

3D-tulostuksen viipalointiohjelmien vertailu

Ville Virolainen

Opinnäytetyö
Tietojenkäsittelyn
koulutusohjelma
2015



Tekijä(t) Ville Virolainen	
Koulutusohjelma Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma	
Opinnäytetyön otsikko 3D-tulostuksen viipalointiohjelmien vertailu	Sivu- ja liitesivumäärä 31+14
Opinnäytetyön otsikko englanniksi Comparison of 3D printing slicing software	
<p>Opinnäytetyön tavoitteena on selventää 3D-tulostamisen prosessia yksityisen käyttäjän näkökulmasta sekä luoda testitulostuksia, joiden perusteella pystytään vertailemaan prosessissa käytettävien viipalointiohjelmien toimintaa keskenään. Työssä perehdytään aluksi 3D-tulostuksen teoriataustaan, jonka jälkeen suoritetaan 3D-tulostimella testitulostukset käyttäen kolmea eri viipalointiohjelmää.</p> <p>3D-tulostamisella tarkoitetaan prosessia, jonka tarkoituksena on luoda kolmiulotteinen objekti käyttäen robotisoitua 3D-tulostinta virtuaalisen mallitiedoston pohjalta. Viipalointi on prosessista se vaihe, jolloin virtuaalinen mallitiedosto muutetaan tulostimen liikkeitä ohjastavaksi G-koodiksi. 3D-tulostamiseen on lukuisia erilaisia teknologioita, mutta yleisin yksityisten käyttäjien tekniikka on pursotustekniikka, jota käytetään tämän työn testausvaiheessa.</p> <p>3D-tulostaminen on ajankohtainen aihe, koska ilmiö tekee muutosta suurten yritysten ja organisaatioiden yksinomaisesta käytöstä koteihin yksittäisten asiakkaiden käyttöön. 3D-tulostaminen voi tulevaisuudessa muuttaa tapaa jolla hankimme arkisia esineitä, koska tekniikan kehittyessä monet hyödykkeet pystytään valmistamaan jopa itse kotona.</p> <p>Viipalointiohjelmien testauksessa selvisi monia eroavaisuuksia niin ohjelmien käytettävyyden, kuin niiden muodostavan G-koodin kanssa. Erot heijastuivat myös 3D-tulostettujen kappaleiden ulkonäössä.</p>	
Asiasanat 3D-tulostus, FDM, viipalointi, G-koodi	

Author(s) Ville Virolainen	
Degree programme Business information Technology	
Report/thesis title Comparison of 3D printing slicing software	Number of pages and appendix pages 31+14
<p>The aim of this thesis is to examine 3D printing as a process from the perspective of an individual user and to create test prints, which can be used to compare different slicing software solutions that are used during the printing process. At first, the thesis focuses on the theory behind 3D printing and then the empirical part describes 3D printing tests that are made by using three different slicing software applications.</p> <p>The term 3D printing means a process which purpose is to create a three-dimensional object with a robotized 3D printer by using a virtual design file. The term slicing is a phase of the printing process where the virtual design file is transformed into G-code, which defines the movement path for the printing. There are different kinds of technologies for 3D printing, but the most common for private users is the extrusion technique, which is used in the testing phase of the thesis.</p> <p>The study reveals that 3D printing is a timely topic, because the phenomenon is evolutionizing by shifting its user base from big enterprises and organizations to private customers. 3D printing may change the manner in which people purchase their everyday goods, as printing technology advances, many commodities could even be produced at home.</p> <p>The testing of the slicing software revealed a number of differences in the software application's usability and in the generated G-code. These differences also reflected in the appearance of the 3D printed objects.</p>	
Keywords 3D printing, FDM, slicing, G-code	

Sisällys

1	Johdanto	1
2	3D-tulostaminen	2
2.1	3D-tulostuksen historia.....	2
2.2	3D-tulostus nykyaikana	3
2.3	Tulevaisuuden näkymä	4
3	3D-tulostustekniikka	5
3.1	3D-tulostusohjelmat	5
3.2	FDM-menetelmä	6
3.3	CAD	7
3.4	G-koodi	7
4	Viipalointiohjelmat	9
4.1	Slic3r.....	9
4.2	CuraEngine.....	10
4.3	Skeinforge.....	10
5	3D-tulostusympäristö.....	11
5.1	Keskeiset parametrit	11
5.2	Repetier-Host-ohjelma	12
5.3	Tulostusprosessi	13
5.4	Mallitiedosto	14
6	Viipalointiohjelmien testaus	16
6.1	Tulostimen asetukset	16
6.2	Slic3r-testi	17
6.2.1	Asetukset	17
6.2.2	Tulostus	17
6.2.3	Lopputulos	18
6.3	CuraEngine-testi	20
6.3.1	Asetukset	20
6.3.2	Tulostus	20
6.3.3	Lopputulos	21
6.4	Skeinforge-testi	23
6.4.1	Asetukset	23
6.4.2	Tulostus	24
6.4.3	Lopputulos	24
6.5	Vertailu	26
	Yhteenveto	29
	Lähteet	30
	Liitteet.....	32
	Liite 1. Slic3r-asetuksien tiedot.....	32

Liite 2. CuraEngine-asetuksien tiedot.....	34
Liite 3. Skeinforge-asetuksien tiedot.....	38

Sanasto

3D-tulostaminen	Tarkoitetaan erilaisia prosesseja, joiden tarkoituksena on luoda kolmiulotteinen objekti käyttäen robotisoitua laitteistoa virtuaalisen kolmiulotteisen mallin pohjalta.
FDM	Tulee englannin sanoista fused deposition modeling, joka tarkoittaa 3D-tulostamisen menetelmää, missä hyödynnetään pursotustekniikkaa luomaan kolmiulotteisia objekteja.
viipalointi	Prosessi, jossa tulostamista varten oleva valmis 3D-malli muutetaan 3D-tulostimen toimintaa ohjastavaksi G-koodiksi.
G-koodi	Yksiselitteisestä numeerisesta merkistöstä koostuva merkkijono, joka ohjastaa 3D-tulostamisessa kaikkea tulostamisen toimintaa.
CAD	Tulee englannin sanoista computer-aided design, joka tarkoittaa tietokoneen avulla tehtyä suunnittelumallia kuten 3D-mallinnusta.
SLA	Tarkoitetaan stereolitografiaa, joka on ensimmäinen kehitetty 3D-tulostamisen tekniikka, jossa käytetään laservaloa jähmettämään haluttua nestemäistä ainetta, muodostaen kolmiulotteisen objektin.
RepRap	Yhteisöpohjainen vapaa projekti, jonka tarkoituksena on kehittää laite, joka pystyisi pursotustekniikka käyttäen monistamaan itsensä. Tämä tarkoittaa, että 3D-tulostin pystyisi tulostamaan mahdollisimman monta omaa osaansa. Projektin pohjalta ovat monet yritykset saaneet alkunsa kehittämällä oman kaupallisen 3D-tulostimen.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selvittää 3D-tulostuksen vaiheet prosessina yksittäisen käyttäjän näkökulmasta ja eritellä siinä käytettävien eri viipalointiohjelmien hyviä ja huonoja puolia. Työn aikana tutkitaan Haaga-Helian oppilaitoksen tiloissa olevien kolmiulotteisten tulostimien hyödyntämiä viipalointiohjelmiä ja vertaillaan niitä keskenään.

Työn ensimmäisessä osassa käydään läpi teoriataustaa 3D-tulostuksesta, tarkastellaan 3D-tulostuksen historiaa sekä pohditaan sen nykypäivän tilannetta ja tulevaisuuden näkymää. Lisäksi testauksessa käytettävä tekniikka esitellään sekä siihen liittyviä osia ja ohjelmistoja selvennetään. Työn toinen osa on projektin käytännön osuus, jossa tulostetaan samasta mallista testikappaleita 3D-tulostimien eri viipalointiohjelmiä hyödyntämällä. Tarkoituksena on vertailla koko tulostusprosessia eri viipalointiohjelmiä käyttämällä, ei pelkästään lopputulosta.

Viipalointi on se osa 3D-tulostamisen prosessia, jossa valmis virtuaalinen mallitiedosto muutetaan 3D-tulostimen liikerataa ohjastavaksi merkkijonoksi, eli G-koodiksi. Ilman viipalointia tulostin ei pystyisi tulostamaan mallitiedostosta aitoa esinettä. Työ sai alkunsa siitä, että oppilaitoksen 3D-tulostimista havaittiin löytyvän mahdollisuus käyttää erilaisia viipalointiohjelmiä, mutta toistaiseksi näistä oli hyödynnetty vain yhtä Slic3r ohjelmaa.

Tartuin työhön siksi, että koen 3D-tulostamisen ajankohtaiseksi aiheeksi sekä tärkeäksi teknologiaksi tulevina vuosina. Projektista tuli eräänlainen opintomatka, jossa tutkimuksen ohella opin paljon uutta 3D-tulostamiseen liittyvistä tekijöistä.

2 3D-tulostaminen

Tulostaminen ja kolmiulotteinen tulostaminen ovat periaatteeltaan hyvin samantapaisia konsepteja. Molemmissa tapauksissa tarvitaan tulostin, joka tekee fyysisen työn, tulostettavan materiaalin, alustan, jolle tulostetaan ja pohjapiirustuksen tietokoneelta, jotta tulostin tietää mitä tulostaa. Tavallisella paperitulostimella vastaukset näihin ovat jokaiselle melko selviä. On olemassa itse tulostin, jossa on usein alusta, jolle tulostettu paperi asettuu sekä tekstitiedosto valmiina tietokoneella, jotta tulostin tietää, miten tulostaa musteen paperille.

Tällaisesta tulostamisesta voitaisiin puhua erikseen kaksiulotteisena tulostamisena, mutta koska se on niin yleinen käytäntö, käytetään vain termiä tulostaminen. Siihen voi tulla tulevaisuudessa muutos, koska 3D-tulostaminen tekee parhaillaan omaa teollista vallankumousta ja sen konsepti on samanlainen kuin tavallisessa tulostamisessa. On 3D-tulostin, joka tekee fyysisen työn, alusta jolle kolmiulotteinen esine tulostetaan, materiaali kuten esimerkiksi polylaktidi eli PLA-muovi sekä kolmiulotteinen mallitiedosto tietokoneella, joka ajetaan viipalointiohjelman läpi ennen tulostamista. Ainoana lisäominaisuutena tavalliseen tulostamiseen verrattuna on sananmukaisesti yksi lisäulottuvuus. Kun tavallinen tulostin tulostaa leveys- ja pituusakseleita pitkin, tulee 3D-tulostuksessa vielä korkeusakseli mukaan tulostusprosessiin. (Lipson & Kurman 2013, 11.)

Toisaalta toiseksi eroavaisuudeksi voisi listata vielä erikseen lopputuloksen. Toki tavallisen tulostimen paperille voi tulostaa millaisen kuvan haluaa, mutta 3D-tulostuksen malloissa vain taivas on rajana. Pelkkä ajatus siitä, että esimerkiksi hetken mielijohteesta 3D-mallinnusohjelmalla taiteiltu kolmiulotteinen figuuri olisi tulostettavissa ja tulostuksen jälkeen fyysisesti sinun kädessäsi, on vähintäänkin mullistavaa.

2.1 3D-tulostuksen historia

Kolmiulotteinen tulostaminen on ollut tieteilijöiden ja suurten organisaatioiden käytössä jo vuosikymmeniä. Ajatus kolmiulotteisesta tulostimesta tuli ensimmäisen kerran jo vuonna 1976, kun mustesuihkutulostin keksittiin. Vuoteen 1984 mennessä mustesuihkutulostimen konsepti oli muovautunut pelkän musteen tulostamisesta materiaalien tulostamiseen. Siitä seuranneiden vuosikymmenten aikana 3D-tulostusta sovellettiin useiden teollisuusalojen käyttöön, kuten autoilu- ja ilmailuteollisuuteen, tuotevalmistukseen sekä lääketieteeseen. (T. Rowe Price Connections 2012.)

Vuonna 1984 nykyisen 3D Systems-yrityksen perustajajäsen Charles Hull kehitti SLA-teknologian, eli stereolitografian, joka mahdollisti käsin kosketeltavan kolmiulotteisen ob-

jektin tulostamisen digitaalisesta datasta. Sillä luotiin 3D-malli kuvasta, jonka jälkeen se oli tulostettavissa. Hull keksi yhdessä kehitystiiminsä kanssa STL-tiedostomuodon, joka on yhä tänä päivänä käytetyin 3D-tulostuksen kieli tietokoneen ja 3D-tulostimen väliseen keskusteluun. (T. Rowe Price Connections 2012.)

Tämän tutkimuksen käyttämän pursotustekniikan, eli FDM-menetelmän, kehitti Scott Crump vuonna 1988. Keksinnön seuraamana hän perusti vaimonsa kanssa Stratasys-yrityksen, joka on tänä päivänä suurin 3D Systemsin kilpailija. FDM-menetelmä eroaa stereolitografiasta siten, että siinä tulostuspäää pursottaa kuumaa materiaalia kerroksina päällekkäin, muodostaen kolmiulotteisen muodon. (Barnatt 2013, 77–78.)

2.2 3D-tulostus nykyaikana

3D-tulostaminen tekee edelleen teollista vallankumousta, jossa konsepti on siirtymässä suurilta organisaatioilta ja yrityksiltä yksityisten käyttäjien koteihin käyttöön. Maailmanlaajuisesti ilmiö on vielä melko pieni, mutta uudet innovaatiot, yhteisöllisyys ja harrastajaporukat auttavat 3D-tulostamista kasvamaan kovaa vauhtia eteenpäin. Kotikäyttäjien suosiossa ovat tähän asti olleet pelkästään FDM-tulostimet, koska niiden valmistaminen ja niillä tulostaminen on muihin 3D-tulostimiin verrattuna huomattavasti halvempaa.

Eräs suurimmista kotikäyttöön tarkoitettujen 3D-tulostinten valmistajista on MakerBot Industries. Yrityksen syntymisen pohjalla vuonna 2009 oli RepRap-projekti, jossa tarkoituksena oli luoda itseään monistamaan kykenevä avoimen lähdekoodin 3D-tulostin, jonka mallit kuka tahansa voisi ladata ja rakentaa. Valmistaminen vaati kuitenkin suuren työn, joten MakerBot alkoi valmistamaan kyseisten mallien tulostimia valmiina paketteina käyttäjille. MakerBot on myös panostanut sen yhteisöön perustamalla suosittu Thingiverse-sivuston, jossa kuka tahansa voi ladata tai jakaa kolmiulotteisen mallin muiden käyttäjien kanssa. (Barnatt 2013, 84–86.)

Nykyään myös pieniä 3D-tulostimia valmistavia yrityksiä on markkinoilla lukuisia. Eräs merkittävin kanava tulostimia valmistavien yritysten syntymiselle ovat olleet erilaiset joukkorahoituspalvelut kuten Kickstarter ja IndieGoGo. Palveluiden tarjoamien kanavien suosio on osoittanut, että kiinnostusta 3D-tulostamiseen löytyy paljon. Suurimmat 3D-tulostimen joukkorahoituskampanjat ovat keränneet yli miljoona dollaria, jotta startup-yritykset ovat päässeet alkuun tuotteidensa kanssa. Näitä ovat muun muassa Formlabsin SLA-teknologiaa käyttävä Form1-tulostin sekä M3D-yrityksen FDM-teknologiaa käyttävä Micro-tulostin. (Honkanen 30.1.2015.)

Ensimmäinen ja toistaiseksi ainoa suomalainen yritys, joka valmistaa 3D-tulostimia, on seinäjokelainen miniFactory. Suomesta löytyy silti lukuisia yrityksiä, jotka hyödyntävät 3D-tulostusta yrityksen liiketoiminnassa esimerkiksi sisustussuunnittelussa, räätälöityjen tuotteiden valmistamisessa tai insinööriyössä. Monet yritykset myös myyvät suoraan 3D-tulostuksia ja -skannauksia asiakkaille. Tulostuspalvelussa asiakas lähettää mallinsa yritykselle, joka tulostaa siitä kolmiulotteisen mallin, mikä lopulta lähetetään asiakkaalle. (Rissanen & Pekkanen 2014.)

2.3 Tulevaisuuden näkymä

Jos suosio 3D-tulostuksen ympärillä jatkaa kasvuaan samanlaisena kuin viimeisen viiden vuoden aikana, voi suuria kaupallisia läpimurtoja tapahtua lukuisilla markkina-aloilla 3D-tulostuksen tarjoamien innovaatioiden avulla. Itse tuotteiden valmistamiseen 3D-tulostaminen toisi suuria parannuksia käyttäjäkokemuksen kannalta. 3D-tulostuksen yleistyminen myötä uusia myyntimalleja joudutaan kehittämään entisestään sekä palveluiden saatavuutta laajentaa huomattavasti, kun asiakkaat elävät yhä enemmän välittömien tarpeiden maailmassa. (Krassenstein 13.7.2014.)

Tuotannon lokalisointi on yksi, jossa yritykset hyötyisivät valtavasti 3D-tulostuksesta. Asiakkaat pystyisivät itse tulostamaan tarvitsemiaan malleja, jotka ostettaisiin yritykseltä tai tuotteiden tuotantoa pysyttäisiin tuomaan lähemmäksi myyntipisteitä, käyttäen pienempiä 3D-tulostamisen resursseja suuriin tehtaisiin verrattuna. Tuotteita valmistettaisiin myös tarkemmin tarpeen mukaan ja tuotteita pystyttäisiin muokkaamaan asiakaskohtaisesti. Tämä myös tarkoittaisi sitä, että suurille varastotiloille ei olisi enää tarvetta. (Smith 2015.)

Jo olemassa olevien 3D-tekniikoiden sekä uusien tekniikoiden kehittäminen on myös suuri tekijä ilmiön suosion kannalta. Toistaiseksi kotikäyttöiset kolmiulotteiset tulostimet käyttävät pääsääntöisesti pursotustekniikkaa laitteiston ja käytettävien materiaalien edullisuuden takia muihin tekniikoihin verrattaessa. Pursotustekniikan suurin haastaja on SLA-tekniikka. SLA-tulostimet kykenevät haastavampien kappaleiden tulostamiseen, mutta ne maksavat tällä hetkellä kaksinkertaisesti enemmän kuin FDM-tulostimet. Silti uusien pienyritysten syntyminen 3D-tulostuksessa vaikuttaa kaikkien tuotteiden hintojen laskuun, kun yritykset etsivät jalansijaa markkinoilla ja kilpailua syntyy entistä enemmän. (Lipson & Kurman 2013, 45–47.)

3 3D-tulostustekniikka

3D-tulostukselle on kehitetty lukuisia tekniikoita, joita käytetään erilaisiin tarkoituksiin. Erilaiset tekniikat ovat laajemmin käytössä teollisuuden aloilla, mutta myös kotikäyttöisissä tulostimissa alkaa ilmetä vaihtelua tekniikoiden kanssa. Yleisesti kolmiulotteisesta tulostamisesta puhuttaessa voidaan myös puhua additiivisesta valmistuksesta (engl. additive manufacturing). (Lipson 2013, 68.)

Tänä päivänä merkittävimpiä erilaisia 3D-tulostustekniikoita on kolme käytettävissä. Ensimmäisessä pursotusmenetelmän tekniikassa (FDM) on kyse sulatetun materiaalin asettamisesta edellisen kerroksen päälle luomalla tasoja, ja täten kolmiulotteisia esineitä. Toisessa stereolitografian tekniikassa (SLA) taas tulostimet yhdistävät raakaa materiaalia, esimerkiksi nestemäistä hartsia, jota lisätään kerroksittain kohdistamalla siihen laseria tai tartunta-ainetta, täten jähmettämällä kolmiulotteisia tasoja. Kolmannessa lasersintrauksen tekniikassa (SLS) tulostin kovettaa laservaloa käyttäen esimerkiksi metallijauheen peitteisestä tasosta kerroksen, jonka jälkeen uusi jauhekerros asetetaan edellisen päälle ja kovetetaan. Lasersintraus on 3D-tekniikoista eniten teollisuuden käytössä. (Barnatt 2013, 58–62.)

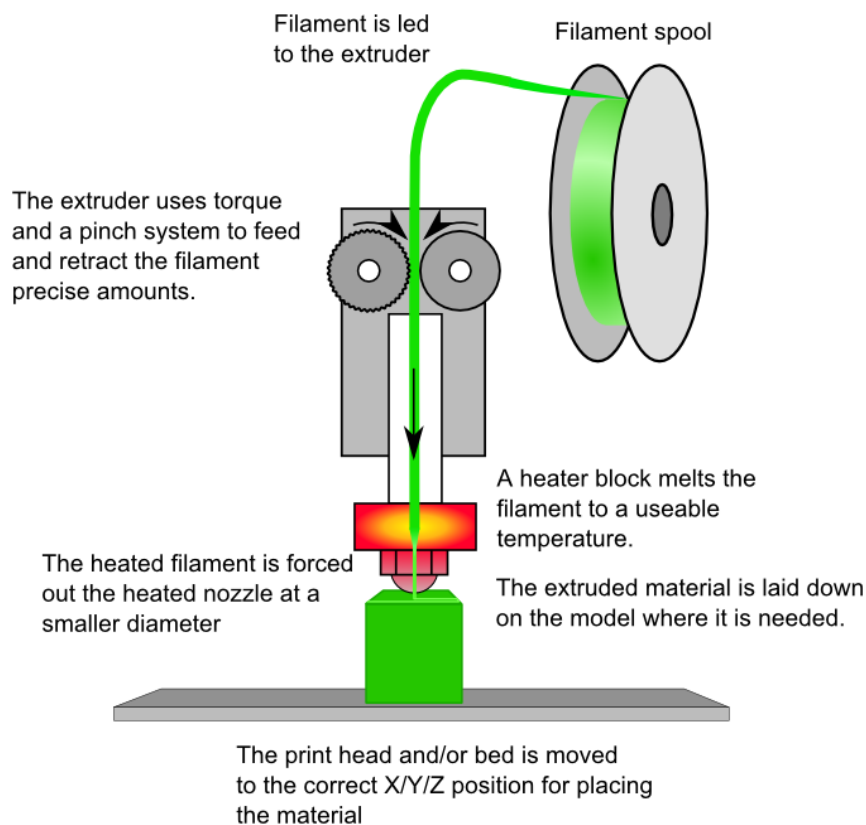
Näiden kolmen lisäksi uudenlaisia tekniikoita kehitetään ja muokataan jatkuvasti. Tämän tutkimuksen 3D-tulostimet käyttävät ensimmäisenä kvalitua pursotustekniikkaa testitulostuksia tehdessä, jossa käytetään rullalta syötettävää termoplastista muovilankaa.

3.1 3D-tulostusohjelmat

3D-mallin luominen ja tulostaminen itsessään vaatii kolmea eri ohjelmaa. Ensin tarvitaan 3D-mallinnusohjelma, jolla suunnitellaan virtuaalinen muoto mallille. Yleensä tähän käytetään CAD-ohjelmistoja (engl. computer-aided design) eli tietokoneen avustamia mallinnuksia. Toiseksi tarvitaan viipalointiohjelma, joka muuntaa mallitiedoston tarkaksi liikeratajonoksi, eli G-koodiksi, jota pitkin 3D-tulostin osaa liikuttaa tulostinpäätä. Kolmantena käytetään vielä 3D-tulostimen ohjaus- tai käyttöohjelmaa, joka lähettää viipaloidut ohjeet tulostimelle oikeaan aikaan ja tarjoaa reaaliaikaisen käyttöliittymän tulostimen ominaisuuksista ja asetuksista. Usein kyseiset ohjausohjelmat sisältävät viipalointiohjelman itsessään tai niihin voi ladata erilaisia viipalointiohjelmiä lisäominaisuutena. (Kaziunas France 2014, 31–36.)

3.2 FDM-menetelmä

FDM-menetelmä, eli fused deposition modeling, tarkoittaa kolmiulotteista tulostusprosessia, jossa haluttua raakaa materiaalia pursotetaan sulatettuna tulostuspään läpi nauhana, muodostaen siitä kerroksia. Prosessissa käytetään kuvassa 1 osoitetulla tavalla esimerkiksi muovilankaa, jossa lanka syötetään kuumennetun tulostuspään läpi, jolloin sulanut muovi asetetaan ensin tulostusalustalle ensimmäiseksi kerrokseksi ja sen jälkeen kerroksina aikaisemman jäähtyneen tason päälle. Prosessissa voidaan käyttää myös erilaisia metalleja, mutta tämä on lähinnä teollisuuden käytettävissä.



Kuva 1. FDM-menetelmä (RepRap 2015a.)

FDM-menetelmä on eniten käytetty kotikäyttöisten 3D-tulostimien teknologiana erityisesti siksi, että ne maksavat vähemmän kuin esimerkiksi SLA-tulostimet. Valitettavasti FDM-menetelmän kerrosten sitomisvoiman asettamat rajoitteet voivat johtaa kompromisseihin, jolloin joutuu tinkimään tulostettavan kappaleen tarkkuudessa ja pinnan sulavuudessa. Lisäksi ohuempia muovilankoja tulostettaessa, kun halutaan pikkutarkkaa jälkeä tulostetaviin malleihin, tulostusajat kasvavat huomattavasti pidemmiksi. (Pinshape, 11.6.2014.)

FDM-menetelmä käsitteenä on patentoitu Stratasys-yrityksen käyttöön ja sen 3D-tulostimille yrityksen kehitettyä alun perin tekniikan. Patentista johtuen termiä hieman väärinkäytetään erilaisia pursotustekniikkaa käyttävien 3D-tulostimien kanssa. Kuitenkin ensimmäisenä tekniikalle nimen antaneena ”fused deposition modeling”-termistä on tullut patentista huolimatta yleinen nimitys vastaavien tulostimien kanssa. Muita yleisiä eri yritysten käyttämiä patentoimattomia nimityksiä tekniikalle ovat fused filament fabrication (FFF), fused filament modeling (FFM) sekä plastic jet printing (PJP). (Barnatt 2013, 28.)

3.3 CAD

CAD eli computer aided design, tarkoittaa tietokoneella avustettua mallintamista, joka teollisuudessa tarkoittaa mallintamista sekä ohjelmisto- että laitteistotasolla. Aikaisemmin mallintamiseen tarkoitettut tietokoneet rakennettiin erikseen omaksi laitteeksi. Nykyään CAD-ohjelmistoja pystyy hankkimaan suoraan kotikoneella käytettäväksi. CAD-ohjelmia löytyy kalliista yrityskäyttöisistä ohjelmistoista aina ilmaiseksi ladattaviin harrastajaohjelmistoihin. Ilmaisista ohjelmista suosituimmat ovat Autodesk 123D, SketchUp sekä avoimen lähdekoodin Blender.

CAD-mallintamisessa on tärkeää pystyä tarkastelemaan luotua mallia jokaisesta tarvittavasta kulmasta, mikä kolmiulotteisten mallien luomisessa tarkoittaa mallin tarkastelua mistä tahansa tahansa. On myös tärkeää pystyä säätämään mallin eri arvoja ja ulottuuksia, kuten esimerkiksi sivun paksuutta tai reunan kaarevuutta. Kolmiulotteisessa mallintamisessa objektia hallinnoidaan X-, Y- ja Z-akseleilla. (Barnatt 2013, 87–88.)

3.4 G-koodi

G-koodilla tarkoitetaan merkkijonoa, joka ohjaa sitä lukevan koneen liikerataa käyttämällä yksiselitteisiä symboleja. Se on käytetyin numeerisesti ohjattujen koneistojen ohjelmointikieli. Sen avulla ihminen kertoo koneelle, mitä halutaan tehdä. 3D-tulostuksessa mallitiedoston lopulta muututtua G-koodiksi, osaa tulostin esimerkiksi liikuttaa tulostuspäätä halutulla nopeudella, haluttuun suuntaan ja halutulla lämmöllä kuvan 2 mukaisesti.

```
9 M107
10 M190 S100 ; set bed temperature
11 M104 S230 ; set temperature
12 G28 ; home all axes
13 G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
14
15 M109 S230 ; wait for temperature to be reached
16 G21 ; set units to millimeters
17 G90 ; use absolute coordinates
18 M82 ; use absolute distances for extrusion
19 G92 E0
20 G1 E-0.80000 F900.00000
21 G92 E0
22 G1 Z0.500 F4200.000
23 G1 X101.464 Y67.930 F4200.000
24 G1 Z0.300 F4200.000
25 G1 E0.85000 F900.00000
26 G1 X102.304 Y68.500 E0.90302 F1800.000
27 G1 X102.304 Y100.954 E2.59860
28 G1 X100.954 Y102.304 E2.69831
29 G1 X49.046 Y102.304 E5.41027
30 G1 X47.696 Y100.954 E5.50998
31 G1 X47.696 Y49.046 E8.22194
32 G1 X49.046 Y47.696 E8.32165
33 G1 X100.954 Y47.696 E11.03361
34 G1 X102.304 Y49.046 E11.13332
```

Kuva 2. Esimerkki Slic3rin muodostamasta G-koodista tulostuksen aloituksessa.

3D-tulostuksessa G-koodi valmistellaan tulostimelle liikeradan lukua varten käyttämällä viipalointiohjelmaa. Nämä ohjelmat käsittelevät CAD-mallin, viipaloivat sen tasoihin ja syöttävät tulostuspäälle tarvittavat arvot jokaisen tason liikerataa varten. Jokaiseen liikera- taan ja sijaintiin ovat määriteltävissä tarkat arvot. Kun tulostus aloitetaan, 3D-tulostin lukee G-koodin merkkijonona alusta loppuun. Se muovautuu tulostimen liikeradaksi, jonka avul- la saadaan kolmiulotteinen malli tulostettua. (RepRap 2015b.)

4 Viipalointiohjelmat

Viipalointi (engl. slicing) on 3D-tulostamisessa se prosessi, joka muuttaa STL-tiedostomuotoisen mallin komentojonoksi, eli G-koodiksi, joka kertoo tulostimelle, mihin liikuttaa tulostuspäätä ja milloin pursuttaa tulostusmateriaalia. Käytännössä ohjelma viipaloi kolmiulotteisen mallin kuvan 3 mukaisesti horisontaalisiin tasoihin, jonka jälkeen se generoi kulkemispolun tulostuspäälle jokaista tasoa varten. 3D-tulostimen toimintaa hallitsee pitkälti sen ajuriohjelmisto, joka on tärkeässä osassa tulostusta tehdessä. Tulostusohjelmisto mukauttaa komentovirran ohjastamaan tulostusliikettä ja muuttaa tarvittaessa tulostimen moottorin kiihdytystä välttääkseen tulostushäiriöitä. Viipalointiohjelmaa voidaan kutsua myös G-koodin generaattoreiksi. (Kaziunas France 2014, 6.)



Kuva 3. Viipalointiprosessi (Hot Mess 3D 2015.)

Viipalointi on tärkeä osa 3D-tulostamista. Se on tarkka tasapainottelu laadun, nopeuden ja käytetyn materiaalmäärän kanssa. Viipaloinnin nopeuteen vaikuttavat viipaloitavan mallin koko, tietokoneen prosessointitehokkuus sekä itse viipalointiohjelma. Valinta sopivan viipalointiohjelman välillä sekä oikeiden viipalointiparametrien käyttö 3D-tulostaessa voi merkitä eroa täydellisen tulostuksen sekä muovisen spagettikasan väliltä. (Kaziunas France 2014, 6.)

4.1 Slic3r

Slic3r sai alkunsa vuoden 2011 lopussa RepRap-projektin sisällä, jolloin oli tarkoitus kehittää helppokäyttöisempi ja sulavampi ohjelmisto G-koodin generointiin. Siihen asti tarkkojen, esimerkiksi 0.1mm kerrospaksuisten, tulostusten ajat kestivät useita tunteja, mikä tarkoitti erilaisten testausten välissä pitkiä odotusaikoja. Viipaloinnin tehokkuudesta oli tullut projektille pullonkaula, joten paremmalle ohjelmistolle oli kysyntää. (Canessa, Fonda & Zennaro 2013, 78-80.)

Slic3rin perimmäinen tarkoitus oli hyvin kirjoitettu ja dokumentoitu avoimen lähdekoodin ohjelmisto, jota olisi helppo kehittää entisestään RepRap-projektin kesken. Sen lisäksi

viipalointiohjelman käyttöä haluttiin helpottaa niin, että myös ne ihmiset, jotka eivät ole tiivistä projektin kanssa tekemisissä, pystyisivät käyttämään ongelmitta ohjelmaa. Viimeisimpänä haluttiin parantaa konfiguroinnin monipuolisuutta viipalointia suorittaessa. Esimerkiksi tukimateriaalien monipuolisuutta, tulostuksen täytön hallinnointia ja useamman samanaikaisen kerrospaksuuden käyttöä haluttiin kehittää.

(Canessa, Fonda & Zennaro 2013, 78-80.)

4.2 CuraEngine

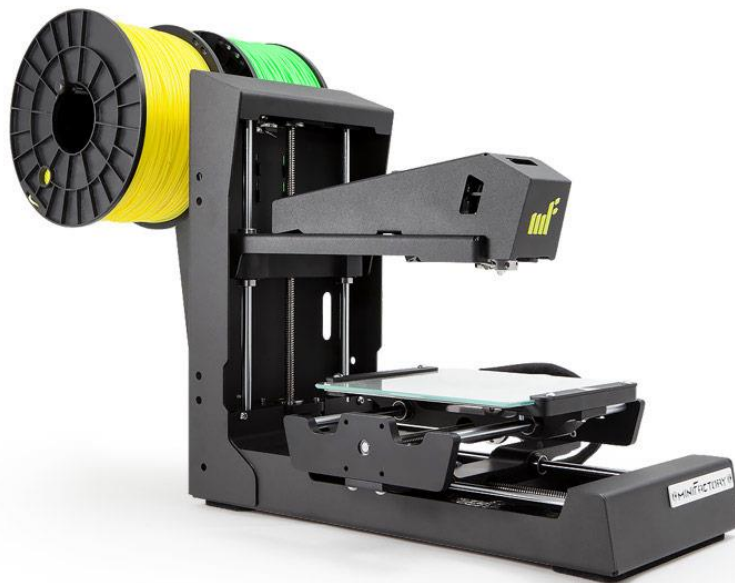
CuraEngine-ohjelman kehitti alun perin Ultimaker 3D-tulostimen käyttäjä David Braam. Hänen tarkoituksenaan oli kehittää parempi ja kehittyneempi viipalointiohjelma kuin Skeinforge Ultimakerin käyttöä varten. Cura käyttää avoimen lähdekoodin C++ ja sen käyttöliittymäsovellus on avoimen lähdekoodin Pythonia. Cura on lähtökohtaisesti esikonfiguroitu toimimaan Ultimaker 3D-tulostimissa, mutta sitä voi käyttää muissakin RepRap-tulostimissa. Curan avoimen lähdekoodin on tarkoitus houkutella käyttäjiä kokeilemaan ja muokkaamaan ohjelmaa tarpeidensa ja taitojensa mukaisesti. Ohjelman julkaisun jälkeen siitä tulikin Ultimaker-käyttäjyhteisössä suosittu ja se osoitti kuinka kokeellisuus voi johtaa innovaatioon 3D-tulostuksen parissa. (de Smale 2014.)

4.3 Skeinforge

Vuonna 2009 julkaistu Skeinforge-ohjelman kirjoitti alun perin Enrique Perez osaksi RepRap-projektia varten. Ohjelman päivityksiä pystyi seuraamaan kehittäjän blogissa vuoteen 2012 asti, mutta sen jälkeen projekti on jäänyt ohjelman käyttäjien vastuulle (Perez 21.1.2012). Skeinforge-ohjelman käyttöliittymä on hyvin pelkistetty ja alkeellinen verrattuna muihin viipalointiohjelmiin. Sen ikä sekä nykypäivän vähäinen käyttäjämäärä heijastuvat hyvin käyttöliittymästä. Silti sen perimmäinen tehtävä on vain muuttaa kolmiulotteisia malleja G-koodiksi 3D-tulostimia varten. Skeinforge on avointa lähdekoodia ja sitä voi käyttää kaikissa MakerBot, RepRap sekä miniFactory 3D-tulostimissa. (Johnson, Rowell, Deason & Eubanks 2011.)

5 3D-tulostusympäristö

Tätä tutkimusta varten käytettiin Haaga-Helian 3D-tulostuslaboratorion miniFactory v3-tulostimia. Seinäjokelainen miniFactory on toistaiseksi ainoa suomalainen 3D-tulostimia valmistava yritys. Tulostimet myydään valmiina paketteina ja ne ovat tarkoitettuja sekä yritys-, että kotikäyttöön. Yritys panostaa yhteisölliseen käyttäjäkokemukseen pitämällä omaa verkkokampusta käyttäjillensä, jossa tulostimen ostaneet voivat jakaa omia malleja ja ideoita toistensa kesken. (miniFactory 2015.)



Kuva 4. miniFactory v3-tulostin (miniFactory 2015.)

Tulostimet käyttävät pursotustekniikkaa kolmiulotteisten kappaleiden tulostamiseen. Laitteen aivoina toimii Arduino-robotti, joka on avoimen lähdekoodin tietokonelaitteisto-, mikro-ohjain- ja ohjelmistoprojekti. Arduino käsittelee tulostimen kaikkia toimintoja, kuten X-, Y- ja Z-akselien liikerataa, materiaalin syöttöä ja lämmön hallintaa. Tulostimen alusta liikuttaa pituus- ja leveysakseleita tulostuksen aikana, kun taas tulostuspään varsi liikkuu korkeusaskelia pitkin (Kuva 4). Tulostin tarvitsee toimiakseen Repetier-Host-ohjausohjelman, joka yhdistetään tietokoneelta 3D-tulostimeen ennen tulostamista. (miniFactory 2015.)

5.1 Keskeiset parametrit

3D-tulostuksessa on tärkeää tehdä oikeat valinnat erilaisia tulostuksia varten ja niiden pohjalta on hyvä tiedostaa keskeiset parametrit 3D-tulostuksessa. Nämä parametrit koskevat ensisijaisesti FDM-menetelmän tulostusprosessia. Ensiksi on tärkeää valita oikea

materiaali tulostukseen. Pursotusmenetelmän tulostuksissa on hyvä miettiä, tulisiko käyttää esimerkiksi PLA-, ABS- tai nailonmuovilankaa. Jokaiselle materiaalille on omat suositellut tulostuslämpötilat, jotka tulee ottaa huomioon erilaisia tulostuksia konfiguroidessa.

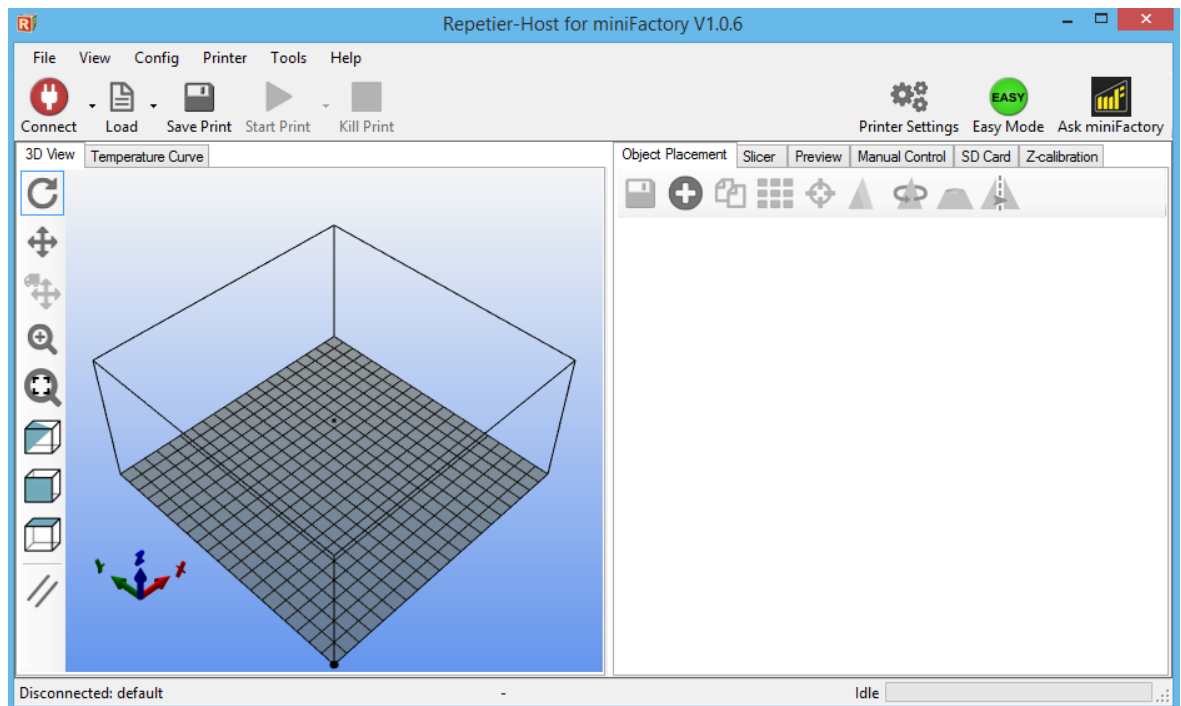
Toiseksi on hyvä miettiä tulostettavan kappaleen täytettä (engl. infill). 3D-malleja viipaloidessa voi valita tulostettavan kappaleen täyteen prosentteina. Se siis tarkoittaa kuinka suurelta osalta tulostin täyttää mallin sisäosan tulostusmateriaalilla. Täyte vaikuttaa mallin painoon ja vahvuuteen, mutta yksinkertaisia malleja tulostaessa täyteprosentti voi hyvin olla 10–40 prosenttia tulostusmateriaalin käytön sekä tulostusajan säästämiseksi. Täyteen määrällä on myös suuri vaikutus tulostukseen käytettävään aikaan.

Kolmanneksi on hyvä huomioida tulostuspään nopeus. Tulostusasetuksissa on kahta eri nopeutta, joita pystyy säätämään. Ensimmäinen on tulostusnopeus, joka kertoo kuinka nopeasti se liikuttaa tulostuspäätä tulostettavalla tasolla, kun se pursottaa materiaalia kerrokselle. Toinen on siirtymänopeus, joka tarkoittaa tulostuspään siirtymistä esimerkiksi yhden kerroksen tulostamisen lopusta uuden kerroksen alkuun, jonka välillä se ei pursota materiaalia. Tulostusnopeudessa on tärkeää huomioida, ettei nopeus ole liian suuri, jolloin tulostusmateriaali ei tartu kerrokseen, mallin muoto hajoaa ja tulostus epäonnistuu. Siirtymänopeus ei kuitenkaan ole kovin merkittävä tulostusnopeuteen verrattuna. Tärkeää on vain huomioida, etteivät nämä kaksi mene sekaisin keskenään.

Neljäntenä ja viimeisimpänä tulee ottaa huomioon tulostettavan kappaleen kerrospaksuus. Kerrospaksuudella on suurin vaikutus tulostettavan kappaleen ulkonäköön ja tarkkuuteen. Tähän on tärkeää löytää sopiva arvo, sillä pienempi kerrospaksuus saa tarkemman lopputuloksen aikaan, mutta tulostusaika on huomattavasti pidempi, koska 3D-tulostin joutuu tulostamaan useampia kerroksia prosessin aikana. Suurempi kerrospaksuus taas saa lopputuloksen näyttämään heikommalta, mutta tulostusaika on huomattavasti lyhempi.

5.2 Repetier-Host-ohjelma

Repetier-Host on helppokäyttöinen ja ilmainen 3D-tulostamisen ohjainsovellus, joka toimii lähes kaikkien RepRap-projektin sekä miniFactory 3D-tulostimien kanssa. Ohjelmassa on kuvan 5 mukainen selkeä graafinen käyttöliittymä, jossa on visualisoitu tila tulostettavan mallin tarkasteluun sekä välilehdet tulostuksen hallinnointia varten. Mallia voi muun muassa siirtää, peilata, muuttaa sen kokoa tai monistaa suoraan Repetier-Hostista. Lisäksi korkeusakselin kalibrointiin 3D-tulostinta varten löytyy kätevä apusovellus, jota voi helposti hiiren painalluksilla käyttää. (RepRap 2015c.)



Kuva 5. Repetier-Host aloitusikkuna.

3D-tulostin tulee olla kytkettynä tietokoneen USB-porttiin, jolloin Repetier-Host pystyy tunnistamaan laitteen. Käyttöliittymästä valitaan Connect, jolloin se muodostaa yhteyden 3D-tulostimeen. Kun yhteys on luotu, tulee tulostimen laitteistoasetukset kalibroida oikein. Asetuksista tulee esimerkiksi syöttää tulostusalustan koko, jolloin Repetier-Host skaalaa virtuaalisen tulostusnäkömön sen mukaiseksi. Tämä auttaa hahmottamaan tulostettavan mallin kokoa todellisen alustan rajoihin verrattuna.

Tämän jälkeen haluttu STL-tiedostopäätteinen malli voidaan ladata Repetier-Hostiin sekä viipaloida halutulla ohjelmalla. Viipaloinnin jälkeen yksittäisiä tasoja voi tarkastella Preview-välilehdellä sekä näkyviin saa myös halutessa koko G-koodin muodostaman tulostuspään liikeradan. Ohjelma sisältää oletuksena Slic3r-, Skeinforge- ja CuraEngine-viipalointiohjelmat.

5.3 Tulostusprosessi

Kokonaisuudessaan tulostusprosessiin kuuluu viisi vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään tai ladataan valmis kolmiulotteinen malli, joka pitää muuttaa STL-tiedostomuotoiseksi. Jos malli on esimerkiksi itse luotu CAD-ohjelmalla, on se hyvä tarkastaa 3D-tulostamista varten tehdyllä validointiohjelmalla. Ohjelma pystyy kertomaan, jos mallissa on esimerkiksi mahdottomia reikiä tai ilmassa leijuvia osia, joita 3D-tulostin ei pysty tulostamaan.

Tulostusprosessin toisessa vaiheessa yhdistetään 3D-tulostuksen hallinnointiohjelma tulostimeen, tässä tapauksessa Repetier-Host-ohjelma, sekä huolehditaan siitä, että laitteen tason asetukset ovat kunnossa. 3D-tulostimen tulostinpään etäisyys tulostusalustasta tulee myös kalibroida aina ennen ensimmäistä kertaa tulostinta käytettäessä. Kun kaikki on kunnossa, voidaan STL-tiedosto tuoda Repetier-Hostiin jatkokäsittelyä varten.

Kolmannessa vaiheessa tulee valita haluttu viipalointiohjelma tulostamista varten. Jokainen viipalointiohjelma tulee kalibroida omista asetuksista erikseen tai niitä varten voi tuoda valmiin asetustiedoston Repetier-Hostiin. Viipaloinnin asetuksilla on suurin vaikutus tulostettavan kappaleen ulkonäköön sekä sen tekemiseen vievään tulostusaikaan. Kun asetukset ovat kunnossa, voidaan suorittaa STL-tiedoston viipalointi, joka luo G-koodin tulostusta varten. Viipaloinnin jälkeen tai jopa tulostuksen aikana G-koodin komentojonoon voi halutessaan lisätä yksittäisiä komentoja Repetier-Hostista.

Neljäntenä on itse tulostamisen aika. Tämä vaihe on pitkälti täysin automaattinen, olettaen että tulostin toimii ja on kalibroitu oikein, laitteen asetukset ovat hyvin, viipalointiohjelman asetukset ovat hyvin sekä G-koodi on yhtenäinen ja ilman ristiriitaisia komentoja alusta loppuun. Kolmiulotteisen kappaleen tulostaminen voi hyvinkin viedä useita tunteja. Tämä kaikki riippuu muun muassa tulostimen tehokkuudesta, tulostusnopeuden asetuksista, kerrospaksuudesta sekä tulostettavan kappaleen fyysisestä massasta. Tulostuksen aikana on mahdollista katkaista tulostus hetkellisesti, esimerkiksi jos jollakin tasolla haluaa vaihtaa tulostettavan langan väriä ja jatkaa sen jälkeen tulostamista. Lisäksi koko tulostamisen voi keskeyttää jos havaitaan jotain vikaa prosessin aikana.

Viidennessä ja viimeisessä vaiheessa kolmiulotteisen kappaleen tulostaminen on valmis ja tulostin on päättänyt työnsä. Kappale irrotetaan tulostusalustalta vasta, kun alusta on jäähtynyt tarpeeksi. Usein tulostukset eivät ole täysin valmiita tekeleitä heti tulostamisen jälkeen, sillä kappaleille luodaan esimerkiksi tukipilareita kaarevia rakenteita varten tai ohut kehä kappaleen ulkoreunoille paikalla pysymistä varten. Nämä lisätoimenpiteet voi viipalointiohjelma suorittaa automaattisesti asetusten salliessa G-koodin muunnosvaiheessa tai niitä voi lisätä manuaalisesti itse. Kyseiset tukirakennelmat täytyy itse poistaa tulostuksen päätyttyä. Tämän jälkeen koko prosessi on valmis.

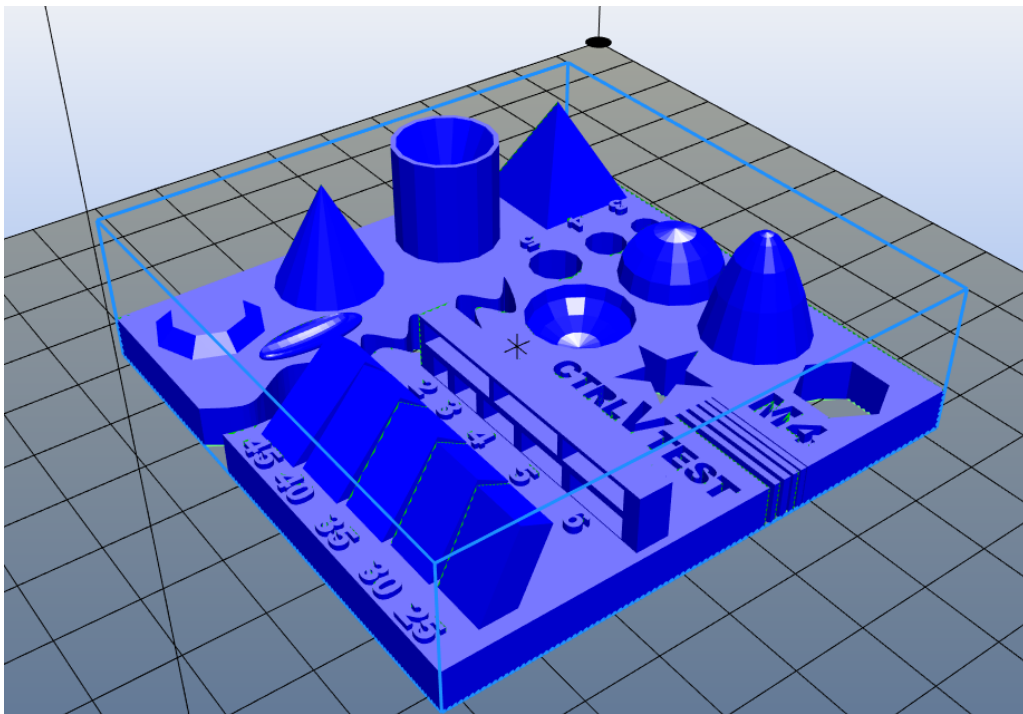
5.4 Mallitiedosto

Testauksen mallitiedostoksi valittiin Thingiverse-sivustolta käyttäjän ctrlV julkaisema STL-tiedosto (Thingiverse 2015). Kappaleen runko-osa on kooltaan 4 x 50 x 50 millimetriä.

Malli muodostuu monista eri osa-alueista, joiden on tarkoitus testata 3D-tulostimen rajoja.

Tällaisia ominaisuuksia ovat

- kolme eri reikää, 3mm, 4mm ja 5mm halkaisijalta
- pyramidi, kartio ja pienet numerot testaamaan tarkkuutta
- aaltokuvio ja puoliympyrä testaamaan pyöreiden tarkkuutta
- ohuet seinävälit 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm ja 0.5mm
- kaarevat seinämät kaltevuudeltaan 25°, 30°, 35°, 40° ja 45°
- eripituiset sillat 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm ja 9mm
- koko päällystaso mittaamaan pinnan tasaisuutta.



Kuva 6. Mallitiedosto hahmoteltuna Repetier-Host-ohjelmassa.

Tämä siis tarkoittaa monen eri 3D-tulostukseen liittyvän ominaisuuden testaamista ja viipalointiohjelmien suorituksen sekä konfiguroinnin tarkkuutta. Tarpeeksi monimutkaisella mallilla on myös tarkoitus löytää helpommin mahdolliset eroavaisuudet viipalointiohjelmien luoman G-koodin välillä.

6 Viipalointiohjelmien testaus

Testaus suoritettiin käyttämällä yhtä miniFactory v3-tulostinta. Vain yksi tulostin valittiin siksi, että prosessiin ja tulostusjälkeen saataisiin mahdollisimman yhtäläiset lähtökohdat, eikä kalibrointiin tulisi laitteistotasolla eroavaisuuksia. Esimerkiksi korkeusakseli on tällöin jokaisella tulostuksella kalibroitu samanlaisesti. Tulostusmateriaaliksi valittiin Lego-palikoissakin käytettävä ABS-muovi, jota käytetään tulostuksessa 1.75mm ohuisena muovilankana. Tämän pohjalta filamentti- ja tulostuslämpöasetukset voitiin muodostaa. Yhdet alustavat testaustulostukset suoritettiin myös PLA-muovilla, käyttäen muuten samoja viipalointiasetuksia, paitsi muuttaen lämpöasetukset suositelluiksi.

Ensisijainen tulostusjäljen ja viipalointiparametrien optimointi suoritettiin käyttäen Slic3r-ohjelmaa, jonka jälkeen saatiin käsitys laitteen ja tulostusasetusten rajoista sekä tarkoista arvoista joihin tulisi tähdätä. Muutamassa konfigurointitestauksessa tehtiin sekä Slic3r-että CuraEngine-testit. Skeinforgesta suoritettiin pelkästään lopullinen testitulostus ohjelman toiminnan erilaisuuden sekä melko puutteellisen dokumentaation johdosta. Yhtenäiseksi parametreiksi päätettiin lopulta filamentin testauksen pohjalta 220 °C tulostuspään lämpötilaksi sekä 100 °C tulostusalustan lämpötilaksi, kerrospaksuudeksi 0.1mm, täytöksi 30 % sekä keskimääräiseksi tulostusnopeudeksi 50mm/s. Tällöin tulostusalusta liikkuu materiaalia pursuttaessa 50 millimetriä sekunnissa. Tarkat tiedot jokaisen viipalointiohjelman merkittävimmistä asetuksista löytyvät työn liitteistä.

Kalibrointiin ja testaukseen tehtiin lopulta yhteensä 12 kappaleen tulostusta, jossa tulostusprosessi meni vähintään yli puolet tulostusajasta. Muutamaan otteeseen tulostus jouduttiin lopettamaan aivan loppuhetkillä väärin parametrien tai muun ongelman takia. Keskimääräisesti yhden kappaleen tulostamiseen meni hieman yli kaksi tuntia. Normaalikokoisten kappaleiden tulostamisen lisäksi tehtiin myös yksi 1.5-kertaisen kappaleen testaus, jonka tulostukseen meni neljä tuntia. Lisäksi jokaisen viipalointiohjelman käyttöön perehdyttiin huolellisesti ennen ohjelman käyttöä.

6.1 Tulostimen asetukset

Repetier-Host-ohjelmassa tulee 3D-tulostinta käyttäessä määrittää tulostimelle omat laiteasetukset kohdalleen, jotta se ensinnäkin osaa ottaa yhteyden laitteeseen, sekä pystyy kertomaan ohjelmalle tulostimen ominaisuuksien raamit. Tästä on hyötyä myös joidenkin viipalointiohjelmien arvojen konfiguroinnissa, sillä ne pystytään hakemaan suoraan tulostimen asetuksista esimerkiksi syöttämällä kyseiseen kohtaan arvon 0.

Kun tulostinasetukset ovat kunnossa, Repetier-Host pystyy ohjaamaan tulostinta, eikä asetuksiin tarvitse enää palata. Repetier-Host käsittelee sekä tulostimen mekaanisia laitteistoasetuksia sekä tietokoneen puolella tulostimen ohjelmistoasetuksia.

6.2 Slic3r-testi

Slic3r-ohjelman käyttö oli viipalointiohjelmista parhaiten ennestään tuttu testausta aloittaessa. Se on myös oletusviipalointiohjelma Repetier-Hostia käyttäessä. Kokonaisuudessaan Slic3r on hyvin aloittelijaystävällinen ja käyttöliittymän toimivuuteen on panostettu jakamalla jokaiset eri asetukset selviin omiin välilehtiinsä. Täten Slic3r soveltui parhaaksi valinnaksi alun tulostusparametrien konfigurointia varten. Alustava käsitys tarvittavista arvoista perustui erilaisiin suosituksiin, mutta nämä havaittiin osittain puutteellisiksi testitulostuksia varten, joten konfiguroinnille oli tarvetta. Testauksessa käytettävän Slic3r-ohjelman versio oli 1.2.9.

6.2.1 Asetukset

Slic3r on ainoa viipalointiohjelmista, joka tarjoaa ensimmäistä kertaa käytettäessä syötettäville asetuksille avustajaohjelman. Ohjelma käy läpi kohta kohdalta tärkeimmät parametrit, kuten käytettävän materiaalin paksuuden tai tulostuslämpötilan. Tämän jälkeen tiedot tallennetaan käyttäjäprofiiliin, jota pääsee muokkaamaan Slic3rin asetusikkunassa. Asetukset tallentuvat .INI-tiedostona, jolloin niitä on myös helppo tuoda valmiina erilaisten profiilien käytettäväksi. Profiilit tallentuvat tiedostopolkuun `C:\Users\[käyttäjä]\AppData\Roaming\Slic3r\print`.

Slic3rin asetusten käyttöliittymä on selkeä. Asetukset on jaettu kolmeen eri osaan Print Settings, Filament Settings ja Printer Settings, joista jokaiselle saa oman profiilin luotua. Repetier-Hostissa voi vaihdella kunkin osan tallennettua profiilia halutuksi aina tulostuksen mukaan, ilman että asetuksiin tarvitsee mennä uudestaan. Slic3rissa on monipuolisesti muokattavaa viipalointia varten. Kerrospaksuutta voi esimerkiksi vaihtaa helposti kohdasta Print Settings – Layers and perimeters. Lisäksi Slic3r tarjoaa monipuolisimman täyttökuviointivalikoiman, joista muun muassa honeycomb-kaavaa ei muista viipalointiohjelmista löytynyt. Tarkat tiedot Slic3r asetuksista on kuvailtu työn liitteessä 1.

6.2.2 Tulostus

Itse tulostaminen Slic3rillä oli hyvin vaivatonta. Asetusten ollessa kohdallaan, mallin viipalointi suoriutui erittäin nopeasti. Myös G-koodin generointi kävi nopeasti, eikä koodissa ollut samoilla parametreilla viipaloidessa eroavaisuuksia. Slic3r luo G-koodia tehdessä

koodiin lisäksi kommentteina merkintöjä, jossa muutamasta komennosta on selitykset, sekä koodin lopussa on kommentoituina kooste tulostettavan kappaleen parametrien arvoista.

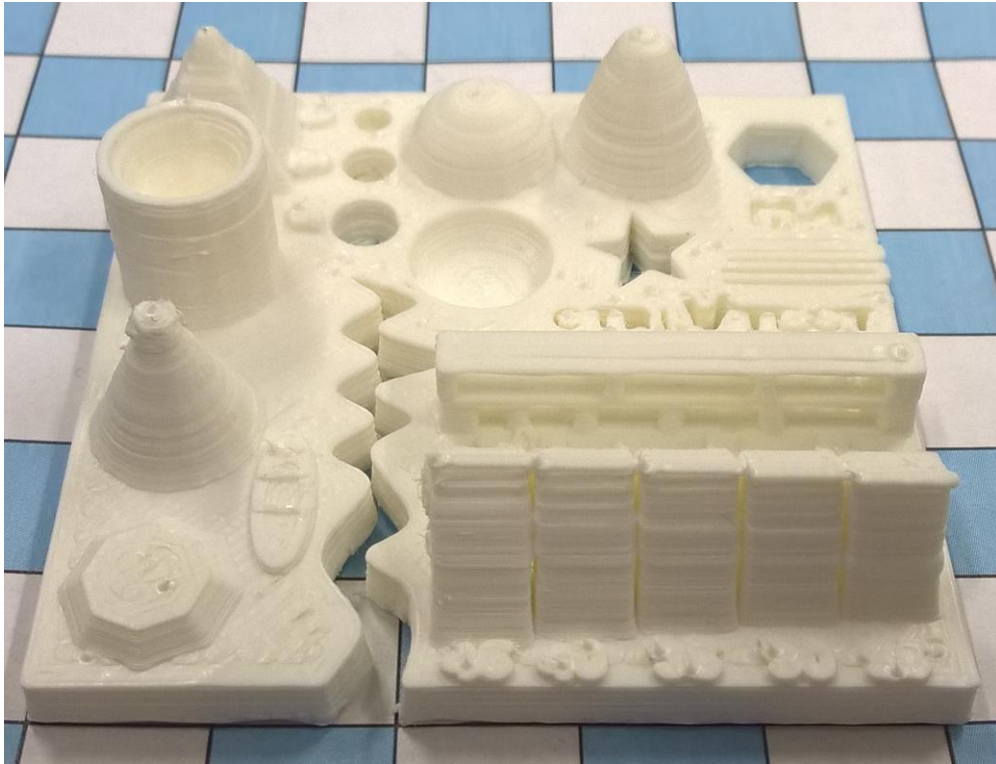
Eräs huomattava asia Slic3rissa oli, sillä jos asetuksista oli kohta Print Settings – Support material käytössä, niin ohjelma halusi välillä hieman turhaankin generoida tukimateriaalia tulostettavien siltaelementtien alle jopa niin aggressiivisesti, että lopputuloksesta oli vaikea irrottaa ylimääräistä muovia pois. Tämä asetus oli siis hyvä olla pois päältä, jos ei uskonut tukimateriaalille tarvetta. Tukimateriaali muodostaminen näkyi selvästi tulostusajoissa, ja tämä pidensi aikaa huomattavasti.

Silti Slic3rin generoima koodi suoriutui lopullisen kappaleen tulostamisesta testauksen nopeimmin, viemällä aikaa 1 tunnin ja 49 minuuttia. Tähän tulostamiseen se muodosti 82319 riviä koodia sekä tulostettavia kerroksia tuli 138 kerrospaksuudella 0.1mm.

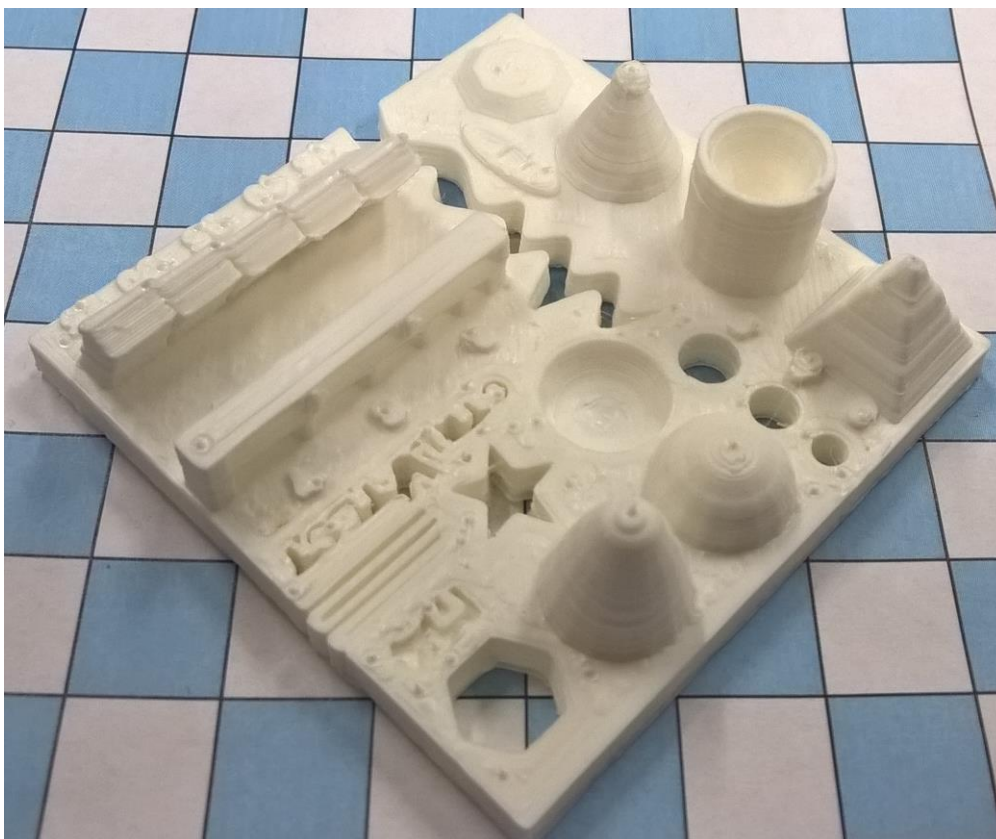
6.2.3 Lopputulos

Slic3rilla tulostettu lopullinen testikappale oli erittäin onnistunut monessa mallin tarjoamassa osassa. Erityisesti siltojen kerroksittainen muodostuminen eri pituuksilla onnistui testin parhaiten. Näiden siltojen takia ABS-muoville alun perin suositeltua 230 °C tulostuslämpötilaa päädyttiin laskemaan kymmenellä asteella, koska siltojen tulostamien ei onnistunut lainkaan. Korkeammalla lämpötilalla tulostettuna materiaali on liian kuumaa jähmetymään tasoksi, kun materiaalia pursotetaan ilmassa lyhyellä matkalla. Tällöin 3D-tulostin ei pysty luomaan siltamaisia tasoja ollenkaan.

Slic3rin lopputulos ei kuitenkaan ollut täydellinen. Esimerkiksi ohuiden seinien liikeradan generoinnissa on puutteita, koska 0.4mm ohuisen seinämävälän ulkoreunuksen Slic3r on liikeradallaan sulkenut kokonaan umpeen. Liikeradan muovin syöttö on niin huomattavaa, että seinämä pyöristyy hieman ulospäin muuhun ulkoseinämään verrattuna, mikä ei ollut mallikappaleen mukaista. Lisäksi pyöreiden sekä porrastettujen liikeratojen tulostamisessa on selviä puutteita, tekemällä lopputuloksesta epätasaisen näköisen. Kartion kärjen tulostamisessa liikerata on liian useasti palannut edelliseltä kerrokselta tulostamaan samaan kohtaan, koska kärkeen on sulanut selvä koostuma liian lämpimän edellisen kerroksen johdosta.



Kuva 7. Slic3r kappale.



Kuva 8. Slic3r kappale.

Kokonaisuutena kappale on onnistunut muutamasta heikosta kohdasta huolimatta. Kappaleen runko on vankasti täytetty, jolloin kansitason muodostaminen on ollut tulostuspäälle helppoa. Reiät ovat muodostuneet tarkasti eikä ulkoseinämissä ole yhtä kohtaa lukuun ottamatta epäkohtia. Myöskään liian nopeasta siirtymisestä johtuvaa säie-efektiä (engl. stringing) muodostunut juuri lainkaan, jossa ohuita muovinauhoja jää tulostuspään jälkeen jättämänä ilmaan näkyviin.

6.3 CuraEngine-testi

Cura vaikutti ensitöikseen hyvin samanlaiselta kuin Slic3r. Curan soveltuvuuteen liittyi joitain ennakkoluuloja, koska viipalointiohjelma on ensisijaisesti suunniteltu Ultimaker 3D-tulostimia varten, mutta käytännössä vastaavia parametreja Curassa syötetään kuin Slic3rissäkin. Cura löytyy myös Repetier-Hostissa valmiina apuohjelmana ilman erillistä asennusta. Muutamia testitulostuksia suoritettiin myös Curalla, kuten testikappaleen tulostaminen alustavasti 230 °C tulostuspäänlämpötilalla sekä testaus PLA-muovilla. Testauksessa käytettävä CuraEngine-versio oli 14.09.

6.3.1 Asetukset

Curan asetukset ovat hieman yksinkertaisemmat kuin Slic3rissä, mutta muokkausmahdollisuuksia viipalointiin löytyy laajasti. Käyttöliittymän ulkoasu on selkeä ja hyvin jaoteltu. Kun asetukset avataan ensimmäisen kerran, on profiiliksi valittu oletuskokoelma parametreja, joiden avulla pitäisi päästä helposti alkuun. Uusia profiileja pystyy luomaan helposti erilaisia tulostuksia varten, joita pystyy vaihtelevaan ikkunan yläosan alavetovalikosta.

Asetukset on jaettu kahteen eri osioon, Print sekä Filament, joista suurin osa on Printvälilehden alla. Curan muokkaaminen tuntui monipuoliselta, mutta Slic3riin verrattuna tiettyjä ominaisuuksia jäi kaipaamaan. Esimerkiksi erilaisia kaavoja tulostettavan kappaleen täyttöä varten oli vähän valittavana. Curassa silti oli viipalointiohjelmista paras käyttöliittymä Repetier-Hostin puolella asetusten vaihteluun. Samaan profiiliin pystyy esimerkiksi oletus kerrospaksuuden lisäksi tallentamaan muita kerrospaksuuksia, joita pystyy vaihtamaan helposti Repetier-Hostissa ilman että tarvitsee asetuksia erikseen avata. Lisäksi Curassa on G-koodia varten eritelty erikseen aloitus-, lopetus ja erikoiskoodit, joita pystyy muokkaamaan tarvittaessa. Tarkat tiedot Curan asetuksista on kuvailtu työn liitteessä 2.

6.3.2 Tulostus

Tulostaminen sujui Curaa käyttäessä viipalointiin ilman suurempia ongelmia. Itse G-koodin generointi oli Slic3rin tapaan nopeaa ja koodi virheetöntä. Eräs hieno piirre Curan

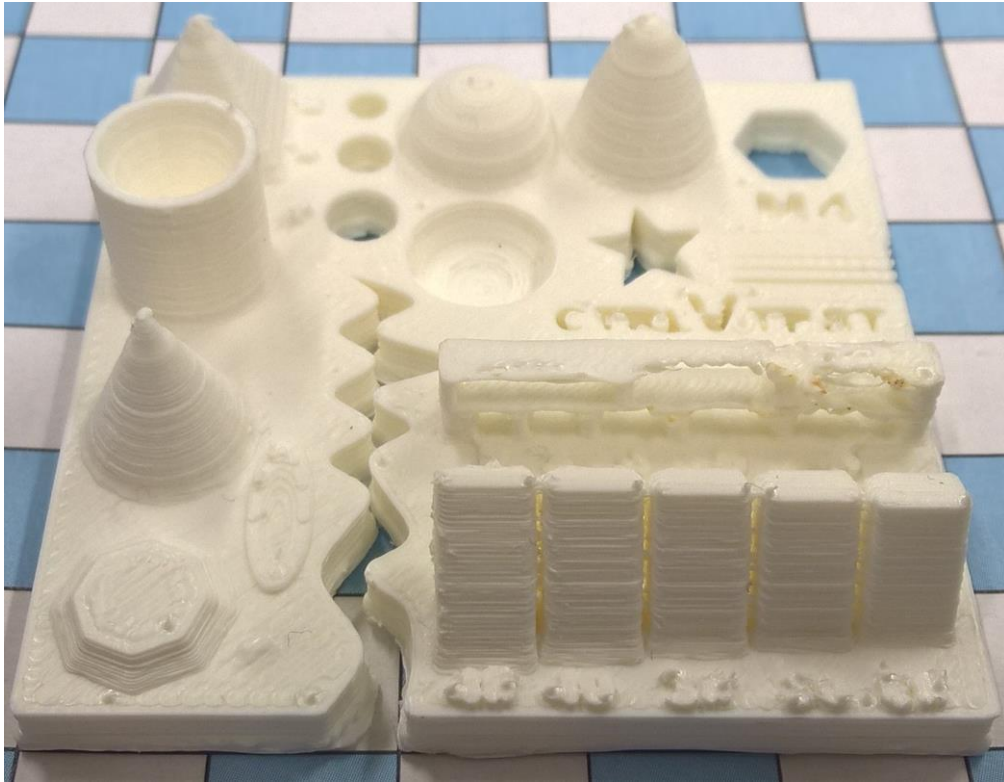
G-koodissa oli se, että koodiin oli aina kommentoituna tulostettavan kappaleen tyyppi, jolloin pelkkää koodia seuraamalla oli helppo kertoa minkäläistä kohtaa tulostin sillä hetkellä tulostaa. Kommentit olivat esimerkiksi ”;TYPE:FILL” tai ”;TYPE:WALL-INNER”.

Curan suurin heikkous oli kuitenkin tulostuksen viemä aika. Samanlaisilla parametreilla kuin Slic3rissa, lopullisen testikappaleen tulostamiseen meni 2 tuntia ja 25 minuuttia. Tähän tulostukseen Cura käytti 110725 riviä koodia sekä viipaloituja kerroksia oli 138 kerrospaksuudella 0.1mm.

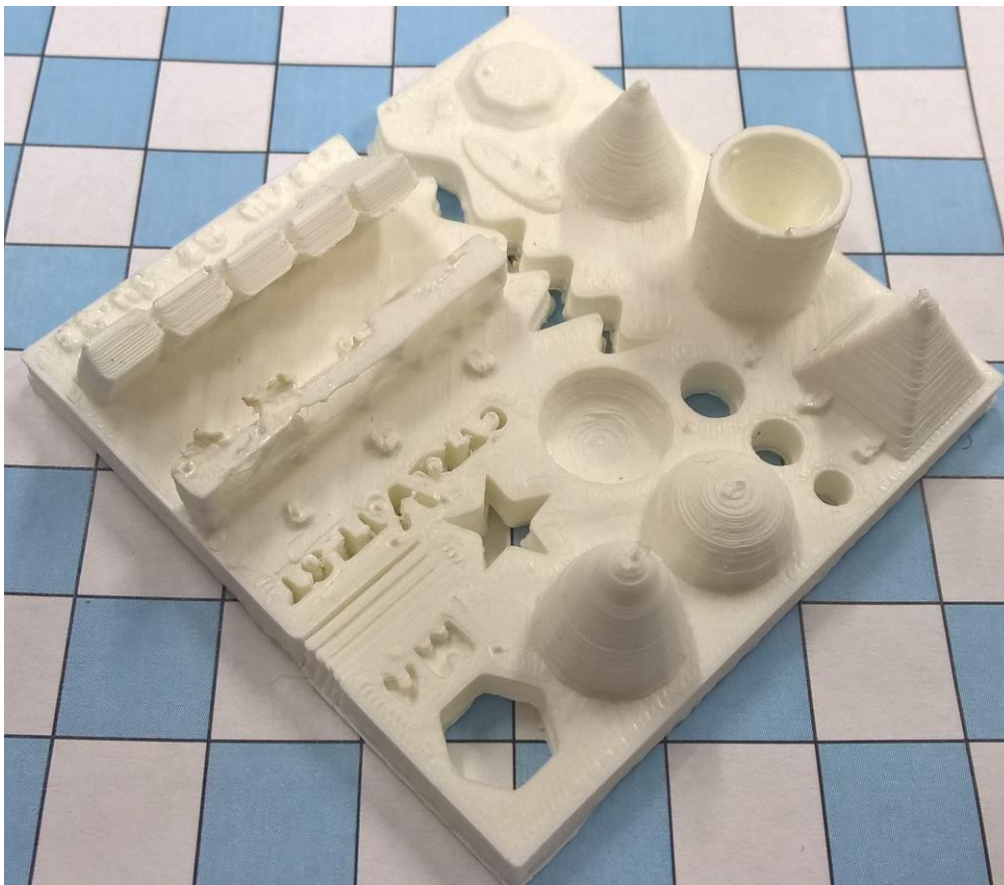
6.3.3 Lopputulos

Lopullisesta tulostuskappaleesta tuli erittäin onnistunut muutamaa heikkoa osa-aluetta lukuun ottamatta. Erityisesti onnistuneita kohtia olivat korkeiden rakennelmien, kuten kartion ja pyramidin tulostusjälki sekä pyöreiden seinämien tasaisuus. Muun muassa kartion kärjessä on aivan pieni viimeisten kerrosten tulostuslämmön aiheuttama virhe, mutta sitä ei tuskin edes huomaa. Muuten kartion pyöreän seinämän jälki on lähes virheetön.

Eräs tulostuksen heikko osa olivat sillat, jotka eivät täysin muodostuneet tasaisiksi tasoiksi ylemmille kerroksille, vaan rakennelma on rojahtanut kasaan heikon tulostusjäljen johdosta. Näille kyseisille viipaloituille tasoille tulostuspään liikerata on muodostettu selvästi erilailla kuin Slic3rin tulostuksessa, jolloin sulaa muovia on pursotettu joko liian nopeasti, tai jäähdytys kyseiselle ja edelliselle tasolle on ollut liian heikkoa. Rakennelman siltojen alemmista tasoista huomaa, että ne ovat muodostuneet paremmin. Tästä voi tehdä johtopäätöksen, että lyhempien siltojen tulostaminen onnistuu, kun viipaloitulla tasolla käytetään tulostamisessa tarpeeksi aikaa muiden osioiden tulostamiseen.



Kuva 9. CuraEngine kappale.



Kuva 10. CuraEngine kappale.

Silloista huolimatta kappaleen muu tulostusjälki on erittäin tarkkaa. Reiät ovat tarkasti muodostuneet ja seinämät ovat tasaisia. Eriasteisissa kaarevissa pilareissa on hieman havaittavissa tasojen välistä porrastumaa. Vastaavaa porrastuneisuutta ei kuitenkaan näe esimerkiksi puoliympyrän seinämässä. Lisäksi ohuiden seinämien välinen tulostuksen liikerata muodostui erittäin hyvin. Myöskin kappaleen pinnassa olevat erilaiset pikkutarkat numerot muodostuivat testauksessa parhaiten, mikä oli melko yllättävää, koska tulostimen tulostuspää on halkaisijaltaan 0.4mm. Tällöin jo laitteiston puolesta pienten yksityiskoh- taisten symbolien muodostaminen on 3D-tulostimelle vaikea tehtävä.

6.4 Skeinforge-testi

Skeinforge tuotti tulostusprosesseista eniten työtä opetellessa viipalointiohjelman käyttöä. Lähtökohtaisesti ohjelma on täysin erilainen kuin Slic3r tai CuraEngine vaikka sen käyttö- tarkoitus on sama G-koodin generointi. Skeinforge on myös ainoa, joka toimii erillisenä ohjelmanaan luodessaan G-koodia. Tämä vain tarkoittaa, että Repetier-Hostin puolella viipaloinnin asetuksiin ei pystytä vaikuttamaan, vaan asetukset tehdään pelkästään Skein- forgen asetuksissa. Skeinforge on kirjoitettu Python-ohjelmointikielellä, joten se vaatii toi- miakseen tietokoneelle vähintään Python 2.x-version sekä Tkinter-ohjelman asetusten käyttöliittymää varten. Testauksessa käytettävä Skeinforge-versio oli 12.03.14.

6.4.1 Asetukset

Skeinforgen asetukset ovat esteettisesti erittäin karun näköiset. Aloittelijalle se vaikuttaa ikkunalta, joka sisältää lukuisia painikkeita, joiden alta aukeaa vain lisää painikkeita. Käyt- töliittymästä voi jo huomata, että viipalointiohjelmaa ei ole päivitetty useaan vuoteen. Skeinforgen asetukset jakautuvat neljään osion alle, Analyze, Craft, Meta ja Profile, joista tulostukselle merkittävät asetukset löytyvät lähes pelkästään Craft-osan alta.

Suurin ongelma Skeinforgen käytössä oli dokumentaation ja ohjeiden löytäminen. Ohjel- man ollessa niin vanha, ei sen ympärillä ole enää käyttäjäkuntaa, koska monet ovat siirty- neet muihin uudempiin viipalointiohjelmiin. Tämä tarkoitti sitä, että Skeinforgen käyttö tar- vitsi erikseen oman testausvaiheen asetusten konfigurointia varten, koska asetusten toi- minta ja niiden pohjalta syntynyt tulostusjälki eivät olleet ollenkaan saman tasoista kuin Slic3rin tai Curan kanssa.

Eräs tärkeä tekijä Skeinforgesta puuttui, mikä Slic3rin ja CuraEnginen asetuksista löytyi. Kun Slic3rissa ja Curassa asetti asetuksissa viipaloitavan tason korkeuden, laskelmoi ohjelma suurimman osan siihen liittyvistä muista parametreista kuten tulostettavan mate- riaalin leveyden automaattisesti. Näin ei kuitenkaan ollut Skeinforgen kanssa. Tästä seu-

rasi useita testitulostuksia erilaisilla tasoasetuksilla, tulostus nopeuksilla ja materiaalin syöttönopeuksilla, joita Skeinforge vaati syötettäväksi, ennen kuin miniFactory-tulostin pystyi luomaan tulostusalustalle oikean näköistä tulostusjälkeä. Eräs ongelma oli myös siinä, että kun tiettyihin toimiviin tulostusasetuksiin oltiin päästy, oli niiden muuttaminen toisenlaisiksi erittäin työlästä. Skeinforgeissa niin moni parametri liittyvät toinen toisiinsa, joten yhden muutoksen johdosta voi joutua muuttamaan kolmea muuta asetusta. Tarkat tiedot Skeinforgen asetuksista on kuvailtu liitteessä 3.

6.4.2 Tulostus

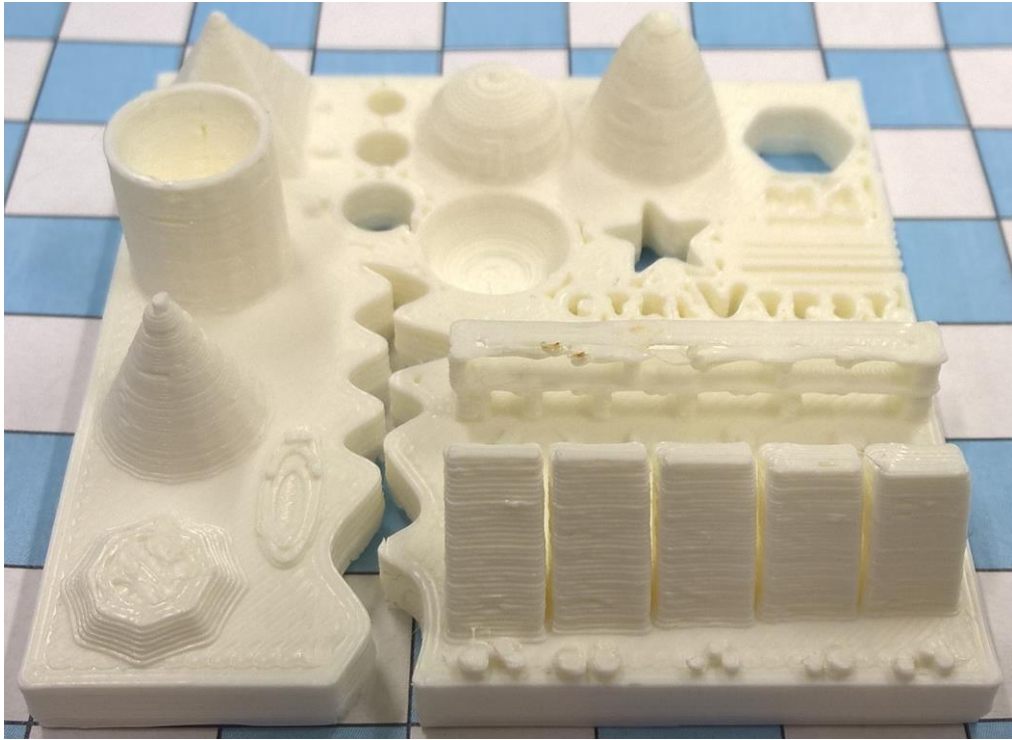
Skeinforgen viipalointia käyttäessä ei tulostaminenkaan sujunut ilman muutamaa ongelma-kohtaa. Ensinnäkin itse G-koodin generointi kesti huomattavasti kauemmin kuin Slic3rillä tai Curaalla viipaloidessa. Skeinforgen muodostama koodi oli hyvin yksinkertaista ilman mitään lisäkommentointia tai apumerkintöjä.

G-koodi osoittautui ensimmäisellä tulostusyrityksellä myös vialliseksi, koska siihen oli muodostunut kesken tulostamisen komentoja, jotka sulkevat tulostuspään lämmittämisen, ilman että siihen olisi mitään toiminnallista tarvetta. Tästä seurasi epäonnistunut tulostaminen. Tutkimisen jälkeen tälle ei löytynyt selvää syytä, joten lopullinen Skeinforgen generoima G-koodi jouduttiin lopulta muokkaamaan tekstieditorilla muuttamalla kaikki aiheettomat komennot kommentoimalla pois käytöstä. Tämä saattoi johtua jostain Skeinforgen yhteensopivuusongelmasta miniFactory-tulostimen kanssa.

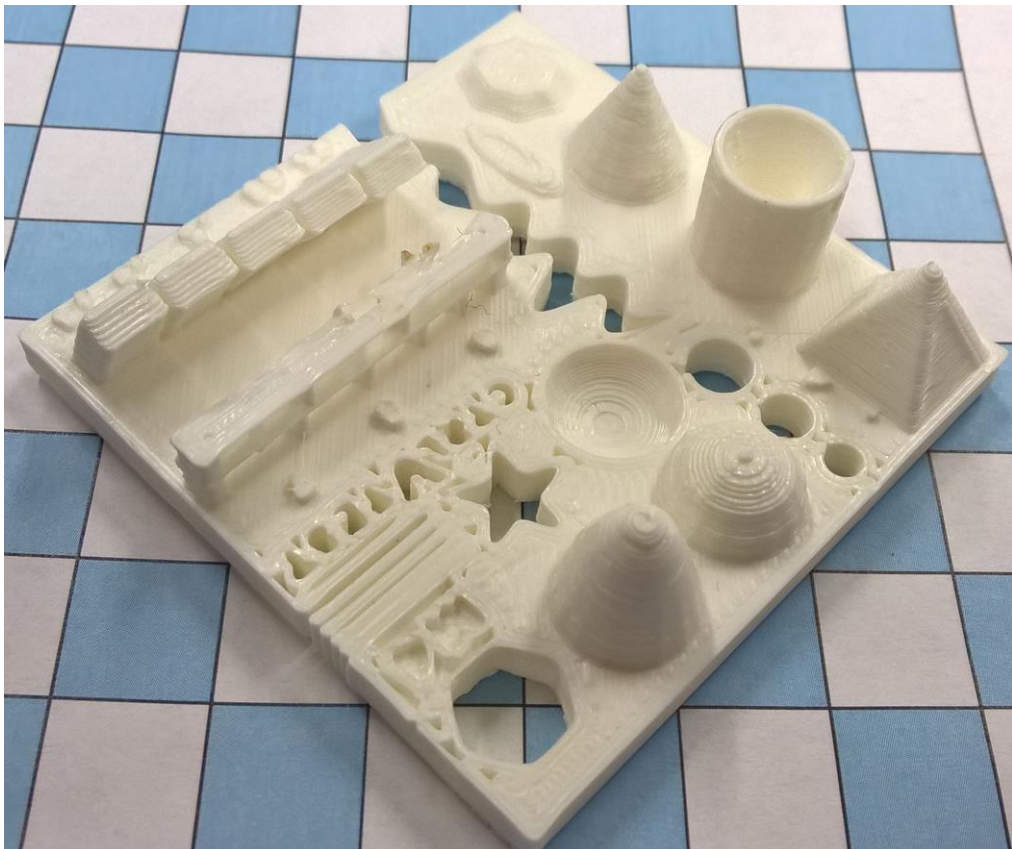
Tämän jälkeen G-koodi toimi alusta loppuun ja lopullinen testikappale saatiin tulostettua käyttäen Skeinforgea. Vastaavilla parametreilla kuin Slic3r ja Cura testattava kappale saatiin tulostettua 2 tunnissa ja 17 minuutissa. Tulostukseen Skeinforge käytti 105268 riviä koodia ja viipaloituja kerroksia oli yhteensä 137 kerrospaksuudella 0.1mm.

6.4.3 Lopputulos

Tulostusjälki oli lopulta odotettua parempaa, ottaen huomioon mitä kaikkea sen eteen oli aluksi jouduttu tekemään. Kappaleen jälki oli tarkkaa ja tulostuspään liikeradat oli muodostettu suurimmalta osalta hyvin. Lisäksi korkeiden objektien kuten kartion ja pyramidin muodostuminen onnistuivat hyvin. Myös sillat ovat saaneet tulostuksessa muotonsa, mutta jälki on erittäin epätasaisen näköistä ja aaltoilevaa. Parhaiten tulostuksessa onnistui kaartuvien seinävälköiden tasainen muoto.



Kuva 11. Skeinforge kappale



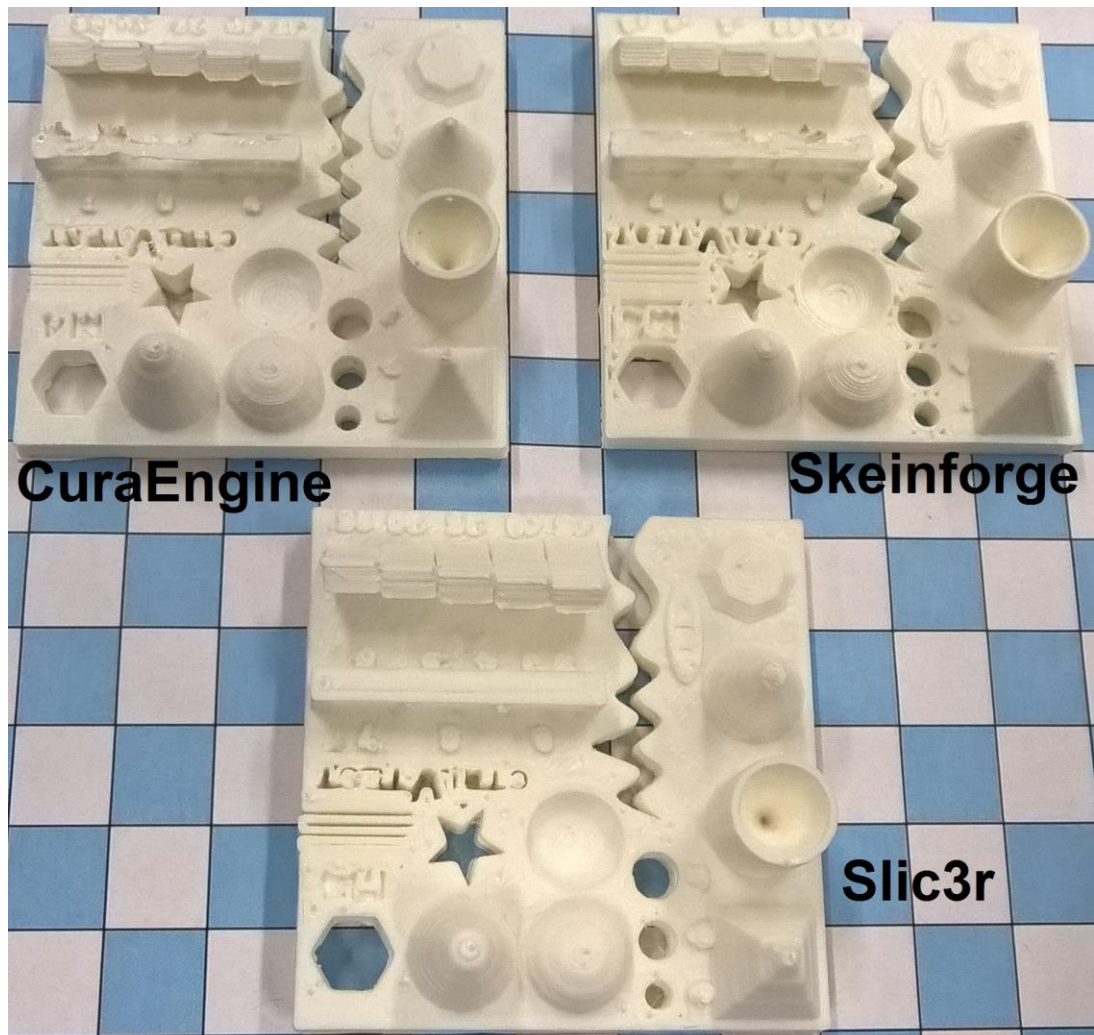
Kuva 12. Skeinforge kappale.

Puutteita kappaleesta kuitenkin riittää. G-koodi on hyvin heikosti suoriutunut pienten ulko-
nevien muotojen ja reikien piirtämisestä. Kappaleen rungossa on selviä epätasaisuuksia,

jotka johtuvat tulostuspään epätarkasta liikkeestä. Myös pieniä numeroita on mahdoton lukea sen pinnalta. Eräissä kohdissa G-koodi on vain heikosti ohjastanut tulostuspään liikettä, sillä esimerkiksi lieriön muotoisen osan seinämässä on selviä kuoppia, koska tulostin ei vain ole tulostanut siihen kohtaan. Tämän lisäksi erityisen epätasaista oli täytön liikerataa varten muodostunut linjamainen kuviointi, josta vaikutti ensin jäävän myös jälkiä yläpintaan asti, mutta se täyttyi lopulta tasaisesti piiloon. Kappale oli rakenteeltaan tämän johdosta selvästi muita kappaleita heikompi.

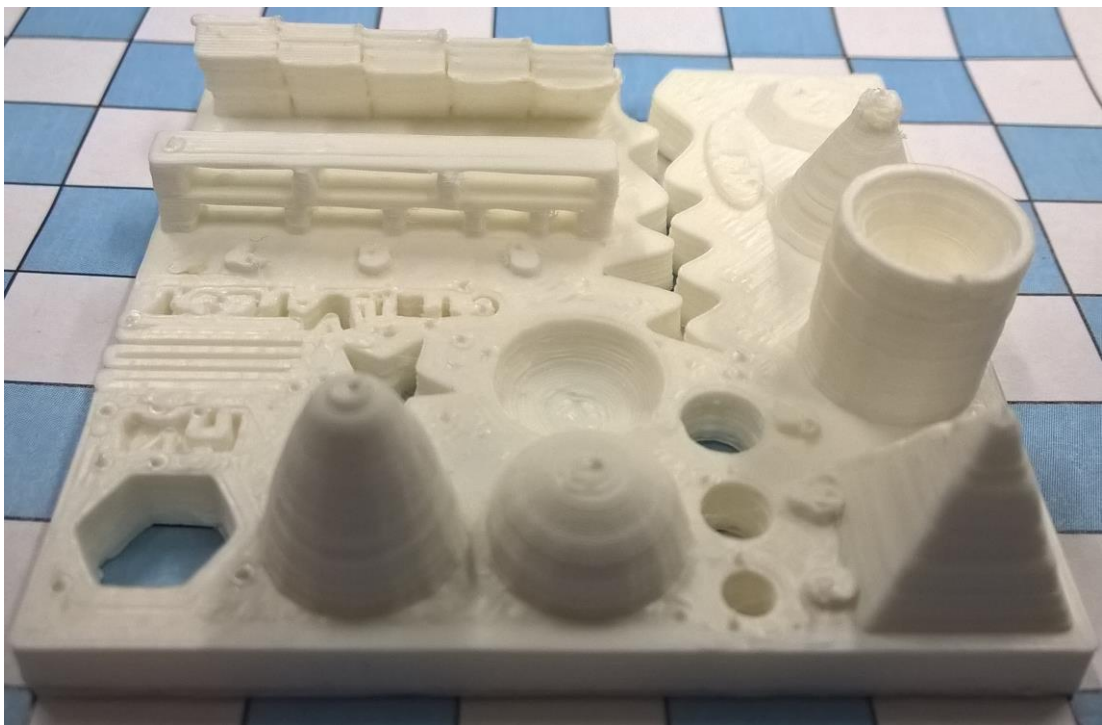
6.5 Vertailu

Testauksessa saatiin selvä käsitys kunkin viipalointiohjelman toiminnasta ja käytöstä. Eroavaisuuksia ilmeni paljon niin asetusten muokattavuudessa kuin käyttöliittymän toimivuudessakin. Testin aikana oli hieno huomata, kuinka erilaisilla tavoilla samanlaisiin lopputuloksiin pystyttiin päätyämään, kun säännöt olivat kaikille samat.



Kuva 13. Kaikki 3D-tulostetut kappaleet.

Mitä lopputuloksista pystyy sanomaan, niin jokainen tulostettu kappale onnistui erittäin hyvin mallitiedoston mittaamissa haasteissa. Ensisilmäyksellä kaikki tulostetut kappaleet näyttävät melko samoilta, mutta pienissä yksityiskohdissa huomaa paljon eroja eri viipalointiohjelmien käytön jälkeen. Slic3rin tulosteessa monet kohdat onnistuivat erinomaisesti. Sen sillat olivat esimerkiksi testin parhaat, joiden tulostaminen FDM-tulostimilla on yleisesti erittäin haastavaa. Cura taas onnistui monessa kohdassa erinomaisesti, missä Slic3rillä oli parannettavaa. Tällaisia olivat muun muassa tornien viimeisten kapeiden kerrosten tulostamien sekä yleinen tarkkuus tulostusjäljen tasaisuudessa. Valitettavasti Skeinforgen tulostus ei loistanut millään erityisellä osa-alueella muita viipalointiohjelmiä paremmin, vaikka kokonaisuutena kappale tulostui hyvin. Skeinforgen tulosteessa oli silti eniten parannettavaa.



Kuva 14. Slic3rin kappale.

On hyvä ottaa huomioon, että kaikkien viipalointiohjelmien tulostusjälkeä olisi pystynyt parantamaan lisäämällä manuaalisesti omia pätkiä G-koodia tarkkoihin kohtiin, mutta se ei ollut tämän tutkimuksen tarkoitus. Tärkeintä oli viipalointiohjelman itse generoima G-koodi ja kuinka se suoriutuu yhteisesti asetetuissa raameissa tehtävästä. Tästä on myös hyvä huomioida, että Skeinforgen muodostama G-koodi oli ainoa, jota joutui muokkaamaan viipaloinnin jälkeen, jotta tulostusprosessi olisi ongelmitta saatu loppuun.

Viipaloinnin asetusten käyttöliittymissä Slic3r ja Cura olivat tasavertaisia asetusten selkeällä asettelulla ja vaivattomalla käytettävyydellä. Skeinforgen käyttöliittymä taas osoitti kuinka vanha ohjelma oikeasti on ja miten vaikealukuinen asetusjaottelu hidastaa ohjelman toimintaa huomattavasti. Skeinforgen käyttämä termistö oli myös erilaista kuin Slic3rissa tai Curassa. Slic3rissa teki erittäin aloittelijaystävällisen sen tarjoaman avustajaohjelman ansiosta, joka kysyy käyttäjää ensimmäisellä käyttökerralla syöttämään tärkeimmät viipalointi-arvot haluamakseen. Muokattavuudeltaan Slic3rissa oli monipuolisimmat asetukset. Silti ne oli kätkeyty käyttöliittymässä monen välilehden alle, kun taas Curan hieman pienempi asetustarjonta oli esillä selkeästi ja paremmin jaotellusti.

Viimeisimpänä tulostusprosessia on hyvä tarkastella kokonaisuutena viipaloinnin näkökulmasta. Se kuinka helposti päästiin alkuasetuksista tulostettuun kappaleeseen, oli ehdottomasti Slic3rin vahvuuksia. Slic3rin G-koodi suoriutui myös tulostuksesta kaikista nopeimmin. Se missä Cura loisti, oli tulostusjälki ja selkeät asetusten säädöt. Silti Curan generoimalla G-koodilla kesti huomattavasti Slic3ria kauemmin tulostaa kappale. Skeinforge taas tuotti turhaa lisäaikaa perehtymällä asetusten monimutkaisuuteen ja alkeelliseen käyttöliittymään. Lopullinen tulostus ei olisi ilman erillistä koodin muokkausta onnistunut ja tulostusjälki oli heikommasta päästä, vaikkakin kokonaisuutena onnistunut.

Yhteenveto

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli perehtyä 3D-tulostuksessa käytettävään viipalointiprosessiin ja vertailla erilaisia viipalointiohjelmia ja niiden ominaisuuksia keskenään. Viipalointi on tärkeä osa 3D-tulostusta, koska se muodostaa tulostimen liikerataa ohjastavan G-koodin mallitiedostosta. 3D-tulostimena testauksessa käytettiin miniFactory v3-tulostinta, joka käyttää pursotustekniikkaa kolmiulotteisten objektien luomiseen.

Projekti aloitettiin perehtymällä 3D-tulostamiseen ja siihen mistä se on alkujaan lähtenyt, sekä mihin asti siinä on tultu tänä päivänä. Perehtyminen ilmiöön auttoi hahmottamaan 3D-tulostamiseen liittyvät prosessit paremmin, jolloin testauksen aloittamisesta tuli huomattavasti helpompaa. Yllättävä tekijä prosessin tutkinnassa oli viipalointiohjelmien monipuolisuus ja se, miten erilaisilla G-koodi pystytään muodostamaan vaikka lopputuloksen raamit ovat kaikille samat.

Jokainen viipalointiohjelma vaati perehtymistä niiden omien asetusten konfigurointia varten. Ohjelmien käyttöliittymissä oli myös eroavaisuuksia ja niiden käytettävyys heijastui hyvin kunkin ohjelman toimivuudessa. Alustavan testauksen jälkeen saatiin käsitys asetuksista, joihin jokaisella viipalointiohjelmalla tulisi tähdätä optimaalisen tulostusjäljen saavuttamiseksi.

Lopulliset testitulostukset suoritettiin käyttäen samaa 3D-tulostinta ja samoja asetusarvoja. Eroja G-koodin muodostamisessa ilmeni jokaisen viipalointiohjelman kohdalla, mutta kaikki suoriutuivat mallikappaleen tulostamisesta ilman valtavia ongelmia. Testin kirkkaimmat suoriutujat olivat Slic3r ja CuraEngine, kun taas Skeinforgen käyttöä hankaloitti vähäisen dokumentaation saatavuus ja käyttöliittymän monimutkaisuus. Kokonaisuudessaan testi oli onnistunut projekti, josta selvisi paljon viipalointiohjelmien toiminnallisuudesta sekä käytettävyydestä.

Lähteet

Barnatt, C. 2013. 3D Printing: The Next Industrial Revolution. ExplainingTheFuture.com.

Canessa, C., Fonda, C. & Zennaro, M. 2013. Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. Trieste.

de Smale, S. 2014. Building Material: Exploring Playfulness of 3D Printers. Utrecht. Luettavissa: <http://todigra.org/index.php/todigra/article/view/21/32>. Luettu 16.9.2015.

Honkanen, J. 30.1.2015. 3D-tulostinten joukkorahoitus. Luettavissa: <http://3djampat.fi/2015/01/3d-tulostinten-joukkorahoitus/>. Luettu 8.10.2015.

Hot Mess 3D 2015. About 3D printing. Luettavissa: <http://hotmess3d.com/about-3d-printing>. Luettu 6.11.2015.

Johnson, W. M., Rowell, M., Deason, B. & Eubanks M. 2011. Benchmarking evaluation of an open source fused deposition modeling additive manufacturing system. Savannah. Luettavissa: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-16-Johnson.pdf>. Luettu 29.9.2015.

Kaziunas France, A. 2014. Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers. Maker Media Inc. Sebastopol.

Krassenstein, B. 13.7.2014. Future Business Models Within The Consumer 3D Printer Market. Luettavissa: <http://3dprint.com/558/3d-printing-business/>. Luettu 2.11.2015.

Lipson, H. & Kurman, M. 2013. Fabricated: The New World of 3D Printing. Wiley. Indianapolis.

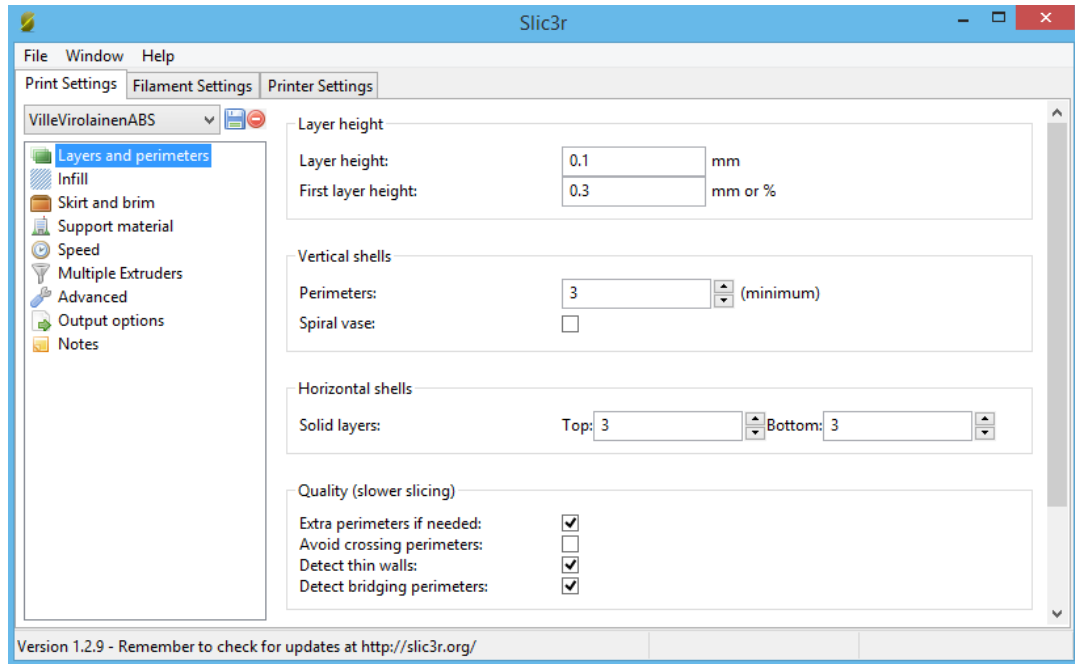
May, T. 2009. Case history: A factory on your desk. The Economist 3.9.2009. Luettavissa: <http://www.economist.com/node/14299512>. Luettu 14.9.2015.

miniFactory 2015. 3D-tulostin. Luettavissa: <http://www.minifactory.fi/3d-tulostin/>. Luettu 11.11.2015.

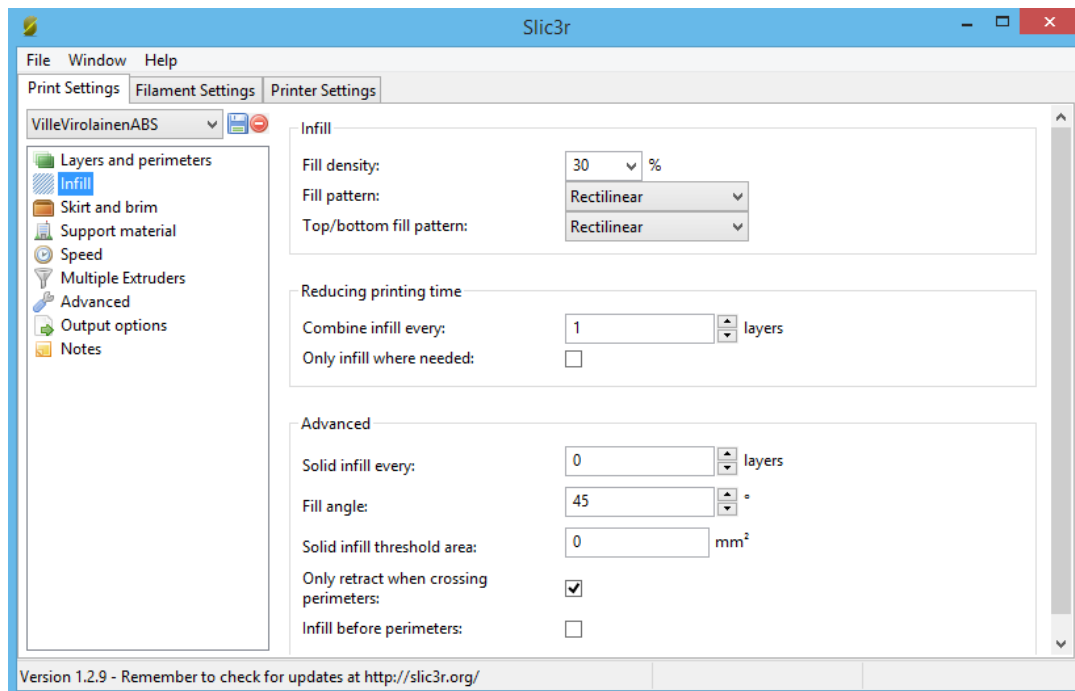
- Perez, E. 2012. Layer Thickness and Perimeter Width. Luettavissa:
<http://fabmethus.blogspot.fi/2012/01/layer-thickness-and-perimeter-width.html>. Luettu 17.9.2015.
- Pinshape, 11.6.2014. FDM vs SLA: Kudo3D Explains 3D Printer Tech. Luettavissa:
<https://blog.pinshape.com/fdm-vs-sla-kudo3d-explains-3d-printer-tech/>. Luettu: 1.10.2015.
- Rissanen, P. & Pekkanen, M. 2014. Liiketoiminnan kehittäminen 3D-tulostuksen avulla. Savonia-ammattikorkeakoulu. Luettavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/76705>. Luettu 4.11.2015.
- RepRap 2015a. Fused filament fabrication. Luettavissa:
http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication. Luettu 5.11.2015.
- RepRap 2015b. G-code. Luettavissa: <http://reprap.org/wiki/G-code>. Luettu 12.10.2015.
- RepRap 2015c. Repetier-Host. Luettavissa: <http://reprap.org/wiki/Repetier-Host>. Luettu 15.10.2015.
- Smith, R. 2015. 5 Incredible Trends That Will Shape Our 3D Printed Future. Forbes 7.7.2015. Luettavissa: <http://www.forbes.com/sites/ricksmith/2015/07/07/5-incredible-trends-that-will-shape-our-3d-printed-future/>. Luettu 2.11.2015.
- T. Rowe Price Connections 2012. A brief history of 3D printing. Luettavissa:
http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf. Luettu 25.9.2015.
- Thingiverse 2015. Test your 3D printer! Luettavissa:
<http://www.thingiverse.com/thing:704409>. Luettu 9.11.2015.

Liitteet

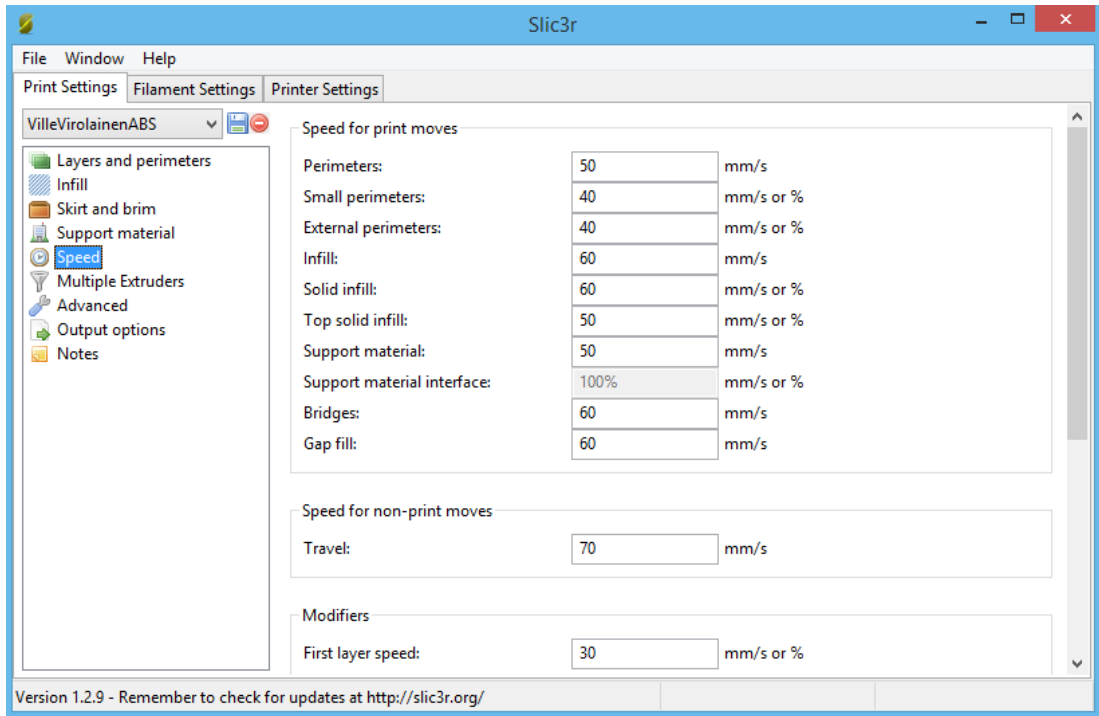
Liite 1. Slic3r-asetuksien tiedot



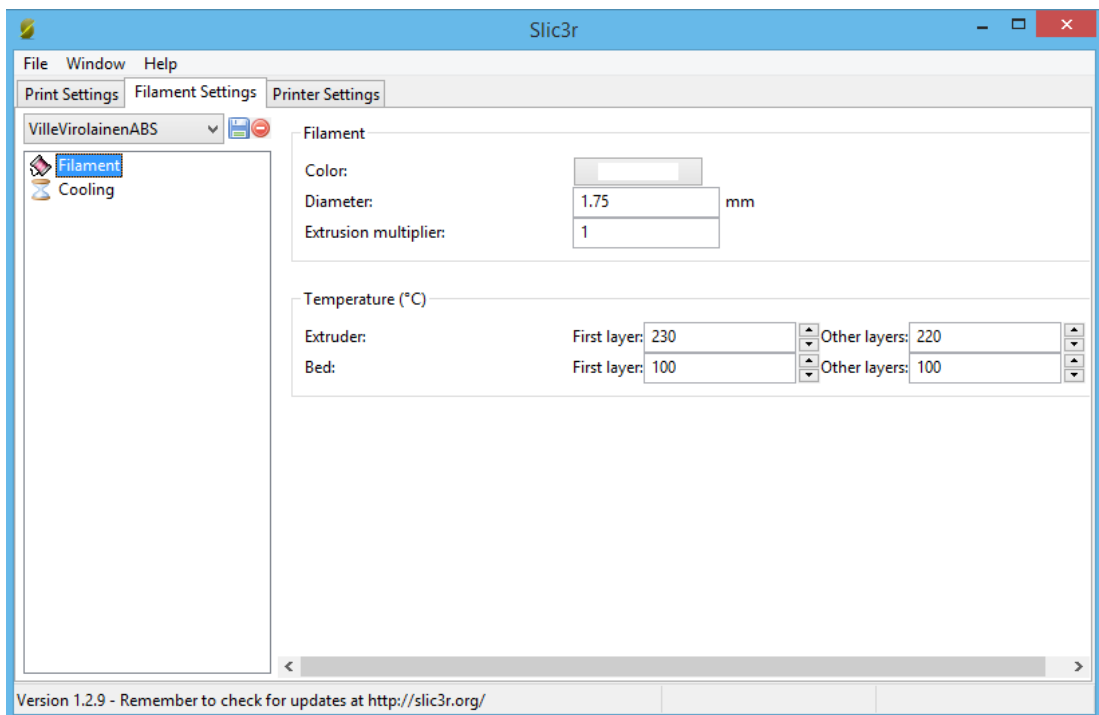
1. Print Settings - Layers and perimeters



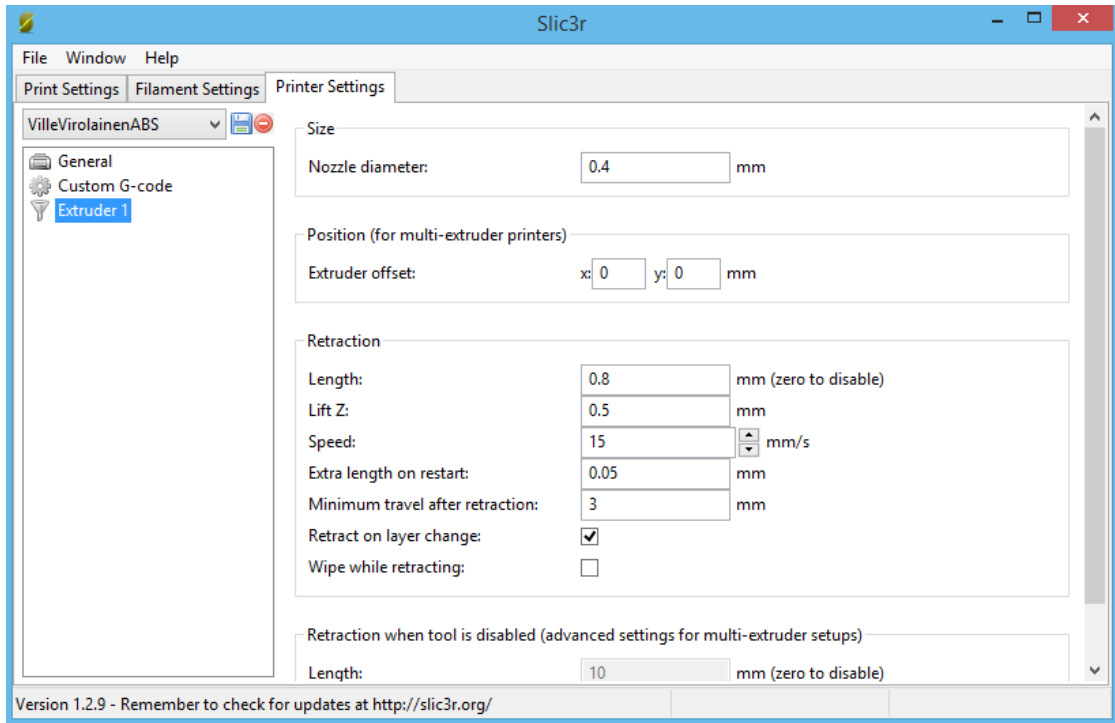
2. Print Settings - Infill



3. Print Settings - Speed

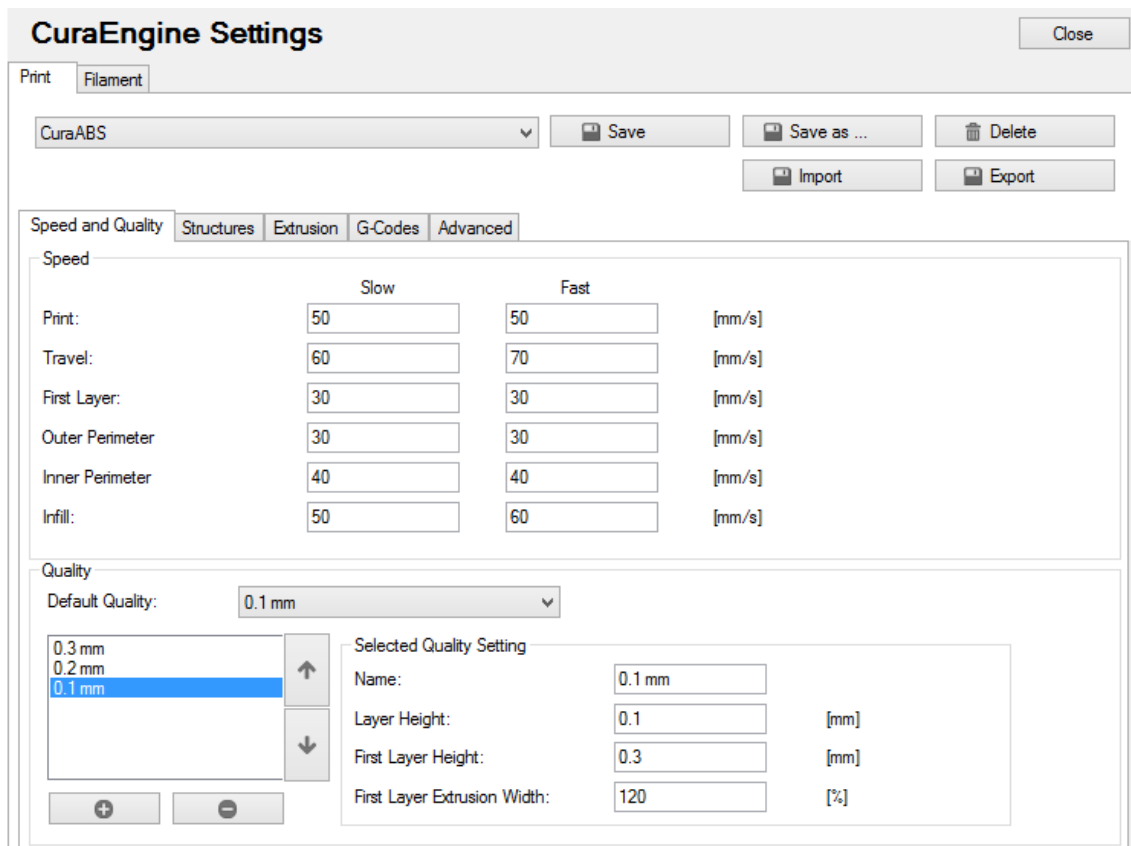


4. Filament Settings - Filament



5. Printer Settings – Extruder 1

Liite 2. CuraEngine-asetuksien tiedot



1. Print – Speed and Quality

CuraEngine Settings
Close

Print Filament

CuraABS
Save
Save as ...
Delete
Import
Export

Speed and Quality
Structures
Extrusion
G-Codes
Advanced

Infill

Shell Thickness: [mm]

Top/Bottom Thickness: [mm]

Infill Overlap: [%]

Infill Pattern: Automatic

Solid Top Infill Solid Bottom Infill

Support

Support Pattern: Grid

Overhang Angle: [°]

Fill Amount: [%]

Distance XY: [mm]

Distance Z: [mm]

Skirt and Brim

Skirt Line Count: Brim Width: [mm]

Skirt Distance: [mm]

Minimum Skirt Length: [mm]

Raft

Extra Margin: [mm] Line Spacing: [mm]

Base Line Thickness: [mm] Base Line Width: [mm]

Interface Thickness: [mm] Interface Line Width: [mm]

Air Gap Layer 0: [mm] Num. Surface Layer:

Air Gap:

General

G-Code Flavour: RepRap (Repetier/Marlin/Sprinter)

2. Print – Structures

CuraEngine Settings Close

Print **Filament**

CuraABS Save Save as ... Delete
Import Export

Speed and Quality Structures **Extrusion** G-Codes Advanced

General Extruder Settings

Spiralize Contour Minimize Crossing Perimeters Enable Retraction

Retraction Speed: [mm/s]
Retraction Distance: [mm]
Minimum Travel before Retract: [mm]
Minimum Extrusion before Retract: [mm]
Z Hop: [mm]
Cut off Object Bottom: [mm]
Nozzle Diameter: [mm or 0 = use value from "Printer Settings"]

The slicer also uses parameters set in "Printer-Settings"->"Extruders"!

Multi Extruder Settings

Create Wipe and Prime Tower Create Ooze Shield

Support Extruder:

Retraction on Extruder Switch: [mm]
Wipe and Prime Volume: [mm³]
Volume Overlap: [mm]

3. Print – Extrusion

CuraEngine Settings Close

Print **Filament**

CuraABS Save Save as ... Delete
Import Export

Filament

Filament Diameter: [mm]
Flow: [%]

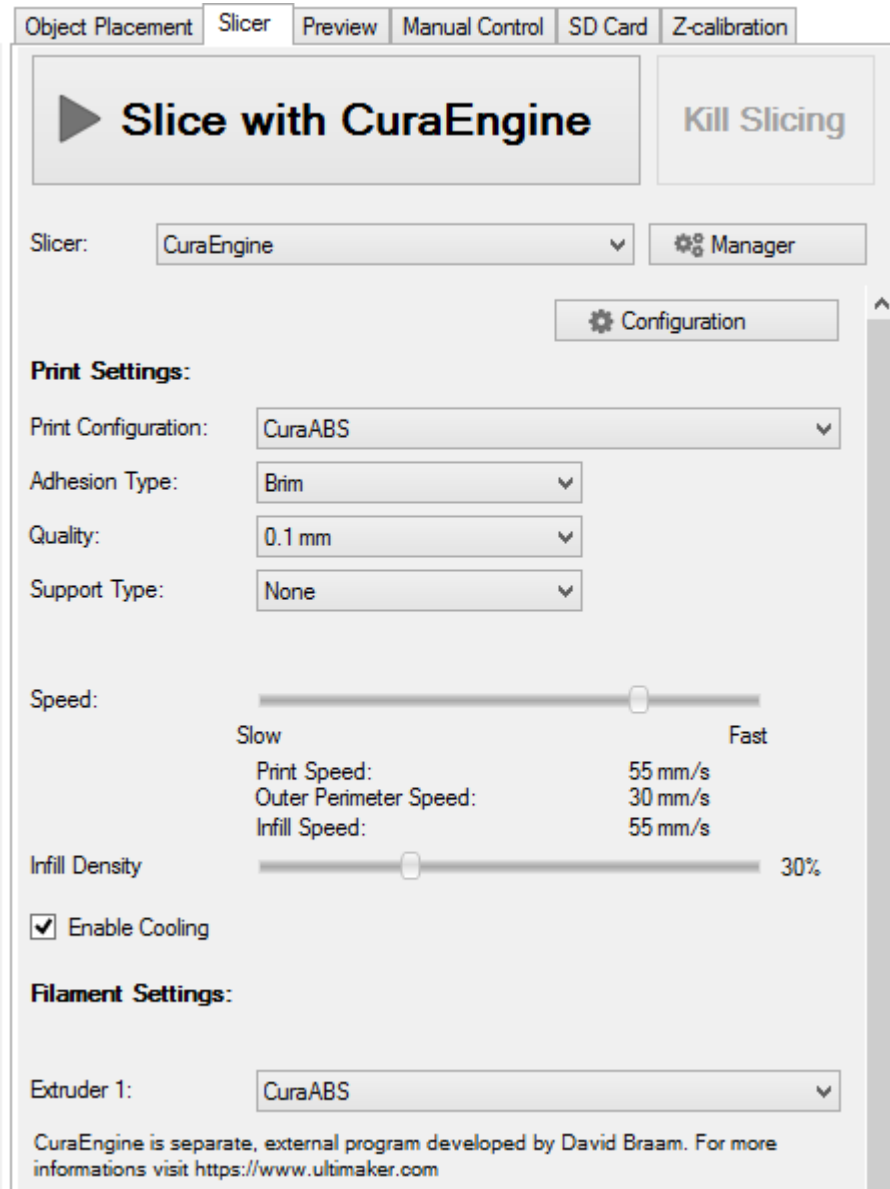
Temperature

Print Temperature: [°C]
Bed Temperature: [°C]

Cooling

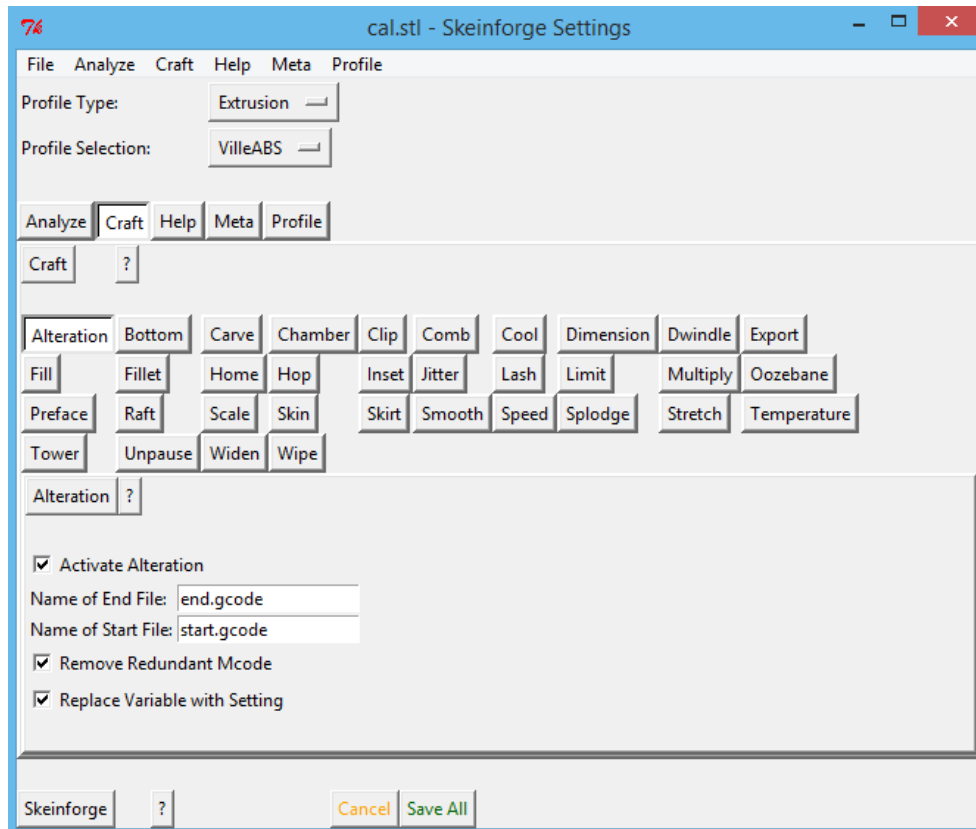
Min. Fan Speed: [%]
Max. Fan Speed: [%]
Minimum Layer Time: [s]

4. Filament

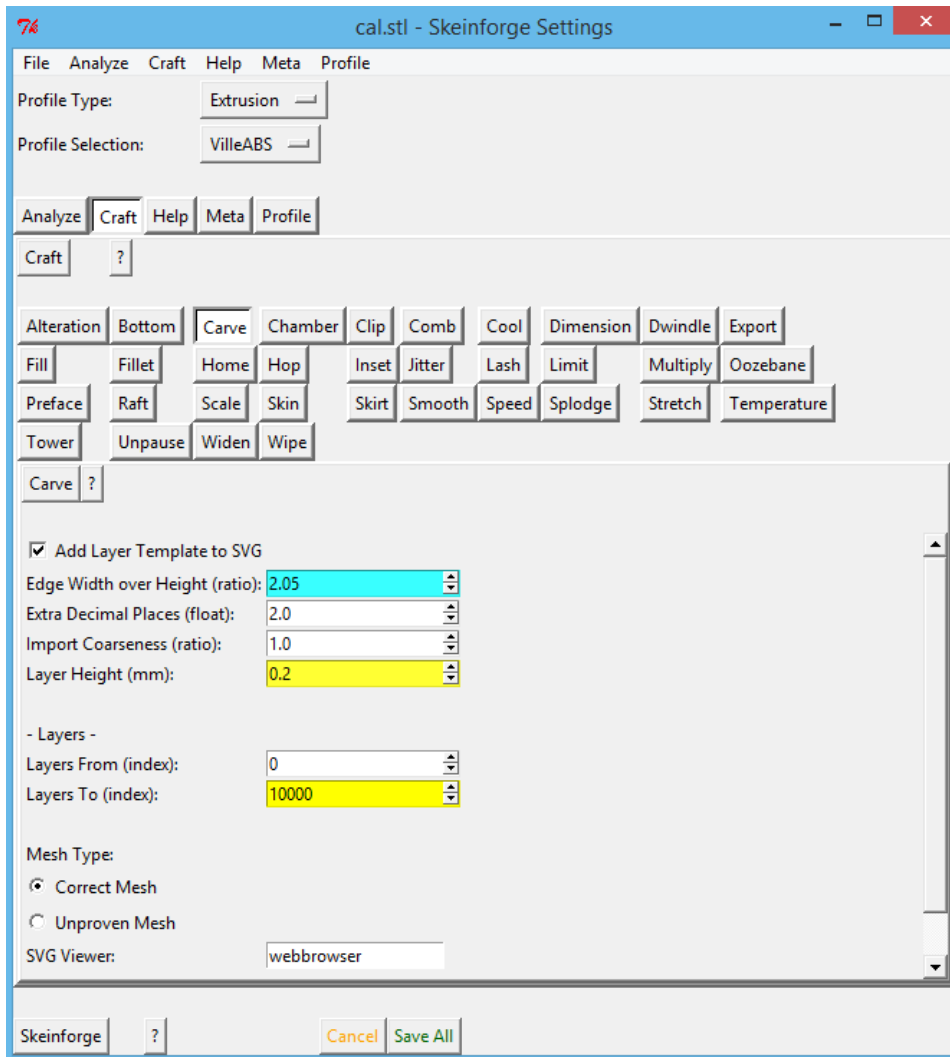


5. Repetier-Host-käyttöliittymän CuraEngine-asetukset

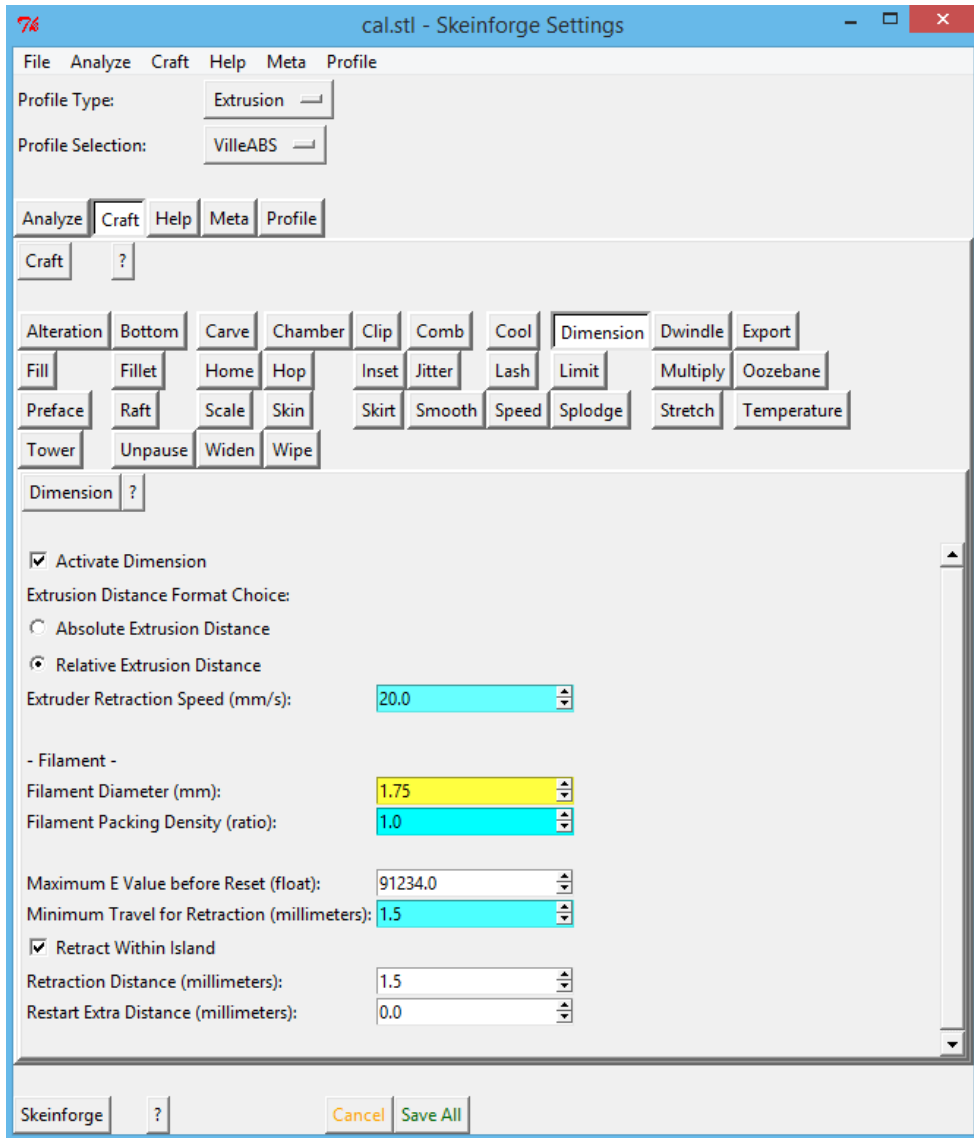
Liite 3. Skeinforge-asetuksien tiedot



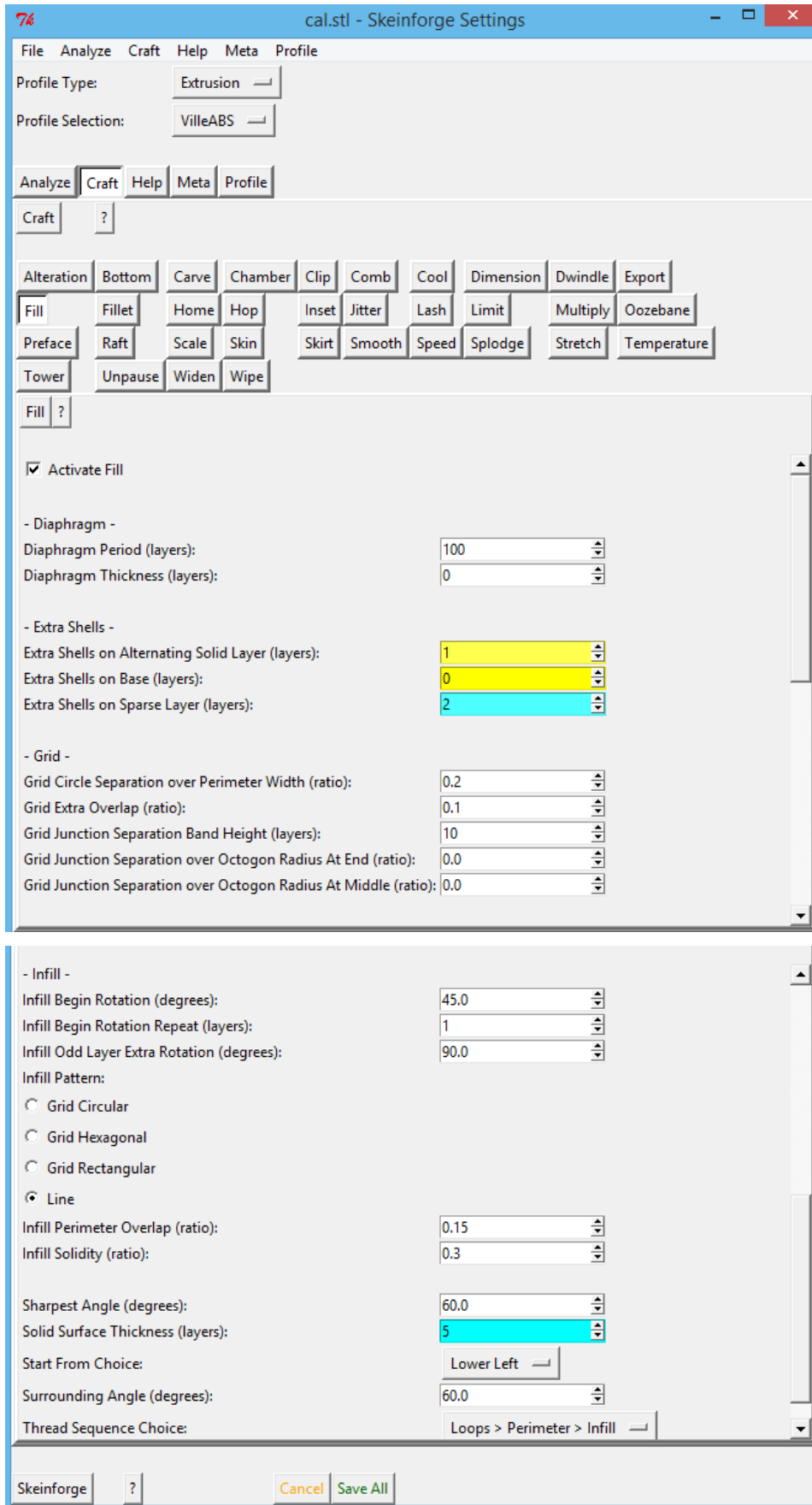
1. Craft - Alteration



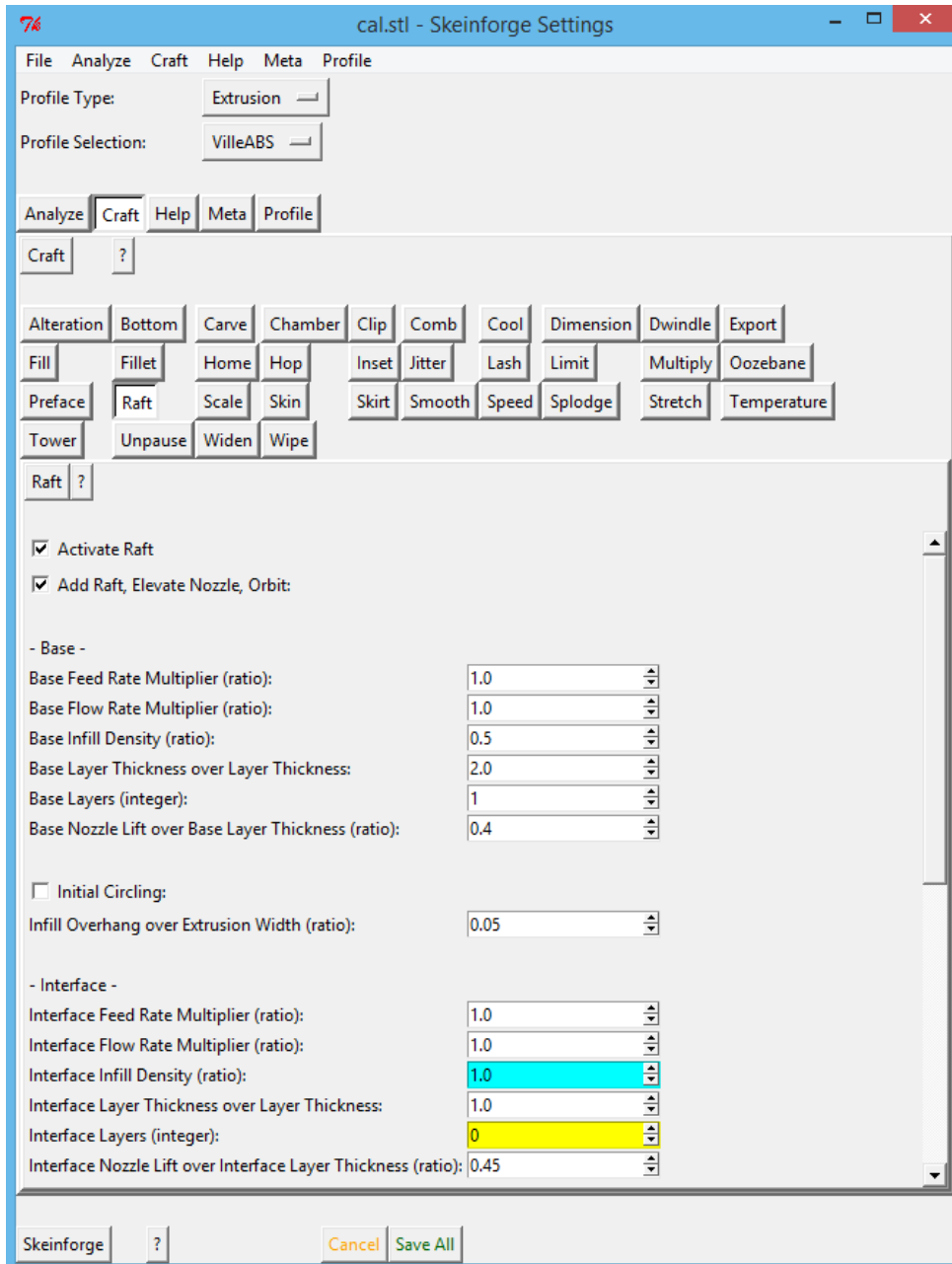
2. Craft – Carve



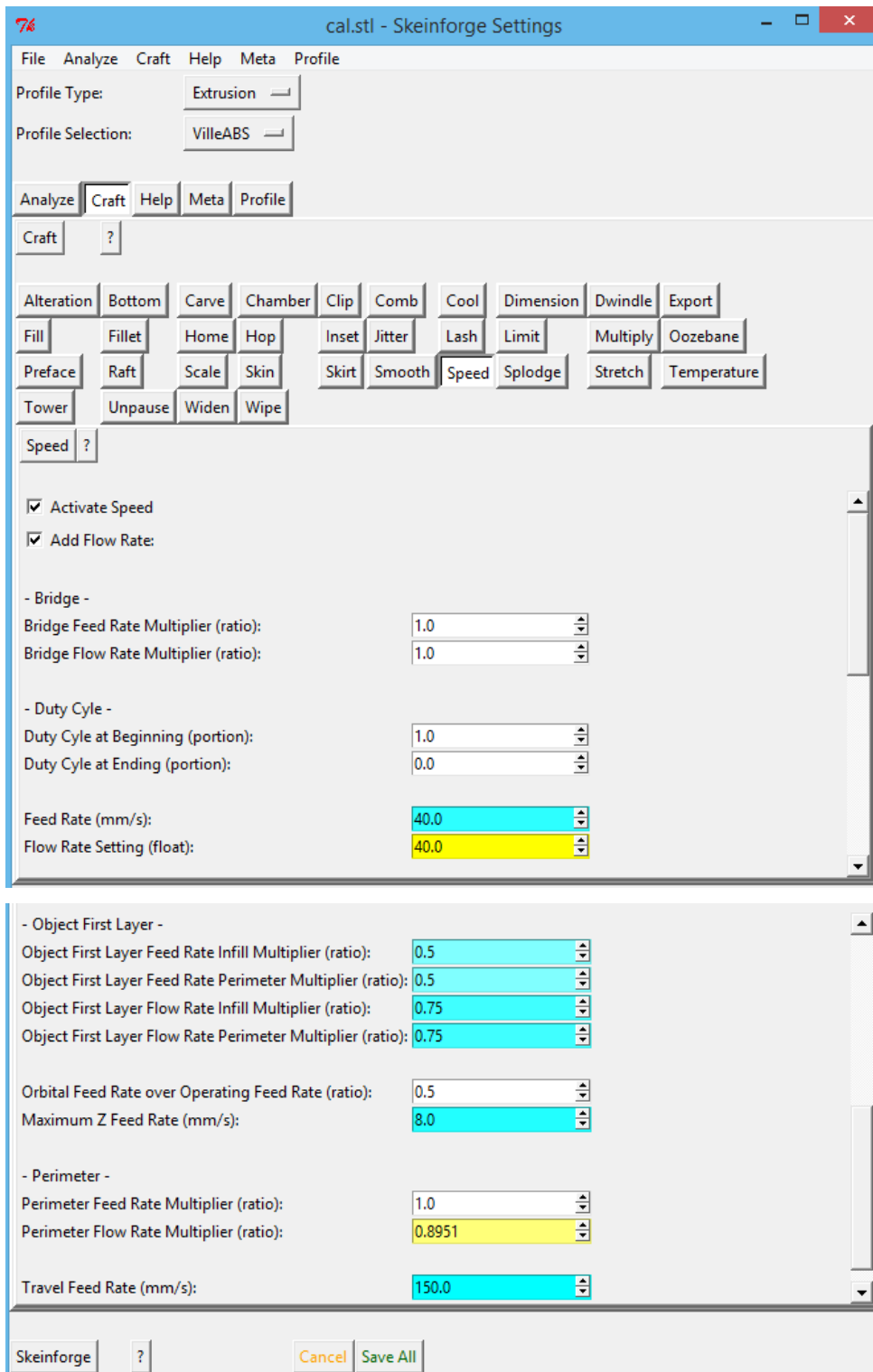
3. Craft – Dimension



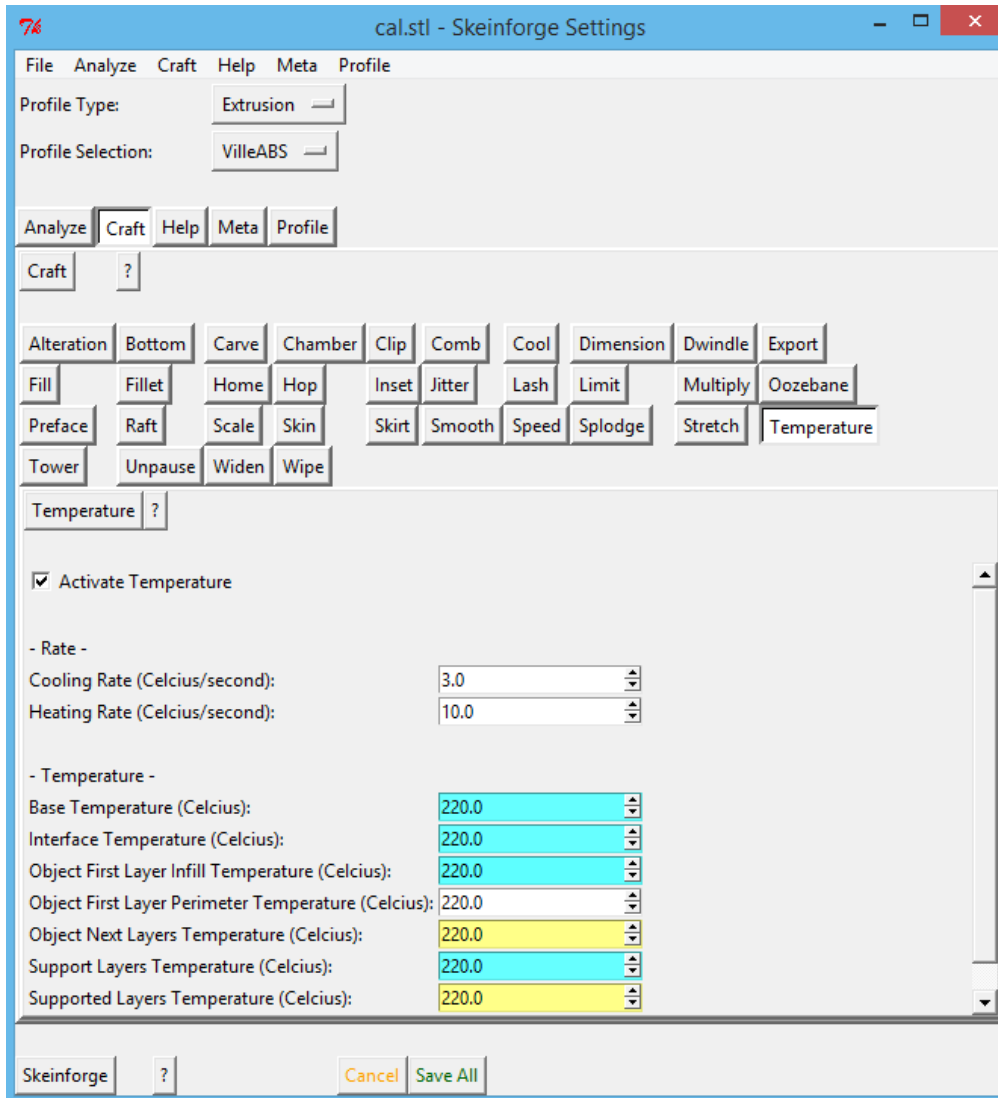
4. Craft – Fill



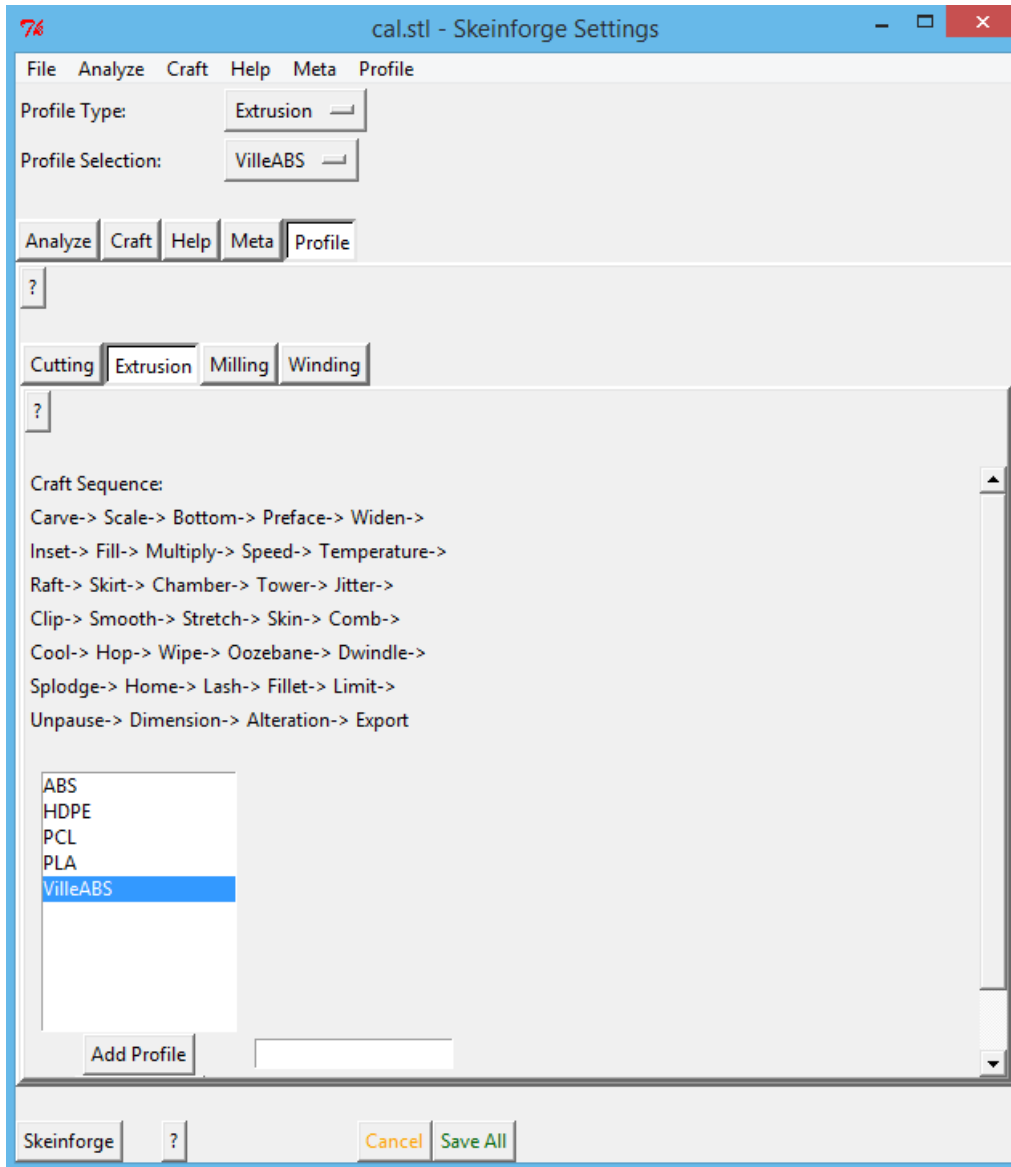
5. Craft – Raft



6. Craft – Speed



7. Craft – Temperature



8. Profile - Extrusion