

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikan insinööri, Meritekniikka

2021

Katri Nuutamo

# 3D-TULOSTUS VALMISTUSMENETELMÄNÄ MERITEOLLISUUDESSA

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikan insinööri, Meritekniikka

2021 | 52 sivua, 4 liitesivua

Katri Nuutamo

# 3D-TULOSTUS VALMISTUSMENETELMÄNÄ MERITEOLLISUUDESSA

Työ toteutettiin Sance-Sandelin Consulting and Engineering Oy:n toimeksiannosta 3D-tulostamisen kehitystyön yhteydessä. Tavoitteena oli tutkia 3D-tulostuksen soveltuvuutta meriteollisuuteen sekä kerätä tietopohjaa tulostamisesta, tulostustekniikoista, mallinnuksesta sekä tulostettavista materiaaleista.

Soveltuvuutta kartoitettiin vertailemalla tulostamisen hintoja, siihen käytettäviä materiaaleja sekä muita ominaisuuksia olemassa oleviin muilla menetelmillä valmistettaviin tuotteisiin. Vertailu toteutettiin prosentuaalisesti, jossa tulostettavan tuotteen ominaisuudet esitettiin prosenttiosuuksina vertailutuotteen ominaisuuksista. Vertailtaviksi esimerkkituotteiksi valittiin kaksi arkkitehtien toimesta laivaan valikoitunutta tuotetta, joiden sijainnit, materiaaliedellytykset ja koot poikkesivat toisistaan. Toinen valituista tuotteista oli suuri ulkoalueella sijaitseva baarin etulaatoitus ja toinen aluksen sisälle saniteettitiloihin sijoitettu pesuallas. Baarin etulaatoituksen tulostaminen edellytti kokonaisen laatoituksen tulostamisen sijaan sen jakamista pienempiin osiin, joita tuli yhteensä 29. Pesuallas puolestaan voitiin suunnitella kokonaiseksi kappaleeksi, jolloin sen tulostaminen oli vertailutulosten perusteella kustannustehokkaampaa kuin sarjatuotannolla toteutettava tulostaminen.

Tulostamisen kustannukset laskettiin tulostuspalvelutarjoajalta saadun tarjouksen perusteella, jossa kokonaissumma jaettiin materiaalilavuuden mukaisesti. Sen vuoksi tulostuskustannukset nousivat oleellisesti sen mukaan, mitä suuremmasta kappaleesta oli kyse ja miten monta tulostuskertaa kokonaisen kappaleen tulostamiseen vaadittiin.

ASIASANAT:

3D-tulostus, 3D-mallinnus, ainetta lisäävä valmistus, laivanrakennus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering, Marine Engineering

2021 | number of pages 52, number of pages in appendices 4

Katri Nuutamo

## 3D PRINTING AS A MANUFACTURING METHOD IN THE MARITIME INDUSTRY

The work was commissioned by Sance-Sandelin Consulting and Engineering Oy and it was made in connection with the development project of 3D printing. The goal was to study the suitability of 3D printing for the maritime industry and to gather a knowledge base on printing, printing techniques, modeling, and printable materials.

The suitability was determined by comparing the prices of printing, the materials used and other properties with existing products made by other methods. The comparison was made on a percentage basis where the characteristics of the product to be printed were expressed as a percentage of the characteristics of the reference product. The reference products were selected based on the product choices chosen by the architect for the ship. The chosen products were in different locations, material conditions and size classes differed from each other. Front tiling of the large bar counter in the outdoor area was the first of the selected products and the other one was the sink located in the sanitary facilities inside the ship. Printing the front tile of the bar counter required dividing the entire tiling into 29 smaller sections. On the other hand, the sink could be designed and printed as a complete piece making it more cost-effective than printing in series.

The cost of printing was calculated based on the offer received from printing company and the total amount was divided according to the volume of material. As a result, printing costs increased substantially the larger the item was and how many print times were required to print the entire item.

### KEYWORDS:

3D printing, 3D modeling, additive manufacturing, shipbuilding

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 3D-TULOSTAMINEN</b>	<b>10</b>
2.1 Tulostusmenetelmät	10
2.1.1 SLS	10
2.1.2 SLA	11
2.1.3 FDM/FFF	13
2.1.4 MJF	14
2.2 Tulostettavat materiaalit	15
2.2.1 Muovit	16
2.2.2 Jauheet	20
2.2.3 Hartsit	22
2.2.4 Metallit	22
2.3 Tulostusystävällinen suunnittelu	23
2.4 3D-mallin viipalointi	26
<b>3 3D-TULOSTUKSEN HAASTEET MERITEOLLISUUDESSA</b>	<b>28</b>
3.1 Säännöt ja määräykset	28
3.2 Painovaatimukset ja aluksen vakavuus	30
<b>4 3D-TULOSTUSTUKSEN KEHITYSTYÖ</b>	<b>33</b>
4.1 Suurtulostetulostimet	33
4.2 Pinnoite ja jälkikäsittely	37
4.3 Materiaalien yhteenveto ja alustava kustannusvertailu	38
4.4 Tulostettavan tuotteen valinta ja suunnittelu	40
4.5 Kustannustehokkuusvertailu	44
<b>5 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT</b>	<b>48</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>50</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Alustava paino- ja hintavertailu
- Liite 2. Tulostuskustannusten määrittely
- Liite 3. 3D-laatan kustannuslaskelmat
- Liite 4. 3D-pesualtaan kustannuslaskelmat

## KUVAT

Kuva 1. SLS-tekniikka (PrintSpace3D 2019).	11
Kuva 2. SLA-tekniikka (PrintSpace3D 2019).	12
Kuva 3. FDM/FFF-tekniikka (PrintSpace3D 2019).	14
Kuva 4. MJF-tekniikka (Kauppila 2021).	15
Kuva 5. Powder Bed Fusion -tulostustekniikka (Varotsis 2021).	23
Kuva 6. Tukirakenteiden tarve yli 45 asteen kulmassa (Instructables 2017).	24
Kuva 7. Tulostussuunnan vaikutus tulosteen laadullisiin ominaisuuksiin (i.materialise 2021b).	25
Kuva 8. Tulostussuunnan vaikutus kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin (Hudson 2021).	25
Kuva 9. 3D-mallin viipalointi (Auerbach 2020).	26
Kuva 10. Vakaa tasapaino (Chakraborty 2021).	31
Kuva 11. Epävakaa tasapaino (Chakraborty 2021).	32
Kuva 12. Colossus Mark II (Colossus 2021a).	34
Kuva 13. Colossus Mark II Static (Colossus 2021a).	34
Kuva 14. Colossus XS series (Colossus 2021a).	35
Kuva 15. Colossus-robottikäsityöstin (eng. Robotic systems) (Colossus 2021a).	36
Kuva 16. Tulostelaatta mallinnettuna SolidWorks-ohjelmassa.	42
Kuva 17. 3D-laatan rakenne.	43
Kuva 18. Pesuallas mallinnettuna SolidWorks-ohjelmassa.	44
Kuva 19. Esimerkki laattojen asettelusta työkuvassa.	46

## KAAVIOT

Kaavio 1. Tulostusmateriaalien hinnat ja paino täydellä tilavuudella.	39
Kaavio 2. Tulostusmateriaalien hinnat ja paino 10 mm seinämäpaksuudella.	40
Kaavio 3. 3D-tulostuslaatan kustannukset ja ominaisuudet verrattuna laatan kustannuksiin.	45
Kaavio 4. 3D-pesualtaan kustannukset ja ominaisuudet verrattuna pesualtaan kustannuksiin.	47

## TAULUKOT

Taulukko 1. Yhteenveto muovimateriaalien ominaisuuksista (Simplify3d 2021e).

38

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

3D	Kolmiulotteisuus
B	Kelluvuuden keskipiste eli aluksen uppouman tilavuuden keskipiste. Lyhenne englanninkielisestä sanasta Buoyancy.
CdA	Ranskalainen telakka Chantiers l'Atlantique.
DWT	Deadweight eli aluksen tyhjäpaino. Ottaa huomioon aluksen lastin, polttoaineen, painolastin, makean veden sekä miehistön painon tonneissa.
Esivalmiste	Kokonaisuus, joka valmistetaan tehtaalla ja tuodaan sellaisenaan laivaan.
FDM	3D-tulostusmenetelmä. Lyhenne tulee menetelmän englanninkielisestä nimestä Fused Deposition Modeling.
FTP	Kansainvälinen palotestauksen sovelluskoodi. Lyhenne englanninkielisestä sanaliitosta Fire Test Procedures.
G	Painovoiman keskipiste eli massan painopiste. Lyhenne englanninkielisestä sanasta Gravity.
GM	Vaihtokeskuskorkeus. Etäisyys painovoiman keskipisteestä G alkuvaihtokeskukseen M.
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö. Lyhenne tulee järjestön englanninkielisestä nimestä International Maritime Organization.
M	Alkuvaihtokeskus. Lyhenne englanninkielisestä sanasta Metacentric.
MJF	3D-tulostusmenetelmä. Lyhenne tulee menetelmän englanninkielisestä nimestä Multi Jet Fusion.
Moduuli	Osia, joista voidaan koota suurempi kokonaisuus.
SLA	3D-tulostusmenetelmä. Lyhenne tulee menetelmän englanninkielisestä nimestä Stereo Lithography.

SLS	3D-tulostusmenetelmä. Lyhenne tulee menetelmän englanninkielisestä nimestä Selective Laser Sintering.
SOLAS	Kansainvälinen yleissopimus, jolla taataan ihmishengen turvallisuus merellä. Lyhenne tulee englanninkielisestä nimestä Safety Of Life At Seas.

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja toimii raisiolainen Sance-Sandelin Consulting and Engineering Oy. Yleisesti yrityksestä puhutaan nimellä Sance Engineering, joka on laivateollisuudessa toimiva konsultointi- ja suunnitteluyritys. Sance Engineering tarjoaa asiakkailleen laivan sisustus- ja LVI-suunnittelupalveluja risteily-, Ro-Ro- ja Ropax-aluksiin. Suunnittelun pääpaino on suurissa risteilyaluksissa, ja usein asiakkaina toimivat kokonaistoimitusyritykset, joille Sance Engineering toteuttaa suunnitteluratkaisut. Sance Engineering tuottaa suunnittelusisältöä tällä hetkellä Turun Meyerin telakalle sekä Ranskaan CdA:n telakalle. Ranskan ja Turun telakoilla toimii myös Sance Projects Oy, joka tuottaa kokonaistoimituksia ulkoalueille, yleisiin wc-tiloihin sekä ravintola-alueille. Kokonaistoimituksien suunnittelu toteutetaan Sance Engineeringin suunnittelijoiden toimesta. Sance Projects Oy ja Sance-Sandelin Consulting and Engineering Oy ovat itsenäisiä yrityksiä, joilla on sama omistaja.

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä 3D-tulostukseen, 3D-mallinnukseen, tulostettaviin materiaaleihin sekä tutkia suurien 3D-tulosteiden mahdollisuuksia meriteollisuudessa. Pää tarkoituksena on kartoittaa sopivat kohteet tulostamiselle, jolloin tulostaminen on järkevää ajallisesti ja rahallisesti. Soveltuvuuden tutkiminen tehdään 3D-tulostamisen ja aiemman valmistusmenetelmien välisellä vertailulla. Oikeanlaisen materiaalin löytäminen on keskeistä 3D-tulostuksen tuonnissa meriteollisuuteen, koska tarkoituksena on luoda säännökset ja määräykset täyttävä tapa valmistaa kevyitä sekä paloturvallisia tuotteita laivaan. Materiaalin tulee täyttää joko kaikki vaatimukset, jolloin sen käyttökohde on vapaa, tai on löydettävä monta eri materiaalivaihtoehtoa, jotka täyttävät vaatimukset käyttökohteen mukaan.

Tulostusmenetelmät ja tulosteiden koot ovat kehittyneet vuosien aikana, joten menetelmät mahdollistavat myös isompien rakenteiden ja osien tuotannon. Tulostetut esivalmiset voidaan tuoda alukseen sellaisenaan tai moduuleissa, jotta vältetään kalliilta asennustyöltä. 3D-tulostus mahdollistaa myös rikkoutuneiden tai vioittuneiden osien uudelleen valmistuksen nopeasti säästäten varastotilaa, kun tuotteet ja varaosat voidaan valmistaa räätälöidysti ilman ylimääräistä varastointia. Valmistustapana 3D-tulostus luo myös arkkitehdeille tavan suunnitella jotain, jota aiemmilla valmistusmenetelmillä ei ole pystytty tekemään.

## 2 3D-TULOSTAMINEN

3D-tulostus eli ainetta lisäävä valmistus on ollut olemassa 1980-luvulta saakka ja on tulostusprosessien kehittyessä kasvattanut suosiotaan valmistusmenetelmänä. Tällä hetkellä käytössä on useampia erilaisia tulostusmenetelmiä, joita voidaan hyödyntää erilaisten tuotetyyppien tuotannossa. (RankRed 2020.)

Luvussa perehdytään tyypillisimpiin ja yleisimmin käytössä oleviin tulostusmenetelmiin, tulostettaviin materiaaleihin sekä tulostettavien kappaleiden suunnitteluun. Tarkoituksena on kerätä tietoa ja tutustua eri vaihtoehtoihin, jotta tietoa voidaan hyödyntää kehitysprojektin eri vaiheissa ja lopullisten tuotevalintojen teossa.

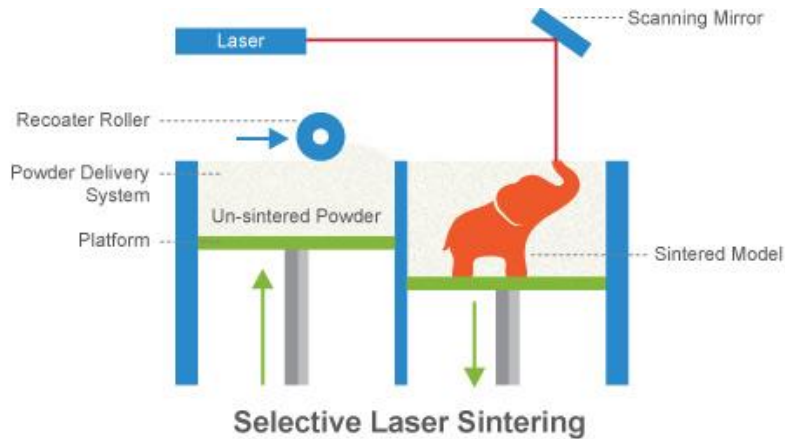
### 2.1 Tulostusmenetelmät

Tulostusvaiheessa tulostin hyödyntää viipaloitua 3D-mallia, jonka jälkeen kappaletta lähdetään rakentamaan kerros kerrokselta kappaleen poikkileikkauksien mukaisesti. Kerrokset rakennetaan tulostusmenetelmästä riippuen, joko jauheesta, sulatetusta muovista tai nesteestä. Tulostettavaa kappaletta lähdetään valmistamaan tulostusalustalle alhaalta ylöspäin, ja kerrospaksuudet määritellään tulostin sekä tuotekohtaisesti. (Robots and Androids 2018.) Tarkasteltavia tulostusmenetelmiä ovat SLS, SLA, FDM sekä MJF.

#### 2.1.1 SLS

SLS-tulostus kuuluu Powder Bed Fusion -tekniikkaan, jossa hyödynnetään laseria sekä kestumuovipolymeerijauhetta (Dassault Systemès 2018). Kuvan 1 mukaisesti SLS-tulostimet koostuvat jauheastiasta, tulostusalustasta (eng. Platform), jauherullasta (eng. Recoater roller), laserista, lämmittimestä, jauhesyöttölaitteesta (eng. Powder delivery system) sekä galvanometreistä, jotka voidaan ajatella pieninä skannauspeileinä (eng. scanning mirror). Tulostusprosessin alussa astia täytetään tietyllä määrällä jauhetta, jonka jälkeen astia asetellaan tulostimeen. Ennen tulostusta jauhe esilämmitetään lähelle sen sulamislämpötilaa. Tulostaminen aloitetaan syöttämällä tulostusalustalle jauherullalla haluttu määrä jauhetta ja kohdistamalla lasersäde galvanometriä avulla tulostuskappaleen poikkileikkauksia myötäillen jauheeseen. Kuumen laserin avulla jauhe sulatetaan, jolloin se kiinteytyy tulostusalustalle haluttuun muotoon kiinteytymättömän

jauheen sekaan. Ensimmäisen kerroksen jälkeen tulostusalusta liikkuu hissillä tavoin kerroksen verran alaspäin, jonka jälkeen jauherulla levittää alustalle uuden kerroksen. Sama prosessi toistetaan, kunnes kappale on valmis. (Gregurić 2019.)



Kuva 1. SLS-tekniikka (PrintSpace3D 2019).

SLS-tekniikan suurin etu on, ettei tulostettava kappale monimutkaisesta geometriastaan huolimatta vaadi tukirakenteita. Tuloste rakennetaan astian sisään, jossa sen ympärille jäävä kiinteyttämätön jauhe toimii tulostettavan kappaleen tukimateriaalina, jolloin siitä ei jää visuaalisia poikkeamia tulosteeseen. (Gregurić 2019.) Ylimääräinen kiinteyttämätön jauhe poistetaan valmiin tulosteen pinnalta joko harjaamalla tai paineilmalla (Dassault Systemès 2018). SLS-tekniikka soveltuu parhaiten pienosien sarjatuotantoon, koska tulostustekniikan tavoitteena on tulostaa mahdollisimman monta kappaletta yhdellä tulostuskerralla. SLS-tulostimen jauheallas pyritään täyttämään mahdollisimman laajasti tulosteilla, jotta vältytään hukkaan menevältä kiinteyttämättömältä jauheelta. Kiinteyttämättömästä jauheesta pystytään kierrättämään vain noin puolet. (Gregurić 2019.)

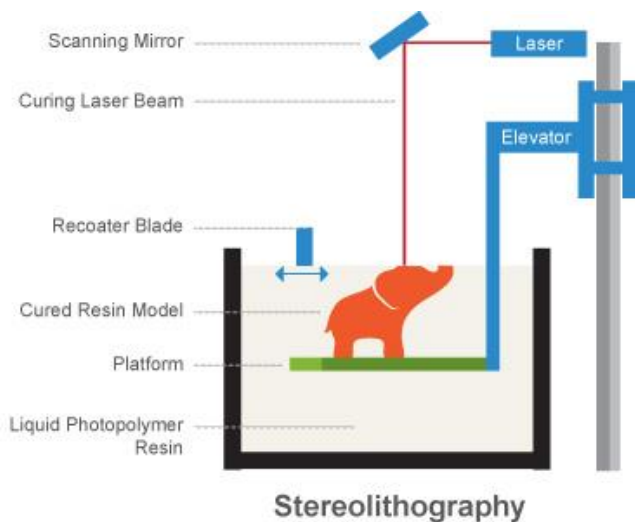
Haittana SLS-tekniikassa on pitkä jäähtymisaika tulostamisprosessin jälkeen. Lisäksi SLS-tulostimissa käytetyt suuritehoiset laserit vaativat paljon tehoa sekä huipputeknologiaa. (Gregurić 2019.)

### 2.1.2 SLA

SLA-tekniikassa käytetään allasta, joka on täytetty nestemäisellä fotopolymeerihartsilla (eng. liquid photopolymer resin) sekä ultraviolettilaseria, joiden avulla tulostettava kappale rakennetaan kerros kerrokselta tulostusalustalle (Hoskins 2013, 44).

Ultraviolettivalo saa hartsissa aikaan kovettumisprosessin, jossa monomeeriset hiiliketjut eli pienet molekyylit aktivoituvat, ja toisiinsa liittyessään muuttuvat kiinteiksi muodostaen vahvan sidoksen keskenään. Tällainen prosessi on peruuttamaton, eikä kiinteytetty hartsi palaudu enää nestemäiseen muotoonsa. (Greelane 2019; Manufactur3D 2018.)

Tulostusprosessissa tulostusalusta asettuu altaaseen nestemäisen hartsin pinnan alapuolelle, johon heijastetaan ultraviolettilaserilla skannauspeilin (eng. scanning mirror) kautta haluttu muoto kuvan 2 mukaisesti (Hoskins 2013, 44). Ultraviolettilaserin valo kiinteyttää hartsin tulostusalustan pintaan, jonka jälkeen tulostusalustaa lasketaan alaspäin yleensä 0,05...0,15 mm verran halutun kerrospaksuuden mukaisesti (Manufactur3D 2018; 3D printing.com 2012). Tulostusmenetelmässä suoritetaan samat vaiheet uudestaan jokaiselle kerrokselle, kunnes tulostettava kappale on valmis. Viimeisen kerroksen jälkeen tulostusalusta nousee altaasta, jolloin valmis tuloste voidaan irrottaa ja jälkikäsitellä. (Hoskins 2013, 44.) Puhdistus- ja käsittelyvaiheessa kappale huuhdellaan ylimääräisestä kovettumattomasta hartsista värittömällä ja kirkkaalla isopropanoliliuoksella eli pesunesteellä, joka on yleisesti käytössä maali- sekä lääketeollisuudessa. Puhdistuskäsittelyn jälkeen kappale jälkikovetetaan UV-kammiossa. (Lohilahti 2019; Työterveyslaitos 2017.)



Kuva 2. SLA-tekniikka (PrintSpace3D 2019).

SLA-tekniikalla päästään laadukkaaseen lopputulokseen ja sillä voidaan rakentaa kappaleita, jotka vaativat tarkkoja yksityiskohtia. SLA-tulosteet vaativat lähes aina tukirakenteita, jotka rakennetaan osaksi tulostettavaa kappaletta. Tukirakenteet poistetaan jälkikovettamisen jälkeen, mutta ne jättävät jäljen tulosteeseen, joka heikentää tulosteen

pinnanlaatua. SLA-tekniikalla suurtulosteiden tekeminen on hankalaa ja tulostettava kappale on aina yksivärinen. Lisäksi fotopolymeerien käyttö on kallista ja materiaali on tulenarkaa. (Lohilahti 2019.)

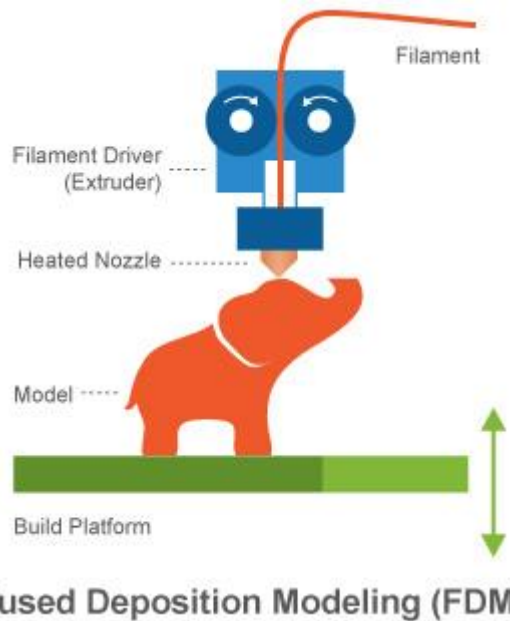
### 2.1.3 FDM/FFF

FDM on yleisin käytössä oleva 3D-tulostusmenetelmä, joka tunnetaan myös nimellä FFF eli Fused Filament Fabrication. FDM/FFF-tekniikassa käytetään termoplastista filamenttia eli sidosainetta, jota on mahdollista muovata lämmön ja paineen avulla. Filamentti kuumennetaan sulamispisteeseen ja pursotetaan kuumennetun tulostuspään (eng. Heated nozzle) avulla kerros kerrokselta tulostusalustalle kolmiulotteisen tulosteen luomiseksi. (Tractus3D 2020; Palermo 2013.)

FDM/FFF-tulostimissa voidaan käyttää useampaa kuin yhtä tulostuspäätä, jolloin tulostettavaan kappaleeseen voidaan yhtäaikaisesti tulostaa useampaa materiaalia. Useamman materiaalin käyttöä voidaan hyödyntää esimerkiksi siten, että mahdolliset tukirakenteet tulostetaan eri materiaalista, jolloin niiden poistaminen tulostamisen jälkeen on helppompaa. (Palermo 2013.)

Tulostamisen aikana filamenttia syötetään kelasta tulostimen tulostuspäähän, joka sullattaa filamenttimateriaalin ja pursottaa tulostusalustalle. Tulostimen toiminta ja liike perustuvat X-, Y- ja Z-akseleihin, jotka tunnetaan myös matemaattisena suorakulmaisena eli karteesisena koordinaatistona. Tulostus tapahtuu joko tulostuspään liikkeenä, tulostuspedin liikkeenä tai näiden yhdistelmällä. Karteesisen tulostimen toimintaperiaate on samankaltainen kuin muissa tietokoneohjatuissa roboteissa. Näissä tulostimissa käytetyt askelmootorit liikkuvat tarkasti, yleensä 1.8 astetta askelta kohden. (Evans 2012 Chapter 1, 2.)

Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen FDM-tulostin, jossa tulostuspää liikkuu tulostusalustan yllä X- ja Y-akseleita pitkin piirtäen samalla tulostettavan kappaleen poikkileikkauksen tulostusalustalle. Pursotettu filamenttikerros jäähtyy ja kovettuu sen alla olevaan kerrokseen. Valmiin kerroksen jälkeen tulostusalusta liikkuu Z-akselin suunnassa alaspäin, jotta tulostuspäällä on tilaa piirtää seuraava kerros. (Palermo 2013.)



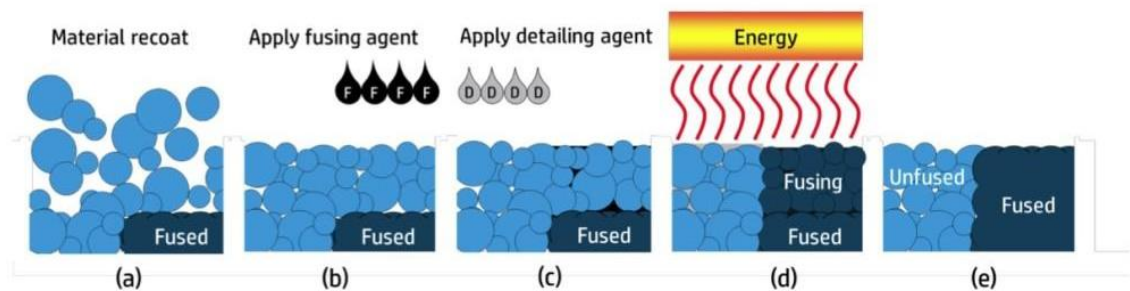
Kuva 3. FDM/FFF-tekniikka (PrintSpace3D 2019).

Kun tulostettava kappale on valmis, sen mahdolliset tukirakenteet poistetaan joko liuottamalla ne veteen tai katkaisemalla. FDM-tekniikassa tukirakenteiden materiaalina käytetään yleensä joko vesiliukoista vahaa tai haurasta kestumuovia, kuten polyfeenisulfonia (PPSF). Mikäli tukirakenteiden tulostamisessa on käytetty samaa materiaalia kuin kappaleessa, tulee tuet poistaa katkaisemalla. Valmiit tulosteet voidaan tulostamisen jälkeen käsitellä hiomalla, jyrsimällä, maalaamalla tai pinnoittamalla, jotta kappaleen näkyvät kerrosrajat saadaan tarvittaessa häivytettyä. (Palermo 2013.)

#### 2.1.4 MJF

MJF 3D-tulostustekniikka on Nailon-jauhepohjainen tulostusprosessi, jossa lisätty sulatusaine toimii lämpöä absorboivana musteena, joka pitää jauhehiukkasia kiinni toisissaan lämmityksen aikana (Weerg 2021). Nimi Multi Jet Fusion tulee sen tulostusprosessista, jossa käytetään useampaa mustesuihkupäätä. MJF-tekniikkaa on helppo verrata perinteiseen paperitulostamiseen, jossa tulostin tulostaa pikseleitä. MJF-tekniikassa tulostusprosessi toimii saman periaatteen mukaan, jossa vokselit eli pikseleiden kolmiulotteiset vastineet, joko sulautuvat lopputuotteeseen tai eivät. Tekniikalla on mahdollista tuottaa myös värillisiä tulosteista sekoittamalla tulostimen musteita ja tulostamalla värillisiä vokseleita saman periaatteen mukaan kuin perinteisessä paperitulostuksessa. (Kauppila 2021.)

Kuvan 4 mukaisesti MJF-tekniikassa tulostin levittää tulostusalustalle jauhetta halutun kerrospaksuuden mukaan, jonka jälkeen sulatusainetta (eng. fusing agent) lisätään valikoivasti esilämmitetyn jauhekerroksen päälle. Sulatusaineen lisäksi tulostin lisää jauheeseen yksityiskohtia luovaa ainetta (eng. detailing agent), joka pitää jauhehiukkaset erillään kohdissa, joihin ei ole tarkoituksena luoda kiinteää muotoa. Aineiden lisäämisen jälkeen tulostin tuo infrapunavalon avulla lämpöenergiaa seoksen ylle, joka kiinteyttää jauheen ja sulatusaineen yhdistelmäkohdat. Jokaisen kerroksen jälkeen sama prosessi toistetaan, kunnes tulostettava kappale on valmis. (Kauppila 2021.)



Kuva 4. MJF-tekniikka (Kauppila 2021).

Kun tuloste on valmis, siirretään tulostusalustan sisältämä jauhe ja osat jälkikäsittelyyn, jossa sitoutumattomat jauheet poistetaan yleensä integroitua imutehoa hyödyntäen (Protolabs 2021). Imetyt jauheet pyritään käyttämään uudelleen, jotta ylimääräisen jätteen syntyä voidaan vähentää (Kauppila 2021). Imuvaiheen jälkeen jäljellä oleva ylimääräinen jauhe raepuhalletaan ennen kuin kappale viedään viimeistelyyn. Viimeistelyvaiheessa valmiin jälkikäsittelyyn kappaleen ulkonäköä parannetaan maalauksella. (Protolabs 2021.)

## 2.2 Tulostettavat materiaalit

3D-tulostettavien materiaalien kirjo on laaja. Tulostusmateriaalin valintaan vaikuttaa tulostettavan kappaleen käyttötarkoitus, yksityiskohtaisuus, suunnittelu sekä tulostusmenetelmä. Yleisimmin käytössä olevat materiaalit ovat muoveja, joita on saatavilla filamentteina, rakeina, hartseina sekä jauheina. (SPC 2017.)

### 2.2.1 Muovit

Muovit ovat monipuolisia tulostusmateriaaleja. Muovi on materiaalina joustavaa, sileää, ja sitä on saatavilla läpinäkyvänä, useana eri värisenä sekä kiiltävänä tai mattana. Tulostusmateriaalina se on edullinen sekä kevyt. Yleisimmin muovia käytetään FDM/FFF-tekniikan tulostimisissa. Kestomuovit kestävät hyvin kuumuutta, kemikaaleja ja mekaanista räsitusta, josta syystä ne sopivat hyvin sellaisten tuotteiden materiaaliksi, joiden tarvitsee kestää räsitusta. (SPC 2017.)

#### **PLA**

PLA eli polyastiinihappo valmistetaan luonnontuotteista, kuten sokeriruo'osta ja maissi-tärkkelyksestä. Materiaalina se on ympäristöystävällistä biohajoavuutensa vuoksi. (Simplify3D 2021a.) Vaikka PLA on biohajoavaa, sen hajoaminen kestää kauan ja ihanteellisissa olosuhteissa hajoamisprosessi kestää kolme kuukautta, joka on pitkä aika verrattuna muihin biohajoaviin materiaaleihin (O'Connell 2021).

PLA valmistetaan filamentiksi raaka-ainepelleteistä, jonka yhteydessä siihen sekoitetaan muita ainesosia. Lisäaineet antavat tulostettavalle tuotteelle paranneltuja ominaisuuksia, kuten lämmönkestävyyttä sekä lujuutta. Valmistetun filamentin halkaisija on yleensä 1,75 tai 2,85 mm (O'Connell 2021).

PLA on helppokäyttöinen, ja sitä on mahdollista tulostaa lähes jokaisella FDM/FFF-tekniikan tulostimella. PLA ei vaadi korkeita lämpötiloja, kuten muut tulostusmateriaalit, ja materiaalina se on suhteellisen halpa. Tulostuspään lämpötilaksi riittää 190...220 °C. (Simplify3D 2021a). Tulostamisen yhteydessä sulatettu polyastiinihappo vapauttaa höyryjä, mutta vapautuvien höyryjen haitallisuus on matalampi kuin muissa muovimateriaaleissa. PLA on kemiallisesti kestävä ja vakaa materiaali, eikä se liukene kaikkiin liuottimiin, kuten isopropyylialkoholiin tai asetoniin. Mikäli liukenemista halutaan tapahtuvan, voidaan käyttää vahvempia liuottimia, kuten dikloorimetaania. (O'Connell 2021).

Materiaalina PLA on hauras, ja sen suurin heikkous on alhainen taivutuslujuus. PLA:sta valmistettu tuote rikkoutuu helposti, mikäli siihen kohdistetaan riittävästi taivuttavaa voimaa. PLA:sta valmistetun kappaleen heikko kestävyys johtuu pitkälti valmistustavasta kuin itse materiaalista. Mikäli tulostettava kappale tehdään suuremmalla kerroskorkeudella sekä täytötiheydellä, saadaan aikaan kestävämpi 3D-tuloste. (O'Connell 2021).

PLA:n lämmönkestävyys on myös hyvin matala, joten siitä valmistetut tuotteet muuttavat helposti muotoaan lämpimissä olosuhteissa. Huonon lämmönkestävyytensä vuoksi materiaali ei sovi ulkokäyttöön, eikä suoraan auringonvaloon. Materiaalin kestävyys UV-säteilylle on heikko, jolle altistuessaan syntyy muodonmuutoksia, kuten lämpöaltistumisessa. Alhaisen lasittumislämpötilan vuoksi tulostimessa ei vaadita olevan lämmitettyä tulostusalustaa, jolloin tulostin itsessään voi olla edullisempi. (O'Connell 2021).

PLA:sta on olemassa useita erityyppisiä filamentteja, joita voidaan käyttää 3D-tulostuksessa. Erityyppisillä filamentteilla saadaan luotua PLA-tulosteeseen niin visuaalisia kuin paranneltuja mekaanisia ominaisuuksia. (O'Connell 2021).

## **ABS**

ABS eli akryylinitriilibutadieenistyreeni on suosittu materiaali 3D-tulostuksessa sen edullisuuden sekä hyvien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi. ABS:ä käytetään yleisesti esimerkiksi LEGO-palikoiden valmistusmateriaalina. Se on kestävää sekä joustavaa, joten materiaalista valmistetut kappaleet soveltuvat monenlaisiin käyttöolosuhteisiin (Evans 2012, 20). ABS:n lasittumislämpötila on korkea, joten se kestää suuriakin lämpötiloja ennen näkyviä muodonmuutoksia. Lämmönkestonsa vuoksi ABS sopii käytettäväksi ulkotiloissa sekä korkean lämpötilan olosuhteissa. (Simplify3D 2021b.)

Yleisin ongelma ABS:n käytössä on sen kutistuminen jäähtyessään. Kun muovi kulkee tulostuspään läpi tulostusalustalle, se jäähtyy huoneenlämmössä, joka aiheuttaa materiaalin kutistumista. Kutistuminen voi aiheuttaa ensimmäisen kerroksen irtoamisen tulostusalustalta, joka usein pilaa tulosteen. Kutistumisen tuomat haitat voidaan minimoida 95...110 °C:seen lämmitetyllä tulostusalustalla, joka estää tulosteen ensimmäisen kerroksen jäähtymisen. Tulostuspään lämpötila voidaan myös asettaa ensimmäisen kerroksen kohdalla 10...20 °C muita kerroksia korkeammalle. Tulostuspään lämpötilan nostaminen alussa vähentää kutistumisriskiä entisestään. Yleisesti tulostuspään lämpötilana käytetään 220...250 °C. Pienemmissä tulosteissa pelkät tulostuspään sekä tulostusalustan lämmitykset ovat riittäviä estämään kappaleen kutistumista ja irtoamista tulostusalustalta. Isommissa tulosteissa tulisi käyttää tulostimen ympärillä suljettua tilaa, jossa lämpötila säilyy tulostuksen ajan korkeampana. Suljettu tila tulostimen ympärillä estää myös vedon, joka voi nopeasti jäähdyttää tulostettavan kappaleen tulostamisen aikana. (Simplify3D 2021b.)

## PC

PC eli polykarbonaatti on materiaaliominaisuuksiltaan lujaa, sitkeää, lämmönkestävää sekä kiinteässä muodossaan läpinäkyvää (Burr 2019). PC:tä käytetään auto- sekä ilmailuteollisuudessa komponenttien valmistusmateriaalina (Horne & Hausman 2017, 57). Materiaaliominaisuuksiensa takia polykarbonaatti tuo hankaluuksia tulostamisprosessiin, koska se vaatii korkeaa tulostuspään lämpötilaa. Lisäksi PC on jäähtyessään altis taipumaan sekä kutistumaan ja se sitoo kosteutta itseensä. (Burr 2019.)

PC on materiaalina kestävämpää kuin PLA sekä kovempaa ja kevyempää kuin ABS. PC on joustavampaa kuin muut kestumuovit, ja se kestää koneellista vääntöjännitystä huoneenlämpöisenä. PC on iskunkestävä ja särkymätön, ja sen lasittumislämpötila ulottuu 150 °C:seen saakka. Se on myös sähköä johtamatonta materiaalia. Polykarbonaatti soveltuu vaativiin ja teknisiin olosuhteisiin sekä korkeisiin lämpötiloihin. (Burr 2019; Simplify3D 2021c.)

Koska PC on tulostettaessa altis taipumaan sekä kutistumaan on tulostimessa välttämättä käyttää lämmitettyä tulostusalustaa, jotta välttyään tulosteen ensimmäisen kerroksen irtoamiselta alustalta (Burr 2019). Tulostusalustan lämpötilan tulisi mieluiten olla 80...120 °C (Simplify3D 2021c). ABS-materiaalin tulostamisen tavoin myös PC vaatii tulostettaessa ympärilleen lämpöä pitävän kotelon. Kotelolla estetään ympäristön lämpötilasta johtuva materiaalin jäähtyminen ja näin ollen taataan tulosteen kerroksien välille vahvempi tarttuvuus. (Burr 2019.)

Taipumisen ja kutistumisen estämiseksi tulostuspään lämpötilan tulee olla vähintään 260 °C. Hitaammalla tulostustahdilla sekä PC komposiiteilla voidaan tulostaa alemmissa lämpötiloissa, mutta tällöin jotkin PC:n hyvät materiaaliominaisuudet jäävät hyödyntämättä. Jos lämpötilat ovat liian alhaiset ja tulostusnopeus liian suuri, saattavat nämä aiheuttaa tulostimeen tukoksia. (Burr 2019; Simplify3D 2021c.)

Tulostimen ympärillä on hyvä käyttää suljettua koteloa myös siksi, että pystytään estämään PC:tä sitomasta ympäristön kosteutta itseensä. Materiaalin keräämä kosteus aiheuttaa tulosteeseen näkyviä haittoja, kuten kuplia sekä muuttaa materiaalin ominaista läpinäkyvyyttä harmaaseen läpinäkymättömyyteen. Ylimääräistä kosteutta poistetaan kuivaamalla filamentti ennen tulostusprosessia. (Burr 2019.)

PC:tä on käytön jälkeen mahdollista kierrättää, koska sen materiaaliominaisuudet sallivat sen uusiokäytön (Burr 2019).

## **PET ja PETG**

PET eli polyeteenitereftalaatti on materiaaliominaisuuksiltaan samankaltainen kuin öljypohjainen polyesteri eli synteettistä polymeeriä, jota käytetään vaateteollisuudessa tekstiileissä. Polyeteenitereftalaatin sulamislämpötila on noin 230 °C ja kiinteytyessään sen olomuoto ja väri muistuttaa lasin visuaalisia ominaisuuksia. Lasimaiset ominaisuudet voidaan säilyttää materiaalin värjäämisestä huolimatta, jolloin käytössä olevat väri vaihtoehdot ovat laajat. Ominaista PET-materiaalille on sen vahvuus, joustavuus ja keveys, mutta tulostettaessa tulee ottaa huomioon tulostusnopeus, jonka on oltava mahdollisimman hidas, jotta kerroksien välille saadaan kunnan tarttuvuus. PET on yleisesti käytössä elintarviketeollisuudessa. (MarkerBot 2021a; Contrado 2019.)

PETG on muokattu versio polyeteenitereftalaatista (PET), jossa nimen perään lisätty G tarkoittaa glykolia (MarkerBot 2021a). Glykoli on orgaaninen yhdiste, joka kuuluu alkoholeihin. Se on yleisesti käytössä pakkasnesteenä, ja koostumukseltaan se on kirkas sekä öljyinen. (Tower water 2020.) Glykoli lisätään polyeteenitereftalaattiin polymerointiprosessin yhteydessä, jotta materiaalista saadaan vahvempi ja kestävämpi. Yhdistelmä on yleisesti käytössä 3D-filamenttina, ja se on visuaalisilta ominaisuuksiltaan läpikuultavaa, mutta saatavilla useissa eri väreissä. PETG-materiaalin mekaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset ja sen käyttökohteet ovat laajat. Materiaali kestää iskua, kosteutta, kuumuutta sekä kemikaaleja, mutta pehmeän pintansa vuoksi materiaali on altis kulumiselle. (MarkerBot 2021a; Simplify3D 2021d.)

Sekä PET:n, että PETG:n tulostamisessa on suositeltavaa käyttää lämmitettyä tulostusalustaa, jonka lämpötila on 75...90 °C. Tulostuspään lämpötilan tulee olla 230...250 °C, ja tulosteen vääntymisen ehkäisemiseksi on suositeltavaa käyttää suljettua koteloa tulostimen ympärillä, jossa lämpötila saadaan pysymään 60...80 °C. Kotelon ja lämmitetyn tulostusalustan käyttö ei ole välttämätöntä tulostettaessa PET-materiaaleja, mutta niiden käyttö vähentää riskiä tulosteen vääntymiseen materiaalin jäähtyessä. (MarkerBot 2021a; Simplify3D 2021d.)

## ASA

ASA eli akryylistyreeni akryylinitrili, joka on ominaisuuksiltaan samankaltainen kuin ABS. Erona ASA:n ja ABS:n välillä on ASA:n parempi UV-säteilyn sekä kosteuden sietokyky. Materiaali tunnetaan parhaiten sen iskukestävyydestä, kemikaalikestävyydestä sekä korkeasta lämmönkestosta. ASA:sta tehdyt tuotteet soveltuvat erityisesti ulkokäyttöön ja olosuhteisiin, jossa tuotteen tulee kestää suoraa auringonvaloa sekä kosteutta. Materiaali säilyttää ulkonäkönsä sekä mekaaniset ominaisuutensa pitkänkin lämpö- ja vesialistumisen jälkeen. ASA-kestomuvia käytetään yleisesti autoteollisuudessa, jossa siitä valmistetaan puskurin osia sekä sivupeilien suojuksia. (Carolo 2020.)

ASA on vaikeasti tulostettava materiaali, ja se vaatii suuremmat tulostuspään ja -alustan lämpötilat kuin monet muut tulostusmateriaalit (Carolo 2020). Tulostuspään lämpötilan tulee olla 90...110°C ja tulostusalustan 220...245°C. ASA:n sisältämän styreenin vuoksi tulostettaessa tulee ottaa huomioon muovista vapautuvat myrkylliset höyryt. (Simplify3D 2021e.) Kuten ABS myös ASA on tulostettaessa taipuvainen vääntymään, mikäli tulostettava osa ei jäähdy tasaisesti. Vääntymisen estämiseksi on suositeltavaa käyttää suljettua tilaa, jotta tuulen aiheuttama veto ei jäähdytä tulostetta tulostuksen aikana. (Carolo 2020.)

### 2.2.2 Jauheet

Jauheiden käyttö on yleistynyt nykyisissä tulostimissa, joissa sitä käytetään 3D-tulosteiden rakennusmateriaalina. Tulostimet sulattavat jauheen, joka levitetään tulostusalustalle kerroksittain, kunnes tulostettava tuote on valmis. Jauheet voivat olla peräisin eri materiaaleista, mutta yleisimmin käytössä olevia jauheita ovat nailon (eng. nylon) ja alumiini (eng. alumide). (SPC 2017.)

## Nailon

Nailon eli polyamidi on kestumuovimateriaali, joka on puolikiteistä ja tunnettu sen joustavuudesta sekä sitkeydestä. Nailonille ominaista ovat alhainen kitkakerroin sekä korkea sulamislämpötila, jonka vuoksi siitä valmistetut tulosteet kestävät hyvin kulutusta. Siitä voidaan valmistaa filamentteja FDM-tulostimiin tai sitä voidaan käyttää jauheena SLS-

sekä MJF-tekniikan tulostimissa. Nailon kerää herkästi kosteutta itseensä. Kosteuden sitoutuminen tulostusmateriaaliin tuottaa laadullisia ongelmia, joten nailonin säilöminen vaatii erityistä tarkkuutta. (SPC 2017; MarkerBot 2021b.)

Nailon muuttuu lämpökäsittelyssä pehmeäksi tai sulaksi nesteeksi, mikäli kuumennusprosessissa ylitetään sen ominainen sulamislämpötila. Nailon vaatii jauhehiukkasten väliseen yhdistymiseen 240...270 °C:n lämpötilan. Sula tai pehmeä nailon voidaan muuttaa takaisin kiinteään olomuotoonsa jäädyttämällä, eikä useampi kuumennus- ja jäähdytysprosessi vaikuta oleellisesti materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. (MarkerBot 2021b; Horne & Hausman 2017, 57.)

Nailonista voidaan helposti luoda yhdistelmiä muiden materiaalien kanssa eli komposiitteja, joilla pystytään parantamaan sen ominaisuuksia. 3D-tulostuksessa yleisesti käytettäviä komposiitteja ovat hiili- sekä lasikuidulla lujitettu nailon. (MarkerBot 2021b.)

Nailonin kerrostarttuvuus on erinomainen, jonka ansiosta siitä voidaan luoda tulosteita, jotka vaativat vesitiiveyttä. Nailonista voidaan tulostaa joko läpinäkyvä, läpinäkymätön tai värillinen tuloste. Nailonin kestävyys ja joustavuus ansiosta siitä voidaan tulostaa kappaleita, joissa on ohuet seinämärakenteet. (MarkerBot 2021b; Horne & Hausman 2017, 57.)

## **Alumidi**

Alumidi on polyamidijauheen ja alumiinihiukkasten yhdistelmä. Alumidin materiaaliominaisuuden eivät poikkea paljon polyamidin fyysisistä ominaisuuksista. Alumiinihiukkasten lisääminen polyamidi jauheeseen lisää tuotteen jäykkyyttä sekä parantaa lämmönkestävyyttä, koska alumiinin lämmönjohtavuuden ansiosta lämpökuormat jakautuvat tasaisesti koko osan ulkopinnalle. (i.materialise 2020a; bitfab 2021.) Alumidi on visuaalisilta ominaisuuksiltaan harmaa sekä hiekkainen (SPC 2017). Sitä voidaan käyttää tuotteissa, joiden tulee kestää pieniä jännitystiloja, jotka ovat rakenteeltaan monimutkaisia ja joilta vaaditaan metallista ulkonäköä. Alumidijauhetta käytetään sellaisenaan SLS-tekniikan 3D-tulostimissa. (Sculpteo 2021.)

Alumidi on vedenkestävää, mutta ei vedenpitävää, joten tästä syystä alumidista valmistettujen tuotteiden ei tule olla pitkiä aikoja kosketuksessa veden kanssa. Altistuessaan yli 120 °C lämpötilalle alumidista valmistettuihin tuotteisiin syntyy huomattavia muodonmuutoksia. (Sculpteo 2021.)

Alumiditulosteet voidaan jälkikäsitellä kahdella vaihtoehtoisella tavalla. Raaka-ainetuotteessa se on jälkikäsitelty hiekkapuhaltamalla, jolloin sen pinta jää karkeaksi. Raaka jälkikäsitely on edullinen vaihtoehto, mikäli tuotteelta ei odoteta pintansa puolesta tarkkoja mekaanisia tai visuaalisia ominaisuuksia. Kiillotettu jälkikäsitely toteutetaan mekaanisella kiillotuksella, jolloin tuotteen pinnakarkeus on matalampi. Kiilloteuissa tuotteissa tulostuskerrokset voidaan edelleen erottaa, mutta erottuvuus on hyvin pientä. Kappaleet voidaan jälkikäsitelyn jälkeen maalata eri väri vaihtoehtoilla. (Sculpteo 2021.)

### 2.2.3 Hartsit

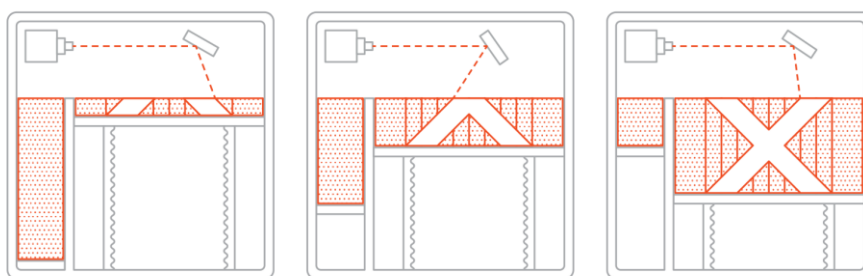
Hartsit ovat nestemäisestä polymeeristä valmistettuja materiaaleja. Niiden käyttö 3D-tulostuksessa on suppeampi kuin muiden materiaalien, koska hartsi on joustavampi ja lujuus on hyvin rajallinen. Hartsia käytetään SLA-tulostimissa, jossa nestemäinen hartsi kovetetaan tulostusalustalle UV-valon avulla. Hartsi värivaihtoehdot rajoittuvat yleensä mustaan, valkoiseen sekä läpinäkyvään. Yleisimmän 3D-tulostuskäytössä olevia hartseja ovat perinteinen hartsi, erittäin yksityiskohtainen hartsi ja maalattava hartsi. Perinteinen hartsi on väriltään läpikuultava ja hartsi vaihtoehtoista herkin UV-valolle. (Treatstock 2020; SPC 2017.) UV-valolle altistuminen aiheuttaa hartsiin värimuutoksia, joten on suositeltavaa pinnoittaa tulosteet joko maalaamalla tai lakkaamalla (i.materialise 2021c). Perinteisillä hartseilla tulostettavat tuotteet ovat yleensä olomuodoltaan kiinteitä ja sitkeitä sekä näyttävät kumisilta (Treatstock 2020). Erittäin yksityiskohtaisia hartseja käytetään yleensä pienemmissä malleissa, joihin vaaditaan tarkkoja yksityiskohtia. Tälle hartsi tyyppille ominaista on musta tai tumma väri (SPC 2017).

### 2.2.4 Metallit

Yleisimpiä 3D-tulostuksessa käytettäviä metalleja ovat ruostumaton teräs, kromi, nikkeli, alumiini sekä inconel, joita hyödynnetään pääasiassa teollisuudessa. Muihin tulostettaviin metalleihin kuuluvat kulta, hopea ja platina, jotka soveltuvat lähinnä korujen valmistamiseen. Perinteisissä valmistusmenetelmissä on vaikeaa hyödyntää ja käsitellä erittäin vahvoja metalliseoksia, kuten kobolttikromi-seoksia, joiden käyttö on kuitenkin mahdollista 3D-tulostuksessa. (Varotsis 2021.) Yleensä 3D-tulostettujen metalliosien väsymislujuus on pienempi kuin perinteisellä menetelmällä valmistetuissa

metallikomponenteissa. Alhainen väsymislujuus johtuu tulosteiden pinnankarkeudesta sekä sisäisestä huokoisuudesta. (HUBS 2021.)

Metalleja käytetään kuvassa 5 esitetyssä Powder Bed Fusion -tekniikkaan kuuluvissa SLM- sekä DMLS-tulostimissa (Dassault Systemès 2018). Metalleja on mahdollista käyttää myös FDM-tulostimissa, joissa polymeerifilamenttiin on sekoitettu runsaasti metallijauhetta. FDM-tulosteesta saadaan täysmetallinen sintraamalla se jälkikäsittelyvaiheessa. (HUBS 2021.)



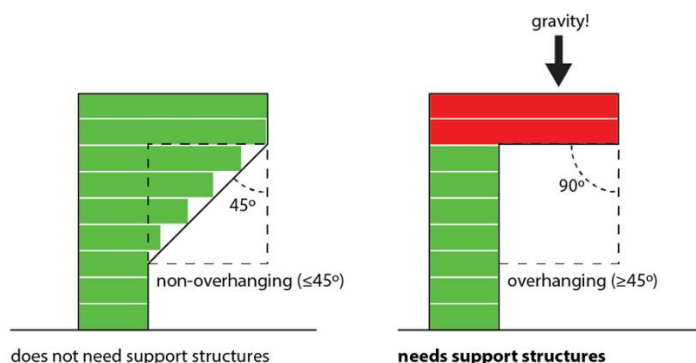
Kuva 5. Powder Bed Fusion -tulostustekniikka (Varotsis 2021).

Tulostusmateriaalina metallijauhe on kallis, josta syystä metallien edut tulevat parhaiten esiin pienemmissä komponenteissa. Kustannuksia saadaan pienennettyä tulostamalla kappaleen sisäosa ontoksi tai verkkomaiseksi rakenteeksi, jolloin materiaalin määrässä pystytään säästämään. (Varotsis 2021.)

### 2.3 Tulostusystävällinen suunnittelu

Tulostettavaa 3D-mallia suunniteltaessa tulee erityisesti ottaa huomioon tulostustekniikka sekä käytettävän materiaalin ominaisuudet. Eri materiaalit käyttäytyvät eri tavalla, jolloin mallinnus tulisi tehdä materiaalikohtaisten ohjeiden mukaisesti. Tulostustekniikasta riippuen mallinnus tulisi tehdä siten, että vapaasti leijuvia osia ei ole tai ne on tuettu tukirakenteilla. (i.materialise 2020b.) Ulokkeiksi lasketaan ne kappaleen osat, jotka ovat osittain tuettuna alempaan tulostuskerrokseen tai jotka eivät ole tuettuna ollenkaan. FDM- ja SLA-tulostimilla tulostettavan ulokkeen ja tulosteen rungon välinen kulma saa olla korkeintaan 45 astetta, jolloin uloke pystytään vielä tukemaan alemman kerroksen avulla. Mikäli tulosteen uloke ylittää 45 asteen kulman kuvan 6 osoittamalla tavalla, on tukirakenteiden käyttö välttämätöntä. Tukirakenteet nostavat tulostuskustannuksia sekä jättävät näkyvän poikkeaman tulosteen pintaan, jolloin niiden käyttöä on hyvä pyrkiä

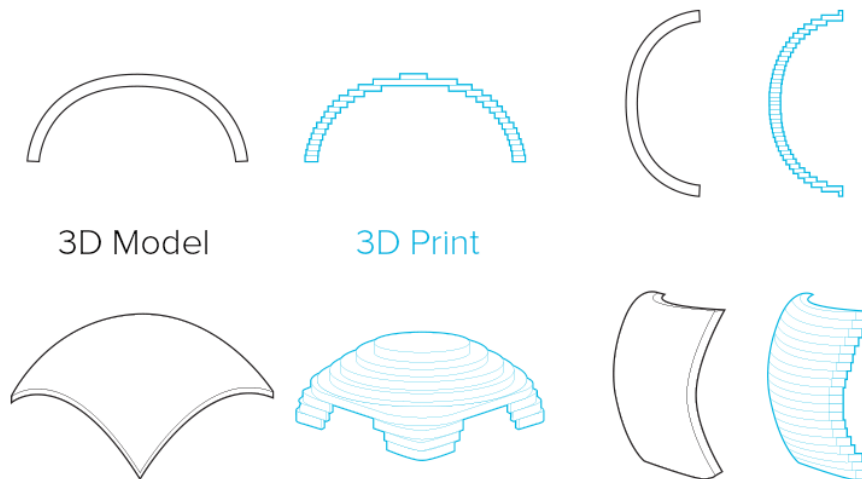
minimoimaan jo suunnitteluvaiheessa. (Brockotter 2021.) Poikkeuksena kulmasääntöihin on SLS-tekniikan tulosteet, joissa kiinteytymätön jauhe toimii tulosteen ulokkeiden tukimateriaalina jättämättä tulosteen pintaan näkyviä haittoja (Gregurić, L. 2019).



Kuva 6. Tukirakenteiden tarve yli 45 asteen kulmassa (Instructables 2017).

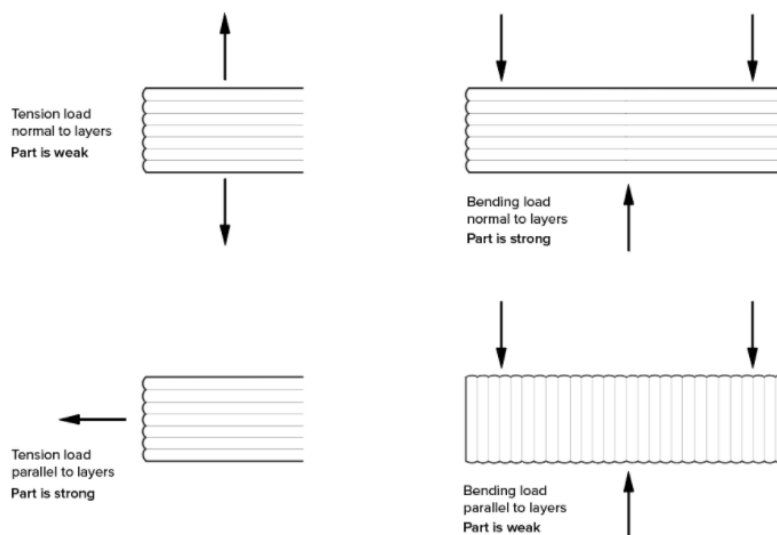
Tulosteiden seinämäpaksuus riippuu tulostettavan kappaleen koosta. Suuremmat kappaleet vaativat suuremman seinämäpaksuuden kuin pienemmät. Suuremmissa kappaleissa voidaan käyttää myös tukilappoja, joilla pystytään vahvistamaan tulosteen kestävyyttä. (i.materialise 2021a.) Seinämäpaksuuteen liittyvät ongelmat ovat yleisin syy siihen, etteivät jotkut 3D-mallit ole tulostettavissa. Liian ohuet seinämät tekevät kappaleesta hauraan ja helposti rikkoutuvan, kun taas liian suuret seinämät voivat aiheuttaa kappaleeseen liian suuren sisäisen jännityksen, ja saada kappaleen pinnan halkeilemaan. (i.materialise 2020b.) Seinämäpaksuus tulee siis arvioida tulostekohtaisesti, mutta yleisenä sääntönä voidaan pitää minimissään 0,8 mm seinämäpaksuutta (Brockotter 2021). MJF-tekniikalla tulostettaessa seinämäpaksuuden tulisi olla 2,5...6,0 mm. MJF-tekniikan tulosteiden pienet yksityiskohdat, kuten kohokuviot eivät välttämättä kestä jälkikäsittelyprosessia. (Protolabs 2021.)

FDM-tekniikassa, jossa tuloste rakennetaan kerros kerrokselta ilmaan, tulee ottaa huomioon tulostettavan kappaleen kerroksien tulostussuunta. Tulostussuunta vaikuttaa kappaleen pinnanlaatuun ja lujuuteen. Kuvassa 7 esitetyissä kaarevissa pinnoissa tulostussuunnalla voidaan vaikuttaa kappaleen visuaalisiin ominaisuuksiin merkittävästi. Mikäli kaareva osa tulostetaan vaakasuorasti, tulee pintaan näkyviin selkeä porrastus kerroksien välille. Laatu saadaan parannettua tulostamalla kaareva pinta pystysuorasti tulostusalustalle, jolloin kerrosten välinen erottuvuus on vähäisempi. (i.materialise 2021b.)



Kuva 7. Tulostussuunnan vaikutus tulosteen laadullisiin ominaisuuksiin (i.materialise 2021b).

Tulostussuunta vaikuttaa myös kappaleen kestävyteen, jolloin siinä tulee olemaan tulostussuunnasta riippuen heikkoja kohtia. Kuvan 8 mukaisesti tulosteen rakenne on heikko, jos taivutus- tai vetokuorma kohdistuu tulostuskerroksien liitoskohtiin. Nämä heikot kohdat tulisi määritellä tarkoin ennen tulostusta, jotta kestävyden ja laadun kannalta tulostetaan kappaleen käyttökohteen mukainen rakenne. Kovaan ja kuormittavaan käyttöön tuleva kappale tulee suunnitella minimoimalla heikkoja kohtia ja koriste-esineet taas maksimoimalla kappaleen laatuominaisuuksia. (i.materialise 2021b; Hudson 2021.)



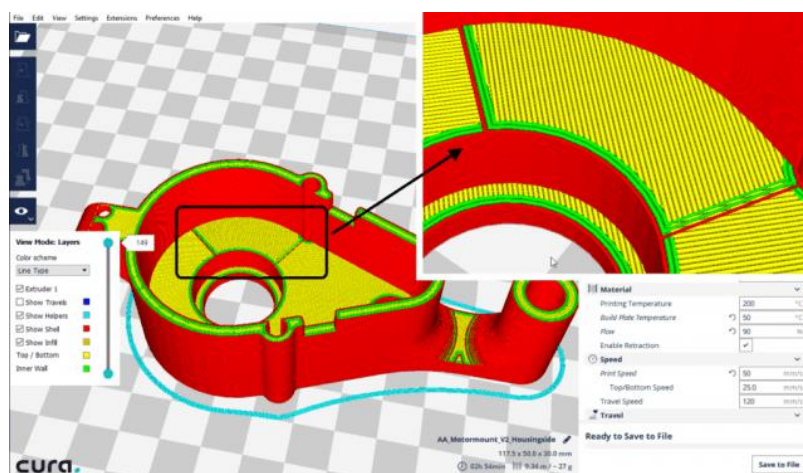
Kuva 8. Tulostussuunnan vaikutus kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin (Hudson 2021).

FDM-tekniikalla tulostettaessa tulee ottaa huomioon myös terävien kulmien ja reunojen pyöristykset. Tulostimen tulostuspää on pyöreä, jolloin myös tulostettava materiaali luo tulostuspään mukaisen pyöristyksen jokaiselle kerrokselle. Käytettävän tulostuspään koko määrittelee kappaleen rajoihin syntyvien pyöristysten säteen. FDM-tekniikalla ei siis voida tulostaa täysin suorakulmaisia ominaisuuksia tulosteeseen. (Hudson 2021.)

Yksi tapa vähentää tukirakenteiden käyttöä ja näin myös ylimääräisiä kustannuksia, on jakaa malli useampaan osaan. Monimutkaiset mallit voidaan jakaa pienempiin tulostettaviin osiin, jotka tulostamisen jälkeen liimataan yhteen. Mallin jakaminen vähentää tulostuskustannusten lisäksi myös tulostusaikaa. (Hudson 2021.)

## 2.4 3D-mallin viipalointi

Melkein jokainen tulostustekniikka vaatii mallin viipaloinnin ennen tulostusta. Viipaloinnin avulla malli muutetaan koodipohjaiseen muotoon, jota tulostin pystyy käyttämään ohjeistuksena mallinnetun kappaleen rakentamiseen. 3D CAD-malli muutetaan STL-tiedostoksi, joka viipalointiohjelman avulla jaetaan tulostuskerroksiksi. Useimmat tulostimet eivät pysty suoraan käyttämään pelkkää CAD:n STL-tiedostoa vaan tiedosto täytyy viipalointiohjelmistojen avulla muuttaa muotoon, jota tulostin pystyy lukemaan. (Monroe 2020.) Viipaloinnissa malli jaetaan yksittäisiin tulostuspään mukaisiin materiaalikerroksiin kuvan 9 osoittamalla tavalla. Viipaloinnin jälkeen ohjelmisto lisää muut tulostuksessa käytettävät arvot, jotka määrittelevät kuinka kerrokset rakennetaan, millä tavoin tulostin liikkuu tulostamisen aikana sekä kuinka paljon materiaalia kunkin kerroksen rakentamiseen käytetään. (Auerbach 2020.)



Kuva 9. 3D-mallin viipalointi (Auerbach 2020).

Viipalointiohjelmien päätarkoitus on tulostusohjeiden luominen tulostimille, mutta niistä löytyy muitakin hyödyllisiä ominaisuuksia. Useimmissa viipalointiohjelmistoissa voidaan määritellä täyttöpaksuutta sekä lisätä malliin tukirakenteita. (Monroe 2020.) Ohjelmistojen avulla pystytään tarkastelemaan jo ennen tulostusta, miten malli tullaan rakentamaan. Jotkin ohjelmistot pystyvät näyttämään tulostamiseen käytettävän materiaalin määrän sekä tulostusajan, joita voidaan vielä viipalointivaiheessa muokata. (Auerbach 2020.)

## 3 3D-TULOSTUKSEN HAASTEET MERITEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa tarkastellaan meriteollisuuden tuomia rajoitteita koskien eri materiaalien käyttöä sekä painon vaikutusta aluksen vakavuuteen.

Aluksen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tulee ottaa huomioon aluksen meriturvallisuus, niin ympäristön näkökulmasta kuin matkustajien ja miehistön. Lähtökohtaisesti aluksen tilaaja haluaa, että tilattu alus rakennetaan kustannustehokkaasti ja siten, että tilaaja saa aluksen käyttöönsä aikana maksimoitua alkusijoituksensa. Suunnittelussa tulee siis turvallisuuden lisäksi ottaa huomioon aluksen rahallinen arvo ja pyrkiä minimoimaan käyttöönsä aikana tapahtuvat kalliit huollot ja asennukset.

Paloturvallisuuden kannalta laivateollisuus tuo paljon rajoitteita materiaalien käyttöön riippuen niiden sijainnista aluksella. Tulipalon ehkäiseminen on otettava huomioon etenkin matkustaja-aluksilla, joiden pääasiallisena tehtävänä on kuljettaa suuria joukkoja ihmisiä.

### 3.1 Säännöt ja määräykset

Materiaalien ja rakenteiden käyttöön vaikuttavat säännöt ja määräykset liittyvät pääosin aluksen paloturvallisuuteen. SOLAS antaa paloturvallisuutta koskevat määräykset ja niitä sovelletaan luokituslaitosten osalta, jotka määrittelevät aluksen edellyttämän luokan. (IMOa 2019; Ilus 2015.)

#### **Paloturvallisuus**

Alus jaetaan kahdenlaisiin palovyöhykkeisiin, joita ovat pystysuuntaiset pääpalo-osastot sekä vaakasuuntaiset palo-osastot. Palovyöhykkeiden sisällä olevat tilat on eristetty toisistaan A- ja B-luokan rajapinnoilla. (Räisänen 1997, 18–31.) Rajapinnat jaetaan alaluokkiin palonkestonsa perusteella, jossa vastakkaisen tilan lämpötila ei saa tietyn aikarajan sisällä kasvaa A-luokassa yli 180 °C ja B-luokassa yli 225 °C. A-luokanrajapintoihin kuuluvat A-60, A-30, A-15 sekä A-0, ja B-luokan rajapintoihin B-15 sekä B-0. Luokan perässä oleva luku osoittaa ajan minuuteissa kuinka kauan vastakkaisen pinnan

lämpötilan tulee pysyä luokan osoittamissa rajoissa. A- ja B-luokan lisäksi rajapintoihin kuuluu luokka C, joka on palomääräyksiltään alin luokka. C-luokan rajapinnat voivat estää hieman palon leviämistä, mutta niillä ei ole ajallisesti samoja lämpötilamääräyksiä kuin aiemmin mainituilla A- ja B-luokan rajapinnoilla. Luokkamääräykset koskevat vain tilarajapintoja, joten tilojen sisäpuolisilla sisustuspinoilla ei ole samoja vaatimuksia materiaalien suhteen. Sisustuspintojen tulee kuitenkin olla palamatonta sekä paloa hidastavaa materiaalia, ja pysyä palokuormalaskelman sallimissa rajoissa. Sisätiloissa käytettävät pinnoitteet, kuten maalit ja lakat eivät saa palaessaan vapauttaa myrkyllisiä aineita. Huonekohtaiset palokuormalaskelmat tehdään SOLAS-yleissopimuksen luvun II-2 mukaisesti, jossa palokuormalle on asetettu maksimilämpöarvo MJ/m<sup>2</sup>. (Ilus 2015.)

Aluksissa käytettäviä materiaaleja koskevia pakollisia säännöksiä ovat SOLAS-yleissopimuksen luku II-2, sekä FTP-koodi. SOLAS-yleissopimuksen luvussa II-2 määritellään vaatimukset koskien palontorjuntaa, -havaitsemista ja -sammutusta aluksilla. Palontorjuntaa koskevat säännökset on laadittu varmistamaan, että materiaalit täyttävät tarkat, palosertifikaatilla varmistetut vaatimukset palovaaran vähentämiseksi. (IMOa 2019; Ilus 2015.) Palosertifikaatit osoittavat rakenteiden ja pinnoitteiden täyttävän sille määrättyt vaatimukset. Virallisen palosertifikaatin voi myöntää vain lippuviranomainen tai sen edellyttämä taho kuten luokituslaitos. (Ilus 2015.) FTP-koodi on IMO:n kansainvälinen ohje, joka pitää sisällään palontestausmenetelmän, tyyppihyväksynät sekä laboratoriotestauksen tuotteille, jotka määritellään SOLAS-yleissopimuksen luvussa II-2. (IMOb 2019.)

Päärakenteissa kuten katto- ja seinäpäällysteissä materiaalien tulee olla joko palamatonta tai palolta suojattua. Palavien rakenteiden käyttö tulee olla rajoitettua, mutta kalusteissa sekä muissa koriste-esineissä jollain määrin sallittua. (Ilus 2015; Räisänen 1997, 18–31.) Ulkoalueilla materiaalien ei tarvitse olla palosertifioituja, ja niiden käyttö on hieman vapaampaa kuin sisätiloissa. Ulkoalueilla rajoituksia tulee kuitenkin sääolosuhteista, jolloin tuotteiden tulee kestää kovaa tuulta, kosteutta, UV-säteilyä sekä yleisesti meri-ilmastoa.

### **Luokituslaitokset**

Luokituslaitosten sääntöjen ja määräysten pohjalla toimii SOLAS. Luokituslaitokset soveltavat näitä säännöksiä, joiden tarkoituksena määrittää aluksen luokituksen edellyttämä meriturvallisuus, merikelpoisuus sekä estää merenkulusta aiheutuva ympäristön pilaantuminen. (IACS 2021.)

Luokittelun tarkoituksena ja tavoitteena on varmistaa aluksen rakenteiden kestävyys sekä käyttö- ja ohjausjärjestelmien toiminta ja luotettavuus, jotta välttämättömien toimintojen käyttö aluksella säilytetään. Luokituslaitokset soveltavat ja tarkentavat IMO:n määrittelemiä sääntöjä, noudattamalla kansainvälisiä lakisääteisiä määräyksiä. (IACS 2021.)

Luokituslaitoksen antama luokitustodistus on siis näyttö siitä, että kyseinen alus täyttää luokituksen edellyttämät vaatimukset ja noudattaa voimassa olevia sääntöjä. (IACS 2021.)

### 3.2 Painovaatimukset ja aluksen vakavuus

Tuotteen tai materiaalin paino on myös yksi tekijä, joka ratkaisee niiden käytön aluksella. Mitä korkeammalle aluksessa mennään, sitä vähemmän alukseen tulisi tuoda painoa. Omat painovaatimukset antaa telakka, joka on tehnyt aluksen perussuunnitteluvaiheessa painolaskelmat, joita tarkennetaan rakennusvaiheessa ja sen jälkeen. (Räisänen 1997, 5–1.) Liian suuri paino aluksen korkeimmissa osissa vaikuttaa oleellisesti aluksen vakavuuteen, jolloin alueet on lähtökohtaisesti suunniteltava tiettyjen painovaatimusten rajoissa. Mikäli kokonaistoimittaja ylittää oman alueensa painorajoitukset, tulee ylityksestä sakkoa. Myös telakan tekemät painoylitykset luvatussa sopimuspainosta maksetaan sakkoina aluksen tilaajalle (Räisänen 1997, 5–1). Siksi jo kokonaistoimituksen tarjousvaiheessa on tärkeää tarkastella eri materiaalien ominaisuuksia ja valita mahdollisimman kevyitä vaihtoehtoja rakennusvaiheeseen, jotta paino saadaan pysymään rajoitusten sisällä tai jopa alhaisempana. Pahimmassa tapauksessa suuret painon ylitykset voivat johtaa aluksen hylkäämiseen tilaajan toimesta, jolloin sopimuksesta löytyvän DWT-painorajan ylityksen jälkeen alusta ei ole pakko vastaanottaa (Räisänen 1997, 5–1).

Lisäkustannukset ovat suoraan myös verrannollisia materiaalin painoon. Raskaammat ja vaikeammin rakennettavissa olevat rakenteet vaativat enemmän työvoimaa, joka näkyy työntekijöiden määrässä, työtunneissa ja siten myös palkkakustannuksissa. (Räisänen 1997, 5–1.)

Muutokset aluksen painossa vaikuttavat aluksen vakavuuteen ja painopisteen sijaintiin. Mikäli aluksen vakavuus ei ole riittävä, voidaan aluksen päämittoja joutua muuttamaan, yleensä leventämällä alusta tai muuttamalla ylimpien kerroksien materiaaliveitoehtoja kevyempiin. (Räisänen 1997, 5–6.)

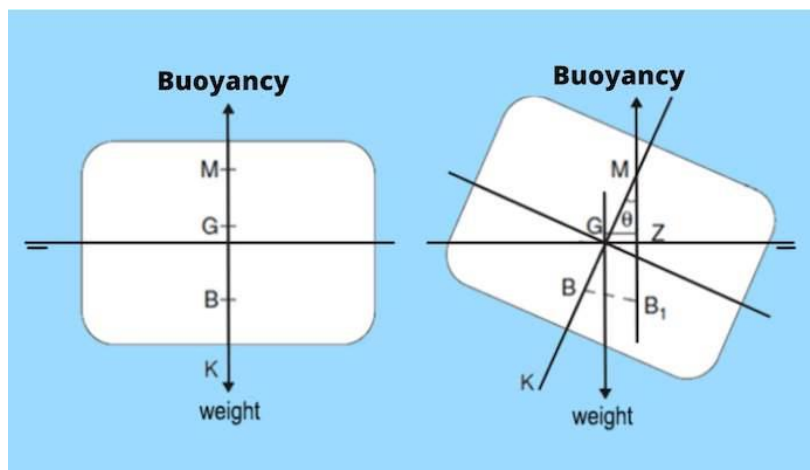
Aluksen painopiste KG eli painopisteen sijainti aluksen kölipisteestä, saadaan kokoomalla aluksen eri alueiden painopisteet yhteen (Räisänen 1997, 6–1).

”Alus tulee rakentaa siten, että sillä on riittävä vakavuus toimia niissä lastitilanteissa, joissa alusta suunnitellaan käytettäväksi. Aluksella on vastaavasti oltava riittävä vakavuus niissä lastitilanteissa, joille Liikenne- ja viestintävirasto määrää vakavuuden laskettavaksi.

Aluksen vakavuus tietyssä lastitilanteessa katsotaan riittäväksi, kun alus pystyy kohtuuttomasti kallistumatta kestäämään ne kallistavat momentit, jotka aluksen rakenne, koko, käyttötarkoitus ja kulkuvedet huomioon ottaen saattavat aiheutua tuulesta, aallokosta, aluksen kääntymisestä tai matkustajien siirtymisestä.” (Laki aluksen teknisestä turvallisuudesta ja turvallisesta käytöstä 1686/2009.)

### Aluksen vakaa tasapaino

Vakaa tasapaino aluksessa saavutetaan, kun painopisteen asema G on alempana kuin alkuvaihtokeskuksen asema M. Tilanteessa, jossa alus kallistuu tiettyyn kulmaan, uppouman tilavuus kasvaa aluksen sillä puolen, jossa laita on lähempänä vesiviivaa. Näin ollen kelluvuuden keskipiste B siirtyy kuvan 10 mukaisesti kohtaan B<sub>1</sub>, lähemmäs kasvavaa uppouman tilavuutta.



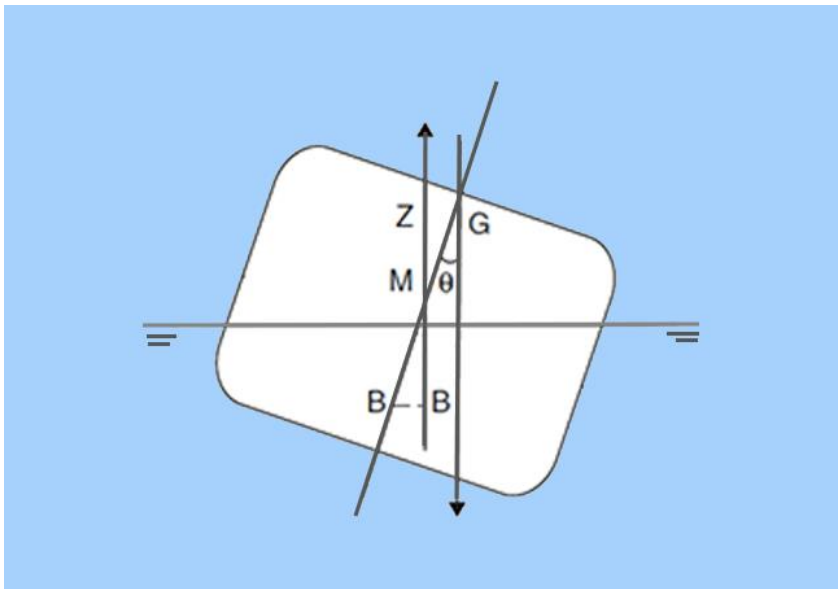
Kuva 10. Vakaa tasapaino (Chakraborty 2021).

Etäisyys painopisteen ja kelluvuuden keskipisteen välillä aiheuttaa oikeasevan momentin, joka on vakaassa tasapainotilanteessa yhtä suuri kuin kallistava momentti. Voimapari

palauttaa aluksen takaisin alkuperäiseen asentoonsa. Mikäli aluksen vaihtokeskuksen korkeus painovoiman keskipisteestä (GM) on suurempi kuin nolla alus on vakaa. (Chakraborty 2021.)

### Aluksen epävakaata tasapaino

Epävakaata tasapaino syntyy päinvastaisessa tilanteessa kuin ylemmässä vakaassa tilanteessa. Epävakaaseen tasapainoon päästään, kun massan keskipiste G on kuvan 11 osoittamalla tavalla ylempänä kuin alkuvaihtokeskuksen asema M, jolloin aluksen GM on negatiivinen. Tällaisessa tilanteessa aluksen kallistuessa oikeaseva momentti on negatiivinen ja se pyrkii kääntämään alusta pois päin pystyasennosta. Mikäli asentoa ei saada korjattua alus kaatuu. (Chakraborty 2021.)



Kuva 11. Epävakaata tasapaino (Chakraborty 2021).

Tällaisessa tilanteessa aluksen ylimmillä kansilla on liian paljon painoa suhteessa alimpiin kansiin. Painopiste G liikkuu lisättyä painoa kohden, mikäli aluksen ylimmille kansille tuodaan huomattavasti lisäpainoa alkuperäisestä laskennasta poiketen, siirtyy myös painopiste ylempäs, joka aiheuttaa vakavuusongelmia. (Chakraborty 2021.)

## 4 3D-TULOSTUSTUKSEN KEHITYSTYÖ

Luvussa käsitellään sopivan 3D-tulostuskohteen valintaa, käyttökohteeseen sopivan materiaalin valintaa sekä perehdytään toimeksiantajan tuotekehitysprojektin yhteistyökumppanien tulostimiin ja pinnoitevaihtoehtoihin. Kehitystyöllä tarkoitetaan koko 3D-projektiin liittyvää työtä, joka jatkuu vielä opinnäytetyön jälkeen. Lopussa vertaillaan tulostuksen ja perinteisen valmistusmenetelmän kustannusten eroavaisuuksia.

Tämän opinnäytetyön aikana malleja ei lähdetä tulostamaan oikeassa koossaan tai asentamaan alukselle, vaan tarkoituksena on tehdä vertailua esimerkkien pohjalta 3D-tulostuksen kannattavuudesta sekä mahdollisuuksista meriteollisuudessa.

### 4.1 Suurtulostetulostimet

Yhteistyökumppanina 3D-kehitysprojektissa toimii belgialainen suurtulosteita tulostava yritys Colossus. Colossukselta löytyy 4 erilaista tulostinta, joista kolme toimii saman periaatteen mukaisesti kuin FFF-tulostustekniikka. (Colossus 2021a.) Tulostintyyppi tunnetaan kuitenkin FFF-tekniikan sijaan nimellä FGF eli Fused Granulate Fabrication, jossa eroavaisuus tulee ilmi filamenttityypistä. FGF tulostimissa materiaalia ei syötetä tulostuspäähän filamenttinauhana vaan granulaatteina eli muovirakeina. Materiaalirakeiden syöttö tulostuspään läpi tulostusalustalle ei tapahdu perinteisesti paineen avulla, vaan FGF-tulostimissa on käytössä ruuvipumpun kaltainen mekanismi. (Stevenson 2018.) Granulaattien käyttö on myös taloudellisesti kannattavampaa kuin filamenttinauhan, koska filamenttinauhojen valmistaminen on muovirakeita kalliimpaa. Joitakin materiaaleja ei pystytä muovaamaan filamenttinauhan muotoon, joten rakeiden käyttö mahdollistaa laajemman materiaalivalikoiman sekä kierrätettävien materiaalien käytön. (Colossus 2021a.)

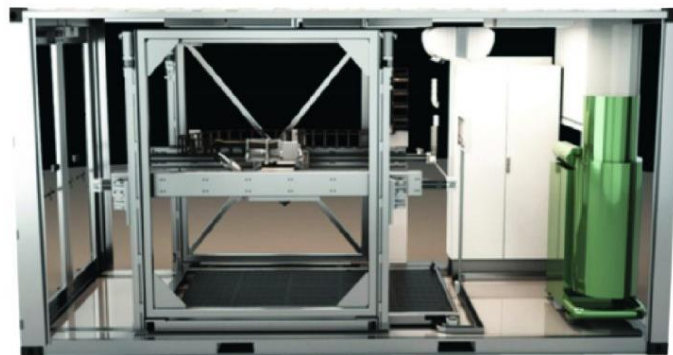
Vakiona Colossuksen tulostimissa on käytössä 1...10 mm tulostuspääkoot, mutta koko on mahdollista räätälöidä myös asiakaskohtaisesti. Jokainen Colossuksen tulostin on varusteltu granulaattien syöttöön sopivalla tulostuspäällä sekä kosteudenpoistoyksiköllä. Tulostuspalveluiden lisäksi Colossukselta on mahdollista ostaa tulostimia. Jokaista tulostinta on mahdollista vuokrata asiakkaan toiveiden mukaisesti, ja ne ovat joko kiinteitä tai liikkuvia yksiköitä. Asiakastarpeiden mukaisesti, Colossus tarjoaa ostettavan tulostimen lisäksi koulutus-, huolto- sekä ylläpitopalveluita. (Colossus 2021a.)

Colossus Mark II-tulostimella pystytään tulostamaan 2700 x 1250 x 1500 mm kokoisia tulosteita. Kuvassa 12 näkyvä tulostimen runko on suunniteltu kevyemmäksi, jolloin se on helposti siirrettävissä. Tulostin on varusteltu sisäänrakennetulla jäähdytyksellä, suljetulla tulostusympäristöllä sekä tulostusalustalla, joka voidaan lämmittää 115 °C:seen. Ominaisuudet mahdollistavat vaativienkin materiaalien käytön tulosteessa. (Colossus 2021a.)



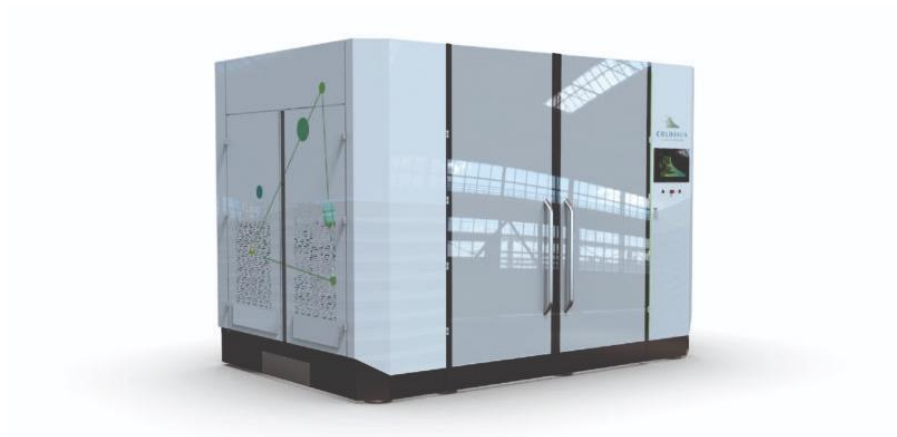
Kuva 12. Colossus Mark II (Colossus 2021a).

Kuvassa 13 esitetty Mark II Static on ominaisuuksiltaan samanlainen kuin Mark II, mutta ilman suljettua tilaa tulostimen ympärillä. Tulostin ei ole konttimallisen Mark II-typin mukaisesti liikuteltava, vaan kiinteästi asennettava yksikkö. Mark II Static-typin tulostimen tulostusmäärä on suurempi, koska suljettu tila ympärillä ei rajoita tulosteiden kokoa. (Colossus 2021a.)



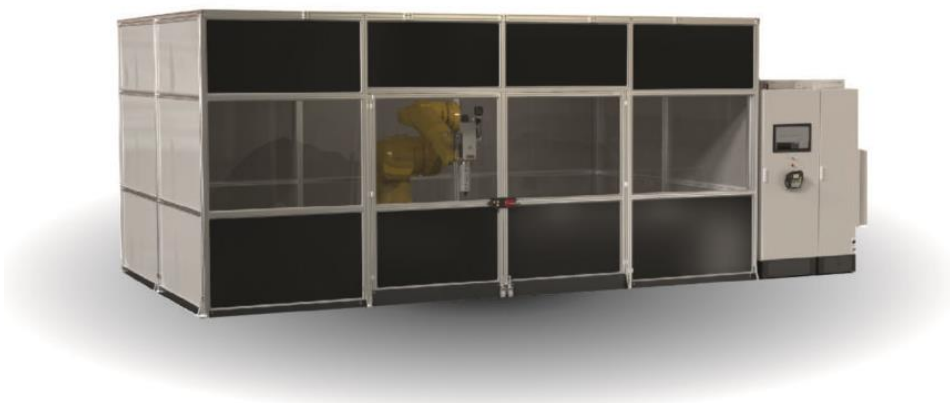
Kuva 13. Colossus Mark II Static (Colossus 2021a).

Kuvassa 14 nähdään XS series-tyypin tulostin, joka on ensimmäinen Colossuksen ja WEBER additiven yhteistyössä kehittämä tulostin. Tässä tulostintyyppissä tulostusnopeus on 200 mm/s ja tulostaminen on optimoitu kierrätettyjen sekä kierrättämättömien materiaalien käyttöön. Tulostimella voidaan tulostaa 1600 x 1200 x 1300 kokoisia tulosteita. XS series-tulostin on varusteltu samoilla kuivausjärjestelmillä sekä 115°C:seen lämmitettävällä tulostusalustalla kuin Mark II-sarjan tulostimet. Tulostin soveltuu pienten sekä keskikokoisten tulostesarjojen tuotantoon. (Colossus 2021a.)



Kuva 14. Colossus XS series (Colossus 2021a).

Neljäs Colossuksen tulostintyypeistä on robottitulostin, joka on esitetty kuvassa 15. Robottitulostimen toiminta eroaa muista tulostintyypeistä monin tavoin. 3-akselin sijaan robottitulostin hyödyntää kuutta eri akselia, joiden mukaan se pystyy liikkumaan. Useamman kuin kolmen akselin käyttö mahdollistaa useampien tulostuskulmien käytön. Poiketen 3-akselisesta järjestelmästä tulosteen poikkileikkauksen ei tarvitse olla yhtäjaksoinen, koska robottitulostin pystyy tulostamaan puolijatkuvasti. Huonoja puolia robottijärjestelmän käytössä on sen vaatima tilantarve. Robottitulostin vaatii enemmän tulostustilaa tulostaakseen saman kokoluokan tulosteita kuin karteesiset 3-akseliset tulostimet. (Colossus 2021a.)



Kuva 15. Colossus-robottikäsittelöstin (eng. Robotic systems) (Colossus 2021a).

Colossuksella on 11 eri materiaalivaihtoehtoa. Näistä vaihtoehtoista käsitellään kuutta eri materiaalia, jotka löytyvät myös aiemmin tehdystä vertailusta. Kuuteen käsiteltävään materiaaliin lukeutuvat PETG, PLA ja PC sekä niiden eri variaatiot.

Colossuksella on tarjota PETG:stä kolmea erilaista, eri käyttökohteisiin soveltuvaa materiaalivaihtoehtoa. Näihin vaihtoehtoihin kuuluvat perinteinen PETG, PETG Carbon sekä PETG Glassfibre. Perinteistä PETG:tä voidaan tarvittaessa parantaa lisäaineilla, joilla saadaan aikaan parempi UV-säteilyn kestävyys. PETG Carbon on nimensä mukaisesti hiilikuitulujitettu versio perinteisestä PETG:stä, jossa sen iskun- ja lämmönkestävyyttä on parannettu. Hiilikuidulla lujitettua PETG:tä on mahdollista saada vain mustana, sen sisältämän hiilen vuoksi. PETG Glassfibre eli lasikuitulujitettu PETG on vahva tulostusmateriaali, kuten hiilikuitulujitettu versio. Poiketen hiilikuitulujitetusta versiosta lasikuitulujitettua on mahdollista saada useassa eri värissä. Saatavilla on vakioväri vaihtoehtojen lisäksi asiakaskohtaisesti räätälöityjä värejä. (Colossus 2021b.)

PLA-vaihtoehtoista on saatavilla perinteinen PLA sekä PLA Specials, jossa on mahdollista käyttää eri lisäaineita, kuten kiveä, puuta tai pronssia. Colossuksen käyttämällä teknologialla lisäaineilla voidaan täyttää perinteisen PLA:n tiheydestä puolet. Eri täyteaineilla on mahdollista luoda tulosteeseen visuaalisia ominaisuuksia. (Colossus 2021b.)

PC:tä käytetään, kun halutaan tulosteeseen PETG:n ominaisuudet, mutta sen toivotaan olevan vahvempaa sekä kestävämpää UV-säteilylle. PC:stä on johdettu myös Colossuksen materiaalivaihtoehtoihin kuuluva Durabio, joka ei ole kierrätettävää. Durabio sekä

PC soveltuvat etenkin läpinäkyvien ja lasimaisten tulosteiden materiaaleiksi. (Colossus 2021b.)

Tuotteiden tulostamisen ja valmiin kehitystyöprojektin jälkeen harkintaan tulee myös tulostimen ostaminen, mutta opinnäytteen tekohetkellä keskitytään vain tuotteiden suunnitteluun ja tulostuspalvelun tilaamiseen.

#### 4.2 Pinnoite ja jälkikäsitely

Tällä hetkellä suurin osa materiaaleista vaatii jonkinlaisen pintakäsittelyn. FDM-tulostimilla tulostettaessa kerrosten erottuvuus varsinkin suurtulosteissa on selkeä, eikä tuloste sellaisenaan olisi laadullisesti arkkitehtien hyväksymä. Tulosteita voidaan kuitenkin jälkikäsitellä oleellisesti eri tavoin, jolloin pinnanlaatu saadaan vastaamaan arkkitehdin esittämiä toiveita. Tulostuspalveluita tarjoava Colossus jälkikäsittelee tulostetut tuotteet hiomalla kerroserottuvuuden vähäisemmäksi sekä maalaamalla käsitellyn pinnan, mikäli asiakas tätä toivoo. Pinnoitteiden avulla tulostusmateriaalien ominaisuuksia voidaan myös parantaa, jolloin niistä saadaan kestävämpiä ja paloturvallisuusmääräykset täyttäviä tuotteita. Pinnoitteita käyttämällä 3D-tulosteet saadaan jo aiemmin meriteollisuuden markkinoille, jos tulosteen rakenteen oma materiaali ei sellaisenaan sovellu käytettäväksi. Pinnoitteista riippuen ja niitä käytettäessä tuloste ei enää ole kierrätettävä. Mikäli tulosteessa käytettävä materiaali on kierrätettävää ja tuotteen toivotaan myös olevan, niin tällöin pinnoitteet tulisi pystyä poistamaan kappaleen pinnalta käyttöiän tullessa täyteen.

Tällä hetkellä pinnoitteita tulosteisiin tekevä ja kehitystyön yhteistyökumppanina toimii yritys nimeltä Finnester. Yritys on erikoistunut komposiittien palosuojaukseen, jossa komposiittimateriaalit pinnoitetaan palonkestäväksi ilman, että alkuperäistä materiaalia tarvitsee vaihtaa. Palosuojauksen lisäksi yrityksen tarjoamat pinnoiteratkaisut lisäävät tuotteen UV-säteilyn, lämmön, kemikaalien sekä korroosion kestävyttä. Finnesterin tuotevalikoimaan kuuluva HybridRED-palosuojapinnoite on palosertifioitu IMO 2010 FTP-koodilla. HybridRED muodostaa kappaleen pinnalle keraamisen suojan, kun pinta altistuu tulelle. Pinnoitteen suojaominaisuudet kasvattavat materiaalin syttymisaikaa sekä vähentävät lämmön vapautumista ja savun muodostumista. Suojapinnoitetta on mahdollista saada RAL-värikoodien mukaisissa väreissä tai läpikuultavana. HybridRED-pinnoitetta on saatavilla neljässä eri variaatiossa, joihin lukeutuvat HybridRED 100, 200, 500

sekä 900. Variaatiot on lajiteltu eri luokkiin niiden pinta- ja suojaominaisuuksien mukaisesti. (Finnester 2021.)

#### 4.3 Materiaalien yhteenveto ja alustava kustannusvertailu

Materiaalikustannukset perustuvat tulostettavan materiaalin tiheyteen, jolloin vertailukohteella ei ole suurta merkitystä. Tässä tapauksessa kustannuksia vertaillaan alustavasti markkinoilla olevaan muovivalmisteiseen designtuotteeseen, jonka rakenne yksinkertainen suorakulmion muotoinen kuutio. Menetelmänä käytetään prosentuaalista vertailua tulosteen ja esimerkkituotteen välillä, jossa prosentit esittävät tulostemateriaalin osuuden tuotteen ominaisuuksista. Tässä tapauksessa kustannukset eivät ole vertailukelpoisia, koska mallituotteen hinta sisältää materiaalin lisäksi sen valmistamiseen kuluvat kustannukset sekä voitot. Alustavalla vertailulla onkin vain tarkoitus tuoda esille tulostusmateriaalien eroavaisuuksia sekä osoittaa materiaalin käytön vähentämisestä johtuvat säästöt.

Tällä hetkellä markkinoilla on saatavilla eniten 3D-tulostuspalveluita FDM-tekniikkaan perustuvilla tulostintyypeillä, jonka kaltaista tekniikkaa hyödyntää myös yhteistyökumppanina toimiva Colossus. Tästä syystä materiaalien kustannus- sekä painovertailut tehdään kyseisessä tulostusmenetelmässä käytettävistä filamenttimateriaalien ominaisuuksista. Näihin materiaaleihin lukeutuvat ABS, PLA, PETG, ASA ja PC.

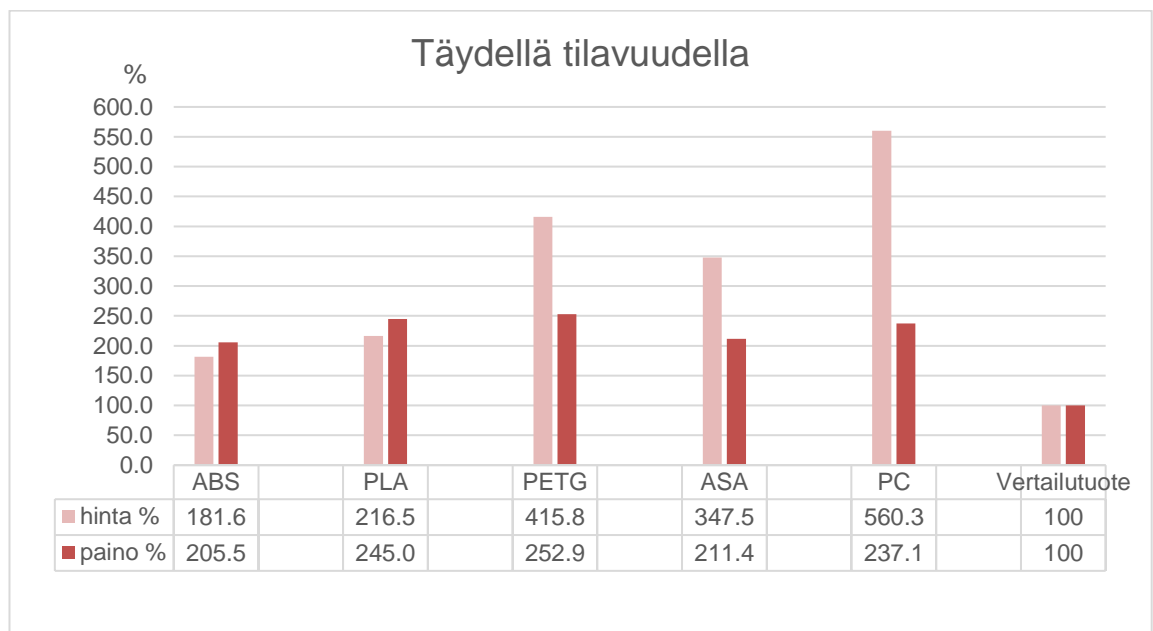
Taulukko 1. Yhteenveto muovimateriaalien ominaisuuksista (Simplify3d 2021e).

	ABS	PLA	PETG	ASA	PC
Maksimi murtolujuus [MPa]	43	65	53	55	72
Lämpölaajenemiskerroin [ $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ]	90	68	60	98	69
Korkein käyttölämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]	98	52	73	95	121
Tulostuspään lämpötila (minimi) [ $^{\circ}\text{C}$ ]	220	190	230	235	260
Tulostuspedin lämpötila (minimi) [ $^{\circ}\text{C}$ ]	95	45	75	90	80
Vedenkestävä			x		
UV-säteilyn kestävä				x	
Lämmönkestävä	x			x	x

Taulukosta 1 voidaan huomata eri käyttöympäristöön soveltuvat materiaalit, joista lämpöä kestäviin materiaaleihin lukeutuvat ABS, ASA sekä PC. Ainut pitkäaikaiseen UV-valoaltistukseen ilman pinnoitteita soveltuva materiaali on ASA, jolloin sen käyttöä voidaan hyödyntää ulkoalueilla. PETG on valituista materiaaleista ainut, joka on vedenkestävä. Tulostemateriaalit, jotka eivät täytä lämpö- tai UV-kriteereitä voidaan tulostamisen

jälkeen pinnoittaa käyttökohteeseen soveltuviksi. Materiaalin valinnassa tähdätään ensisijaisesti alhaiseen hintaan sekä painoon. Tehdyt laskelmat ovat nähtävissä liitteestä 1, joka ei sisälly julkaistavaan versioon.

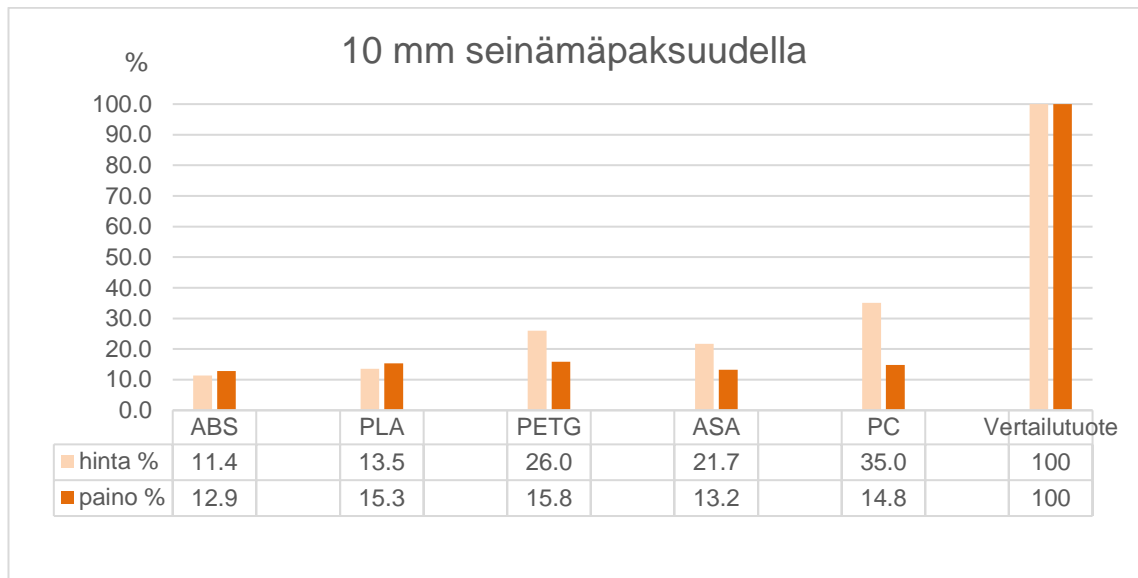
Kaaviosta 1 ilmenee tulosteen hinta ja paino, jos kappale täytetään koko tilavuudeltaan tulostusmateriaalilla. Vertailukaaviota tarkastelemalla huomataan, että PC on materiaaleista selkeästi arvokkain ja täydellä tilavuudella tulostettuna sen osuus esimerkkituotteen hinnasta olisi 560,3 %. Jokaisen materiaalin paino sekä hinta ovat kuitenkin selkeästi mallituotetta korkeammat, mikäli tulosteet täytetään koko tilavuudeltaan materiaalilla. Tilavuutta saadaan pienennettyä tulostamalla kappaleesta ontto, vaikuttamatta kappaleen ulkomittoihin sekä säilyttämällä mekaaniset ominaisuudet vaaditulla tasolla. Tässä vertailussa tulostamiseen käytetyn materiaalin tilavuutta vähennetään siten, että tulosteen seinämän paksuudeksi jää 10 mm.



Kaavio 1. Tulostusmateriaalien hinnat ja paino täydellä tilavuudella.

Kaaviosta 2 voidaan huomata kuinka paljon materiaalin käytön vähentäminen täydestä tilavuudesta onttoon rakenteeseen vaikuttaa kappaleen hintaan sekä painoon. Painon ja hinnan lisäksi ontton rakenteen tulostaminen kestää vähemmän, jolloin kokonaisen tulosteen tulostusaika pienenee oleellisesti. Kaaviossa 2 pelkästään seinämäpaksuuksia muuttamalla PC:n hinnan osuus esimerkkituotteen hinnasta tippuu 35 prosenttiin, jolloin se on 65 prosenttia edullisempi vaihtoehto. PC:n hinta on silti suurissa ja tiheissä tulosteissa huomattavasti korkeampi verrattuna muihin tulostusmateriaaleihin. Suuremmissa

tulosteissa materiaalien väliset painoerot ovat näkyvämpiä, jolloin PETG:n sekä PLA:n tiheyden erottuvuus muihin materiaaleihin verrattuna on selkeämpää.



Kaavio 2. Tulostusmateriaalien hinnat ja paino 10 mm seinämäpaksuudella.

3D-tulostuksen edut tulevat esille etenkin eri valmistustapavaihtoehtojen laajuudesta, jolloin kappaleen tiheydestä pystytään säästämään vaivattomammin verrattuna muihin valmistusmenetelmiin. Tulostustavan valinta ja mallintaminen ovat keskeisiä asioita kustannustehokkaan tuotteen luomisessa, koska tulosteen ominaisuuksia pystytään muokkaamaan kustannustehokkaaksi mallinnusvaiheessa sekä vielä tulostusasetuksia valittaessa. Pelkkä materiaalihintojen vertailu ei kuitenkaan luo kokonaiskuvaa tulostuskustannuksista vaan huomioon pitää ottaa myös tulostamiseen, jälkikäsittelyyn sekä asennukseen kuluvat kustannukset, joihin perehdytään tarkemmin kustannustehokkuusvertailussa.

#### 4.4 Tulostettavan tuotteen valinta ja suunnittelu

Kehitysprojektin alussa kartoitettiin ja kerättiin yhteen tällä hetkellä suunnittelun alla olevat alueet ja niiden sisältämät huonekalut, joista löytyisi potentiaalia tulostukseen. Ensimmäisten viikkojen aikana näiltä alueilta koottiin yhteen kaikki ne huonekalut, joita olisi sääntöjen puitteissa olemassa olevilla materiaaleilla mahdollista tulostaa. Kuten aiemmassa luvussa mainittiin, laivan sisällä sijaitsevilla alueilla on tarkemmat ja tiukemmat määräykset kuin ulkoalueilla. Sääntöjen vuoksi vertailukohteiksi valitaan ulkotilojen

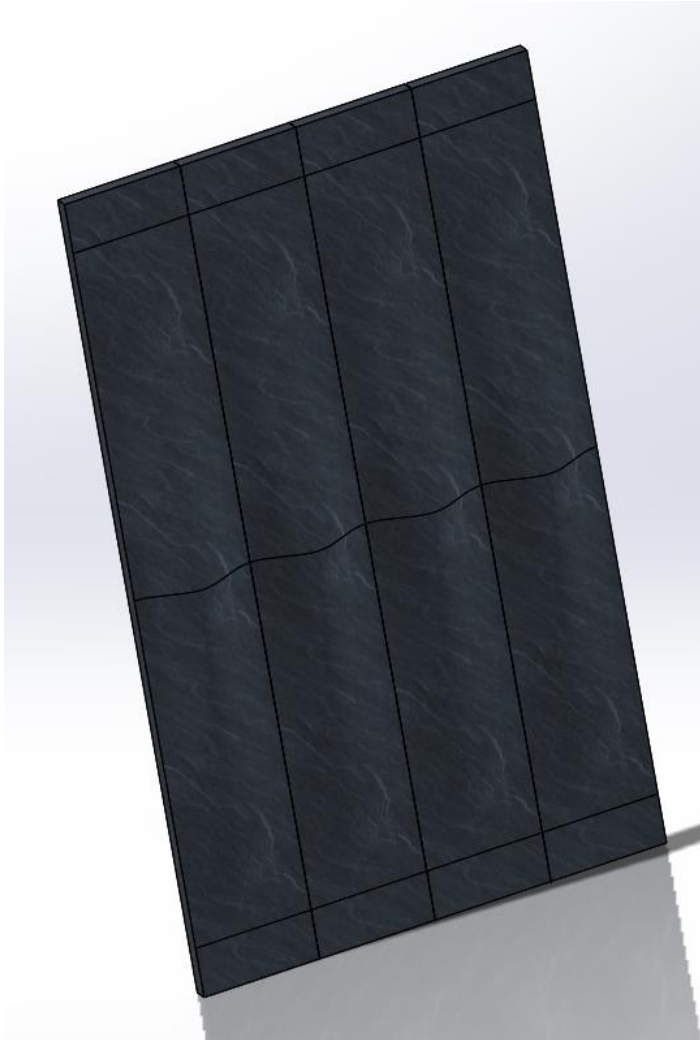
rakenteita sekä sisätilojen huonekaluja, joiden ei tarvitse täyttää erityisiä paloturvallisuusvaatimuksia.

Työn ensimmäiseksi vertailukohteeksi valittiin aluksen ulkokannella sijaitsevan baarin etulaatoitus, jonka värin tulee olla marmorikuvioitu musta. Valittu tulostuskohde sijaitsee ulkoalueella, joten sen tulee kestää meri-ilmastoa, kosteutta sekä UV-valoa. Baari sijaitsee aluksen perässä suorassa auringonvalossa, joten materiaalin tulee olla ominaisuuksiltaan sellainen, että sen käyttö soveltuu pitkäaikaiseen UV-altistumiseen ilman, että tuotteessa tapahtuu näkyviä muodonmuutoksia. Kohteen valintaan vaikuttivat oleellisesti kappaleen muoto, asennusmenetelmä, laatoitukseen kuluvat työtunnit, laatan korkea hinta sekä paino. Baarin etuosan koristekuvioinnin tulee myös täyttää laadulliset kriteerit, jolloin materiaali ja tuloste tullaan jälkikäsittelemään. Laatoituksen lisäksi vertaillaan huonekalun tulostamista, joka on tässä tapauksessa saniteettitiloihin sijoitettava pesuallas. Baarin etuosaa ei voida tulostaa yhtenä kokonaisena kappaleena, jolloin hyvän vertailukohteen 3D-tulostamalla tehdyn sarjatuotannon lisäksi tuo yksittäisen kappaleen tulostaminen. Laatoituksesta poiketen alkuperäisen pesualtaan paino ei ole liian korkea, jonka vuoksi valintaan vaikuttivat enemmän tuotteen monimutkainen muoto sekä korkea hinta.

Pesuallas sekä laatta ovat valmiita designtuotteita, joten niitä käytetään opinnäytteessä vain vertailuesimerkkinä 3D-tulostuksen kannattavuudesta. Molemmat tuotteet ovat laivaan valittuja, joten ainoastaan niiden hinta- ja painotietoja vertaillaan tulostettaviin tuotteisiin. Tulostettavien tuotteiden mallinnus ja visuaalinen ilme tehdään alkuperäisistä tuotteista poikkeaviksi kuitenkin niin, että tuotteiden materiaalmäärien tilavuudet ovat vertailukelpoisia. Vertailut pohjautuvat prosentuaalisiin tietoihin, joita ei voi yhdistää alkuperäisiin tuotteisiin.

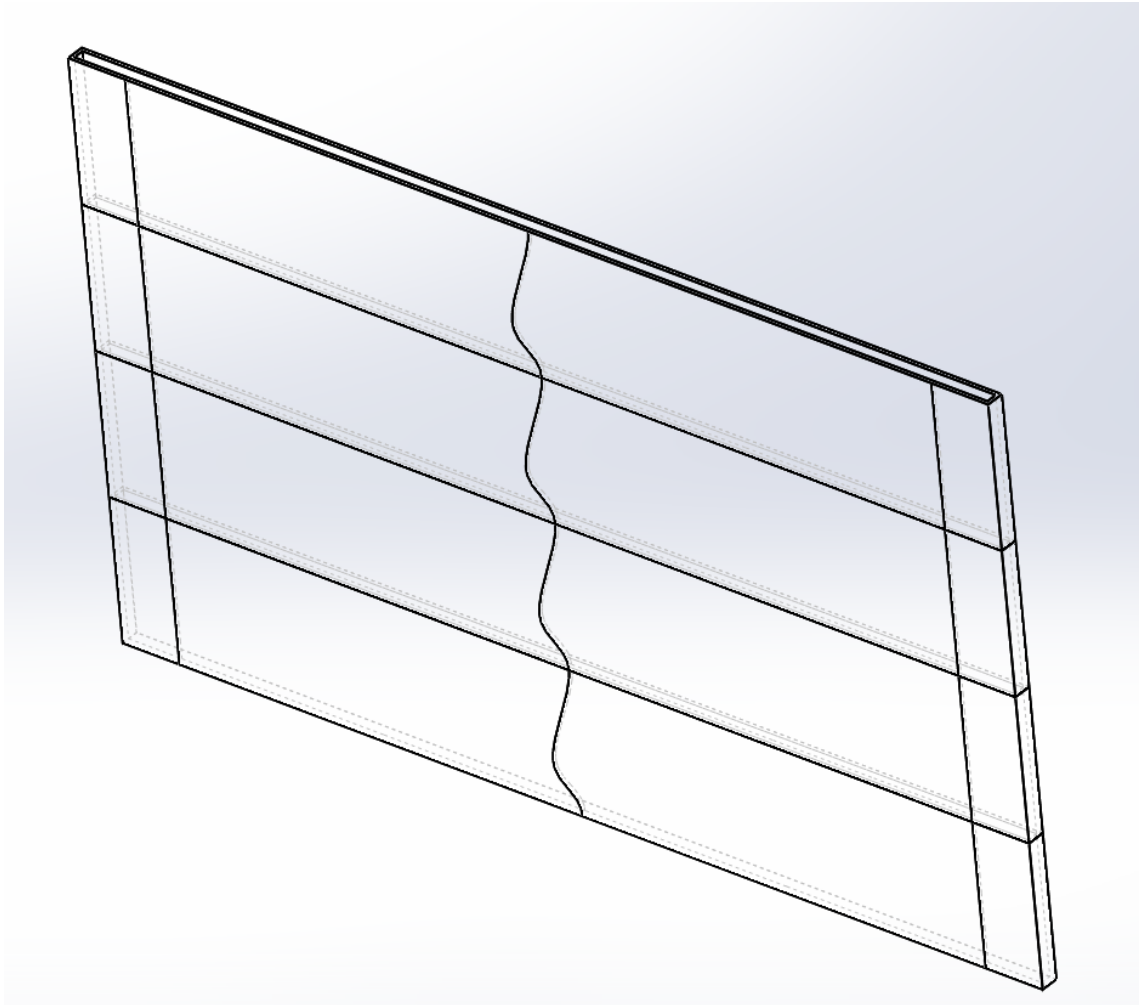
Aiemman materiaalivertailun mukaisesti kappaleen suunnittelussa lähdetään liikkeelle prioriteetista vähentää käytetyn materiaalin määrää. Tulostusystävällisen suunnittelun mukaisesti minimiseinäpaksuuden tulisi olla vähintään 0,8 mm. Laattatuloste tulee sijaitsemaan asiakkaiden välittömässä läheisyydessä, jolloin siihen kohdistuu kulutusta, mutta ei muita oleellisesti kuormittavia voimia. Näin ollen tulosteen seinämäpaksuudeksi arvioidaan riittävän 5 mm. Tulostelaatta tehdään 808 x 480 x 15...40 mm kokoisista palloista, joita tulee olemaan yhteensä 29 kappaletta. Tulostepalat kootaan laivassa yhdeksi kokonaisuudeksi. Yksi kokonainen tulostepala pitää sisällään neljä laattaa, jotka tulostetaan yhtenäiseksi kappaleeksi kuvan 16 osoittamalla tavalla. Kapeutensa sekä

korkeutensa takia tuloste ei pysy itsenäisesti pystyssä tulostusalustalla, jolloin tulostettavan tukialustan eli tukirakenteiden käyttö on välttämätöntä.



Kuva 16. Tulostelaatta mallinnettuna SolidWorks-ohjelmassa.

Laatoituksen ensimmäinen pala sekä viimeinen pala tulevat olemaan toiselta sivultaan umpinaisia ja toiselta avonaisia. Keskimmäisten laattapalojen pidemmät sivut ovat molemmilta puolin avonaisia. Laatta tulostetaan kuvassa 17 nähtävässä asennossa, pidempi sivu tulostusalustaa vasten, jolloin vastakkaisella sivulle jäävä aukko jää tulosteen yläosaan. Kappaletta ei voi onton rakenteensa vuoksi tulostaa umpinaiseksi jokaiselta sivultaan, koska muuten vaaditaan tukirakenteiden käyttöä tulosteen sisällä. Tulostelaatan kohoumassa on huomioitu 45 asteen kulmasääntö, jotta tukirakenteiden määrä saadaan minimoitua.

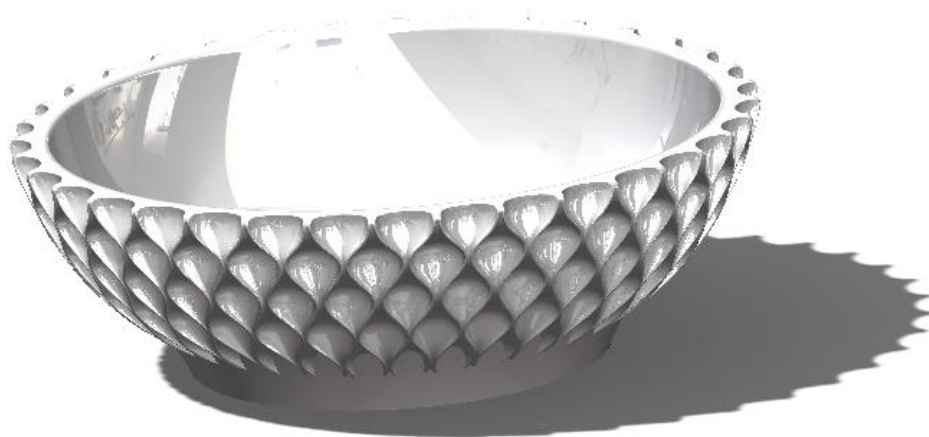


Kuva 17. 3D-laatan rakenne.

Laattatulosteen materiaaliksi valitaan Colossuksen PETG, joka sisältää UV-kestävyyttä lisääviä lisäaineita. PETG on materiaalivaihtoehdoista edullisempi kuin PC, mutta painavampaa. PETG:n ja PC:n painoerot ovat kuitenkin huomattavan pienet, jolloin edullisuus on ensisijainen kriteeri materiaalin valinnassa. Kappale tulostetaan suoraan mustana sekä jälkikäsitellään hiomalla. Vaikka PETG:stä on saatavilla valmiiksi musta PET carbon -vaihtoehto, sitä ei valita tähän kyseiseen kappaleeseen korkean painonsa vuoksi. Liitoskohdat yhdistetään toisiinsa liimalla, jotta kappaleiden välinen sauma saadaan mahdollisimman pieneksi. Kaikki kappaleet liimataan baarin runkorakenteisiin kiinni.

Pesualtaan mallinnuksessa käytetään täysin alkuperäisestä altaasta poikkeavaa pintakuviointia. Pintakuviointi on luotu SolidWorks-ohjeistuksia apuna käyttäen. Allas on korkeudeltaan 145 mm ja leveydeltään 700 mm. Altaan alaosaan on lisätty kuvasta 18 ilmenevä 50 mm korkea kartion muotoinen uloke, jotta altaan pohja ei vaatisi

tukirakenteiden käyttöä. Altaan tulostaminen olisi mahdollista ilman alaosan uloketta, jos kappale käännetään avonainen puoli tulostusalustaa vasten. Mikäli kappale käännettäisiin tulostusalustalle toisinpäin kuin kuvassa 18 osoitetaan olisi tukirakenteiden käyttö välttämätöntä altaan sisäreunan kulman ylitettyä 45 astetta, jolloin kappaleen sisäosasta 37 % täyttyisi tukirakenteista. Kappaleen jokaisen reunan tulee olla pyöristetty, jotta tulostuspään pyöreystä johtuvat virheet vältetään ja otetaan huomioon jo mallinnusvaiheessa.



Kuva 18. Pesuallas mallinnettuna SolidWorks-ohjelmassa.

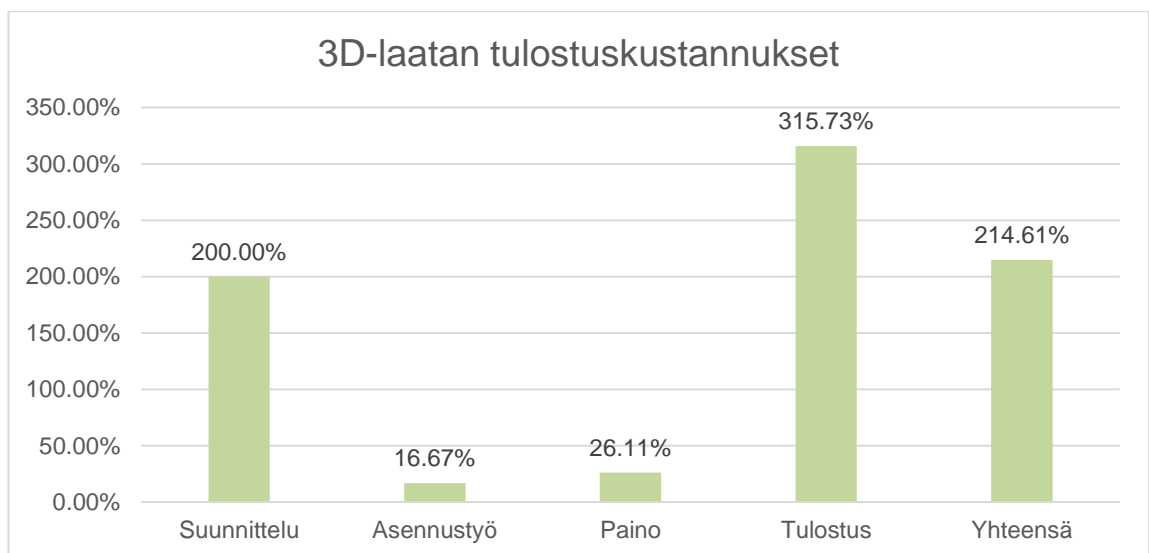
Pesualtaan materiaalivalintaan vaikuttava pääkriteeri on sen käyttökohteen vuoksi vedenpitävyys. Näin ollen materiaaliksi valitaan perinteinen PETG, joka on vaihtoehdoista ainoa vedenpitävä materiaali. Kappaleen kerrokset on tulostettava mahdollisimman tiiviisti kiinni toisiinsa, jotta allas on vedenpitävä. Tuloste on tarkoitus jälkikäsitellä hiomalla sekä valkoisella maalipinnalla. Vedenpitävyyttä voidaan tehostaa tarvittaessa pinnoitteilla.

#### 4.5 Kustannustehokkuusvertailu

Kokonaiskustannuksien vertailussa käsitellään tuotteen valmistamiseen, asennustyöhön sekä suunnitteluun kuluvia kustannuksia. Vertailu tehdään aiempien menetelmien mukaisesti, jossa tulostettavan laatan sekä pesualtaan ominaisuuksien osuuksia vertaillaan prosentuaalisesti alkuperäisiin tuotteisiin. Toimitusaikoja tai toimitushintoja ei huomioida vertailussa, koska molemmissa valmistusmenetelmissä nämä ovat lähes yhtä suuret, eivätkä ne vaikuta oleellisesti vertailtaviin kustannuseroihin. Tulostuskulut perustuvat

Colossukselta saatuun hintatarjoukseen, jonka pohjalta on laskettu yhden tulostuskerran hinta kappaleen tilavuuden mukaisesti. Tulostuskustannukset pitävät sisällään tulostamisen, jälkikäsittelyn sekä käytettävän materiaalin hinnat. Laskelmat löytyvät liitteestä 2, joka ei sisälly julkaistavaan versioon. Alkuperäisten kappaleiden hinnat ovat tarkkoja ja perustuvat tuotetoimittajien tarjoamaan tietoon.

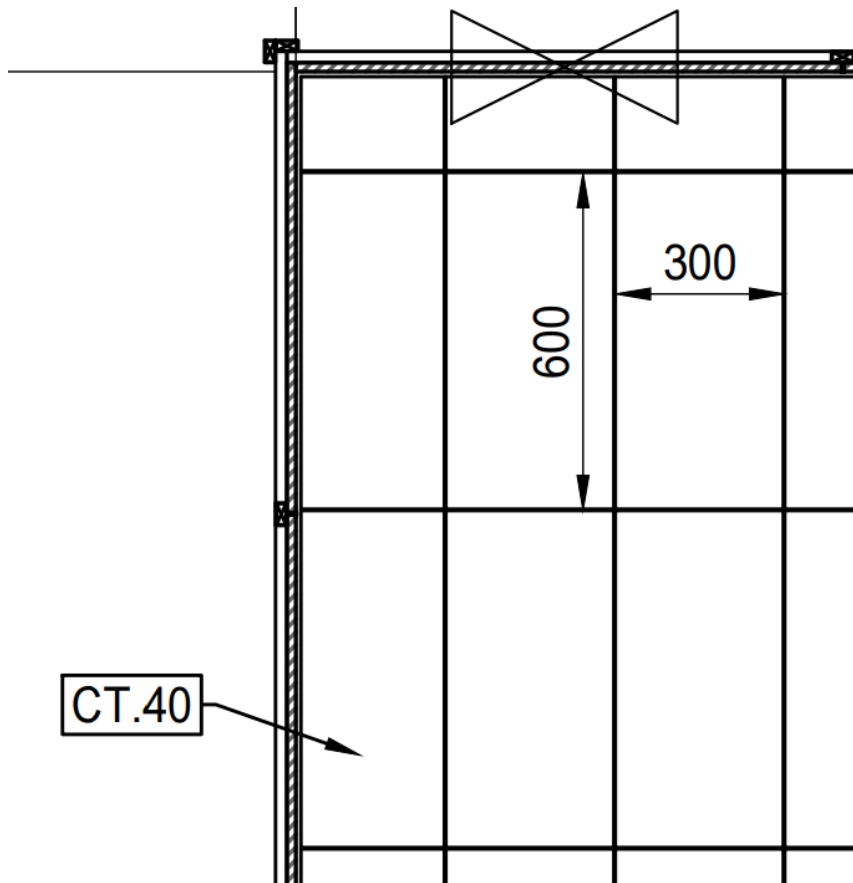
Baarin etulaatoituksen tulostamiseen liittyvien kustannusten laskelmat löytyvät liitteestä 3, joka ei sisälly julkaistavaan versioon. Laskelmista saadut tulokset esitetään kaaviossa 3 prosentuaalisesti. Vertailusta huomataan kuinka tulostetun kappaleen paino sekä asennustöiden määrä laskevat merkittävästi aiempaan valmistustapaan verrattuna. Laatoituksen kuluvat työtunnit ovat huomattavasti moduulirakentamista korkeammat, jossa tulostetut palaset voidaan vain liimata kiinni rakenteisiin. Laatoittamisessa suurimman työn teettää laattojen asettelu sekä niiden saumaus. 3D-tulosteen asennustöihin kuluvat työtunnit ja tuntipalkkiot ovat 83,3 % pienemmät kuin laatoituksessa.



Kaavio 3. 3D-tulostuslaatan kustannukset ja ominaisuudet verrattuna laatan kustannuksiin.

Perinteisen laatoituksen suunnitteluun kuluvat työtunnit eivät ole korkeat, koska tällä hetkellä työkuvat tehdään 2D:nä, jolloin myös laatta esitetään piirustuksissa pelkkinä ääri-viivoina. Laattojen sijoittelu työkuviin oikeassa koossa sekä muodossaan on kuitenkin tärkeää, jolloin suunnittelussa aikaa vie kuvan 19 esimerkin mukaisesti sijoitus, mitoitus sekä materiaalinumerointi. 3D-tulostettavan tuotteen suunnittelun aikaa vievin osuus on tulostamiseen soveltuva alkusuunnittelu sekä 3D-mallinnus, jossa laatta on piirrettävä oikeanlaiseen olomuotoonsa, eikä näin ollen pelkät ääriviivat riitä. Kaaviosta 3 voidaan

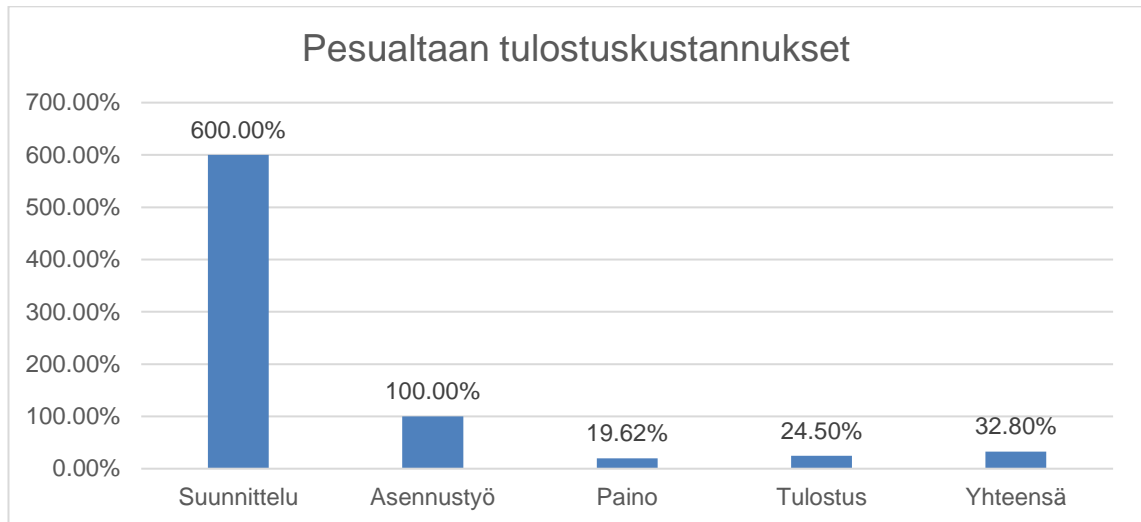
kuitenkin huomata, että kaikki kustannukset yhteenlaskettuna laatan 3D-tulostamisen osuus perinteisestä valmistustavasta tulisi olemaan 214 prosenttia, jolloin se olisi selvästi kalliimpi vaihtoehto. Tulostamisen edut näkyisivät vain tuotteen painossa sekä asennuksiin kuluviissa työtunneissa.



Kuva 19. Esimerkki laattojen asettelusta työkuvasa.

Pesualtaan kustannustehokkuusvertailussa säästöjä alkuperäisesti valmistetun altaan hintoihin tulee kaavion 4 mukaisesti kaikilta muilta alueilta paitsi suunnittelusta sekä asennuksesta. Kustannustehokkuuslaskelmat löytyvät liitteestä 4, joka ei sisälly julkaisutavaan versioon. Tulosteen asennustyöhön arvioidaan kuluvan yhtä paljon aikaa kuin alkuperäisen pesualtaan asentamiseen. Mikäli pesuallas ostettaisiin valmiina tuotteena suoraan toimittajalta ei suunnittelukustannuksia syntyisi vaan ne kuuluvat jo altaan ostohintaan. Tällöin suunnitteluun kuluvaan aikaan sisältyisi vain altaan sijoittaminen piirustuksiin, joka ei ole aikaa vievä osuus. Altaan tulostamisessa tarvitsee laatan tavoin tehdä suunnittelutyö itse, jolloin säästöjä ei syntyisi työtuntien osalta. Vaikka altaan alkuperäinen paino ei ole merkittävän korkea on tulosteen paino silti oleellisesti alhaisempi. Tulostettavan altaan yhteenlasketut kustannukset ovat yksittäistä tuotetta tulostettaessa

lähes 67,2 prosenttia edullisemmat. Huomioon pitää ottaa myös se, että vertailtava esimerkki on designtuote, jolloin sen hinta on jo alun perin korkea. Arkkitehdit toivovat laatua matkustaja-alusten sisustusalueilla, jolloin sinne valitut tuotteet ovat yleisesti hintavia.



Kaavio 4. 3D-pesualtaan kustannukset ja ominaisuudet verrattuna pesualtaan kustannuksiin.

Laatan ja pesualtaan kustannusvertailuista voidaan huomata, että yksittäisen kappaleen tulostaminen on sarjatuotantoa kustannustehokkaampaa. Sarjatuotannossa jokaisen yksittäisen kappaleen tulostamiseen tulevat sisältymään tulostuskustannukset, jolloin se on huomattavasti kalliimpaa kuin yksittäisen tuotteen tulostaminen kokonaisena.

## 5 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Kehitystyön tavoitteena oli kerätä tietoa ja osaamista 3D-tulostamisesta sekä löytää tulostamiseen parhaiten soveltuvat tuotetyypit. Pää tarkoituksena oli verrata esimerkkituotteiden valmistusmenetelmien kustannuksia, hyötyjä ja haittoja samanlaisen tuotteen 3D-tulostamiseen. Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että vaikka tulostimet pysyvät tekemään jo suuremman kokoluokan tulosteita ei niiden tulostaminen ole aina kannattavaa. Tulostamisen kannattavuus suuremmissa tulosteissa riippuu paljolti siitä, pystytäänkö tuote tekemään perinteisimmillä valmistustavoilla, jolloin se on vielä tässä vaiheessa edullisempi vaihtoehto. Mikäli tulosteita tulostettaisiin sarjatuotantona, olisi pitkällä aikavälillä järkevää investoida tulostuspalveluiden ostamisen sijaan tulostimen ostoon. Yksittäiset hintavat tuotteet voivat sen sijaan tulla edullisemmaksi 3D-tulosteina, jos kappale saadaan tulostettua kokonaiseksi yhdellä tulostuskerralla. Huomattavimmat säästöt ja hyödyt 3D-tulostamisessa tulisivat esille kappaleen painossa, jota saadaan pienennettyä useammalla prosentilla tuotteen alkuperäiseen painoon nähden, koska tulostettavan tuotteen materiaalihiheyttä pystytään säätelemään enemmän kuin muissa valmistusmenetelmissä. Kappaleen kustannustehokas tulostettavuus ei välttämättä vaadi 3D-tulostukselle ominaista monimutkaista rakennetta, vaan tulostuskohdetta on katsottava kokonaisuutena, johon vaikuttavat tulostusaika, esimerkkituotteen hinta sekä säästetyt materiaali-, asennus-, suunnittelu- ja painokulut. Muita mainittavia hyötyjä tulostinten käytössä verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin on sen kyky hyödyntää laajalti eri materiaaleja, jolloin on mahdollista siirtyä laivanrakennukseen soveltuviin ekologisempiin kierrätettäviin materiaaleihin lähitulevaisuudessa. Ekologisuus tulee 3D-tulostamisessa esille myös siinä, että tulostin tulostaa vain tarvittavan, juuri kyseiseen mallin edellyttämän määrän materiaalia, jolloin hukkaan menevää ilmastoa kuormittavaa jätettä syntyy vain vähän.

3D-tulostettavia materiaaleja on saatavilla jo runsaasti erilaisia eri olosuhteisiin, joita voidaan jo osittain soveltaa myös meritekniikassa. Tulostuksen liittäminen osaksi aluksen sisällä sijaitsevia sisustusrakenteita on pidempi prosessi, koska paloturvallisuuden mukaisesti jokainen rakennemateriaali vaatii palosertifikaatin. Tästä syystä 3D-tulostuksen saattaminen osaksi meriteollisuutta tapahtuu parhaiten helpompien olosuhteiden kautta, kuten ulkoalueilta tai huonekaluista, joiden ei tarvitse täyttää erityisiä sääntöjä tai määräyksiä. Kokonaistoimittajat eivät voi itsenäisesti päättää miten ja millä materiaalilla rakenteet tehdään, vaan jokainen materiaali, väri ja muoto vaativat

hyväksyttämisen prosessin, jonka viimekädessä hyväksyy tilaaja ja arkkitehti. Tämän vuoksi uudet ideat on oltava valmiina ennen laivanrakennusprosessia, jotta nämä vaihtoehdot voidaan tuoda esille vaiheessa, jolloin hyväksyttäminen on vielä mahdollista. Kehitystyössä voidaan siis hyödyntää mallina tällä hetkellä rakenteilla olevia aluksia, mutta uusien ideoiden saattaminen on helpompaa ja nopeampaa vasta tuleville aluksille. Kehitystyötä jatketaan soveltuvan materiaalin kehittämisellä, jolla 3D-tulostus saadaan mukaan myös aluksen sisätiloihin. 3D-tulostusmahdollisuus tulisi saattaa arkkitehtien tietoisuuteen, jotta sitä osataan pitää myös soveltuvana vaihtoehtona ennen lopullisten tuotevalintojen tekoa.

## LÄHTEET

3D printing.com 2012. What is 3D Printing? Viitattu 31.10.2021 <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>

Auerbach, A. 2020. 3D Slicer Software: How it Works and What to Expect. Solidprint. Viitattu 3.11.2021 <https://www.solidprint3d.co.uk/3d-slicer-software-how-it-works-and-what-to-expect/>

Bitfab 2021. All about 3D printing in Alumide. Viitattu 20.10.2021 <https://bitfab.io/blog/alumide-3d-printing/>

Brockotter, R. 2021. Key design considerations for 3D printing. Viitattu 23.10.2021 <https://www.hubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing/>

Burr, E. Polycarbonate (PC) 3D Printing – All You Need to Know. Viitattu 16.10.2021 <https://all3dp.com/2/polycarbonate-pc-3d-printing-all-you-need-to-know/>

Chakraborty, S. 2021. Ship Stability – Understanding Intact Stability of Ships. Marine insight. Viitattu 6.10.2021 <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/>

Colossus 2021a. Our printers - Colossus print systems. Viitattu 11.11.2021 <https://colossusprinters.com/printers/>

Colossus 2021b. Our materials – FGF material compounds. Viitattu 11.11.2021 <https://colossusprinters.com/materials/>

Contrado 2019. What Is Polyester? The 8 Most Vital Questions Answered. Viitattu 16.10.2021 <https://www.contrado.co.uk/blog/what-is-polyester-a-closer-look-into-this-love-it-or-hate-it-fabric/>

Dassault Systèmes 2018. Processes – 3D Printing. 3DEXPERIENCE Marketplace. Viitattu 3.11.2021 <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>

Evans, B. 2012. Practical 3D Printers. Paul Manning

Finnerster 2021. Product families. Viitattu 11.11.2021. <https://www.finnerster.fi/products/all-products/>

Greelane 2019. Mitä ovat monomeerit ja polymeerit ja miten ne sopivat yhteen? Viitattu 31.10.2021 <https://www.greelane.com/fi/science-tech-matematiikka/tiede/monomers-and-polymers-intro-608928/>

Gregurić, L. 2019. SLS 3D Printing: Selective Laser Sintering Simply Explained. All3DP. Viitattu 13.10.2021. <https://all3dp.com/2/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-simply-explained/>

Horne, R. & Hausman, K. 2017. 3D Printing for dummies. John Wiley & Sons, Inc.

Hoskins, S. 2013. 3D Printing for artists, designers and makers. Bloomsbury Publishing Plc.

HUBS 2021. Metal 3D Printing. Viitattu 3.11.2021 <https://www.hubs.com/guides/metal-3d-printing/>

Hudson, B. How to design parts for FDM 3D printing. Viitattu 23.10.2021 <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/#bridging>

i.materialise 2020a. How 3D Printing In Alumide Really Works. Viitattu 20.10.2021 [https://i.materialise.com/blog/en/3dprinting\\_alumide/](https://i.materialise.com/blog/en/3dprinting_alumide/)

- i.materialise 2020b. 5 Mistakes to Avoid When Designing a 3D Model for 3D Printing. Viitattu 23.10.2021 <https://i.materialise.com/blog/en/5-mistakes-to-avoid-when-designing-a-3d-model-for-3d-printing/>
- i.materialise 2021a. Rubber-like (MJF) design guide. Viitattu 23.10.2021 <https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/rubber-like/design-guide>
- i.materialise 2021b. ABS Design guide. Viitattu 23.10.2021 <https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/abs/design-guide>
- i.materialise 2021c. Standard Resin. Viitattu 3.11.2021 <https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/Standard-Resin>
- IACS. Classification societies – their key role. Viitattu 6.10.2021 <https://www.iacs.org.uk/media/3784/iacs-class-key-role.pdf>.
- Ilus, M. 2015. Laivaturvallisuuksäännöt. Laivasuunnittelijakoulutuksen koulutusmateriaali. Meyer Turku. Ei julkinen
- IMO 2019a. Fire protection. Viitattu 6.10.2021 <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/FireProtection-default.aspx>
- IMO 2019b. Fire testing laboratories. Viitattu 3.11.2021 <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/firetestinglaboratories-default.aspx>
- Instructables 2017. 3D Printing With Support Structures. Viitattu 3.11.2021 <https://www.instructables.com/Bottle-Lock-Part-3-3D-Printing-With-Support-Struct/>
- Kauppila, I. 2021. Multi Jet Fusion (MJF) 3D Printing – Simply Explained. All3DP. Viitattu 6.10.2021 <https://all3dp.com/1/multi-jet-fusion-mjf-3d-printing-simply-explained/>
- Laki aluksen teknisestä turvallisuudesta ja turvallisesta käytöstä 1686/2009. Voimaantulopäivä 21.12.2019. Saatavilla [https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ysluonnos\\_vakavuusm%C3%A4r%C3%A4ys.pdf](https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ysluonnos_vakavuusm%C3%A4r%C3%A4ys.pdf)
- Lohilahti, J. 2019. Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS-teknologiat. 3d-tulostus. Viitattu 13.10.2021 <https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat>
- Manufactur3D 2018. How Stereolithography (SLA) 3D Printing Works? Viitattu 13.10.2021 <https://manufactur3d.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/>
- MarkerBot 2021a. Everything you need to know about PETG 3D printing. Viitattu 16.10.2021 <https://www.markerbot.com/stories/engineering/everything-you-need-to-know-about-petg-3d-printing/>
- MarkerBot 2021b. Everything you need to know about nylon 3D printing. Viitattu 20.10.2021 <https://www.markerbot.com/stories/design/nylon-3d-printing/>
- Monroe 2020. The Role ‘Slicing Plays in 3D Printing. Viitattu 3.11.2021 <https://monroeengineering.com/blog/the-role-slicing-plays-in-3d-printing/>
- O’Connell, J. 2021. PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide. All3DP. Viitattu 13.10.2021 <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
- Palermo, E. 2013. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. Live Science. Viitattu 6.10.2021 <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- Printspace3D 2016. 3D Printing Processes. Viitattu 6.10.2021 <https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/>

- Protolabs 2021. Multi Jet Fusion. Viitattu 6.10.2021 <https://www.protolabs.fi/palvelut/3d-tulos-tus/multi-jet-fusion/>
- Räisänen, P. (toim.) 1997. Laivatekniikka – Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Jyväskylä: Gummerrus.
- RankRed 2020. What is 3D Printing? Working Principle/Types/Applications. Viitattu 31.10.2021 <https://www.rankred.com/what-is-3d-printing-working-principle-types-applications/>
- Robots and Androids 2018. 3D Printing Principles: General Principles Involved in Additive Manufacturing. Viitattu 13.10.2021. <http://www.robots-and-androids.com/3D-printing-principles.html>
- Sculpteo 2021. Alumide 3D printing material. Viitattu 20.10.2021 <https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/alumide-material/>
- Simplify3D 2021a. PLA. Viitattu 13.10.2021 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>
- Simplify3D 2021b. ABS. Viitattu 16.10.2021 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- Simplify3D 2021c. Polycarbonate. Viitattu 16.10.2021 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- Simplify3D 2021d. PETG. Viitattu 16.10.2021 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/petg/>
- Simplify3d 2021e. Filament Properties Table. Viitattu 9.11.2021 <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- SPC 2017. What materials are used for 3D printing? Viitattu 20.10.2021 <https://www.sharrettsplating.com/blog/materials-used-3d-printing/>
- Stevenson, K. 2018. Are Pellets Better Than Filament? Fabbaloo. Viitattu 11.11.2021 <https://www.fabbaloo.com/2018/04/are-pellets-better-than-filament>
- Tower Water 2020. What is Glycol? Viitattu 16.10.2021 <https://www.towerwater.com/what-is-glycol/>
- Tractus3D 2020. FDM 3D printing – fused Deposition. Viitattu 31.10.2021 <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/fdm-3d-printing/>
- Treatstock 2020. What is Resin 3D printing – Introductory Guide [2020 update]. Viitattu 20.10.2021 <https://www.treatstock.com/guide/article/125-what-is-resin-3d-printing-introductory-guide-2020-update>
- Työterveyslaitos 2017. OVA-ohje: ISOPROPANOLI. Viitattu 13.10.2021 <https://www.ttl.fi/ova/isopropanoli.html>
- Varotsis, A. 2021. Introduction to metal 3D printing. HUBS. Viitattu 3.11.2021 <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>
- Weerg 2021. What is Multi Jet Fusion 3D Printing? Viitattu 6.10.2021 <https://www.weerg.com/en/global/blog/what-is-multi-jet-fusion-3d-printing>

Tämä liite sisältää luottamuksellisia tietoja ja ne eivät sisälly julkiseen versioon.

Tämä liite sisältää luottamuksellisia tietoja ja ne eivät sisälly julkiseen versioon.

Tämä liite sisältää luottamuksellisia tietoja ja ne eivät sisälly julkiseen versioon.

Tämä liite sisältää luottamuksellisia tietoja ja ne eivät sisälly julkiseen versioon.