valmistetun kappaleen reunasta. Kuvasta on havaittavissa erilainen pinnanlaatu pysty- ja vaakakselin suuntaisissa reunoissa. Valkoinen väri on erityisen hankala kuvata heijastavuutensa vuoksi. Tämä ilmenee kuvassa 12 olevasta pyöreältä näyttävästä viisteestä, joka tosiasiansa on terävyydeltään verrattavissa kuvassa 10 olevaan Standard Black -tulosteeseen.

Standard Black (Form 3+)



PA12 (Fuse 1+)



Vero Ultra White (Stratasys J35pro)



Kuvat 10–12. Eri tulostusmenetelmillä valmistettujen kappaleiden kulmat. Suurennos 50,3-kertainen. (Kuvat: Ellonen J, 2023)

4.3 Demotulosteiden värimallien vertailu

Demomalleista tehtiin värimallit, joissa tulostetun kappaleen pinnasta saatua pistepilveä verrattiin ideaalisen CAD-mallin mittoihin. Tavoitteeksi mallien pituusmittoille asetettiin vuonna 1993 julkaistun ISO 2768-1 standardin sivulla viisi olevat f-luokan mukaiset mittatoleranssit (kuva 13). Tulostettujen kappaleiden toleranssialueet tulisivat olla pienimpien piirteiden osalta +/- 0,05 mm toleranssialueen sisällä. Suurimpien mittojen osalta tavoitetasona on +/- 0,15 mm, koska tulosteen koko on pisimmältä sivultaan alle 120 mm.

Taulukko 1 Pituusmittojen sallitut poikkeamat lukuunottamatta viistettyjä kulmia
(ulkopuoliset säteet ja viisteet – ks. taulukko 2)

		Arvot mm							
Toleranssiluokka Tunnus	Kuvaus	Sallitut poikkeamat nimellismita-alueella							
		> 0,5 ¹⁾ ≤ 3	> 3 ≤ 6	> 6 ≤ 30	> 30 ≤ 120	> 120 ≤ 400	> 400 ≤ 1 000	> 1 000 ≤ 2 000	> 2 000 ≤ 4 000
f	hieno	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	–
m	keskikarkea	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	karkea	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	erittäin karkea	–	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

¹⁾ Nimellismitoille < 0,5 mm, eromitat tulee merkitä vastaavan nimellismitan viereen.

Kuva 13. ISO 2768-1 standardin asettamat pituusmittojen sallitut poikkeamat (SFS-EN 22768-1 1993, 5).

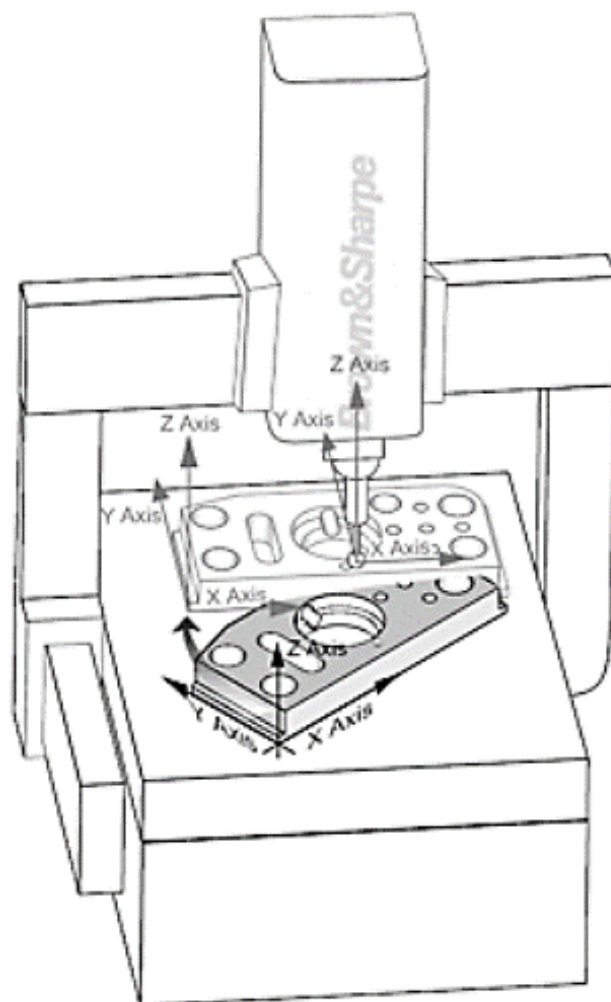
Liitteessä 3 olevista värimalleista ilmenee, että Formlabs Form 3+ kykenee tarkimmillaan noin +/- 0,05 mm tarkkuuteen tulosteen tukimateriaalin vastaisella puolella Rigid 10K -materiaalilla. Jokaisen vertailussa olleen Form 3+ -laitteella valmistetun kappaleen pinnanlaatu, sekä mittatarkkuus olivat merkittävästi parempia tukirakenteiden vastaisilla puolilla. Tämä tulee huomioida kappaleiden orientoinnissa tulostusta varten. Se tulee ottaa huomioon myös tukirakenteiden kiinnityskohtien sijoituksen yhteydessä. Värimallien perusteella laitteella on haastavaa tulostaa matalan tasomaisuuden vaativia alueita. Kokonaisuutena arvioiden Formlabs Form 3+ -tulostin pääsee jokaisella materiaalilla +/- 0,2 mm toleranssialueen sisään.

SLS-tulosteiden Fuse 1 -laitteen värimallista käy ilmi selvästi tulostuksen aikainen kappaleen liikeyhdys. Täten erityisesti X- ja Y-tulostussuunnissa on havaittavissa huomattavaa eroa CAD-malliin. Pienempi osa oli onnistunut, mutta siinä on havaittavissa kutistumaa tulostussuunnassa Z. Tällä osalla X- ja Y-suuntaiset tulokset ovat hyviä. Jälkitoimituksena tullut Fuse 1+ -tuloste oli onnistunut, mutta siinäkin oli havaittavissa kutistumaa Z-tulostussuunnassa. Tämän tulosteen kohdalla X- ja Y-suuntainen poikkeama oli maksimissaan +/- 0,09 mm. Z-suuntainen kutistuma oli maksimissaan noin 0,35 mm. Tämä kuitenkin olisi korjattavissa jonkin verran lähemmäksi nollaa skaalaamalla kappaletta Z-suunnassa.

Stratasys J35 Pro -tulosteita vertailussa oli kaksi, joista toinen oli kokonaan VeroUltra White -materiaalista valmistettu, ja toinen 80/20 seossuhteella VeroUltra Whitestä- ja Elastico Black -materiaaleista valmistettu. Liitteen 3 värimallien mukaan Stratasys pääsee noin +/- 0,05 mm toleranssialueen sisään Z-tulostussuunnassa. XY-suunnissa toleranssialueena voidaan pitää +/- 0,2. Erona Formlabs Form 3+ -laitteeseen Stratasys'n mittamuutokset ovat hallitumpia, joten CAD-mallin mittojen skaalaus olisi helpompaa mahdollista uusintatulostetta varten.

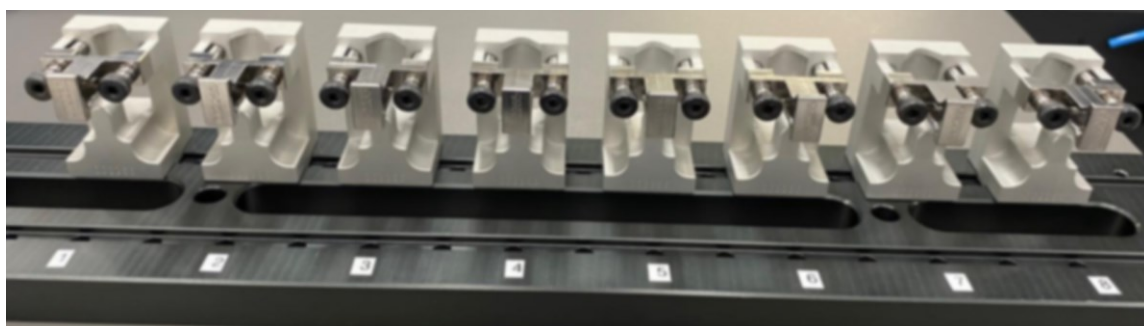
4.4 Toiminnallinen testaus

Jigien toiminnallinen testaus toteutettiin tekemällä vertailumittaukset kaikilla demomalleilla. Testaus toteutettiin kontrolloiduissa olosuhteissa, joten lämpötila ja ilmankosteus olivat likimain yhdenmukaiset kaikissa mittauksissa. Vertailun mittauksissa käytettiin Zeiss:n valmistamaa O-Inspect-mittalaitetta. Kyseisessä laitteessa on kamera optisia mittauksia varten, sekä koordinaattimittalaite koskettavia mittauksia varten (Zeiss 2022, 2). Mittauksissa käytettiin kyseisen laitteen koordinaattimittausta. Koordinaatti-, eli CMM-mittalaitteissa on X- Y- ja Z-suunnissa liikkuva mittapää, johon voidaan yhdistää erilaisia mittakärkiä. Kuvan 14 mukaisilla CMM-mittalaitteilla voidaan mitata esimerkiksi halkaisijoita, pituuksia, tasomaisuuksia tai muita haluttuja mittapiirteitä mittauksen kohteena olevasta kappaleesta (Hexagon 2023).



Kuva 14. CMM-mittalaite. (Hexagon 2023)

Referenssijiginä käytettiin kuvassa 15 olevaa alumiinista koneistamalla valmistettua jigiratkaisua. Jigiratkaisussa on yhdenmukaisin välein yhteensä kahdeksan kappaletta 3D-tulostettuihin jigeihin rinnastettavia yksittäisiä jigejä.

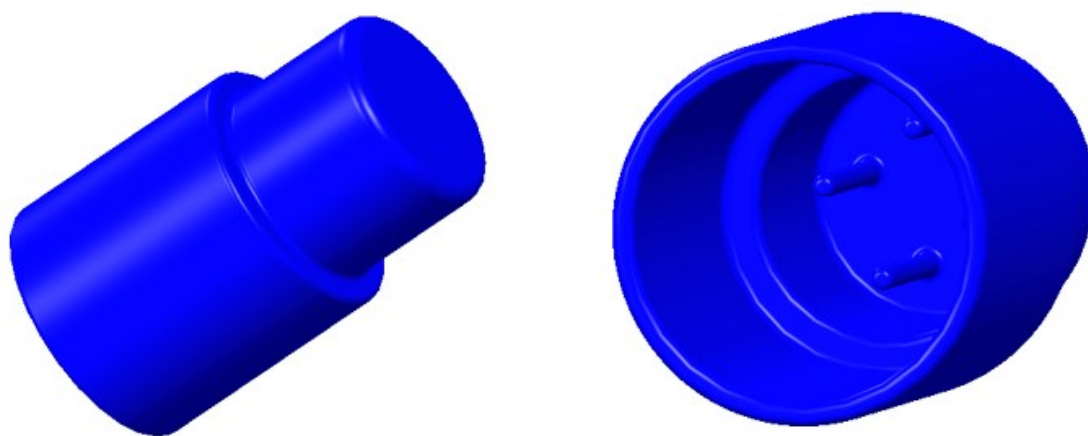


Kuva 15. Referenssimittatulosten mittauksessa käytetty jigiratkaisu.

(Kuva: Ellonen J, 2023)

Jigiratkaisu sekä mittausohjelma ovat validoituja, mistä syystä mittatuloksia voidaan pitää luotettavina. Validointi, eli varmentaminen tarkoittaa tässä tapauksessa mittausmenetelmän varmentamista siitä, että validoinnin kohteena olevalla mittausjigin ja -ohjelman yhdistelmällä kyetään mittaamaan todistetusti luotettavia tuloksia.

Edellä mainitulla kokoonpanolla mitattiin numeroidut 12 ruiskuvalettua testikappaleita. Näistä saatiin referenssitulokset, joihin demomallien tuloksia voitiin verrata. Toistettavuuden arvioinnin tueksi jigiratkaisun ensimmäisellä paikalla, sekä demojigeillä mitattiin kahdentoista saadun mittaustuloksen jälkeen vielä yhtä vertailukappaleita kuusi kertaa peräkkäin. Tähän vaiheeseen valikoitui sattumanvaraisesti järjestysluvun neljä omaava vertailumittakappale. Jokaisen mittaustuloksen välissä kappale irrotettiin jigistä, jonka jälkeen se asemoitiin uudestaan seuraavaa mittausta varten. Kokoonpantu demomalli kiinnitettiin pohjassa olevasta urastaan kiinni aluslevyyn. Aluslevy kiinnitettiin koordinaattimittalaitteen pöytään, minkä jälkeen ensimmäinen referenssikappale kiinnitettiin jigisiin. Jokaisen demojigin ensimmäiselle mitattavalle referenssikappaleelle toteutettiin manuaalisuuntaus, minkä jälkeen suoritettiin referenssimittakappaleiden mittaaminen edellä mainitun järjestelyn mukaisesti.



Kuva 16. Kuvaannollinen esimerkki kappaleesta, jollaisia tarkastelussa olevalla demojigillä pystytään mittaamaan. (Kuva: Ellonen J, 2023)

Liitteessä 3 olevat mittatulokset analysoitiin käyttäen Minitab -ohjelmiston 2-Sample t-testiä. Luottamusvälinä käytettiin 95 %:n arvoa. Tällä testillä voidaan vertailla kahden otannan keskiarvojen eroavaisuuksia. Tärkeimpänä yksittäisenä lukemana käytetään p-arvoa, joka kertoo, onko kahden otannan välillä keskiarvollista eroa (Minitab 2023). Minitab on yleisesti käytetty ohjelmisto, jota käytetään statistiikkaan liittyvien laskujen apuvälineenä.

4.5 Materiaalit

Vertailussa olevilla laitteilla materiaalit ovat sidoksissa laitevalmistajaan. Laitteiden käyttämät tulostusmateriaalit ovat laitevalmistajan omien alihankkijoiden valmistamia. Vertailuissa olevista laitteista suppein valikoima oli Fuse 1+ -laitteelle, jolle kirjoitusajankohtana oli tarjolla kolmea eri muovimateriaalia, joista kahta laatua oli saatavilla lisäksi lasikuulavahvisteisena. Nämä materiaalit ovat polyamidit PA 11, PA 11 lasivahvisteinen, PA12 ja PA12 lasivahvisteinen. Taipuisuutta vaativiin sovelluksiin on saatavilla termoplastinen polyuretaani (TPU). Materiaalilaadun vaihtaminen Fuse-sarjan laitteistoilla on mahdollista, mutta se vaatii tulostusympäristön erittäin tarkan puhdistamisen vaihdon välissä. (Formlabs 2023a.) Näistä materiaaleista soveltuvimmat opinnäytetyössä olevaan käyttötarkoitukseen ovat PA11 lasivahvisteinen tai PA12, johtuen näiden materiaalien pienestä venymästä. (Formlabs 2023b, 101–117)

Stratasys J35 Pro -laitteelle on tarjolla viisi eri vaihtoehtoa. Näistä mittatarkin vaihtoehto valmistajan edustajan mukaan on VeroUltra White. Edellä mainittua materiaalia voidaan sekoittaa halutulla seossuhteella joustavan Elastico-materiaalin kanssa, jolloin tulosteiden jousto-ominaisuuksia saadaan paremmiksi. Lisäksi tulostusvaiheessa kappaleen ympärille tarvitaan vesiliukoista tukimateriaalia. Materiaalivaihtoehtoista myös ABS-muovin ominaisuuksia jäljittelevä Digital ABS Plus -materiaali voisi materiaalitietoihin perustuen olla sopiva mittausjigien prototyyppien valmistukseen. (Stratasys 2021.)

Formlabs Form 3+ -laitteelle on saatavilla noin 15 eri materiaalivaihtoehtoa erilaisiin käyttötarkoituksiin. Materiaalivaihtoehtojen kesken ominaisuudet vaihtelevat erittäin paljon, joten valikoimasta löytyy vaihtoehtoja lukuisiin eri käyttötarkoituksiin. Materiaaliominaisuuksien perusteella parhaat materiaalit mittausjigien prototyyppien valmistukseen ovat Rigid-sarja ja Grey Pro. (Formlabs 2023b, 8–54.) Valmistajalla on tarjolla laitteesta myös 3B+ malli, johon on saatavilla lisää materiaalivaihtoehtoja muun muassa hammaslääketieteen sovelluksiin. (Formlabs 2019)

4.6 Oman 3D-tulostimen vertailu alihankintaan

Vaihtoehtona oman 3D-tulostuslaitteiston hankinnalle on alihankinta. Tulosteiden alihankinta on järkevä vaihtoehto, jota tulee harkita erityisesti silloin, mikäli tulosteiden tarve vuositasona on vähäinen (Henell, 2022).

Kuvissa 18 ja 19 olevat vaatimus- ja ominaisuusprofiilit muodostettiin kohdassa 3.3. mainittujen menetelmien mukaisesti. Vaatimuksiksi muodostui mittatarkkuus, pinnanlaatu, toimitusaika, kommunikaatio ja hinta.

Vaatimusprofiili alihankinnalle

Toimintojen vaatimukset	
<u>Mittatarkkuus</u>	Tulosteiden toleranssit tulee olla mahdollisimman lähellä nominaaliarvoa.
<u>Pinnanlaatu</u>	Pinnan oltava mahdollisimman tasainen.
Ympäristön vaatimukset	
<u>Toimitusaika</u>	Valmis kappale olisi mahdollisimman nopeasti käytettävissä.
<u>Kommunikaatio</u>	Toimiva yhteydenpito. Tiedusteluihin vastaaminen.
Kustannukset	
<u>Hinta</u>	Valmistuksen kustannukset vertailujigä kohden

Kuva 18. Vaatimusprofiili alihankinnalle.

Ominaisuusprofiili alihankinnalle

Vaatus	Ominaisuus
<u>Toiminnot</u>	
Mittatarkkuus	Tulosteen toleranssialue (vertailulukuna)
Pinnanlaatu	Pinnanlaatu laitevalmistajan ilmoittama kerrospaksuus (mm)
<u>Käyttöympäristö</u>	
Toimitusaika	Oletetut toimitusajat (päivinä)
Kommunikaatio	Yleinen arvio kokemukseen perustuen. Arviointiasteikko: 0=Heikko, 10=Toimivin.
<u>Kustannukset</u>	
Hinta	Arvioitu hinta prototyyppiä kohden (vertailulukuna).

Kuva 19. Ominaisuusprofiili alihankinnalle.

Alihankintavaihtoehdoille muodostettiin painokertoimet kohdan 3.3.2. mukaisesti, jotta niitä pystyttiin vertailemaan keskenään. Vertailuun valittiin vaihtoehtoina mukaan myös oma laite ja koneistus alihankintana. Vertailussa oli mukana kaksi suomalaista 3D-tulosteita tarjoavaa alihankintayritystä. Tulosteiden hinnat, sekä mittatarkkuudet perustuvat alihankkijoiden antamiin tarjouksiin. Suuren painokertoimen omaavan toimitusajan perusteella potentiaalisiksi vaihtoehtoiksi valikoitui ainoastaan kotimaisia yrityksiä. Lähtöarvot painokertoimien määrittämiseen olevat luvut on taulukoitu liitteessä 3. Osa käytetyistä lähtöarvoista on muutettu todellisiin lukemiin perustuviksi suhdeluvuiksi.

Taulukon 5 mukaisesti suurimmat painoarvot määräytyivät mittatarkkuudelle, sekä mahdollisimman lyhyelle toimitusajalle. Kommunikaatiolle ei tullut ollenkaan painoarvoa, joten sillä ei lopputuloksissa tule olemaan ollenkaan merkitystä.

<u>Ominaisuus</u>	A	B	C	D	E
Mittatarkkuus (A)		A	AC	A	A
Pinnanlaatu (B)			AB	B, 2D	B
Hinta (C)				2D	C
Toimitusaika (D)					2D
Kommunikaatio (E)					
Yhteensä, eli paino-kerroin	5	3	2	6	0

Taulukko 5. Painokertoimet alihankintavaihtoehtojen vertailua varten.

5 Kustannukset ja hintavertailua

5.1 Toimitusajat

Tulostusmäärien ollessa pieniä laitteen käyttöaste jää pelkällä prototyyppivalmistuksella melko matalaksi. Tämän takia laitteen suurin hyöty tulee projektivaiheessa säästyneenä aikana ja projektien lyhenteinä läpimenoaikoina. Mikäli alihankintana hankitun koneistetun prototyypin toimitusaika olisi noin 10 arkipäivää ja vastaavan pystyisi valmistamaan itse yhdessä työpäivässä, olisi aikasäästö noin 9 työpäivää. Mikäli ensimmäinen prototyyppimalli ei ole toimiva ja joudutaan tekemään muokkauksia malliin, voi aikaa mennä pelkästään alihankkijasta johtuvaan odotteluun noin 20 työpäivää. 3D-tulosteita tarjoavat alihankkijat lupaavat toimitusajaksi noin viisi arkipäivää. Omalla 3D-tulostimella odotusajaksi muodostuu noin yksi työpäivä valmistettua prototyyppiä kohden.

5.2 Koneistus alihankintana

Koneistettujen kappaleiden alihankinnasta on yrityksen sisällä vankka aiempi kokemus ja menetelmä on todettu prototyyppien osalta toimivaksi. Suurimmat haittapuolet ovat pitkät toimitusajat, sekä korkeat hinnat. Korkeat hinnat johtuvat pääosin siitä, että valmistettavat kappaleet ovat yksittäiskappaleita. Mikäli samaa kappaletta tilattaisiin useita kappaleita, olisi myös kappalekohtainen hinta matalampi. Toimitusajoissa on kausittaisia-, sekä yrityskohtaisia eroja, joten tilausvaiheessa joudutaan olemaan yhteydessä useisiin eri yrityksiin, jotta löytyy sen hetkisesti lyhimmän toimitusajan tarjoava. Koneistettujen osien hinnoissa on myös huomattavaa vaihtelua riippuen valmistettavan kappaleen monimutkaisuudesta. Prototyyppivaiheessa tilattaville koneistetuille kappaleille tuo lisähintaa myös yksittäiskappaleena valmistus. Vertailuluvut voivat vaihdella jigien mallin mukaan välillä 50–300. Hintakertoimena vertailuissa olevalle kahdesta osasta muodostuvalle CNC-koneistetulle jigille käytetään kuvitteellista vertailulukua 100.

5.3 3D-tulosteet alihankintana

Valmistajien alihankituille 3D-tulostetuille kappaleille lupaamat toleranssit eivät lähtökohtaisesti täytä nykyään yrityksessä käytettäviä jigipiirustusten toleranssirajoja. Luvatut toimitusajat ovat lyhempiä koneistettuihin kappaleisiin nähden. Kyseessä olevalle jigien vertailuhinta on noin 1/10 koneistuksena valmistetun vertailuhintaan nähden. 3D-tulostettujen kappaleiden hinnat määräytyvät pääosin käytetyn tulostusmenetelmän, sekä tulostettavan kappaleen tilavuuden perusteella. Näin ollen monimutkaisetkaan rakenteet eivät juurikaan nosta 3D-tulosteiden hintaa.

Metallisten 3D-tulosteiden alihankinta on erinomainen vaihtoehto esimerkiksi erikoisvalmisteisille työkaluille, joille riittää mittatarkkuudeksi +/- 0,2 mm. Mittatarkkuudet 3D-tulosteilla eivät yllä ilman erillistä jälkiprosessointia laadukkaiden

koneistettujen kappaleiden tasolle. Alihankinta on suositeltava vaihtoehto, mikäli aiempaa kokemusta 3D-tulostamisesta ei ole tai sitä on erittäin vähän.

5.4 Oma 3D-tulostuslaitteisto

Oman laitteiston hankinta on paras vaihtoehto, mikäli tarkoituksena on saada tulostettu malli käyttöön mahdollisimman nopeasti. Pienillä tulostusmäärillä kallis laite jälkikäsitteilylaitteineen ei välttämättä suoraan maksa itseään takaisin laitteen elinkaaren aikana. Mahdolliset huoltosopimukset voivat maksaa huomattavan paljon, ja lähtökohtaisesti voidaan sanoa, että mitä kalliimpi laite on, sitä kalliimmat sen huoltosopimusten hinnatkin ovat. Usein laitteita pystyy käyttämään jo melko vähäiselläkin koulutuksella, mutta korkealaatuisten ja mittatarkkojen tulosteiden valmistaminen vaatii yleensä käyttäjältä merkittävästi enemmän tietotaitoa. Demojigin materiaalikulut omalla laitteella olisi noin 5 % koneistetun hintaan nähden.

6 Tulokset

6.1 3D-tulostimen valinnan vertailuluvut

Kuvassa 20 olevien vertailulukujen mukaan Formlabs Form 3+ osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi. Suuren painoarvon omaavasta hankintahinta -ominaisuudesta laite sai huomattavan määrän pisteitä muihin nähden. Syy tähän on laitteen huomattavasti edullisempi hankintahinta muihin nähden.

Liitteessä 2 olevat vertailulukujen lähtöarvot on hintojen osalta muutettu suhdeluvuiksi.

Mittatarkkuudet olivat lukemiltaan likimain yhtenevät sekä Form 3+, sekä Stratasys J35 Pro -laitteilla. Liitteen 3 värimallien mukaisesti Stratasys'n mittatarkkuudet ovat kuitenkin paremmin ennustettavia. Lisäksi esimerkiksi tasomaisten

pintojen valmistuksessa ei vaikuta olevan samanlaisia haasteita, kuin mitä esiin-
tyy Form 3+ -laitteella.

Vertailuluvut				
<u>Ominaisuus</u>	<u>Ominaisuuden</u> <u>painokerroin</u>	<u>Vertailuluvut vaihtoehtoisin</u>		
		Formlabs Form 3+	Stratasys J35 Pro	Formlabs Fuse 1+
Tulosteen mittatarkkuus (A)	10	100,0	100,0	40,0
Tulosteen kerrospaksuus (B)	7	52,5	70,0	11,9
Tulosteen vaatima jälkikäsittelyn määrä (C)	1	2,0	10,0	3,3
Tulosteen käyttöikä (D)	5	25,0	25,0	50,0
Hukkamateriaalin määrä tulostettaessa (E)	6	53,3	33,3	60,0
Laitteen käyttöikä (F)	7	28,0	70,0	37,3
Laitteen hankintahinta asennettuna (G)	7	70,0	8,9	9,8
Materiaali-kustannukset (H)	1	4,0	2,0	10,0
Helppokäyttöisyys (I)	1	4,0	10,0	5,0
Materiaalivalikoiman laajuus (J)	4	40,0	13,3	8,0
Vertailuluvut		378,8	342,6	235,4

Kuva 20. Vertailuluvut vertailussa mukana olleille laitteille.

6.2 Alihankinnan vertailuluvut

Liitteessä 2 olevien vertailulukujen perusteella kuvassa 20 parhaaksi valikoitunut vaihtoehto omaksi laitteeksi osoittautui alihankintaa nähden paremmaksi vaihtoehdoksi, johtuen suurimmalta osin toimitusajalle määräytyneestä suuresta painokertoimesta.

<u>Vertailuluvut</u>					
Ominaisuus	Ominaisuuden painokerroin	Vertailuluvut			
		Alihankkija A	Alihankkija B	Oma laite	Koneistus
Mittatarkkuus (A)	5	2,5	2,5	3,5	50
Pinnanlaatu (B)	3	6	6	6	30
Hinta (C)	2	8	10	20	0,6
Toimitusaika (D)	6	6	6	60	4
Kommunikaatio (E)	0	0	0	0	0
Vertailuluvut		22,5	24,5	89,5	84,6

Kuva 21. Vertailuluvut alihankintavaihtoehdoille.

Huomioitavan arvoista on kuvassa 21 olevien vertailulukujen erittäin suuret vaihtelut. Koneistus on täysin omassa luokassaan tietyillä osa-alueilla. Menetelmäkohtaisista luvuista ilmenee hyvin, kuinka koneistus on merkittävästi erilainen valmistusmenetelmä 3D-tulostukseen nähden. Tästä syystä pienelläkin painotuserolla on erittäin suuri vaikutus vertailun lopputulokseen. Alihankkijoiden kesken eroa ei juurikaan ole. Hieman edullisemmän hinnan vuoksi paremmaksi vaihtoehdoksi valikoitui Alihankkija B.

6.3 Toiminnallisten testausten tulokset

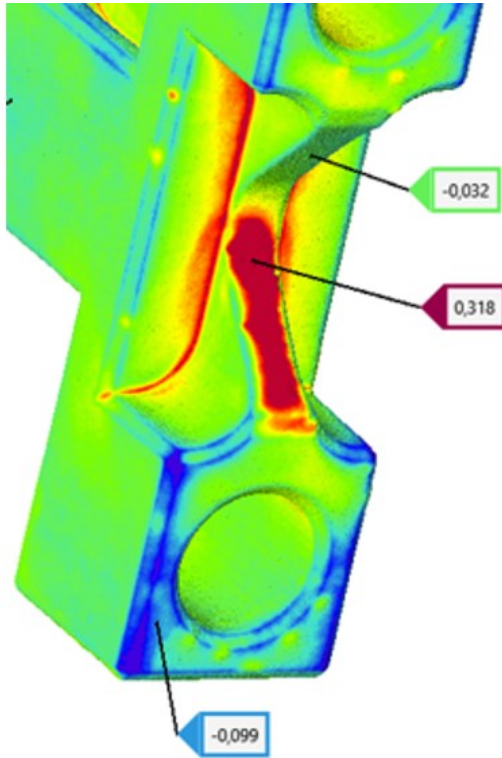
Liitteessä 4 olevien toiminnallisten testien tulos oli osin yllättävä. Vahvojen aiempien mielipiteiden vuoksi ennako-olettama oli, etteivät kaikki vaihtoehdot läpäisisi testausta. Kuitenkin kaikilla testatulla 3D-tulostetuilla mittausjigeillä jokaisen mittaposition p-arvo oli yli 0,05, joten merkittävää eroa koneistettuun vaihtoehtoon nähden ei ollut havaittavissa. Esimerkiksi SLS-tuloste kykeni toistamaan mittatuloksia jopa koneistettua vaihtoehtoa paremmin.

Laite	Materiaali	P-arvojen keskiarvo
Formlabs Form 3+	Rigid 10 K	0,639
Formlabs Form 3+	Standard Black	0,622
Formlabs Form 3+	Tough 1500	0,556
Stratasys J35pro	VeroUltraWhite (WUV)	0,604
Stratasys J35pro	20/80 Elastico/VUW	0,718
Formlabs Fuse 1+	PA12	0,679

Taulukko 6. P-arvojen keskiarvot materiaalienkohtaisesti.

Taulukossa 6 olevien kolmen eri mittaposition p-arvojen keskiarvoissa ei ole suurta eroa, ja jokaisen tuloksen kohdalla arvo on reilusti yli kriittisen 0,05 rajan. Tämän takia merkittävää eroa jigien välillä toimivuuden kannalta ei ole. Elastico ja VeroUltraWhite materiaalien sekoituksesta valmistetulla jigillä oli havaittavissa pientä takertelua liukupinnoilla, mikä johtui mitä luultavimmin kumimaisen Elastico materiaalin muita materiaaleja korkeammasta kitkakertoimesta. Aistinvaraisesti arvioituna matalin kitkakerroin vertailussa olleista materiaaleista oli Rigid 10K materiaalilla. Tämä ilmentyi liikkuvan osan hyvänä liukumisena metallista johdetta vasten.

Huomattavimpina eroina Rigid 10 K valmisteisella kiinnittimellä oli jonkin verran haasteita toistaa mittauksia yhtenevästi. Suurin yksittäinen syy tähän on kuvassa 17 olevasta värimallista ilmenevä poikkeava geometria kappaleen kontaktipinnalla. Poikkeavan geometrian vuoksi mitattavat kappaleet eivät asettuneet riittävän yhtenevällä tavalla kiinnittimeen. Kuvassa 17 on havaittavissa tukimateriaalin kiinnityskohdista jääneitä jälkiä, joten tämä olisi oletettavasti korjattavissa kappaleen erilaisella orientoinnilla tulostusta varten. Kuten aiemmin mainittua, Form 3+ kykenee parempaan tarkkuuteen tukimateriaalin vastaisella puolella. Mikäli kappale olisi orientoitu tulostusta varten kriittinen pinta tukimateriaalin vastaiselle puolelle, olisi jigien tuottamien mittaustulosten toistettavuus ollut oletettavasti mitattuja tuloksia parempi.



Kuva 17. Poikkeava geometria kontaktipinnalla. Materiaalina Rigid 10 K.
(Kuva: Ellonen J, 2023)

6.4 Tulosten luotettavuuden arviointia

Parhaaksi vaihtoehdoksi kummassakin vertailussa valikoitui oma laite. Vaatimus- ja ominaisuusprofiilien, sekä painokerrointaulukon laadinnassa tulisi olla asiaan perehtynyt useamman henkilön työryhmä opinnäytetyön kirjoittajan lisäksi, jotta tuloksien luotettavuus olisi parempi.

Erittäin suurten vaihtoehtojen välisten ominaisuuksien tasoerojen vuoksi kuvassa 21 olevia alihankintavaihtoehtojen vertailulukuja ei voida pitää kaikilta osin täysin luotettavina. Mikäli vertailussa olisi esimerkiksi ainoastaan 3D-tulosteita myyviä alihankkijoita, olisi vertailu luotettavampi.

Toiminnalliset mittaukset ovat kirjoittajan yksin suorittamia, joten täysin luotettavasti ne eivät kerro demojigien toimivuudesta. Testaus tulisi suorittaa esimerkiksi käyttäen Gage R&R testiä, jota varten mittaustulokset pitäisi olla kolmen

eri mittajaan suorittamia, jotta voitaisiin puhua luotettavista mittaustuloksista. Työn tarkoituksena olikin suorittaa ainoastaan suuntaa antavia mittauksia, mihin liitteen 4 mittaustulokset soveltuvatkin varsin hyvin. Vaikka toiminnallisten mittausten osalta tulokset olivatkin hyviä, on mahdotonta sanoa, kuinka hyvin 3D-tulostettu jigiratkaisu toimisi pitempiaikaisessa käytössä. Oikeastaan ainut keino, jolla voi varmentua valmistusmenetelmän toimivuudesta pidemmällä aikajänteellä kyseessä olevassa käyttökohteessa, on kokeilu.

6.5 Johtopäätöksiä tuloksista

Vertailuun osallistuneista tulosteista yksikään ei päässyt kaikilta osin SFS-EN 22768-1 standardissa määrättyjen f-luokan toleranssirajojen sisään, mutta käytännön testeissä jokainen potentiaalisilla laitteilla tulostettu demojigi läpäisi testauksen. Tähän tietoon perustuen voidaan olettaa, että myös alihankintana valmistetut tulosteet läpäisisivät toiminnallisen testauksen. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kannattaa kiinnittää huomiota kappaleilta vaadittuihin toleransseihin. Toleranssit tulee asettaa järkevälle tasolle ja liian tiukkojen toleranssien asettamista ehdottomasti välttää, mikäli niillä ei tosiasiaassa ole vaikutusta tuotteen toimivuuteen. Vertailulukujen perustana olevat lähtöarvot ovat liitteessä 2. Mittaustulokset, sekä 2 t-sample testin tulokset demojigien toiminnallisten testien osalta ovat liitteessä 4.

7 Pohdinta

3D-tulostimien käyttö tarkkuutta vaativissa sovelluksissa vaatii lähes poikkeuksetta jonkin asteisen jälkikäsittelyn. Mittausjigien osalta pienellä jälkikäsittelyllä pystytään todistetusti tuottamaan toimivia prototyyppejä. Jigisuunnittelijan mielilyksillä ja suunnitteluperiaatteilla on suuri vaikutus siihen, onko prototyyppi mahdollista toteuttaa 3D-tulostamalla. Mikäli suunniteltu ratkaisu sisältää esimerkiksi eri suuntiin olevia erittäin pitkiä ja kapeita ulokkeita, on tällaisen

ratkaisun valmistaminen erittäin haasteellista 3D-tulostamalla. Myöskään suurta tarkkuutta vaativien tulkkien valmistamiseen 3D-tulostamisen menetelmät eivät sovellu.

Mittausohjelman tekijällä ja mitattavan kappaleen geometrialla on myös vaikutusta osaltaan siihen, voidaanko kappaleita mitata luotettavasti. Hyvin suunnitellulla ja korkealaatuisella mittausjigillä voidaan mitata luotettavasti huonosti suunnitellulla mittausohjelmalla. Heikosti suunnitellulla ja kohtuullisen laadun omaavalla mittausjigilläkin pystytään mittaamaan luotettavia mittauksia, mikäli mittausohjelma on tehty hyvin.

3D-tulostus mahdollistaa alipaineella toimivien mittausjigien ilmakehien valmistuksen huomattavasti helpommin perinteisiin ainetta poistaviin menetelmiin nähden. Liitteessä 3 olevien CT-läpileikkauksien perusteella erityisesti valokovettuvien materiaalien tiheys on erinomainen pitämään painetta. SLS-menetelmällä valmistetuillakaan kappaleilla ei pitäisi olla ongelmia paineen pitävyydessä, vaikka materiaalissa onkin havaittavissa jonkin asteista huokoisuutta. Vertailun vuoksi mukana oleva FFF-menetelmällä valmistettu tuloste ei oletettavasti sellaisenaan tulisi pitämään painetta.

Huomioitavaa on se, ettei samat tulostusmenetelmät välttämättä sovellu sekä lyhyt- että pitkäjaksoiseen käyttöön. Esimerkkinä SLA-menetelmä, joka on erittäin hyvä esimerkiksi prototyyppien valmistukseen, mutta tulosteet eivät ole yhtä pitkäikäisiä verrattuna esimerkiksi SLS-menetelmällä valmistettuihin. Valokovettuvalla polymeerillä on mahdollista jatkaa kovettumista tulostus- tai jälkikovetusvaiheen jälkeen, mikäli kovettumisprosessi on jäänyt kesken. Tämä voi muuttaa kappaleiden geometriaa ajansaatossa. Liitteessä 2 on tarkasteltu kahden materiaalin osalta kahden kuukauden jälkeisiä mittamuutoksia, mutta mitään merkittäviä muutoksia ei värimalleista käy ilmi. Kappaleita ei tarkoituksenmukaisesti altistettu UV-säteilylle, vaan ne ovat olleet aikajaksolla sekä pahvilaatikossa, että pöydillä loisteputkivalaisimien alla. Valokovetteisten menetelmien materiaallivalikoima on laaja, joilla jokaisella on toisistaan eroavat ominaisuudet ja tästä

syystä jälkikäteen tapahtuvia mittamuutoksia ei valmistusmenetelmän osalta voida täysin poissulkea.

Mikäli mittausjigiin sisältyy liukupintoja, tulisi materiaalin kitkakerroin olla mahdollisimman alhainen. Korkeamman kitkakertoimen omaavilla muovimateriaaleilla on odotettavissa nopeampaa kulumista verrattuna matalamman kitkakertoimen omaaviin materiaaleihin Tämä johtaa väistämättä esimerkiksi liukupintoina olevien reikien väljistyseen pidempiaikaisessa käytössä.

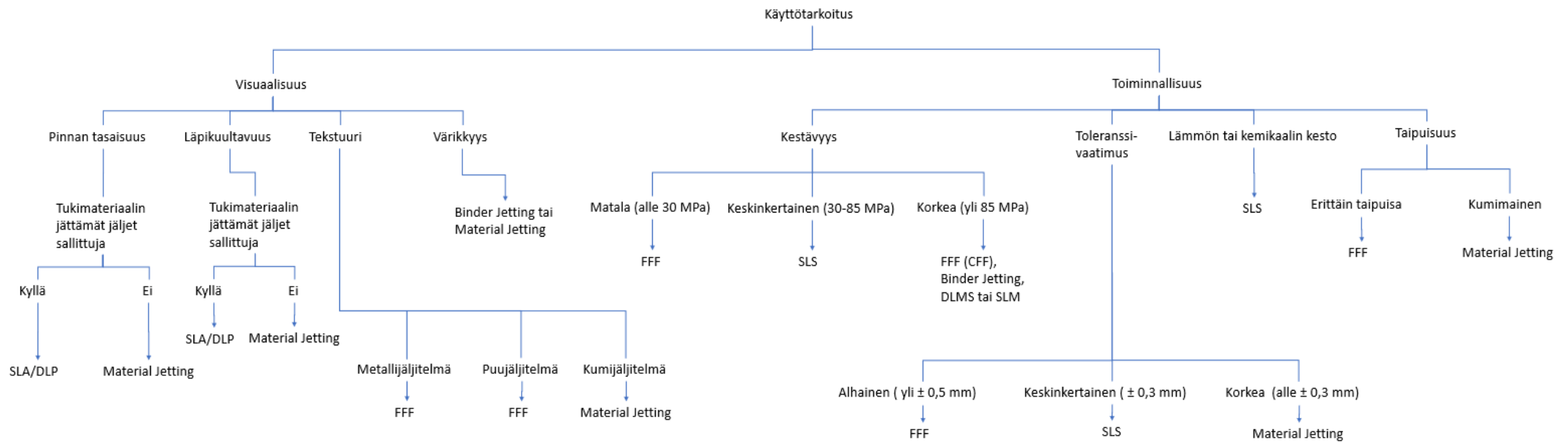
Lähteet

- European Commission. 2020. Conformity assessment procedures for 3D printing and 3D printed products to be used in a medical context for COVID-19. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40562>. 10.05.2023
- Chee K. C. & Kah F. L. 2017. 3D Printing and Additive Manufacturing, Principles and Applications. 2017. Singapore: B & Jo Enterprise Ltd.
- Formlabs. 2019. What is the difference between the Form 3 and the Form 3B? https://support.formlabs.com/s/article/What-is-the-difference-between-the-Form-3-and-the-Form-3B?language=en_US. 14.04.2023.
- Formlabs. 2023a. Switching SLS powder types (Fuse 1/Fuse Sift) https://support.formlabs.com/s/article/Switching-SLS-powder-types-Fuse-1-and-Fuse-Sift?language=en_US. 03.05.2023.
- Formlabs. 2023b. Materials library. <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1901266-TDS-ENUS-0.pdf>. 29.05.2023.
- Henell, A. 2022. Senior Lecturer, JAMK. Kahdenvälinen keskustelu. 30.11.2022.
- Hexagon. 2023. Intro to Coordinate Metrology. <https://hexagon.com/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology>. 09.05.2023.
- Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima Oy
- Minitab. 2023. Interpret the key results for 2-Sample t. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/2-sample-t/interpret-the-results/key-results/>. 14.03.2023.
- Noorani, R. 2020. 3D Printing Technology, Applications and Selection. Boca Raton: CRC Press
- Phillips-Medisize. 2023. Phillips Medisizen historiaa. <https://www.phillips-medisize.fi/meidan-tarina/>. 24.01.2023
- Redwood, B., Schöffner F., & Garret, B. 2017. The 3D Printing Handbook, Technologies, design, and applications. Arnheim: Coers & Roest.
- SFS-EN 22768-1. 1993. Yleistoleranssit. Osa 1: Ilman Toleranssimerkintää olevien pituus- ja kulmamittojen toleranssit. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021. 2021. Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS
- Stratasys. 2021. Digital ABS Plus. https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/polyjet-materials/digital-abs-plus/bp_pj_digital-abs-plus_application-note_0721a.pdf?v=48e083. 27.04.2023.
- Stratasys. 2021. WSS150, Water soluble support for single-step removal using regular tap water. https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/polyjet-materials/polyjet-support-materials/op_pj_wss150_a4_1221a.pdf?v=493574. 15.05.2023.
- Thompson, R. 2007. Manufacturing Processes for Design Professionals. Lontoo: Thames & Hudson Ltd
- Zeiss. 2011. Metrotom 800 Operating instructions. https://metrology.me.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/674/2016/09/manual_en.pdf. 09.05.2023.
- Zeiss. 2020. The optical solution with the right touch, Zeiss O-Inspect. <https://asset-downloads.zeiss.com/catalogs/download/iqs/810b3066->

a739-49bd-b801-9a771a636007/EN_O-INSPECT-
EN_60_020_0049III.pdf. 15.05.2023.

Liite 1. Tulostustavan esivalintataulukko.

Mukaan Redwood ym. 2017, 142–143.



Liite 2. Vaatimus- ja ominaisuusprofiilien lähtöarvot, sekä vaihtoehtokohtaiset luvut vertailulukujen määrittämistä varten.

Oma laite:

Lähtöarvot

Ominaisuus	Vaihtoehto		
	Formlabs Form 3+	Stratasys J35 Pro	Formlabs Fuse1+
Tulosteen mittatarkkuus (A)	0,2	0,2	0,5
Tulosteen pinnanlaatu (B)	0,025	0,01875	0,11
Tulosteen vaatima jälkikäsittelyn määrä (C)	25	5	15
Tulosteen käyttöikä (D)	6	6	12
Hukkamateriaalin määrä tulostettaessa (E)	80	50	90
Laitteen käyttöikä (F)	6	15	8
Laitteen hankintahinta asennettuna (G)	10	1,3	1,4
Materiaalikustannukset (H)	2,5	5	1
Helppokäyttöisyys (I)	4	10	5
Materiaalivalikoiman laajuus (J)	15	5	3

Vaihtoehtokohtaiset luvut vertailulukujen määrittämistä varten

Ominaisuus	Vaihtoehto		
	Formlabs Form 3+	Stratasys J35 Pro	Formlabs Fuse1+
Tulosteen mittatarkkuus (A)	10,0	10,0	4,0
Tulosteen kerrospaksuus (B)	7,5	10,0	1,7
Tulosteen vaatima jälkikäsittelyn määrä (C)	2,0	10,0	3,3
Tulosteen käyttöikä (D)	5,0	5,0	10,0
Hukkamateriaalin määrä tulostettaessa (E)	8,9	5,6	10,0
Laitteen käyttöikä (F)	4,0	10,0	5,3
Laitteen hankintahinta asennettuna (G)	10,0	1,3	1,4
Materiaalikustannukset (H)	4,0	2,0	10,0
Helppokäyttöisyys (I)	4,0	10,0	5,0
Materiaalivalikoiman laajuus (J)	10,0	3,3	2,0

Alihankinta:

Lähtöarvot

Ominaisuus	Alihankkija 1	Alihankkija 2	Oma laite	Koneistus
Mittatarkkuus (A)	0,5	0,5	0,7	10
Pinnanlaatu (B)	2	2	2	10
Hinta (C)	4	5	10	0,3
Toimitusaika (D)	10	10	1	15
Kommunikaatio (E)	5	6	10	5

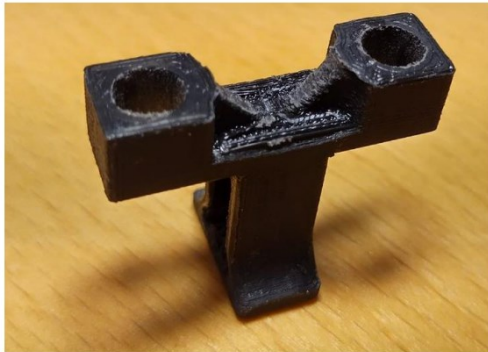
Vaihtoehtokohtaiset luvut vertailulukujen määrittämiseksi

Ominaisuus	Vaihtoehto			
	Alihankkija A	Alihankkija B	Oma laite	Koneistus
Mittatarkkuus (A)	0,5	0,5	0,7	10,0
Pinnanlaatu (B)	2,0	2,0	2,0	10,0
Hinta (C)	4,0	5,0	10,0	0,3
Toimitusaika (D)	1,0	1,0	10,0	0,7
Kommunikaatio (E)	5,0	5,0	10,0	5,0

Liite 3. Värimalleja ja kuvia 3D-tulosteista.

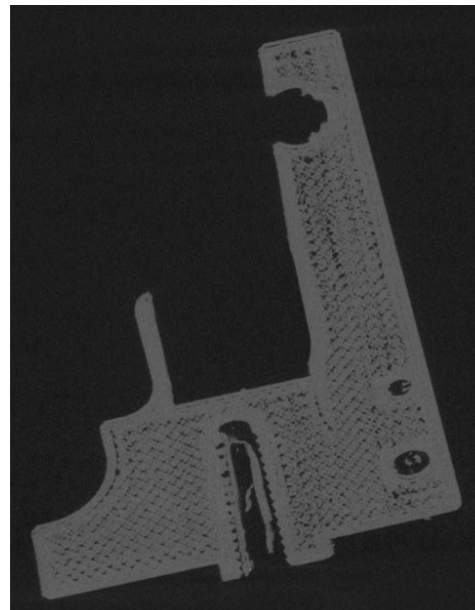
FDM, Ultimaker 3

- Material: PLA
- Printed without using water-soluble support material



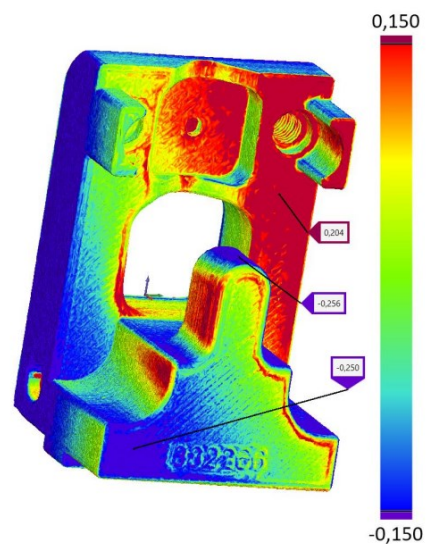
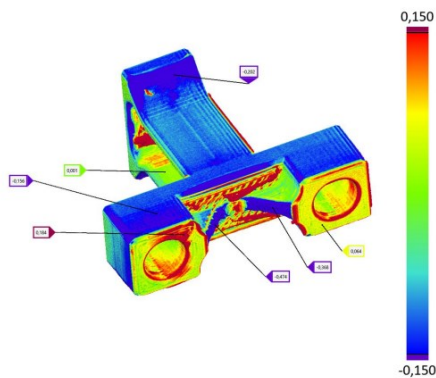
FDM, Ultimaker 3

- Material: PLA
- "Honey Comb" structure inside
- Unremoved support material is visible on holes
 - Because the support-structures were build of PLA.



FDM, Ultimaker 3

- Material: PLA



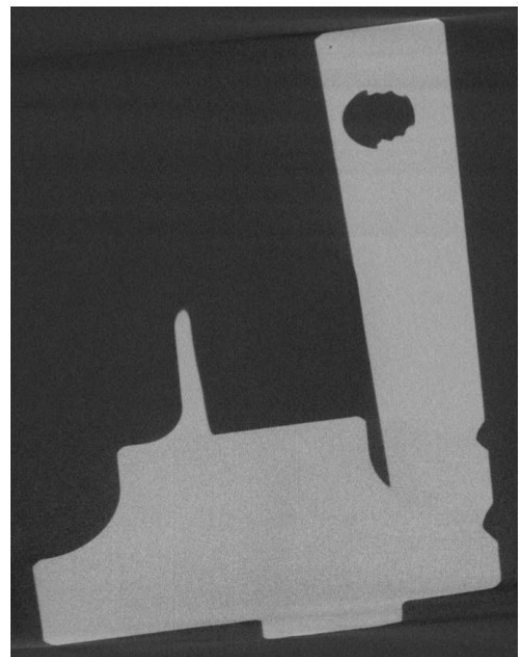
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Rigid 10K



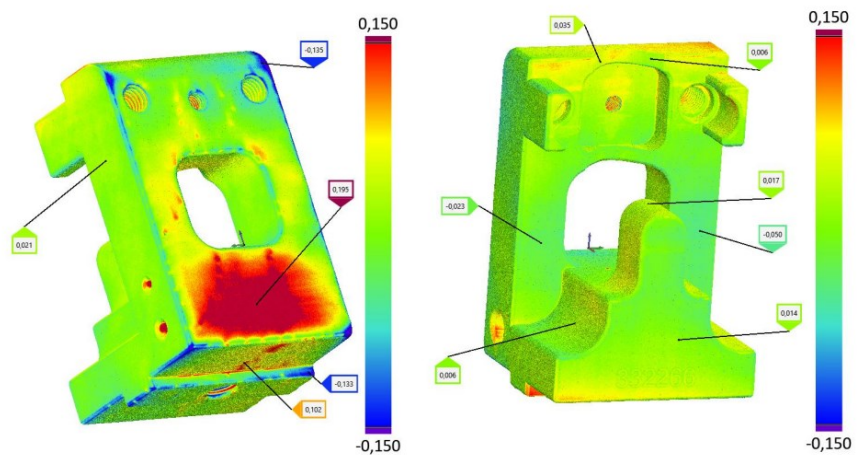
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Rigid 10K
- Solid material, nothing special on CT-clipping



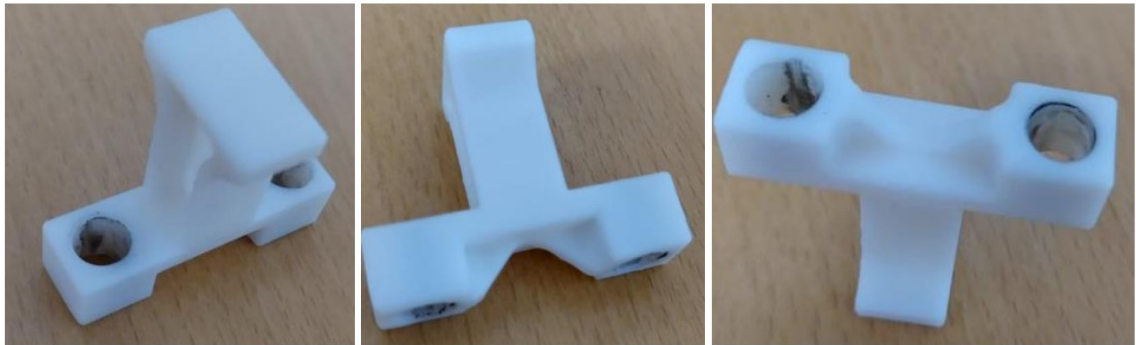
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Rigid 10K



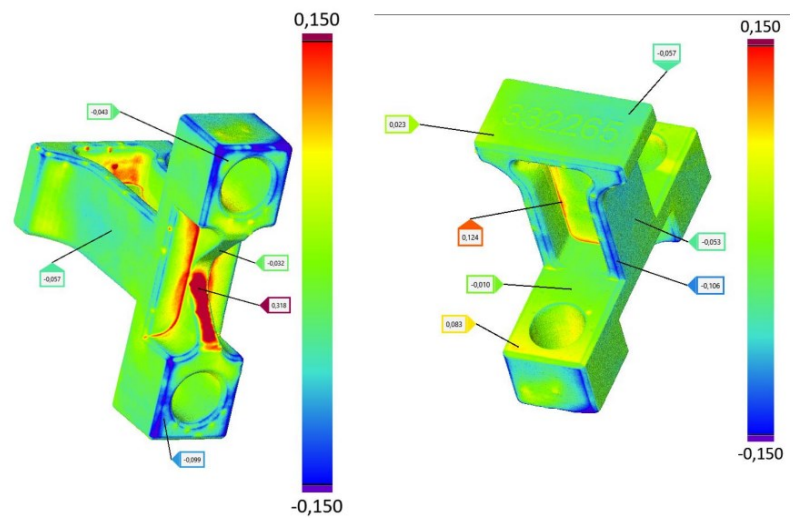
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Rigid 10K



SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Rigid 10K



SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Standard Black

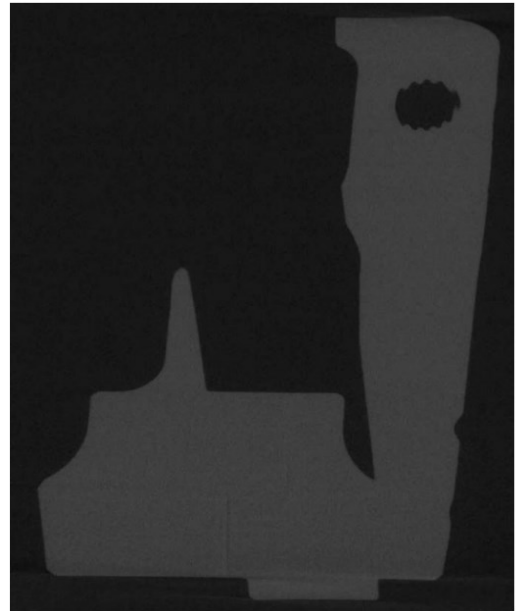
- Part fell on the floor on dispatch area, sleeve glued. No effect for usage

Low quality corner



SLA, Formlabs Form 3+

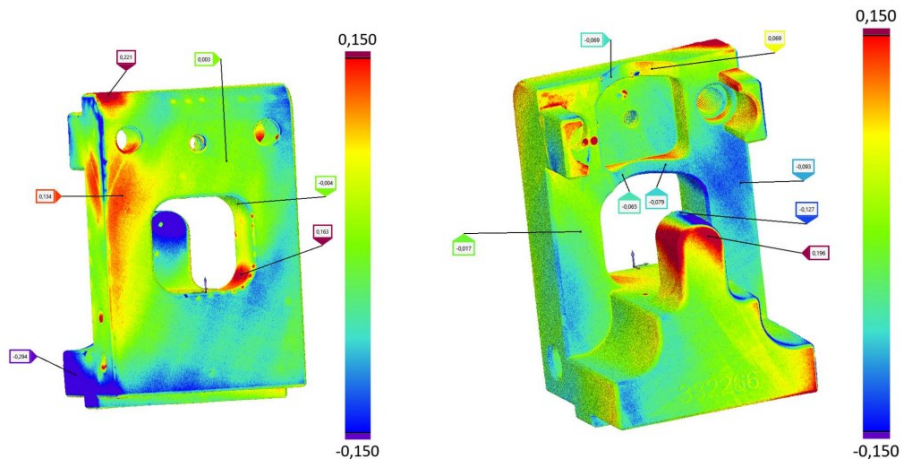
- **Material: Standard Black**
- Solid material, nothing special on CT-clipping



16 © Philips-Medisize

SLA, Formlabs Form 3+

- **Material Standard Black**



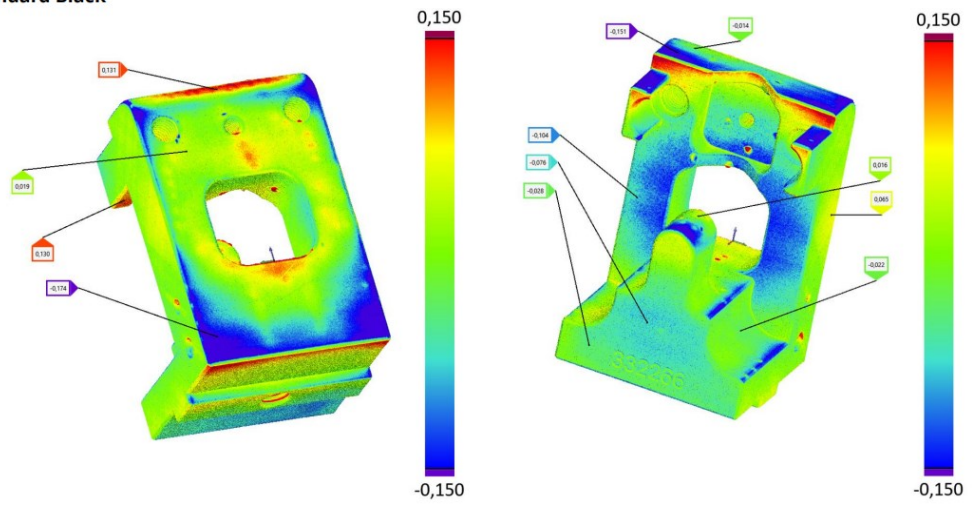
SLA, Formlabs Form 3+, Part 2

- **Material Standard Black**



SLA, Formlabs Form 3+, Part 2

- Material Standard Black



19 © Phyllis-Medsize

SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Standard Black



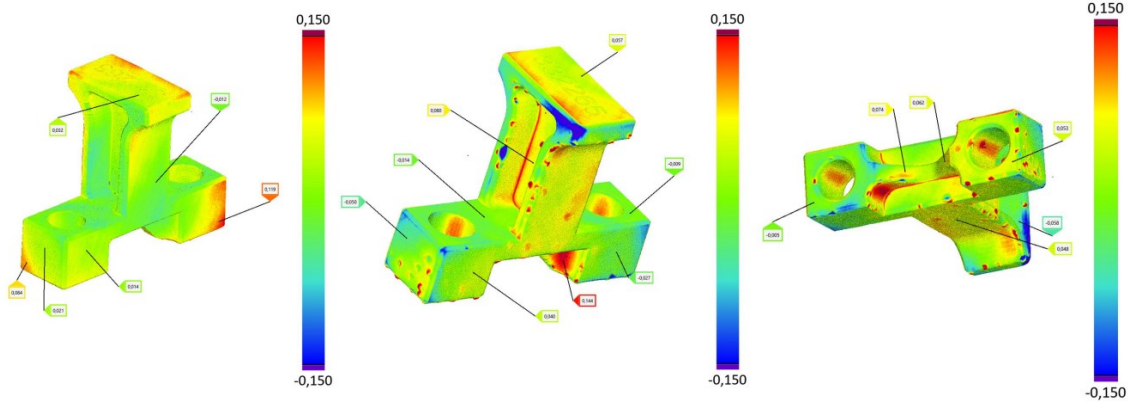
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Standard Black
- Support structure



SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Standard Black



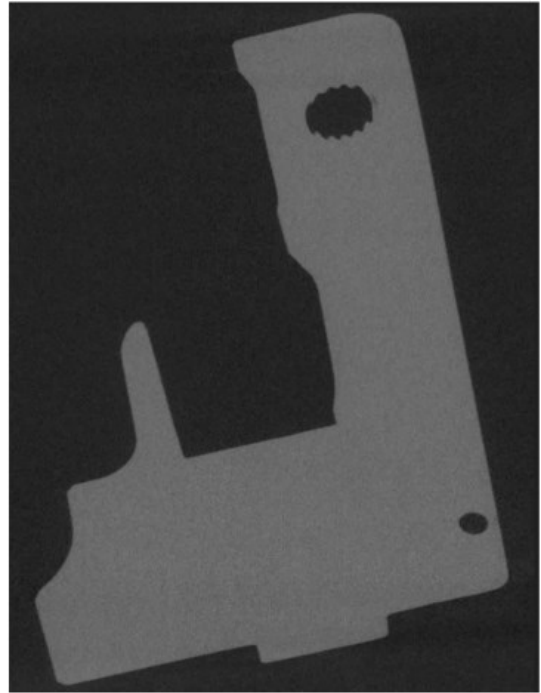
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Tough 1500



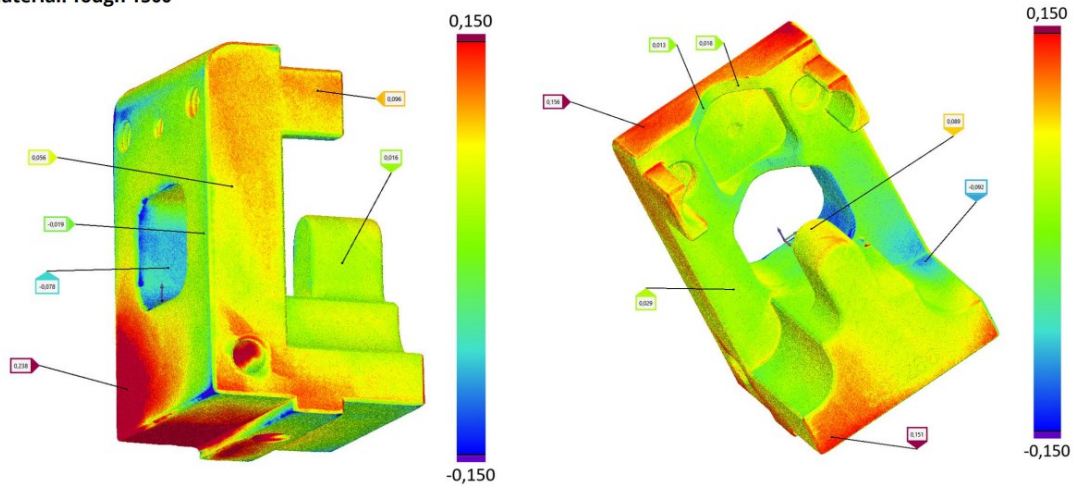
SLA, Formlabs Form 3+

- **Material: Tough 1500**
- Solid material, nothing special on CT-clipping



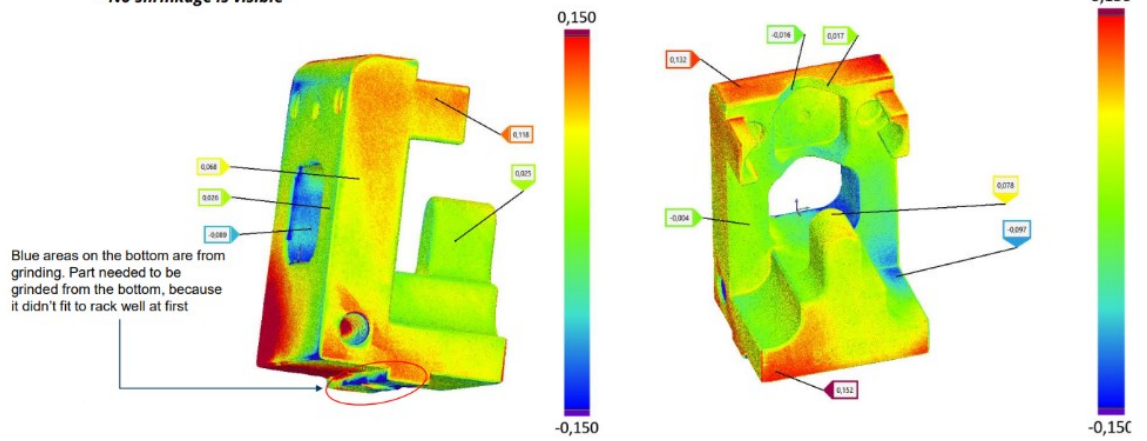
SLA, Formlabs Form 3+

- **Material: Tough 1500**



SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Tough 1500
- Re-scanned after 2 months to see shrinkage
- *No shrinkage is visible*



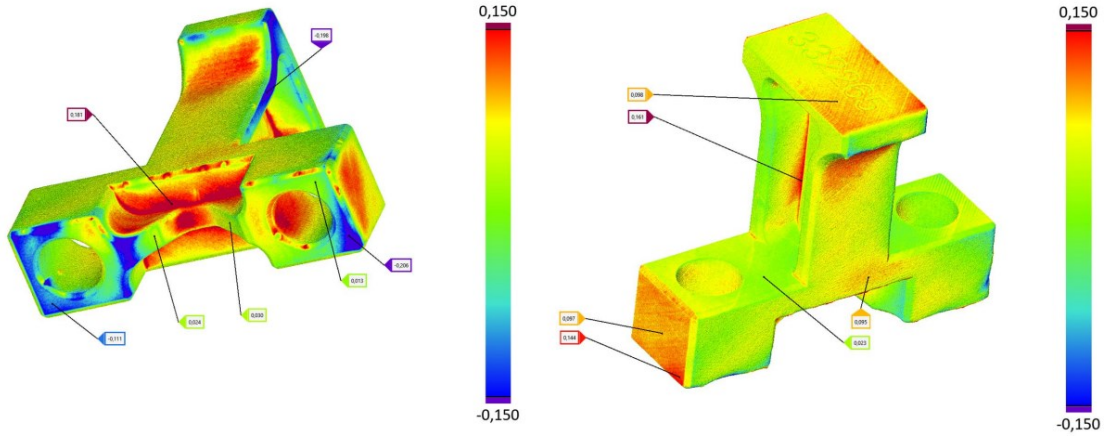
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Tough 1500



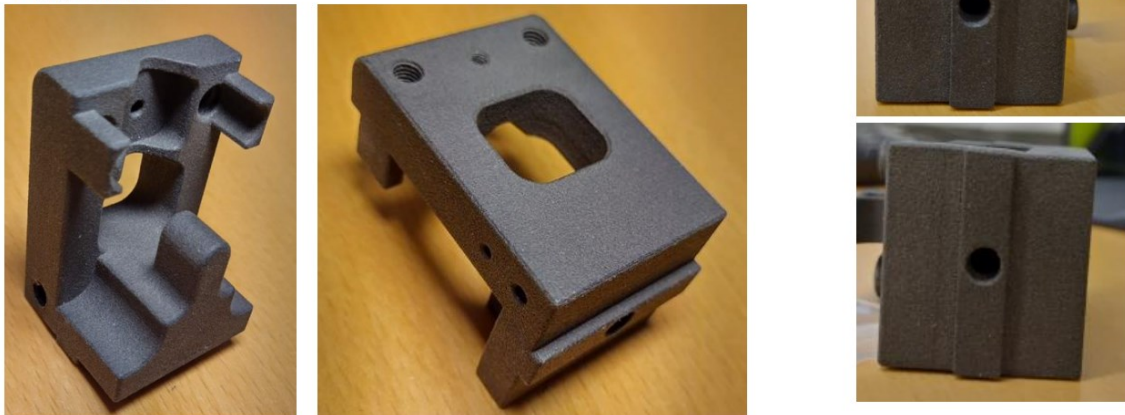
SLA, Formlabs Form 3+

- Material: Tough 1500



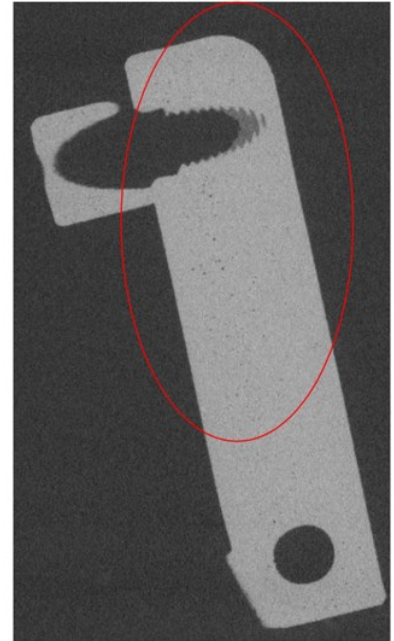
SLS, Formlabs Fuse 1

- Material: PA12



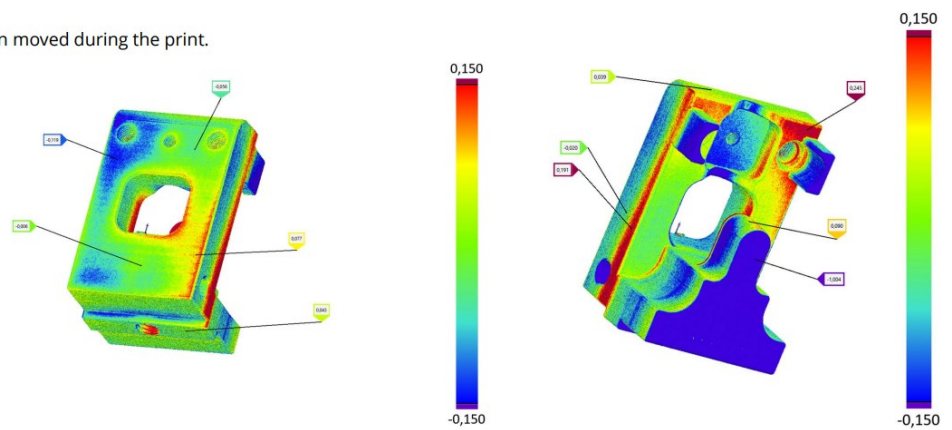
SLS, Formlabs Fuse 1

- **Material: PA12**
- Minor spots on CT-clipping.



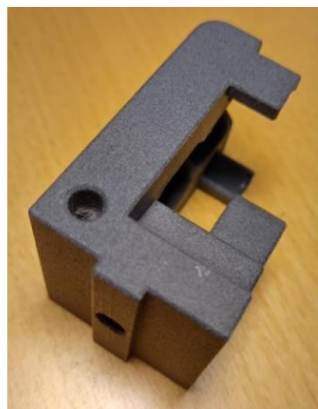
SLS, Formlabs Fuse 1

- **Material: PA12**
- Body part has been moved during the print.



SLS, Formlabs Fuse 1+, reprint

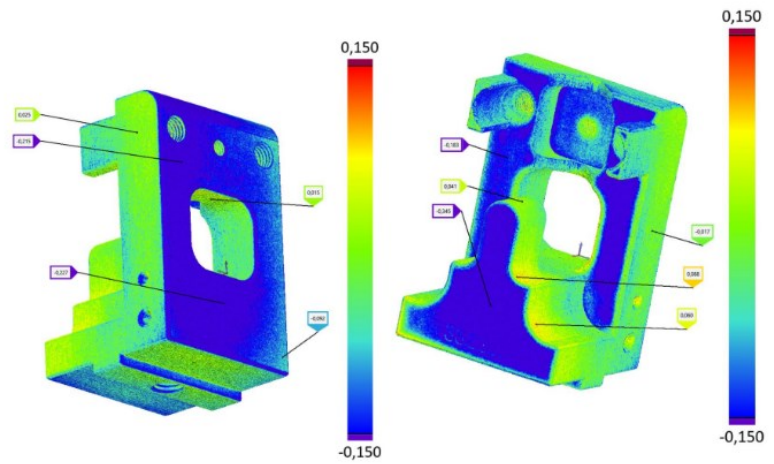
- **Material: PA12**



SLS, Formlabs Fuse 1+, reprint

• **Material: PA12**

- X- and Y-printing direction OK.
- Z-direction not OK.
- When printing, the powder is rolled using too much force?
 - *Better results if the machine would be re-calibrated on Z-direction?*



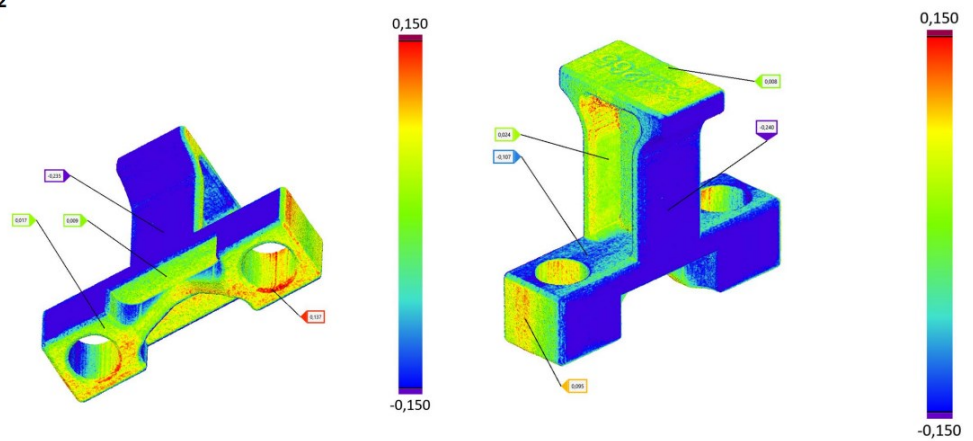
SLS, Formlabs Fuse 1

• **Material: PA12**



SLS, Formlabs Fuse 1

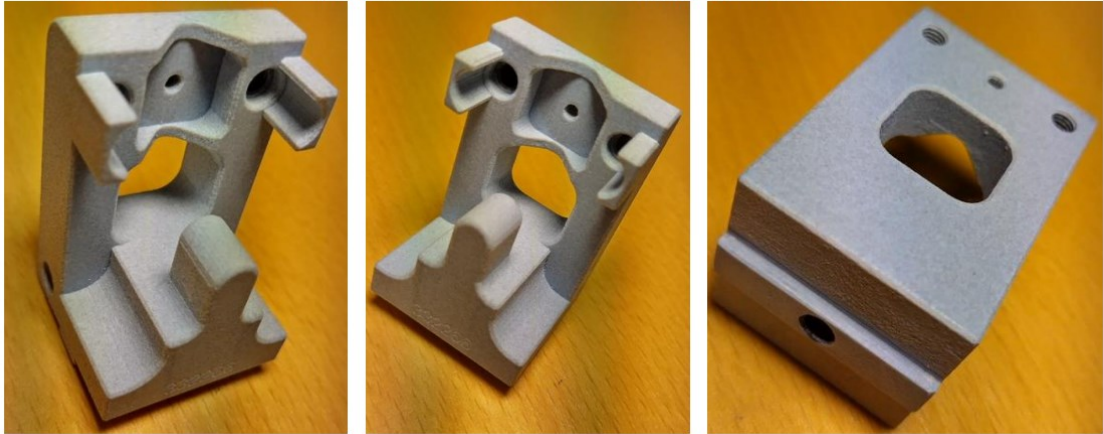
• **Material: PA12**



PolyJet, Stratasys J35 pro

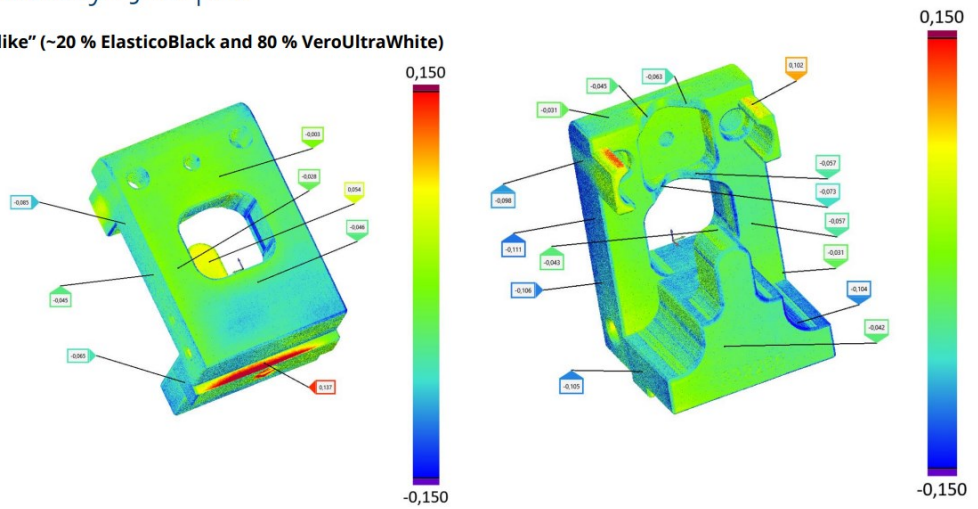
• Material: "PP-like" (~20 % ElasticoBlack and 80 % VeroUltraWhite)

- Sleeve broke during testing flexibility → 20/80 mix is not flexible enough for plastic springs



PolyJet, Stratasys J35 pro

• Material: "PP-like" (~20 % ElasticoBlack and 80 % VeroUltraWhite)



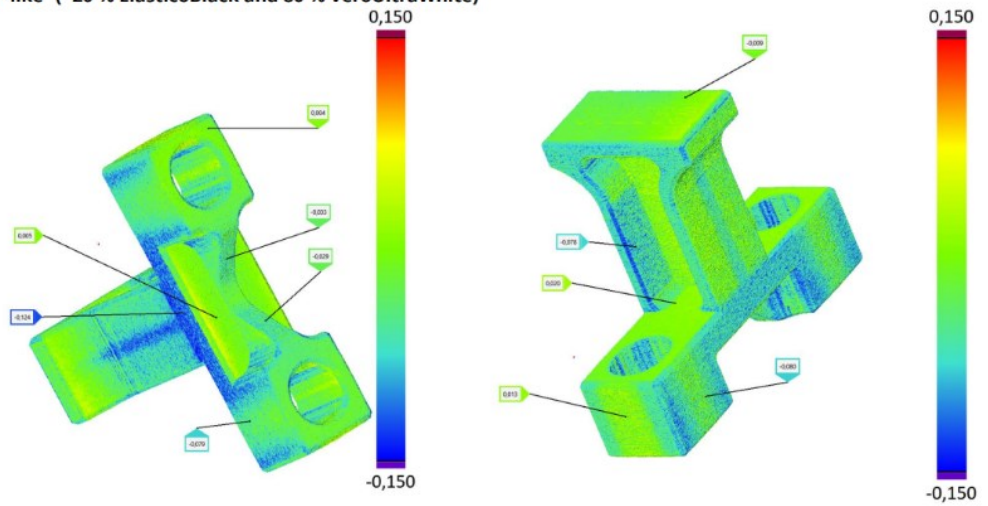
PolyJet, Stratasys J35 pro

• Material: "PP-like" (~20 % ElasticoBlack and 80 % VeroUltraWhite)



PolyJet, Stratasys J35 pro

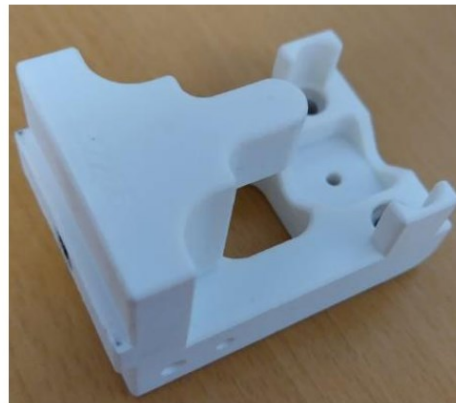
- Material: "PP-like" (~20 % ElasticoBlack and 80 % VeroUltraWhite)



PolyJet, Stratasys J35 pro

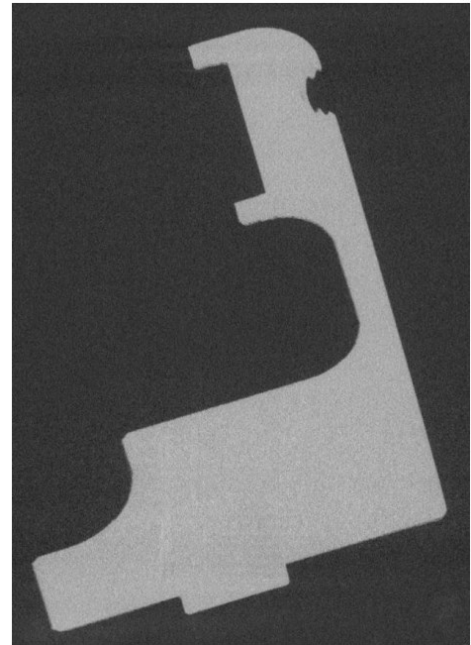
- Material: 100 % VeroUltraWhite

- Model broke when the bottom screw was screwed to the end of the bottom thread → glued together, no effect for usage



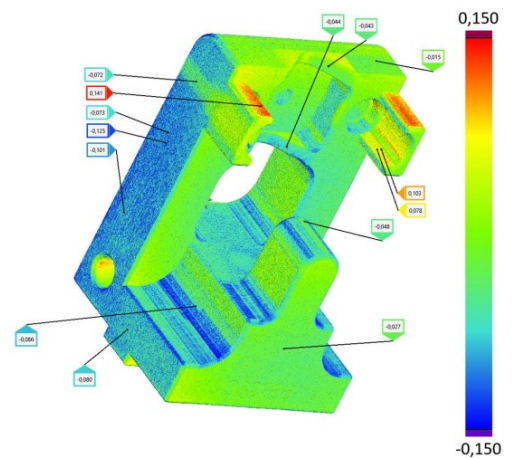
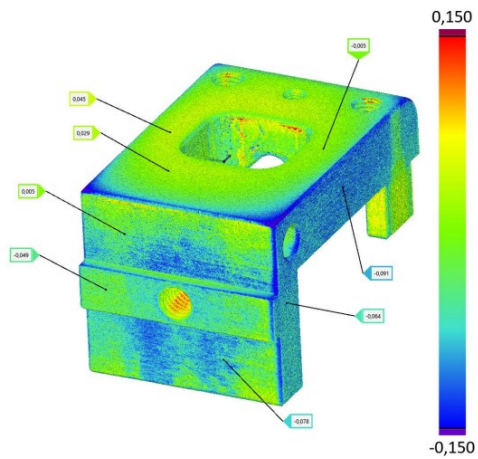
PolyJet, Stratasys J35 pro

- Material: 100 % VeroUltraWhite
- Solid material, nothing special on CT-clipping



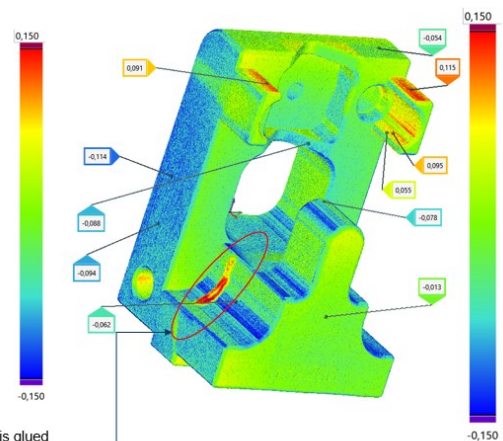
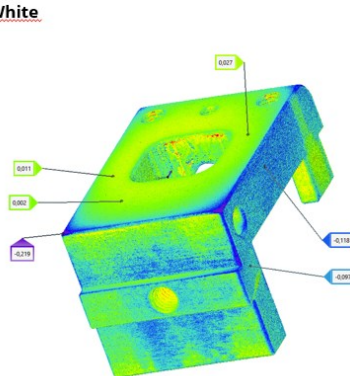
PolyJet, Stratasys J35 pro

- Material: 100 % VeroUltraWhite



PolyJet, Stratasys J35 pro, re-scan

- Material: 100 % VeroUltraWhite
- Rescanned after 2 months
- No major difference



Part has been broken, and it is glued back together. Gluing line is visible

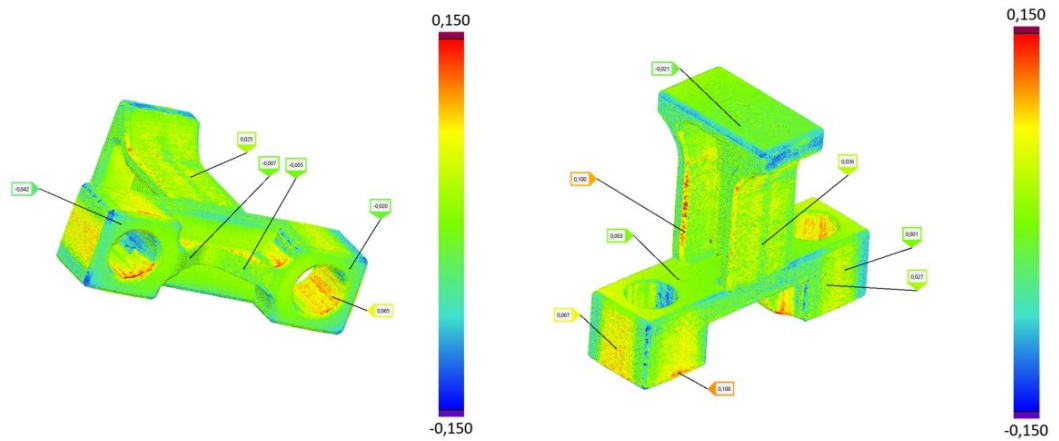
PolyJet, Stratasys J35 pro

• Material: 100 % VeroUltraWhite



PolyJet, Stratasys J35 pro

• Material: 100 % VeroUltraWhite



Liite 4. Mittaustulokset toiminnallisista testeistä.

M_POS 3	M_POS 8	M_POS15	DATE_TIME	JIG_MATERIAL	PART_NUMBER	COMMENT	MEASURING_DEVICE	OPERATOR	TEMP	HUMIDITY
5,431564	42,06182	23,57612	4.4.2023	3Djig_rigid10k	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,428586	42,09608	23,5819	4.4.2023	3Djig_rigid10k	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,440343	42,0927	23,60256	4.4.2023	3Djig_rigid10k	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,393275	42,08022	23,64056	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,410583	42,07227	23,58585	4.4.2023	3Djig_rigid10k	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,414623	42,10215	23,57479	4.4.2023	3Djig_rigid10k	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,426714	42,09202	23,57459	4.4.2023	3Djig_rigid10k	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,388717	42,07951	23,57522	4.4.2023	3Djig_rigid10k	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,409816	42,07883	23,5904	4.4.2023	3Djig_rigid10k	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,396327	42,10352	23,59503	4.4.2023	3Djig_rigid10k	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,412508	42,10012	23,60182	4.4.2023	3Djig_rigid10k	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,387743	42,08376	23,61227	4.4.2023	3Djig_rigid10k	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,394042	42,08107	23,6428	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,393599	42,08048	23,64182	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,396834	42,0787	23,64206	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,40707	42,07808	23,64275	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,407776	42,07851	23,64337	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,401296	42,0784	23,64234	4.4.2023	3Djig_rigid10k	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,413719	42,05932	23,5833	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,422424	42,09426	23,58729	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,436048	42,08732	23,60786	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %

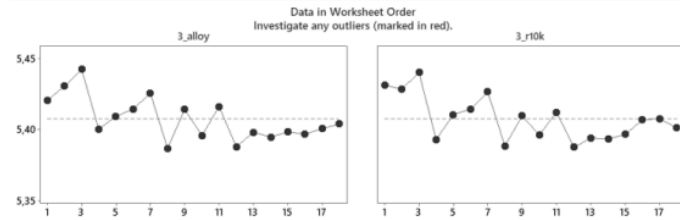
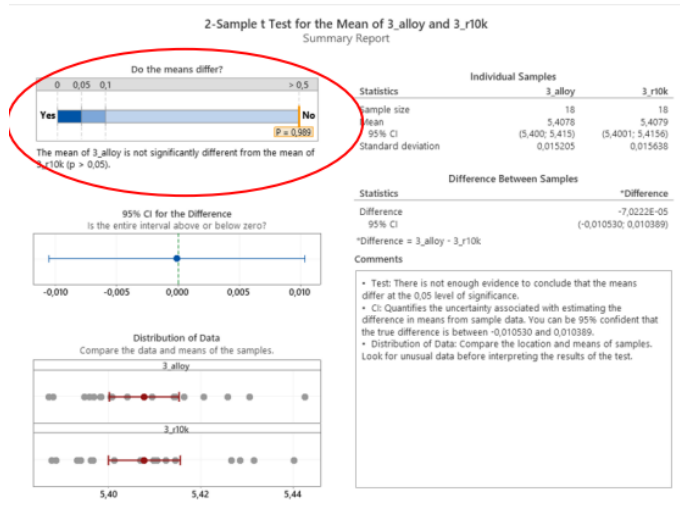
M_POS_3	M_POS_8	M_POS15	DATE_TIME	JIG_MATERIAL	PART_NUMBER	COMMENT	MEASURING_DEVICE	OPERATOR	TEMP	HUMIDITY
5,389116	42,07695	23,64539	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,407256	42,07203	23,59011	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,41139	42,09872	23,57929	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,424538	42,09032	23,5802	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,384981	42,0775	23,58049	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,407944	42,07818	23,59628	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,395344	42,10491	23,60004	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,412196	42,09904	23,607	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,385501	42,08508	23,61557	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,391097	42,077	23,64654	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,390948	42,07771	23,64678	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,389535	42,07691	23,64715	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,390474	42,07715	23,64741	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,389744	42,07954	23,64713	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,392458	42,07687	23,64777	4.4.2023	3Djig_veroultrawhite	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,417139	42,05957	23,58183	4.4.2023	3Djig_tough1500	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,428412	42,09574	23,58692	4.4.2023	3Djig_tough1500	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,436962	42,08862	23,60772	4.4.2023	3Djig_tough1500	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,391182	42,07798	23,64669	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,406924	42,07506	23,59311	4.4.2023	3Djig_tough1500	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,412235	42,09787	23,58078	4.4.2023	3Djig_tough1500	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,424093	42,09084	23,57998	4.4.2023	3Djig_tough1500	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,387068	42,08009	23,57948	4.4.2023	3Djig_tough1500	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,407375	42,07251	23,59522	4.4.2023	3Djig_tough1500	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,394929	42,10321	23,60008	4.4.2023	3Djig_tough1500	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,412191	42,09973	23,60544	4.4.2023	3Djig_tough1500	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,384391	42,09492	23,61647	4.4.2023	3Djig_tough1500	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,390933	42,0808	23,64671	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,390254	42,07911	23,64735	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,389606	42,08023	23,64757	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %

M_POS_3	M_POS_8	M_POS15	DATE_TIME	JIG_MATERIAL	PART_NUMBER	COMMENT	MEASURING_DEVICE	OPERATOR	TEMP	HUMIDITY
5,390448	42,07864	23,64688	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,389621	42,07829	23,64707	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,389565	42,07947	23,64713	4.4.2023	3Djig_tough1500	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,419558	42,05838	23,58322	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,42996	42,09564	23,58647	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,44061	42,09348	23,60738	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,393209	42,0798	23,64721	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,4082	42,07137	23,59156	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,416258	42,09937	23,58054	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,428894	42,09212	23,58087	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,387712	42,08051	23,57925	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,410592	42,07263	23,59604	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,397943	42,10535	23,60077	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,41456	42,09867	23,60647	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,38876	42,08612	23,6162	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,39296	42,08791	23,65084	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,393229	42,08242	23,64915	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,39407	42,08054	23,64929	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,392323	42,08103	23,64929	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,393281	42,08316	23,64932	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,395053	42,08055	23,64775	4.4.2023	3Djig_Standard_Black	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,41748	42,05912	23,58233	4.4.2023	3Djig_PP_like	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,43037	42,09531	23,58636	4.4.2023	3Djig_PP_like	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,440957	42,09277	23,60903	4.4.2023	3Djig_PP_like	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,392963	42,08103	23,6476	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,40829	42,07058	23,59162	4.4.2023	3Djig_PP_like	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,417342	42,09631	23,5791	4.4.2023	3Djig_PP_like	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,430316	42,09198	23,58008	4.4.2023	3Djig_PP_like	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,388993	42,07711	23,58084	4.4.2023	3Djig_PP_like	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,409236	42,0726	23,59595	4.4.2023	3Djig_PP_like	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %

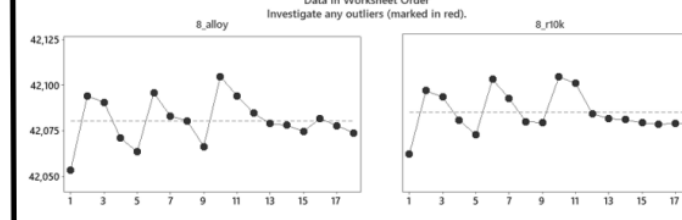
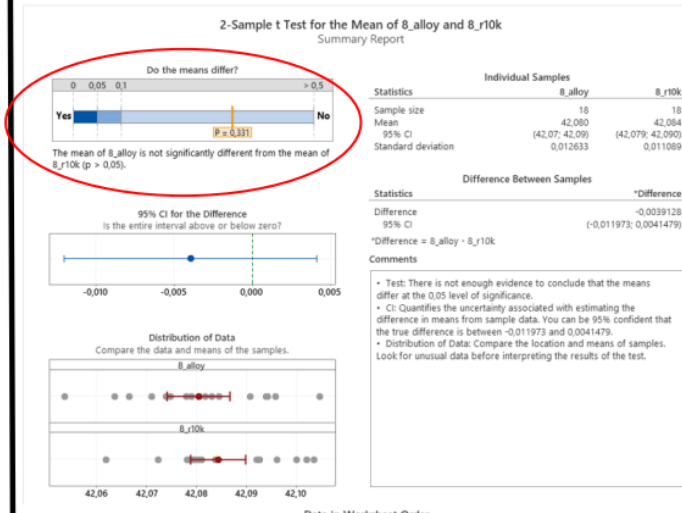
M_POS_3	M_POS_8	M_POS15	DATE_TIME	JIG_MATERIAL	PART_NUMBER	COMMENT	MEASURING_DEVICE	OPERATOR	TEMP	HUMIDITY
5,397178	42,10484	23,59973	4.4.2023	3Djig_PP_like	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,416652	42,10241	23,60601	4.4.2023	3Djig_PP_like	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,390625	42,08935	23,61581	4.4.2023	3Djig_PP_like	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,392303	42,08014	23,64701	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,391707	42,07756	23,64876	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,392881	42,07724	23,64826	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,39408	42,07875	23,64811	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,396203	42,07586	23,64961	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,395693	42,07683	23,64984	4.4.2023	3Djig_PP_like	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,4 °C	41,2 %
5,420159	42,05573	23,58943	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,43153	42,09528	23,58788	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,435103	42,08728	23,6135	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,391983	42,07981	23,65178	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,408282	42,06686	23,59495	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,413125	42,09666	23,5831	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,425701	42,09591	23,58599	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,382388	42,0812	23,58304	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,406996	42,06893	23,60202	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,394286	42,105	23,60265	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,409499	42,09439	23,61065	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,384956	42,09049	23,6185	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,391496	42,08274	23,65044	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,390516	42,08158	23,65029	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,389878	42,08155	23,65011	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,389806	42,08018	23,65031	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,390221	42,0821	23,65003	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,389263	42,07933	23,65032	12.4.2023	3Djig_pa12_fuse1+	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,420694	42,05357	23,58548	12.4.2023	JIG_ALLOY	1	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,430646	42,09402	23,58528	12.4.2023	JIG_ALLOY	2	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,442695	42,09072	23,60915	12.4.2023	JIG_ALLOY	3	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %

M_POS_3	M_POS_8	M_POS15	DATE_TIME	JIG_MATERIAL	PART_NUMBER	COMMENT	MEASURING_DEVICE	OPERATOR	TEMP	HUMIDITY
5,400497	42,071	23,65069	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,409543	42,06358	23,59149	12.4.2023	JIG_ALLOY	5	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,414561	42,09582	23,57845	12.4.2023	JIG_ALLOY	6	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,425889	42,08303	23,58062	12.4.2023	JIG_ALLOY	7	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,387091	42,08057	23,57663	12.4.2023	JIG_ALLOY	8	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,414295	42,06646	23,59831	12.4.2023	JIG_ALLOY	9	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,395953	42,10474	23,59861	12.4.2023	JIG_ALLOY	10	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,416426	42,09426	23,60539	12.4.2023	JIG_ALLOY	11	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,388046	42,08459	23,61367	12.4.2023	JIG_ALLOY	12	N/A	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,398389	42,07906	23,6465	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,394899	42,07799	23,64711	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,39856	42,07476	23,64682	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,396996	42,08174	23,65017	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,400843	42,07793	23,64844	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %
5,404129	42,07397	23,64664	12.4.2023	JIG_ALLOY	4	uusinta	O-INSPECT	JEI	22,2 °C	42,8 %

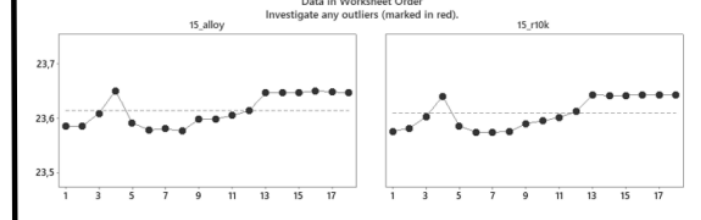
Formlabs Form 3+
• Rigid 10K



POS 3

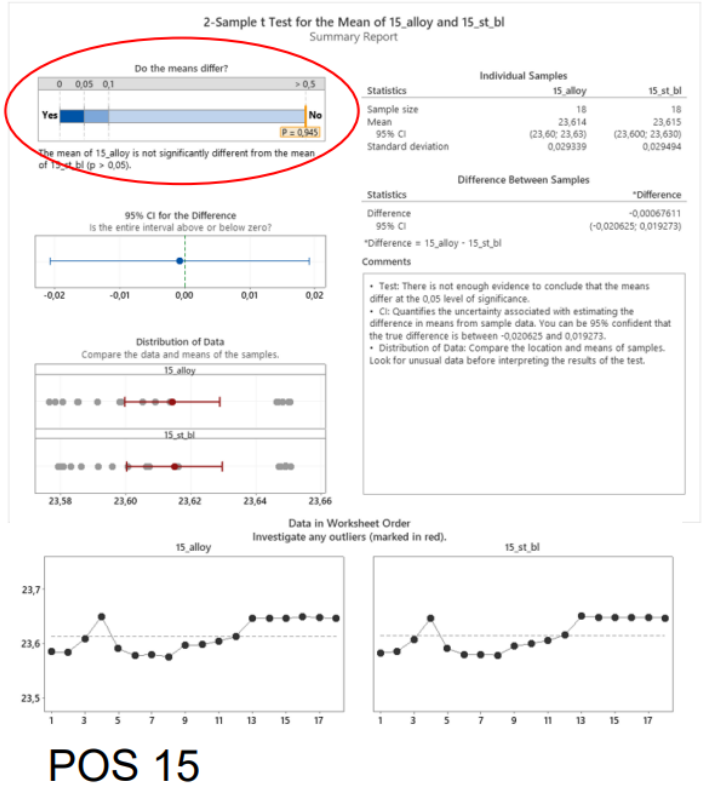
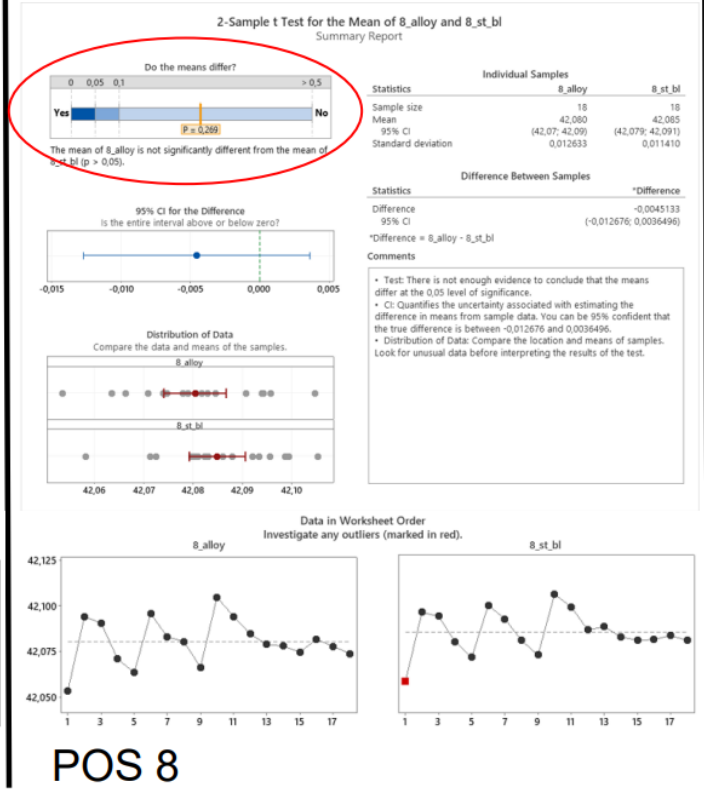


POS 8

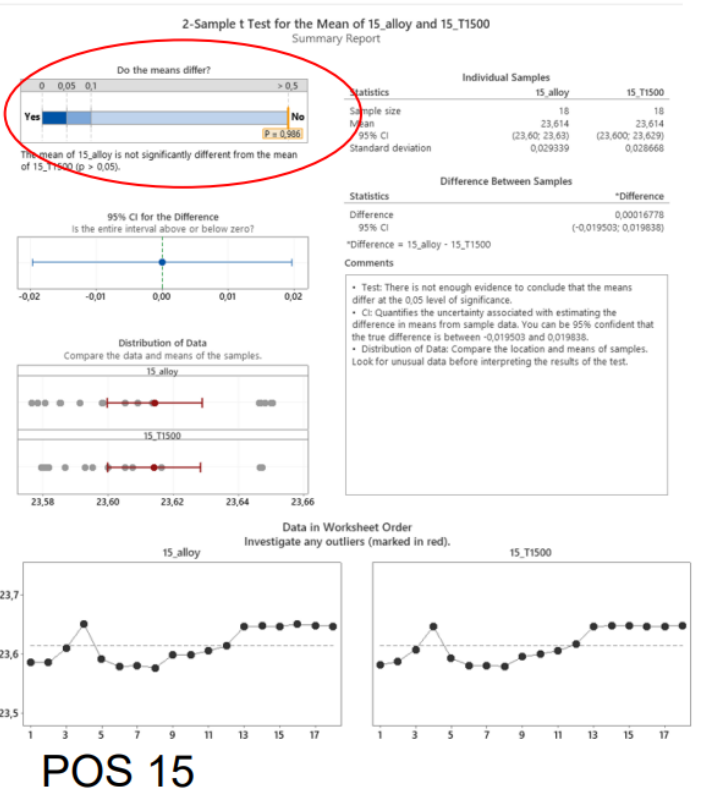
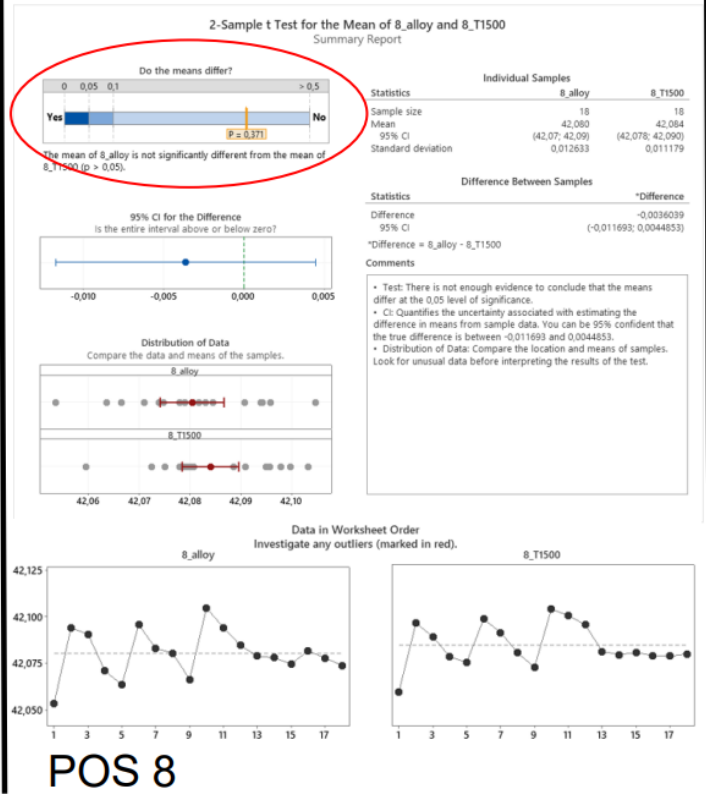


POS 15

• Standard black

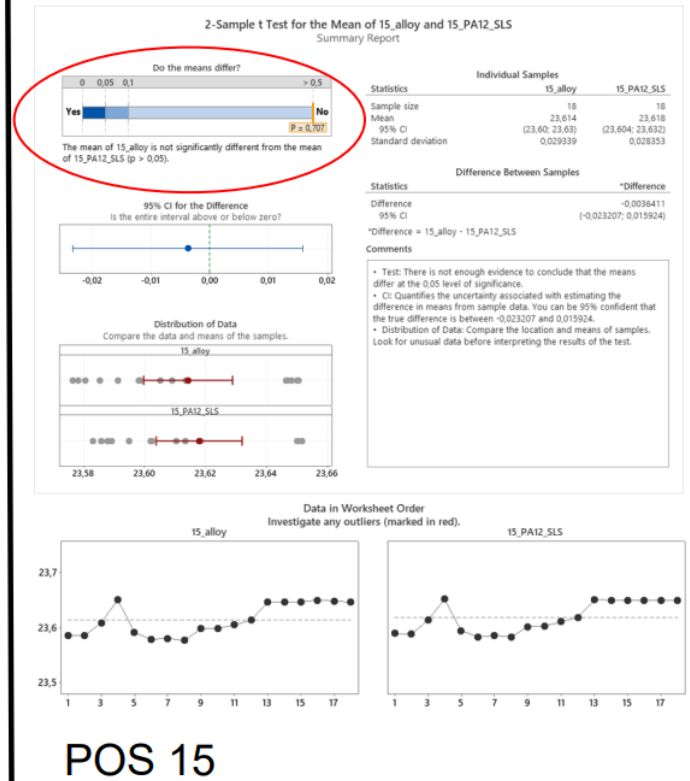
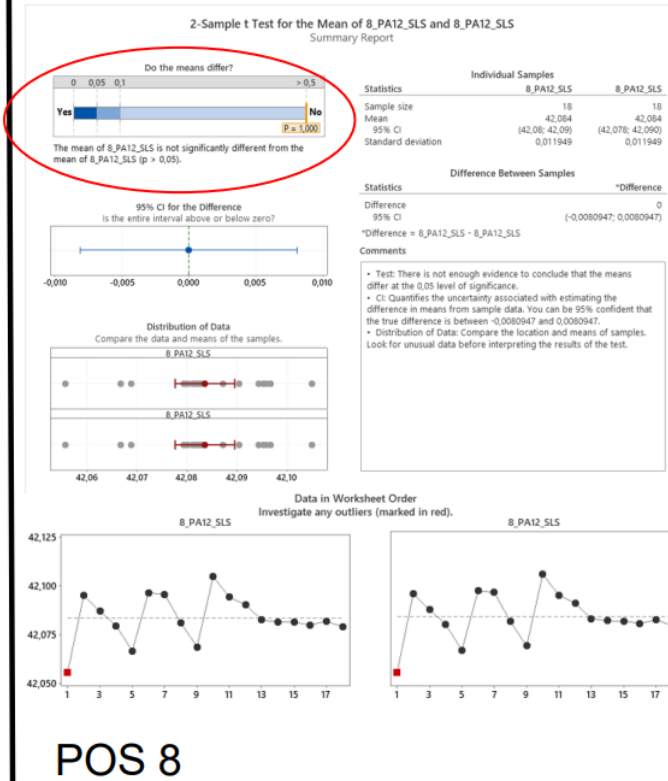


• Tough 1500



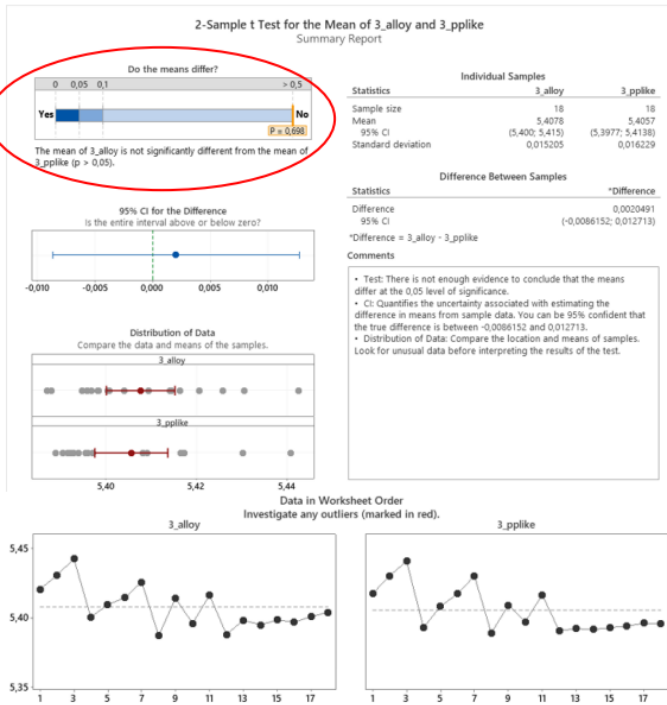
Formlabs Fuse 1+

• PA12 (SLS)

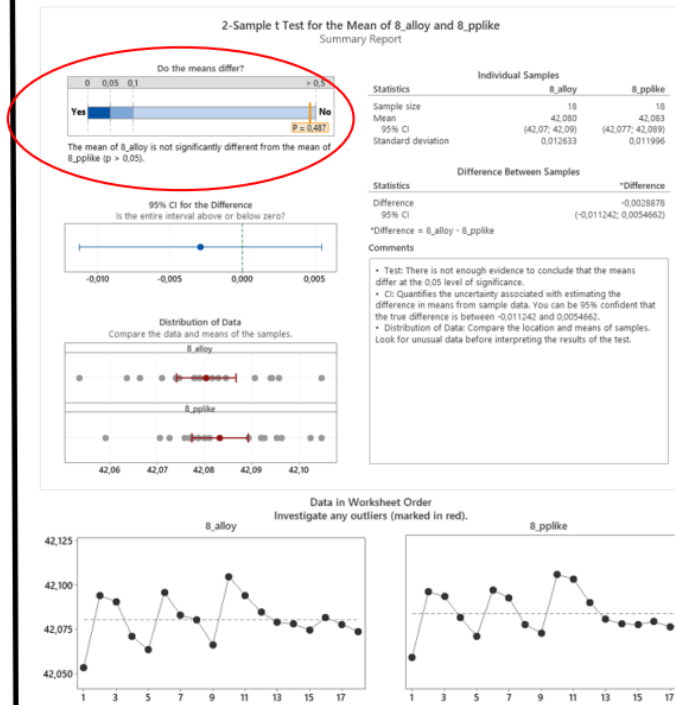


Stratasys J35Pro

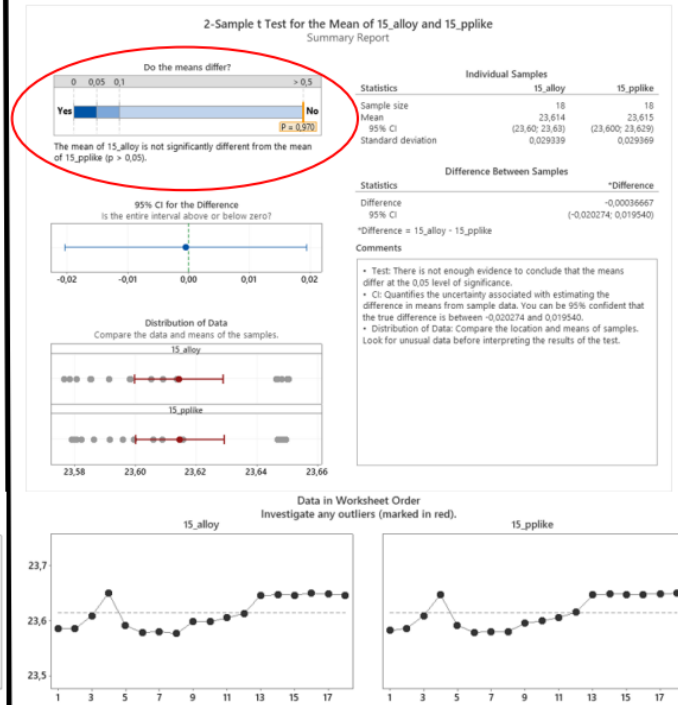
• PP-like



POS 3



POS 8



POS 15

• Vero Ultra White

