

Pekka Lähti

# **RHINOCEROS GRASSHOPPER 3D-TU- LOSTUKSEN SUUNNITTELUSSA**

Kandidaatintyö  
Teknisten tieteiden tiedekunta  
Joulukuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Pekka Lähti: Rhinoceros Grasshopper 3D-tulostuksen suunnittelussa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2021

---

Ainetta lisäävä valmistus on alati kasvava ala, joka on viime vuosina kehittynyt voimakkaasti saavuttaen suosiota valmistavan teollisuuden lisäksi myös kotitalouksissa. 3D tulostimien kehittyä aiemmin kovin kalliit tulostimet ovat hintojen laskettua päätyneet yhä useamman yrityksen tuotekehitysosaston, sekä kotiharrastajan käyttöön. Ainetta lisäävän valmistuksen etu perinteiseen valamiseen ja koneistamiseen verrattuna on tulostamisen kyky tuottaa kappaleita lähes ilman geometrisia rajoitteita useista eri materiaaleista, sekä hyvin pienten, ja monimutkaisten sarjojen valmistaminen kustannustehokkaasti.

3D tulostimet voidaan jakaa viiteen yleisimpään eri luokkaan niiden toimintaperiaatteen mukaan. Eri tulostintyypeillä on hyvin erilaiset ominaisuudet niin itse laitteen hankintakustannusten, tulostusnopeuden ja -tarkkuuden, sekä tulostettavan materiaalin mukaan. Eri tulostinten toimintatapa ohjaa ja antaa kappaleen suunnittelulle rajoitteita varsinkin tukirakenteiden ja kappaleen yhtenäisyyden ja umpinaisuuden osalta. Suunniteltaessa kappaletta tulostettavaksi onkin edullista tietää käytettävä laitteisto ja menetelmä ennalta, jotta voidaan varmistua kappaleen tulostuksen onnistumisesta ilman mallin korjaamista tai uudelleensuunnittelua. Tietoisuus tulostamisen mahdollisuuksista ja rajoitteista kappaleiden valmistuksessa on vielä verrattain pientä, mikä saattaa aiheuttaa ennakkoluuloja ainetta lisäävää valmistusta kohtaan.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia Rhinocerosin algoritmipohjaiseen pintamallinnusohjelmistoon integroidun graafisen ohjelmointikielen, Grasshopperin, käyttöä 3D-tulostuksen suunnittelussa. Työssä esitellään ensin 3D-tulostuksen perusteet, yleisimmät tulostusmenetelmät, sekä tulostuksen suunnittelun peruseriaatteen ja rajoitteet perinteiseen valmistukseen verrattuna. Työn lopussa tutustutaan Grasshopperin käyttöön mallinnuksessa. Algoritmien luominen ja kappaleen mallintaminen vaikutti aluksi hieman hankalalta, mutta ohjelmisto osoittautui käyttökelpoiseksi varsinkin geometrisesti haastavien kappaleiden mallintamisessa.

Avainsanat: Rhinoceros, Rhino3d, Grasshopper, 3d-tulostus, additive manufacturing

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. 3D-TULOSTUS .....	2
2.1 3D-tulostuksen kehitys .....	2
2.2 3D-tulostustekniikat ja -materiaalit .....	3
2.2.1 Pursotus .....	3
2.2.2 Valokovetus altaassa .....	4
2.2.3 Jauhepetisulatus ja sidosaineen suihkutus .....	5
2.2.4 Materiaalin suihkutus .....	7
3. 3D-TULOSTUKSEN SUUNNITTELU .....	8
3.1 Perusteet .....	9
3.2 Tukirakenteet .....	11
3.3 Tulostuksen ongelmakohdat .....	12
3.4 3D-mallin siirto tulostimeen .....	12
4. MALLINTAMINEN .....	14
4.1 Ohjelmiston käyttö .....	14
4.2 Esimerkkikappaleen mallinnus .....	15
4.3 Vertailu muihin mallinnusohjelmiin .....	17
5. YHTEENVETO .....	19
LÄHTEET .....	20
LIITE A: ESIMERKKIMALLI .....	21

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	Computer aided design
3D	Kolmiulotteinen
NURBS	Non-uniform rational basis spline
Rhino, Rhino3d	Rhinoceros
SLA	Stereolithography apparatus, stereolitografia
DLP	Digital light processing
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fused filament fabrication
SLS	Selective laser sintering
MJP	Multi jet printing
PLA	Polyaktidi
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
PET	Polyetyleenitereftalaatti
TPU	Thermoplastinen polyuretaani
CNC	Tietokoneistettu numeerinen ohjaus
AM	Additive manufacturing
RP	Rapid prototyping, nopea prototyyppien valmistus
AMF	Additive Manufacturing File format

# 1. JOHDANTO

3D-tulostus, eli lisäävä valmistus, on viime vuosina kasvanut lähes räjähdysmäisesti, ja rantautunut tavallistenkin kansalaisten arkeen. Edullisten, mutta silti kohtuullisen hyvään tarkkuuteen pystyvien tulostimien kehityttyä, on yhä useammalla harrastelijalla varaa hankkia oma tulostin pienimuotoiseen osavalmistukseen. Toisaalta teollisten tulostimien kehitys on mahdollistanut muun muassa metallisten osien tulostamisen, jolloin osat, jotka ennen olivat mahdottomia valmistaa yhtenä kappaleena, voidaan nyt valmistaa 3D-tulostimella käytännössä ilman kappaleen muotoihin aiheutuneita rajoituksia.

Perinteisistä valmistus- ja työstömenetelmistä poiketen 3D-tulostaminen on verrattain hidasta, eikä se siten sovellu kovinkaan hyvin massatuotteiden valmistukseen. Tulostus on kuitenkin kustannustehokas tapa valmistaa hyvin yksilöllisiä tuotteita, kuten esimerkiksi korvan muotoihin sovitettuja korvatulppia. Toisaalta tulostamalla voidaan toteuttaa suuriakin tuotteita, hyvänä esimerkkinä keväällä 2021 valmistunut Hollannissa tulostamalla tehty talo. Verrattaessa lisäävää valmistusta perinteiseen materiaalia poistavaan CNC-työstöön, voidaan suurimpina tulostuksen hyötyinä pitää raaka-aineen tehokasta käyttöä, sekä lähes rajoituksetonta kappaleen muotoa.

Tulevaisuudessa 3D-tulostuksen merkitys tuskin tulee pieneneään, esimerkiksi avaruusmatkailun lisääntyessä tarve paikan päällä valmistetuille osille kasvaa, eivätkä perinteiset työstömenetelmät pysty ketteryden, tai materiaalitehokkuuden osalta vastaamaan tulostuksen hyödyille.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia Rhinocerosin mallinnusohjelmistoon integroitua graafista ohjelmointikieltä Grasshopperia 3D-tulostuksessa. Työssä esittelen yleisimmät lisäävän valmistuksen menetelmät, sekä mitä erityispiirteitä 3D-tulostuksen suunnittelussa on perinteiseen 3D-mallinnukseen ja CNC-koneistukseen verrattuna. Lopuksi vertailen esimerkkikappaleen mallintamisen avulla Grasshopperin käyttökelpoisuutta 3D-tulosteiden mallintamisessa.

## 2. 3D-TULOSTUS

3D-tulostus kuuluu ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin (Additive manufacturing, AM) ja tulostusta on aikaisemmin kutsuttu myös pikavalmistukseksi (rapid prototyping, RP). 3D-tulostusta on käytetty aiemmin lähinnä prototyyppien valmistukseen tuotekehityksen tueksi, mutta nykyään tulostus on yhä enenevässä määrin myös pientuotannon osana. (Gibson et al. 2015, s. 1-2)

3D-tulostimien nopea kehitys ja uusien edullisten tulostimien tulo markkinoille ovat synnyttäneet suuret markkinat yhä useampien harrastajien ja kotitalouksien hankittua laitteen. Lisäksi teollisten tulostimien hankintakustannusten alennuttua on yhä useamassa yrityksessä otettu 3D-tulostus osaksi toimintaa. (Noorani 2018, s. 8)

### 2.1 3D-tulostuksen kehitys

Ensimmäisten nykyaikaisten 3D-tulostimien kehittäjänä pidetään Charles W. Hullia, joka kehitti ensimmäisen toimivan 3D-tulostimen vuonna 1984 ja jonka 3D Systems kaupallisti vuonna 1989. Ensimmäisten tulostimien käyttämä tekniikka oli stereolitografia (SLA), jossa ultraviolettivalolla kovetettiin kerralla koko tulostettava kerros. Menetelmän haasteena on tulostusmateriaalina käytettävän resiniin sotkuinen käsiteltävyys. Lisäksi tulostettu kappale joudutaan usein jälkikovettamaan riittävän lujuuden saavuttamiseksi. (Horvarth 2014, osa 1, luku 1)

Nykyisin yleisimmin käytetyn FDM-tekniikan (fused deposition modeling) kehittivät ja patentoivat S. Scott ja L. Grump vuonna 1989. Menetelmä tunnetaan yleisesti myös FFF-tekniikkana (fused filament fabrication), jossa tulostettava materiaali syötetään lankana ekstruuderiin, jossa se kuumennetaan ja pursotetaan sulana tarkasti haluttuun muotoon. Alkuperäisten patenttien vanhennuttua vuonna 2005 alkoi koti- ja harrastekäyttöönkin soveltuvien tulostimien kehitys Adrian Bowyerin perustettua RepRap-liikkeen, jossa Bowyer jakoi helposti valmistettavien tulostimien suunnitelmat ja kannusti muita kehittämään niitä edelleen. (Horvarth 2014, s. osa 1. luku 1)

Tulevaisuudessa 3D-tulostus korvannee perinteisiä keskitettyjä tuotantolaitoksia siirtämällä osavalmistuksen sinne missä kysyntää on, jolloin toimitusajat ja kuljetuskustannukset pienenevät. Noorani (2018, s. 25) kirjoittaa, että tulevaisuudessa on mahdollista valmistaa tulostamalla kokonaisia avaruusaluksia ja niiden varaosia suoraan kiertoradalla, jolloin kaikkea mahdollisesti tarvittavaa ei tarvitsisi lennättää maasta avaruuteen.

## 2.2 3D-tulostustekniikat ja -materiaalit

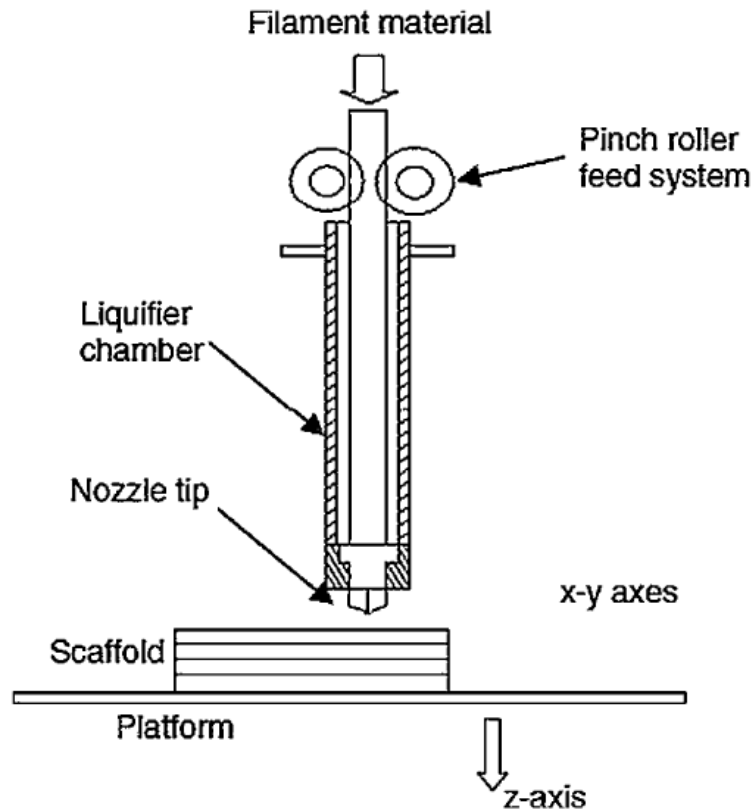
3D-tulostustekniikat voidaan jakaa karkeasti viiteen yleisimmin käytettyyn tekniikkaan: pursotus (FDM/FFF), valokovetus altaassa (SLA), jauhepetisulatus (SLS), materiaalin suihkutus (MJP) ja sideaineen suihkutus, joista ensin mainittu on nykyisin selkeästi suosituin edullisen ja yksinkertaisen laitteiston vuoksi. Eri menetelmät eroavat toisistaan merkittävästi niin tekniikaltaan, hinnaltaan, kuin tulostettavilta materiaaleiltaan. (Coward 2015, osa 1, luku 1)

Tulostuksessa voidaan käyttää tulostustekniikasta riippuen useita eri materiaaleja polymeereistä metalleihin ja keraameista komposiitteihin. Käytetty materiaali vaikuttaa suoraan tulosteen kestävyteen ja käyttökohteisiin, ja se on tulostintyyppistä riippuen joko nestemäisessä, jauhemaisessa tai kiinteässä muodossa. (Noorani 2018, s. 81-98)

### 2.2.1 Pursotus

Fused deposition modeling / fused filament fabrication, eli pursotustekniikka, on yleisin käytössä olevista menetelmistä varsinkin koti- ja harrastekäytössä sen kustannustehokkaan hinnan, edullisten raaka-aineiden ja yksinkertaisen rakenteen vuoksi. Tämän lisäksi pursotustulostimen toiminnan kannalta ei ole kriittistä sen osien ja kokoonpanon tarkkuus, vaan tulostin voidaan helposti kokoonpanna perustyökaluilla ja se silti saavuttaa hyvän tarkkuuden. (Coward 2015, osa 2, luku 7)

Pursotustekniikassa tulostettava raaka-aine, filamentti, on yleensä kiinteänä lankana keilalla, josta se syötetään tulostuspäähän eli ekstruuderiin. Ekstruuderissa filamentti sulatetaan ja pursotetaan suuttimen läpi valmistusalustalle, jossa tulostuspäätä liikutetaan halutun muodon mukaan, kunnes kerros on valmis. Tämän jälkeen tulostuspäätä nostetaan tai alustaa lasketaan kerrosvahvuuden verran ja aloitetaan uusi kerros. (Gibson et al. 2015, s. 147-150)



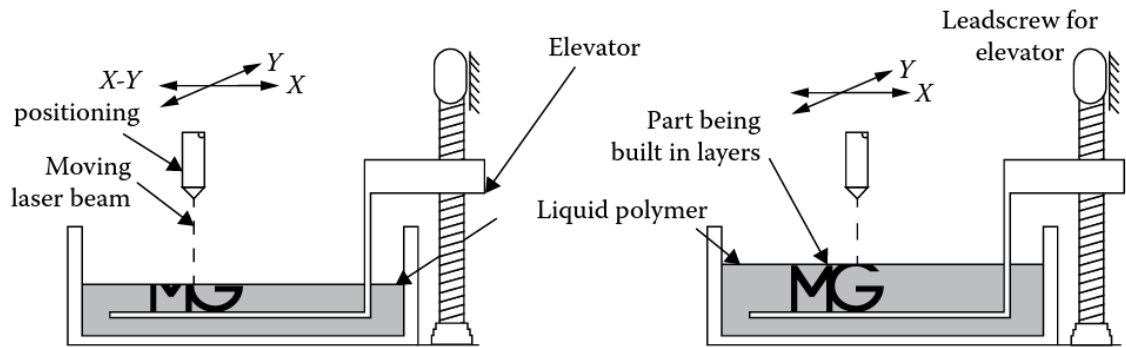
**Kuva1.** Pursotuksen toimintaperiaate. (Gibson et al. 2015, s. 150)

Awarin et al. (2021, s. 6) mukaan yleisimmät pursotettavat materiaalit ovat thermoplastiset muovit: PLA (polyaktidi), ABS (akryyliniiriibutadienistyreeni), PET (polyetyleenitereftalaatti) ja TPU (thermoplastinen polyuretaani). Pursotusmenetelmällä suurin z-suuntainen tarkkuus riippuu tulostettavan kerroksen paksuudesta, joka kalleimmilla tulostimilla on pienimmillään 0,078 mm. Hyvin pieni kerrosvahvuus tarkoittaa kuitenkin tulostusajan voimakasta kasvamista, vaikka saavutettava tarkkuus onkin hyvä. Lisäksi pursotuksessa käytettävät suuttimet ovat pyöreitä, mikä estää terävien kulmien ja -muotojen tulostamisen. (Gibson et al. 2018, s. 164-165)

### 2.2.2 Valokovetus altaassa

Valokovetus altaassa (SLA) on tarkka tulostusmenetelmä, joka mahdollistaa erittäin hyvän tulosteen pinnanlaadun. Menetelmässä nestemäiset monomeerit polymerisoidaan UV-laserin avulla valmistustilassa sijaitsevalle valmistusalustalle. Ylös valmistustilan pinnalle nostetun alustan pintaan kovetetaan ensimmäinen tulostuskerros laserin UV-valon avulla haluttuun muotoon. Kun kerros on kovetettu, lasketaan alustaa kerrosvahvuuden verran pinnan alle ja toistetaan, kunnes tuloste on valmis. (Gebhard 2011, s. 34-36)



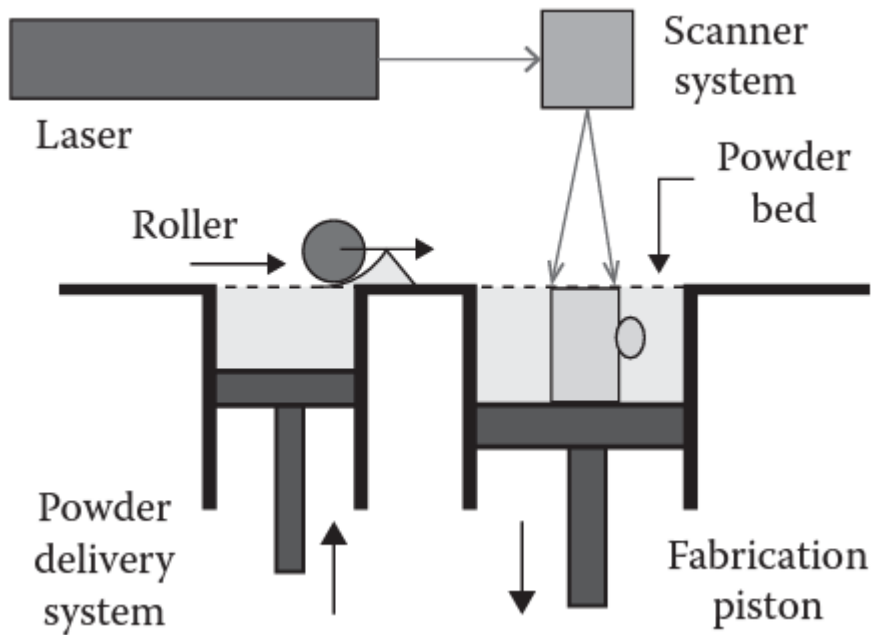


**Kuva 2.** Valokovetuksen periaatekuva. (Noorani 2018, s. 108)

Siitä huolimatta, että tulostettava kappale on valmistusaltaassa tulostusnesteen ympäröimänä, ei neste itsessään tarjoa kappaleen ulkoneville muodoille riittävää tukea, vaan tukirakenteiden käyttö on välttämätöntä. Tukirakenteiden liitoskohdat itse kappaleeseen voidaan kuitenkin tulostimen hyvän tarkkuuden vuoksi pitää hyvin pieninä, jolloin tukimateriaalien poistaminen valmiista kappaleesta on helppoa. Suunniteltaessa tulostetta tulee kuitenkin muistaa huolehtia, ettei kappaleesta tule liian yhtenäinen, jolloin tulostusneste ei pääse valumaan kappaleen onkaloista pois. (Elliot & Waters 2019, s. 10-11)

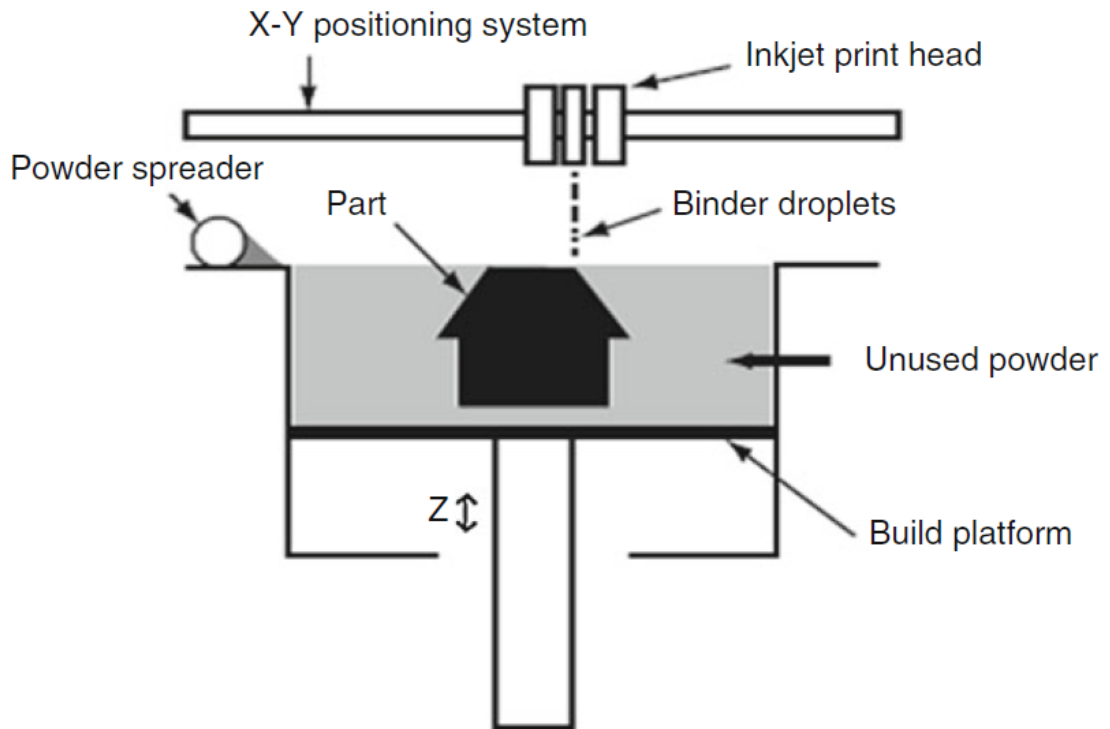
### 2.2.3 Jauhepetisulatus ja sidosaineen suihkutetus

Jauhepetisulatus eli lasersintraus (SLS) muistuttaa toimintaperiaatteeltaan valokovetusta, menetelmässä tulostettava raaka-aine on jauhemaisessa muodossa, josta se levitetään valmistusalustan päälle ja sulatetaan haluttuun muotoon lasersäteiden tuottaman lämmön avulla. Kuten valokovetuksessa, myös jauhepedillä valmistettaviin kappaleisiin pitää jo suunnitteluvaiheessa jättää riittävästi aukkoja, jotta kappaleen sisään jäävä jauhe voidaan valuttaa pois. (Elliot & Waters 2019, s. 12)



**Kuva 3.** Jauhepetisulatuksen tulostusperiaate. (Noorani 2018, s. 110)

Tyypillisesti jauhepetiin levitettävän kerroksen paksuus on 0,075-0,1 mm, joka levitetään suljetussa tyypellä täytetyssä valmistuskammiossa valmistusalustan päälle. Tyypin tehtävä tulostuksessa on estää hapen pääsy kosketuksiin sulan materiaalin kanssa (Gibson et al. 2018, s. 108). Noorani (2018, s. 110) kirjoittaa, kuinka varhaisessa vaiheessa jauhepedillä voitiin käyttää raaka-aineena ainoastaan polykarbonaattia, mutta nykyaikaisilla laitteilla voidaan tulostaa monipuolisesti eri muoveja, sekä metallia.



**Kuva 4.** Sidosaineen suihkutuksen periaate. (Gibson et al. 2018, s. 206)

Sidosaineen suihkutusta muistuttaa hyvin paljon jauhepetisulatusta, tulostusperiaate on sama lukuun ottamatta raaka-aineen kovettamista, joka laser sulatuksen sijaan toteutetaan kovettavalla musteella. Tulostuksen jälkeen kappale jätetään asettumaan tulostusaltaaseen jauheen ympäröimänä asettumaan ennen jälkikäsitelyä, jonka avulla voidaan parantaa kappaleen mekaanisia ominaisuuksia. Lopuksi kappale puhdistetaan ylimääräisestä raaka-aineesta kuten jauhepetisulatuksessakin. (Gibson et al. 2018, s. 205-206)

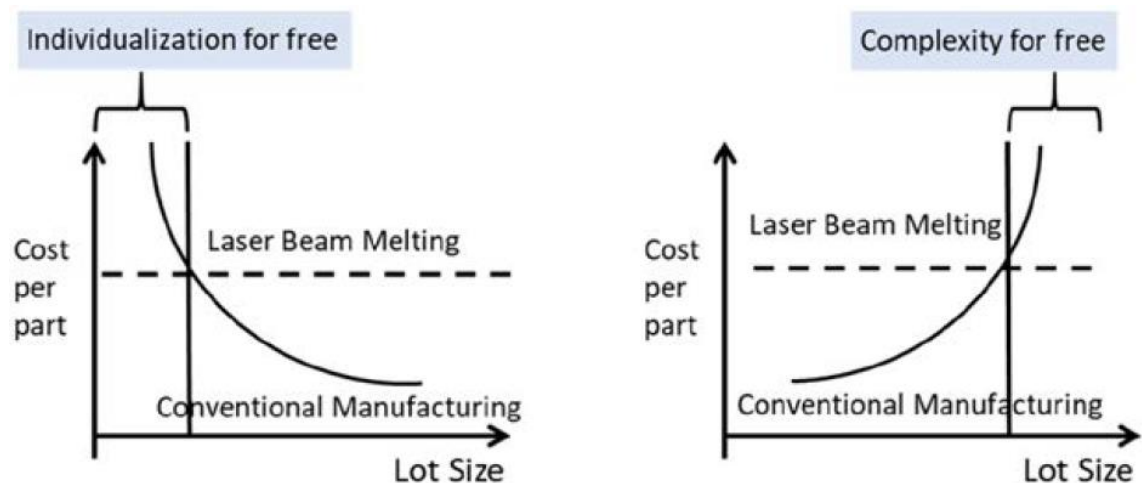
#### 2.2.4 Materiaalin suihkutusta

Materiaalin suihkutuksessa (MJP, multi-jet -printing) valmistusalustalle suihkutetaan UV-valossa kovettuvaa muoviseosta tai vahamaista tukimateriaalia. Materiaalin suihkutuksessa saavutetaan suuri z-suuntainen tarkkuus tulostuksen kerrospaksuuden ollessa 16  $\mu\text{m}$ . Tulostuksessa käytettävä tukimateriaali on myös hyvin helppo poistaa, eikä vaadi mekaanista irrotusta, jolloin tulostettava kappale voi sisältää hentojakin yksityiskohtia ja monimutkaisia sisäisiä rakenteita. (Gebhard 2011, s. 37)

### 3. 3D-TULOSTUKSEN SUUNNITTELU

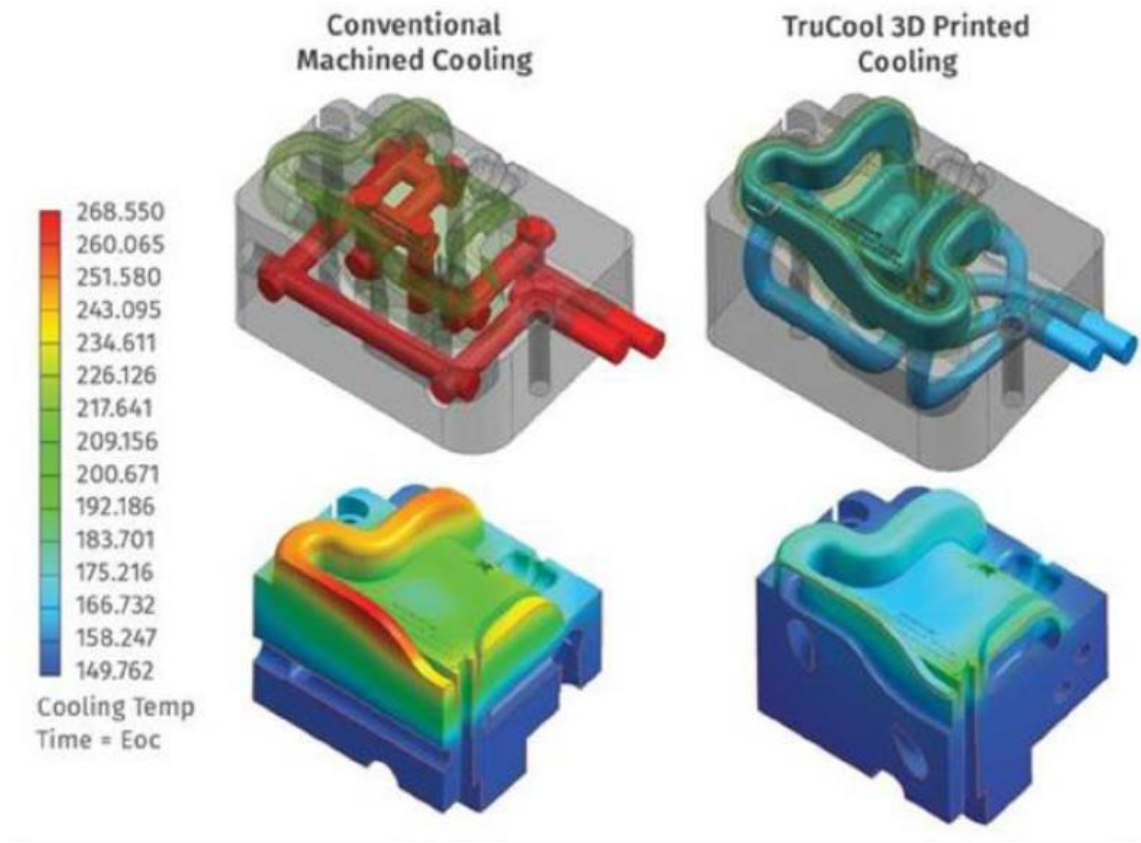
Materiaalia lisäävä valmistus (AM) mahdollistaa kokonaan uuden lähestymistavan kappaleiden ja prototyyppien tuotantoon. Gibson et al. kirjoittaa sivulla 9, kuinka perinteisiin menetelmiin verrattuna AM:llä valmistus on yksinkertaisempaa, koska kappale voidaan valmistaa yhdessä osassa, eikä kappaleen kiinnitystä tarvitse muuttaa kesken valmistuksen, kuten CNC-koneistuksessa. Kappaletta suunniteltaessa on kuitenkin tiedostettava käytettävän menetelmän ja laitteen rajoitukset, jolloin suunnittelijan ja kappaleen valmistajan yhteistyö on tärkeää.

Materiaalia lisäävän valmistuksen kustannukset kappaletta kohden ovat vakiot riippumatta tuotettavan kappaleen eräkoosta, eikä kappaleen monimutkaisuudella ole juuri vaikutusta. Perinteisessä valmistuksessa massatuotannon kustannukset laskevat nopeasti eräkoon kasvaessa, mutta toisaalta mikäli kappaleen monimutkaisuus lisääntyy, kasvavat myös tuotantokustannukset kappaletta kohden eksponentiaalisesti. AM:n hyödyt tulevat esiin, kun halutaan tuottaa vahvasti yksilöityjä tuotteita, tai valmistaa erittäin monimutkaisia kappaleita. (Elliot & Waters 2019, s. 20)



**Kuva 5.** Jauhepetisulatuksen kustannushyöty. (Elliot & Waters 2019, s. 20)

Lisäävän valmistuksen suurimpia vahvuuksia on geometrinen rajoitteiden puute. Kevyet, mutta vahvat ristikkorakenteet, sekä mahdollisuus lisätä materiaalia vain tarvittaviin kohtiin mahdollistavat aikaisempaa kevyempien, mutta silti vahvempien kappaleiden valmistuksen. Koska kappaleiden sisään voidaan toteuttaa myös kaarevia onkaloita, voidaan esimerkiksi lämmönvaihtimien ja jäähdytyskanavien tehoa parantaa.



**Kuva 6.** AM-menetelmän edut jäähdytyksessä. (Elliot & Waters 2019, s. 26)

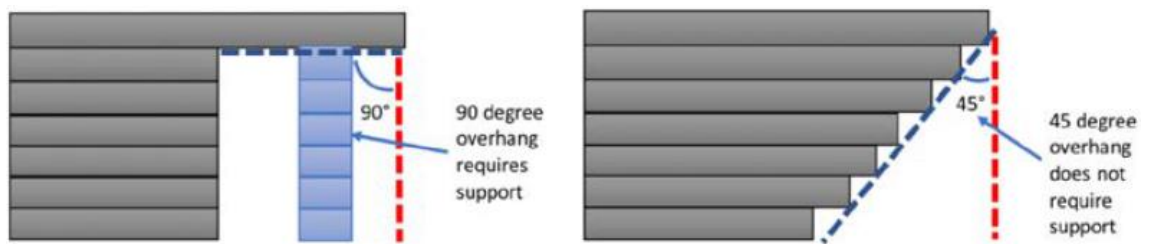
Lisäksi kappaleen sisään voidaan jo suunnittelu- ja valmistusvaiheessa jättää tarvittavat onkalot, jolloin osien kokonaismäärää, ja siten kokoonpanoaikaa voidaan vähentää huomattavasti. Yksi AM-menetelmien etuja onkin kappaleen saaminen kerralla valmiiksi, kun perinteisin menetelmin kappale on voinut koostua useiden eri osien kokoonpanosta.

### 3.1 Perusteet

Suunniteltaessa kappaletta valmistettavaksi tulostamalla on kappaleen muoto hyvin vapaa. Kappaleen kokoa rajoittaa käytettävän tulostimen valmistustilan mitat, johon kappaleen on tukirakenteineen mahdollista.

Valmistettavien kappaleiden kerrosrakenteesta johtuen valmiin kappaleen ominaisuudet vaihtelevat suuresti eri pintojen välillä, jonka vuoksi kappaleen orientointi, eli tulostusasento tulee miettiä huolella. Riippumatta käytetystä AM-menetelmästä yleisohjeena voidaan pitää, että ylöspäin osoittavat pinnat ovat pinnanlaadultaan parhaita. Ylin kerros jähmettyy kosketuksissa ilman kanssa, kun taas kappaleen alapinnat tukirakenteiden varassa. Lisäksi kappaleen vaatimien tukirakenteiden määrä saattaa vaihdella suuresti riippuen siitä, miten kappale viipaloidaan ja tulostetaan. (Gibson et al. 2018, s. 55-56)

Tulostuksessa ongelmallisia kappaleen piirteitä ovat ulokkeet ja onkalot. Kappaleessa olevat, jyrkässä kulmassa levenevät ulokkeet ja onkaloiden yläpinnat vaativat tukirakenteiden käyttöä, jotta vältetään hallitsemattomilta muodonmuutoksilta. Mikäli tukirakenteiden käyttö halutaan minimoida, tulee ulokkeet suunnitella levenemään maksimissaan 45 asteen kulmassa kuvan 7 mukaisesti, jolloin lisätuentaa ei tarvita. Sama vaatimus etenevän suhteen koskee myös pyöristyskäsiä, jolloin tukirakenteiden osalta mielekkäämpää on käyttää viistettä kappaleen ulkonemien reunoissa kuten kuvassa 8 on esitetty. (Elliot & Waters 2019, s. 56-58)



**Kuva 7:** Vaatimus ulokkeen tuennalle. (Elliot & Waters 2019, s. 57)



**Kuva 8:** Pyöristyksissä reuna levenee yli 45° kulmassa. (Elliot & Waters 2019, s. 57)

Tulostusaikaan vaikuttaa valmistettavan kappaleen koon lisäksi kappaleeseen käytetyn raaka-aineen määrä, jolloin valmistusaikaan ja kappaleen painoon voidaan vaikuttaa jättämällä kappale ontoksi, mikäli se ei vaikuta kappaleen toiminnallisuuteen. Kappaletta voidaan keventää myös korvaamalla kappaleen umpinainen sisus hunajakenko- tai ristikkorakenteella, jolloin kappale säilyy edelleen tukevana. Jos tulostuksessa käytetään jauhepetimenetelmää, tai valokovetusta altaassa, tulee kappaleeseen lisäksi jättää riittävästi aukkoja, jotta kappaleen sisään jäänyt ylimääräinen raaka-aine voidaan poistaa. (Gibson et al. 2018, s. 57)

### 3.2 Tukirakenteet

Vaikka AM-menetelmillä voidaan tulostaa lähes rajoituksetta erilaisia geometrisiä muotoja, on kuitenkin kappaleeseen tulostettava tukirakenteita, jotta kappaleen muoto säilyy. Eri tulostusmenetelmät asettavat omat vaatimuksensa tukirakenteille, esimerkiksi jauhepetitulostuksessa raaka-aine itsessään tukee tulostetta, mutta pursotettaessa kappaleen ulkonevat ja ontot muodot aiheuttavat ongelmia. Tukirakenteiden tehtävä onkin pitää tulostettava kappale paikoillaan, ja estää kappaletta vääntymästä tai muuttamasta muotoaan tulostuksen aikana. Tuennan on kuitenkin oltava helposti poistettavissa, eikä irrotuksen jälkeen kappaleeseen saisi jäädä jälkiä.

Osassa AM-menetelmistä tukirakenteissa voidaan, ja on kannattavaa käyttää eri materiaalia kuin itse kappaleen tulostamisessa. Käytettäessä eri väristä, heikompaa tai liukenevaa materiaalia tuentaan, on tukirakenteiden poisto helppoa. Esimerkiksi pursotettaessa voidaan tulostuspää varustaa toisella pursottimella, jolla voidaan tulostaa tukimateriaali rinnakkain varsinaisen kappaleen kanssa. (Gibson et al. 2018, s. 156-157)



**Kuva 7:** Tukirakenteiden perustyyppit. (Elliot & Waters, 2019, s. 52)

Koska tukirakenne itsessään ei lisää valmiin kappaleen arvoa, mutta lisää materiaalikustannuksia ja jälkikäsittelyaikaa, on tukirakenteiden määrä pyrittävä minimoimaan. Tulostuksen onnistumisen kannalta välttämättömiä tuentoja ovat kappaleen ankkurointi val-

mistusalustaan, sekä lämpötilasta johtuvien jännitysten tukeminen. Kappaletta tulostettaessa raaka-aineen levitin tai tulostuspää saattavat aiheuttaa suuriakin voimia kappaleeseen, jolloin ankkuroinnin pettäessä seurauksena on kappaleen irtoaminen valmistusalustasta ja valmistuksen epäonnistuminen. Raaka-aineen jäähtyessä sulatuksen jälkeen aiheutuu kappaleeseen jännityksiä lämpötilojen tasaannuttua. Mikäli kappaleen tuenta ei ole riittävää, lämpöerosta johtuvan jännityksen seurauksena kappale voi vääntyä ja aiheuttaa törmäyksen liikkuvaan tulostuspäähän. (Elliot & Waters, 2019, s. 52-56)

AM process	Structural support?	Thermal support?	Support material	Support removal
Vat photopolymerization	Yes	No	Same as build	Breaking by hand
Powder bed fusion	Sometimes	Sometimes	Same as build	Breaking with pliers
Directed energy deposition	Yes	Yes	Same as build	Grinding or sawing; avoid if possible
Material jetting	Yes	No	Different material	Melting or water jet
Binder jetting	Infiltrant runners for MMCs Sintering setters for single alloys			Crushing with tool Grinding or sawing
Small-scale extrusion	Yes	No	Same as build or separate, dissolvable material	Dissolving or breaking by hand
Big-area extrusion	Yes	No	Same as build	Grinding or sawing; avoid if possible

**Kuva 8:** Eri AM-menetelmissä käytettävät tuennat (Elliot & Waters, 2019, s. 56)

### 3.3 Tulostuksen ongelmakohdat

Huolimatta lukuisista eduista, AM-menetelmillä on myös haasteita. Koska kappale valmistetaan kerros kerrokselta, voi kerrosten väliin jäädä huokoisia kohtia, joissa kerrokset eivät ole tarttuneet kunnolla toisiinsa. Toisiinsa tarttumattomat kerrokset heikentävät huomattavasti kappaleen kestävyyttä. Kerrosten irtoaminen on pursotukselle tyypillinen ongelmatilanne, mutta se on mahdollista myös muilla menetelmillä. Kerrosrakenne tulee ilmi myös kappaleen anisotrooppisena, eli suunnasta riippuvaisena rakenteena. Tämä tarkoittaa, että kappaleen mekaaniset ominaisuudet riippuvat vahvasti kuormitus suunnasta. (Ngo et al., 2018, s. 189-190)

### 3.4 3D-mallin siirto tulostimeen

Kun 3D-malli on luotu CAD-ohjelmalla, pitää tiedosto tallentaa tai muuttaa tulostimen ymmärtämään tiedostoformaattiin. Tulostimien yleiseksi käytännön standardiksi on muodostunut STL-formaatti, joka tallentaa kappaleen pintamallina, eikä sisällä kappaleen pinnanmuotojen lisäksi mitään muuta dataa, joka alkuperäisessä CAD-mallissa mahdollisesti on. Johtuen edellä mainituista STL tiedostomuodon puutteista, on uudeksi tiedostomuodoksi kehitetty AMF (Additive Manufacturing File Format) -formaatti, jossa on mahdollista säilyttää muun muassa kappaleen mitta, materiaali ja väritietoja. AMF on valittu



kansainväliseksi ISO standardin mukaiseksi tiedostomuodoksi, ja useat suurimmat mallinnusohjelmien ja 3D-tulostimien laitevalmistajat ovat ilmoittaneet lisäävänsä tuen AMF-tiedostoille seuraavan sukupolven tuotteissaan. (Gibson et al. 2018, s. 45-47)

Kun tulostettavan kappaleen mallista luodaan pintamalli STL-tiedostoon, mallin pinta kuvataan toisissaan kiinni olevilla kolmioilla, joiden koko vaikuttaa suoraan kuinka hyvin luodun pintamallin pinta kuvaa alkuperäistä mallia. Tiukemmalla toleranssilla, eli pienemmillä kolmioilla saavutetaan parempi pinnanlaatu, mutta se tarkoittaa pidempää valmistusaikaa tulostettaessa. Oletuksena useimmille kolmioinneille toleranssina käytetään 0,05 mm, jolloin kappaleen pinnanlaatu on riittävän hyvä valmistuksen keston kasvatta liikaa. (Noorani 2018, s. 36)

Tiedostomuunnoksen jälkeen pintamallista luodaan viipalointiohjelman avulla työstöradat yleensä G-koodina, joka voidaan syöttää tulostimen ohjaimelle. Viipaloinnissa ohjelman tulee ottaa huomioon tulostimen valmistustilan ja liikeratojen määrittämät rajoitteet, sekä tulostettavan kappaleen geometria. (Horvarth 2014, s. osa 2, luku 5)

## 4. MALLINTAMINEN

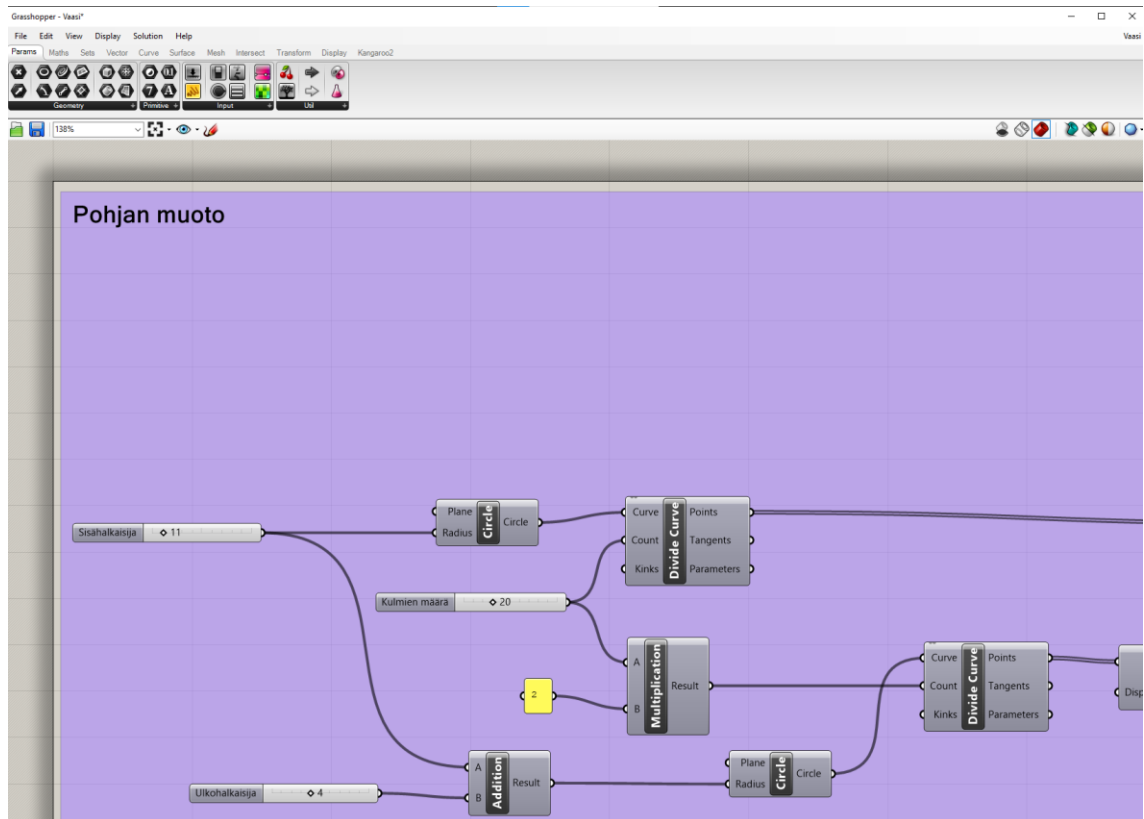
Rhinoceros on Robert McNeelin ja kumppaneiden kehittämä kaupallinen 3D CAD ohjelmisto. Yrityksenä McNeel on perustettu vuonna 1980, ja se on yksityinen, työntekijöiden omistama yritys, jolla on tuotekehitys, myynti ja koulutuspisteitä ympäri maailmaa (McNeel:n kotisivut).

Rhinoceros on algoritmipohjainen pintamallinnusohjelmisto, jonka geometriat perustuvat NURBS (Non-uniform rational basis spline) malliin. Rhino on hyvä vapaamuotoiseen mallinnukseen (freeform modeling), ja se on houkutteleva vaihtoehto arkkitehdeille, insinööreille ja muotoilijoille. Grasshopper on McNeelin kehittämä graafinen ohjelmointikieli, joka on integroitu vahvasti Rhinoceros-mallinnusohjelmistoon.

Grasshopper on graafiseen ohjelmointiin perustuva mallinnustyökalu, jolla voidaan eri ohjelmalohkoja yhdistelemällä luoda monimutkaisiakin kappaleita ja muotoja. Ohjelman tekeminen on intuitiivista, eikä varsinaista aiempaa ohjelmointikokemusta välttämättä vaadita, vaikka perus ohjelmointitaidoista on toki hyötyä.

### 4.1 Ohjelmiston käyttö

Grasshopper käynnistetään Rhinoceros-mallinnusohjelman ikonista, tai komentoriviltä käskyllä grasshopper. Grasshopperin avaamisen jälkeen avautuu käyttöliittymä, ja kangas, johon mallinnukseen käytetty ohjelma syötetään. Grasshopperin käyttöliittymän yläreunan työkaluvalikot on jaettu eri välilehdille ryhmittäin, joista löytyvät mallinnuksessa ohjelman tekemisessä käytettävät ohjelmalohkot. Ohjelmalohkot voidaan lisätä kankaalle myös tuplaklikkaamalla tyhjää kohtaa kankaalla, ja kirjoittamalla halutun lohkon nimi avautuvaan hakukenttään.



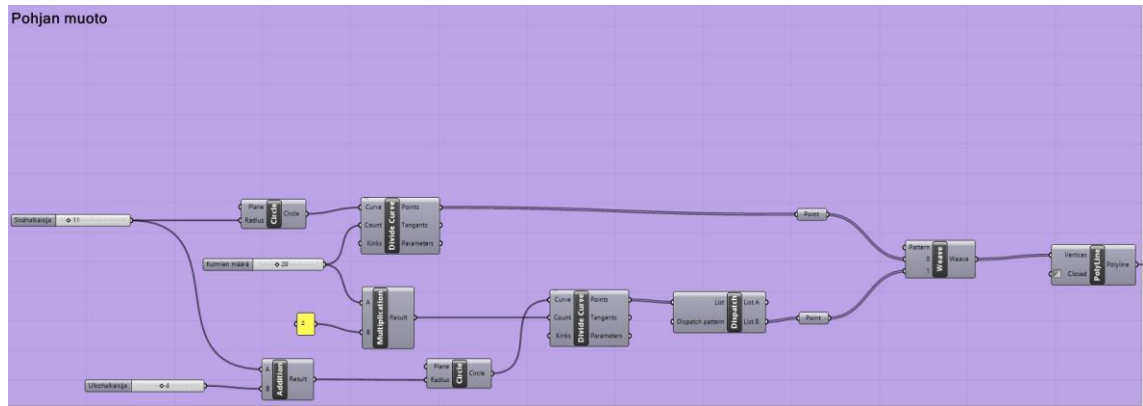
**Kuva 9:** Grasshopperin käyttöliittymä.

Lohkot ottavat sisäänsä tietoa lohkon vasemmasta reunasta, ja lähettävät sen muokattuna oikeasta reunasta, lohkot yhdistetään toisiinsa langoilla. Lohkojen tiedonkulkusuunnan vuoksi mallin ohjelma on selkeintä tehdä vasemmalta oikealle eteneväksi, vaikka varsinaisia rajoitteita lohkojen sijoittelulle ei olekaan. Mallin muokkaaminen ja mahdollinen vianhaku on helpointa, kun ohjelmalohkot on jaoteltu selkeästi ja siistiin järjestykseen. Ohjelmalohkoille voidaan syöttää numeerisia arvoja joko suoraan, tai käyttämällä liukukytkintä, jolloin syötettävän luvun arvoa voidaan helposti muuttaa. Grasshopper sisältää laajan kirjaston ohjelmalohkoja erilaisten geometrinen muotojen mallintamiseen matemaattisten ja loogisten lohkojen lisäksi. Grasshopperiin tehty malli piiryy Rhino 7 ohjelman ikkunaan reaaliajassa, josta mallia voi tutkia eri kulmista, sekä isometrisenä, joka on hyödyllistä varsinkin haettaessa mallille hyvää visuaalista ilmettä.

## 4.2 Esimerkkikappaleen mallinnus

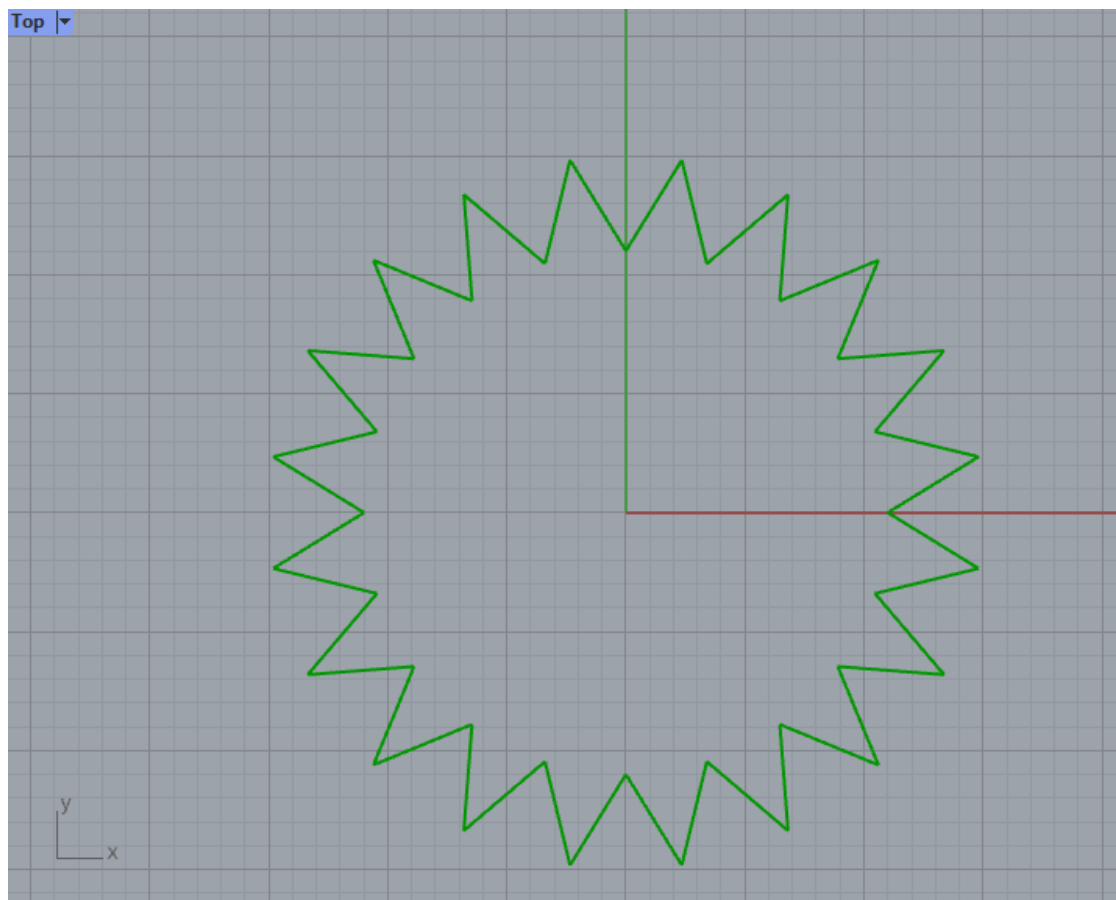
Esimerkkikappaleena mallinnettiin 3D tulostukseen soveltuva vaasi. Kappale on suhteellisen yksinkertainen, mutta antoi käsityksen ohjelman käytöstä, ja sen mahdollisuuksista varsinkin kappaleen visuaalisen ilmeen muutoksien helppoudesta. Mallin ohjelma tehtiin

piirteiden ja ominaisuuksien mukaisen jaottelun mukaisiin ryhmiin, jotka nimettiin sen toiminnallisuuden mukaan, jotta ohjelman tutkiminen jälkikäteen olisi mahdollisimman sujuvaa.



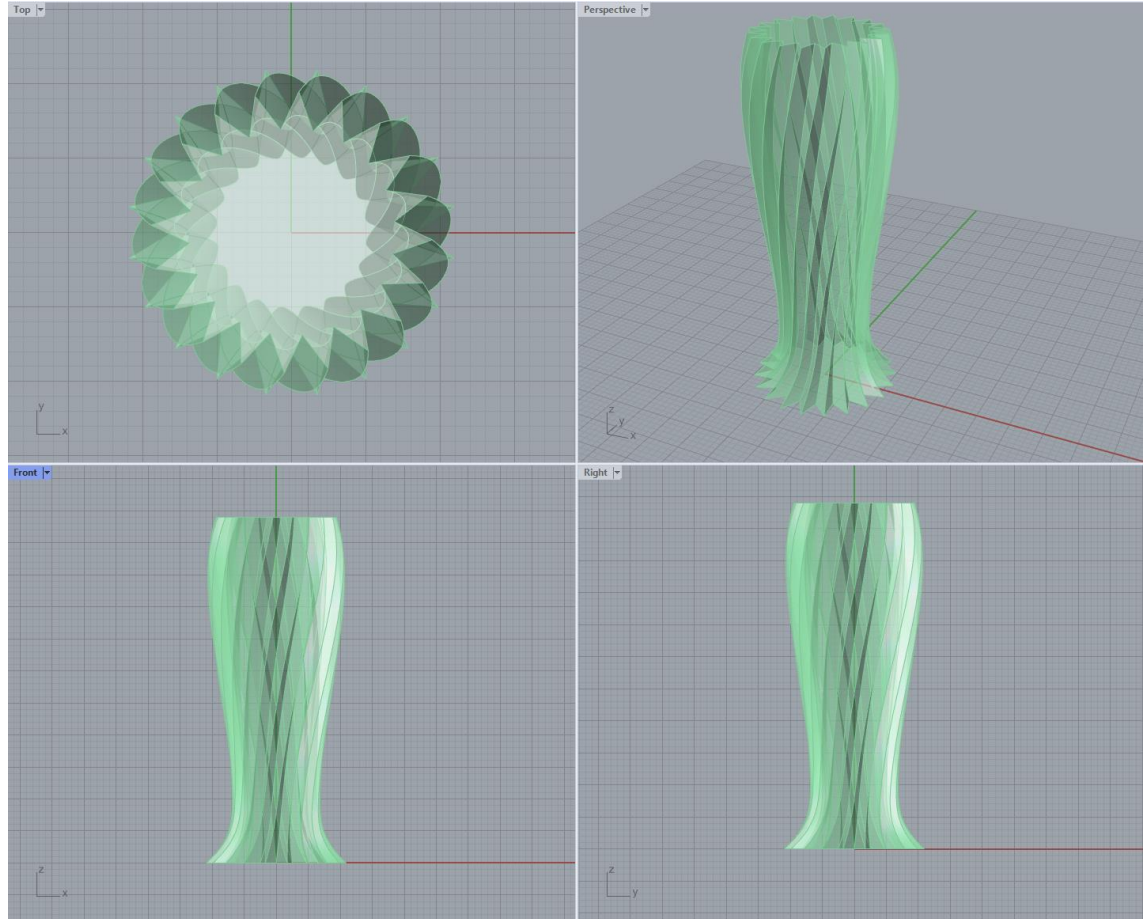
**Kuva 10:** Osa esimerkkimallin ohjelmasta.

Mallinnus aloitettiin kappaleen pohjan perusmuodosta, jonka halkaisijaa, kulmien määrää, sekä kulmien harjan korkeutta voidaan muuttaa liukukytkimistä halutuiksi. Pohjan muodon ohjelmalohko on esitetty kuvassa 10, ja ohjelma tulostaa kuvan 11 mukaisen muotoviivan, joka viedään seuraavaan lohkoon.



**Kuva 11:** Esimerkkimallin pohjan muoto.

Muissa lohkoissa määritettiin kappaleen korkeus, sivuprofiilin muoto, kappaleen reunan kiertymä, sekä viimeiseksi kappaleesta luotiin pintamalli. Kappaleen korkeutta, ulkopinnan sekä profiilin muotoa sekä profiilin kiertymää voidaan muuttaa liukukytkimistä portaattomasti.



**Kuva 12:** Grasshopperin käyttöliittymä.

Lopputuloksena saatiin kuvan 12 mukainen vaasi, jonka visuaalista ilmettä on helppo säätää liukukytkimien avulla halutuksi. Ohjelman tekeminen oli alkuhaasteiden jälkeen suhteellisen yksinkertaista, vaikka itse mallinnustapahtuma erosikin radikaalisti aiemmin käyttämästäni mallinnusohjelmista. Liukukytkimien arvojen rajoitus on tarpeellista, sillä mielivaltaisten tai liian suurien lukujen syöttäminen sai ohjelman kaatumaan.

### 4.3 Vertailu muihin mallinnusohjelmiin

Verrattuna perinteisiin parametrisiin mallinnusohjelmiin, kuten SolidWorks ja Siemens NX, on Grasshopperin mallin muuttaminen lennossa hyvin helppoa. Mallia voidaan muuttaa liukukytkimien arvoja säätämällä, eikä itse mallia tarvitse muuttaa. Parametristen ohjelmien mallien luonnosten tai pursotteiden parametrien muokkaaminen on työ-

lästä, ja saattaa helposti rikkoa mallin. Tämä ei ole suuri ongelma mallinnettaessa perinteisen lastuavan työstön mukaisia kappaleita, jotka ovat jo tuotantorajoitteiden vuoksi hyvin määriteltyjä.

## 5. YHTEENVETO

3D-tulostus on kasvava ja voimakkaasti kehittyvä tuotantotapa, joka on yleistynyt viime vuosina huomattavasti niin teollisuuden, kuin myös kotiharrastajien keskuudessa. Perinteisen valmistuksen rajoitusten kiertäminen joustavan valmistustekniikan avulla mahdollistaa aivan uusien kappaleiden valmistamisen niin muotojensa kuin myös rakenteensa puolesta.

Tässä kandidaatintyössä perehdyttiin eri 3D-tulostuksen perusteisiin, eri tulostustekniikoiden eroihin ja mahdollisuuksiin, tulostuksen suunnittelun ja mallinnuksen perusperiaatteisiin ja rajoituksiin perinteiseen valmistukseen verrattuna, sekä Rhinocerosin Grasshopper mallinnustyökalun käyttöön 3D-tulostuksen suunnittelussa. Grasshopper oli entuudestaan tuntematon työkalu, mutta ohjelman käyttö oli verrattain intuitiivista, ja mallinnuksen eteneminen suoraviivaista.

Verrattuna perinteisiin parametrisiin mallinnusohjelmiin Grasshopperin etuna on mallin visuaalisen ilmeen ja ulkomuodon vapaa ja nopea muokkaaminen. Mallin ohjelmaan syötettävien parametrien muokkaaminen on helppoa, ja lopputulosta on jouhevaa tarkastella, ja muutokset voidaan tehdä muuttamatta itse mallin ohjelmarakennetta, jolloin virheiden mahdollisuus pienenee.

# LÄHTEET

Awari G. K., Thorat C. S., Ambade V., Kothari D. P. (2021). Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications, CRC Press. ISBN 9780367436223

Coward C. (2015). 3D Printing, Alpha. ISBN 9781615647453

Elliott A. M. & Waters C. K. (2019). Additive Manufacturing for Designers: A Primer, SAE International. ISBN 9780768094121

Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C. B., Wang C. C. L., Shin Y. C., Zhang S., Zavattieri P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, Computer-Aided Design 69 65-89

Gebhard A. (2011). Understanding Additive Manufacturing, Hanser Publishers. ISBN 9783446425521

Gibson I., Rosen D., B. Stucker B. (2015). Additive Manufacturing Technologies, toinen painos, Springer, New York. ISBN 9781493921133

Horvarth J. (2014). Mastering 3D Printing, Apress. ISBN 9781484200261

McNeelIn kotisivut. Saatavissa [http:// www.mcneel.com](http://www.mcneel.com). Viitattu 19.1.2020.

Micallef J. (2015). Beginning Design for 3D Printing, Apress. ISBN 9781484209479

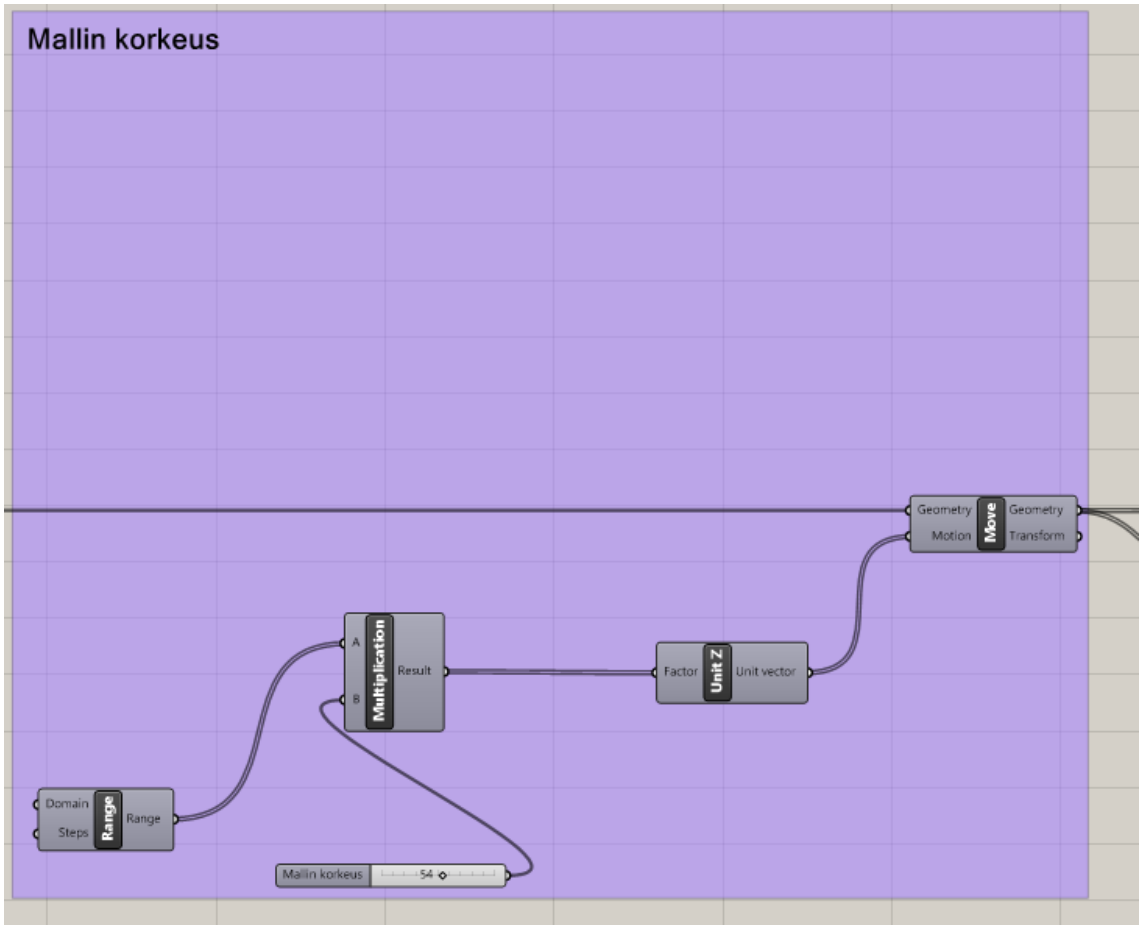
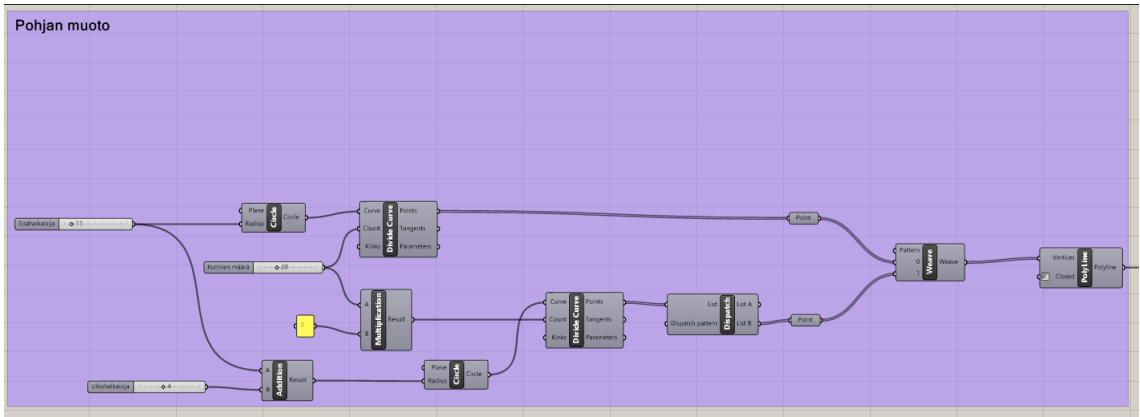
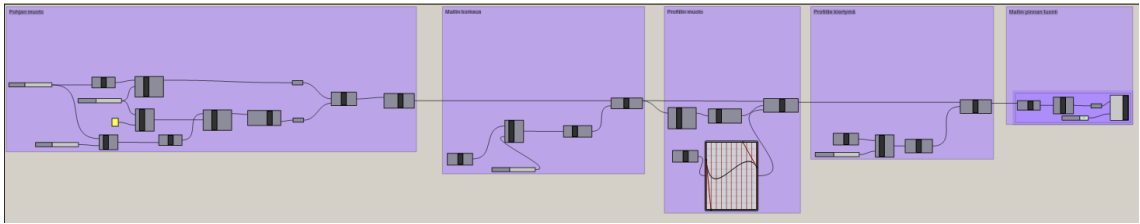
Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composites Part B 143 172-196

Noorani R. (2018). 3D Printing technology, applications and selection, CRC Press. ISBN 9780367781965

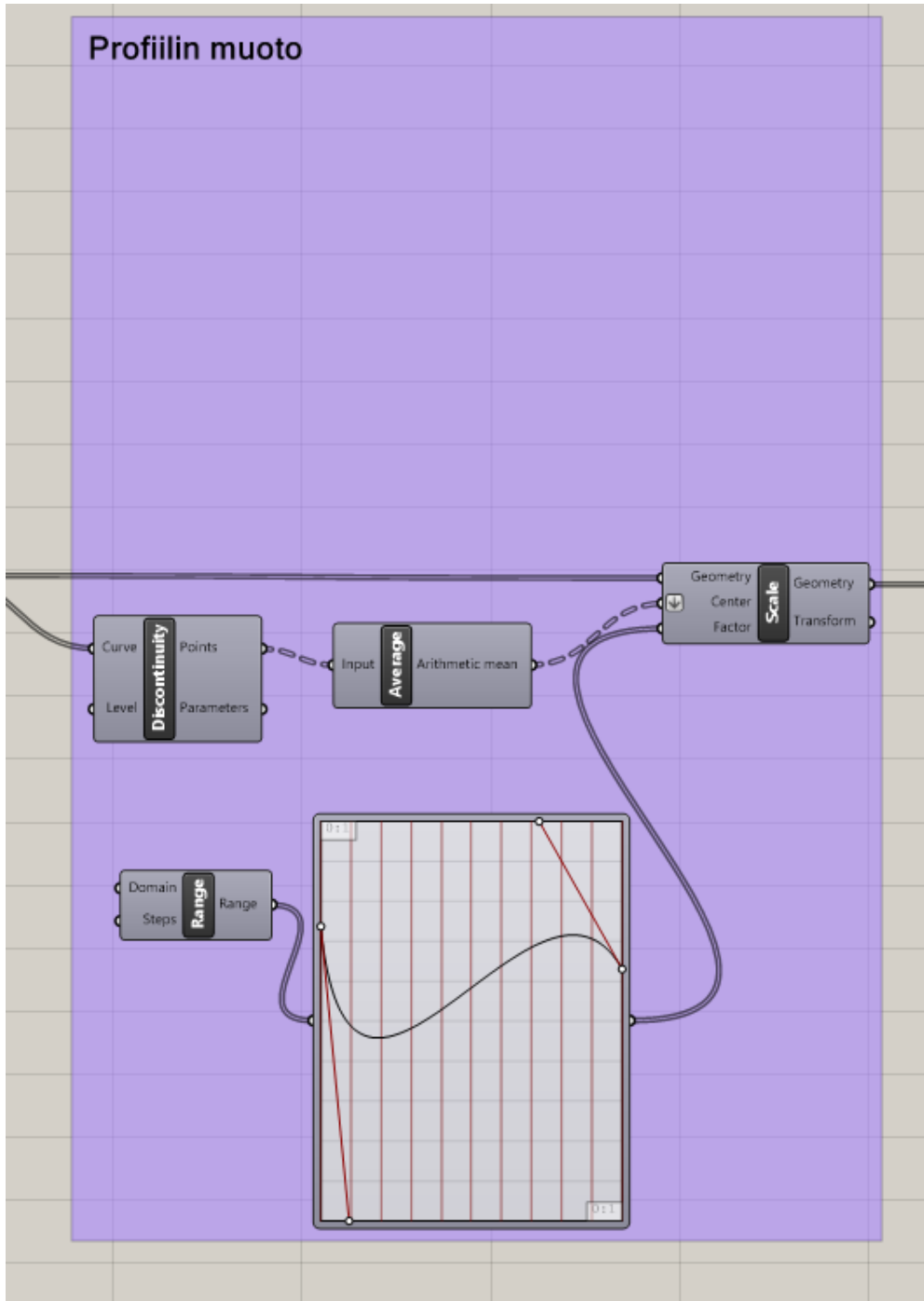
Zhang J. & Jung Y-G. (2018). Additive Manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications, Elsevier. ISBN 9780128123270



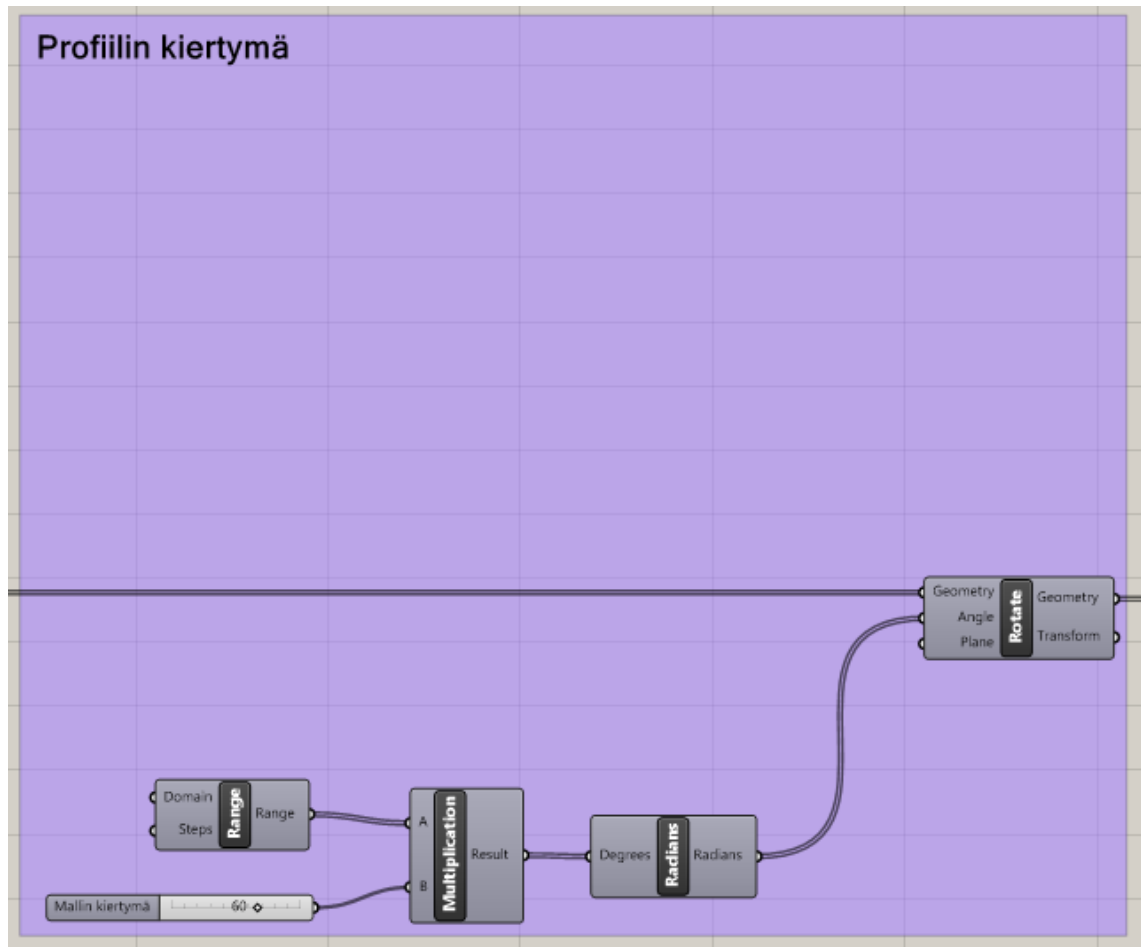
# LIITE A: ESIMERKKIMALLI



# Profiilin muoto



## Profiilin kiertymä



## Mallin pinnan luonti

