

Jenna Elonen

# HYDRAULISYLINTERIKOMPONENTTIEN 3D-TULOSTAMISEN TALOUDELLISUUS

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Ohjaaja: Heikki Kauranne, Fiellberg Oy & Jorma Vihinen  
Tarkastaja: Jorma Vihinen  
10 2020

# TIIVISTELMÄ

Jenna Elonen: Hydraulisyliinterikomponenttien 3D-tulostamisen taloudellisuus  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Lokakuu 2020

---

3D-tulostus (lisäävä valmistus) on metallisten hydraulisyliinterikomponenttien kohdalla suhteellisen uusi ja vähän käytetty valmistusmenetelmä. Menetelmää on toistaiseksi hyödynnetty lähinnä auto- ja ilmailuteollisuuden sekä lääketieteen käytössä, joiden sovelluksissa komponenteilta edellytetään erittäin suurta kulutuskestävyyttä. 3D-tulostuksen suosio on kuitenkin jatkuvassa kasvussa myös muilla aloilla, sillä menetelmä vaatii vähemmän työvoimaa kuin monet muut valmistusmenetelmät. 3D-tulostuksessa komponenttien valmistuskustannukset eivät riipu valmistettujen komponenttien määrästä samaan tapaan kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Lisäksi markkinoilla tarjolla olevien tulostusmateriaalien (eri metallijauheet) valikoima kasvaa jatkuvasti ja myös tulostuspalveluita tarjoavien yritysten määrä on kasvussa niin Suomessa kuin ulkomailla. 3D-valmistuksen kustannuksiin vaikuttavat useat eri tekijät, kuten tulostusmateriaali, tuotettavien kappaleiden määrä sekä tulostettujen kappaleiden tukirakenteiden poistotarve ja kappaleiden jälkityöstön tarve.

Käytettävissä olevat tulostuslaitteet asettavat kappaleille eräitä geometrisia rajoitteita, jotka tietyiltä osin vaikuttavat tulostettavien kappaleiden muuten varsin vapaaseen suunnitteluun. Rajoitteet liittyvät lähinnä kappaleiden kokoon, muttei niiden monimutkaisuuteen, mikä ei myöskään juuri vaikuta komponenttien valmistuskuluihin, koska menetelmässä kappaleet valmistuvat kaikilta osin kerros kerrokselta, eikä kappaleeseen ole tarvetta kohdistaa haastavia ylimääräisen materiaalin poistomenetelmiä.

Tässä kandidaatintyössä selvitetään metallin 3D-tulostuksessa syntyviä kuluja, kuinka niihin voidaan vaikuttaa ja milloin tulostaminen on taloudellisesti kannattavaa perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Työn aikana havaittiin, että huolellisen suunnittelun ja onnistuneen topologisen optimoinnin avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä sekä parantaa kappaleen teknisiä ominaisuuksia ja vähentää komponentin painoa.

Kulutarkastelu tehdään kahdelle erilaiselle kappaleelle; pitkän ja johdonmukaisen suunnittelutyön pohjalta syntyneelle digiventtiililohkolle, joka voidaan integroida osaksi hydraulisyliinteriä, sekä korva- ja pohjakappaleesta koostuvalle hydraulisyliinterin niveltakapälle. Näiden kahden kappaleen kohdalla saatujen tulosten sekä saatavilla olevan materiaalin pohjalta voidaan todeta, että 3D-tulostaminen on taloudellisesti kannattavinta silloin, kun kyseessä on pieni kappale, joka teknisiltä ominaisuuksiltaan tai topologialtaan on sellainen, että sen valmistaminen on haastavaa perinteisin menetelmin. 3D-tulostuksen sarjatuotanto on järkevintä piensarjatuotannossa (alle 100 kappaleen sarjat), kun taas sitä suuremmissa sarjoissa monet perinteiset menetelmät tulevat edullisemmiksi.

Kirjoittajan oma ennuste tämän kandidaatintyön pohjalta on, että metallin 3D-tulostus tulee kasvamaan tulevaisuudessa eksponentiaalisesti tietoisuuden ja kannattavuuden kasvaessa. Ekologisuusnäkökulma sekä suunnitteluaspekti tarjoavat parempia mahdollisuuksia suhteessa perinteisiin menetelmiin monella eri tieteenalalla.

Avainsanat: 3D-tulostaminen, digiventtiililohko, hydraulisyliinteri, lisäävä valmistus, metallijauhe, niveltakapää.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Jenna Elonen: Economics of 3D printing in manufacturing of hydraulic cylinder components  
Bachelor thesis  
Tampere University  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
October 2020

---

3D printing (additive manufacturing) is a relatively new and little used manufacturing method for metal hydraulic cylinder components. The method has so far been used mainly in the automotive, aerospace and medical industries and, where applications require very high wear resistance. However, the popularity of the method is growing in other fields because it requires less labor than other manufacturing methods. In the 3D printing, the manufacturing costs depend less on the quantities of components produced than in other methods. In addition, the range of printing materials (various metal powders) available on the market is constantly growing, and the number of companies offering printing services is also growing both in Finland and abroad. The cost of 3D manufacturing is affected by several factors, such as the printing material, the number of pieces to be produced, as well as the need to remove the support structures and the need for post-processing of the printed pieces.

The available printing devices impose certain geometrical constraints on the pieces, which in certain respects affect the otherwise quite free design of the pieces to be printed. The constraints are mainly related to the size of the pieces, but not to their complexity. Unlike in conventional methods, the complexity of the component has little effect on the manufacturing costs in 3D printing, as the pieces are all made layer by layer and there is no need for challenging excess material removal methods.

This bachelor's thesis investigates the costs of 3D printing of metal, how they can be influenced, and the economic feasibility compared to traditional manufacturing methods. During the work, it was found that with careful design and successful topological optimization it is possible to achieve significant cost savings as well as improve the technical properties of the part and reduce the weight of the component.

The cost analysis is performed for two different pieces; a complex digital valve block and a simpler cylinder bottom part. The digital valve block is a result of long and consistent design work and it can be integrated as part of a hydraulic cylinder. The bottom part of a hydraulic cylinder consists of an ear and a bottom piece. Based on the results obtained for these two pieces and the available material, it can be concluded that 3D printing is more economically viable for a small piece that is technically or topologically challenging to produce by traditional methods. Serial production of 3D printing makes the most sense in small series production (series of less than 100 pieces), while in larger series, many traditional methods become more economical.

The author's own prediction based on this bachelor's thesis is that 3D printing of metal materials will grow exponentially in the future as the awareness and profitability increase. The ecological and the design aspects offer better opportunities compared to traditional methods for the use of many different disciplines.

Keywords: 3D-printing, additive manufacturing, cylinder bottom part, digital valve block, hydraulic cylinder, metal powder

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Kandidaatintyö on tehty osana kandidaatin tutkinnon suorittamista Tampereen yliopistolla.

Kiitän kandidaatintyön ohjaajaa Heikki Kaurannetta sekä koko Fiellberg Oy:n, Fiellberg Fluid Oy:n ja Delva Oy:n henkilökuntaa avusta, neuvoista ja yhteistyöstä tämän mielenkiintoisen aiheen ympärillä.

Tampereella, 25.10.2020

Jenna Elonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. METALLIKOMPONENTTIEN 3D-TULOSTAMINEN .....	2
2.1 Materiaalit .....	2
2.2 Teknologiat .....	3
2.3 Valmistusaika.....	4
2.4 Viimeistely.....	5
2.5 Edut ja haasteet.....	6
3. 3D-TULOSTETTAVIEN SYLINTERIKOMPONENTTIEN SUUNNITTELU.....	9
3.1 Suunnitteluperiaatteet.....	9
3.2 Tukirakenteet .....	10
3.3 Lämpörasitukset ja vääristymät .....	11
3.4 Kappaleen asettelu alustalle.....	12
4. SYLINTERIKOMPONENTTIEN 3D-TULOSTAMISEN TALOUDELLISUUS.....	13
4.1 Palveluntarjoajat Suomessa .....	13
4.2 Valmistajien hinnoitteluperiaatteet .....	15
4.3 Koekappaleet.....	15
5. YHTEENVETO .....	23
LÄHTEET .....	25

# KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Kuormanlaskuventtiin ominaisuuksia optimoiva 3D-suunnittelu (Fiellberg Oy 2015) .....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 2. 3D-tulostettavan kappaleen suunnitteluvaiheet eli AM-suunnitteluvaiheet (Wells 2018) .....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 3. Tyypillisimmät tukia vaativat rakenteet vasemmalta oikealle: suuri ylityskulma, tukematon alue, suuri ulkoneva alue (Yang et al. 2017, s. 98) .....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 4. Metallien 3D-tulostuksessa käytettävät yleisimmät tukigeometriat vasemmalta oikealle: lohko, tähti, verkko, reunus ja linja (Yang et al. 2017, s. 99) .....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 6. Maailmanlaajuiseen kasvuennusteeseen ja suomalaisen teollisuuden BKT:hen perustuva ennuste mahdollisesta AM-potentiaalin kehityksestä Suomessa (Wohlers 2018).....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 5. Laatusot metallin 3D-tulostuksessa alhaalta ylöspäin (1–5) luokiteltuna (Hämeenaho 2019) .....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 7. 3D-tulostusta varten suunniteltu digiventtiin kanavistolohko (Lantela, Fiellberg Oy 2020).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 8. 3D-tulostettu digiventtiin kanavistolohko .....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 9. Digiventtiin kanavistolohkon kustannusvertailu sarjakoon mukaan.....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 10. Hydraulisynterinin pohjakappaleen 3D-malli ennen topologista optimointia.....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 11. Hydraulisynterinin pohjakappaleelle laskettu von Mises -jännitys jakauma ennen topologista optimointia, myötölujuus <math>2,75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2</math> .....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 12. Hydraulisynterinin pohjakappaleen 3D-malli yksinkertaisen topologisen optimoinnin jälkeen, mahdolliset tulostussuunnat merkitty kuvaan nuolella.....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 13. Hydraulisynterinin pohjakappaleen von Mises -jännitys jakauma topologisen optimoinnin jälkeen, myötölujuus <math>3,15 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2</math> .....</i>	<i>21</i>

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

17-4PH ruost.	engl. SAE Type 630 stainless steel, ruostumaton teräs
316L ruost.	engl. SAE 316L stainless steel, ruostumaton teräs
Al-Si-10-Mg	engl. Aluminium alloy, alumiiniseos
AM	engl. Additive Manufacturing, lisäävä valmistus
BJ	engl. Binder Jetting, sideaineen suihkutus
BKT	Bruttokansantuote
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CFD	engl. Computational Fluid Dynamics, laskennallinen virtausdynamiikka
CNC-jyrsin	engl. Computerized Numerical Control, tietokoneohjattu jyrsin
Co-Cr-Mo	engl. Cobalt-chromium-molybdenum alloy, koboltti-kromi-molybdeeniseos
CP-Ti	engl. Commercially Pure titanium, kaupallisesti puhdas titaani
DMLS	engl. Direct Selective Laser Sintering, metallin lasersintraus
EBM	engl. Electron Beam Melting, elektronisuihkusulatus
FEM	engl. Finite Element Method, elementtimenetelmä
IN-625	Inconel 625, nikkeli-kromiseos, johon on lisätty molybdeenia ja niobiumia
IN-718	Inconel 718, nikkeli-kromiseos, johon on lisätty rautaa, niobiumia, molybdeenia, alumiinia ja titaania
LPBF	engl. Laser Powder Bed Fusion, laserjauhefuusio
PBF	engl. Power Bed Fusion, jauhepetisulatus
SLM	engl. Selective Laser Melting, lasersulatus
Ti-6Al-4V	engl. Alpha-beta titanium alloy, alfa-beeta-titaaniseos
UAM	engl. Ultrasonic Additive Manufacturing, ultraääninen lisääainevalmistus
cm <sup>3</sup>	kuutiosenttimetri
g	gramma
GPa	Giga Pascal
kg	kilogramma
mm	millimetris
MPa	Mega Pascal
m/s	metriä per sekunti
N/m <sup>2</sup>	Newton per neliometri
W	Watti

# 1. JOHDANTO

3D-tulostaminen eli lisäävä valmistus (engl. Additive Manufacturing, AM), on tekniikka, jossa tuotetaan kiinteitä kappaleita niistä laaditun kolmiulotteisen (3D) tietokonemallin pohjalta. Valmistus tapahtuu lisäämällä metallijauhetta kerroksittain 3D-tulostusalustalle. Metallia tulostettaessa suunnittelun on oltava alusta asti tarkoin harkittua, jotta tulostuksen kappaleelle vaatimat tukirakenteet ja kappaleen asettelu pystytään toteuttamaan oikein. Tämän materiaalin tulostuksessa on lisäksi otettava huomioon tulostuksen aikainen korkea lämpötila ja sen vaikutus kappaleeseen. Näiden seikkojen johdosta metallikappaleiden 3D-tulostusprosessi eroaa hieman tutummasta muovikappaleiden 3D-tulostamisesta.

3D-tulostaminen on noussut erääksi potentiaalisimmista vaihtoehtoisista valmistustavoista monestakin syystä: se optimoi työvoiman tarvetta, työstölaitteistoa, materiaalihukkaa ja eliminoi kokoonpanovaiheen. Tämä valmistustapa on oiva vaihtoehto myös silloin, kun valmistettavat kappaleet ovat monimutkaisia tai niiden valmistaminen edellyttää vaativaa koneistusta. Pääperiaatteena voidaan pitää, että 3D-tulostus kannattaa valita valmistusmenetelmäksi perinteisten menetelmien sijaan silloin, kun kappale on hitaasti valmistettava tai monimutkainen ja haastava työstettävä. (Tuan et al. 2018; Gupta 2019)

Tämä kandidaatintyö toteutettiin yhteistyössä hydraulisylinterisuunnittelua ja -valmistusta tarjoavan yrityksen, Fiellberg Oy:n kanssa, sekä konsultoimalla metallien 3D-tulostuksen asiantuntijaa Delva Oy:tä. Kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää metallisten hydraulisylinterikomponenttien 3D-tulostamisesta syntyviä kuluja, kuinka niihin voidaan vaikuttaa ja sitä kautta tarkastella, missä tilanteessa tulostaminen on taloudellisesti kannattavaa suhteessa komponenttien perinteiseen valmistamiseen. Koska 3D-tulostettujen metallikomponenttien mekaaniset ominaisuudet on osoitettu riittävän hyviksi (Gibson et al. 2010, s. 25; Tuan et al. 2018), ei niiden selvittäminen ole tässä työssä tarpeen, vaan tässä keskitytään ainoastaan tämän valmistustavan taloudelliseen puoleen.



## 2. METALLIKOMPONENTTIEN 3D-TULOSTAMINEN

### 2.1 Materiaalit

3D-tulostamisessa voidaan käyttää useita eri metalleja ja voidaan todeta, että suuri osa tulostamisen kustannussäästöistä voidaan toteuttaa juuri materiaalivalinnan avulla. Hintaerot eri metallien välillä perustuvat pitkälti materiaalin ominaisuuksiin sekä lopputyöstä aiheutuviin mahdollisiin haasteisiin.

Nykyään lähes kaikki metallin 3D-tulostusprosessit nojautuvat metallijauheen käyttöön, joten tulostusmateriaalien käyttö riippuu lähes pelkästään siitä, kuinka hyvin ja helposti metallin jauhemainen muoto kyetään sulauttamaan energialähteen avulla yhteen (Tuan et al. 2018). 3D-tulostettavien metallikappaleiden valikoima on kokonaisuudessaan vielä varsin rajallinen. Osin tämä johtuu markkinoiden ostovoimasta ja osin valmistajien materiaalmääritysten puutteellisuudesta. Tämänhetkinen metallijauhevalikoima sisältää yleisimmin käytetyt materiaalit eli teräksen, alumiinin, nikkelin sekä koboltti- ja titaani-seokset. Edellisten lisäksi monet valmistajat tarjoavat myös omia materiaalejaan. Taulukossa 1 on esitelty yleisimmät metallimateriaalit ominaisuuksineen. (Yang et al. 2017, s. 84–85)

**Taulukko 1.** Yleisimmät saatavilla olevat metallijauhemateriaalit (Yang et al. 2017, s. 84–85)

Metalli	Kimmokerroin (GPa)	Vetolujuus (MPa)	Venymä (%)
Ti-6Al-4V	110–120	930–1 020	10–14
CP-Ti	-	570	21
316L ruost.	184–185	633–640	40
Maraging-teräs	160	1 110	10–11
17-4PH ruost.	160–170	850–1 300	10–25
Co-Cr-Mo	191–200	960–1 100	20
IN-625	170–182	827–961	35
IN-718	166–170	994–1 241	18
Al-Si-10-Mg	60–78	240–361	5–20

Edellä olevan taulukon ja perinteisten spesifikaatioiden (juoksevuus ja partikkelikoko-kauma pinnoitteen jakautumista silmällä pitäen) ohella on otettava huomioon monia muita materiaaleista johtuvia tekijöitä: metallijauheen levittäytyminen ja jauhemateriaalin kemialliset ominaisuudet. Tällä hetkellä AM-metallijauhe muodostaa vain pienen osan metallijauheiden kokonaismarkkinoista. Tämä vaikuttaa suoraan paitsi kustannuksiin,

myös metallijauhevalmistajien aktiivisuuteen uusien materiaalien kehittämisessä. (Yang et al. 2017, s. 84–85)

Suunniteltaessa hydraulisylinterikomponentteja meriolosuhteisiin on 3D-tulostettaessa tärkeää ottaa huomioon metallijauhemateriaalien korroosionkestävyys. Korroosionkestävyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin materiaali kykenee vastustamaan ympäristön aiheuttamia kemiallisia ilmiöitä, jotka johtavat materiaalin heikkenemiseen muun muassa ruostumalla. Tarjolla olevista metallijauhevaihtoehdoista nikkeli-pohjaiset vaihtoehdot ovat ihanteellisimpia vaihteleville sääolosuhteille ja suolavedelle alttiille kappaleille. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset Inconel-seokset sekä kestävät titaani- ja koboltti-kromi-seokset, jotka ovat myös suhteellisen hyviä korroosionkestoltaan. (Gao & Zhou 2018; Belmont Metals 2020)

Metallijauheille on asetettu tietyt laatuvaatimukset 3D-tulostettujen kappaleiden toiminnan takaamiseksi. Metallijauheen on täytettävä vaatimukset partikkelikoon, jakauman, virtausnopeuden, happipitoisuuden ja materiaalikemian osalta, oli kyseessä sitten kierätetty tai uusi metallijauhe (Lloyd's Register Group Ltd. 2017). Käytetty metallijauhe on mahdollista kierrättää uudelleenkäytettäväksi siivöimisen ja analysoimisen jälkeen, ja kierrätysmahdollisuudet vaikuttavat osaltaan metallijauheen hintaan (Gibson et al. 2010, s. 375).

## 2.2 Teknologiat

Jauhepetisulatustekniikassa 3D-tulostusprosessi alkaa täyttämällä rakennusalustana toimiva kammio inertillä kaasulla (usein Argonilla) metallin hapettumisen estämiseksi. Kammio lämmitetään oikeaan lämpötilaan ja metallijauhe levitetään alustalle, jolle laser-säteellä sulatetaan halutun kappaleen poikkileikkaus. Korkeista lämpötiloista syntyviä mahdollisia vääntymiä estäviä tukia rakennetaan samalla ja samasta materiaalista kuin itse tulostettava osa. Kappaleen tuet voivat olla umpinaisia tai hilarakenteisia. 3D-tulostusta jatketaan kerros kerrokselta, kunnes kappale on tulostunut alustalle kokonaan. Kappaleen jäähtyttyä tarpeeksi ylimääräinen metallijauhe poistetaan ja kappale lämpökäsitellään jäännösjännitysten poistamiseksi. Lopuksi komponentti irrotetaan työstömenetelmillä tuista ja alustasta, minkä jälkeen se on valmis käyttöönotettavaksi. (DebRoy et al. 2018; 3D Hubs 2020)

Metallikappaleiden 3D-tulostamisessa voidaan hyödyntää useita erilaisia tekniikoita (Taulukko 2); suurienergisiä lasereita (LPBF, SLM, DMLS), elektronisädettä (EBM), si-deaineen suihkutusta (BJ) ja ultraääntä (UAM). Yleisimmät metallin 3D-tulostuksessa

käytettävät tekniikat (ja siten myös tässä työssä käsiteltävät tekniikat) ovat laserteknologiaa hyödyntävät menetelmät, jotka eroavat toisistaan vain metallijauheen sitouttamisprosessiltaan. (DebRoy et al. 2018; 3D Hubs 2020) DMLS:ssä jauheesta tuotetaan kappale sulattamalla ainetta kuumuudella tai puristuksen avulla, tätä menetelmää kutsutaan sintraukseksi (Ajatec Oy 2020). SLM puolestaan sulauttaa metallijauheen laserin avulla kiinteäksi kappaleeksi, ja se on hieman nopeampi näistä kahdesta 3D-tulostusvaihtoehdosta (DebRoy et al. 2018).

**Taulukko 2.** Metallien 3D-tulostuksessa käytettävät tekniikat ja menetelmät

LPBF	Laser Powder Bed Fusion	Laserjauhefuusio
SLM	Selective Laser Melting	Lasersulatus
DMLS	Direct Selective Laser Melting	Metallin lasersintraus
EBM	Electron Beam Melting	Elektronisuihkusulatus
BJ	Binder Jetting	Sideaineen suihkutus
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing	Ultraääninen lisäainevalmistus
PBF	Powder Bed Fusion	Jauhepetisulatus

Edellä mainittuja lasertekniikoita käytetään yhdessä jauhepedin kanssa. Tätä menetelmää kutsutaan PBF-metodiksi (jauhepetisulatus), joka on 3D-tulostuksessa eniten käytetty menetelmä. Jauhepeti on metallijauheen levitykseen ja kappaleen 3D-tulostamiseen käytettävä alusta, joka laskeutuu alaspäin kerrosten tulostamisen välissä. Yksi kerros on 0,02–0,06 mm paksu, ja alusta laskeutuu kerroksen paksuuden verran. Yhden tulostusprosessin aikana paksuus on aina vakio. (Mahmoodkhani et al. 2018; Delva Oy 2020)

Mikään metallin 3D-tulostuksessa käytettävistä tekniikoista ei ole optimaalinen tai mahdollinen kaikille sovelluksille. Variaatiot kuitenkin mahdollistavat monipuolisten materiaalien käytön, mekaanisten ominaisuuksien muokkaamisen sekä erilaiset jälki- ja pintakäsittelymahdollisuudet.

## 2.3 Valmistusaika

Suunnittelun jälkeiseen valmistusaikaan vaikuttavat useat eri asiat: 3D-tulostettavan kappaleen muoto, tukirakenteet sekä metallijauheen materiaali. Suunnittelusta edetään laitteen säätöihin ja mahdollisiin jauheen vaihtoihin tai lisäyksiin. Tähän kuluva aika riip-

puu sekä 3D-tulostimesta että manuaalisesti toteutettavan jauhevaihdon tekevän henkilön osaamisesta ja vaihdon tehokkuudesta. Tulostusnopeus vaihtelee 10–40 cm<sup>3</sup>/h välillä riippuen käytetyn 3D-tulostimen tulostusnopeudesta sekä ajon häiriöttömyydestä. (Kamps et al. 2018; 3D Hubs 2020)

Lopuksi valmiista kappaleesta poistetaan ylimääräinen metallijauhe, jonka jälkeen kappaleelle tehdään lämpö- ja pintakäsittely sekä muut viimeistelyt, kuten tukien poisto sekä lopuksi kiillotus. Tyypillinen 3D-tulostusprosessi vie tällä hetkellä kokonsa puolesta mahdollisilta kappaleilta aikaa kahdesta vuorokaudesta kahteen viikkoon. 3D-tulostus tehostaa valmistusta, sillä laite toimii ympärivuorokautisesti. (Delva Oy 2020)

Erityisesti monimutkaisten kappaleiden valmistaminen 3D-tulostamalla on verrattain nopeaa suhteessa perinteiseen koneistamiseen, sillä parhaimmillaan 3D-tulostetut tuotteet saadaan käyttöön vain muutamassa päivässä. AM-tekniikalla on mahdollista tuottaa komponentti yhdessä vaiheessa, kun taas esimerkiksi CNC-jyrsimet vaativat monivaiheisen valmistusprosessin (sisältäen asennuksia ja prosessisuunnittelua erityisesti monimutkaisemmissa geometrioissa). (Gibson 2010, s. 10) Nykyisillä menetelmillä on myös mahdollista tuottaa kappaleita sarjatuotantona, mikä mahdollistaa tietyissä rajoissa paitsi nopean, myös kustannustehokkaan valmistuksen. Edellytyksenä sarjatuotannolle on 3D-tulostettavien kappaleiden oikea suunnittelu.

## 2.4 Viimeistely

Kappaleen jäähtyttyä 3D-tulostuksen jälkeen alkaa sen viimeistely. Ensimmäisenä vaiheena on poistaa ylimääräinen metallijauhe sekä siivilöidä ja analysoida se kierrätystä varten. Ylimääräisen metallijauheen huolellinen poisto ennen uunitusta on tärkeää, jottei jäännösjauhe sintrautuisi kappaleeseen (Delva Oy 2020). Kappaleelle tehdään alustava laatutarkastus visuaalisen- ja mittatarkastusten muodossa. Alusta ja sille tulostettu kappale siirtyy seuraavaksi toimenpiteeseen, jossa kappaleesta poistetaan jäännösjännityksiä ennen varsinaista alustan irrotusta kappaleesta. Tällä taataan, että 3D-tulostusprosessin aikana mahdollisesti syntyneet rasitukset eivät aiheuta kappaleeseen vääntymiä tai halkeamia. (Hämeenaho et al. 2019)

Kappale irrotetaan alustalta usein manuaalisesti joko sahaamalla tai kipinätyöstön avulla. Tämän jälkeen kappaleelle on mahdollista tehdä lisää lämpökäsittelyjä. Käsittely vaikuttaa aina hieman kappaleen materiaalin ominaisuuksiin, joten käyttötarkoituksesta riippuen käsittelytapa tulisi valita aina huolella. Seuraava vaihe on viimeistellä kappale poistamalla tukirakenteet, sekä viimeistellä komponentin pinta vaaditun mittatarkkuuden

saavuttamiseksi. Tyypillisimpiä lopputyöstömenetelmiä ovat koneistus, puhallus (pallotai hiekka), peittäus, kiillotus ja etsaus.

Valmistusprosessin päätteeksi kappaleelle tehdään lopullinen laaduntarkastus. Laadunvarmennusta komponentille on käytännössä tehty koko sen valmistusprosessin ajan aina suunnittelusta lähtien. (Hämeenaho et al. 2019)

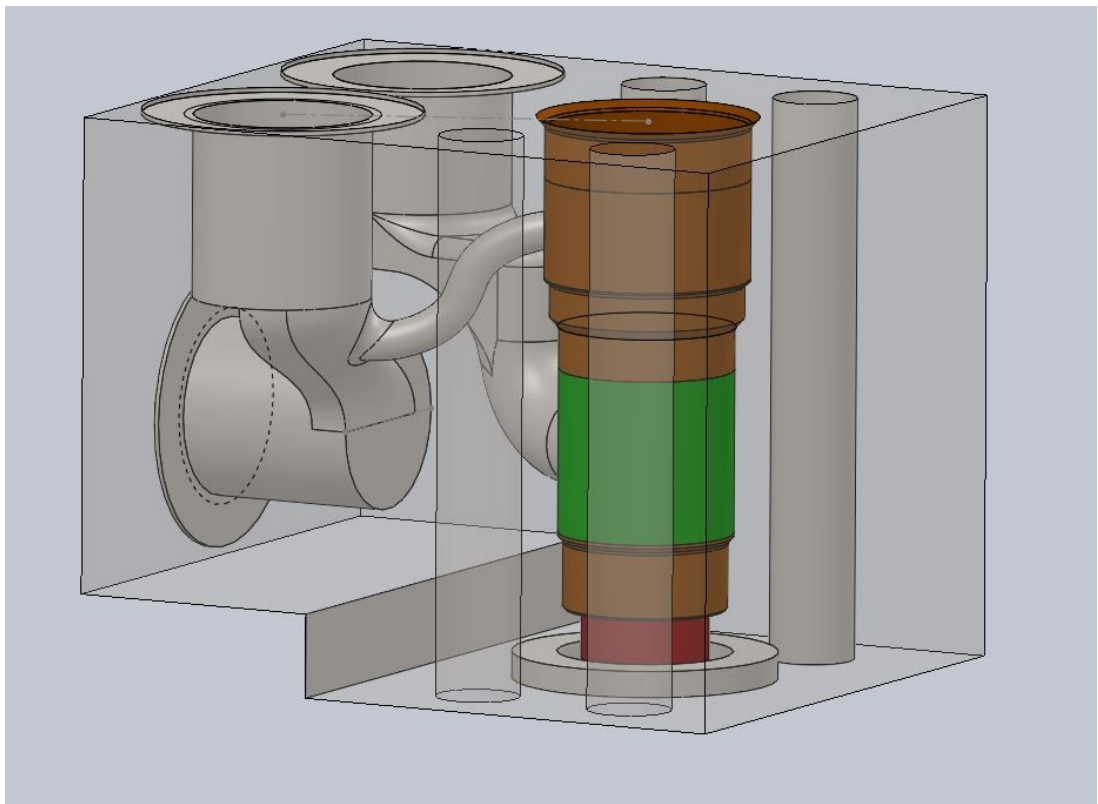
## **2.5 Edut ja haasteet**

Metallien 3D-tulostuksessa on monia etuja, mutta tiettyjen rajoitteiden (kuten kappalekoon tai materiaalivalikoiman rajoitteet) vuoksi 3D-tulostaminen ei ole aina paras vaihtoehto metallikomponenttien valmistukseen. Menetelmän suurimpana etuna voidaan pitää sitä, että sen avulla on mahdollista valmistaa tuotteita, joiden geometria asettaa erittäin suuria haasteita perinteisille valmistusmenetelmille. 3D-tulostettaessa haastavista geometrioista ei synny lisää valmistuskustannuksia toisin kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä tarvittavien työkalujen ja valumuottien vuoksi. (Hämeenaho et al. 2019)

Uusiotuotannon ohella 3D-tulostamalla on helppo valmistaa varaosia vanhempiin, tuotannosta jo poistuneisiin ja jopa työpiirustuksettomiin komponentteihin. Tämä on iso ekologinen ja rahallinen etu esimerkiksi vanhempien työkoneiden huollolle, jolloin on mahdollista teettää korvaavia osia yksittäisille vioittuneille osille sen sijaan, että koko koneisto jouduttaisiin päivittämään uuteen.

Vaikka itse 3D-tulostimet ovat kohtuullisen kalliita, ovat henkilöstökulut tuotannon näkökulmasta tulostettaessa alhaisemmat kuin perinteisissä valmistustavoissa. Toimijoita tarvitaan suunnittelun jälkeen lähinnä 3D-tulostimen alkuasetteluun, kuten metallijauheiden vaihtoon sekä lopputyöstöön. Itse valmistus tapahtuu täysin automatisoidusti, ja kappale voi rakentua käytännössä ilman valvontaa vuorokauden ympäri. (Hämeenaho et al. 2019)

3D-tulostamisella on mahdollista optimoida tuotteen ominaisuuksia kuten topologiaa, suorituskykyä sekä materiaalia ja sitä kautta vähentää myös sen massaa hyvien CAD-suunnittelutyökalujen avulla. Painon pienenemisen lisäksi tyypillisesti kappaleen jäykkyys lisääntyy. Materiaalihukka on 3D-tulostettaessa pienempi paitsi edellä mainitun optimoinnin vuoksi myös sen johdosta, että lisäävän valmistuksen ansiosta kappaleeseen ei tule ylimääräistä poistettavaa ainetta. (Hämeenaho et al. 2019) Metallijauheen kierrätys tukee omalta osaltaan materiaalihukan vähyyttä (3D Hubs 2020). Tyypillisesti onteiloita, kuten jäähdytyskanavia, voidaan pitää haastavina työstää perinteisin menetelmin, mutta 3D-tulostaen niiden tekeminen on huomattavasti helpompaa. Kanavien onnistunut tulostaminen edellyttää oikeaoppista suunnittelua, kanavien vapaasta muotoilusta on esimerkkinä Kuvan 1 kuormanlaskuventtiililohko.



**Kuva 1.** Kuormanlaskuventtiilin ominaisuuksia optimoiva 3D-suunnittelu (Fiellberg Oy 2015)

Suurimpana haasteena 3D-tulostuksessa voidaan pitää valmistusta edeltävää suunnitteluvaihetta. Tyypillisestä suunnittelutavasta poiketen 3D-tulostettavan kappaleen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon niin valmistuksen vaatimien tukirakenteiden tulostuminen kuin niiden poistaminenkin sekä tulostamisen edellyttämät kappaleen kallistukset tulostusalustaan nähden, ja luonnollisesti myös 3D-tulostamiseen liittyvät kappaleen kororajoitukset. Helposti perinteisin menetelmin tuotettaville osille, kuten putkesta valmistettaessa, 3D-tulostuksen hinta nousee kohtuuttoman suureksi perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna.

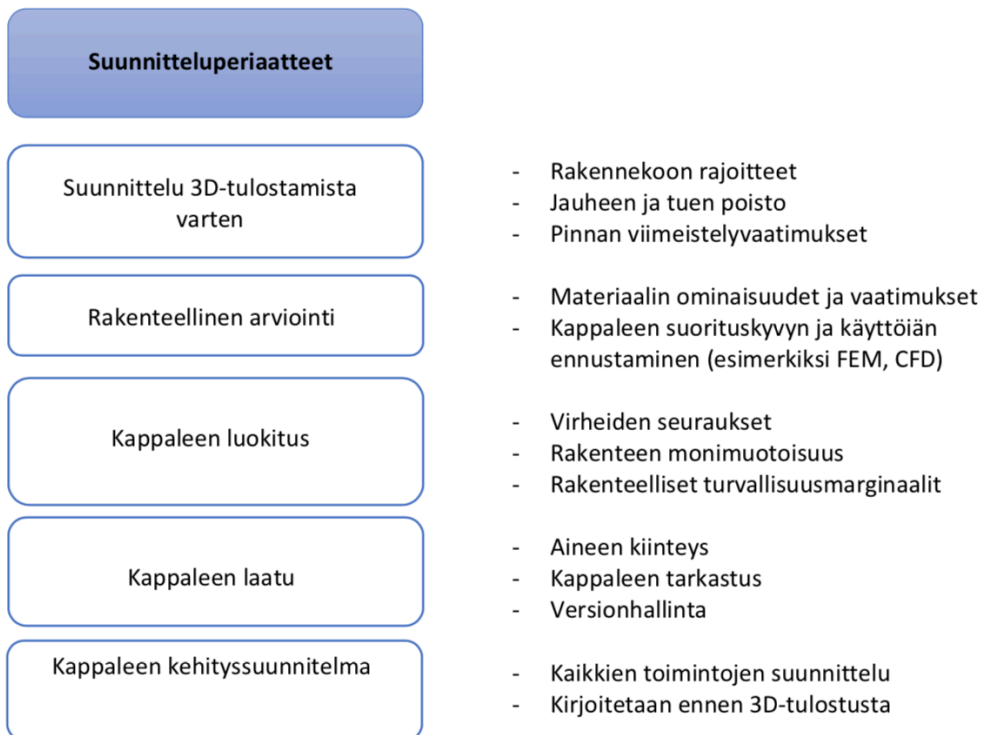
3D-tulostuksessa käytettävä metallimateriaalivalikoima on toistaiseksi merkittävästi rajoituneempi kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Kaikkia metallilajeja ei ole myöskään mahdollista käyttää 3D-tulostuksessa, mutta useimmissa tapauksissa on mahdollista valita sellainen metallijauhe, jota käyttämällä saadaan täytetyksi kappaleelta vaadittavat mekaaniset ominaisuudet.

Metallisten 3D-tulosteiden maksimikokoon vaikuttavat sekä tulostuslaitteen fyysiset rajoitteet että valmistusprosessin hallinta. Suurikokoisten kappaleiden yhteydessä on otettava huomioon myös valmistusaika, joka nykyisillä menetelmillä venyisi epäedullisen pituiseksi. 3D-tulostusjärjestelmä pystyy tyypillisesti tulostamaan 250 x 150 x 150 mm kokoisia komponentteja. Isoimmilla 3D-tulostimilla on mahdollista tulostaa jopa 500 x 280 x 360 mm kappaleita mittatarkkuudella  $\pm 0,1$  mm (3D Hubs 2020). 3D-tulostettujen osien mekaaniset ominaisuudet ja anisotrooppinen käyttäytyminen rajoittavat toistaiseksi suurten tulostusten mahdollisuutta ja tästä syystä 3D-tulostus ei ole aina paras vaihtoehto metallikomponenttien valmistamiseen (Tuan et al. 2018).

## 3. 3D-TULOSTETTAVIEN SYLINTERIKOMPO- NENTTIEN SUUNNITTELU

### 3.1 Suunnitteluperiaatteet

3D-tulostettavan kappaleen geometrisen tarkkuuden määräävät metallijauheen morfologia sekä kappaleen ominaisuudet raekoon, pinnankarheuden ja jäännösjännitysten mukaan. Hyvällä monivaiheisella suunnittelulla (Kuva 2) metallijauheen valinnasta lähtien voidaan vaikuttaa edellä mainittuihin ominaisuuksiin. Suunnittelu 3D-tulostusta varten vaatii valmistusmenetelmän tarjoamien geometristen vapauksien ja rajoitteiden ymmärtämistä sekä jälkikäsittelyn aiheuttamien vaikutuksien huomioon ottamista. 3D-suunnittelu vaatii ammattiosaamisen lisäksi riittäviä ohjelmistotyökaluja materiaalinkäytön optimointiin sekä kappaleen suorituskyvyn ja elinkaaren ennustamiseen. (Hämeenaho et al. 2019)



**Kuva 2.** 3D-tulostettavan kappaleen suunnitteluvaiheet eli AM-suunnitteluvaiheet (Wells 2018)

Kun 3D-tulostuksen suunnitteluvaiheisiin, eli AM-suunnitteluun kuuluva rakenteellinen arviointi on tehty, suoritetaan ennen valmistusprosessia kappaleen luokittelu perustuen sen monimutkaisuuteen ja mahdollisen virheen aiheuttamiin seuraamuksiin sekä turval-

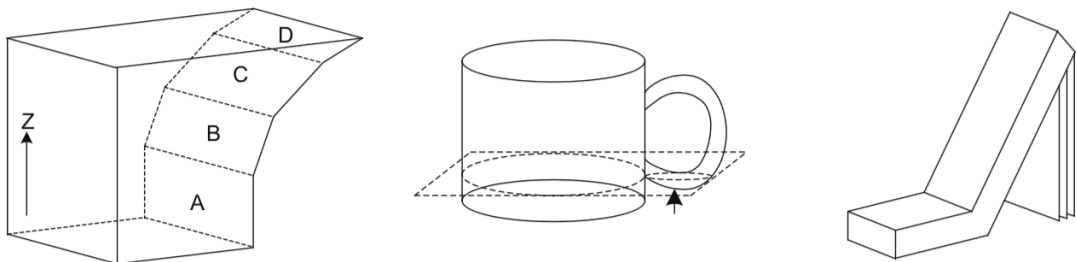


lisuusmarginaaleissa että 3D-kappaleen laadussa. Lopuksi kappaleelle luodaan kehittämissuunnitelma kuvaamaan kaikkia toimintoja konseptin luomisesta osan hyväksymiseen. (Seifi et al. 2017; Hämeenaho et al. 2019)

Valmiin komponentin ominaisuuksiin vaikuttavat komponentin sijainti ja suunta 3D-tulostusalustalla, metallijauheen ominaisuudet, prosessin parametrit (kuten sulatusnopeus ja kerroksen paksuus) sekä jälki- ja pintakäsittely (VTT 2015). Pinnankarheus ja materiaalivirheet ovat myös tärkeitä huomioonotettavia asioita AM-komponenttien murtumiskäyttäytymiselle ja väsymislujuudelle. Lisääntynyt pinnan karheus aiheuttaa jännityskeskittymiä ja tavallista varhaisempaa väsymistä. Myös sisäiset materiaalivirheet ja riittämätön kerroksen kiinnittyminen vähentävät AM-osien väsymiskestävyyttä. (Tuan et al. 2018)

### 3.2 Tukirakenteet

Tukirakenteet kuuluvat lähes kaikkiin metallin 3D-tulostusprosesseihin. Osalle kappaleista tukirakenteet ovat välttämätön osa tulostetta, kun taas osalle kappaleista tukirakenteet ovat epätoivottuja muotonsa vuoksi. Tukien tarve tulee ilmi kohdissa, joissa on vaarana, että kappaleeseen kohdistuu tulostettaessa rasituksia, niihin tulee vääntymiä tai niihin muodostuu jäännösjännitystä. Lisäksi painovoima aiheuttaa 3D-tulostusprosessiin omat tukitarpeensa, sillä kappaletta ei voida tulostaa tyhjän päälle. Kuvassa 3 on esitelty yleisimmät tukirakenteita vaativat rakenteet. Tukirakenteiden suunnittelussa on otettava huomioon niihin kuuluva materiaali sekä tukirakenteiden poistamiseen kuuluva aika. (Yang et al. 2017, s. 97–101)



**Kuva 3.** Tyypillisimmät tukia vaativat rakenteet vasemmalta oikealle: suuri ylityskulma, tukematon alue, suuri ulkoneva alue (Yang et al. 2017, s. 98)

Useimmat nykyisistä AM-suunnitteluohjelmistoista tukevat tukirakenteen automaattista muodostumista, mikä perustuu kappaleen geometrisiin ominaisuuksiin. Päälinjana voitaisiin tukirakenteiden suunnittelussa pitää tuen tarvetta ominaisuuksille, jotka ovat yli 45 asteen kulmassa (Yang et al. 2017, s. 97–101), nykyisillä menetelmillä on kuitenkin mahdollista saada jopa 70 asteen ylityskulma, mikäli prosessiparametrit on asetettu oikein (Delva Oy 2020).

Tukirakenteiden poiston helpottamiseksi ja materiaalitehokkuuden parantamiseksi 3D-tulostuksessa suositaan yhä enenevässä määrin solurakenteita (Kuva 4). Tällöin kappaleen ulkopinta pysyy umpinaisena, mutta sisätilavuudesta saadaan huokoinen. Kevyissä rakenteissa käytetään useimmiten tukina hilarakenteita, jotka mahdollistavat kappaleen pysymisen mahdollisimman kevyenä. (Yang et al. 2017, s. 97–101)



**Kuva 4.** Metallien 3D-tulostuksessa käytettävät yleisimmät tukigeometrit vasemmalta oikealle: lohko, tähti, verkko, reunus ja linja (Yang et al. 2017, s. 99)

Tukirakenteiden poistosta kappaleen pintaan syntyvät jäljet tulee ottaa huomioon jo kappaleen suunnitteluvaiheessa. Tukirakenteen päälle 3D-tulostetuilla pinnoilla on usein heikompi pinnanlaatu kuin muualla kappaleessa. (Tuan et al. 2018; 3D Hubs 2020) Tukirakenteita tulisi välttää seuraavissa kohdissa: kriittisillä pinnoilla (joissa vaaditaan kappaleelta täydellistä eheyttä), pienillä välyksillä varustetuilla pinnoilla, sisäkanavilla ja esteettisesti kriittisissä kohdissa (Yang et al. 2017, s. 97–101). Tukien poisto aiheuttaa myös rajoitteita geometriseen vapauteen, sillä kaikkiin tukirakenteisiin täytyy olla vapaa pääsy niiden poiston mahdollistamiseksi (Jiang et al. 2018).

### 3.3 Lämpörasitukset ja vääristymät

Korkeiden lämpögradienttien vuoksi kappaleissa ilmenee muodon vääristymiä sekä jäännösjännityksiä, joita voidaan ehkäistä oikeanlaisen tukirakennesuunnittelun avulla. Tukien on tarkoitus lisätä jäykkyyttä sekä tasoittaa lämmönkertyvyyttä (Jiang et al. 2018). Tällä hetkellä ei ole vakiintunutta suunnittelukäytäntöä lämpörasitusten ja vääristymien laskemiseen ja ennustamiseen. Ennen kuin nopeita laskennallisia työkaluja on saatavana, on käytettävä perinteisiä AM-komponenttien suunnitteluohjeita (VTT 2015).

Pyöristykset vähentävät kappaleen nurkkiin kohdistuvia jännityskeskittymiä ja näin ollen parantavat sen 3D-tulostettavuutta. Kulmien viistäminen auttaa myös kappaleen irrottamisessa tulostusalustasta sekä helpottaa kappaleen käsittelyä terävien kulmien puuttuessa. (Redwood et al. 2018, s. 289)

### 3.4 Kappaleen asettelu alustalle

Kappaleen alustalle asettelulla voidaan merkittävästi vaikuttaa tukirakenteiden tarpeeseen, materiaalihukkaan, tulostusaikaan sekä kappaleen irrottamiseen alustalta. Edellä mainitut ominaisuudet ovat varsin riippuvaisia toisistaan, esimerkiksi asettelusuunnat, jotka minimoivat tukien määrää lisäävät helposti tulostuksen kestoa. Tällöin päämitat ovat linjassa rakennussuunnan kanssa, jolloin tulostusaika kasvaa. (Yang et al. 2017)

Kaikissa metallin 3D-tulostusprosesseissa rakennussuunta määritetään Z-akselin mukaan, eli kohtisuoraan tulostusalustasta ylöspäin. Puhtaasti aikaperspektiivistä tarkasteltuna on parasta tulostaa kappale asennossa, jossa sillä on pienin pystysuora korkeus. (Diegel et al. 2019 s. 46) Sarjatuotantona 3D-tulostettaessa kappaleiden orientoinnilla ja asettelulla pystytään vaikuttamaan tulostusalustan täyttymiseen, jolloin pystysuuntainen pisin tulostussuunta voi hyvin olla komponenttikohtaisesti nopein ja edullisin, mikäli alusta on mahdollisimman täysi.

Etteplan on kehittänyt AM-kustannusarviointityökalun, jolla arvioidaan ja vertaillaan suunnitteluvaihtoehtojen kustannuksia perinteisin menetelmin valmistettuun osaan. Yksi kustannustehokkaimmista orientaatioon ja asetteluun liittyvistä tekniikoista on kappaleiden sisäkkäin asettelu (engl. nesting). Tämä tekniikka maksimoi rakennusalustalle 3D-tulostettavien kappaleiden määrän edellyttäen, että kappaleiden geometria sopii sisäkkäin asetteluun. Etteplan arvioi eräässä sisäkkäin asettelua hyödyntävässä projektissään yhteen kappaleeseen kohdistuvien valmistuskustannusten laskevan noin 40 % verrattuna perinteisin menetelmin valmistettuun vastaavaan kappaleeseen. Tällöin tehostetaan toimitusketjua sekä mahdollistetaan kysynnän mukaan mukautuvat sarjatuotantomäärät. (Etteplan Oy 2020)

Kappaleen orientaatio vaikuttaa merkittävästi 3D-tulostettavan osan laatuun, ja toisinaan laatuominaisuuksia joudutaan priorisoimaan ristiriitaisuuksien vuoksi. Esimerkiksi toinen suunta voi antaa tavoiteltavamman pinnankarheuden ja puolestaan paremmin vääntymisriskejä.

## 4. SYLINTERIKOMPONENTTIEN 3D-TULOСТА- MISEN TALOUDELLISUUS

### 4.1 Palveluntarjoajat Suomessa

Suomessa toimii tällä hetkellä kuusi yritystä (Taulukko 3), jotka tarjoavat metallien 3D-tulostusta, osa näistä yrityksistä tarjoaa myös muovin 3D-tulostusta. Kaupallisten palveluntarjoajien lisäksi 3D-metallitulostimia on Suomessa myös yliopistoilla, ammattikorkeakouluilla ja tutkimuskeskuksilla.

**Taulukko 3.** Yhteenveto kaupallisista metallitulostajista Suomessa

Yritys	Sijainti	3D-tulostimen malli
3D Formtech	Jyväskylä	EOS M290
3D Step	Ylöjärvi	SLM 280HL Twin 400 W
Delva	Hämeenlinna	EOS M270, EOS M290
HT Laser	Keuruu	SLM 280 2.0 Twin 700 W
Materflow	Lahti	Concept Laser M1, SLM 280 HL
Salon Metalelektro Oy	Salo	SLM 280 2.0 Twin 700 W

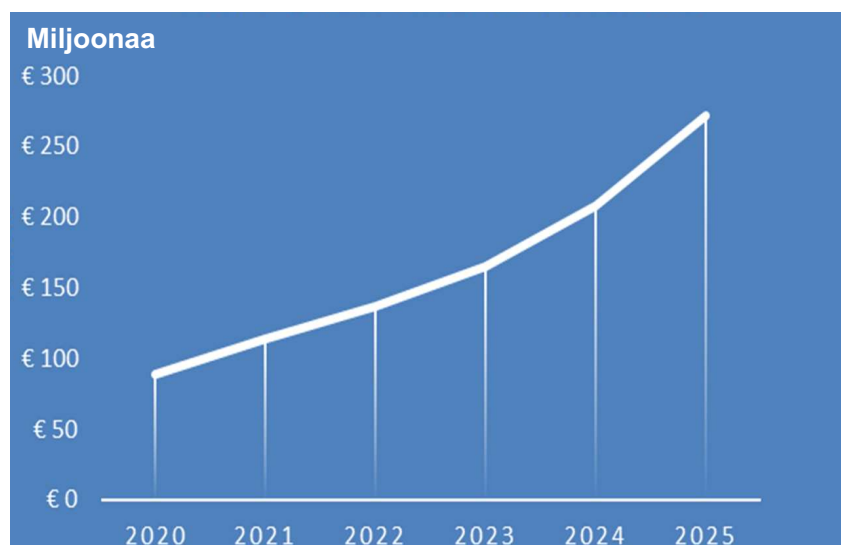
Suomalaisen teollisuuden kiinnostuksen lisääntyessä 3D-tulostusta kohtaan on myös AM-järjestelmien saatavuus Suomessa kohentunut. Toistaiseksi kaikki suomalaiset palveluntarjoajat käyttävät maailmallakin eniten tunnettua tekniikkaa – jauhepetiä sekä keskittyvät lähinnä yksittäisten prototyyppien valmistukseen. Suomalaisilla palveluntarjoajilla on kuitenkin potentiaalia metallikomponenttien laajempaan sarjatuotantoon. (Lindqvist et al. 2017; Hämeenaho et al. 2019)

Nuorten yritysten investoinnit ovat keskittyneet lähinnä tuotannon lisäämiseen ja asiakaskannan kartuttamiseen, joten suomalaiset kaupalliset palveluntarjoajat eivät ole hankkineet sertifiointia todentamaan kyvykkyyssasteikon (Kuva 5) laatutasoja. Esimerkiksi Suomessa laajasti käytössä olevilla EOS:in tulostuslaitteistojen prosesseilla on kuitenkin mahdollista päästä laatutasolle 5 asti, mikäli kappaleille teetettäisiin ylimääräisiä testejä käyttökohteisiin soveltumisen takaamiseksi. Laatuvaatimusten kiristyessä rahaa kuluu muun muassa materiaalitesteihin, tuotannon auditointiin ja laadunvalvontaan. (Hämeenaho et al. 2019; Delva Oy 2020)



**Kuva 6.** Laatutasot metallin 3D-tulostuksessa alhaalta ylöspäin (1–5) luokiteltuna (Hämeenaho 2019)

Yleisesti voitaneen todeta, että metallien 3D-tulostusta pidetään merkittävänä 2020-luvun kasvajana, ja sen käytön yleistymisestä on ollut huomattavia merkkejä, kuten kilpailukyvyn lisääntyminen ja tuotannon siirtyminen lähemmäs asiakasta (Ituarte et al. 2017). Jos oletetaan globaalien valmistusmarkkinoiden pysyvän vakiona, 3D-tulostuksen markkinaosuus voidaan ekstrapoloida ja soveltaa suomalaisen valmistusteollisuuden BKT:hen, jolloin on mahdollista ennustaa suomalaisen AM-potentiaalin tuleva kehitys (Kuva 6). On huomattava, että nykyisellään varsin pieni osa kaupallisesta potentiaalista on hyödynnettyä.



**Kuva 5.** Maailmanlaajuiseen kasvuennusteeseen ja suomalaisen teollisuuden BKT:hen perustuva ennuste mahdollisesta AM-potentiaalin kehityksestä Suomessa (Wohlers 2018)

## 4.2 Valmistajien hinnoitteluperiaatteet

3D-tulostettavan kappaleen hinnoittelu muodostuu monen tulostukseen vaikuttavan asian summasta, jälkityöstöstä, tuotantomäärästä sekä materiaalivalinnasta. Kilpailukykyisen hinnan saavuttamiseksi voitaisiin pääperiaatteina pitää menestyksestä topologista optimointia, useamman kappaleen samanaikaista 3D-tulostamista sekä tulostusalustalle asettelun onnistumista. Kappaleen monimutkaisuus ei vaikuta tuotteen lopulliseen hintaan, mikäli esimerkiksi tukirakenteiden poistoa ei tarvita tavanomaista enempää.

Topologisen optimoinnin yksi päätavoitteista on vähentää materiaalihukkaa, mikä vaikuttaa suoraan kappaleen hintaan. Mitä vähemmän kappaleen 3D-tulostuksessa tarvitsee käyttää materiaalia, sitä vähemmän komponentti maksaa. Koska kappaleen monimutkaisuudella ei hinnan suhteen ole juuri merkitystä, on 3D-tulostettavasta kappaleesta mahdollista poistaa sen ominaisuuksien sallimissa rajoissa materiaalia jo suunnitteluvaiheessa. Hinnan lisäksi tämän kaltaisella optimoinnilla on suora vaikutus kappaleen painoon.

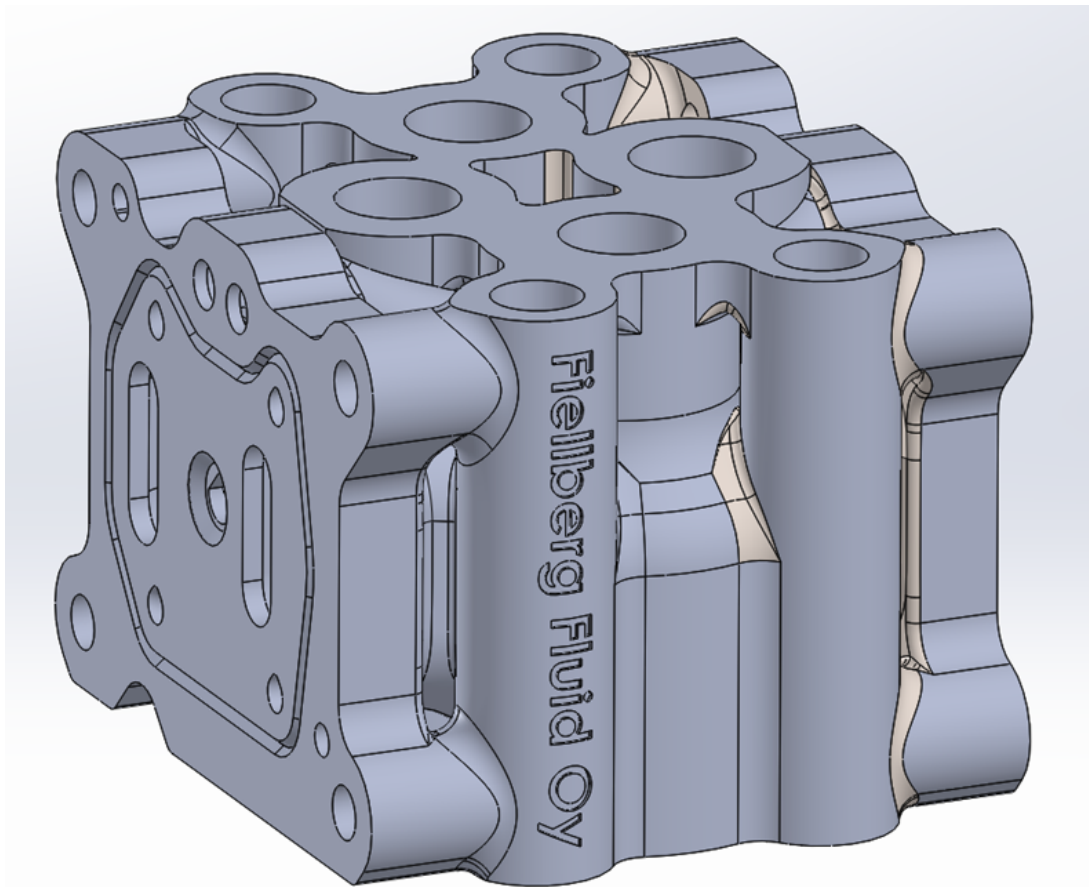
3D-tulostuslaitteen alustan sekä tulostettavien komponenttien koista riippuen sarjatuotanto on sekä kustannus- että ajansäästösyistä kannattava vaihtoehto. Käyttökohteen siirtyessä enemmän nopeista prototyypeistä sarjatuotantomaisempaan valmistukseen on yksittäisen kappaleen hintaa saatu laskettua huomattavasti alemmas, vaikka itse metallijauheen tai 3D-tulostimien hinta ei ole laskenut lähivuosina. Sarjatuotantona 3D-tulostaessa yksittäisen kappaleen hintaan vaikuttaa se, kuinka hyvin alustan tilavuus saadaan täytettyä yhden tulostusajon aikana – metallijauheen levitysaika tietyille korkeudelle on aina sama riippumatta alustalla olevien tuotteiden määrästä.

## 4.3 Koekappaleet

Tässä työssä ensimmäiseksi tarkasteltavaksi 3D-tulostettavaksi metalliseksi hydraulisyylinteriosaksi valittiin digiventtiililohko, johon kuuluu digiventtiilin kanavistolohko sekä kansiosat kanaviston ylä- ja alapuolella. Digiventtiiliä on mahdollista käyttää sekä erillisenä itsenäisenä komponenttina että integroida se osaksi sylinterirakennetta. Toiseksi osaksi valittiin korvasta ja pohjasta koostuva hydraulisyylinterin pohjakappale, eli niveltakappää.

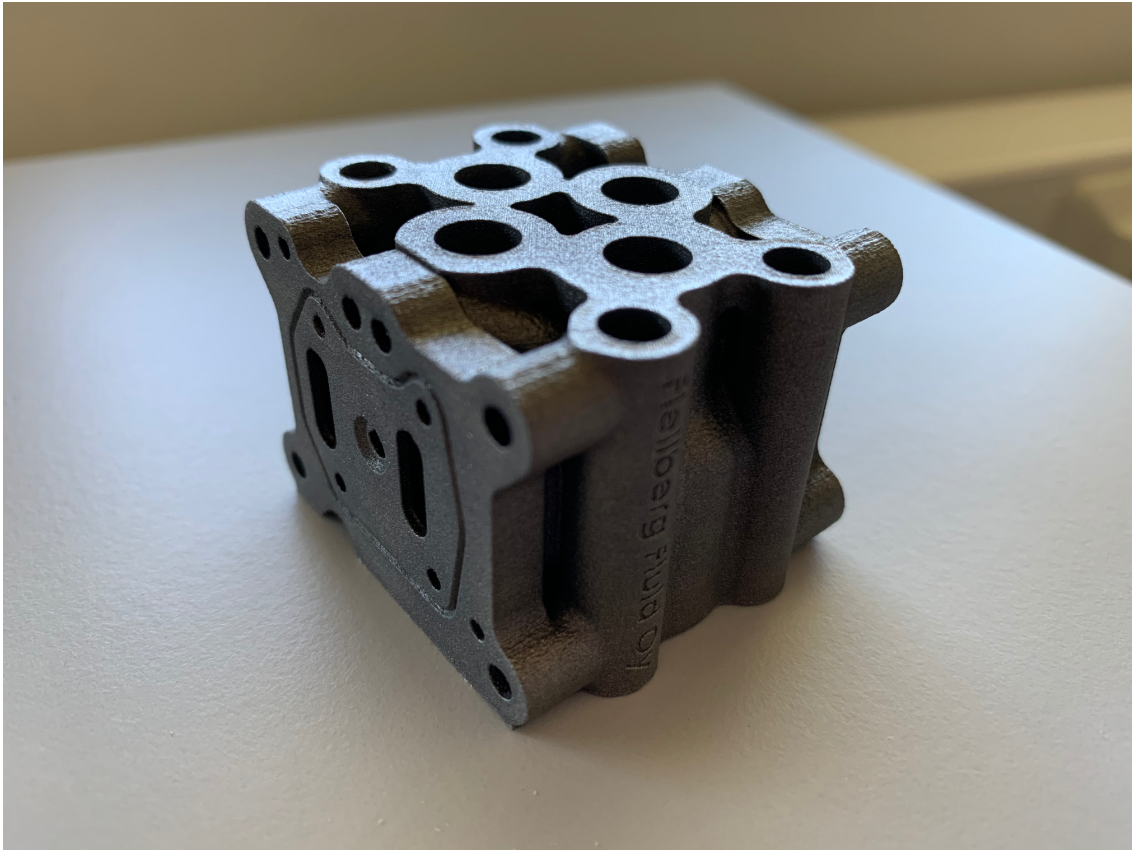
Hydrauliset venttiililohkot ovat hyvin monimutkaisia sekä isoja kokonaisuuksia, joiden valmistaminen perinteisin työstömenetelmin on työlästä ja kallista. Venttiililohko koneistetaan teräspalkista, johon tulee runsaasti tulpattavia apuporauksia. Poraukset ovat

haastavia puhdistaa ja lisäävät vuotoriskiä. Materiaalin poisto koneistamalla on suhteellisen kallista, joten kappaleeseen jää aina runsaasti ylimääräistä ainetta. Vuonna 2015 entinen Nurmi Cylinders Oy ja VTT aloittivat venttiililohkon topologisen optimoinnin, ja myöhemmin Fiellberg Oy sekä Fiellberg Fluid Oy jatkoivat tätä tutkimustyötä kehittäen nykyisessä muodossaan olevan digiventtiililohkon kanaviston (Kuva 7). Tällä muotoilulla on saavutettu merkittävä painonsäästö sekä päästy eroon apuporauksista lohkon ominaisuuksista tinkimättä. (Fiellberg Oy 2020) Ensimmäinen prototyyppi 3D-tulostettiin heinäkuussa 2020.



**Kuva 7.** 3D-tulostusta varten suunniteltu digiventtiilin kanavistolohko (Lantela, Fiellberg Oy 2020)

Kyseiselle kappaleelle määriteltiin tulostusparametrit seuraavasti: materiaaliksi Maraging-teräs (1.2709), jälkikäsittelyyn kuulapuhallus ylimääräisen materiaalin poistoon, kappaleen koneistus lopulliseen muotoon sekä lämpökäsittely. Tukirakenteet suunniteltiin tulevaisuuden pohjapinnan alle hyvän pinnanlaadun takaamiseksi. Kanaviston (Kuva 8) lisäksi digiventtiilille 3D-tulostettiin lohkon ylä- ja alapuolelle tulevat kansiosat.



**Kuva 8.** 3D-tulostettu digiventtiilin kanavistolohko

Koneistamalla valmistettävien lohkojen valmistus ei ole paras vaihtoehto edes suursarjatuotannossa (joka tyypillisesti on kappalehinnaltaan edullisin tuotantomuoto), sillä 3D-tulostuksen avulla saavutetaan merkittävä painonsäästö ja kappaleen teknisien ominaisuuksien huomattava paraneminen. Taulukossa 4 on esitelty keskeisimmät 3D-tulostettavan ja perinteisin menetelmin (koneistamalla) valmistetun digiventtiililohkon väliset geometriset erot.

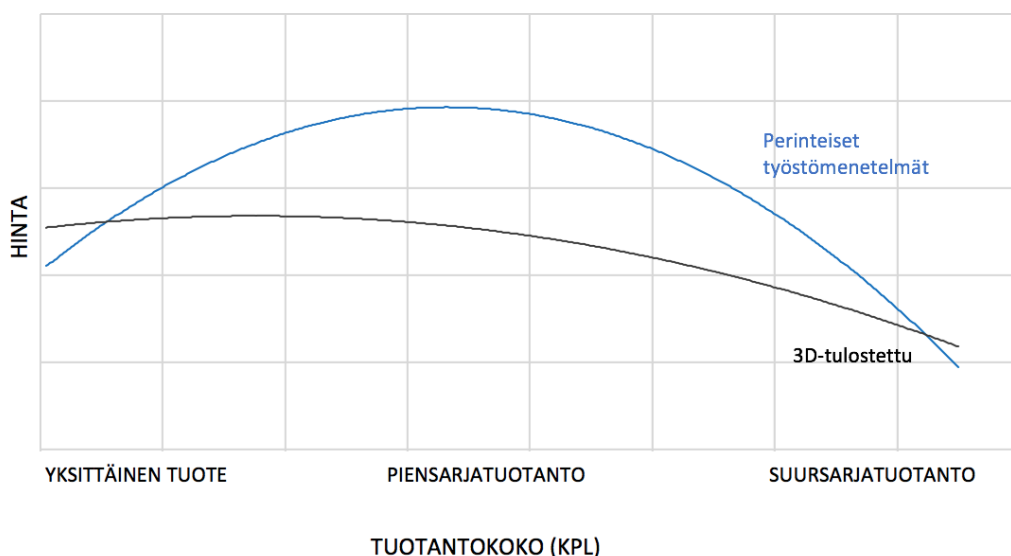
**Taulukko 4.** 3D-tulostetun ja perinteisin menetelmin valmistetun digiventtiililohkon vertailu (Delva Oy 2020; Fiellberg Oy 2020)

	3D-tulostettu versio	Perinteinen valmistustapa
Kanaviston paino (g)	241	2 446
Yhden kansiosan paino (g)	60	328
Kanaviston koko (mm)	45 x 39 x 32	80 x 80 x 70
Yhden kansiosan koko (mm)	42 x 32 x 8	50 x 40 x 30
Digiventtiililohko paino (g)	360	2774
Digiventtiililohko tilavuus (mm <sup>3</sup> )	77 664	508 000



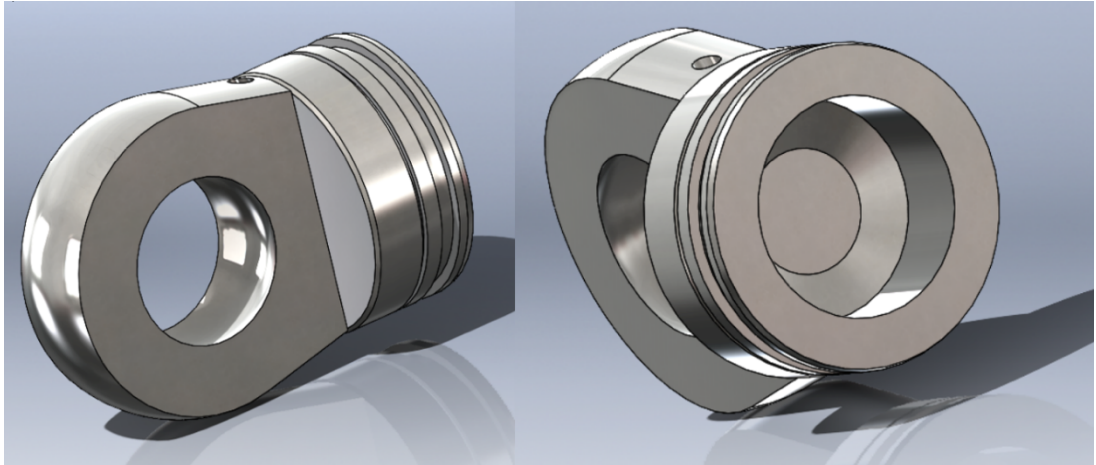
Jos tällainen lohko valmistetaan yksittäiskappaleena, niin koneistamalla päästään 3D-tulostamiseen verrattuna noin 8,5 % alhaisempaan kappalehintaan, mutta toisaalta koneistamalla tuotetun kappaleen tilavuus on 6,5-kertainen 3D-tulostettuun verrattuna. Piensarjatuotannossa (noin alle 100 kappaleen sarjat) on 3D-tulostettaessa mahdollista saavuttaa jopa 30 % vähennys kappalehinnassa, kun taas koneistettaessa kustannussäästöjä ei synny juuri lainkaan. Kun sitten siirrytään suursarjatuotantoon (yli 100 kappaleen sarjat), niin tällöin lohkon valmistaminen perinteisin menetelmin tulee noin 8 % edullisemmaksi 3D-tulostukseen verrattuna. (Delva Oy 2020; Fiellberg Oy 2020)

Hintaerot selittyvät kappaleiden materiaalivalinnoilla, lopputuotteen viimeistelyllä sekä perinteisillä työstömenetelmillä tuotettavan lohkon haasteellisuudella. Sarjatuotannossa perinteisin menetelmin tuotettuna jokainen lohko on tehtävä erikseen ja jokainen yksityiskohta on tehtävä kerta toisensa jälkeen samalla tarkkuudella. 3D-tulostettaessa taas mallin suunnittelun jälkeen haastavia työvaiheita ei enää ole, joten mallista on vaivattomampaa tulostaa piensarjoja. Mitä suurempiin sarjoihin mennään sitä enemmän 3D-tulostettujen kappaleiden yksikköhinta alkaa lähestyä perinteisin menetelmin valmistettavan kappaleen yksikköhintaa. 3D-tulostamalla alustalle voidaan asettaa aina tietty määrä kappaleita, kun taas perinteisillä menetelmillä tuotteen työstö halpenee sarjan kasvaessa. Usein suursarjatuotannossa spesifioidaan tuotteelle oma tuotantolinja tai investoidaan koneeseen, joka on tarkoitettu vain kyseisen kappaleen tuottamiseen. Tällöin esimerkiksi asetustuntien aiheuttamat kulut per valmistettava kappale pienenevät. Kuva 9 havainnollistaa yksikkökustannuksia sarjatoon kasvaessa molemmilla tuotantomenetelmillä.



**Kuva 9.** Digiventtiin kanavistolohkon kustannusvertailu sarjatoon mukaan

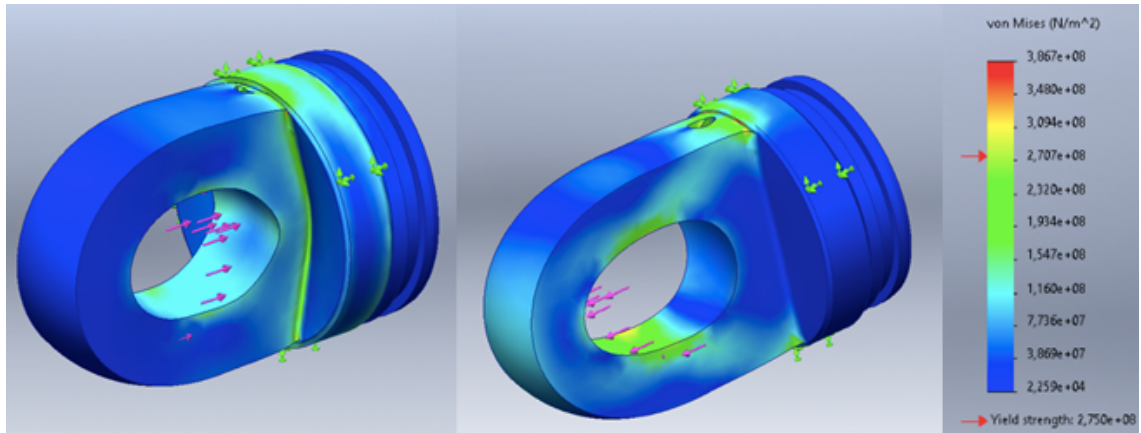
Toiseksi koekappaleeksi valittiin digiventtiin kanavistolohkoa huomattavasti yksinkertaisempi hydraulisylinterin pohjakappale eli niveltakappää, joka perinteisin menetelmin tuotettuna valmistetaan joko pyörötangosta (tyypillisempi tapa) tai takeesta muotin avulla, jolloin pyöröpinnat, kierre ja tiivisteurat koneistetaan jälkikäteen. Pohjakappaleesta tehtiin 3D-malli SolidWorks:illa (Kuva 10), ja kappaleen painoksi saatiin 1,228 kg. Tämän kokoinen pohjakappale sopii 63 mm -halkaisijaiseen sylinteriin, jossa on 40 mm -halkaisijainen männänvarsi.



**Kuva 10.** Hydraulisylinterin pohjakappaleen 3D-malli ennen topologista optimointia

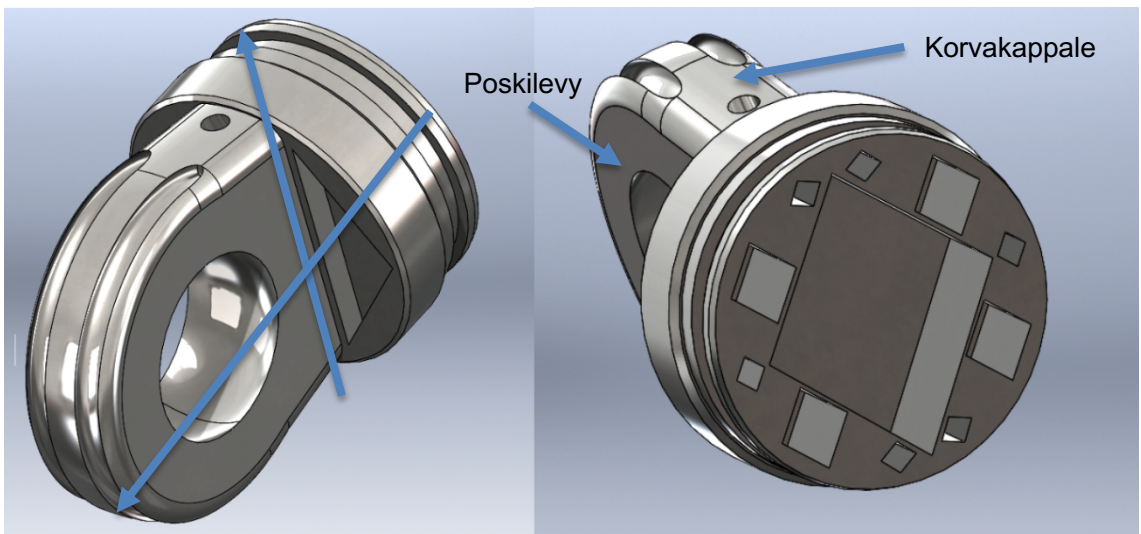
Hintavertailun lisäksi tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon komponentin massa voidaan vaikuttaa yksinkertaisen topologisen optimoinnin avulla, sekä kuinka tulostus-suunta ja tukirakenteiden olemassaolo vaikuttavat 3D-tulostettuun kappaleeseen. (Fiellberg Oy 2020)

Optimoimattomalle kappaleelle tehtiin lujuustarkastelu käyttäen valitulle sylinterikoolle sallittuja maksimivoimia: vetovoima 52 kN ja työntövoima 87 kN (Fiellberg Oy 2020). Lujuuslaskentatyökalujen avulla saatiin selville ne kappaleen kohdat, joista materiaalinpoisto on mahdollista kappaleen edelleen kestäessä maksimikuormia. Laskennassa käytettiin von Mises -jännitys jakaumaa, jonka mukaan mallikappaleessa oli runsaasti mahdollisuuksia poistaa ylimääräistä materiaalia (Kuva 11).



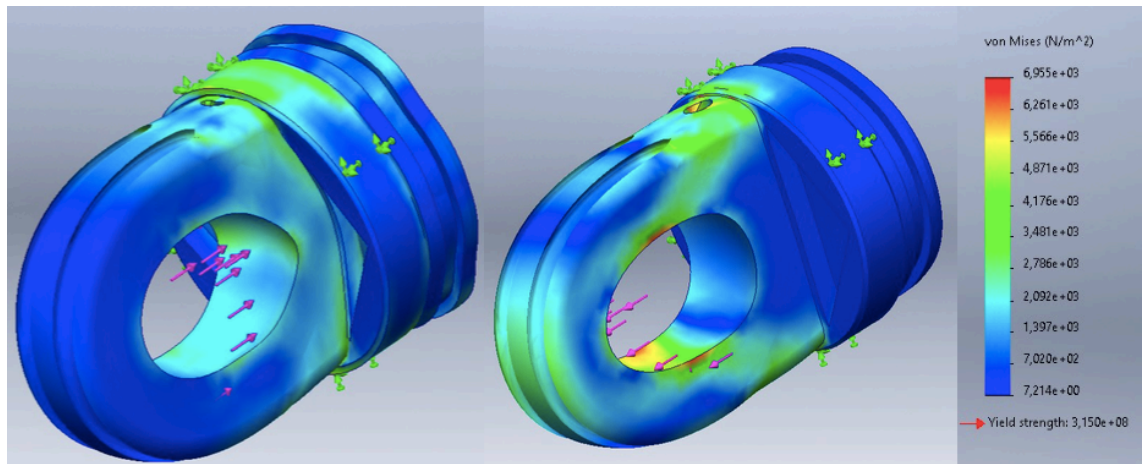
**Kuva 11.** Hydraulisynterän pohjakappaleelle laskettu von Mises -jännitys jakauma ennen topologista optimointia, myötölujuus  $2,75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Pohjakappaleen topologinen optimointi suoritettiin siten, että tulostussuunta on kappaleen poskilevyjen suuntainen (Kuva 12). Tällöin sekä tukirakenteiden määrä että tulostusaika saatiin minimoitua. Optimoinnin avulla kappaleen painoa saatiin pudotettua hieman alkuperäisestä ja loppupainoksi saatiin 1,048 kg (painoero noin 8,5 %). Korvakappaleeseen uurrettiin kaksi uraa ja kantaosaa ohennettiin molemmista suunnista hyödyntäen 45 asteen kulmia tulostussuuntaan nähden.



**Kuva 12.** Hydraulisynterän pohjakappaleen 3D-malli yksinkertaisen topologisen optimoinnin jälkeen, mahdolliset tulostussuunnat merkitty kuvaan nuolella

Optimoidulle kappaleelle tehtiin jälleen lujuustarkastelu sen kestävyuden varmistamiseksi edellä mainituilla voimilla (Kuva 13). Tarkastelun avulla voitiin todeta kappaleen edelleen kestävä vaadittuja voimia kevennyksistä huolimatta.



**Kuva 13.** Hydraulisyylinterin pohjakappaleen von Mises -jännitysjaakauma topologisen optimoinnin jälkeen, myötölujuus  $3,15 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Varsin yksinkertaisesta rakenteestaan johtuen tämän kappaleen 3D-tulostaminen on vielä toistaiseksi huomattavasti kalliimpaa kuin perinteisin menetelmin tuotettuna. Hinta-ero yksittäin valmistettavalle kappaleelle on noin 630 % ja sarjatuotantona valmistettaville noin 1400 % perinteisten menetelmien eduksi. Erot selittyvät perinteisen työstömenetelmän helppouden ja sitä kautta edullisuuden, mutta myös materiaalivalinnan kautta. 3D-tulostettaessa olisi kappaleelle valittava käyttöolosuhteiden vuoksi korroosionkestävä materiaali (Inconel), joka on paitsi lähtöhinnaltaan korkeampi, mutta myös haastavampi lopputyöstettävä kuin 316L ruostumaton teräs (Delva Oy 2020). Tulostettavaan kappaleeseen tulisi koneistamalla tuotetun tavoin valmistaa kierteet jälkityöstönä. Voidaan siis todeta, että saavutettavalla kevennyksellä vastaavien yksinkertaisten kappaleiden 3D-tulostaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Tämän kandidaatintyön yhteydessä 3D-tulostetut kappaleet teetettiin Delva Oy:ssä, jolla on käytössään kaksi EOS:n valmistamaa keskikokoista ja jauhepetiteknikkaa hyödyntävää tulostinmallia, EOS M270 ja EOS M290. Näiden kahden tulostinmallin ominaisuuksien välillä on hienoisia eroja, jotka on esitelty Taulukossa 5.

**Taulukko 5.** EOS M270 ja EOS M290 –mallisten 3D-tulostuksen keskeiset tekniset ominaisuudet asiakasnäkökulmasta (EOS 2020)

Ominaisuus	EOS M270	EOS M290
Maks. rakennuskoko (mm)	250 x 250 x 215	250 x 250 x 325
Puolijohdekuitulaser (W)	200	400
Materiaalit	Ei titaania tai alumiinia	Kaikki 3D-tulostettavat metallit mahdollisia
Muuta	Tulostus suoraan CAD-tiedostosta	Reaaliaikainen laadunvalvonta

EOS M290 -tulostimessa on korkea säteenlaatu ja näin ollen erinomainen yksityiskohtaresoluutio. Kyseinen 3D-tulostin soveltuu erinomaisesti monimutkaisiin homogeenisiin

ominaisuudet omaavan kappaleen valmistukseen. Kaikki markkinoilla saatavilla olevat metallijauheet ovat tulostettavissa EOS M290 -tulostimella kaasutiiviin prosessikammion ansiosta. EOS M270 -tulostinta käytetään kappaleiden valmistamiseen suoraan CAD-tiedostosta. Sen laser on hieman matalatehoisempi kuin M290-mallissa, mutta siitä huolimatta sillä on suuri suorituskyky ja pitkä käyttöikä. (EOS 2020) EOS-tulostimien rinnalla monet suomalaiset palveluntarjoajat käyttävät myös SLM Solutions -valmistajan tulostinmalleja.

## 5. YHTEENVETO

Metallikomponenttien 3D-tulostaminen tuottaa teolliselle tuotantoketjulle taloudellisia etuja kahdesta pääsyystä; sekä toimitusketjun että suunnittelun optimoinnin vuoksi. 3D-tulostustekniikka mahdollistaa tietyille kappaleille nopeamman markkinasaatavuuden, lyhentyneen tuotanto- ja kokoonpanoajan sekä yksinkertaisemmat kappaleiden muokkaukset. Luova vapaus suunnittelussa kustannusten silti nousematta on ehdottomasti yksi suurimmista hyödyistä, joita 3D-tulostuksella on saavutettu.

Perinteisin keinoin valmistettaessa kappaleen mallin muuttaminen tuotannon aikana saattaa johtaa merkittäviin kustannuskasvuihin sekä valmistuksen viivästymiseen. 3D-tulostus tarjoaa suunnittelijalle mahdollisuuden tehdä samasta mallista useita erilaisia versioita kustannustehokkaasti. (CMTC Manufacturing 2020)

Materiaalitehokkuuden näkökulmasta tarkasteltuna materiaalin lisäys sen poistamisen sijaan ja ylijäävän metallijauheen kierrätys parantavat valmistuksen ekologisuutta ja parhaassa tapauksessa tuottavat myös kustannussäästöjä. Kappaleet on mahdollista suunnitella sekä tilavuudeltaan että painoltaan aiempaa pienemmiksi niiden teknisistä ominaisuuksista tinkimättä, eikä 3D-tulostuksessa synny materiaalin poistosta aiheutuvia ylimääräisiä jätteitä, toisin kuin kappaleita perinteisin menetelmin valmistettaessa. Materiaalitehokkuus ja tuotantoprosessien työvaiheiden vähentyminen pienentävät myös energiankulutusta. GE (The General Electric Company) on tunnettu amerikkalainen yritys muun muassa uusiutuvan energian ja ilmailualan innovaatioista - yrityksen tuotantopäällikkö on todennut seuraavasti: LEAP-suihkumootorissa käytetään lasersintrauksella 3D-tulostettuja polttoainesuuttimia. Jos ne valmistettaisiin perinteisin menetelmin, niin kukin suutin jouduttaisiin valmistamaan hitsaamalla 20 eri osaa yhteen, kun taas AM-menetelmää käyttämällä saadaan aikaan tuote, joka on painoltaan 25 % hitsattua rakennetta kevyempi ja viisi kertaa kestävämpi, minkä lisäksi, sillä saavutetaan 15 % polttoaineen säästö. (GE 2020).

Metallikomponenttien tulostaminen on perustelluinta silloin, kun valmistettavan kappaleen rakenne on niin monimutkainen, että perinteisin menetelmin työstettynä sen teknisistä ominaisuuksista jouduttaisiin tinkimään tai kappaleesta tulisi liian painava. Taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltuna 3D-tulostusta kannattaa hyödyntää silloin, kun kappaleen monimutkainen topologia perinteisin menetelmin valmistettuna aiheuttaisi merkittävän kasvun kappaleen hinnassa johtuen haastavista työstömenetelmistä.

Kappaleiden piensarjatuotanto 3D-tulostuksessa on pääsääntöisesti aina edullisempi vaihtoehto kuin yhden kappaleen tuottaminen - onnistuneella alustalle asettelulla voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä. 3D-tulostusaika ei juurikaan riipu alustalla olevien kappaleiden määrästä, kun taas perinteisissä valmistusmenetelmissä työaika kasvaa jokaisen valmistettavan kappaleen myötä.

Tässä työssä ensimmäiseksi tarkasteltavaksi 3D-tulostettavaksi metalliseksi hydraulisynteriosaksi valittiin digiventtiililohko, johon kuuluu digiventtiilin kanavistolohko sekä kansiosat kanaviston ylä- ja alapuolelle. Digiventtiiliä on mahdollista käyttää sekä erillisenä itsenäisenä komponenttina että integroida se osaksi sylinterirakennetta. Toiseksi osaksi valittiin korvasta ja pohjasta koostuva hydraulisynteripohjakappale, eli niveltakapää, joka sopii 63 mm -halkaisijaiseen sylinteriin, jossa on 40 mm -halkaisijainen männänvarsi. Taulukossa 6 on esitelty prosenttein keskeisimmät tulokset näiden kahden esimerkkikappaleen osalta.

**Taulukko 6.** Kokonaisen digiventtiililohkon (kanavistolohko ja kansiosat) ja niveltakapään kustannusvertailu

	<i>Digiventtiililohko 3D-tulostettuna suhteessa koneistettuun</i>	<i>Niveltakapää 3D-tulostettuna suhteessa koneistettuun</i>
<i>Yhden kappaleen hinta (%)</i>	+8,5 %	+600 %
<i>Piensarjatuotanto hinta (%)</i>	-21,5 %	+1400 %
<i>Suursarjatuotanto hinta (%)</i>	+8 %	+1400 %
<i>Kappaleen massa (%)</i>	-88 %	-8,5 %

Kirjoittajan oma ennuste tämän kandidaatintyön pohjalta on, että metallin 3D-tulostus kasvaa tulevaisuudessa eksponentiaalisesti sekä kuluttajien että palveluntarjoajien tietoisuuden lisääntyessä, metallijauhevalikoiman laajentuessa ja tulostuslaitteiston edullistuessa. Ekologisuuden kasvattaminen ja ilmastonmuutosta vastaan taistelemine ovat merkittävässä roolissa tuotantomenetelmien kehittämisessä ja 3D-tulostaminen on ekologisesta näkökulmasta parempi vaihtoehto suhteessa perinteisille valmistusmenetelmille materiaalin säästön ja metallijauheen kierrätettävyyden ansiosta. Lähes rajattomat suunnittelumahdollisuudet ja yksittäisten testikappaleiden nopea muokkaaminen 3D-tulostusta varten voivat tulevaisuudessa tarjota uusia yhä monipuolisempia vaihtoehtoja useiden kriittisten alojen, kuten lääketieteen, käyttöön.

## LÄHTEET

3D Hubs, saatavilla: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/#work> ja <https://www.3dhubs.com/guides/metal-3d-printing>, luettu 6. –8.2020

Ajatec Oy, saatavilla: <https://ajatec.fi/tekniikat/metalliosat/metallin-laser-sintraus>, luettu 6.2020

Belmont Metals, saatavilla: <https://www.belmontmetals.com/alloys-and-powder-specs-for-3d-printing/>, luettu 8.2020

CMTC Manufacturing, saatavilla: <https://www.cmtc.com/blog/benefits-of-additive-manufacturing>, luettu 8.2020

DebRoy, T. Wei, H.L. Zubacj, J.S. Mukherjee, J. Elmer, J.W. Milewski, J.O. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, A. & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metal components - Process, structure and properties. Science Direct.

Delva Oy, Kastell, J. Lindqvist, M. & Mäkinen, M-L. (2020)

Diegel, O. Nordin, A. & Motte, D. Springer International Publishing (2019). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing.

EOS, saatavilla: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290> ja [https://dmlstechnology.com/images/pdf/EOSINT\\_M\\_270.pdf](https://dmlstechnology.com/images/pdf/EOSINT_M_270.pdf), luettu 8.2020

Etteplan Oy, saatavilla: <https://www.etteplan.com/references/additive-manufacturing-design-case-optimized-production>, luettu 8.2020

Fiellberg Oy, Elonen, J. Lantela, T. Nurmi, J. Siitari, V. Materiaalit julkaistu (2015–2020)

Gao, Y. Zhou, M. (2018). Superior Mechanical Behavior and Fretting Wear Resistance of 3D-Printed Inconel 625 Superalloy. Applied Sciences.

GE, saatavilla: <https://www.ge.com/news/reports/epiphany-disruption-ge-additive-chief-explains-3d-printing-will-upend-manufacturing>, luettu 8.2020

Gibson, I. Rosen, D.W. & Stucker, B. Springer International Publishing (2010) Additive Manufacturing Technologies.

Gupta, M. (2019). Special Issue: 3D Printing of Metals. Applied Sciences.

Hämeenaho, T. Tölander, H. Nordenberg, E. Komi, E. Rytönen, I. & Karjalainen, J. (2019) Additive manufacturing center of excellence in Finland. Feasibility Study, Business Finland.

Jiang, J. Xu, X. Stringer, J. (2018) Support Structures for Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing and Materials Processing.



Kamps, T. Lutter-Günther, M. Seidel, C. Gutowski, T. & Reinhart, G. (2018). Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.

Lindqvist, M. Piili, H. & Salminen, A. (2016) Benchmark study of industrial needs for additive manufacturing in Finland. *ScienceDirect*.

Lloyd's Register Group Ltd (2017) Guidance notes for the certification of metal parts made by additive manufacturing. London: Lloyd's Register Group Ltd.

Mahmoodkhani, Y. Usman, A. Shahriar, I.S. Adhitan, R.K. Reza, E. Ali, K. Ehsan, M. & Ehsan, T. (2018) On the measurement of effective powder layer thickness in laser powder-bed fusion additive manufacturing of metals. *Progress in Additive Manufacturing*.

Redwood, B. Schöffner, F. Garret, B. (2018). *The 3D Printing Handbook*. Amsterdam, Coers & Roest.

Ituarte, I.F. Salmi, I. Ballardini, M. Tuomi, R-M. Partanen, J. (2017) Additive Manufacturing in Finland: Recommendations for a Renewed Innovation Policy. *Science Direct*.

Seifi, M. Gorelik, M. Waller, J. Hrabe, N. Shamsaei, N. Daniewicz, S. Lewandowski, J. (2017) Progress Towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM)*.

Tuan, D.N. Kashani, A, Imbalzano, G. Nguyen, K.T.Q. & Hui, D. (2018) Additive manufacturing (3D Printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Science Direct*.

VTT (2015) SLM design guide.

Wells, D. (2018). Qualification & certification of additively manufactured parts for NASA applications. NSC Webinar for Safety and Mission Assurance Professionals. Huntsville, AL, USA. Saatavilla: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190000354>

Wohlers, T. C. (2018) Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. In T. Wohler. Colorado, USA: Wohlers Associates.

Yang, L. Hsu, K. Baughman, B. Godfrey, D. Medina, F. Menon, M. Wiener, S. Springer International Publishing (2017). *Additive Manufacturing of Metals*, 168 s.