



3D-tulostaminen

Juha-Pekka Räsänen

Haaga-Helia ammattikorkeakoulu

Amk-opinnäytetyö

2021

Tradenomin tutkinto

Tiivistelmä

Tekijä(t)

Juha-Pekka Räsänen

Tutkinto

Tietojenkäsittelyn tradenomi

Raportin/Opinnäytetyön nimi

3D-tulostaminen

Sivu- ja liitesivumäärä

36

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mitä 3D-tulostaminen on. Työssä selvitetään, kuinka monimuotoinen 3D-tulostusprosessi on, ja mistä se koostuu. Osa-alueina tietoperustassa ovat 3D-mallinnus, 3D-tulostamisen mahdollistavat tekniikat ja 3D-tulostimet, sekä 3D-tulostimien tulostusmateriaalit.

Opinnäytetyön tietoperusta aloitetaan käsittelemällä 3D-mallinnusta. Työssä selvitetään ensin mitä 3D-mallinnus on, ja sen jälkeen käydään läpi yleisimmät 3D-mallinnuksen menetelmät.

Mallinnusta seuraa 3D-tulostaminen. Ensin työssä käsitellään 3D-tulostamista yleisellä tasolla, sekä käydään läpi 3D-tulostamisen historian tärkeimmät tapahtumat. Tämän jälkeen tutustutaan 3D-tulostamisen erilaisiin tekniikoihin, sekä 3D-tulostamisessa käytettäviin materiaaleihin.

Opinnäytetyön tietoperustan jälkeen vuorossa on itse tehty 3D-tulostus. Oman 3D-mallinnus- ja -tulostusprosessin dokumentoinnin avulla havainnollistettiin se, miten ideasta muodostetaan fyysinen objekti. Viimeisenä työssä on pohdintaosa, jossa reflektoidaan opinnäytetyön eri vaiheita sekä erillisinä osa-alueina, että yhtenäisenä kokonaisuutena.

Asiasanat

3D-tulostaminen, 3D-mallinnus

Sisällys

1	Johdanto	1
2	3D-mallinnus	2
2.1	Mitä on 3D-mallinnus	2
2.2	3D-mallinnuksen menetelmät	3
2.2.1	Solid-mallinnus.....	3
2.2.2	Wireframe-mallinnus	4
2.2.3	Surface-mallinnus	4
3	3D-tulostaminen	6
3.1	Mitä on 3D-tulostaminen	6
3.2	3D-tulostamisen historiaa	6
3.3	FDM-tulostaminen.....	8
3.3.1	FDM-tulostimet: esimerkkejä.....	9
3.4	Hartsitulostaminen	10
3.4.1	SLA.....	10
3.4.2	DLP.....	10
3.4.3	Materiaalin suihkutusp.....	11
3.4.4	Hartsitulostimet: esimerkkejä.....	11
3.5	Metallitulostaminen	13
3.5.1	DMLS.....	13
3.5.2	SLM	13
3.5.3	Suorakerrostus.....	14
3.5.4	Metallitulostimet: esimerkki.....	14
3.6	Jauhetulostaminen	15
3.6.1	SLS.....	15
3.6.2	Sideaineen suihkutusp.....	16
3.7	Muut tulostamismuodot	16
4	Filamentit	17
4.1	PLA.....	17
4.2	ABS	17
4.3	PETG.....	17
4.4	PA.....	18
4.5	PC.....	18
4.6	Puu- ja metallisekoitemuovit.....	18
4.7	Tulostushartsit.....	19
5	Ideasta esineeksi – esimerkki 3D-objektin luomisesta	20
5.1	Mallintaminen.....	20
5.2	Tulostusohjelma.....	22

5.3 Tulostaminen	25
6 Pohdinta.....	28
Lähteet	30

1 Johdanto

On kiehtovaa luoda ajatuksesta fyysinen esine – se on nykyisin mahdollista jokaiselle 3D-tulostamisen avulla. Edulliset kotitulostimet, kirjastot, koulut, jopa työpaikat tarjoavat mahdollisuuden tutustua ja kokeilla 3D-tulostamista. Aikaisemmin varjoissa pysyneen luomistavan näkyvyys on kasvanut sitä mukaa kun ala on päässyt eroon lastentaudeistaan ja antanut käyttäjilleen konkreettista hyötyä.

Yritykset ja instituutiot ovat huomanneet hyödyn. Erikoisosat voidaan ulkoistamista helpommin valmistaa paikan päällä 3D-tulostimella. Prototyypin läpimenoaika voidaan lyhentää tuntuvasti tulostamalla ne itse. Tuotteita voidaan tulostaa tarpeen mukaan – tällä säästetään sekä rahaa että varastotilaa. Lääketieteessä potilaalle voidaan mallintaa ja tulostaa sopiva proteesi paikan päällä, ja siten säästää aikaa ja kuluja, joita valmistamisen ulkoistaminen toisi.

Tämä toiminnallinen opinnäytetyö käsittelee 3D-tulostamisen vaiheita, ja pyrkii antamaan lukijalle niistä selkeän, ymmärrettävän läpileikkauksen. Työssä käsitellään ensin 3D-mallintamista ja sen eri menetelmiä, sitten siirrytään 3D-tulostamiseen – sen historiaan, erilaisiin tekniikoihin ja materiaaleihin. Tämän jälkeen näytetään havainnollistavan esimerkin avulla, kuinka esine 3D-tulostetaan: ensin 3D-mallinnus, sen jälkeen objektin viipalointi ja sitten itse esineen tulostus. Lopun pohdintaosassa käydään vielä läpi työn vaiheet ja mietitään kokonaisuutta.

2 3D-mallinnus

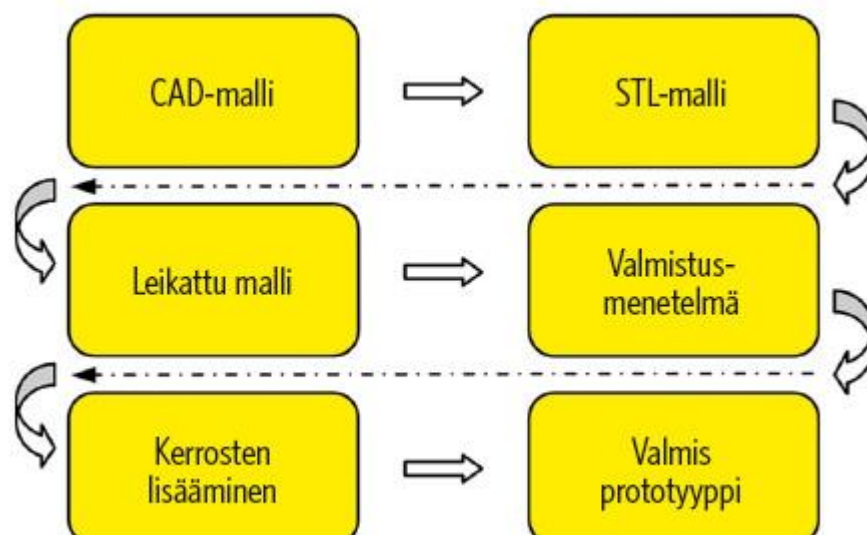
2.1 Mitä on 3D-mallinnus

Tietokonegrafiikassa 3D-mallinnus on minkä tahansa objektin kolmiulotteisen pinnan matemaattinen esittäminen siihen tarkoitettulla ohjelmalla. Tästä syntyvää tuotosta kutsutaan 3D-malliksi. (Prus 2016.) 3D-malleja hyödynnetään laajalti elämän eri osa-alueilla, esimerkiksi elokuva- ja pelistudioilla, mainostoimistoissa, teollisuudessa ja tieteen apuna. (Ryduch 2021)

3D-malleja käsitteleviä ohjelmia kutsutaan CAD-ohjelmiksi (Computer-aided design). Kun 3D-mallia hyödynnetään esimerkiksi valmistuksessa tai animaatioissa, tarvitaan sitä varten 3D-tiedosto. 3D-tiedosto pitää sisällään koordinaatit, jotka määrittelevät 3D-mallin. Pelkkien koordinaattien hahmottaminen on hyvin vaikeaa. CAD-ohjelma näyttää 3D-tiedostot visuaalisessa käyttöliittymässä. Tämä helpottaa mallintamista huomattavasti. (Ortiz 2020)

Virtuaalisista 3D-malleista voidaan tehdä fyysisiä objekteja joko 3D-tulostimilla tai perinteisemmällä tuotantomenetelmillä. (Siemens PLM.) Perinteisiin tuotantomenetelmiin lukeutuu esimerkiksi CNC-tekniikalla (Computer numerical control) toimiva jyrsin (engl. milling machine). Tekniikalla joko poraa tai leikataan materiaalia, esimerkiksi metallia tai puuta. Jyrsimen ja muun poraamisen eron on siinä, että jyrsimellä voi leikata materiaalia erilaisissa kulmissa ja liikkua eri akseleilla. (Theias 2019)

Fyysisten objektien luomisen vastakohtana on takaisinmallintaminen, jossa objektista tehdään 3D-malli 3D-skannerin avulla. 3D-malleja voidaan myös renderöidä eli piirtää 2D-malleiksi useisiin eri käyttötarkoituksiin. (Siemens PLM)

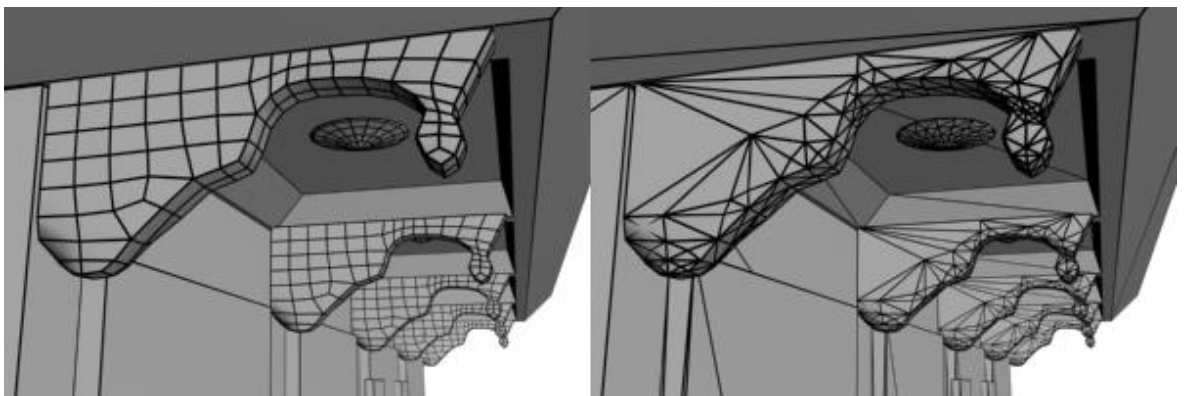


Kuva 1. Tulosteen matka suunnittelusta esineeksi (Bruder 2016)

2.2 3D-mallinnuksen menetelmät

3D-mallit rakentuvat 2D-muodoista, joita nimitetään monikulmioiksi eli polygoneiksi. Näitä tasoja ei yleensä näe, koska ne mukautuvat osaksi 3D-mallia. Mitä enemmän polygoneja on mallissa, sitä sulavapintaisempi ja yksityiskohtaisempi se on. Polygonien määrä lisää myös tiedoston kokoa ja niiden prosessointi vaatii enemmän konetehoa. (Vendelskis 2021)

3D-mallin geometrisia pintamuotoja kutsutaan *mesh*-verkoksi, "rautalankamalliksi" joka koostuu sadoista tai tuhansista yksinkertaisista geometrisista muodoista; polygoneista ja niiden yhdistyvistä kärkipisteistä (engl. vertices), särmistä (engl. edges) ja vähintään kolmikulmaisista tasoista, eli tahkoista (engl. faces). Mallin topologiaksi kutsutaan sitä, miten nämä muodot yhdistyvät toisiinsa ja muodostavat 3D-mallin mesh-verkon. Topologian tavoitteena on saavuttaa mallin pinnan haluttu muoto ja tarkkuus mahdollisimman vähäisillä tahkoilla. Polygoneja lisätään yleensä niihin 3D-mallin kohtiin, joiden pitää taipua tai liikkua. (Slick 2020)



Kuva 2. Kahdella eri topologialla toteutettu malli. (Turbosquad 3D Resources)

Pääasiallisia mallinnustyypppejä on CAD-ohjelmissa kolme: solid, wireframe ja surface. Jokaisella näistä on omat hyvät ja huonot puolensa. Myös muita mallinnustyypppejä on olemassa, mutta suurin osa niistä joko sisältyy pääasialliseen mallinnustyyppiin, tai sitten ne ovat erikoistuneet vain spesifiin tarkoitukseen. (Ortez 2020)

2.2.1 Solid-mallinnus

Solid-mallinnuksessa suunniteltavaa osaa esittämään luodaan kiinteämuotoinen objekti. Tällä mallinnuksella voidaan luoda monimutkaisia objekteja. Jokainen muoto esitetään omana objektinaan – ja jokainen muoto voidaan lisätä, vähentää tai leikata toiseen muotoon. Tämä helpottaa monimutkaisten muotojen mallintamista. (3D Systems)

Solid-mallintaminen on parametrissa. 2D-osasta voidaan ekstruusioida, ”puristaa” 3D-osa ja antaa sille parametreja kuten pituus tai halkaisija. Mikäli näitä osan parametreja myöhemmin muutetaan, muuttuu myös muu osaan liitetty kokoonpano automaattisesti. (Pechter 2018.) Yhteenrakennettuja mallinnuksia voidaan purkaa tarvittaessa alkuperäisiin toisistaan irrallisiin muotoihinsa. (3D Systems)

Solid-mallit pystytään näyttämään tarpeeksi yksityiskohtaisesti, jotta niitä voidaan käyttää digitaalisten prototyyppien luomisessa. Ennen kuin osa fyysisesti valmistetaan, on Solid-mallinnuksessa mahdollista tarkistaa, kuinka se sopii muiden osien kanssa, mikä on sen paino, kestävyys, ja esimerkiksi miten nesteet valuvat sen sisä- tai ulkopuolella. (Pechter 2018)

2.2.2 Wireframe-mallinnus

Wireframe-malli on särmä- tai ”luuranko”-mallinen esitys fyysisestä objektista.

Objekti koostuu sen särmiä tai keskiviivoja määrittelevistä pisteistä, viivoista, ympyröistä, kaarista ja käyristä. Wireframe-mallintamista voidaan käyttää yksinkertaiseen 3D-suunnitteluun, jonka avulla evaluaatioida ja iteroida muotoilua. Sen avulla voi katsella mallia mistä tahansa perspektiivistä ja sitä voi käyttää apuna solid- ja surface-mallintamisessa. (Autodesk 2020)

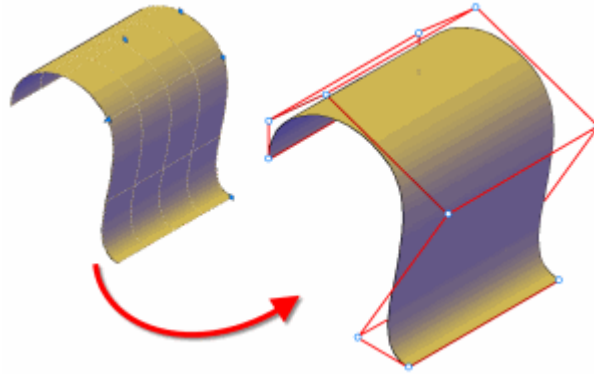
Jokainen Wireframe-mallin muodostava objekti pitää erikseen määritellä ja piirtää. Tästä syystä Wireframe-mallinnus on yksi aikaa vievimmistä mallinnustavoista. Sen avulla voidaan analysoida spatiaalisia suhteita, muun muassa kulmien ja särmien lyhintä välimatkaa. (Vskills 2020)

2.2.3 Surface-mallinnus

Surface-mallilla ei ole massaa tai tilavuutta, vaan se on loppumattoman ohut kuori. (Autodesk 2018 a.) Se on useimmista CAD-ohjelmista löytyvä matemaattinen menetelmä, jolla esittää kiinteämuotoisilta näyttäviä objekteja. (Techopedia)

Kuten kuva 4. havainnollistaa, on 3D-objektin pintoja kahdenlaisia: prosedural-pintoja (engl. Procedural surfaces) ja NURBS-pintoja (engl. Non-uniform rational basis spline). Prosedural-pinnat voivat olla assosiatiivisia ja pitää yhteyden muihin objekteihin, sallien niiden ryhmämuokkaamisen. NURBS-pinnat eivät ole assosiatiivisia, vaan niillä on yhdistyviä kärkipisteitä, jotka mahdollistavat mallin luonnollisen omaisen muokkaamisen. (Autodesk 2018 a)

Surface-mallinnuksella pystytään näyttämään objekteja monipuolisemmin kuin wireframe-mallinnuksella, mutta ei yhtä sofistikoituneesti kuin solid-mallintamisen avulla. Sitä hyödynnetään laajasti 3D-kuvittamisessa, arkkitehtuurisissa hahmotelmissa ja animaatioiden tekemisessä. Surface-malli ja solid-malli voivat näyttää samannäköisiltä näytöllä, mutta ne eivät ole samanlaisia: surface-mallia ei voi leikata auki, solid-mallin taas voi. (PcMag)



Kuva 3. Vasemmalla prosedural- ja oikealla NURBS-pinta (Autodesk 2018 b)

3 3D-tulostaminen

3.1 Mitä on 3D-tulostaminen

Materiaalia lisäävää valmistusmenetelmää, jossa 3D-mallista tehdään fyysinen objekti, kutsutaan 3D-tulostamiseksi. Tämän tekniikan toimintatapana on lisätä materiaalia kerros kerroksen päälle, kunnes tulostettava objekti on valmis. Tulostamiseen tarvitaan tiedosto, joka kertoo tulostimelle, miten tulostuksen pitää tapahtua. Yleisimmin käytetty tiedostomuoto on G-code. (Roberson 2021)

G-code pitää sisällään muun muassa tulostimen tarvitsemat X-, Y-, ja Z-akselien liikera-dat, sekä kertoo jokaisen tulostettavan kerroksen korkeuden. Mitä ohuempi jokainen tulostettava kerros on, sitä tarkempi 3D-tulosteesta tulee. (Roberson 2021)

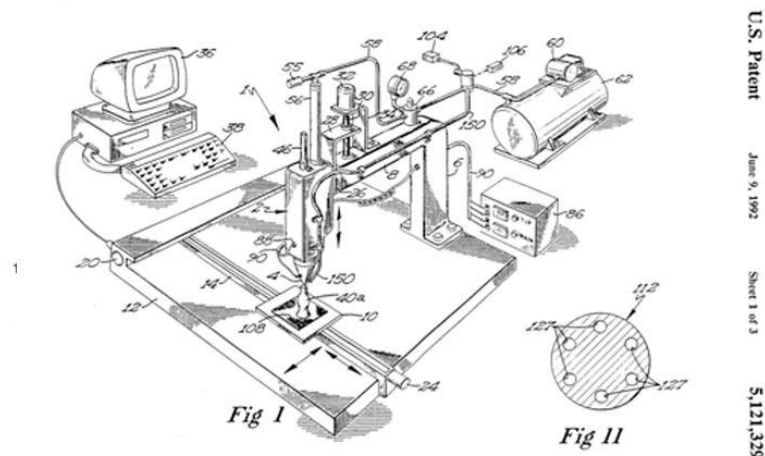
3.2 3D-tulostamisen historiaa

Vuonna 1981 japanilainen tohtori Hideo Kodama haki ensimmäisenä patenttia pikamallinnusta käyttävälle tekniikalle (engl. rapid prototyping), joka käytti laseria hartsin kovettamiseen. Rahoituksen puuttuessa patenttiprosessi jäi lopulta kesken. (Gregurić 2018)

Kolme vuotta myöhemmin ranskalaiset Alain Le Méhauté, Olivier de Witte, ja Jean Claude André hakivat patenttia stereolithografia-tekniikalle. (3DSourced a.) Kolmikko kuitenkin luopui patentista, koska heidän työnantajansa eivät nähneet, että idealla olisi kaupallista merkitystä. (Nguyen 2019)

Vain kolme viikkoa ranskalaisten patentin jälkeen yhdysvaltalainen Chuck Hull patentoi stereolitografia-laitteen, ja nimesi prosessin virallisesti stereolitografiaksi vuonna 1986. Hull kehitti myös STL-tiedostomuodon – digitaalisen tiedoston, jota 3D -tulostin pystyy lukemaan. (Brown 2021)

Hull oli yksi 3D Systems Corporation perustajajäsenistä. 3D Systems kehitti ensimmäisen kaupallisen pikamallinnuksen mahdollistavan laitteen SLA-1:n vuonna 1987 ja se tuli myyntiin seuraavana vuonna. Samana vuonna 1987 yhdysvaltalainen Carl Deckard haki patenttia SLS-tekniikalle (Selective Laser Sintering), ja sai patentin vuonna 1989 – kuten sai myös Scott Crump, joka patentoi (kuvassa 4.) ehkä nykyisin tunnetuimmaksi tulleen tulostustekniikan, FDM:n (Fused Deposition Modeling). (3D Printing Industry) Ensimmäinen FDM-tulostin julkaistiin vuonna 1991. (3DSourced a)



Kuva 4. Alkuperäinen FDM-patentti. (3DSourced b)

Metalliosia tulostava DMLS eli Direct Metal Laser Sintering näki päivänvalon vuonna 1989. Tekniikan kehitti saksalainen EOS GmbH. Metallin käyttö monipuolisti huomattavasti tulostusmahdollisuuksia. (Brown 2021)

Binder jetting eli sideaineen suihkutus kehitettiin Massachusettsin teknillisessä korkeakoulussa (MIT) vuonna 1993. Tulosteiden hyvälaatuisuuden takia amerikkalainen yhtiö Z Corporation hankki korkeakoululta yksinoikeuden tekniikkaan kaksi vuotta myöhemmin. Tekniikan hyödyntämisen metallien tulostamisessa aloitti ExOne -niminen yhtiö vuonna 1996. (Alexandrea 2021)

Läpi 1990-luvun syntyi uusia 3D-tulostamisen tekniikoita, ja sitä kautta patenteja kuten LOM (Laminated Object Manufacturing), BPM (Ballistic Particle Manufacturing), SGC (Solid Ground Curing) ja 3DP eli 'three dimensional printing'. 1990-luvun alussa nähtiin ennätysmäärä uusia alan toimijoita, mutta vain kolme niistä on enää toiminnassa: Stratasys, EOS ja 3D Systems. (3D Printing Industry)

1990-luvun ja 2000-luvun alun uudet 3D-tulostusteknologiat suuntautuivat täysin yritysmaailmaan, missä sitä hyödynnettiin enimmäkseen uusien tuotteiden innovointiin prototyyppien avulla. Luomistyötä nopeuttamaan kehitettiin uusia tekniikoita, kuten Rapid Tooling, Rapid Casting ja Rapid Manufacturing. Kaupallisia toimijoita syntyi lisää: muun muassa ZCorporation, Arcam, EnsivionTec, ExOne ja MCP Technologies tulivat uusina toimijoina alalle. Yleisesti hyväksytyksi sateenvarjotermiksi alalle saatiin Additive Manufacturing (AM), eli suomeksi ainetta lisäävä valmistus. (3D Printing Industry)

2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen puolivälissä alan toimijat alkoivat jakaantua kahteen eri ryhmään: kalliiden, monimutkaisia erikoisosa valmistavien tulostimien jouk-

koon, sekä edullisempien ja käyttäjäystävällisempien konseptitulostimien valmistajiin. Ensimmäinen alle 10000 dollarin laite julkaistiin vuonna 2007 3D Systemsin toimesta. (3D Printing Industry)

Vuonna 2007 nähtiin myös uusi ilmiö nimeltään RepRap. Vuodesta 2004 asti tohtori Adrian Boyerin ja hänen tiiminsä kehittämä RepRap-konsepti tuli ihmisten tietoisuuteen ja muutti 3D-tulostimet kaikkien saataville. Ideana oli luoda tulostin, joka pystyy tulostamaan suurimman osan uuden tulostimen osista. Ensimmäinen idean kautta kaupallisesti luotu rakennussarja tuli myyntiin vuonna 2009. Vuonna 2012 nähtiin aloitustason tulostimissa ensimmäisen kerran hartsia käyttäviä SLA- ja DLP-tekniikoita. Molemmat tulostimet rahoitettiin Kickstarter-joukkorahoitussivuston kautta. (3D Printing Industry)

Vuonna 2013 avaruusjärjestöt ESA ja NASA ryhtyvät kehittämään omia kuu- ja avaruustulostimiaan. Tarkoituksena on rakentaa laitteita, jotka pystyvät paikan päällä avaruudessa luomaan uutta ja kierrättämään olemassa olevaa huoltotarpeen vähentämiseksi. (Museum of art and design)

Viimeisen kymmenen vuoden aikana 3D-tulostimien hinnat ovat laskeneet paljon, ja ne ovat tulleet tutummaksi isommalle joukolle ihmisiä. Tulostettavien materiaalien määrä ja tulostettavien asioiden koko ovat molemmat kasvaneet: muun muassa hiili- ja lasikuitua sisältävät tulosteet ovat tulleet markkinoille, ja jopa kokonaisten talojen tulostamisesta on tullut yleisempää. Yhä useammat teollisuuden ja lääketieteen haarat hyödyntävät 3D-tulostamisessa yhä enemmän - 3D-tulostamisen historia on vasta alkutekijöissään. (BCN3D 2020 b)

3.3 FDM-tulostaminen

Pursotus eli FDM (engl. Fused Deposition Modeling) on yksi yleisimmin käytetyistä 3D-tulostustekniikoista helppokäyttöisyytensä vuoksi. Tulostuksessa termoplastinen filamentti lämmitetään sen sulamispisteeseen ja pursotetaan kuumennetun suuttimen pään läpi. Tietokoneohjelman ohjaama suutin kiinnittää ohuen kerroksen materiaalia tulostusalustalle. Kun yksi kokonainen kerros on tulostettu, siirtyy pursotuspää tulostamaan uuden kerroksen. (Kumar, Pandey & Wimpenny. 2019, 46)

Mikäli tulostettavassa objektissa on tyhjän päälle tulostuvia rakenteita, tarvitaan niille usein tukirakenne alle. Yleisesti hyväksytyyn säännön mukaan yli 45 asteen kulman ylittäviä ulokkeita pidetään tukirakennetta tarvitsevinä. Yleisimmin käytettyjä tukivaihtoehtoja ovat lineaariset- ja puumalliset tuet. Yhden suuttimen tulostimissa tukimateriaali on sama

kuin itse tulostusmateriaali, useamman suuttimen tulostimissa tukimateriaali voi olla tulos-
tettu materiaalista, joka hajoaa pois esimerkiksi vedessä. (Chakravorty 2021)

3.3.1 FDM-tulostimet: esimerkkejä

Esimerkkinä kuluttajille suunnatusta FDM-tulostimesta on tsekkiläinen Prusa i3 MK3S+. Hintansa suhteen harrastetulostimien keskikastiin asettuvan Prusan saa joko kasaussar-
jana (769 euroa) tai valmiiksi kasattuna (999 euroa). Kyseessä on avoimen kehyksen tu-
lostin. Kehyksessä on kiinni sataan asteeseen lämpenevä, automaattisesti vaakatasoon
asettuva tulostusalusta, joka liikkuu edestäpäin katsottuna taakse ja eteen. Tulostimen
näyttönä on yksivärinen LCD ja tulostimen valikoissa liikutaan valintanuppia pyörittämällä.
Tulostusohjelmanaan laite käyttää PrusaSlicer -sovellusta. (Hoffman 2021)

Tulostuspinta-ala on enimmillään 25 cm x 21 cm x 21 cm (korkeus, leveys, syvyys). Prusa
i3 MK3S+ tulostaa useita erilaisia filamentteja: PLA, ABS, PETG, nylon, ASA, TPU sekä
sekoitefilamentteja. Tulostuspään maksimilämpötila on 300 astetta. Tulostimeen on mah-
dollista saada lisäosa, jonka avulla tulosteista saa viisivärisiä. Tulostusohjelmanaan laite
käyttää PrusaSlicer -sovellusta. Tiedostot siirtyvät laitteeseen muistikortin avulla. (Hoff-
man 2021)



Kuva 5. Prusa i3 MK3S+ -tulostin (Original Prusa i3 MK3S+)

FDM-tulostimia on myös ammattikäyttöön. Yksi niistä on Intamsys Funmat HT Enhanced.
Kyseessä on metallirunkoinen suljetun tilan tulostin. Laite painaa 43 kg ja maksaa noin

6800 euroa. Aina 450 asteeseen nousevan tulostuspäänsä avulla laite kykenee tulostamaan vaatimuksiltaan haastaviakin filamentteja. PEEK, ULTEM, PEI, PC sekä kaikki alempien lämpötasojen filamentit tulostuvat laitteella. (All3DP 2020)

Automaattisesti vaaiuttuva tulostusalusta lämpenee aina 160 asteeseen asti. Täysin eristetty, suljettu tulostuskammio kykenee pitämään 90 asteen lämpötilan tulostuksen aikana. Laitetta käytetään kosketusnäytön avulla, ja se kykenee tulostaan korkeintaan suuntaansa 260 mm:n tulosteita. Tiedot laitteeseen siirtyvät joko muistikortilla tai USB-portin kautta. (All3DP 2020)

3.4 Hartsitulostaminen

3.4.1 SLA

SLA (Stereolithography Apparatus) on nestemäiseen väliaineeseen perustuva additiivinen tulostustekniikka. UV-aallonpituudella olevan valon avulla nestemäinen hartsi kovetetaan ohuisiin toistensa päälle tuleviin kerroksiin. (Jordan. 2019, 57.) Tulostuksen alussa tulostusalusta laskeutuu hartsilla täytettyyn altaaseen jättäen yhden tulostustason verran tilaa tulostusalustan ja altaan väliin. (Varotsis a)

Yksittäinen UV-laserin kierto ei riitä täysin kovettamaan nestemäistä hartsia. Tästä seuraavat laserin kierrot auttavat edellisiä kovettuneita kerroksia sulautumaan toisiinsa van-kasti. Tällä tavoin tulostetuilla osilla on isotrooppisia mekaanisia ominaisuuksia. Mekaanisesti parhaat kovuus- ja lämmönkesto-ominaisuudet saavutetaan jälkikäteen tehtävällä kirkkaan UV-valon tai auringonvalon alla tapahtuvalla kovettamisella. (Varotsis a)

SLA-tekniikan etuihin kuuluu muun muassa sen helppo valvonta, tulostuskoon laaja skaala, tulostuksen- ja tulostuspinnan tarkkuus sekä saatavilla olevien hartsinesteiden monipuolinen tarjonta. (Jordan. 2019, 57.)

3.4.2 DLP

Digital Light Processing eli DLP on tekniikkana hyvin samankaltainen kuin SLA. Erona tekniikoissa on se, että UV-laserilla tapahtuvan pistepiirtämisen tilalla DLP-tulostustekniikassa käytetään tuhansista UV-LED:istä koostuvaa valoa. Valo kovettaa hartsia kerros kerrallaan – tämä tekee DLP-tekniikasta SLA:ta nopeamman. (Pires 2019).

Jokaisen kerroksen kuviointi rakentuu kääntyvien mikrokokoisten peilien (engl. Digital Micromirror Device; DMD) avulla. Peilit sijaitsevat UV-LED:ien ja hartsin välissä. Ne heijastavat

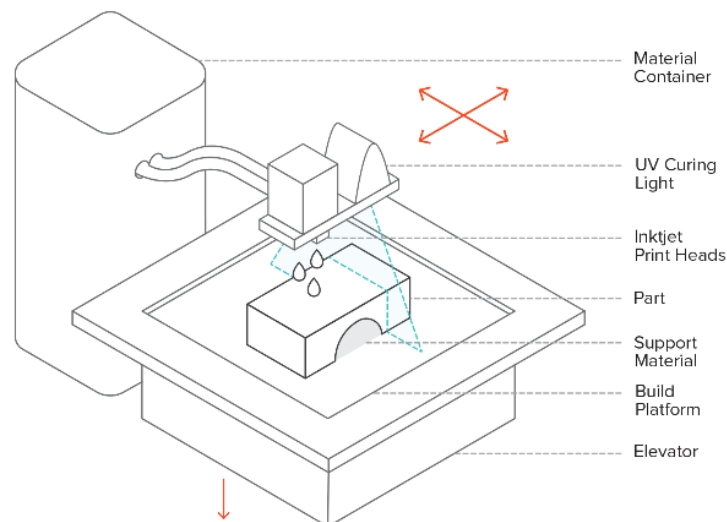
valon haluttuihin kohtiin kerroksessa ja saavat siten aikaan hartsikerroksen polymerisaation eli tässä tapauksessa kovettumisen. (Pires 2019).

3.4.3 Materiaalin suihkutetus

Materiaalin suihkutetus (engl. Material Jetting) on 3D-tulostustekniikka, joka mukailee 2D-mustesuihkutulostimien toimintaperiaatetta. Tässä tekniikassa tulostuspää jakaa tulostusalustalle valoherkkää materiaalia olevia, 30-60 asteeseen esilämmitettyjä polymeeripisaroita, jotka UV-valo kovettaa kerros kerrokselta muodostaen lopulta valmiin tulosteen. (Varotsis b)

Materiaalin suihkutetus on tarkka tulostustekniikka, joka sallii pienimmillään jopa 0,013 mm korkeisten kerrosten tulostamisen. Tulosteiden pinta on sileä ja yksityiskohdat tulevat tarkasti esille. Tekniikan muihin etuihin lukeutuvat muun muassa moniväriset tulosteet sekä mahdollisuus käyttää useita eri materiaaleja samassa tulosteessa. (AMFG b)

Tulosteiden käyttökohteina ovat muun muassa erikoisosien, prototyyppien ja valumuottien luominen sekä anatomisesti tarkkojen lääketieteellisten mallien valmistaminen. Materiaalin suihkutuksen heikkouksia ovat tulosteiden heikot mekaaniset ominaisuudet, hidas tulostusnopeus sekä erilaisten tulostusmateriaalejen rajallisuus. (AMFG b)



Kuva 6. Materiaalin suihkutustekniikka. (Vassos)

3.4.4 Hartsitulostimet: esimerkkejä

Formlab Form 3 on ammattilaiskäyttöön suunnattu, vain vähäistä ylläpitoa vaativa SLA-tulostin. Hartsisäiliö on laitteen takana, ja se täyttää hartsialtaan automaattisesti ilman,

että käyttäjän tarvitsee koskea hartsiin. Vaihdetavan hartsisäiliön ja -kasetin avulla hartsia on mahdollista vaihtaa tulostinta putsaamatta. (Baguley 2021)

Form 3:n käyttää LPU-tekniikkaa (engl. Light Processing Unit) tulostamiseen. Tekniikassa laser ja muu optiikka pidetään omassa suljetussa ympäristössään, jossa ne liikkuvat vasemmalle ja oikealle. Yksittäisen galvanometrin mittaamien tietojen perusteella laseria ohjataan vertikaalisesti, samalla kun LPU liikkuu horisontaalisesti. Tämän tekniikan avulla tulostimen koko optiikan ei tarvitse enää olla hartsialtaan alla, näin mahdollistaen paremman tulostusresoluution. (Papp 2020.) Form 3:n XY resoluutio on 0,025 mm ja Z resoluutio käyttäjävalintainen 0,025–0,3 mm. (Adey 2019)



Kuva 7. Formlabs Form 3 -tulostin. (Formlabs)

Form 3 käyttää 3D-mallien slicing- eli viipalointiohjelmana Formlabin omaa PreForm -ohjelmaa. Laitteen suurin mahdollinen tulostuskoko on 14 x 14 x 18,5 cm. Laitteen hinta on noin 3300 euroa. (Baguley 2021)

Anycubic Photon S on harrastelijakäyttöön suunnattu hartsitulostin. Se käyttää DLP-tekniikkaa, ja hartsin kovettamiseen laitteessa on LCD täynnä UV-ledejä. Sen pienin kerroksen tulostuskorkeus on 0,025 mm ja XY resoluutio 0,047 mm. (Top 3D Shop)

Vaikka laite onkin pääasiallisesti suunnattu kotikäyttöön, voi sitä sen korkean tulostustarkkuuden myötä käyttää myös esimerkiksi korujen vahamallien valmistamiseen. (Top 3D Shop.) Tulostimella pystyy valmistamaan korkeintaan 115 x 65 x 165 mm kokoisia tulosteita, ja se maksaa noin 200 euroa. (3D-Cadsolutions)

3.5 Metallitulostaminen

3.5.1 DMLS

Metallin laser sintraus DMLS (Direct metal laser sintering) on metallia lisäävä 3D-tulostusmuoto. Sitä käytetään sekä metalliosien massatuotantoon että prototyyppien pikamallinukseen. (Jones 2021)

DMLS käyttää jauhepetimenetelmää tulostusmuotonaan. Tulostus tapahtuu suljetussa suojakaasulla täytettävässä tulostuskammiossa. Suojakaasu valitaan tulostettavan metallimateriaalin mukaan. Tulostuksessa metallijauhekerros levitetään sulalla tulostusalueelle, jonka jälkeen jauhekerros sintrataan laserilla valikoidusti kerros toisensa jälkeen, kunnes objekti on valmis. (Savonia.)

Laser kuumentaa metallihiukkaset ja saa ne siten hitsautumaan toisiinsa. Metallihiukkasten koko on yleensä 20–40 mikrometriä. Pienempi hiukkaskoko mahdollistaa tarkemman tulostusresoluution. Koska tulostus tapahtuu sintraamalla, tulee metallitulosteesta huokoisempi kuin sulattamalla. Sintraus mahdollistaa metalliseokset, joissa on useita eri sulamispisteitä - jopa metalleja ja muoveja voidaan yhdistää. (Jones 2021)

Mikäli ylimääräistä jauhetta jää, se pystytään kierrättämään ja käyttämään uudelleen. Jauhepetijärjestelmää hallitaan sen parametrejä muuttamalla. Esimerkiksi partikkelikoko, laserin teho, sekä tuki- ja lämpönielujen koko ja sijainti vaikuttavat tulostuksen laatuun ja onnistumiseen. (Savonia)

3.5.2 SLM

SLM (Selective laser melting) on metallia sulattava jauhepetimenetelmä. Menetelmä on samankaltainen kuin DMLS-tulostaminen. Molemmissa on esimerkiksi suljettu oman atmosfäärin omaava tulostuskammio metallijauheelle. Metallijauhe levittyy hyvin ohueksi kerrokseksi tulostusalueelle, jossa se sulatetaan valikoidusti. Kun kerros on sulatettu, tulostusalueesta laskeutuu yhden kerroksen ja metallijauhe levittyy jälleen. Usein tulosteisiin pitää myös materiaalin painon takia tulostaa tukirakenteet tulostettavan osan ulokkeisille kohdille. (Murphy 2019)

SLM eroaa DMLS-tulostamisesta siinä, että se ei sintraa vaan sulattaa metallijauheen nestemäiseen muotoon. Sulatus mahdollistaa laajan metallijauheskaalan. SLM mahdollistaa tulosteelle monimutkaiset muodot ja sisäiset ominaisuudet, joita olisi vaikea luoda perinteisemmässä tuotannossa. (Murphy 2019)

Tulostuksen jälkeen osat pitää leikata irti tulostusalusta, esimerkiksi vannesahalla. Tulostetut tukirakenteet pitää myös poistaa. Tulostetun esineen pinnan epätasaisuudet saattavat vaatia hiontaa jälkikäteen. (Murphy 2019)

3.5.3 Suorakerrostus

Suorakerrostus (engl. Directed Energy Deposition) sulattaa materiaaleja, useimmiten lan-kaa tai jauhetta, suoraan työkappaleeseen kerros kerrallaan. (Dassault Systèmes.) Yleisimmin materiaalina on metalli, mutta tekniikkaa voi käyttää myös muovin ja keramiikan kanssa. (Loughborough University.) Tekniikka jaetaan kolmeen eri kategoriaan käytettävän energiamuodon mukaisesti: laser, elektronisuihku ja plasma. (Engineering Product Design). Tätä tekniikkaa käyttävät laitteet vaativat suljetun toimintaympäristön sekä paljon tilaa, ja tästä syystä sitä yleisesti käytetäänkin vain teollisuudessa. (Dassault Systèmes)

Tyypillisessä suorakerrostusta tekniikkanaan käytävässä laitteessa on sulaa materiaalia tulostuspinnalle työntävä suutin, joka toimii neljän tai viiden akselin varassa. (Loughborough University) Usean akselinsa avulla tulostuspää pääsee liikkumaan paljon vapaammin eri suuntiin kuin esimerkiksi perinteisempi pursotustulostimen tulostuspää, jolla on vain x-, y- ja z-akselit. (Dassault Systèmes)

Tekniikalla luotuja metalliosia voidaan jälkikäteen lämpökäsitellä ja koneistaa aivan kuten mitä tahansa muutakin metallia. Suorakerrostuksen eri muotoja hyödynnetään muun muassa ase-, öljy-, avaruus- ja meriteollisuudessa luomaan ja korjaamaan erikoisosia. (Engineering Product Design)

Tekniikan eduiksi voidaan lukea korjaustulostaminen, kooltaan isot ja kestävät tulosteet, helppo materiaalien vaihtaminen sekä vähäinen määrä hukkamateriaalia. Suorakerrostuksen negatiivisiin puoliin kuuluu sen korkea hankintahinta, tukirakenteiden puuttuminen sekä alhainen tulostusresoluutio, joka vaatii usein jälkikäsitelyä koneistamisen muodossa. (Engineering Product Design)

3.5.4 Metallitulostimet: esimerkki

Sulattavaa jauhepetimenetelmää käyttävä saksalainen Trumpf TruPrint 1000 on suunniteltu pienten teollisuusosien valmistukseen. SLM-tulostimen kaksi 200 watin kuitulaseria skannaavat tulostuspetiä yhtä aikaa, ja laitteessa on kallistumiseen kykenevä jauhepedin pyyhkijä. Molemmat ominaisuudet nopeuttavat laitteella tulostamista. Laitteella pystyy tekemään joustavia ja syöpymistä kestäviä esineitä, koska se kykenee tulostamaan amorfisia, eli ”ilman muotoa olevia” metalleja. Tämän ominaisuuden ansiosta esineistä saadaan kevyempiä nopeammassa ajassa. (Kauppila 2021)

Kaasuina laitteessa voi käyttää argonia ja typpeä. Laitteen tulostustarkkuuden voi valita 10 ja 50 mikrometrin väliltä. Laite painaa kahdella laserilla varustettuna 750 kg. (Btech a.) Tulostettavien esineiden enimmäiskoko on 100 x 100 x 100 mm. Trumpf TruPrint 1000 maksaa noin 170 000 dollaria. (Kauppila 2021)



Kuva 8. Trumpf TruPrint 1000 SLM-tulostin. (btech b)

3.6 Jauhetulostaminen

3.6.1 SLS

Selective Laser Sintering (SLS) eli jauhemateriaalien valikoiva lasersintraus on yksi suosituimmista teollisista polymeerien 3D-tulostustekniikoista. Se on yli kolmen vuosikymmenen aikana kehittynyt hyödylliseksi prototyyppien luomisessa ja nykyisin myös osien tuotannossa. (AMFG 2020).

SLS-tekniikka käyttää korkeatehoista hiilidioksidilaseria ja termoplastista polymeerijauhetta tulostettavien osien luomiseen. SLS-tulostuksessa jauheasetti asetetaan tulostimeen, joka lämmittää jauheen lähelle sulamispistettä. Tulostuksen ensimmäisessä vaiheessa pyyhkijä (engl. re-coater) asettaa tulostusalustalle kerroksen tulostusjauhetta, jonka hiukkasista hiilidioksidilaseri sintraa valikoidut kohdat tulostettavaan kerrokseen. Tämän jälkeen pyyhkijä asettaa uuden kerroksen jauhetta tulostusalustalle, ja alusta laskeutuu yhden kerroksen alaspäin – sama prosessi jatkuu, kunnes tulostettava objekti on valmis. (Gregurić 2019.) Tulosteen ontot kohdat täyttyvät automaattisesti käyttämättömällä jauheella – tämä poistaa tukien tarpeen SLS tulosteissa. (AMFG 2020)

3.6.2 Sideaineen suihkutus

Sideaineen suihkutuksessa (engl. Binder Jetting) sidotaan jauhemainen perusaine neste-mäisellä sidosaineella. Yleisimmin perusaineena käytetään hiekkaa, kipsiä, keramiikkaa, metallia tai muovia. (Alexandrea 2021)

Materiaalien monipuolisuus on yksi suihkutustekniikan hyvistä puolista. Iso tulostusala sekä tulostamisen nopeus ja sitä kautta tulostusmäärä ovat myös tekniikalle eduksi. (Schwaar 2021)

Tulostimissa on yleensä kaksi tankkia sekä tulostusalusta toisessa tankeista. Tulostuksen alussa toinen tankeista on täynnä tulostukseen käytettävää jauhetta, ja toinen tyhjänä. Tuloste muodostuu tyhjään tankkiin, jossa tasoittava rulla levittää jauhetta ensimmäisen kerroksen tulostusalustalle. Tulostuspää suihkuttaa 80 mikrometrin kokoisia sidosainepi-saroita jauheeseen muodostaen kiinteän kerroksen tulostetta kerros kerrokselta. (Alexandrea 2021) Erillisiä tukirakenteita ei tarvita, koska tulosteessa oleviin rakoihin jäävä jauhe antaa tarpeeksi hyvän tuen yläpuolelle tulostuvalle kerrokselle. (Schwaar 2021)

Sideaineen suihkutus -tekniikalla on mahdollista luoda esimerkiksi värillisiä keramiikkatu-losteita lisäämällä väri samaan aikaan sidosainepisaroiden kanssa. Tuloste pitää lopuksi puhdistaa ylimääräisestä tulostusjauheesta. Tulosteiden jälkikäsittelyyn vaikuttaa käytetty materiaali. Esimerkiksi metallituloste yleensä sintrataan eli kuumentamalla kovetetaan lo-pulliseen muotoonsa. (Alexandrea 2021)

3.7 Muut tulostamismuodot

Kerros laminointia (engl. Sheet Lamination) tehdään paperilla, muovilla, metallilla tai kera-miikalla. Kerros valittua materiaalia laitetaan alustalle, ja siihen leikataan haluttu kuvio. Tekniikasta riippuen leikkaus tapahtuu joko ennen tai jälkeen sen, kun seuraava kerros materiaalia kiinnitetään edellisen päälle. (Silbernage 2018)

Keramiikkaa, paperia ja muovia leikataan tulosteesta riippuen joko laserilla tai terällä ja metallitulosteet jyrsitään. Paperia ja muovia laminoitaessa väliaineina toimivat liima tai muovi, metallikerrokset toisiinsa hitsaa atomitason muutokset (atomic migration) levyjen välillä. (Silbernage 2018)

Kerros laminointi on kustannustehokas ja nopea tapa valmistaa näyte kappaleita. Tekniikalla ei voi valmistaa rakenteellisesti toimivia malleja, joten sen hyödyntäminen on rajal-lista. (Nikhil 2020)

4 Filamentit

4.1 PLA

Polylaktidi eli PLA on lämpömuovattava kestopuovi, joka on valmistettu uusiutuvista materiaaleista. Se on maailman eniten käytetty biomuovi. Polylaktidin valmistuksessa käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi maissitärkkelys ja sokeriruoko. (Makerbot b)

Luonnonmateriaaleista saatu tärkkelys lämmitetään entsyymeiden ja muiden kemikaalien kanssa, jotta se luovuttaa dekstroosia – tietynlaista sokeria. Dekstroosi fermentoidaan ja tuloksena syntyy maitohappo. Maitohappo kondensoidaan kemiallisten reaktioiden avulla lopulta muoviksi joka, kuten muutkin tulostusfilamentit, keritään halkaisijaltaan 1,75 mm muovilangaksi kerälle. (O'Connell 2021)

PLA on yleisimmin käytetty muovi FDM-tulostimissa. Se on helppo tulostaa: PLA ei vaadi suljettua tulostusympäristöä, korkeaa lämpötilaa tai lämmitettyä tulostusalustaa. Sitä saa kaikissa väreissä, se on edullinen, myrkytön ja biohajoava. Täydellinen se ei kuitenkaan ole, sillä sen taivutuslujuus ja lämmönkestävyys ovat heikkoja. (O'Connell 2021)

4.2 ABS

ABS on yksi suosituimmista 3D-tulostusmuoveista. Se on edullista, ja sillä on hyvä iskun- ja lämmönkestävyys. ABS:llä tehdyn tulosteen jälkikäsittely onnistuu mekaanisesti sekä kemikaaleilla, kuten asetonilla. ABS on vaikeahko muovi tulostaa. Ilmankosteus on tulostettavalle ABS:lle haitallista. Itseensä kosteutta imenyt ABS saattaa aiheuttaa heikkolaituisia tulosteita, tai jopa tukkia tulostimen suuttimen. (AMFG a)

Ensimmäinen tulostuskerros on haastava saada pysymään kiinni tulostusalustassa ABS:lla tulostettaessa. Usein kiinnittymistä avustamaan tulostusalustalle laitetaan liimaa. Tulostus vaatii yleensä n. 245 asteen lämpötilan suuttimelta. Lämmitettävä tulostusalusta, suuttimen tuulettimien säätäminen, suljettu tulostustila ja objektin ympärille tulostettava reunus (engl. brim) ovat suosituksia hyvän tulostusjäljen aikaansaamiseksi. (Makerbot a)

ABS-muovista valmistetaan muun muassa leluja, työkalun osia ja prototyyppisiä. (AMFG a)

4.3 PETG

Maailman käytetyimmistä muovista PET:sta glykolilla muokatussa PETG:ssä on erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Erityisesti polylaktidiin (PLA) verrattuna PETG on joustava sekä kestää hyvin kosteutta, lämpöä ja kemikaaleja. Muotoilijat ja suunnittelijat 3D-tulostavat PETG-muovia kuluttajapakkausten suunnittelu- ja prototyyppitys -prosesseissa. (Makerbot c)

Tehdasinsinöörit ja koneistajat käyttävät hyväkseen PETG-muovin mekaanisen rasituksen kestävyttä luodessaan teollisessa tuotannossa tarvittavia apuvälineitä ja mukautettuja koneiden osia. Muoville on ominaista tulosteiden kiiltäväpintaisuus.

(Makerbot c)

4.4 PA

PA eli polyamidimuovi tunnetaan myös nimellä nylon. Sen puolikiteinen rakenne tekee siitä puolijoustavan sekä kulutusta, iskuja ja lämpöä kestävä muovi. PA:n lämmönkestävyys on noin 120 astetta. (BCN3D 2020 a)

Edellä mainittujen ominaisuuksien vuoksi se soveltuu vaativimpiinkin teknisiin ratkaisuihin. Käyttöesimerkkejä ovat muun muassa hammasrattaat, laakerit, aluslevyt, tulpat ja työkalujen kädensijat – eli yleisesti ottaen vaativissa olosuhteissa käytettävät väsymistä kestävät rakenteelliset osat. (BCN3D 2020 a)

4.5 PC

Polykarbonaatti (PC) on kevyt mutta erittäin kestävä läpinäkyvä muovi. Se päästää valoa lävitseen mutta sen joustavuus, vetolujuus ja iskunkestävyys ovat lasia paremmat ja siksi sitä voidaan hyvin käyttää sovelluksissa, joissa lasi ei välttämättä kestäisi.

(3DSourced c)

Polykarbonaatin lämmönkestävyys on huippuluokkaa – se kestävä lämpötiloja aina 150 asteeseen asti ilman että sen rakenne muuttuu. Ilmasta kosteutta helposti itseensä imevänä polykarbonaatti-muovi on parasta säilyttää ilmatiiviissä pakkauksessa, jotta sen kestävyys ja tulostusjälki eivät kärsisi. (Simplyfy3D)

Tällä muoville optimaalisin tulostusympäristö on suljettu tulostin, jossa on korkeita lämpötiloja kestävä tulostuspää ja -alusta. Useisiin polykarbonaatti-filamentteihin on kuitenkin lisätty ainesosia, jotka mahdollistavat sen tulostamisen sille tavanomaista alemmissa lämpötiloissa. (Simplyfy3D)

4.6 Puu- ja metallisekoitemuovit

Yleisimmin puusekoite on PLA-pohjainen muovi, joka valmistajasta riippuen sisältää noin 30 prosenttia jauhettua puu-, korkki- tai muuta puumaista johdannasta. Lisätyn jauheen ansiosta tulosteiden ulkoasu muistuttaa oikeaa puupintaa. (Simplyfy3D b)

Puusekoitemuovit ovat vähemmän hankaavia kuin esimerkiksi metalli- ja hiilikuitua sisältään pitävät muovit, joten ne eivät vaadi tulostimelta erikoissuuttimia. Puusekoitemuoveihin lisättyjen puuhiukkasten takia suuttimen kannattaa olla yleisesti eniten käytettyä 0,4 mm suutinta isompi – esimerkiksi 0,5 mm tai isompi. (Simplyfy3D b)

4.7 Tulostushartsit

Tulostushartsit (engl. resin) on nestemäinen liuos, joka koostuu monomeereista ja oligomeereista – molekyyleistä ja niiden yhdisteistä. Niistä muodostuu lyhyitä, lähinnä hiiliatomeista ja funktionaalisista ryhmistä koostuvia lyhyitä polymeeriketjuja, jotka ovat nestemäisessä muodossa. (Flynt 2018)

Fotopolymerasaation tapahtuessa valonsäteestä tuleva energia saa monomeerit ja oligomeerit reagoimaan keskenään rakentaen pidempiä, jatkuvasti muodostuvia polymeeriketjuja. Hartsin kovettuminen kerros kerrokselta ei tapahdu kokonaisvaltaisesti kerralla vaan osa monomeereista ja oligomeereista jää reagoimattomaan tilaan ja siten ne pystyvät yhdistymään seuraavaan tulostuskerrokseen. Tällä tavoin molekyylitasolla yhdistyvien kerrosten vetolujuus on sama Z-, X- ja Y-akseleilla. (Flynt 2018)

5 Ideasta esineeksi – esimerkki 3D-objektin luomisesta

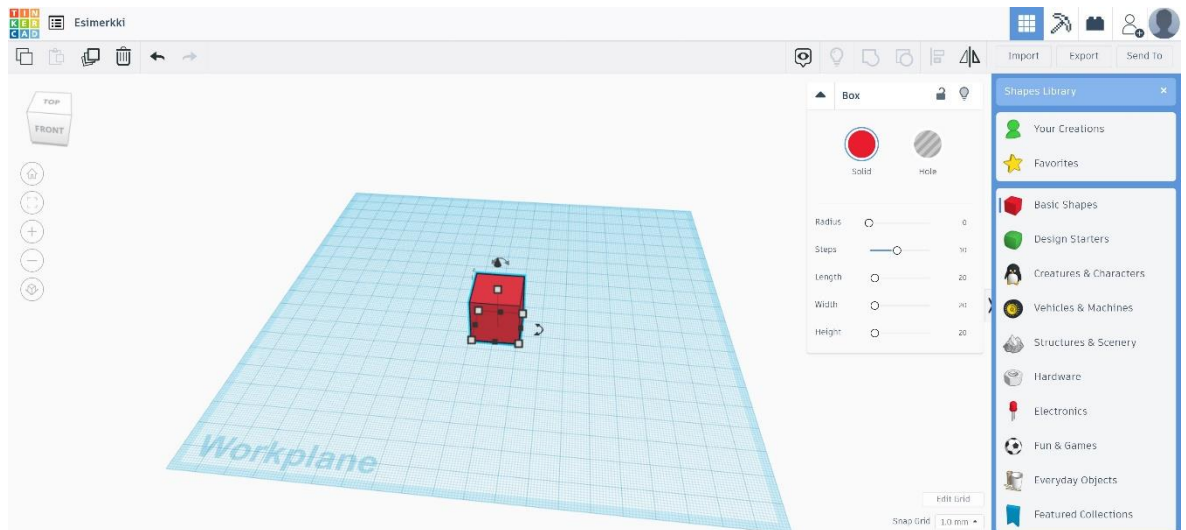
Esimerkkitapauksessa suunniteltiin lintujen talviruokintaa varten ruokinta-automaatti. Vaatimuksena automaatilla oli riittävä siemenkapasiteetti sekä mahdollisimman hyvä toimivuus lumi- ja vesisateiden yllättäessä. Automaatti haluttiin tehdä osista, joiden maksimimitta olisi korkeintaan 14 cm suuntaansa, jotta mahdollisimman moni tulostin kykenisi tulostamaan automaatin rakentamiseen tarvittavat osat.

Ruokinta-automaatti koostuu kahdeksasta osasta. Osat liitetään toisiinsa kuudellatoista pienellä M3-kokoisella ruuvilla ja mutterilla. Tällä tavoin rakennettuna automaatista tulee kestävä, mutta toisaalta myös helposti korjattava, mikäli yksi osista kuitenkin rikkoutuu. Kahdeksan erillistä osaa mahdollistavat myös tarvittaessa värien monipuolisen käytön.

Automaatti täytetään päältä. Katto-osa nostetaan pois, ja (esimerkiksi) auringonkukan siemenet kaadetaan sisään. Automaatin jyrkkä keskiosa ohjaa siemenet tasaisesti molemmin puolin automaattia. Siemenet laskeutuvat syöttökaukaloihin täyttäen ne. Niin kauan kuin ruokinta-automaatissa on siemeniä, pysyy myös syöttökaukalo aina täynnä.

5.1 Mallintaminen

Idean mallintamiseen käytettiin Autodeskin selainpohjaista Tinkercad-alustaa. Kyseessä on ilmainen ohjelma, joka tarjoaa helpon mutta tarpeeksi monipuolisen käyttöliittymän suhteellisen suoraviivaisten esineiden mallintamiseen. Tinkercad soveltuu niin aloittelijoille kuin mallintamista enemmän harrastaneillekin. Ohjelma tarjoaa eri muotoisia elementtejä, joista mallintaminen aloitetaan. Pyörää ei tarvitse keksiä uudelleen, koska yleisimmät muodot ja esineet löytyvät valikosta jo valmiina. Osa muodoista ja esineistä on Tinkercadin luomia, osa käyttäjien. Käyttäjät voivat tuoda ohjelmaan myös valmiita .stl-, .obj- ja svg-tiedostojaan. Kun haluttu muoto on löytynyt, se raahataan siniselle mallinnus -alustalle.

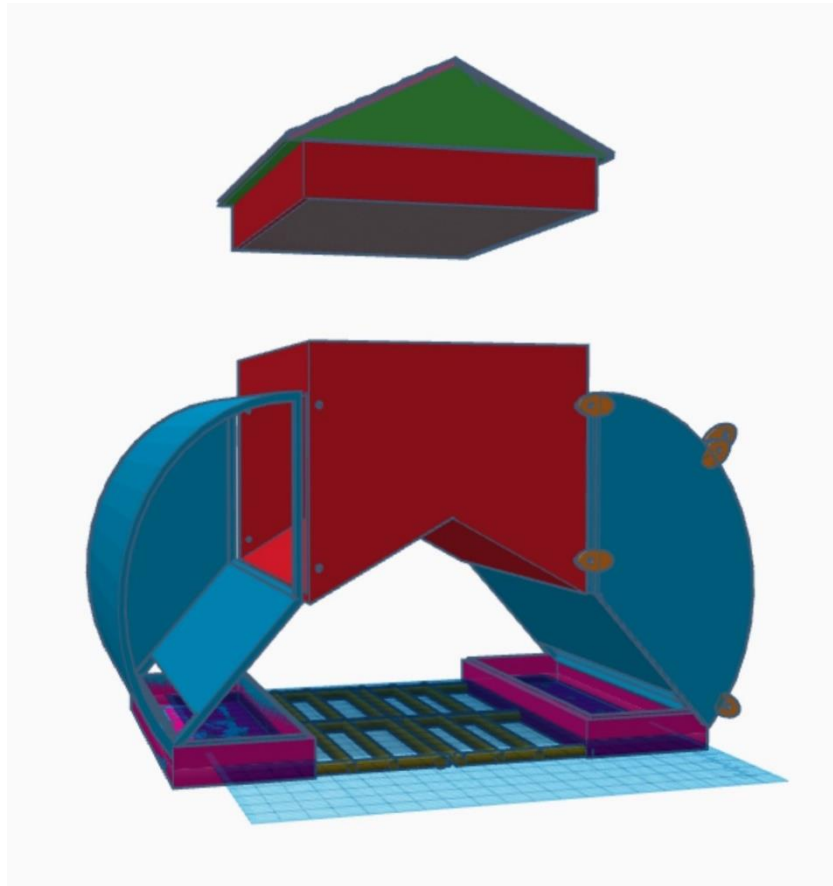


Kuva 9. Tinkercad-työpöytä, jossa keskellä mallinnettava objekti, vasemmalla eri katsukulmat ja oikealla valitun objektin oma valikko, sekä objektivalikko.

Valittuja objekteja venytetään, kavennetaan, lisätään ja vähennetään toisiinsa ja toisiin. Useissa objekteissa on oma valikkonsa, josta voi muuttaa pituutta, leveyttä, korkeutta, sädettä ym.

Lintujen ruokinta-automaatin mallintaminen tehtiin perusmuotoja käyttäen, eli neliöistä, kolmioista ja ympyröistä. Ainoa suunnittelua helpottava poikkeus oli tiilimäinen katto-grafiikka, joka tuotiin Tinkercadiin ja venytettiin kattoon sopivaksi.

Suunnittelu alkoi perinteisesti neliöstä. Mallin tulostusversio ei ollut valmiina mielessä, vaan työ muuttui sitä mukaa kun siihen lisättiin osia. Lopullinen malli hioutui kompromissina: halutut ominaisuudet ja toisaalta asetetut rajoitukset piti saattaa toimivaksi kokonaisuudeksi.

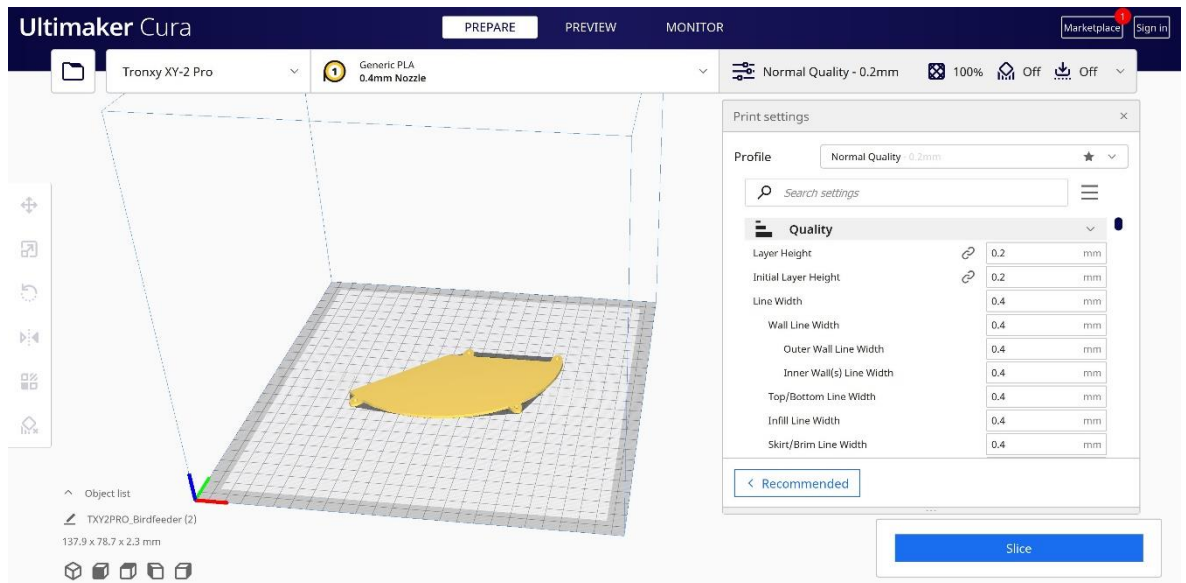


Kuva 10. Kuvassa lopullinen malli. Sivuja ja katto irti toiminnallisuuden näyttämiseksi.

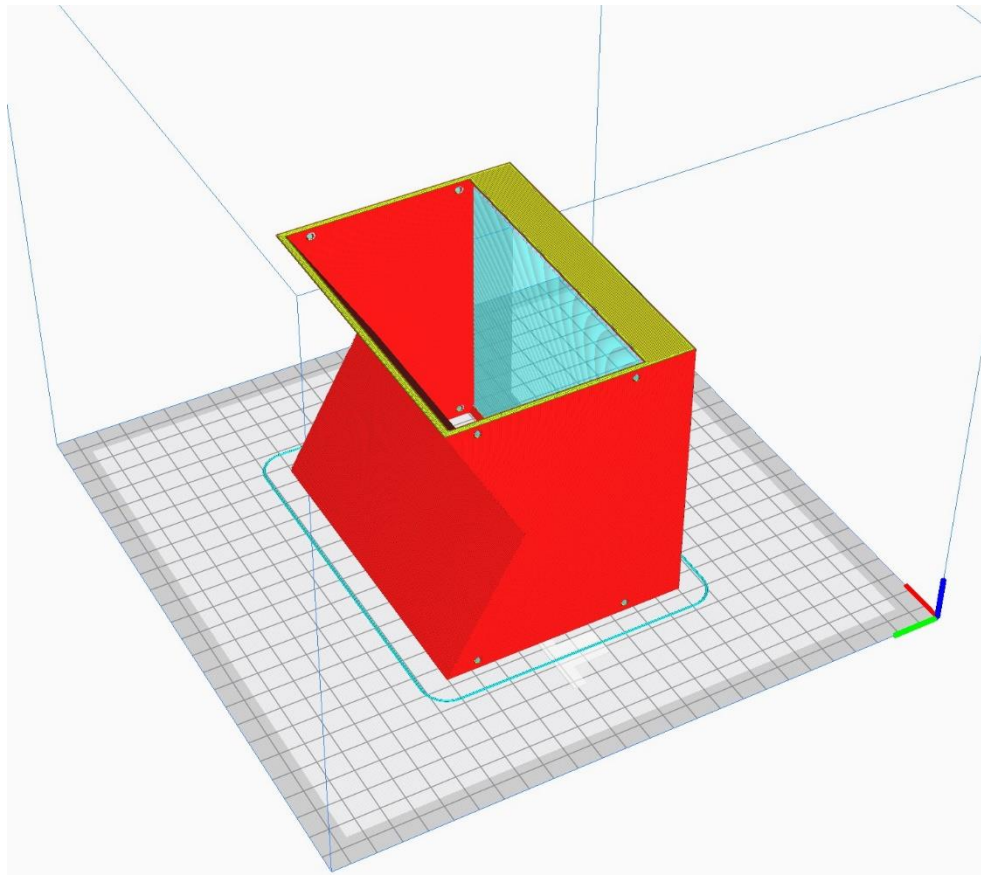
5.2 Tulostusohjelma

Valmis malli ladattiin osissa koneelle .stl -tiedostoina. Tinkercadissa osat valittiin omiksi kokonaisuuksiksi kokonsa ja muotonsa mukaan. Osan oli mahdollista halutun 14 cm sisään, ja oltava muodoltaan sellainen, ettei sen tulostamiseen tarvittaisi suurta määrää tukirakenteita.

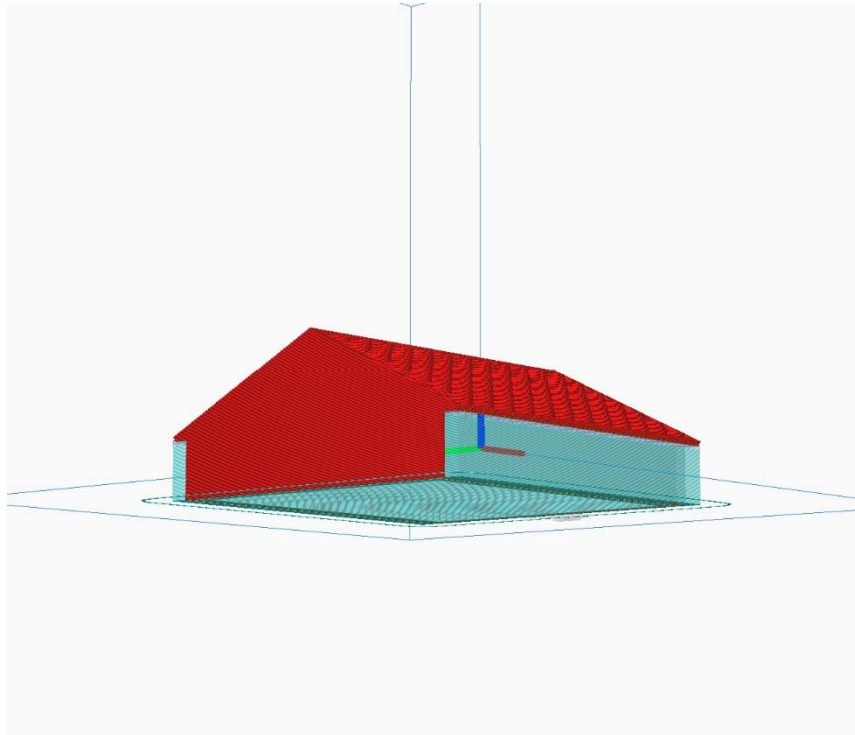
Tulostusohjelmaksi (engl. slicer) valittiin Cura, suosittu tulostusohjelma, joka tarjoaa lähes loputtomat mahdollisuudet peukaloida tulostuksen asetuksia. Cura valittiin, koska sen käyttämisestä oli kokemusta ja se antoi tarpeeksi hyvin muokattavat tulostusominaisuudet.



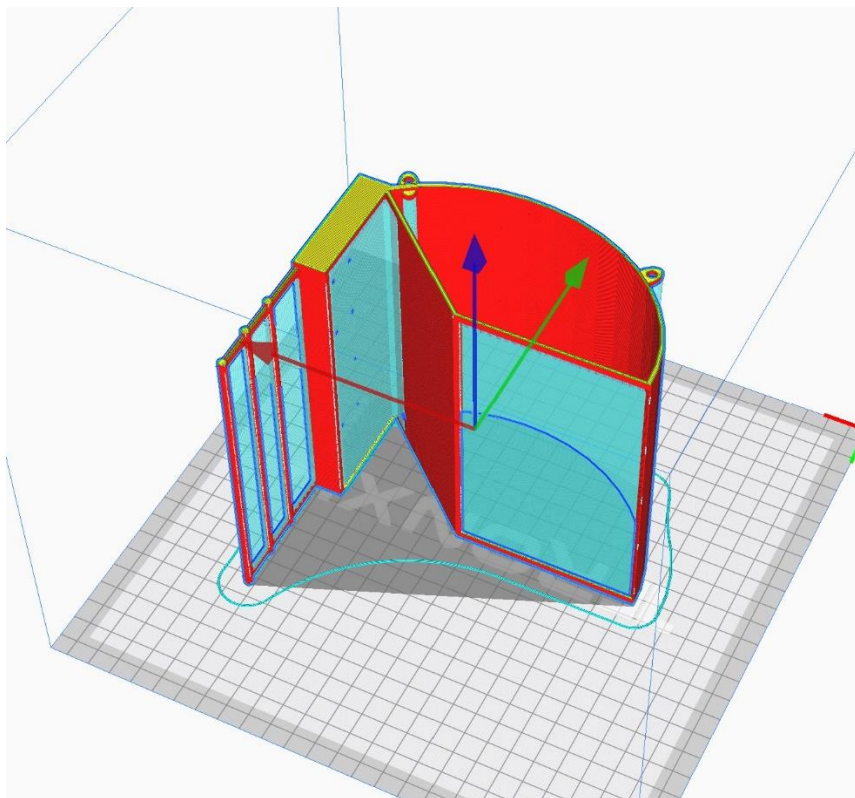
Kuva 11. Sivupaneelit olivat helpoimmat tulostaa. Tukia ei tarvittu. Lämpötilaksi valittiin 200 astetta, joka sopii tässä käytetylle PLA-muoville yleisesti hyvin. Tulostusalustan lämpötilaksi valittiin 50 astetta, jotta tuloste pysyisi hyvin kiinni alustassa.



Kuva 12. Keskimäinen osa tarvitsi tukirakenteen palkin tulostamista varten. Osaa kääntämällä tukirakenteiden määrä saatiin kuitenkin pieneneään huomattavasti, ja tulostusajassa säästettiin neljä ja puoli tuntia - tulostusajaksi jäi 14 tuntia ja 27 minuuttia. Tukirakenteet näkyvät kuvissa vaaleansinisinä.



Kuva 13. Katto-objekti tarvitsi tukirakenteet pohjaan ja räystäiden alle. Katon epätasaisten muotojen vuoksi objektia ei voitu kääntää järkevästi muihin asentoihin.

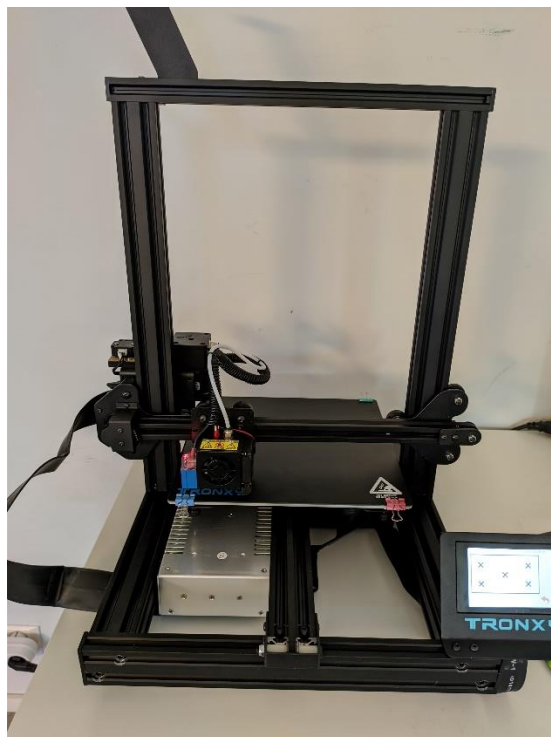


Kuva 14. Sivujen isot osat oli helpoin kääntää sivuttain. Tällä tavoin tukirakenteet olivat pienimmillään, mikä tarkoitti säästöä muovin määrässä ja ajassa.

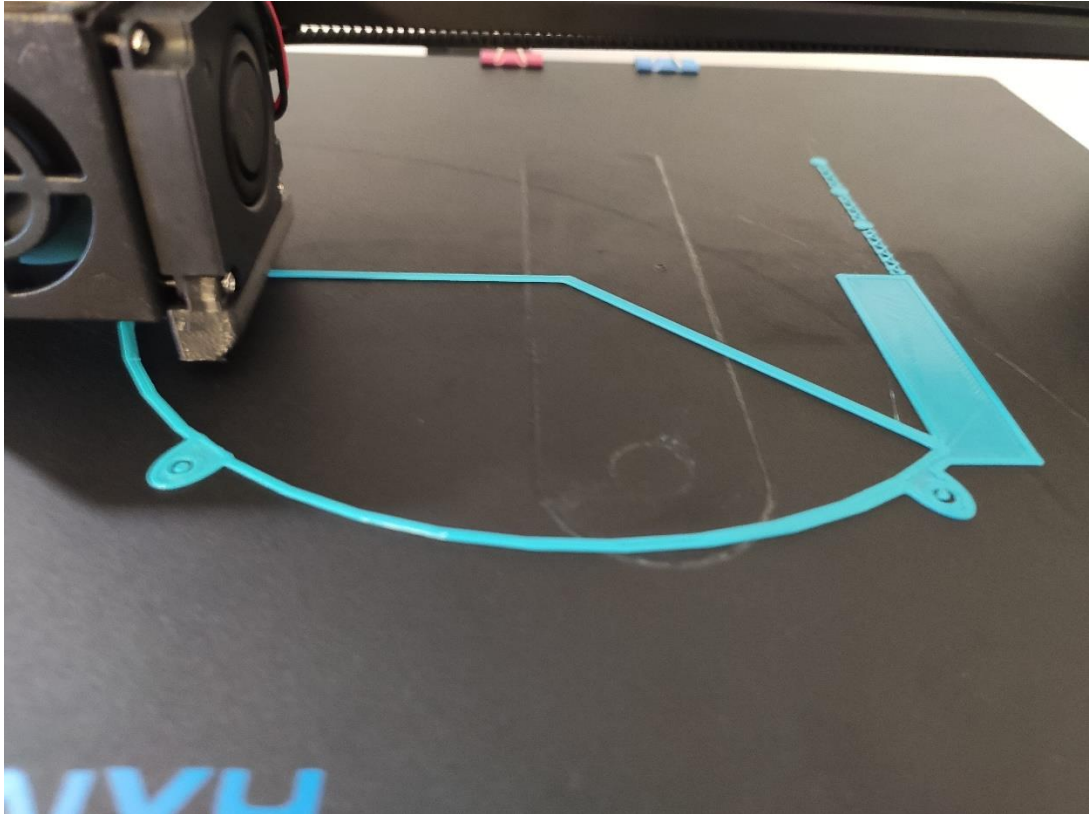
5.3 Tulostaminen

Cura viipaloi 3D-mallit 3D-tulostimelle sen ymmärtämään gcode-muotoon. Gcode pitää sisään G- ja M-koodeja. G-koodit ovat universaaleja ja M-koodit tulostinkohtaisia. Nämä koodit kertovat tulostimen suuttimelle x-, y- ja z-koordinaatit liikkumiseen ja tulostamiseen, ohjaavat tulostuksen aloitusta ja lopetusta, säätelevät tuulettimen nopeutta – käytännössä kertovat tulostimelle kaiken mitä täytyy tapahtua, jotta objekti tulostuu halutulla tavalla. Tällä hetkellä erilaisia G-koodeja on jo yli 1000 kappaletta. (Madeleine 2021)

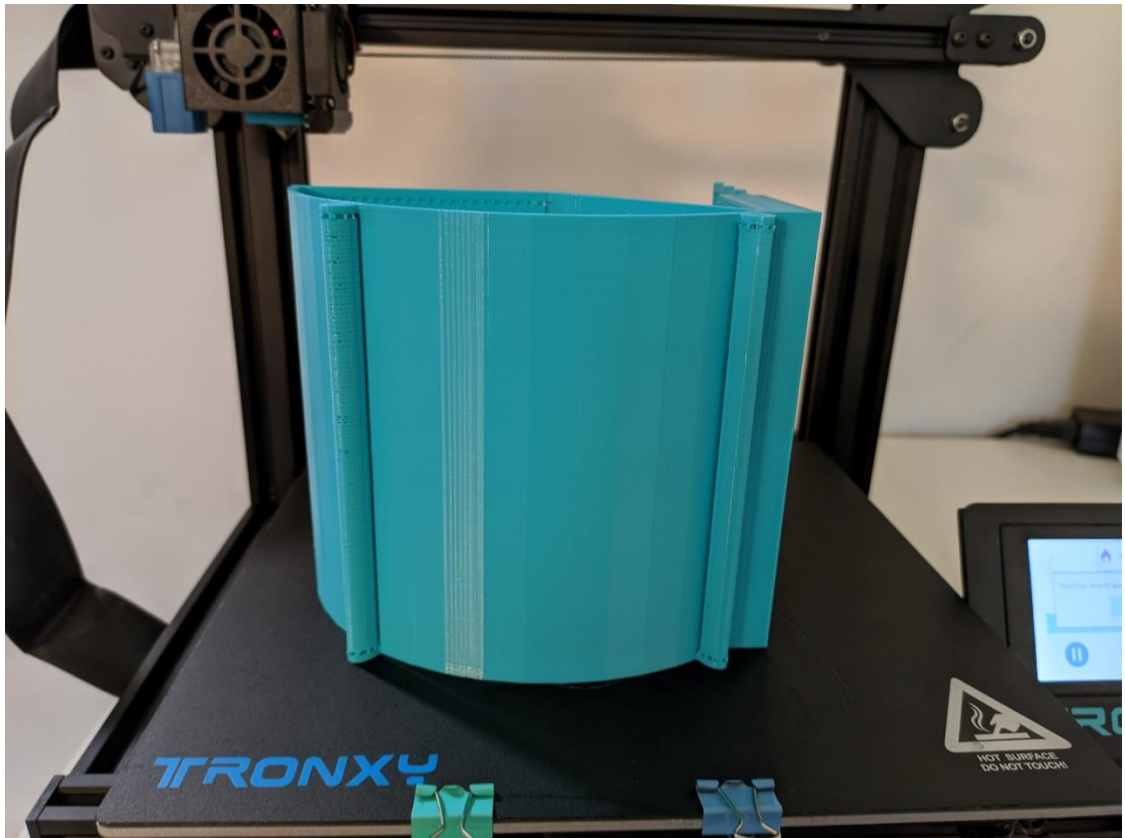
Ruokinta-automaatin osia tulostamaan valittiin Tronxy XY2 Pro Titan. Tulostin valittiin, koska se löytyi jo valmiiksi taloudesta. Kyseessä on osista koottava, pursotustekniikkaa käyttävä 3D-tulostin. Tulostettavaksi filamentiksi valittiin PLA. Ulkoilmaan suunnitellulle esineelle olisi kestävämpiäkin filamentteja kuten polykarbonaatti, mutta PLA toimi hyvin konseptitodistuksen tekemiseen helppokäyttöisyytensä vuoksi. Tulostimessa on lämmitettävä tulostusalusta ja sillä pystyy tekemään kooltaan 255 mm x 255 mm x 245 mm tulosteita.



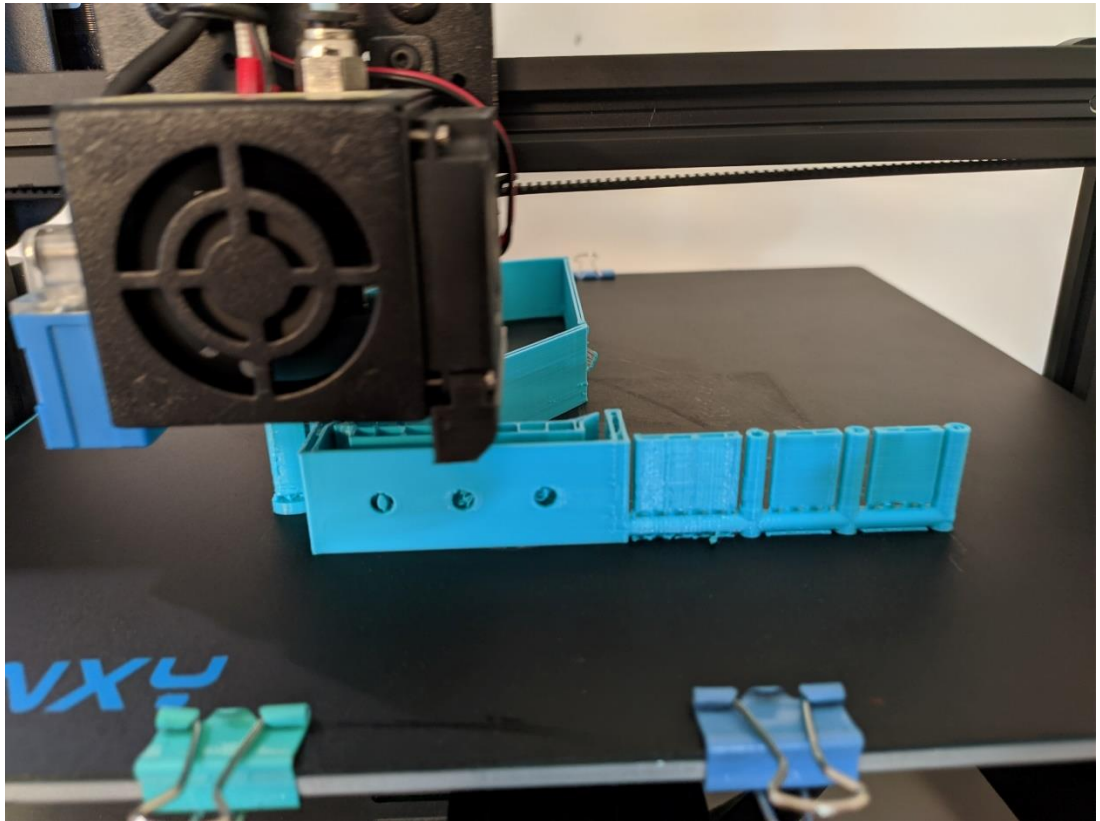
Kuva 15. Tulostuksessa käytetty Tronxy XY2 Pro Titan -tulostin



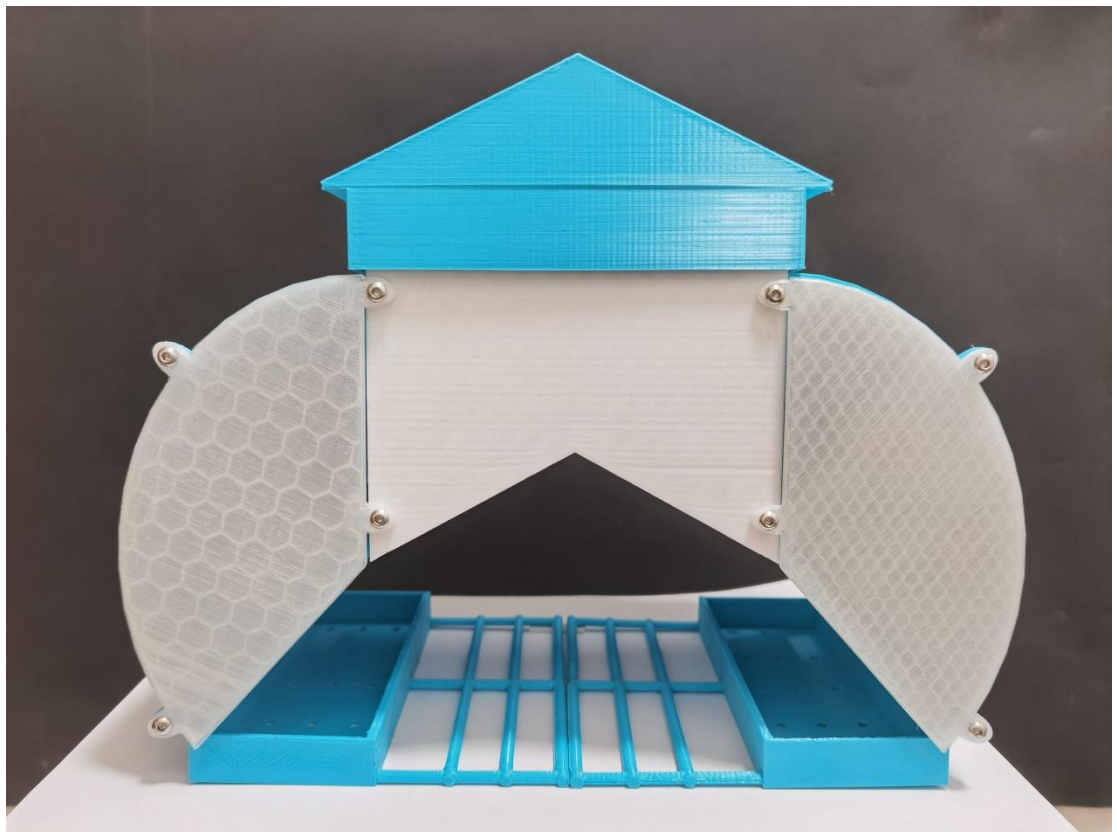
Kuva 16. Kuvan 10 3D-mallin ensimmäiset kerrokset tulostumassa.



Kuva 17. Yllä oleva tuloste valmiina. Tukirakenteet vielä tulosteessa kiinni.



Kuva 18. Sama objekti toisessa kulmassa tulostettuna. Kuvassa tukirakenteet näkyvillä.



Kuva 19. Valmis 3D-tulostus. Valoa läpi päästävissä sivupaneeleissa testattiin erilaisia täyttökuvioita parhaimman visuaalisen ilmeen löytämiseksi. Idea linnunruokinta-automaattista on muuttunut fyysiseksi esineeksi mallinnuksen ja tulostuksen kautta.

6 Pohdinta

Opinnäytetyössä käsiteltiin 3D-tulostamista sen eri vaiheiden kautta. Teoria aloitettiin kertomalla 3D-mallinnuksesta, sen eri menetelmistä sekä menetelmien erityispiirteistä. Alun perin opinnäytetyön teoriaosa oli tarkoitus toteuttaa keskittyen 3D-tulostamisen tekniikoihin sekä oman 3D-tulostusprojektin esittämiseen. Työn edetessä kävi kuitenkin selväksi, ettei ilman 3D-mallinnusta voi kokonaisvaltaisesti käsitellä 3D-tulostamistakaan, joten 3D-mallinnus liitettiin kiinteämmäksi osaksi työtä.

Työssä kerrottiin mitä 3D-mallinnus yleisellä tasolla on, sekä käsiteltiin kolmea 3D-mallinnuksen menetelmää. 3D-mallinnuksen menetelmiä on olemassa lukuisia, mutta ne lähes kaikki asettuvat kolmen läpikäydyn menetelmän alle, tai vaihtoehtoisesti ne ovat niin erikoistuneita menetelmiä, ettei niiden läpikäymisestä olisi ollut merkittävää hyötyä ottaen huomioon opinnäytetyön rajaus.

3D-tulostaminen aloitettiin yleisluontoisella määrittelyllä mitä 3D-tulostaminen on, ja siitä siirryttiin sen historiaan. Historiaa selvittämällä oli tarkoitus saada ymmärrystä siihen, miten ja miksi nykyisin käytössä olevat tekniikat ovat syntyneet. 3D-tulostamisen historian tärkeimmät tapahtumat pyrittiin tuomaan esiin kronologisessa järjestyksessä, ottaen mukaan tapahtumia ja tekniikoita, joita opinnäytetyössä myöhemmin käytiin seikkaperäisemmin läpi. Historian hetken tärkeys on useissa kohdin enemmän tai vähemmän tulkinnanvaraista; haastavaa työssä oli yrittää löytää nykyisyyttä eniten muokanneet historian hetket ilman, että historian käsittelystä tulisi liian laaja.

Seuraava, itse tulostusprosessia käsittelevä opinnäytetyön osuus rakennettiin pitämään sisällään läpileikkaus 3D-tulostamisesta sen eri tekniikoita tarkastellen. 3D-tulostustekniikoita on suuri määrä, ja niitä syntyy edelleen lisää. Tarkoituksena oli kertoa tarpeeksi useasta erilaisesta tekniikasta, jotta lukija saisi mielikuvan siitä, miten eri tavoin ja mistä materiaaleista esineitä voidaan 3D-tulostamalla valmistaa. Metallitulostimissa voi olla käyttöaineena jauhe, mutta ne haluttiin silti metallitulostuksen merkityksen vuoksi laittaa omaksi metallia tulostavaksi ryhmäkseen, erikseen jauhetulostimista.

Tulostustekniikoiden luonnollisena jatkumona oli listaus filamenteista. Filamentit kuuluvat pursotustulostukseen, mutta ne päätettiin käydä läpi omana kokonaisuutenaan, koska niiden skaala on laaja. Useita filamentteihin käytettävistä materiaaleista käytetään myös esimerkiksi jauhetulostuksessa, joten filamentit-osiota ei haluttu laittaa yhden tulostustekniikan alle.

Henkilökohtainen tulostusprojekti oli suoraviivaisempi prosessi kuin teoretiedon hankinta ja hyödyntäminen. Oma luomisprojekti ja sen vaiheet ovat tekijälle itselleen aina itsestäänselvyyksiä. Isoin haaste projektin esille tuomisessa olikin se, kerrotaanko siinä varmasti riittävästi asiasta sitä tietämättömälle. Suunnittelun ja tulostuksen vaiheet pyrittiin tuomaan riittävästi esille ilman, että niissä mentiin projektin kokonaisuuden hahmottamisen kannalta merkityksettömiin yksityiskohtiin.

Aikaa vievää ja haastavaa opinnäytetyössä oli aiheeseen liittyvä termiviidakko. Läheskään kaikille 3D-mallintamiseen ja -tulostamiseen liittyville termeille ja lyhenteille ei ole suomenosta, tai suomennoksen oikeellisuutta ei voi tarkastaa toisesta lähteestä. Tästä syystä työssä käytettiin englanninkielisiä termejä silloin kun suomalaista vastinetta sanalle ei löytynyt. Haastava oli myös tiedon määrä: tietyistä aiheista, kuten hartseista, löytyi molekyylitasolle menevää tietoa. Osa aiheista taas oli sellaisia, ettei tietoa ollut suuria määriä saatavilla, tai tieto oli jopa eriävää verrattuna toiseen lähteeseen.

3D-tulostaminen -opinnäytetyöstä tuli lopulta kelvollisella logiikalla ja riittävällä teorialla etenevä kokonaisuus, jotta työn tarkoitus toteutui. Sekä teoria- että projektiosaa voisi varmasti aina kasvattaa, hioa ja tehdä yksityiskohtaisemmaksi, mikäli aikaa olisi rajaton määrä. Aivan kuten aiheena olevassa 3D-tulostuksessa usein käytännössä tapahtuu: lopputuloksesta löytyy viilattavaa ja parannettavaa, mutta jossain kohtaa tuotoksen laatu kohtaa tekijänsä sille asettamat vaatimukset - silloin on hyvä aika pysähtyä.

Lähteet

3DCad-solutions. s.a. Anycubic Photon S DLP white 3D-tulostin. Luettavissa: <https://www.an-cadsolutions.fi/tuote/anycubic-photon-s-dlp-white-3d-tulostin/>. Luettu: 10.12.2021.

3DSourced a. s.a. The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2021. Luettavissa: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>. Luettu: 20.11.2021.

3DSourced b. s.a. The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2021. Luettavissa: <https://www.3dsourced.com/wp-content/uploads/2019/08/Stratasys-FDM-3D-Printer-Patent.jpg>. Luettu: 20.11.2021.

3DSourced c. s.a. Polycarbonate Filament: The Complete PC Filament 3D Printing Guide. Luettavissa: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/polycarbonate-pc-filament-3d-printing/>. Luettu: 6.5.2021.

3D Printing Industry. s.a. The Free Beginner's Guide. Luettavissa: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>. Luettu 20.11.2021.

3D Systems. s.a. Solid Modeling Complex Machining. Luettavissa: <https://www.3dsystems.com/solid-modeling-complex-machining>. Luettu: 11.12.2021.

Adey, L. 8.4.2019. EAC. Formlabs Form 3 & Form 3L: Answers to your FAQs. Luettavissa: <https://eacpds.com/formlabs-form-3-form-3l-answers-to-your-faqs/>. Luettu: 9.12.2021.

Alexandrea, P. 29.7.2021. 3D natives. The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing. Luettavissa: <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>. Luettu: 20.11.2021.

All3DP. 14.1.2020. All3DP. Intamsys Funmat HT Enhanced Review. Luettavissa: <https://all3dp.com/1/intamsys-funmat-ht-review-3d-printer-specs/>. Luettu: 7.12.2021.

AMFG a. 29.6.2018. 3D Printing with ABS Plastic: All You Need to Know. Luettavissa: <https://amfg.ai/2018/06/29/abs-plastic-3d-printing-all-you-need-to-know/>. Luettu: 1.12.2021.

AMFG b. 29.6.2018. A Comprehensive Guide to Material Jetting 3D Printing. Luettavissa: <https://amfg.ai/2018/06/29/material-jetting-3d-printing-guide/>. Luettu 15.11.2021.

AMFG. 21.1.2020. The Evolution of SLS: New Technologies, Materials and Applications. Luettavissa: <https://amfg.ai/2020/01/21/the-evolution-of-sls-new-technologies-materials-and-applications>. Luettu 2.5.2021.

Autodesk a 12.1.2018. About Creating 3D Surfaces. Luettavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-8218FF9A-6F05-47E7-A39C-47D342B942EB-htm.html>. Luettu: 11.12.2021.

Autodesk b 12.1.2018. About Creating 3D Surfaces. Luettavissa: <https://help.autodesk.com/cloudhelp/2018/ENU/AutoCAD-Core/images/GUID-1BC962DD-4424-4B4E-A0D8-F1BEFC83FB68.gif>. Luettu: 11.12.2021.

Autodesk. 13.8.2020. About Creating 3D Wireframe Models. Luettavissa: <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-84E193D7-A18D-4EE2-B978-19E4AFBCAEEC-htm.html>. Luettu: 10.12.2021.

Baguley, R. 5.2.2021. Tom's Guide. Form 3 3D printer review: Expensive, but excellent. Luettavissa: <https://www.tomsguide.com/reviews/form-3-3d-printer>. Luettu 7.12.2021.

BCN3D a. 5.2.2020. Everything You Need to Know About Nylon Filament for 3D Printing. Luettavissa: <https://www.bcn3d.com/everything-you-need-to-know-about-nylon-filament-for-3d-printing/>. Luettu: 6.5.2021.

BCN3D b. 15.5.2020. When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing. Luettavissa: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>. Luettu: 5.12.2021.

Brooks, M. 2021. M3dzone. 3D Printing History [Timeline]. Luettavissa: <https://m3dzone.com/3d-printing-history/>. Luettu 20.11.2021.

Brown, M. 10.6.2021. Cad Crowd. A Brief History of 3D Printing. Luettavissa: <https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/>. Luettu 20.11.2021.

Bruder, Ulf. 23.7.2016. Muoviyhdistys. OSA 21 – AINETTA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT. <https://www.muoviyhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/07/tekstiin01-5.jpg>.
Luettu: 4.12.2021.

Btech a. TruPrint 1000. Luettavissa: <https://www.btech.com.tr/en/truprint-1000-en/>. Luettu: 12.12.2021

Btech b. TruPrint 1000. Luettavissa: <https://www.btech.com.tr/wp-content/uploads/2021/05/trumpf-banner2.png>. Luettu: 12.12.2021.

Chakravorty, D. 5.11.2021. All3DP. 3D Printing Supports – The Ultimate Guide. Luettavissa: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>. Luettu 15.5.2021.

Dassault Systèmes s.a. 3D PRINTING – ADDITIVE. Luettavissa: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition>. Luettu 29.11.2021.

Engineering Product Design s.a. Direct Energy Deposition (DED). Luettavissa: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/>. Luettu: 22.11.2021.

Flynt, J. 3.10.2018. 3Dinsider. Best 3D Printing Resin Materials. Luettavissa: <https://3dinsider.com/3d-printer-resin/>. Luettu: 6.5.2021.

Formlabs. Form 3 Package. Luettavissa: https://formlabs.com/checkout-media/catalog/product/600x600/i/m/image_1_export_artboard_.png. Luettu: 12.12.2021.

Gregurić, L. 2018. All3DP. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? Luettavissa: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>. Luettu: 20.11.2021.

Gregurić, L. 2019. All3DP. SLS 3D Printing: Selective Laser Sintering Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-simply-explained>. Luettu 3.5.2021.

Hoffman, T. 28.9.2021. PCMagazine. Original Prusa i3 MK3S+. Luettavissa: <https://uk.pcmag.com/3d-printers/135940/original-prusa-i3-mk3s>. Luettu: 7.12.2021.

Jones, G. 15.4.2021. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>. Luettu: 12.12.2021.

Jordan, J. 2019. 3D Printing. The MIT Press. England.

Kaupilla, I. 4.11.2021. All3DP. Best Metal 3D Printers of 2021 – Buyer’s Guide. Luettavissa: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/#trumpf-truprint-1000>. Luettu: 12.12.2021.

Kumar, L., Pandey, P. & Wimpenny, D. 2019. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Springer. Singapore.

Loughborough University s.a. About Additive Manufacturing. Luettavissa: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directenergydeposition/>. Luettu: 20.11.2021.

Madeleine, P. 23.9.2021. 3D Natives. What is a G-Code and What is its Use in 3D Printing? Luettavissa: <https://www.3dnatives.com/en/g-code-use-3d-printing-230920216/>. Luettu 02.12.2021.

Makerbot a. s.a. EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT ABS 3D PRINTING. Luettavissa: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/abs-3d-printing/>. Luettu: 01.12.2021

Makerbot b. s.a. EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT PLA 3D PRINTING. Luettavissa: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/everything-you-need-to-know-about-pla-3d-printing/>. Luettu: 6.5.2021.

Makerbot c. s.a. EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT PETG 3D PRINTING. Luettavissa: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/everything-you-need-to-know-about-petg-3d-printing/>. Luettu 6.5.2021.

Murphy, J. 28.3.2019. All3DP. Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>. Luettu: 12.12.2021.

Museum of art and design. s.a. 3D PRINTING TIMELINE. Luettavissa: <https://madmuseum.org/sites/default/files/static/ed/3D%20Printed%20Timeline%20Resource.pdf>. Luettu: 5.12.2021.

- Nguyen, T. 14.3.2019. Who Invented the 3D Printer? Luettavissa: <https://www.thoughtco.com/who-invented-3d-printing-4059854>. Luettu: 13.12.2021.
- Nikhil, A. 20.7.2020. Engineers Garage. 3D Printing Processes – Sheet Lamination (Part 8/8). Luettavissa: <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-sheet-lamination-part-8-8/>. Luettu: 17.11.2021.
- O'Connell, J. 24.7.2021. All3DP. PLA Plastic / Material – The Ultimate Guide. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>. Luettu: 1.12.2021.
- Original Prusa i3 MK3S+. s.a. Prusa Research. Luettavissa: <https://cdn.prusa3d.com/content/images/product/default/2127.jpg>. Luettu: 7.12.2021.
- Ortiz, L. 25.2.2020. All3DP. The Types of 3D Modeling – Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/types-of-3d-modeling/>. Luettu: 10.12.2021.
- Papp, D. 21.1.2020. Hackaday. FORM 3 SLA PRINTER TEARDOWN, BUNNIE STYLE. Luettavissa: <https://hackaday.com/2020/01/21/form-3-sla-printer-teardown-bunnie-style/>. Luettu: 8.12.2021.
- PcMag. s.a. Surface modelling. Luettavissa: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/surface-modeling>. Luettu: 12.12.2021.
- Pechter, D. 25.10.2018. All3DP. Solid Modeling (CAD) – Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/solid-modeling-cad-simply-explained/>. Luettu: 11.12.2021.
- Pires, R. 12.10.2019. All3DP. SLA vs DLP: The Differences – Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>. Luettu 5.5.2021.
- Prus, I. 2.8.2016. Architectural CGI. What Is 3d Modeling? Things You've Got To Know Nowadays. Luettavissa: <https://archicgi.com/product-cgi/3d-modeling-things-youve-got-know/>. Luettu: 01.12.2021.
- Roberson, D. 3.5.2021. Ultimaker. What is 3D printing? Luettavissa: <https://ultimaker.com/learn/what-is-3d-printing>. Luettu: 5.12.2021
- Ryduch, A. 28.6.2021. Datafloq. 10 Industries Transformed By 3d Modeling – Examples & Benefits. Luettavissa: <https://datafloq.com/read/10-industries-transformed-by-3d-modeling-examples-benefits/15342>. Luettu 1.12.2021

Savonia. s.a. Jauhepetimenetelmä. Luettavissa: <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/tietopankki/menetelmat/jauhepetimenetelmat>. Luettu: 12.12.2021.

Schwaar, C. 26.8.2021. All3DP. Betting on Binder Jetting for Production Additive Manufacturing. Luettavissa: <https://all3dp.com/1/betting-on-binder-jetting-for-production-additive-manufacturing/>. Luettu: 15.11.2021.

Siemens PLM. s.a. What is 3D Modeling? Luettavissa <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/3d-modeling/17977>. Luettu 1.12.2021.

Silbernage, C. 23.5.2018. Canada Makes. Additive Manufacturing 101-6: What is sheet lamination? Luettavissa: <http://canadamakes.ca/what-is-sheet-lamination/>. Luettu: 16.11.2021.

Simplyfy3D. Polycarbonate. Luettavissa: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>. Luettu: 6.5.2021.

Simplyfy3D b. Wood Filled. Luettavissa: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/wood-filled/>.

Slick, J. 2.12.2020. Lifewire. The Definition of Topology and Its Purpose in 3D Animation. Luettavissa: <https://www.lifewire.com/topology-in-3d-animation-2181>. Luettu: 1.12.2021.

Top 3D Shop. s.a. Anycubic Photon S LCD 3D Printer Review. Luettavissa: <https://top3dshop.com/blog/anycubic-photon-s-lcd-3d-printer-review>. Luettu: 10.12.2021

Techopedia. s.a. Surface Modelin. Luettavissa: <https://www.techopedia.com/definition/13380/surface-modeling>. Luettu: 12.12.2021.

Theias, M. 11.1.2019. What Is CNC Milling? – Simply Explained. Luettavissa: <https://all3dp.com/2/what-is-cnc-milling-simply-explained/>. Luettu 13.12.2021.

Turbosquad 3D Resources. Topology. Luettavissa: <https://resources.turbosquid.com/wp-content/uploads/2016/06/topology0.png>. Luettu 1.12.2021.

Varotsis, A a. s.a. Hubs. Introduction to Material Jetting. Luettavissa: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>. Luettu 22.11.2021.

Varotsis, A b. s.a. Hubs. Introduction to Metal 3D Printing. Luettavissa: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>. Luettu 15.11.2021.

Varotsis, A c. s.a. Hubs. Introduction to SLA 3D Printing. Luettavissa: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>. Luettu 2.11.2021.

Vassos, L. s.a. Hubs. How to design parts for material jetting 3D printing. Luettavissa: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-material-jetting/3-mj-schematic.png>. Luettu 15.5.2021

Vendelskis, S. 29.5.2021. Arsenal. What is the difference between High Poly and Low Poly models in 3D modeling? Luettavissa: <https://www.arsenal.ai/blog/difference-between-high-poly-and-low-poly-models>. Luettu: 1.12.2021.

Vskills 2020. Wireframe Models. Luettavissa: <https://www.vskills.in/certification/tutorial/wireframe-models/>. Luettu: 11.12.2021.