



# Suunnitteluohjeistuksen ja -vaiheistuksen laatiminen 3D-tulostettaville metallikappaleille

Lari Koistinen

OPINNÄYTETYÖ  
Kesäkuu 2020

Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

KOISTINEN, LARI:

Suunnitteluohjeistuksen ja -vaiheistuksen laatiminen 3D-tulostettaville metallikappaleille.

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Kesäkuu 2020

---

Metallien ainetta lisäävä valmistus, toiselta nimeltään 3D-tulostus, on koko ajan kehittyvä valmistustekniikka, joka on etenkin lentokoneteollisuuden suuren huomion kohteena. Nykyään 3D-tulostuspalveluja tarjoaa useampi yritys Suomessakin. 3D-tulostus antaa suunnittelijoille huomattavasti enemmän vapauksia verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Tämän ansiosta 3D-tulostus on mahdollistanut myös erilaisten optimointimenetelmien suosion kasvun. Näillä menetelmillä voidaan optimoida muun muassa kappaleen suorituskykyä. Nämä vapaudet tuovat kuitenkin omat haasteensa suunnitteluun, sillä suunnittelijoiden on kyettävä unohtamaan perinteiset rajoittavat tekijät.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Patria Aviation Oy:lle. 3D-tulostuksen ollessa vielä uusi valmistusmenetelmä ei Patrialla ole vielä täyttä suunnittelukykyä metallien 3D-tulostusta varten. Näin ollen syntyi tarve suunnitteluohjeistukselle, joka on tarkoitettu suunnittelijoiden käyttöön. Suunnitteluohjeistuksen tarkoituksena on helpottaa suunnittelijoiden työtä sekä auttaa muistamaan tiettyjä raja-arvoja. Suunnitteluohjeistus laadittiin laajan kirjallisuus- ja tutkimusperehtymisen jälkeen. Ohjeistusta varten ei suoritettu testitulostuksia, jolloin ohjeistuksen tuli olla yleispätevä. Tämä valmistunut ohjeistus jää vain Patrian käyttöön, eikä sitä näin ollen julkaista tämän työn yhteydessä.

Vaiheistusta varten suunniteltiin perinteisiä valmistusmenetelmiä varten suunniteltu kappale uudelleen hyödyntäen muun muassa topologian optimointia. Lopputuloksena saatiin vaiheistus, joka laadittiin prosessikaavion muotoon. Tuloksena saatu prosessikaavio ei kuitenkaan ole Patrian virallinen ylläpitämä prosessi. Vaiheistuksen yhteydessä uudelleen suunnitellulle kappaleelle suoritettiin vielä lopuksi valmistuksen simulointi. Työtä olisi suositeltavaa jatkaa jatkotutkimuksilla, eli valmistamalla työn tuloksena syntynyt kappale, jotta voidaan varmistua menetelmien toimivuudesta. Lisäksi tärkeää olisi tehdä testitulostukset, jotta saataisiin tulostin- ja materiaaliikohtaiset suunnitteluohjeet.

---

Asiasanat: 3D-tulostus, ainetta lisäävä valmistus, jauhepölytulostus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Aircraft Engineering

KOISTINEN, LARI:

Creating design guidelines and design phases for metal 3D-printing

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 1 page  
June 2020

---

Additive manufacturing, also known as 3D-printing of metals, is a rapidly growing manufacturing method, and it is an especial area of interest for the aviation industry. 3D-printing services are also provided in Finland by many companies. 3D printing provides more design freedom for designers than conventional manufacturing methods. That is why 3D-printing has increased the use of optimization methods. By using optimization methods, it's possible to optimize, for example, the performance of a part. These design freedoms provide also challenges for design and it is important to understand the benefits provided of 3D-printing. Without appropriate knowledge, these benefits cannot be utilized.

This thesis was made for Patria Aviation Oy. Because 3D-printing is a new manufacturing method, Patria does not have full design capability for metal 3D-printing. To achieve this full design capability, designers must understand those benefits and challenges of 3D-printing. Therefore, design guidelines for metal 3D-printing were made. This guide is meant for designers to help and give some instructions when designing parts for 3D-printing. The guide is based on literature review and researches on the subject. Because it wasn't possible to make test prints, general guides had to be made. Exact guides for different material would need test prints. The design guide is not shown in this thesis, because as it is confidential.

For design phases, an existing part used for conventional manufacturing methods was redesigned, so, among other things, topology optimization was used for achieving the best design for 3D-printing. As a result, an optimized and printable part was created, which can be manufactured in the future. After the part was ready, the needed design phases were created. These phases were made into a flow chart. It's recommended here that this work should be continued by manufacturing that part to find out if these guides and phases are working properly. Furthermore, test prints should be made to achieve exact design guides for different materials.

---

Key words: 3D-printing, additive manufacturing, powder bed fusion

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	PATRIA OYJ .....	7
	2.1 Yritysrakenne .....	7
	2.1.1 Patria Aviation Oy .....	8
3	AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS .....	9
	3.1 Yleistä .....	9
	3.2 Tekniikat .....	10
	3.2.1 Powder Bed Fusion (PBF) .....	11
4	HAASTEET .....	13
	4.1 Rajoitettu koko .....	13
	4.2 Tukirakenteet .....	13
	4.3 Jäännösjännitykset .....	15
	4.4 Jälkikäsittely .....	15
	4.5 Laaduntarkkailu .....	16
	4.6 Prosessiparametrit .....	17
5	HYÖDYT .....	20
	5.1 Geometrian vapaus .....	20
	5.2 Pienerävalmistus .....	23
	5.3 Materiaalihukka .....	23
	5.4 Digitaalivarasto .....	23
6	SUUNNITTELU 3D-TULOSTUSTA VARTEN .....	24
7	SUUNNITTELUOHJEET .....	27
	7.1 Suunnitteluvaiheet .....	29
	7.1.1 Kappaleelta vaadittavat ominaisuudet .....	29
	7.1.2 CAD-mallin muokkaus .....	30
	7.1.3 Kuormitusten asettaminen ja FEM-analyysi .....	32
	7.1.4 Topologian-optimointi .....	33
	7.1.5 Uudelleen suunnittelu optimoidun kappaleen pohjalta .....	36
	7.1.6 Valmistuksen simulointi .....	37
8	TULOKSET .....	39
9	POHDINTA .....	46
	LÄHTEET .....	48
	LIITTEET .....	51
	Liite 1. Prosessikaavio AM-suunnitteluun .....	51

**ERITYISSANASTO**

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
DMLS	Direct Metal Laser Melting
EBM	Electron Beam Melting
NURBS	Non-uniform rational basis spline
PBF	Powder Bed Fusion
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering

## 1 JOHDANTO

3D-tulostaminen on tuonut mukanaan paljon uusia mahdollisuuksia, joihin ei ole perinteisillä valmistusmenetelmillä kyetty. Metallien 3D-tulostus on tällä hetkellä kovassa nosteessa, ja näin ollen tekniikka kehittyy kovalla vauhdilla. Tulostamisen tuomat mahdollisuudet voivat olla haastavia hyödyntää, mikäli taustalla on pitkä suunnittelukokemus perinteisiä menetelmiä varten. Kaiken lisäksi 3D-tulostaminen on tällä hetkellä vielä kallis valmistusmenetelmä perinteisiin menetelmiin verrattuna, jolloin suunnittelussa tarjolla olevien mahdollisuuksien rooli korostuu entisestään.

Tämä työ tehtiin Patria Aviation Oy:lle, joka on yksi Patria Oyj:n tytäryhtiöistä. Patria Aviation tarjoaa muun muassa lentokoneiden elinkaaren tukipalveluita. Patria työllistää kaikkiaan yli 3000 henkilöä, joista Aviationin osuus on 26 %. Työssä tavoitteena oli laatia Patrian suunnittelijoiden käyttöön suunnitteluohjeistus ja vaiheistus 3D-tulostettaville metallikappaleille. Patria Aviationille metallisten 3D-tulosteiden suunnittelukyky on uusi asia, joten tarve ohjeistukselle oli olemassa. Suunnittelusta haluttiin alkumetreiltä asti yhtenäistä, laadukasta sekä kustannustehokasta. Koska kukaan suunnittelijoista ei suunnittele pelkästään 3D-tulostettavia osia, syntyy ajoittain tarve myös muistin virkistämiseen, missä suunnittelun ohjeistus ja vaiheistus auttavat.

Työssä käydään läpi hieman PBF-tulostimen toimintaperiaatetta, sillä tulostimen toiminnan ymmärtäminen on todella tärkeää onnistuneen suunnittelun kannalta. Työn ulkopuolelle on jätetty täysin kaikki muut tulostustekniikat. Työssä tullaan perehtymään PBF-tulostimen tuomiin haasteisiin sekä tietenkin hyötyihin. Kappaleessa 6 esitetään asioita, joita on hyvä pitää mielessä, kun mietitään kappaleen tulostettavuutta. Näiden asioiden lisäksi on myös monia muita asioita, jotka vaikuttavat kappaleen tulostettavuuteen, mutta näihin ei tässä työssä oteta kantaa. Kappaleessa 7 tullaan esittämään suunnitteluvaiheet, joista muodostuu ohjeisiin sisältyvä vaiheistus. Yksityiskohtaisesti ohjeita ei tulla työssä esittämään, sillä ne jäävät vain Patrian käyttöön.

## 2 PATRIA OYJ

### 2.1 Yritysrakenne

Patria on kansainvälinen yritys, joka tarjoaa puolustus-, turvallisuus-, ja ilmailualan elinkaaren tukipalveluja ja teknologiaratkaisuja. Patrian tuotteita ovat mm. panssaroidut pyöräajoneuvot ja kranaatinheitinjärjestelmät. Näiden lisäksi Patria tarjoaa pääasiassa viranomais- ja sotilasasiakkaille lentokoneiden ja helikopterien elinkaaren tukipalveluja.

Enemmistön Patriasta omistaa Suomen valtio (50,1 %) ja loput 49,9 % omistaa norjalainen Kongsberg Defence & Aerospace AS. Vuonna 2018 Patrian liikevaihto oli 476,1 miljoonaa euroa ja yrityksessä työskentelee yli 3000 ihmistä. (Patria 2020.)

Patrian historia ylettyy vuoteen 1921 asti, jolloin perustettiin Ilmavoimien lentokonetehdas. Nimi Patria otettiin käyttöön vuonna 1997, jolloin yhdistettiin puolustus- ja ilmailuteollisuuden yrityksiä. Nykyisin Patria on jaettu seitsemään tytäryhtiöön liiketoimintojen mukaan. (Patria 2020.) Patrian nykyinen konsernirakenne näkyy kuvassa 1. Kuvasta näkee, että viisi näistä tytäryhtiöistä on kokonaan Patrian omistamia.



Kuva 1. Patrian konsernitoiminnot. (Patria 2020).

### **2.1.1 Patria Aviation Oy**

Patria Aviation Oy tuottaa lentokoneiden ja helikopterien elinkaaren tukipalveluita sekä lentokoulutusta siviili- ja sotilashenkilöille. Elinkaaren tukipalveluihin kuuluu rungon, moottorin ja laitteiden huolto-, korjaus-, ja modifiointipalvelut. Aviationin osuus koko Patria-konsernin liikevaihdosta oli vuonna 2018 18 % ja 26 % Patria-konsernin henkilöstöstä työskenteli Patria Aviationilla. Merkittävimmät asiakkaat Patria Aviationille ovat sotilas- ja viranomaistoimijat pohjoisessa Euroopassa. Patria Aviation toimii Suomen puolustusvoimien strategisena kumppanina. (Patria 2019.)



### 3 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

#### 3.1 Yleistä

Idea kolmeulotteisesta kappaleiden valmistamisesta on huomattavasti vanhempi kuin ainetta lisäävät valmistusmenetelmät. Ensimmäinen konsepti kolmeulotteisesta valmistuksesta voidaan jäljittää vuoteen 1902, jolloin patentointiin lamioidut hevosenkengät. 60- ja 80-luvuilla kehitettiin paljon patenteja ainetta lisäävään valmistukseen ja tällöin kehitettiin idea kerros kerrokselta valmistamisesta. 3D-Systems esitteli vuonna 1987 ensimmäisen kaupallisen järjestelmän maailmassa. Vuosien 1991 ja 1993 välillä kehitettiin jo viisi uutta tekniikkaa, mukaan lukien nykyäänkin paljon käytössä oleva Selective Laser Sintering (SLS). (Yang ym. 2018.)

Ainetta lisäävää valmistus, eli toiselta nimeltään 3D-tulostus, on prosessi, jossa 3D-mallista tehdään valmis kappale materiaalia liittämällä, usein kerros kerrokselta. 3D-tulostus antaa vapauksia suunnitteluun, sillä kappaleen monimutkaisuus ei nosta valmistuskustannuksia, toisin kuin ainetta poistavilla valmistusmenetelmillä. Nykyisin valmistettävien materiaalien määrä 3D-tulostuksella on suuri. Näihin kuuluvat muun muassa muovit, metallit, keramiikka, paperi, komposiitti ja betoni. (Duda & Raghavan 2018.) Tässä työssä tarkastellaan vain metallien 3D-tulostusta PBF-tekniikalla. Edellä mainittujen nimien lisäksi 3D-tulostuksesta käytetään Suomessakin myös nimeä AM-tekniikka.

Alun perin 3D-tulostusta on hyödynnetty teollisuudessa lähinnä prototyyppien tekoon, mutta tekniikoiden kehittyessä on käyttökohteitakin tullut lisää. Tällä hetkellä 3D-tulostuksella kyetään valmistamaan käyttökelpoisia lopputuotteita. Työvälineiden valmistus on yksi käyttökohteista, jossa tulostusta hyödynnetään laajalti. Muun muassa Volkswagen on alkanut valmistaa 3D-tulostamalla työkaluja autojen kokoonpanoa varten. Tällä tavalla Volkswagen on säästänyt 91 % työkalujen kehityskuluissa sekä vähentänyt työkalujen kehitysaikaa 95 %. (Ultimaker 2017.) Lentokone-teollisuus on tänä päivänä yksi suurista metallien 3D-tulostuksen käyttäjistä. Muun muassa lentokonevalmistaja Airbus on valmistanut ensimmäisen lentokelpoisen osansa jo vuonna 2014. 3D-tulostuksen avulla voidaan

päästä käsiksi suuriinkin säästöihin, sillä Airbus on laskenut, että jokainen säästetty kilogramma säästää 25 tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä lentokoneen elinkaaren aikana. (Airbus 2020.) Tämän vuoksi kyseessä on erittäin mielenkiintoinen tekniikka tulevaisuuden kannalta, sillä todennäköisesti tulevaisuudessa lentokoneellisuus tulee olemaan rajusti päästörajoitusten kourissa.

### 3.2 Tekniikat

ASTM jakaa 3D-tulostus tekniikat seitsemään eri kategoriaan,

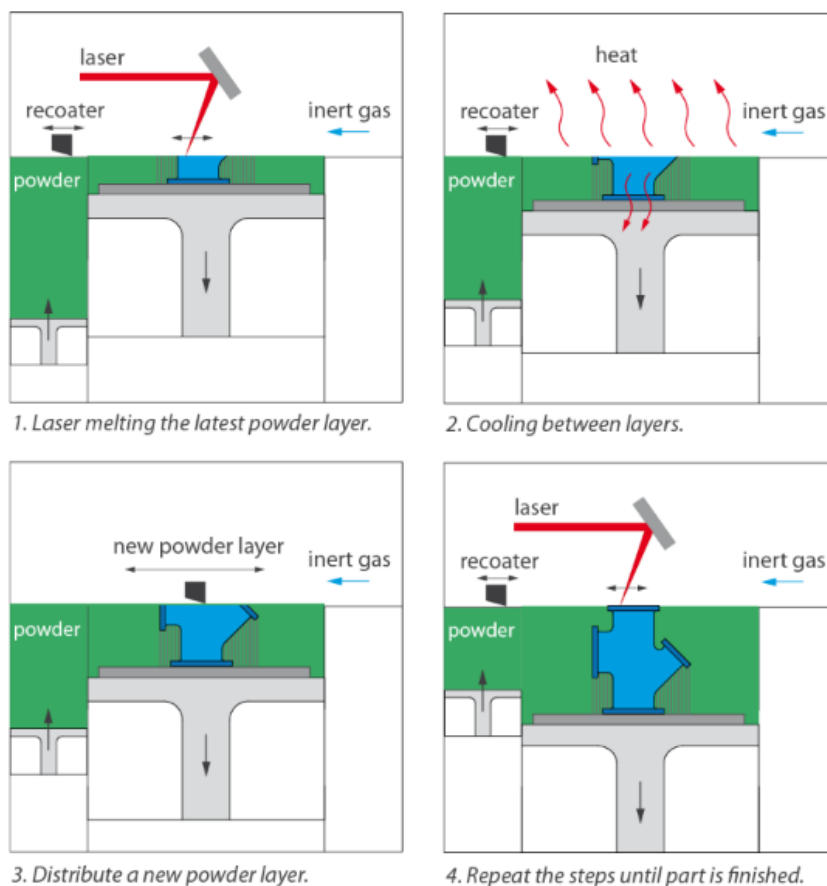
- Binder Jetting (BJ)
- Direct Energy Deposition (DED)
- Material Extrusion
- Material Jetting
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Sheet Lamination
- Vat Polymerization

Näistä seitsemästä kategoriasta vain neljällä voidaan valmistaa metallia. Nämä menetelmät ovat BJ, DED, PBF sekä Sheet Lamination. Jokaisen kategorian alla on useampia erilaisia tekniikoita, joilla ne on toteutettu. (Dutta ym. 2019, 16.)

Yleisiä materiaaleja metallien 3D-tulostukseen ovat teräkset, alumiiniseokset, titaani ja sen seokset, sekä myös nikkelpohjaiset superseokset. Suurin osa nykyisiä metallijauheista valmistetaan vesi-, kaasu- tai plasma-atomisaatiolla. Atomisaation ollessa kallis menetelmä, on erityisesti titaanien ja sen seosten puolella kehitteillä uusia halvempia valmistustekniikoita. (Herzog ym. 2016.)

### 3.2.1 Powder Bed Fusion (PBF)

PBF-tekniikat perustuvat kaikki samalle toimintaperiaatteelle. Siinä metallijauhetta levitetään rakennusalustalle, jonka jälkeen laser- tai elektronisäde skannaa tämän alueen lämmittäen metallijauhetta sen verran, että se sulaa tai lähes sulaa. Jäähdyessään metalli kiinnittyy kiinni alempaan kerrokseen. Tämän jälkeen kappaleen annetaan jäähtyä, ennen kuin alustaa lasketaan yhden kerroksen verran alaspäin ja uusi jauhekerros levitetään. Tätä prosessia toistetaan siihen asti, kunnes kappale on täysin valmis. Tämä prosessikuvaus on havainnollistettu kuvassa 2. Laserin tai elektronisäteen reitti on määritetty valmistettavan kappaleen CAD-tiedostosta. PBF antaa suunniteluun enemmän vapauksia verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. PBF-menetelmällä kyetään nykyisin valmistamaan jo varsin tarkkoja yksityiskohtia. (Dutta ym. 2019.) Yleisimpiä PBF-tekniikoita ovat SLM, SLS, DMLS ja EBM. Edellä mainittujen yksi suurimmista eroista on niiden käyttämissä energialähteissä, EBM:n ollessa ainut, joka käyttää elektronisädettä. Muut tekniikat käyttävät lasersädettä.



Kuva 2. PBF-menetelmän tulostusprosessi. (Kokkonen ym. 2016).

Jauhepetimenetelmässä rakennuskammio täytyy täyttää joko inertillä kaasulla, tai saada aikaan voimakas alipaine, riippuen käytetäänkö laseri- vai elektro-nisädetttä. Inertillä kaasulla on tarkoitus vähentää hapettumisen riskiä. (Herzog ym. 2016). EBM- ja SLS/SLM-tekniikoilla on muutakin eroa kuin edellä mainitut. Nimittäin EBM-tekniikassa rakennuskammio lämmitetään aina korkeaan lämpötilaan. Tämän avulla pystytään saamaan metallikappaleita, joihin ei ole syntynyt jäännösjännityksiä, toisin kuin laseria käytettäessä. (EPMA 2019.) EBM-tekniikan rakennuskammion lämmitys tuo kuitenkin mukanaan omia haasteitaan, sillä korkean lämpötilan takia osa sulamattomasta jauheesta saattaa sintrautua kappaleeseen kiinni, tehden näin joidenkin geometristen piirteiden valmistamisesta hankalaa. Seuraavassa kappaleessa kerrotaan tarkemmin PBF-tekniikan haasteista, jotka liittyvät etenkin suunnitteluun.

Tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti näkemään vielä useampia eri PBF-tekniikoita. Esimerkiksi Grazin yliopistolla on onnistuttu kehittämään PBF-tekniikka, joka käyttää energialähteenään LEDiä. Tällä konseptilla pystyttäisiin saavuttamaan nopeampi valmistusaika verrattuna laseriin, sillä LEDin halkaisijaa pystytään muuttamaan 0,05 – 20 mm välillä. Näin tekemällä pystytään tietyissä kohtaa kappaletta sulattamaan suurempia alueita kerralla, jolloin tietenkin valmistusaika pienenee. (Essop 2020.)

## 4 HAASTEET

### 4.1 Rajoitettu koko

Jauhepetitulostuksessa yksi todella rajoittava tekijä on tulostusalueen koko. Mikäli tulostusaluetta suurempia kappaleita halutaan tulostaa, nousee vaihtoehtoksi kappaleen jakaminen kahteen tai useampaan osaan. Tämä taas ei välttämättä ole täysin optimaalinen ratkaisu, sillä kappaleiden kiinnitys toisiinsa pitää tehdä esimerkiksi hitsaamalla. Yksi suurimmista kaupallisista jauhepetitulostimista on EOS:n valmistama M400-mallin tulostin. Kyseisen tulostimen tulostusalueen koko on 400 mm suuntaansa. (EOS 2019.) Huomattavaa on, että yleisimmät Suomessa käytössä olevat metallitulostimet ovat kokoluokaltaan noin 250 mm suuntaansa.

### 4.2 Tukirakenteet

Koska 3D-tulostuksessa ei voida valmistaa mitään tyhjän päälle, syntyy tarve tukirakenteille. Nämä tuovat oman haasteensa, sillä tukirakenteet on aina lopulta irrotettava, mikä taas saattaa vaurioittaa etenkin ohutseinäisiä kappaleita. Tukien käyttö kappaleiden sisäpuolisissa rakenteissa on hyvin rajallisesti mahdollista ja esimerkiksi pienissä nestekanavissa lähes mahdotonta. Tämä luo haasteita suunnitteluun, sillä on kyettävä valmistamaan itseään kantavia muotoja. Tarvittaessa on kappaleeseen lisättävä koneistusvaraa tukirakenteiden poistoa varten. (Kokkonen ym. 2016.) Koska tukimateriaalit ja etenkin sen poistaminen on hiekan rajoittanut 3D-tulostuksen mahdollisuuksia, on tähän kehitetty ratkaisuja, joilla tätä voidaan helpottaa. Muun muassa Itävaltalainen yhtiö Hirtenberger on kehittänyt tekniikan 3D-tulostettavien kappaleiden jälkikäsitteilyä varten. Kyseinen tekniikka muun muassa poistaa tukirakenteet, joten voidaan olettaa, että tukimateriaalien poistosta koituvat rajoitteet alkavat helpottaa tulevaisuudessa. (Scott 2018.)

Tukirakenteiden tehtävänä on kiinnittää kappale tulostusalueeseen ja toimia myös lämmönjohtimena pois kappaleesta. Toinen tärkeä tehtävä tukirakenteilla on kantaa taivutusjännitykset, jotka syntyvät lämmön takia, jotta mittatarkkojen kappaleiden

leiden valmistaminen on mahdollista. Joissain tapauksissa kappale voidaan rakentaa suoraan kiinni tulostusalustaan. Tällöin tarvitaan ylimääräistä materiaalia kappaleen alapintaan. Tätä materiaalia tulee olla sen verran, että se voidaan sahata pois ja koneistaa mittatarkaksi. Kolmas tukirakenteiden tehtävä on nimensä mukaisesti tukea kappaletta, kun valmistetaan sellaisia piirteitä, jotka eivät pysty itseään kantamaan. (Kokkonen ym. 2016.)

Tukirakenteita voidaan tehdä suoraan kappaleen CAD-malliin, jolloin tukirakenteista saadaan hyvin jäykkiä sekä hyvin lämpöä johtavia. Muuten tukirakenteet tehdään sitä varten kehitetyillä ohjelmilla. Yleisiä tukirakennetyyppejä ovat ristikkotuki sekä tankotuki. Näiden erona on se, että tankomallinen tuki on jäykempää sekä paremmin lämpöä johtavaa. Toisaalta tankomallinen tuki on työläämpää poistaa valmiista kappaleesta, minkä vuoksi niitä ei ole suotavaa käyttää liikaa. Tämän vuoksi voidaan käyttää ristikkotukirakennetta. Ristikkomallinen tuki käyttäytyy päinvastoin kuin tankomallinen, tuoden vähemmän jäykkyyttä sekä lämmönjohtokykyä. Toisaalta ristikkomallinen tuki on helpompaa poistaa kappaleesta, jolloin mahdollinen kappaleen vahingoittuminen tukirakenteen irrottamisen yhteydessä pienenee. (Kokkonen ym. 2016.)

Tukirakennetta näkyy kiinnittyneenä valmiiseen kappaleeseen kuvassa 3. Tukirakenteiden kohdalla on hyvä muistaa, että niitä ei kyetä vielä kierrättämään. (Ford ym. 2016). Näin ollen tukirakenteista muodostuu hukkamateriaalia, mikä taas nostaa valmistuskustannuksia.



Kuva 3. Tukirakennetta. (Childerhouse 2019).

### 4.3 Jäännösjännitykset

Yksi varsin vaikea haaste 3D-tulostuksessa on jäännösjännityksien syntyminen. Näitä jännityksiä syntyy, kun metallia sulatetaan ja jäädytetään. Jäännösjännityksien takia kappale pitää lähes aina jälkikäsitellä, josta kerrotaan myöhemmin lisää. Nämä jäännösjännitykset voivat pahimmillaan rikkoa kappaleen ja myöskin irrottaa sen tulostusalustastaan, eli aiemmin mainittuja tukirakenteita tarvitaan tähän. Tämän vuoksi on syytä suunnitteluvaiheessa miettiä, minkälaisia tukirakenteita kappaleeseen laitetaan. Jäännösjännityksiä kyetään vähentämään tulostusalustan esilämmittämällä. (Kokkonen ym. 2016.) Useimmat simulointimallit ennustavat, että kappaleeseen syntyy puristusjännitystä energialähteen edessä. Energialähteen siirtyessä alkaa muodostumaan vetojännitystä. Tulostussuunnassa olevat jännitykset on havaittu olevan lähinnä vastuussa murtumis- ja muodonmuutoskäytöksestä. (Bandyopadhyay & Traxel 2018.)

### 4.4 Jälkikäsitteily

3D-tulostamalla valmistetun kappaleen pinta on harvoin riittävän hyvälaatuinen loppukäyttöä varten. Näin ollen jälkikäsitteilyä tarvitaan, jotta saadaan kappaleesta riittävän hyvälaatuinen. 3D-tulostamalla valmistetuille kappaleille yleisemmin käytettyjä jälkikäsitteilytoimenpiteitä ovat pinnan kiillotus tai hiekkapuhallus, koneistaminen haluttuun mittaan, tukirakenteiden poistaminen sekä jäännösjännitysten poistaminen. Kiillotuksella ja hiekkapuhalluksella on tarkoituksena parantaa kappaleen pinnan karheutta, sillä 3D-tulostettujen metallikappaleiden pinnan karheus on valmistuksen jälkeen todella korkea. (Löber 2012.) Jännityksen poistaminen on suositeltavaa tehdä ennen kuin kappale irrotetaan tulostusalustasta, jotta vältetään kappaleen halkeilulta (Kokkonen ym. 2016).

Laadun parantamisella voidaan käsittää muun muassa kappaleen väsymisominaisuuksien parantaminen. Yksinkertaisin toimenpide tähän on pinnan kiillotus. Materiaalivirheisiin, kuten huokoisuuksiin, voidaan vaikuttaa esimerkiksi kuumalla isostaattisella puristuksella (HIP). Tämä parantaa väsymisominaisuuksia siten, että ne alkavat olla vertailukelpoisia valettuun versioon materiaalista. (Herzog ym. 2016.)

## 4.5 Laaduntarkkailu

Laadun varmistaminen nousee monesti esiin, kun puhutaan AM-tekniikan haasteista. Se mikä tästä tekee haastavan, on se, että pelkästään jauhepetimenetelmässä on yli 20 erilaista prosessiparametriä, jotka vaikuttavat kappaleen laatuun, mm. laserteho, skannausnopeus, kerrospaksuus ja skannausstrategia. Lujuusominaisuudet ovat monesti kiinnostuksen kohteena valmistettaessa kappaleita metallista. Yleisesti ottaen voidaan sanoa staattisten lujuusominaisuuksien riippuvan kappaleen tiheydestä, kuin myös materiaalin mikrorakenteesta, joka syntyy 3D-tulostuksen yhteydessä. 3D-tulostamalla valmistettujen kappaleiden staattinen lujuus on yleensä suurempi kuin perinteisin menetelmin valmistetun materiaalin, kuten valamalla. 3D-tulostettujen kappaleiden lujuusominaisuudet ovat kuitenkin riippuvaisia tulostussuunnasta. (Herzog ym. 2016.) Tämän anisotrooppisen käytöksen aiheuttaa mahdollisesti hieman vajaa lämpöenergia, joka saa aikaan epätäydellistä sulamista kerrosten välissä, aiheuttaen näin tulostussuunnan heikommat ominaisuudet. (Zhang ym. 2017.) Tästä voidaan päätellä, että AM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden lujuusominaisuuksien ennustaminen on todella haastavaa. Tulostussuunta ei ole ainoa tekijä, joka määrittää metallin ominaisuuksia, sillä jopa kappaleen geometria vaikuttaa tähän. (Yang ym. 2017.) Tarkasteltaessa materiaaleille luvattuja lujuusominaisuuksia, voidaan havaita kohtalaista hajontaa tuloksissa. Esimerkiksi materiaali- ja tulostinvalmistaja EOS (2017) kertoo itse valmistamalleen titaanijauheelle vetomurolujuudeksi 1055 – 1075 MPa, kun taas Yang ym. (2017) viittaa kirjassaan kokeellisiin tutkimuksiin, joissa on titaanille saatu vetomurtolujuudeksi 1051 – 1250 MPa. Voidaan siis todeta, ettei metalleille, jotka ovat AM-tekniikalla valmistettuja, voida luvata mekaanisia ominaisuuksia samalla tavalla, kuten perinteisin menetelmin valmistetuille materiaaleille. Tämän vuoksi laaduntarkkailu nousee yhdeksi haasteeksi, jonka AM-tekniikka kohtaa.

Miten laadunvarmistaminen sitten onnistuu AM-tekniikalla, on hyvinkin laaja aihe, johon ei tässä työssä oteta sen suuremmin kantaa. AM-palveluita tarjoavat yritykset joutuvat etsimään kullekin tulostettavalle materiaalille parhaat parametrit,



joilla saavutetaan laadullisesti semmoinen tulos, joka täyttää asiakkaan tarpeet. Tällekin saralle saadaan mahdollisesti lähivuosina lisää tutkittua tietoa sitä myötä, kun tekniikka yleistyy.

#### 4.6 Prosessiparametrit

Aiemmin mainittiin, että jauhepetimenetelmässä laatuun vaikuttavia tulostusparametrejä on yli 20. Osaa näistä parametreistä käytetään määrittämään energiatiheys, joka käytetään yhteen jauhekerrokseen. Energiatiheys on tärkeä arvo 3D-tulostuksessa, koska tämä arvo vaikuttaa suuresti kappaleen lopulliseen laatuun. Riittävän suuri energiatiheys mahdollistaa kerrosten kunnollisen kiinnittymisen toisiinsa. Energiatiheys voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$E_D = \frac{P}{h \cdot t \cdot v}, \quad (1)$$

jossa  $P$  on laserteho,  $h$  varjostusetäisyys (etäisyys lasersäteiden välillä),  $t$  kerrospaksuus ja  $v$  skannausnopeus. (Brown ym. 2018.)

Kerrospaksuudella tarkoitetaan sitä, miten paksu kerros metallijauhetta levitetään valmistettavan kappaleen päälle, kun edellinen kerros on saatu valmiiksi. Kerrospaksuudella on merkitystä siihen, miten tarkkoja piirteitä pystytään valmistamaan ja näin ollen ylipäätään tämä vaikuttaa kappaleen mittatarkkuuteen. Kerrospaksuus vaikuttaa täysin loogisesti kappaleen laatuun, laadun ollessa paras, kun kerrospaksuus on pienin. Hieman aiemmin mainittiin, että kappaleen tiheys vaikuttaa lujuusominaisuuksiin. Kerrospaksuus taas vaikuttaa kappaleen tiheyteen, tiheyden ollessa hyvinkin lähellä 100 %:a pienillä (noin 20 – 30  $\mu\text{m}$ ) kerrospaksuuksilla. Ohuempien kerrospaksuuksien parempi tiheys johtuu mahdollisesti paremmin sulaneesta materiaalista sekä pienemmistä kaasukuplista kappaleen sisällä. Nämä kaasukuplat aiheuttavat kappaleeseen huokoisuuksia ja näin ollen pienentävät tiheyttä. (Nguyen ym. 2018.)

Skannausnopeus vaikuttaa merkittävästi kappaleen tulostusaikaan. Skannausnopeutta ei silti voi asettaa mahdollisimman suureksi siinä toivossa, että kappale valmistuisi mahdollisimman nopeasti. Mikäli skannausnopeus asetetaan liian suureksi, ei säteellä ole riittävästi aikaa sulattaa metallijauhetta. Tämä aiheuttaa

huokoisuuksia kappaleeseen ja heikentää kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. (Brown ym. 2018.)

Laserteho kertoo, kuinka paljon energiaa käytetään jauhekerroksen sulattamiseen. Laserteho vaikuttaa siihen, miten hyvin jauhekerros sulaa ja näin ollen kiinnittyy edelliseen kerrokseen. Liian pieni teho aiheuttaa jauhekerroksessa huonoa sulamista tai se ei sulata kunnolla edellistä kerrosta, jolloin kiinnittyminen jää huonoksi. Myös liian suuresta tehosta on haittaa kappaleen laatuun. Liian suuri teho saattaa aiheuttaa höyrystymistä, joka taas aiheuttaa kappaleeseen huokoisuuksia. (Brown ym. 2018.) Tyypillisesti laserteho on säädetty siten, että se sulattaa myös tietyltä etäisyydeltä edellistä kerrosta, mahdollistaakseen parhaan mahdollisen fuusioitumisen edellisen kerroksen kanssa. (Yang ym. 2017).

Varjostusetäisyys on etäisyys peräkkäisten lasersäteiden välissä. Pienentämällä tätä mitta voidaan kasvattaa säteiden päällekkäisyyttä, mikä voi aiheuttaa säteen ulkoreunalle jäävän metallin liiallisen sulatuksen. Taas isontamalla tätä mitta voi käydä siten, että säteet eivät mene tarpeeksi päällekkäin, mikä jälleen kerran johtaa epätäydelliseen sulamiseen. Brown mainitsee julkaisussaan tutkimuksen, jossa oli tutkittu eri parametrien vaikutusta kappaleen huokoisuuksiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa oli havaittu, että varjostusetäisyydellä on suurin vaikutus kappaleen vetolujuuteen, skannausnopeuden jäädessä toiseksi ja lasertehon kolmanneksi. (Brown ym. 2018.)

Skannausstrategiallakin on vaikutusta lopputulokseen. Skannausstrategialla tarkoitetaan sitä, minkälaisessa järjestyksessä laser laitetaan sulattamaan kappaletta. Skannausstrategialla pystytään vaikuttamaan kappaleeseen syntyviin jäännösjännityksiin, mutta yksiselitteisesti parasta strategiaa ei ole olemassa. Esimerkiksi Yang ym. (2017) sanoo kirjassaan, että skannausstrategia, jossa skannausalue jaetaan useampaan "ala-alueeseen" olisi paras vaihtoehto jäännösjännitysten minimointiin. Toisaalta Robinson ym. (2018) tulee tutkimuksessaan lopputulokseen, jossa pienin jäännösjännitys saataisiin muuttamalla skannaussuuntaa XY-suunnassa kerroksittain. Näihin erilaisiin lopputuloksiin on voinut vaikuttaa erilaiset muut prosessiparametrit, erilainen materiaali, jota on tulostettu, sekä tietenkin kappaleen geometria. Eli yksiselitteisesti parasta strategiaa ei voida

näillä näkymin vielä antaa. 3D-tulostuksessa lopputulos on hyvin herkkä pienillekin prosessiparametrien muutoksille.

## 5 HYÖDYT

### 5.1 Geometrian vapaus

Suurimpia hyötyjä 3D-tulostuksessa verrattuna perinteisiin menetelmiin on se, että 3D-tulostuksessa voidaan suoraan valmistaa kappale CAD-tiedostosta. Tämä tuo omia vapauksiaan suunniteluun ja mahdollistaa hyvinkin vaikeiden geometrioiden valmistamisen. Täydellistä geometristä vapautta ei tälläkään tekniikalla saada, mutta se mahdollistaa sellaistenkin muotojen valmistuksen, joita ei perinteisin menetelmin olla kyetty valmistamaan. Näitä monimutkaisia muotoja, joihin AM-tekniikka kykenee, esitellään alla olevissa kuvissa 4 ja 5. Kappaleen tulostusasento vaikuttaa omalta osaltaan tähän vapauteen. Tiettyyn suuntaan valmistettaessa voidaan joitain piirteitä valmistaa ilman tukea. Mikäli kappaleen rakenteesta tehdään ontto, tai kappaleen sisään jää vastaavia alueita, on tässä tapauksessa huomioitava, miten sisään jäänyt metallijauhe voidaan poistaa. Tätä varten on yleensä tehtävä kappaleeseen poistoaukot metallijauhetta varten.

Kokoonpanojen valmistaminen tuo suurta etua 3D-tulostukselle. 3D-tulostamalla voidaan valmistaa aiemmin useasta osasta koostunut kokoonpano yhtenä osana. Tällä tavalla voidaan säästää asennusajassa, mutta tämänkaltainen suunnittelu voi jopa parantaa kappaleen toimintakykyä. (Dutta ym. 2019.) Hyvänä esimerkkinä voidaan nostaa GE:n ja Safranin valmistama LEAP-moottori. Kyseisessä moottorissa on esimerkiksi polttoainesuuttimessa hyödynnetty 3D-tulostusta. Tällä tavalla on säästetty 25 % suuttimen massassa, mutta kaiken lisäksi nämä suuttimet ovat jopa 5 kertaa kestävämpiä kuin perinteisin menetelmin valmistetut verrokkit. (CFM 2020.)



Kuva 4. Tulostettu kappale. (Metal-AM 2020).



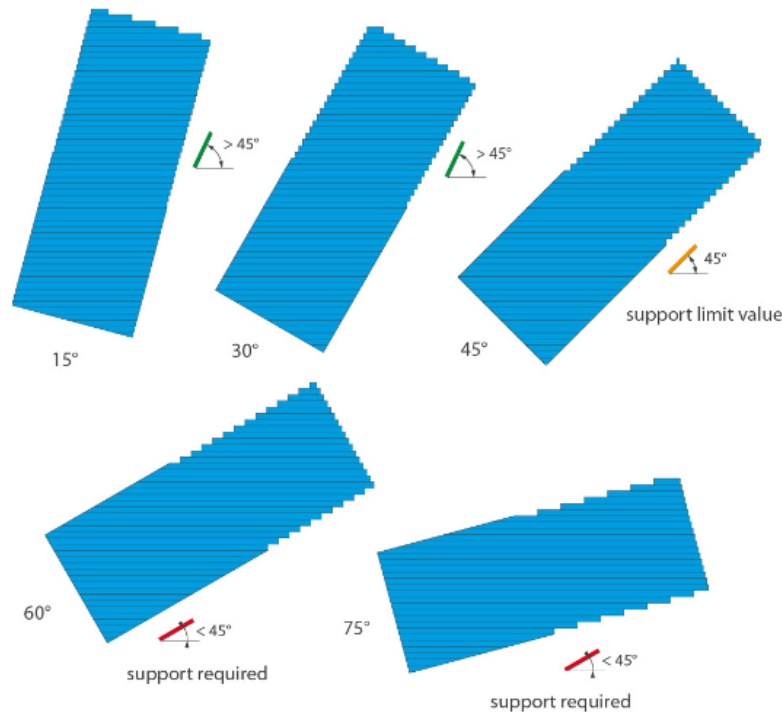
Kuva 5. AM-tekniikalla valmistettu ristikkorakenne. (Renishaw 2020).

Näistä kuvista näkee helposti sen, miten monimutkaisiksi rakenteet saattavat mennä, kun ne valmistetaan hyödyntäen AM-tekniikan tarjoamia etuja. Täyden hyödyn saadakseen täytyy kappaleet suunnitella varta vasten AM-tekniikkaa varten, minkä yhteydessä on usein kannattavaa käyttää myös optimointityökaluja.

AM-tekniikka on mahdollistanut optimointimenetelmien suosion kasvun, kuten topologian optimoinnin ja muodon optimoinnin. Nämä optimointimenetelmät ovat tärkeässä osassa 3D-tulostuksessa. Näiden avulla voidaan tehdä esimerkiksi kappaleita, joiden massa on optimoitu. Tämä taas laskee merkittävästi valmistuskustannuksia, sillä metallijauhe on nykyään vielä todella kallista. Optimointimenetelmät etsivät kappaleesta ne kohdat, joissa vähiten materiaalia tarvitaan, ja näin ollen sitä voidaan annetuin ehdoin poistaa, jolloin jäljelle jää vain tarpeellinen. Näin ollen kappaleista tulee todella kevytrakenteisia, mutta silti kestäviä. (Dutta ym. 2019.) Optimoinnista kerrotaan tarkemmin lisää kappaleessa 7.13.

Kuten aiemmin todettu, on tukirakenteet omalta osaltaan sekä haaste että hyöty AM-tekniikassa. Vaikka puhutaankin geometrisestä vapaudesta AM-tekniikan osalla, on hyvä muistaa, ettei tukirakenteita haluta välttämättä valmistaa turhaan. Tukirakenteiden määrää voidaan jo suunnitteluvaiheessa minimoida huomioiden, mihin suuntaan kappale tulostetaan. Tällä on muun muassa vaikutusta siihen, miten suuria ympyrämuotoja voidaan tulostaa ilman tukea. Toinen asia, joka

on mahdollista huomioida jo suunnitteluvaiheessa, on ulokkeet. Hyvänä nyrkkisääntönä näiden osalla voidaan mainita, että tukirakenteita tarvitaan, mikäli tulostuskulma on alle  $45^\circ$ . (Kokkonen ym. 2016.) Kuvassa 6 on havainnollistettu, mitä tällä tarkoitetaan.



Kuva 6. Tulostuskulman vaikutus. (Kokkonen ym. 2016).

Poikkileikkaukseltaan ympyrät ovat tiettyyn halkaisijaan asti itseään kantavia rakenteita. Ylitettäessä tämän halkaisijan syntyy taas tarve tukirakenteille. Aina ei kuitenkaan ole järkevää valmistaa riittävän suurella halkaisijalla varustettua ympyrämuotoa tukirakenteiden takia. Ongelmaksi saattaa muodostua tukirakenteiden poisto. Jos halutaan tehdä kappaleen sisälle ympyrän mallinen kanava, ei tästä kyetä jälkeenpäin enää tukirakenteita poistamaan. Tämä sisäinen kanava on silti valmistettavissa AM-tekniikalla, mikäli poikkileikkaus valitaan sellaiseksi, joka on itseään kantava. Näitä muotoja ovat muun muassa pisaramuoto ja timantti-/salmiakkimuoto. (Kokkonen ym. 2016.) Näille tulostettaville piirteille on omia nyrkkisääntöjään. Nämä kertovat yleisellä tasolla esim. minkä kokoisen ympyrän voi tulostaa horisontaalisesti ilman tukea. Tämänkaltaiset nyrkkisäännöt ovat erittäin hyvä lisä suunnittelijalle, joka suunnittelee kappaleita 3D-tulostettavaksi. Näiden avulla voidaan nopeuttaa suunnitteluprosessia, sekä välttää uudelleen suunnittelu.

## 5.2 Pienerävalmistus

Hyötyä voidaan saada myös siitä, että aika kappaleen suunnittelusta valmistukseen on huomattavasti pienempi. Perinteisin menetelmin ei ole ollut kovin kannattavaa tehdä piensarjatuotantoa, mutta 3D-tulostuksella tämäkin voidaan saada jopa kannattavaksi. Tuotantomäärien noustessa ajavat perinteisemmät menetelmät kustannuksissa yleensä ohi AM-tekniikasta. (Dutta ym. 2019.)

## 5.3 Materiaalihukka

3D-tulostuksella päästään pienempään materiaalihävikkiin kuin mitä se on perinteisillä valmistusmenetelmillä. Esimerkiksi lentokoneiden moottorin tai rakenteen osien "buy-to-fly" -suhde voi olla perinteisillä menetelmillä 10:1 – 20:1. 3D-tulostus mahdollistaa hyvin lähelle 1:1 pääsyn. (Duda & Raghavan 2018.) Buy-to-fly -suhteella tässä tarkoitetaan sitä, minkä verran ostettua materiaalia saadaan lopulta hyötykäyttöön. Ford ym. (2016) kertoo tutkimuksessaan, että AM-tekniikalla käyttämättä jäänyt metallijauhe saadaan kierrätettyä käyttöön 95 – 98 %, eli hukkaa syntyy todella vähän verrattuna perinteisempiin menetelmiin. Täytyy kuitenkin muistaa, ettei tähän ole otettu huomioon tukirakenteita.

## 5.4 Digitaalivarasto

3D-tulostus mahdollistaa niin sanotun digitaalivaraston. Tällä tavalla tarvittavat osat ovat tiedostoina tallennettuna tietokoneelle, eikä suuria tilaa vieviä fyysisiä varastoja tarvita. Osia voidaan valmistaa vain silloin, kun niitä tarvitaan. Kaiken lisäksi valmistus voidaan tehdä suoraan paikan päällä, jolloin ei synny viivettä kuljetuksista ja muista vastaavista, jolloin osa saadaan nopeammin käyttöön. Lisäksi tarvittaessa osia voidaan nopeasti muokata ilman, että siitä koituu lisäkustannuksia, saati valmistuksen viivästymistä. (Attaran 2017.)

## 6 SUUNNITTELU 3D-TULOSTUSTA VARTEN

Tässä kappaleessa käydään läpi, miten kannattaa huomioida aiemmissa kappaleissa mainittuja hyötyjä ja haasteita, kun mietitään kappaleen tulostettavuutta.

3D-tulostus ei pelkkänä valmistusmenetelmänä tuo lainkaan lisäarvoa kappaleelle, joten näin ollen on syytä miettiä, millä tavalla lisäarvoa kappaleelle saadaan, mikäli se valmistetaan 3D-tulostamalla. Etenkin ilmailuteollisuus haluaa kappaleista lujia, mutta samaan aikaan niiden on oltava mahdollisimman kevyitä. Tässä aukeaa 3D-tulostukselle mahdollisuus, sillä käyttämällä optimointityökaluja voidaan kappaleen massassa säästää huomattaviakin määriä ilman, että kappaleen lujuus siitä kärsii.

Suunnittelijan pitää ymmärtää 3D-tulostustekniikka, jota tullaan käyttämään, jotta vältetään suurimmilta virheiltä. Tähän sisältyy tulostimen toimintaperiaate ja tästä aiheutuvat haasteet sekä mahdollisuudet. Tekniikan ymmärtäminen auttaa suunnittelijaa hahmottamaan sitä, minkälaisia piirteitä tulostimella kyetään valmistamaan.

Koska tulostettavalta kappaleelta halutaan jotain, mitä ei voida saada perinteisillä menetelmillä, on seuraavia asioita hyvä miettiä (Ahtiluoto 2019):

- **Monimutkaiset piirteet/muodot.** 3D-tulostus mahdollistaa sellaisten piirteiden ja muotojen valmistamisen, joiden valmistus perinteisillä menetelmillä on haastavaa tai jopa mahdotonta. Ristikkorakenteet tai sisäiset kanavat ovat hyvä esimerkki tästä.
- **Hinta.** Verrattaessa 3D-tulostusta ja perinteisempiä menetelmiä nousee hinta monesti esiin. 3D-tulostuksessa suunnittelija voi vaikuttaa huomattavasti valmistuskustannuksiin. Koska monimutkaisuus ei sinällään tuo lisää hintaa 3D-tulostettavalle kappaleelle, on tässä keino säästää kustannuksissa. Lisäksi piensarjatuotanto on monesti edullisempaa 3D-

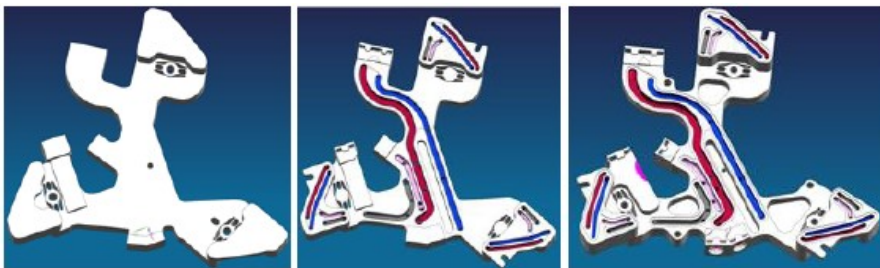


tulostuksella. Topologian optimoinnilla saadaan säästöä myös hinnassa.

- **Valmistusaika.** Valmistusaika voi nousta 3D-tulostuksen eduksi, etenkin piensarjatuotannossa. Siinä missä perinteisillä menetelmillä voi mennä kuukausia, selvittää 3D-tulostuksessa muutamalla päivällä. Tuotantomäärien noustessa saattaa 3D-tulostus olla hitaampi ja kalliimpi valmistusmenetelmä. Kriittisille osille voi olla tärkeää nopea läpimenoaika, jolloin on syytä harkita 3D-tulostusta valmistusmenetelmänä.
- **Suorituskyky.** 3D-tulostus mahdollistaa osan optimoinnin käyttötarkoitusta varten, jolloin kappaleen suorituskykyä voidaan parantaa.

Näitä yllälistattuja asioita on syytä ottaa huomioon, kun mietitään, valmistetaanko kappale 3D-tulostamalla. Mikäli jostain näistä saadaan merkittävää etua, kannattaa harkita 3D-tulostuksen käyttöä.

Suunnittelustrategioita on syytä miettiä, mikäli halutaan saada kaikki hyöty irti 3D-tulostuksesta. Tässä esitetään kaksi strategiaa, joilla on suunniteltu sama putkisto, mutta erilaisilla lopputuloksilla. Nämä strategiat on nimetty Top Down- sekä Bottom Up -strategioiksi. (Thompson ym. 2016.)



Kuva 7. Top Down -strategia. (Thompson ym. 2016).



Kuva 8. Bottom Up -strategia. (Thompson ym. 2016).

Kuvassa 7 näkyy perinteisiä valmistusmenetelmiä varten suunniteltu putkisto. Tästä on sen jälkeen poistettu materiaalia toiminnallisia pintoja varten, minkä jälkeen on vielä vähennetty massaa. (Thompson ym. 2016).

Kuvassa 8 on samaa putkistoa lähdetty suunnittelemaan 3D-tulostusta varten. Alkuun on laitettu toiminnalliset piirteet, eli tarvittavat liittimet, omille paikoilleen. Sitten on lisätty putkiston maksimikoko, yhtenä suunnittelurajoituksena. Lopuksi on lisätty pinnat ja tarvittavat kevennykset. Lopputulos on 50 % kevyempi kuin kuvan 7 tapauksessa. (Thompson ym. 2016.)

Kumpaakin näistä strategioista voidaan käyttää, kun suunnitellaan kappaleita 3D-tulostettavaksi. Top Down -strategia toimii 3D-tulostuksessa, kun käytetään topologian optimointia, varsinkin kun on jo olemassa oleva 3D-malli. Kyseiselle mallille pitää vain määrittää suunnitteluavaruus, jonka jälkeen optimointi ohjelma laskee paikat, minne materiaalia tarvitaan. Bottom Up -strategia voi mahdollisesti olla toimivampi strategia, kun suunnitellaan täysin uusi kappale suoraan 3D-tulostettavaksi, eikä välttämättä käytetä topologian optimointia.

Suunnitteluvaiheessa on tärkeää tietää, onko kappaletta tarkoitus valmistaa suurempia määriä. Tämä rajaa osaltaan mahdollista suunnittelustrategiaa, sillä tässä tapauksessa suunnittelussa on otettava huomioon perinteiset valmistusmenetelmät. Mikäli osan tuotanto pysyy pienenä, jolloin on kannattavaa valmistaa vain 3D-tulostamalla, voidaan valita suunnittelustrategia, jota ohjaa kappaleen toiminnallisuus. Tämä strategia mahdollistaa täyden hyödyn 3D-tulostamisesta, mutta samaa kappaletta ei taas voida enää valmistaa perinteisin menetelmin, mikäli tarve vaatisi. (Klahn ym. 2015.)

## 7 SUUNNITTELUOHJEET

Tämän työn tarkoituksena oli laatia käyttökelpoiset suunnitteluohjeet Patrian Engineering-yksikön käyttöön. Ohjeiden tarkoitus on toimia suunnittelun työkaluina suunnitellessa kappaleita 3D-tulostettavaksi. Ohjeiden haaste on siinä, ettei niitä kyetä laatimaan täysin paikkaansa pitäviksi jokaisessa tilanteessa. Tämän takia tarkoituksena onkin laatia ennemminkin niin sanotut nyrkkisäännöt suunnitteluun, jotka pätevät lähes jokaisessa tilanteessa ja joita pyritään seuraamaan mahdollisimman hyvin. Tämänkaltaiset ohjeet käsittävät muun muassa suurimmat tulostettavat reiät ilman tukimateriaalia, sekä ulokkeen kulman vaikutuksen tukimateriaalin määrään. Nämäkin edellä mainitut piirteet ovat riippuvaisia monista eri asioista, jolloin joudutaan hieman yksinkertaistamaan asioita. Lopullisen osan konstruktio ja siinä käytetyt piirteet määräytyvät osan vaatimusten ja rajoitteiden sekä suunnittelijan oman harkinnan mukaan. Suunnittelukyvyt paranevat, kun tarkemmat rajoitteet selviävät tekniikan, kuten käytössä olevien laitteiden ja materiaalien, käyttöönoton myötä. Tämän jälkeen myös ohjeita voidaan tarkentaa yksityiskohtaisemmiksi. Työn tuloksena syntyneet ohjeet jäävät vain Patrian käyttöön, joten lopputuloksia ei sen osalta tässä esitetä. Tässä osiossa kerrotaan, miten näitä suunnitteluohjeita lähdettiin kokoamaan.

Tulostustekniikka vaikuttaa luonnollisesti hyvin suuresti kappaleen tulostettavuuteen. Näin ollen ei ole järkevää käyttää samoja suunnitteluohjeita ristiin eri tekniikoille. Tätä työtä varten on valittu tekniikaksi PBF, joten kaikki suunnitteluohjeetkin ovat sitä varten tehtyjä. Esimerkiksi tarkkuudessa on jo eroja tekniikoiden välillä. DED-tekniikka on PBF-tekniikkaa nopeampi, mutta tarkkuus on taas heikompi, minkä takia PBF-tekniikalle laaditut piirteiden minimitarkkuudet eivät päde DED-tekniikalle.

Tulostuksessa käytettävällä materiaalillakin on vaikutusta tulostusohjeisiin. Esimerkiksi alumiini kyetään tulostamaan hyvin pienillä tukirakenteilla 45° kulmaan. Jos sama kappale tulostettaisiin Inconel-materiaalista, vaatisi se huomattavasti jäykemmät tukirakenteet. (Kokkonen ym. 2016.) Tämän vuoksi yleisiin suunnitteluohjeisiin, jotka eivät ole materiaaliikohtaisia, joudutaan hieman yksinkertaista-

maan, minkä takia syntyneissä ohjeissa voi esiintyä hieman varman päälle otettuja mittoja jonkin materiaalin kohdalla. Mikäli haluttaisiin tehdä materiaalikohtaiset ohjeet, olisi mahdollisesti järkevintä tehdä itse koetulostukset. Tämä osaltaan sen takia, koska ohjeet ovat riippuvaisia myös käytettävästä tulostimesta. Näin ollen itse koetulostamalla saataisiin sekä materiaalikohtaiset, että tulostinkohtaiset ohjeet.

Tätä työtä varten ei tehty koetulostuksia, joten suunnitteluohjeet jouduttiin laatimaan yleispäteviksi. Suunnitteluohjeita varten piti perehtyä laajasti aihetta koskevaan kirjallisuuteen ja tutkimuksiin. Näin saatiin selville, missä tällä hetkellä tekniikan kohdalla ollaan menossa. Koska tekniikka kehittyy koko ajan, ei välttämättä 10 vuotta sitten annetut ohjeistukset ole enää tänä päivänä täysin paikansa pitäviä. Kirjallisuuteen perehtyessä saatiin hyvin selville, mitkä ovat ne ongelmallisimmat tai tärkeimmät geometriset piirteet, jotka toistuvat lähteestä toiseen. Tällä tavalla huomattiin, mitkä ovat niitä asioita, joita tarvitsee ottaa ohjeissa huomioon, sekä mitkä voi jättää pienemmälle huomiolle. Esimerkiksi jo aiemmin mainittu reiän maksimihalkaisija ilman tukimateriaalia on hyvin tärkeä tieto suunnittelijalle. Näistä kirjallisuudesta löytyneistä ohjeista oli havaittavissa selkeitä eroja keskenään mittojen suhteen. Tämä on täysin ymmärrettävää, sillä kuten aiemmin on todettu, geometrisiin piirteisiin vaikuttaa todella moni asia. Pelkästään eri tulostinvalmistajan tulostinta käyttäessä on ohjeistuksissa havaittavissa eroja. Tämän seurauksena eri ohjeistuksia täytyi verrata keskenään, jotta kyettiin muodostamaan ohjeistus, joka palvelisi useammassa kuin yhdessä käyttötarkoituksessa.

Lopputuloksena valmistui ohjeistus, jota suunnittelijat voivat käyttää apunaan suunnitellessaan kappaleita 3D-tulostettavaksi. Koska 3D-tulostus on vielä varsin uusi asia Patriallakin, on ohjeistukseen syytä sisällyttää myös työvaiheistus 3D-tulostusta varten suunniteltaessa. Työvaiheistus on ohjeiden tapaan myös tapauskohtainen, joten valmistettava vaiheistus on oltava myös yleispätevä. Vaiheistus on apuna etenkin niille suunnittelijoille, joilla ei ole paljoa kokemusta suunnittelusta 3D-tulostusta varten. Tällä vaiheistuksella voidaan varmistaa, että suunnittelija ymmärtäisi ajatella suunnittelua eri tavalla kuin perinteisille valmistusmenetelmille suunniteltaessa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi, mitä tämä vaiheistus pitää sisällään.

## 7.1 Suunnitteluvaiheet

Ennen varsinaista suunnittelutyötä on osasta selvitettävä tietoja, jotka vaikuttavat kappaleen tulostettavuuteen. Näitä tietoja ovat muun muassa kappaleen päämitat. Kappaleen päämittojen selvittäminen on tärkeää, koska se määrittää sen, voidaanko kappaletta suunnitella valmistettavan yhdestä osasta, vai pitääkö kappale jakaa. Toinen kiinnostava asia on kappaleen kriittisyys. 3D-tulostuksen ollessa vielä kohtuullisen uusi valmistusmenetelmä, ei ole välttämättä mielekästä heti aloittaa kriittisten osien valmistamista. Tämä sen takia, kuten aiemmin todettu, että 3D-tulostuksen laadunvalvonta on vielä haastavaa, ja muun muassa lujuus- ja väsymisominaisuuksissa on edelleen suuria eroavaisuuksia.

### 7.1.1 Kappaleelta vaadittavat ominaisuudet

Kappaletta optimoitaessa saattavat jotkin kappaleen ominaisuudet kärsiä. Esimerkiksi jos kappaleelta halutaan mahdollisimman suurta jäykkyyttä, ei ole järkevää optimoida sitä minimoimalla massa. Tällöin ohjelma ei ota kappaleen jäykkyyttä lainkaan huomioon optimointiprosessin aikana. Tällöisessä tapauksessa on syytä optimoida suoraan jäykkyyden perusteella.

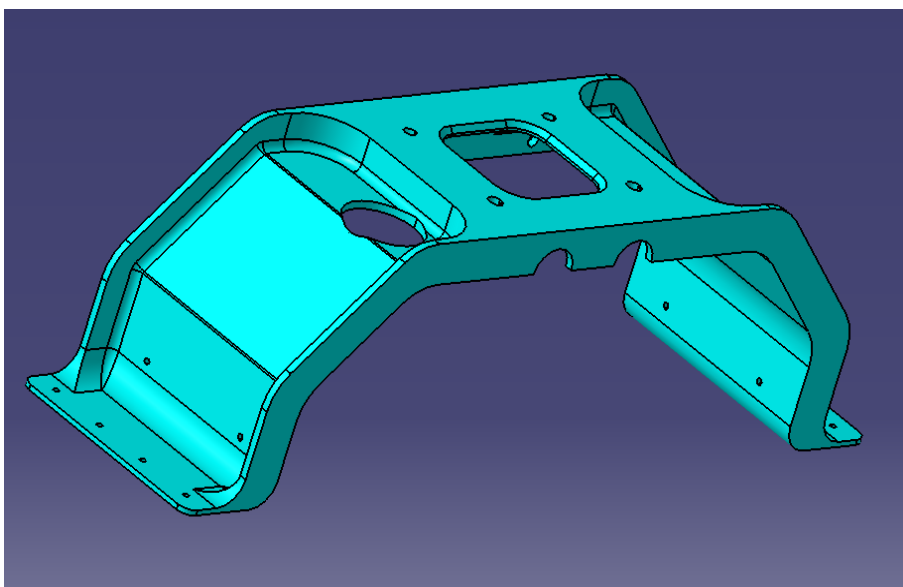
Tätä suunnitteluvaiheiden läpikäyntiä varten valittiin kappale, joka on alun perin jo suunniteltu valmistettavaksi perinteisin menetelmin. Kyseisen kappaleen tehtävänä on toimia näytönpidikkeenä AW119-helikopterissa. Näin ollen jo kappaleen ympäristö luo kappaleelle vaatimuksia, jotka sen on täytettävä. Helikopterissa on useita eri lähteitä, jotka tuottavat värähtelyä tietyllä taajuusalueella. Kappaleen ominaisvärähtelytaajuuden ei haluta osuvan näille taajuusalueille, sillä kappale alkaisi muuten resonoimaan. Näitä taajuuksia varten oli kyseiselle helikopterille tehty aiemmin mittauslento, jossa nämä herätetaajuusalueet oli selvitetty. Näin ollen pystyttiin jo varhaisessa vaiheessa näkemään, mitkä taajuusalueet on ehdottomasti vältettävä.

Jotta kappaleen valmistaminen 3D-tulostamalla olisi järkevää, on suunnitelulla kyettävä saavuttamaan jotain sellaista, mihin alkuperäinen ei kykene. Yksinker-

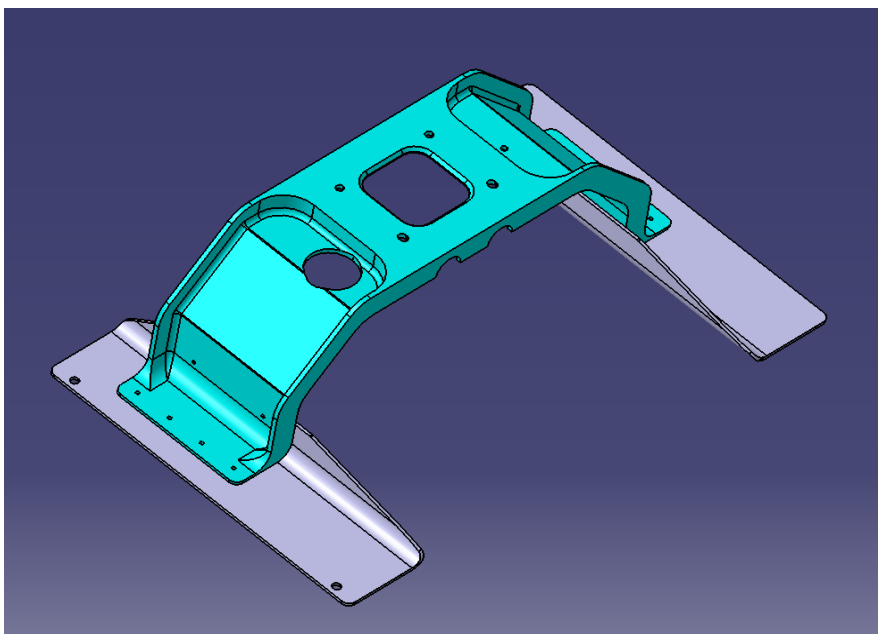
taisin tämmöinen ominaisuus on massa. Työssä käytetyllä kappaleella oli mahdollista hyödyntää kokoonpanon yhdistämistä, sillä näytönpidike koostui alun perin kolmesta eri osasta. Tarkemmin tämä on selitetty seuraavassa kappaleessa. Alkuperäisen kokoonpanon massa oli 612 g, joten jotta saataisiin jotain konkreettista hyötyä uudelleen suunnittelusta, asetettiin tavoitteeksi saada uudesta kappaleesta kevyempi, mutta ilman, että kappaleen jäykkyys tästä kärsii.

### 7.1.2 CAD-mallin muokkaus

Työtä varten valittu näytönpidike esitetään kuvassa 9. Kuten aiemmin todettu, oli kyseisen kappaleen osalta mahdollista yhdistää kokoonpano. Kuvassa 10 näkyy, miten tämä kokoonpano ja koko näytönpidike muodostui. Turkoosi kappale on alun perin koneistettu ja materiaalina käytetty alumiinia. Harmaat osat ovat myös alumiinista valmistettuja, ja ne on kiinnitetty pidikkeen runkoon niittaamalla.



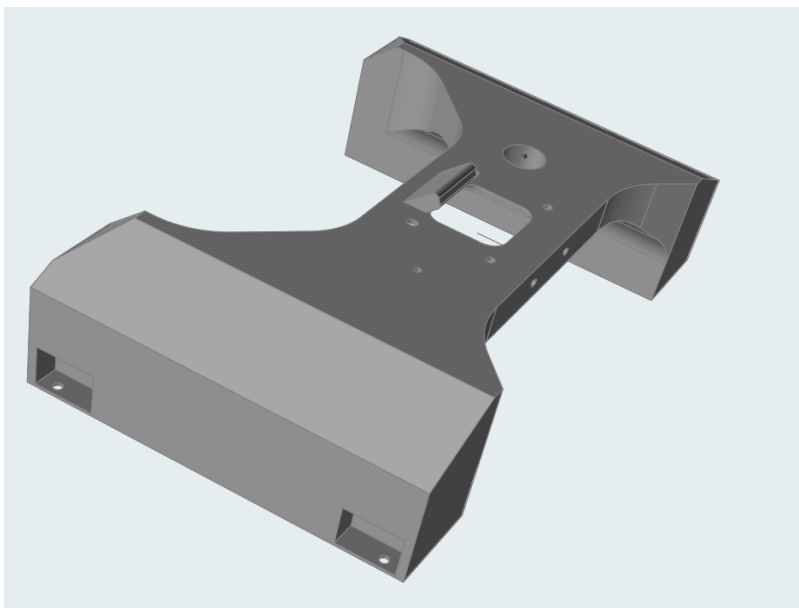
Kuva 9. Alkuperäinen näytönpidike.



Kuva 10. Alkuperäinen kokoonpano.

Saadakseen paras tulos optimoinnista on kappaleen tilavuutta suurennettava mahdollisimman suureksi. Tämän vuoksi on kappaleesta poistettava sellaisia piirteitä, joita ei ole pakko säilyttää. Tällaisia piirteitä ovat esimerkiksi kevennykset ja pyöritykset. Reiät, joiden alkuperäinen tarkoitus on ollut mahdollistaa esimerkiksi johtonipun läpivienti, voidaan poistaa. Optimoinnin tuloksena syntyy yleensä hyvin orgaaninen rakenne, jolloin kappaleessa on valmiina aukkoja ja reikiä tämän kaltaisia läpivientejä varten. CAD-mallin muokkausvaihetta ei tarvita, mikäli kappaletta ei ole jo valmiiksi suunniteltu. Tällä tavoin kappale voidaan suunnitella CAD:ssä suoraan soveltuvaksi optimointia varten. Tässä tapauksessa suunnittelijan on tiedettävä kappaleen toiminnalliset piirteet sekä karkea ulkomuoto.

Työssä käytetty kappale muokkauksen jälkeen näkyy kuvassa 11. Tästä voi hahmottaa, kuinka mallin luominen optimointia varten toimii. Tarkoituksena on luoda ääriarvot kappaleelle, sekä hyvin yksinkertaiset muodot. Alan puhekielessä tästä käytetään usein termiä tilamalli, suunnitteluavaruus tai design space. Tämän jälkeen ei tarvitse kappaleelle luoda muuta kuin piirteet, jotka kappaleelta vaaditaan.



Kuva 11. Muokattu geometria.

### 7.1.3 Kuormitusten asettaminen ja FEM-analyysi

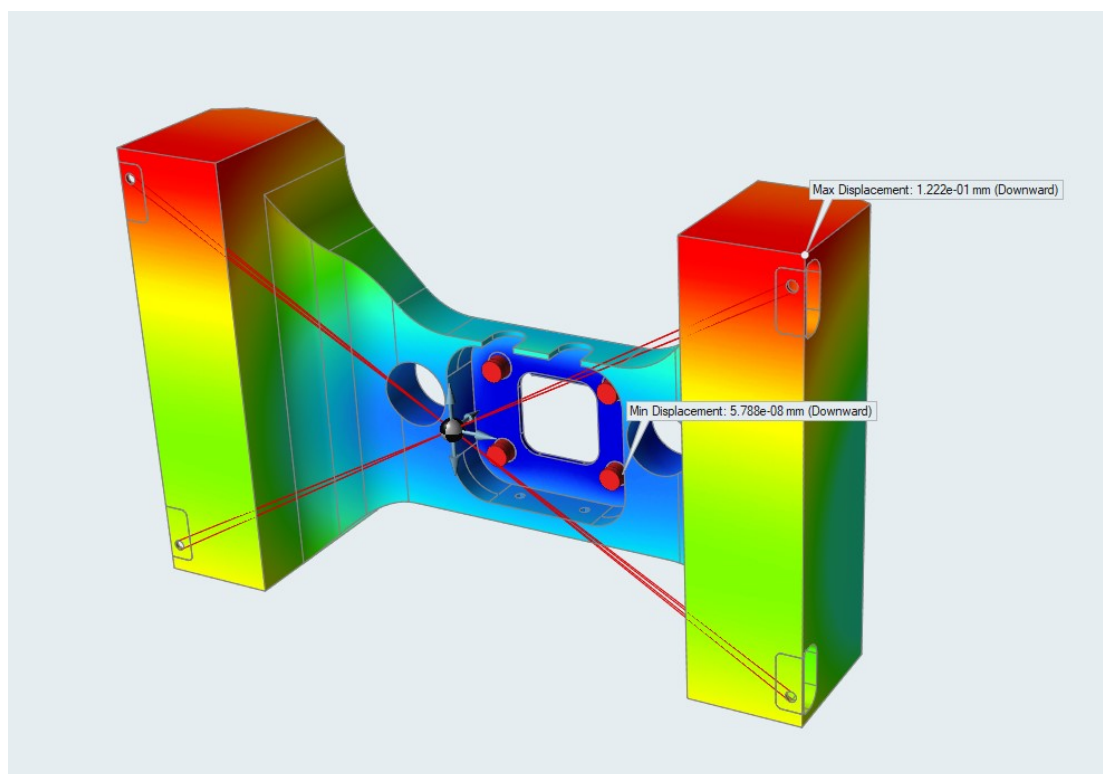
Kappaleen ollessa geometrian osalta valmis topologian optimointia varten, täytyy kappaleeseen lisätä ulkoiset voimat, jotka siihen vaikuttavat. Tämän lisäksi on asetettava tukipisteet, joista kappale on tuettu. Ennen optimoinnin suorittamista on hyvä tehdä FEM-analyysi, jotta voidaan varmistua, että kuormitukset on asetettu oikein ja tulokset ovat täysin johdonmukaisia. Esimerkiksi jos 100 mm pitkässä kappaleessa taipumat ovat lähempänä 1000 mm, voidaan olettaa joko kuormitusten tai materiaaliominaisuuksien olevan väärin asetettu (Sourav 2019).

Työssä tarkasteltavaan kappaleeseen kohdistuu kuormia kuormitusmonikerroista. Puhekielessä kuormitusmonikerroista puhutaan yleensä g-voimina. Tällä tarkoitetaan sitä, miten monikertainen kiihtyvyys kappaleeseen vaikuttaa verrattuna putoamiskiihtyvyyteen. Koska pidike kannattelee suhteellisen painavaa näyttöä, syntyy näistä kuormitusmonikerroista kappaleeseen vaikuttavat voimat.

Kuvassa 12 näkyy optimointia varten muokatun geometrian FEM-analyysi taipumien osalta. Kuvasta näkyy, että suurimmat siirtymät kappaleeseen aiheuttaa alaspäin suuntautuva kuormitusmonikerro. Tämän tuloksen pohjalta voitiin todeta, että kuormitukset on oikein asetettu, sillä tämän analyysin mukaan suurin siirtymä kappaleessa on 0,12 mm. Kappaleen materiaaliksi valittiin titaani, sillä



se on 3D-tulostuksen kannalta todella mielenkiintoinen materiaali hyvien ominaisuuksiensa vuoksi.



Kuva 12. FEM-analyysitulokset.

#### 7.1.4 Topologian-optimointi

Topologian optimoinnin konsepti on esitelty jo vuonna 1901, mutta suurempaa suosiota se ei ole saavuttanut kuin vasta 80-luvun puolivälissä (Yang ym. 2017). Topologian optimointi on suunnittelun työkalu, joka kertoo, miten materiaalia kapaleeseen kannattaa asettaa, jotta saavutetaan paras rakenteellinen toimintakyky. Idea kehitettiin alun perin mekaanisiin suunnitteluongelmiin, mutta on sen jälkeen levinnyt useammalle eri fysiikanalalle, sisältäen muun muassa nesteet, sähkömagnetismin ja näiden yhdistelmät. Alkuperäisen topologian optimointitekniikan kehittämisen jälkeen on tullut useita erilaisia tekniikoita optimointia varten. Näitä ovat muun muassa tiheysmetodi, eli Solid isotropic material with penalization (SIMP), Level set method (LSM), Topological derivative, phase-field topological optimization (PFTO), Evolutionary structural optimization (ESO),

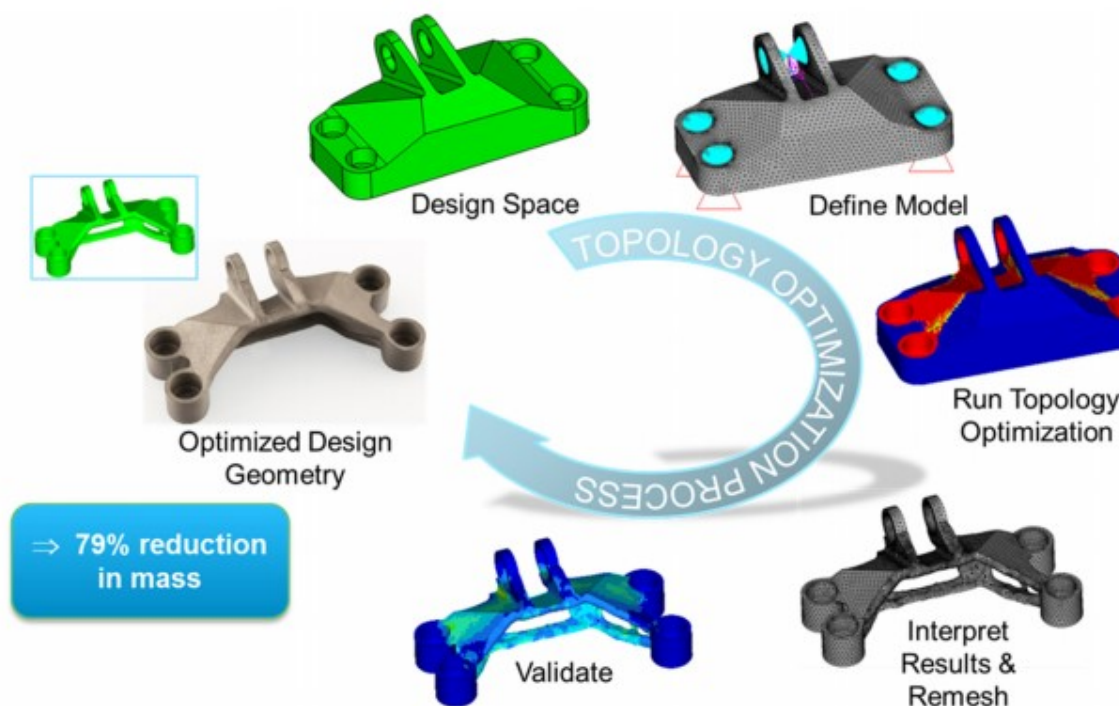
sekä lukuisia muita. (Sigmund & Maute 2013.) Tässä työssä käytetään optimointiin ohjelmaa, joka tekee sen SIMP-metodia hyödyntäen, minkä takia tässä keskitytään vain tähän metodiin.

SIMP-metodissa jokaiselle elementille lasketaan tiheys, ja tätä tiheyttä käsitellään yhtenä suunnittelumuuttujana. Elementin tiheys saa arvon 0 ja 1 väliltä, jossa 1 tarkoittaa 100 % tiheyttä, kun taas elementin tiheyden ollessa 0 % ei tässä elementissä ole lainkaan materiaalia. Näiden välillä olevat arvot esittävät kuvitteellista materiaalia, ja koska materiaalin jäykkyys on suoraan verrannollinen sen tiheyteen, on tämän tekniikan materiaalin laatiminen hyvinkin johdonmukaista yleiseen käsitykseen materiaalien käyttäytymisestä. Yleensä optimaalinen lopputulos vaatii laajan alueen rakenteessa olevia tiheyden arvoja, jotka ovat jotain 0 ja 1 väliltä. (Altair 2018, 48.)

Tämän vuoksi tarvitaan tekniikkaa, joka poistaa nämä tiheyden arvot. Käytettyä tekniikkaa, joka kertoo tiheyden ja materiaaliominaisuuden yhteyden, kutsutaan nimellä power-law, joka voidaan esittää seuraavassa kaavassa

$$\underline{K}(r) = \rho^p K, \quad (2)$$

jossa  $\underline{K}$  ja  $K$  esittävät elementin vähennettyä ja oikeaa jäykkymatriisia.  $\rho$  on tiheys ja  $p$  on vähennyskerroin, joka on aina suurempi kuin 1. (Altair 2018, 49.)



Kuva 13. Optimointiprosessi. (Kokkonen ym. 2016).

Optimointiprosessi on esitetty kuvassa 13. Kuvasta näkyy, että kyseisestä kappaleesta on valittuna kuusi reikää muodoiksi, joita ei saa optimointiprosessin aikana poistaa. Nämä ovat siis rajattuna pois suunnitteluavaruudesta. Kun kappaleeseen on asetettu kaikki muuttujat, voidaan ohjelman antaa suorittaa itse optimointi. Kuvassa näkyy, että optimoinnin tuloksena on syntynyt monimutkaisempi geometria kuin mitä se alun perin oli. Pelkästään optimoinnin ajo ei riitä, sillä halutaan varmistaa, että kyseinen kappale täyttää varmasti sille asetetut tavoitteet. Tämä todennetaan tekemällä kappaleesta uusi FEM-malli.

Topologian optimointi voidaan suorittaa erilaisin tavoittein, kuten maksimijäykkyys tai minimimassa. Näiden lisäksi kullekin optimointitavoitteelle on omat rajoitteenensa, joiden avulla voidaan pyrkiä säätämään tulevaa optimointitulosta halutunlaiseksi. Esimerkiksi minimimassa-tavoitteella tarvitaan vielä määrittää varmuuskerroin, jonka mukaan ohjelma laskee tarvittavan materiaalmäärän. Työssä käytetty Inspire-ohjelma käyttää tätä niin, että jakaa käytetyn materiaalin myötölujuuden tällä varmuuskertoimella. Tämä saatu tulos on se, jonka alle ohjelma pyrkii saamaan jännitykset kappaleessa. (Altair 2019.)

Kappaleen optimointia varten kokeiltiin eri tulostussuuntia, jotta nähtiin, mihin suuntaan kappaletta on suositeltavaa tulostaa. Lisäksi kappale optimoitiin käyttäen erilaisia valmistusrajoitteita sekä erilaisia symmetriarajoitteita. Optimoinneissa vaihdeltiin paksuusrajoitteita, joiden mukaan ohjelma kappaletta optimoi. Näillä paksuusrajoitteilla pystyy vaikuttamaan hieman tulevaan lopputulokseen. Useiden eri optimointiajojen jälkeen pystyttiin näitä optimointituloksia vertailemaan keskenään, ja valitsemaan näistä parhaat seuraavia vaiheita varten.

### **7.1.5 Uudelleen suunnittelu optimoidun kappaleen pohjalta**

Optimoinnin tuloksena syntynyt geometria ei ole sopivassa muodossa, jotta se voitaisiin siirtää CAD-ohjelmaan tai suorittaa sille valmistuksen simulointi. Tämän vuoksi pitää optimoidun muodon pohjalta luoda kappaleelle uusi pinta. Työssä käytetty Inspire-ohjelma kykenee muodostamaan automaattisesti NURBS-pinnan kappaleelle, joka on täysin valmis siirrettäväksi esim. CADiin. Tämä automaattisesti luotu NURBS-pinta ei ole täysin viimeistelty, joten jos halutaan saada hyvä ja laadukas tulos, on suositeltavampaa luoda kappaleelle tämä NURBS-pinta käsin.

Pintaa luodessa kappaleelle on hyvä huomioida, että ohjelman antama optimointitulokse on enemmänkin ohjeistava kuin ainut oikea vaihtoehto. Tämä antaa suunnittelijalle vielä vapauksia ja mahdollisuuksia. Esimerkiksi suunnittelija pystyy vielä tässä vaiheessa välttämään alle 45° kulmia, jolloin saavutetaan itseään kantavia rakenteita ja pystytään vähentämään tukimateriaalin määrää.

Työtä varten luotiin useammista optimointituloksista täysin tulostettavissa oleva malli. Tämän avulla pystyttiin kunnolla vertailemaan erilaisia lopputuloksia keskenään, sillä kappaleen geometria muuttuu huomattavan paljon, kun sille luodaan NURBS-pinta. Tämän vuoksi myös kappaleen massa vaihtelee jonkin verran eri tuloksien kesken. NURBS-pinnan lopputulos on täysin riippuvainen sen tekijästä, jolloin samoillakin optimointiarvoilla voidaan saada täysin erilaiset lopulliset geometriat.

Tässä vaiheessa on kappaleelle vielä suositeltavaa tehdä FEM-analyysi, jotta voidaan varmistua, että luotu geometria täyttää kappaleelle asetetut vaatimukset. Mikäli kappale ei tässä vaiheessa täytä sille asetettuja rajoitteita, on tähän asiaan vielä helppo puuttua muokkaamalla geometriaa. Työssä tarkastellulle näytönpidikkeelle tehtiin tässä kohtaa vielä muutamia muokkauksia. Tällä tavoin yritettiin saada ominaisvärähtelytaajuutta nousemaan halutulle tasolle.

Ennen simulointiin siirtymistä on kappaleelle mahdollista tehdä NURBS-pinnan optimointi. Tällä tavalla voidaan esimerkiksi mahdollisia korkean jännityksen alaisia alueita muokata, jotta saataisiin jännitykset laskemaan halutulle tasolle. Tämä optimointi toimii siten, että NURBS-pinnan haluttuihin kohtiin annetaan suunta, johon sen halutaan muuttuvan. Tämän jälkeen määritetään varmuuskerroin, jonka mukaan ohjelma pyrkii kappaletta muokkaamaan ja suoritetaan optimointi. Huomioitavaa on, että luonnollisesti kappaleen massa vielä muuttuu tässä kohdassa.

### **7.1.6 Valmistuksen simulointi**

Valmistuksen simuloinnin tarkoituksena on tarkastella, kuinka kappale käyttäytyy tulostuksen aikana sekä nähdä, onko kappale valmistettavissa. Tarvittaessa kappaletta voidaan vielä tämän vaiheen jälkeenkin muokata, mikäli havaitaan, ettei tulostus onnistu.

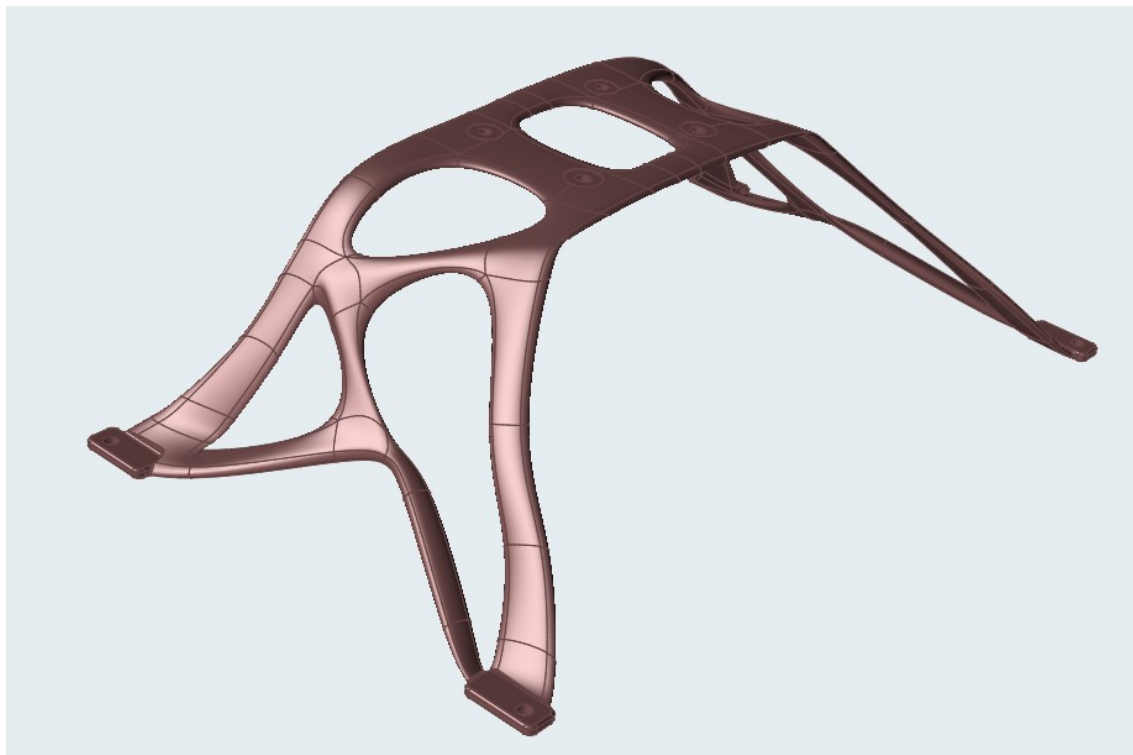
Koska 3D-tulostuksessa kappale altistetaan nopeille lämmönmuutoksille, on tämän vuoksi tärkeää tarkastella, minkä suuruisia jännityksiä kappaleeseen syntyy, sekä myös minkälaisia taipumia kappaleeseen aiheutuu. Simuloinnissa on mahdollista muuttaa muutamia tulostusparametrejä ja tarkastella niiden vaikutusta muun muassa yllä mainittuihin asioihin. Näitä säädettäviä parametrejä ovat skannausstrategia, skannausnopeus, laserteho, kerrospaksuus, jäähdytysaika, alustan lämpötila sekä jauheeseen imeytynyt energia. Jännitysten ja siirtymien lisäksi saadaan simuloinnin tuloksena plastinen venymä sekä lämpötilat. Näitä kaikkia seuraamalla kyetään kohtalaisella tarkkuudella näkemään, onnistuuko kappaleen tulostaminen, vai nousevatko esimerkiksi jännitykset liian suuriksi. Prosessiparametreillä voidaan myös vaikuttaa energiatiheyyden kaavan (1) mukaan.

Simuloinnin tuloksen perusteella voidaan tulostinoperaattorille kertoa, mitkä kohdat mahdollisesti ovat kappaleessa herkempiä esimerkiksi taipumille. Näin operaattori voi ottaa sen huomioon, jotta saadaan varmasti paras mahdollinen lopputulos.

Simulointia varten kappale pitää asettaa haluttuun asentoon tulostusalustalle, ennen kuin voidaan generoida tukimateriaalit. Käytetty ohjelma generoi kappaleeseen valmiiksi tukirakenteet, mutta nämä tukirakenteet eivät ole sellaisenaan tulostuskelpoisia, joten niitä on muokattava. Lisäksi on suositeltavaa miettiä, mitkä tukimateriaalit ovat välttämättömiä ja mitkä eivät. Käytetty ohjelma antaa tukimateriaaleille kolme erilaista mallia: näitä ovat pyöreä, neliö, sekä ontto. Näistä tukimateriaaleista pyöreät ja neliönmalliset ovat tankotukia, ja ontonmallinen on hyvin lähellä ristikkotukea. Näitä erilaisia tukimateriaalimalleja kannattaa suosia eri käyttötarkoituksiin, sillä esimerkiksi Materialise suosittelee jäykkien tankotukien käyttöä kappaleen reunoilla ja keskellä. Nämä kantavat syntyneet taivutusjännitykset. Muualle voidaan käyttää ristikkotukea, joka on helpommin poistettavissa. (Kokkonen ym. 2016.) Mikäli kappaleen valmistaja on tiedossa jo simulointivaiheessa, on kannattavaa kommunikoida heidän kanssaan tulostusprosessista ja hyödyntää mahdollinen palaute liittyen osan asemointiin ja tukirakenteisiin. Tällä tavalla voidaan mahdollisesti parantaa simuloinnin laatua.

## 8 TULOKSET

Suunnitteluvaiheiden jälkeen saatu kappale esitetään kuvassa 14. Kappaleen optimointia ei olisi ollut järkevää suorittaa minimoimalla massa, joten tässä tapauksessa se suoritettiin maksimoimalla jäykkyys. Uudelleensuunnitteluvaiheessa pyrittiin saamaan jalkojen kulmat noin  $45^\circ$ . Näin toimimalla pystyttiin säästämään huomattavasti tukimateriaalimäärässä.



Kuva 14. Optimoitu kappale.

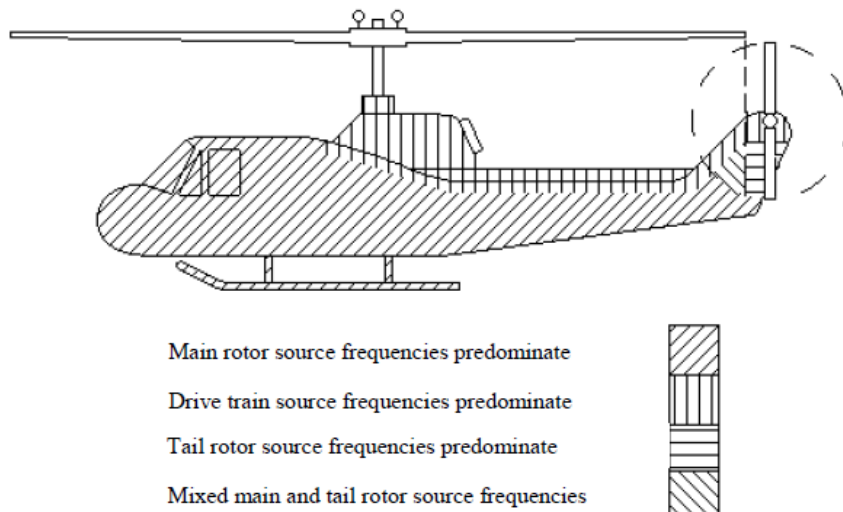
FEM-analyysissä tarkasteltiin myös kappaleen taajuusominaisuuksia. Analyysissä selvitettiin kolmen alimman moodin taajuudet, ja ne on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Optimoidun kappaleen ominaisvärähtelytaajuudet

Moodi 1	211,84 Hz
Moodi 2	455,74 Hz
Moodi 3	743,49 Hz

Kyseiset taajuudet ovat todella korkeita, minkä vuoksi nämä on syytä vielä tarkastaa myöhemmin täysin lujuuslaskentaa varten tehdyllä ohjelmalla, jotta voidaan nähdä, kuinka suuri ero niissä ja käytetyn ohjelman antamissa värähtelytaajuuksissa on.

Aiemmin kerrottiin, että kyseiselle AW119-helikopterille oli tehty mittauslento herätetaajuuksien selvitystä varten. Tämän mittauslennon tuloksien perusteella pystyttiin katsomaan, onko kappaleen ominaisvärähtelytaajuus sopiva. Tärkeimmät väistettävät herätetaajuudet aiheuttaa pääroottori. Mitkään edellä esitetyistä moodeista eivät osu pääroottorin aiheuttamiin herätetaajuusalueisiin, eikä minäkään muunkaan värähtelylähteen taajuusalueeseen. Toisaalta mikäli ominaisvärähtelytaajuus olisi osunut jonkun muun herätetaajuuden kanssa kuin pääroottorin, ei tämä olisi ollut kovin vakavaa, sillä MIL-810F standardissa näytetään alueet (kuva 15), missä mikäkin värähtelylähde vaikuttaa. Työssä tarkasteltu kappale on matkustamon puolella, joten kuvasta 15 voidaan nähdä, että siellä dominoiva värähtelylähde on pääroottori. Tämän vuoksi olisi voitu hyväksyä myös, mikäli ominaisvärähtelytaajuus olisi osunut esimerkiksi pyrstöroottorin herätetaajuuden kanssa.

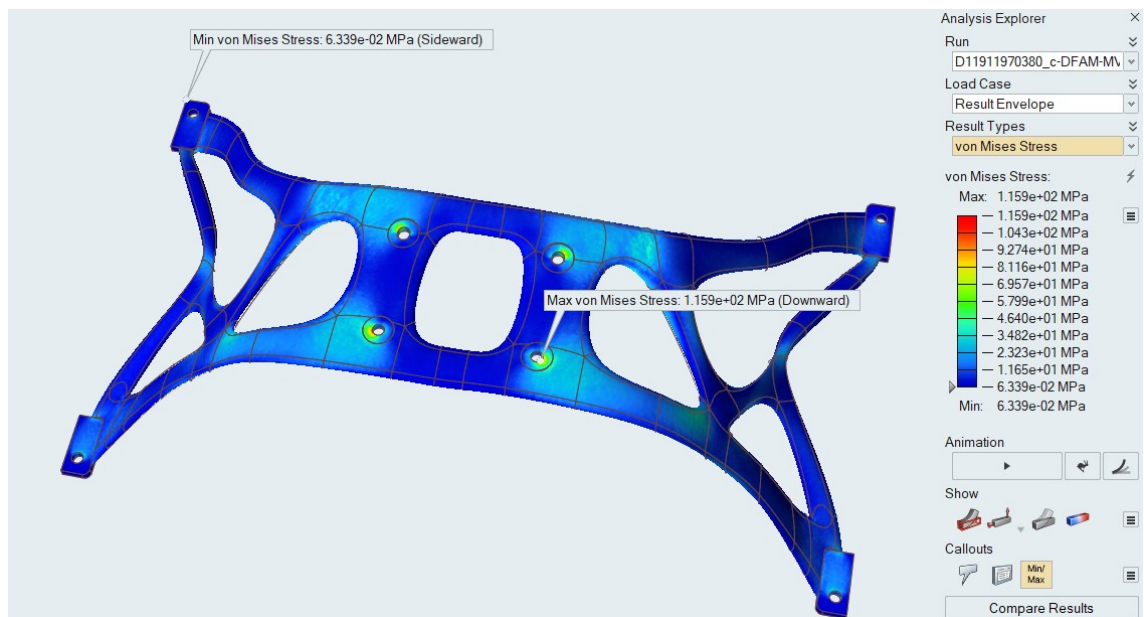


Kuva 15. Helikopterin värähtelyalueet. (MIL-810F 2000).

Samassa FEM-analyysissä saatiin myös selville kappaleen kokemat taipumat ja jännitykset kuormitustilanteissa. Suurimman taipuman kappaleeseen aiheuttaa



kuormitusmonikerta, joka osoittaa sivulle. Tämän aiheuttama taipuma kappaleeseen on 1,02 mm. Taipumienkin osalta kappale voidaan hyväksyä, sillä käytetyissä kuormitusilanteissa voitaisiin sallia useammankin millimetrin taipumat, joten analyysissä saatu taipuma jää huomattavasti tämän alapuolelle. Suurimmat jännitykset aiheutuvat alaspäin suuntautuvasta kuormitusmonikerrasta, kuten kuvasta 16 voidaan havaita. Jännitykset pysyvät pieninä suurimmassa osassa kappaleita, maksimijännityksen ollessa 115 MPa, asettuen pienelle alueelle kiinnitysreikien kohdalle. Kyseiset jännitykset ovat kuitenkin hyvin pienellä alueella, joten kappale voidaan näidenkin osalta hyväksyä.

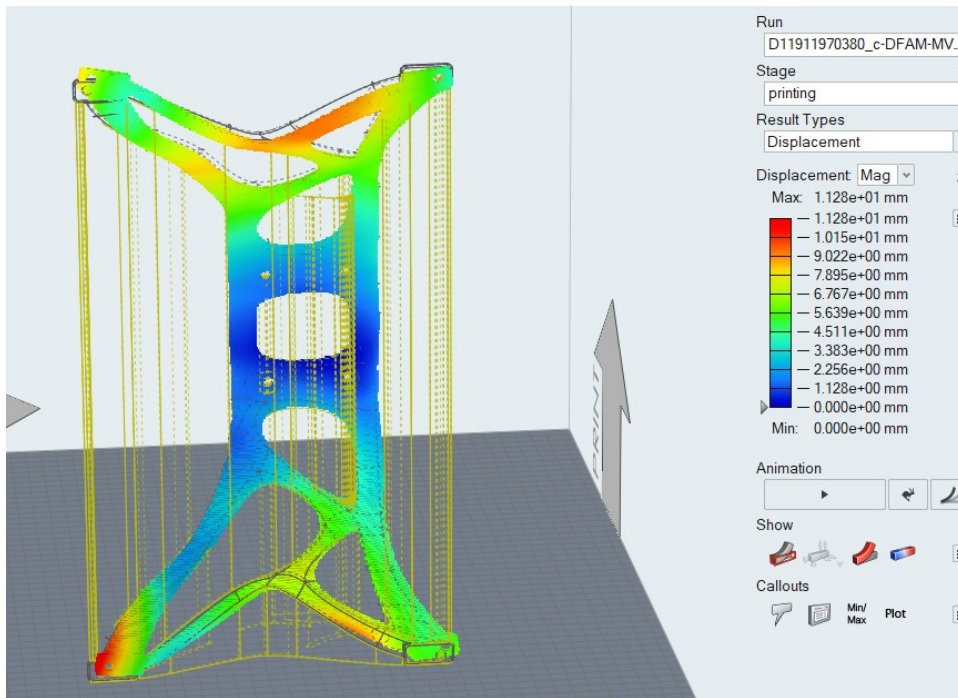


Kuva 16. Von Mises -jännitykset.

Alkuperäisen kokoonpanon massa oli 612 g. Optimointivaiheiden jälkeen saadun kappaleen massa oli 443 g. Näin ollen massaa saatiin pienennettyä noin 27 %, joka on jo merkittävä massan säästö, etenkin ilmailuteollisuudessa. Tässä voidaan ottaa esimerkiksi Airbus A320-lentokone, johon oli laskettu vuotuinen polttoainesäästö, mikäli matkustajien istuimien runkoa muokataan 3D-tulostettavaksi. Laskelmissa päädyttiin 214 kg massasäästöön, joka tekisi vuosittain 9600 kg polttoainesäästöt (Froes 2019). Tästä voidaan laskea, että 1 kg massa säästö merkitsisi 44 kg polttoainesäästöä vuosittain. Tällä esimerkillä voidaan osoittaa, kuinka merkittävistä säästöistä ilmailuteollisuuden parissa voidaan puhua, kun suunnitellaan kappaleita uudelleen 3D-tulostettavaksi.

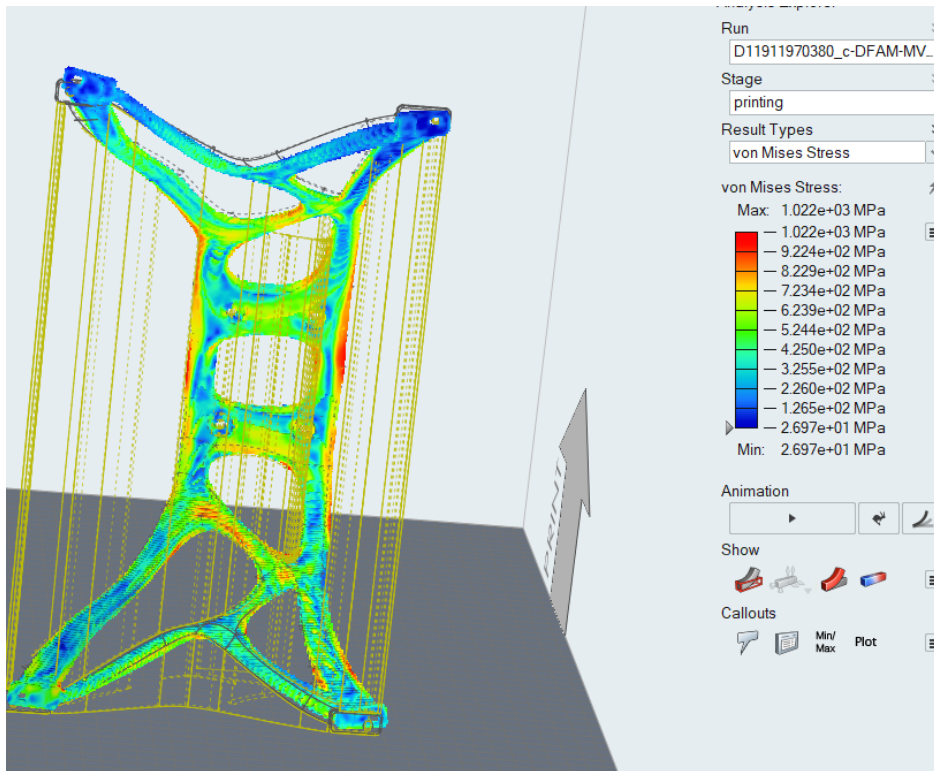
Kappaleelle suoritettiin lopuksi valmistuksen simulointi. Simuloinnissa pyrittiin saamaan kappaleelle mahdollisimman hyvä energiatiheys säätämällä prosessiparametrejä. Energiatiheys pyrittiin pitämään simuloinneissa 50 – 80 J/mm<sup>2</sup> välissä, sillä European Powder Metallurgy Association (2019) esittää, että titaanille saadaan paras suhteellinen tiheys energiatiheden ollessa 50 – 80 J/mm<sup>2</sup>. Näin toimimalla simuloinnista saadaan mahdollisimman paljon reaalitilannetta lähellä oleva tulos, sillä oikeassa tulostustilanteessa pyrittäisiin saamaan suhteellinen tiheys mahdollisimman korkeaksi. Simuloinnissa jouduttiin käyttämään hieman lopullisesta poikkeavaa kappaletta, sillä käytetty ohjelma ei jostain syystä kyennyt tuottamaan aiemmin esitetylle kappaleelle minkäänlaista tulosta. Simuloinnissa käytetty kappale eroaa hieman tästä lopullisesta kappaleesta, mutta pääpiirteittäin ne ovat hyvin samanlaisia, jolloin voidaan saada edes suuntaa antava lopputulos sekä nähdä, kuinka simulointi toimii.

Simuloinnin perusteella voidaan huomata kohdat, jotka vaativat erityisempää huomiota, kun kappaletta aiotaan todellisuudessa valmistaa. Muutamissa kohtaa kappaletta jännitykset ovat liian korkeita ja parissa kohdassa syntyy kappaleeseen liian suuria taipumia. Kuvassa 17 näkyy simuloinnin tulos taipumien suhteen. Kuvasta selviää, että suurin taipuma on 11,2 mm. Kyseisen kokoinen taipuma on ehdottomasti otettava huomioon, kun kappaletta aiotaan oikeasti valmistaa. Kuvasta nähdään, että suurin taipuma on aivan kappaleen vasemmassa alalaidassa. Tiedetään, että sulatuksesta ja jäähtymisestä aiheutuvat jännitykset pyrkivät taivuttamaan kappaletta sen reunoilta. Näin ollen tässä simuloinnissa syntyneet taipumat pystyttäisiin erittäin todennäköisesti välttämään, asettamalla riittävän jäykät tankotuet kappaleen reunoille. Käytetty ohjelma ei ole paras mahdollinen analysoimaan eri tukimateriaalityyppien toimintaa, joten sen kokeilemisesta jouduttiin luopumaan.



Kuva 17. Taipumat.

Maksimijännitykset näkyvät kuvassa 18. Suurin jännitys on 1022 MPa, mutta kuten kuvasta huomaa, vaikuttaa tämä jännitys hyvin pienellä alueella. Tämä jännitys on jo liian suuri, joten tällaisenaan kappaletta ei tämän mukaan olisi syytä tulostaa. Hyvä on kuitenkin muistaa, että 3D-tulostuksen simuloiminen on hyvin hankala prosessi, minkä vuoksi tämän kaltaisen tuloksen takia ei kappaletta kannata vielä hylätä. Tämä on syytä ottaa huomioon siten, että joko muutetaan tulostusasentoa tai ilmoitetaan asia tulostinoperaattorille, joka osaa tehdä vaadittavat toimenpiteet käytetylle tulostimelle, jotta tulostusprosessi saadaan varmasti onnistumaan. Syytä näin korkeaan jännitykseen voi olla todella monta, mutta yleisempiä ovat aiemmin mainittu tulostusasento sekä tulostusparametrit. On erittäin todennäköistä, että simuloinnissa käytetylle tulostimelle ei valittu juuri sitä parametrijärjestelmää, jolla olisi saatu paras tulos. Nämä asiat ovat yleensä vain tulostinvalmistajien ja -operaattoreiden tiedossa, minkä vuoksi tässä ei voitu käyttää muuta mittaria kuin energiatiheyttä.



Kuva 18. Jännitykset.

Näiden ylläesitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että kappale on saanut lisäarvoa suunnittelusta 3D-tulostamista varten. Kappaleen jäykkyys on saatu pidettyä hyvänä samalla, kun massa on pienentynyt. Lisäksi yhteen kappaleeseen pystyttiin sisällyttämään yhteensä kolme osaa. Vaikka simuloinnista ei saatu välttämättä parasta tulosta, voidaan kyseisellä tuloksella osoittaa tulostuksen kannalta kriittiset paikat ja näin ollen välttää tulostuksen epäonnistuminen. Huomionarviosta on se, että työn päällimmäinen tarkoitus ei ollut kappaleen uudelleen suunnittelu, joten kyseisessä kappaleessa on vielä hieman hienosäätöä vaativia piirteitä, jotta siitä saataisiin optimaalinen lentotoimintaa varten.

Valmiin kappaleen avulla saatiin halutut suunnitteluvaiheet selville, mitä tarvitaan, kun suunnitellaan kappaleita 3D-tulostettavaksi. Tällä kappaleella pystyttiin osoittamaan, että esitetyillä vaiheilla kyetään suunnittelemaan täysin tulostettavissa olevia kappaleita. Vaiheistus tehtiin prosessikaavion muotoon, jossa kyllä/ei-porteilla pystytään ohjaamaan suunnittelijaa toimimaan kussakin vaiheessa oikealla tavalla. Tällä tavalla pyritään saamaan suunnittelusta mahdollisimman jouheaa,

etenkin kun joillain suunnittelijoilla voi mennä pitkiäkin aikoja ilman, että he käyttävät 3D-tulostusta varten luotuja ohjelmistoja. Tuloksena saatu prosessikaavio on yleispätevä, eikä se ole Patrian virallinen ja ylläpitämä.

## 9 POHDINTA

Työn tavoitteena oli laatia ohjeistus 3D-tulostettaville metallikappaleille. Tämän lisäksi tavoitteena oli suunnitella uudestaan kappale, joka oli alun perin suunniteltu perinteisiä valmistusmenetelmiä varten. Tämän avulla voitiin selvittää, mitä työvaiheita tarvitaan, mikäli halutaan suunnitella kappaleita valmistettavaksi jauhepetitulosusta käyttäen. Työ rajattiin koskemaan pelkästään jauhepetitulosusta, sillä kyseinen tekniikka on tällä hetkellä suosituin valmistettaessa tarkkoja, toiminnallisia metallikappaleita.

Tuloksena saatiin yleispätevä ohjeistus sekä työvaiheistus, jonka avulla pystytään ohjaamaan suunnittelijoita toimimaan oikein suunniteltaessa kappaleita 3D-tulostettaviksi. Vaiheistuksen sivutuotteena saatiin täysin tulostuskelpoinen näytönpidike AW119-helikopteriin. Tällä näytönpidikkeellä voitiin osoittaa käytettyjen vaiheiden paikkansapitävyys.

Työn tulokset ovat täysin linjassa kirjallisuudesta ja tutkimuksista löytyvien tuloksien kanssa. Ohjeistus on laadittu täysin kirjallisuus- ja tutkimusperehtymisen avulla, minkä vuoksi se korreloi muiden ohjeistuksien kanssa. Vaiheistus on hyvin samantapainen kuin mitä kirjallisuudessa esitetään. Toki työtä varten valmistuksessa vaiheistuksessa on myös huomattavia eroja, sillä se on tehty suoraan Patrian tarpeita varten, jolloin tätä ei voida täysin peilata muihin vastaaviin.

Huomioitavaa on, että tuloksena syntyneet ohjeistus ja vaiheistus ovat yleispäteviä, eivätkä näin ollen ole Patrian virallisia ohjeita. Työtä varten ei ollut mahdollisuutta suorittaa erilaisille geometrioille testitulostuksia, joiden avulla olisi voitu laatia tulostin- ja materiaalikohtaiset ohjeistukset. Tämä on otettava huomioon, sillä eri materiaaleille ja eri tulostimille saadaan huomattavasti toisistaan poikkeavia suunnittelun raja-arvoja.

Työtä olisi suositeltavaa jatkaa valmistamalla tuloksena syntynyt kappale. Testitulostuksia suositellaan tehtäväksi, mikäli joskus aiotaan valmistaa 3D-tulostamalla enemmänkin kappaleita. Testitulostusten teko olisi myös suositeltavaa senkin kannalta, jos halutaan sertifioida kappaleita lentotoimintaa varten. Useampien

kappaleiden valmistus ja sertifiointi vaatii, että kappaleiden ominaisuuksille saadaan erittäin hyvä toistettavuus, eikä erien välissä tulisi olla suurta vaihtelua.

## LÄHTEET

- Ahtiluoto, M. & Coatanea, E. (2019) Model for Evaluating Additive Manufacturing Feasibility in End-Use Production. *Proceedings of the Design Society*. [Online] 1 (1), 799–808.
- Airbus. 2020. 3D Printing. Luettu 14.5.2020. <https://www.airbus.com/public-affairs/brussels/our-topics/innovation/3d-printing.html>
- Altair Engineering. 2019. Inspire for Structural Analysis and Optimization.
- Altair University. (2018) Practical Aspects of Structural Optimization.
- Attaran, M. (2017) The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. [Online] 60 (5), 677–688.
- Bandyopadhyay, A. & Traxel, K. D. (2018) Invited review article: Metal-additive manufacturing—Modeling strategies for application-optimized designs. *Additive Manufacturing*. [Online] 22758–774.
- Brown. C.U. ym. (2018). The Effects of Laser Powder Bed Fusion Process Parameters on Material Hardness and Density for Nickel Alloy 625.
- CFM International. 2020. The Leap Engine. Luettu 22.4.2020. <https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/>
- de Vries. C. (2017). Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. Luettu 26.3.2020. <https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed>
- Duda, T. & Raghavan, L.V. 2018, "3D metal printing technology: the need to reinvent design practice", *AI & Society*, vol. 33, no. 2, pp. 241-252.
- Dutta, B. ym. (2019) Science, technology and applications of metals in additive manufacturing. Amsterdam, Netherlands;: Elsevier.
- Essop, A. (2020). Tu Graz engineers create metal 3D printer that uses LED instead of laser or electron beams. Luettu 22.5.2020 <https://3dprintingindustry.com/news/tu-graz-engineers-create-metal-3d-printer-that-uses-led-instead-of-lasers-or-electron-beams-171609/>
- EOS (2017) Material Data Sheet. EOS Titanium Ti64
- EOS. (2019). Technical Data EOS M400. Luettu 25.2.2020. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-400>



- European Powder Metallurgy Association. 2019. 3. painos. Introduction to additive manufacturing technology.
- Froes. F. 2019. Additive manufacturing for the Aerospace Industry.
- Herzog, D. et al. (2016) Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. [Online] 117371–392.
- Scott, C. (2018). Hirtenberger's Hirtisation Technology Brings Speed and Automation to Post-Processing. Luettu 8.4.2020. <https://3dprint.com/229919/hirtenbergers-hirtisation-technology-speeds-post-processing/>
- Kim, H. ym. (2018) A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. [Online] 24 (3), 645–669.
- Robinson, J. et al. (2018) Determination of the effect of scan strategy on residual stress in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. [Online] 2313–24.
- Klahn, C. ym. (2015) Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing.
- Kokkonen, P. ym. (2016). Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. VTT Research Report, vol. VTT-R-03160-16, VTT Technical Research Centre of Finland.
- Löber, L. ym. (2013) Comparison of different post processing technologies for SLM generated 316l steel parts. *Rapid Prototyping Journal*. [Online] 19 (3), 173–179.
- MIL-STD-810F. 2000. Environmental Engineering Considerations And Laboratory Tests.
- Patria 2020. Patria lyhyesti. Luettu 7.2.2020. <https://www.patriagroup.com/fi/tietoa-meista/patria-lyhyesti>
- Patria. 2020. Konsernirakenne ja osakkeenomistajien äänioikeudet. Luettu 7.2.2020. <https://www.patriagroup.com/fi/tietoa-meista/konsernirakenne-ja-osakkeenomistajien-aanioikeudet>
- Q.B. Nguyen, D.N. Luu, S.M.L. Nai, Z Zhu, Z. Chen, J. Wei. (2018) The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts.
- Ford, S. & Despeisse, M. (2016) Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*. [Online] 137 (C), 1573–1587.
- Sigmund, O. & Maute, K. (2013) Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. [Online] 48 (6), 1031–1055. [online].
- Sourav, D. (2019) Learn Conceptual Design with Inspire 2019.

Thomas Childerhouse & Martin Jackson (2019) Near Net Shape Manufacture of Titanium Alloy Components from Powder and Wire: A Review of State-of-the-Art Process Routes. *Metals*. [Online] 9 (6), 1–18.

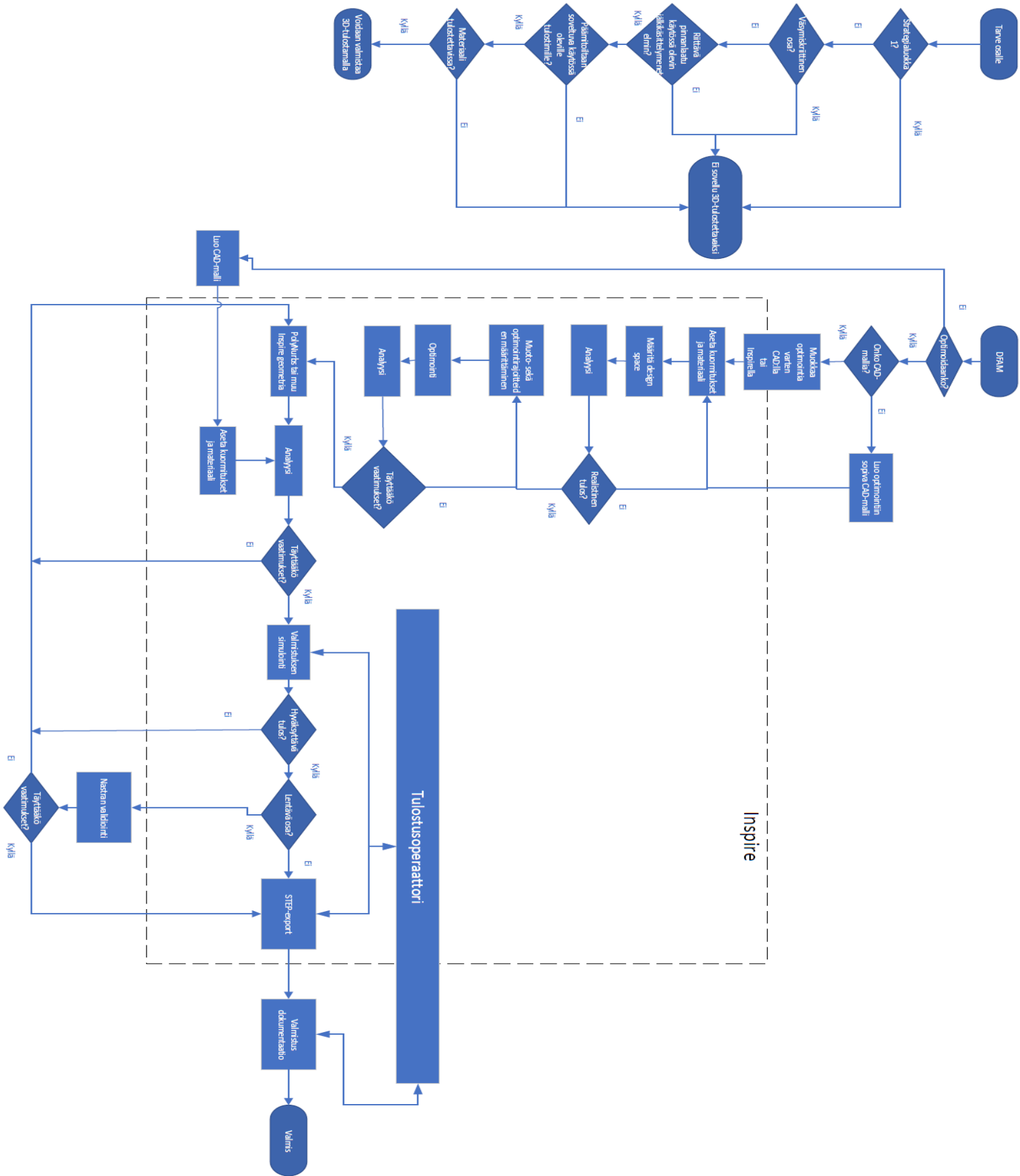
Thompson, M. K. et al. (2016) Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. [Online] 65 (2), 737–760.

Renishaw. 2020. Topologically optimised spider bracket lattice view. Luettu 25.2.2020. [https://resources.renishaw.com/details/Topologically+optimised+spider+bracket+lattice+view+3\(215112\)\(78285\)](https://resources.renishaw.com/details/Topologically+optimised+spider+bracket+lattice+view+3(215112)(78285))

Yang, L. et al. (2017) Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. 1st ed. 2017. [Online]. Cham: Springer International Publishing.

Zhang, Y. et al. (2018) Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. [Online] 27 (1), 1–13.

LIITTEET



Liite 1. Prosessikaavio AM-suunnitteluun