

Janne Terho

**NESTEMÄISTEN MATERIAALIEN PURSOTUS
3D-TULOSTMELLA**

NESTEMÄISTEN MATERIAALIEN PURSOTUS 3D-TULOSTIMELLA

Janne Terho
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Tekijä: Janne Terho

Opinnäytetyön nimi: Nestemäisten materiaalien pursotus 3D-tulostimella

Työn ohjaaja: Heikki Kurki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2014

Sivumäärä: 53 + 6 liitettä

Opinnäytetyössä suunniteltiin MakerBot Cupcake CNC -pikamallinnuslaitteeseen uusi tulostuspää nestemäiselle materiaalille. Työ tehtiin Oulun ammattikorkeakoululle ja tavoitteena oli suunnitella tulostuspää, jolla voidaan valmistaa kappaleita eri materiaaleista suoraan 3D-mallista.

Työ oli luonteeltaan tuotekehitystyötyyppinen. Uuden tulostuspään suunnittelussa perehdyttiin erilaisten materiaalien toimivuuteen pikamallinnuksessa, puristustekniikoihin, avoimeen lähdekoodiin perustuvaan Arduino-mikrokontrollerin ohjelmointiin, ReplicatorG-ohjelmaan sekä G-koodiin. Aiheeseen perehtymisen jälkeen laite päädyttiin toteuttamaan pursottamalla materiaalia 20 ml:n lääkeruiskusta, jonka mäntää työnnetään askelmootorilla. Pikamallin valmistukseen tarvittavien G-koodien generointiin käytettiin MakerBotin kehittämää ReplicatorG-ohjelmaa.

Pursotuspäälle suunniteltiin uusi rakenne, johon kiinnitettiin lääkeruisku, askelmootori ja moottoriohjainkortti. MakerBot Cupcake CNC:n liikkeisiin käytettävien ohjainkorttien ohjelmat päivitettiin askelmootorille sopivaksi. ReplicatorG-ohjelman sisältämään Skeinforge-työkaluun tehtiin muutoksia, jotta G-koodi vastasi uuden tulostuspään liikkeitä.

Työn lopputuloksena syntyi toimiva pursotin, jota ajettiin MakerBot Cupcake CNC -pikamallinnuslaitteella. Pursotin saatiin toimimaan toivotulla tavalla eri materiaaleille ja laitteella saatiin tulostettua haluttuja kappaleita. Suunnittelun tuloksena syntyivät myös mallit pursotuspään kiinnitysrakenteesta sekä G-koodin aloitus- ja lopetusohjelmat. Työn edetessä syntyi ideoita, kuinka pursotinta voidaan kehittää lisää.

Asiasanat: CNC, NC, Pikavalmistus, 3D-tulostus, FDM, ReplicatorG, MakerBot

ALKULAUSE

Tämän insinööriyön tilaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulu. Oppilaitoksen ohjaavana opettajana toimi oppilaitoksen sähkö- ja automaatiotekniikan osastonjohtaja Heikki Kurki ja tilaajana kone- ja tuotantotekniikan osastolta lehtori Jari Viitala. Haluan kiittää opinnäytetyöhön osallistujia mahdollisuudesta tehdä työtä nopealla ja joustavalla aikataululla. Sain ottaa pikamallinnuslaitteen kotiin, mikä helpotti työn tekemistä myös iltaisin. Tämä edesauttoi valmistumista oikeassa aikataulussa.

Oulussa 6.6.2014

Janne Terho

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 3D-TULOSTUS	9
2.1 FDM-menetelmä	10
2.2 Nestemäinen aine	10
3 TULOSTUSLIIKKEIDEN OHJAUS	12
3.1 Valmistelevat G-koodit	12
3.2 Kytkevät M-koodit	13
4 MAKERBOT CUPCAKE CNC -TULOSTIN	14
4.1 Ominaisuudet	14
4.2 Laitteisto	16
4.3 CAD-ohjelma	16
4.4 ReplicatorG-ohjelma	16
4.4.1 Tulostimen asetukset	17
4.4.2 Manuaaliajo	19
4.4.3 G-koodin generointi	20
4.4.4 Skeinforge-ohjelma	21
5 PURSOTUSPÄÄ	25
5.1 Osat	26
5.2 Moottori	27
5.3 Askelmoottorionjous	29
5.4 Pursotuspään kokoaminen	30
6 OHJELMOINTI	32
6.1 Ohjelmistopäivitys	32
6.2 Koeajo	33
6.3 Kalibrointi	34
6.3.1 Aloitus- ja lopetuskoodi	34
6.3.2 Skeinforge-asetukset	34

7 MATERIAALIEN TESTAUS	36
7.1 Tulostusasetukset	36
7.2 Silikoni	39
7.3 Korjausmassa Sugru	41
7.4 Muovailumassa Krea	42
7.5 Muita havaintoja	45
8 PARANNUSEHDOTUKSIA	47
9 YHTEENVETO	48
LÄHTEET	50
LIITTEET	53

SANASTO

3D	Three Dimensional, kolmiulotteinen
ABS	akrylinitrilibutadieenistyreeni, kestävä muovilaatu
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CNC	Computerized Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
DWG	Drawing, AutoCAD-suunnitteluohjelman käyttämä tiedostomuoto
FDM	Fused Deposition Modeling, pikamallinnustekniikka
STL	Stereolithography, tiedostomuoto
USB	Universal Serial Bus, yleinen sarjaväylä

1 JOHDANTO

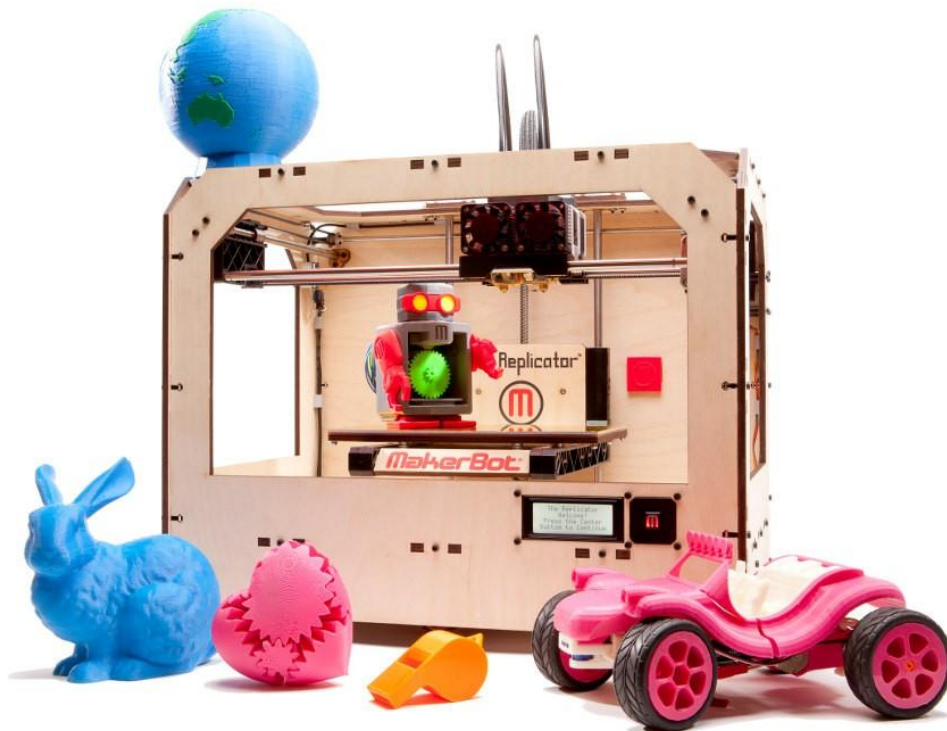
Opinnäytetyön tilaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikkö. Työn tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa laitteisto, jonka avulla pystytään valmistamaan pikamalleja nestemäisestä materiaalista, kuten silikoni ja savi. Kun tulostusmateriaalivalikoima kasvaa, voidaan tulostinta käyttää useampaan tarkoitukseen. Kehitettävä laitteisto sisältää pursotustekniikan, joka kiinnitetään Makerbot Cupcake CNC -tulostimeen.

Laitteistossa käytettiin vanhan tulostimen runkoa ja akselistoa, mutta pursotuspää suunniteltiin uudelleen. Uusi pursotuspää sisältää askelmoottorin ja lääkeruiskun, jota puristamalla saadaan tulostettua nestemäistä materiaalia. Nestemäinen materiaali johdetaan tulostusalustalle, johon haluttu kappale tulostetaan.

Työ sisälsi uuden pursotuspään suunnittelun, käyttöönoton, kalibroinnin sekä tulostusmateriaalien testauksen. Opinnäytetyötä varten tehtiin myös lähtötietomuuisto, joka on liitteenä 1.

2 3D-TULOSTUS

3D-tulostin on laite, joka pystyy tulostamaan tietokoneella suunnitellusta kolmiulotteisesta mallista fyysisen esineen (kuva 1). Tulostusmateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi muovia, metallia, keraamia tai lasia. Nykyään ovat yleistymässä kotikäyttöön tulostimet, joiden tulostusmateriaaleina käytetään muoveja. Nämä suhteellisen edulliset tulostimet tulostavat kuumentamalla sulatettua muovia ohuina kerroksina tulostusalustalle. Muovi kovettuu hetkessä ja useita kerroksia päällekkäin tekemällä saadaan muodostettua haluttu malli. Neljännen sukupolven tulostimia pystytään ohjaamaan jopa puhelimella. (1.)



KUVA 1. 3D-tulostin (2)

Kolmiulotteisen tulostuksen kehitys on vienyt tulostamisen myös kotikäyttöön. Tulostimien käyttö on melko yksinkertaista ja avoimeen lähdekoodiin perustuvat tulostimet ovat suhteellisen edullisia verrattuna valmiiksi tuotteistettuihin tulos-

timiin. Kolmiulotteisia malleja voidaan tilata myös tulostuspalveluja tarjoavilta yrityksiltä. (1.)

Valmiskappaleiden tulostusta käytetään esimerkiksi koruteollisuuden, hammas-tekniikan ja veistotaiteen aloilla (1). Kolmiulotteista tulostusta käytetään myös erilaisten laitteiden prototyypin valmistuksessa. Tarvittavat osat voidaan itse tulostaa, jolloin vältetään kalliilta yksittäisten osien tilauksilta sekä pitkiltä toimitusajoilta.

2.1 FDM-menetelmä

FDM tulee sanoista Fused Deposition Modeling. Menetelmässä kappale rakennetaan kerros kerrokselta. Materiaalina käytetään muovilankaa, joka johdetaan kelalta tulostuspäähän, jossa se sulatetaan. Sulatettu muovi johdetaan tulostusalustalle, joka Makerbot Cupcake CNC -tulostimessa liikkuu X- ja Y-suuntiin työratojen mukaan. Kun ensimmäinen kerros on valmiina, pursotinpää siirtyy Z-suunnassa ylöspäin ja seuraava kerros tulostetaan edellisen päälle. (3, s. 7.)

FDM-menetelmässä ei voi tulostaa pitkiä matkoja tyhjän päälle, mutta joissakin tulostinmalleissa käytetään kahta tulostuspäätä, jolloin toisesta tulostuspäädä voidaan syöttää eriväristä materiaalia tai tukimateriaalia. Nykyisillä ohjelmilla tukimateriaalin tarvetta ei tarvitse itse suunnitella, vaan tulostusohjelma laskee tarvittavan tukimateriaalin määrän automaattisesti. Kappale olisi kuitenkin hyvä suunnitella niin, ettei tukimateriaalia tarvita ollenkaan, sillä poistettaessa se voi jäädä tulostettavaan kappaleeseen kiinni.

2.2 Nestemäinen aine

Huoneenlämmössä nestemäisessä muodossa olevan aineen tulostaminen tuo lisämahdollisuuksia valmistaa kolmiulotteisesta mallista kappaleita erilaisiin käyttötarkoituksiin. Nestemäisen aineen tulostamisessa ongelmaksi muodostuvat erilaisten aineiden eri viskositeetit. MakerBot Industries on kehittänyt Frost-ruder MK2 -tulostuspään (kuva 2), jolla tulostetaan nestemäistä ainetta paineilman avulla (4). Paineilmalla tulostettaessa ongelmaksi muodostuu paineen muutoksen tarve viskositeetin muuttuessa.



KUVA 2. Frostruder MK2 (4)

Lääkeruiskun männän liikemäärä on suoraan verrannollinen säiliön tilavuuden muutokseen. Vaikka tulostettavan aineen viskositeetti muuttuu, pysyy lääkeruiskun männän nopeus ja pursotettavan aineen määrä samana. Tämän ansiosta voidaan erilaisia aineita tulostaa samoilla asetuksilla, mutta ruiskun sisällön on oltava tasalaatuista.

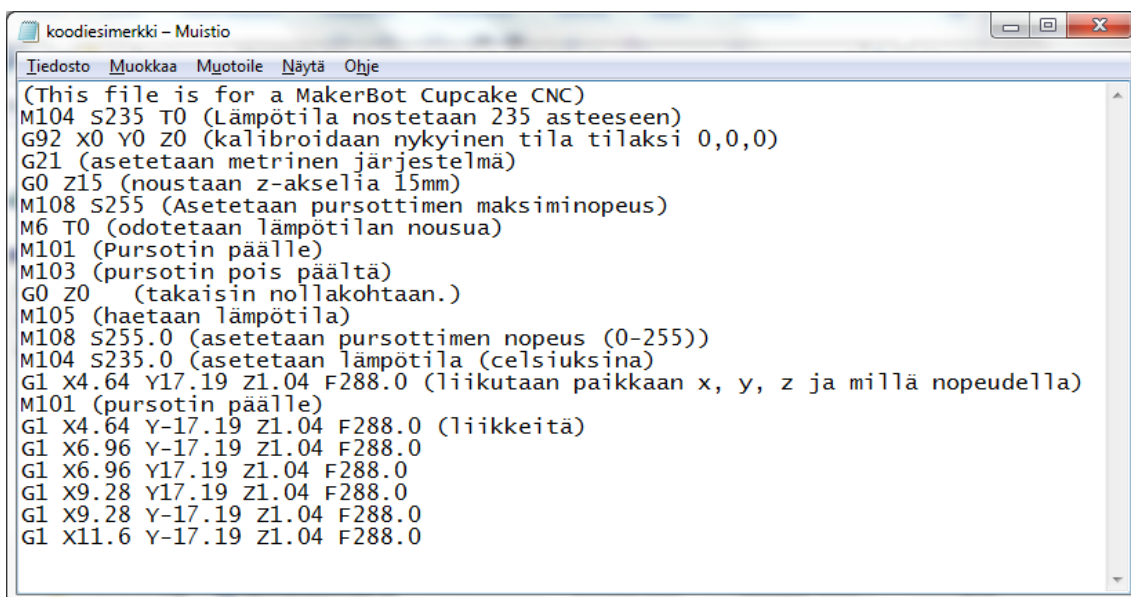
Nestemäiseen pursotukseen soveltuvat ainakin silikoni, savi, ilmakeiva savi, muoviluvaha, ruoka-aineet, kaksikomponenttiaineet ja muovilumassat. Suurimmalla osalla näistä aineista ongelmaksi muodostuu kuivumisajan pituus, mikä tuo haasteita korkeiden kappaleiden tulostuksessa.

Nestemäisen aineen tulostuksella voidaan tällä hetkellä helposti tehdä koriste-esineitä ja valmistaa leivoksia. Riittävän hyvän materiaalin löytyessä voidaan tulostusmenetelmää käyttää myös teknisten tuotteiden ratkaisuihin, kuten sulavien keernojen valmistamiseen.

3 TULOSTUSLIIKKEIDEN OHJAUS

Tietokoneistettu numeerinen ohjaus (CNC, Computerized Numerical Control) tarkoittaa työstö- tai muun koneen ohjaamista käyttökoodeilla, jotka kone muuttaa moottorien liikkeiksi (5). 3D-tulostimia on alettu kehittää CNC-koneiden pohjalta.

3D-tulostimen isäntänä toimii tietokone, jolta tulostin saa käskyjä. Tulostimen muistikapasiteetti on sen verran pieni, ettei sinne voida syöttää koko ohjelmaa. Tämän takia ohjelma sijaitsee isäntäkoneessa ja tulostimelle syötetään vain yksittäisiä käskyjä G-koodin muodossa (kuva 3). Tulostimessa isäntänä toimii Motherboard, joka vastaanottaa tietokoneelta käskyt ja lähettää niitä eteenpäin. Motherboard välittää ohjaustiedot X-, Y- ja Z-akseleiden ohjaamiseen käytettäville moottoriohjainkortteille sekä pursotusohjainkortille.



```
koodiesimerkki - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
(This file is for a MakerBot Cupcake CNC)
M104 S235 T0 (Lämpötila nostetaan 235 asteeseen)
G92 X0 Y0 Z0 (kalibroidaan nykyinen tila tilaksi 0,0,0)
G21 (asetetaan metrinen järjestelmä)
G0 Z15 (noustaan z-akselia 15mm)
M108 S255 (Asetetaan pursottimen maksiminopeus)
M6 T0 (odotetaan lämpötilan nousua)
M101 (Pursotin päälle)
M103 (pursotin pois päältä)
G0 Z0 (takaisin nolakohtaan.)
M105 (haetaan lämpötila)
M108 S255.0 (asetetaan pursottimen nopeus (0-255))
M104 S235.0 (asetetaan lämpötila (celsiusina))
G1 X4.64 Y17.19 Z1.04 F288.0 (liikutaan paikkaan x, y, z ja millä nopeudella)
M101 (pursotin päälle)
G1 X4.64 Y-17.19 Z1.04 F288.0 (liikkeitä)
G1 X6.96 Y-17.19 Z1.04 F288.0
G1 X6.96 Y17.19 Z1.04 F288.0
G1 X9.28 Y17.19 Z1.04 F288.0
G1 X9.28 Y-17.19 Z1.04 F288.0
G1 X11.6 Y-17.19 Z1.04 F288.0
```

KUVA 3. Esimerkkikoodi G-koodista

3.1 Valmistelevat G-koodit

G-koodia voidaan pitää NC-ohjausten yleisstandardina, joka sisältää lähinnä liikekäskyjä, koordinaatteja ja asetusarvoja. Suurin osa valmistelevista G-koodeista on kullekin konetyypille samat. Yhdellä G-koodirivillä esiintyy yleensä

yksi G-koodi, koordinaatit sekä korkeintaan yksi M-koodi (ks. luku 3.2) kerrallaan.

G-koodeista on tiedettävä niiden voimassaoloaika, esimerkiksi se mitkä koodit voivat olla voimassa käynnistyksen tai resetoinnin jälkeen. Tämän perusteella G-koodit jaotellaan joko modaalisiksi tai ei-modaalisiksi. Ei-modaalinen on voimassa vain silloin, kun käsky annetaan. Modaalinen on voimassa niin kauan, kunnes samaan ryhmään kuuluva G-koodi annetaan. (6.)

G-koodit on jaoteltu ryhmiin modaalisuuden perusteella. Esimerkiksi G1, joka on lineaarinen liike, ja G2, joka on kaariliike myötäpäivään, eivät voi vaikuttaa samaan aikaan. Molemmat ovat modaalisia käskyjä ja kuuluvat samaan ryhmään. (6.)

3.2 Kytkevät M-koodit

Toisin kun G-koodit, M-koodit eroavat eri laitteilla huomattavasti. Ne ovat ON/OFF-tyyppisiä komentoja, joilla voidaan esimerkiksi laittaa moottori päälle ja toisella koodilla moottori pois päältä. M-koodit tulee aina tarkistaa valmistajan sivuilta. (6.)

4 MAKERBOT CUPCAKE CNC -TULOSTIN

MakerBot Industries (7) on New Yorkissa vuonna 2009 perustettu yritys, joka tuottaa 3D-pikamallikoneita. Makerbot on lähdetty kehittämään RepRap Research Foundationin laitteista ja tarkoituksena on ollut saada 3D-tulostimia kotikäyttöön kohtuullisella hinnalla. RepRap Research Foundation on voittoa tavoittelematon ryhmä, joka perustettiin edistämään varhaista tutkimusta avoimella koodilla toimivilla 3D-tulostimilla. (8, s. 15.)

4.1 Ominaisuudet

Makerbot Cupcake CNC (9) on MakerBotin valmistama FDM-menetelmällä toimiva avoimen lähdekoodin tulostin (kuva 4). Sillä voidaan tulostaa 3D-suunniteltuja tai mallinnusohjelmalla suunniteltuja esineitä. Tulostimessa on käytetty Arduino-pohjaista ohjainkorttia, jota voidaan ohjata ReplicatorG-ohjelman avulla. Tulostin on poistunut myynnistä, mutta aikoinaan se on voitu ostaa joko rakennussarjana (10, linkit Support -> MakerBot Cupcake CNC -> Assembly instructions) tai valmiiksi koottuna. Oppilaitokselle tulostin on tilattu rakennussarjana ja sen on koonnut ryhmä opiskelijoita.



KUVA 4. Makerbot Cupcake CNC (9)

MakerBot Cupcake CNC:tä ovat kehittäneet sekä laitteen valmistajat että käyttäjät. MakerBot Cupcake CNC:n kehityksen aikana on ylläpidetty wiki-sivustoa, mutta se on poistettu käytöstä. Wiki-sivuston varmuuskopio sijaitsee vielä lähteestä 11.

MakerBot Cupcake CNC -tulostimesta on tehty useita versioita. Versiopäivitykset voidaan ladata tulostimeen ReplicatorG-ohjelman kautta. Jotkut päivitykset edellyttävät myös muutoksia ohjauselektronikkaan. MakerBot Cupcake CNC:lle on kehitetty myös erilaisia tulostinpäitä, jotka voidaan vaihtaa helposti.

MakerBot Cupcake CNC hyväksyy kolme erilaista muovilaatua ja se tulostaa tarkasti pieniä esineitä. MakerBotilla on valmistettu mm. pienoismalleja autoista, robotin osia, kihlasormuksia, tuomarin pillejä, shakkinappuloita jne. Laitteen omistajien ja 3D-suunnittelijoiden luomuksia voi tarkastella osoitteessa www.thingiverse.com. MakerBot Cupcake CNC:n ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. (9.)

TAULUKKO 1. MakerBot Cupcake CNC -tulostimen ominaisuudet (9)

Ulkoiset mitat	350 mm x 240 mm x 450 mm
Maksimitulostuskoko	100 mm (leveys) x 100 mm (syvyys) x 130 mm (korkeus)
X/y-koordinaatiston erottelutarkkuus	0,085 mm
Z-koordinaatiston erottelutarkkuus	3,125 mikronia
Maksimisyöttö x/y	5000 mm/ minuutti
Maksimisyöttö x/y	200 mm/ minuutti
Z-tason normaalipaksuus	0,3725 mm

Nykyään MakerBot ei valmista enää avoimeen lähdekoodiin perustuvia laitteita, mutta kehitys jatkuu nopeasti. Kehitystä on tullut seuraavissa asioissa: tarkempi tulostus, suuremmat tulostusalueet, ohjaus puhelimella, tulostus langattomasti, automaattinen kuvaus sekä tallennus sosiaaliseen mediaan. Sen lisäksi MakerBot on tuonut markkinoille laitteen, jolla voidaan luoda 3D-mallinnustiedosto valokuvaamalla jo olemassa olevan kappaleen. (10.)

4.2 Laitteisto

MakerBot Cupcake CNC -tulostimessa on käytetty RepRapin Generation 3 -elektroniikkaa (12). Siihen kuuluvat pääohjainkortti v1.2, moottoriohjainkortit v2.3, rajakytkimet v2.1 sekä pursotusohjainkortti v2.2. Oppilaitoksen tulostimessa ei ole käytetty rajakytkimiä ollenkaan. Näiden lisäksi tulostimeen kuuluu runko, tulostusalusta, X-, Y- ja Z -akselisto sekä virtalähde. Tarkemmat laitetiedot on esitetty liitteessä 2.

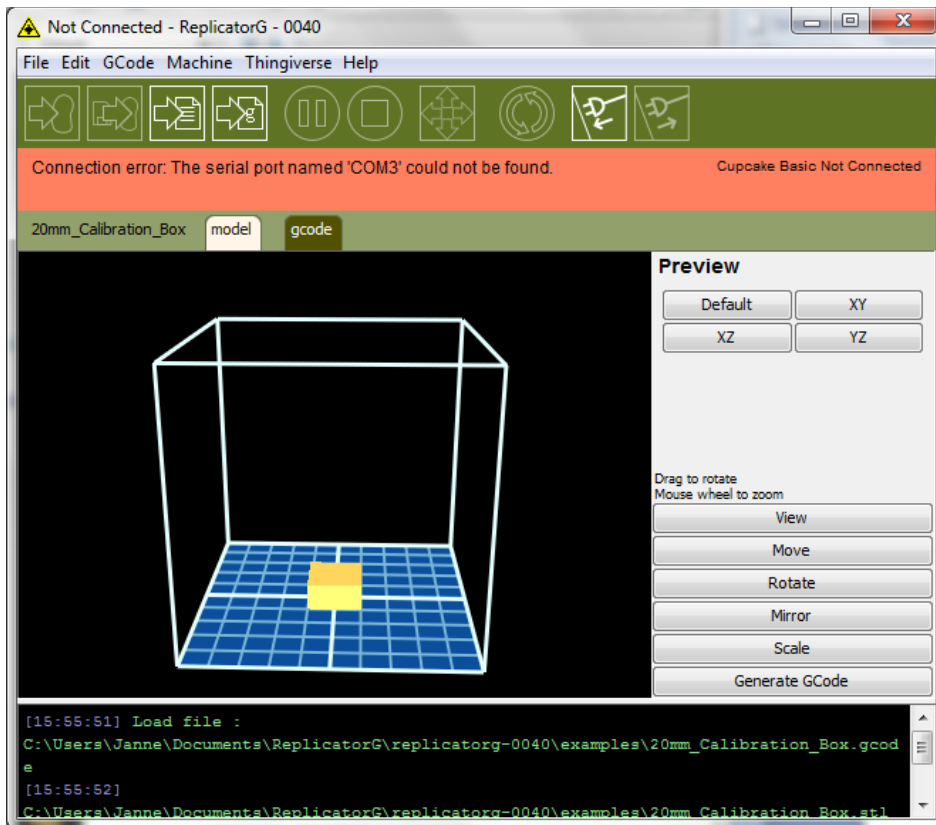
MakerBot on rakentanut Cupcake CNC:stä uudemman version nimeltään Thing-O-Matic, joka on rakennettu uudemmalla Generation 4 -elektroniikalla.

4.3 CAD-ohjelma

Tietokoneavusteinen suunnittelu eli CAD on tietokoneen käyttöä apuvälineenä suunnittelutyössä. 3D-CAD-suunnittelun tuloksena saadaan tulostettavasta kappaleesta malli, joka voidaan kääntää STL-tiedostoksi. Tässä opinnäytetyössä käytettiin valmiita avoimeen lähdekoodiin perustuvia STL-tiedostoja. (13.)

4.4 ReplicatorG-ohjelma

ReplicatorG-tulostusohjelmalla ohjataan tulostinta sekä voidaan myös päivittää ja kalibroida MakerBot-tulostimia (kuva 5). ReplicatorG sisältää myös Skeinforge-ohjelman, joka suunnittelee tulostinpään liikkumisen tulostuksen aikana. Ohjelmalla voidaan kääntää STL-tiedosto G-koodiksi. Kun tulostin ja tietokone ovat kytkettynä kaapelin avulla, voidaan ReplicatorG-ohjelmalla syöttää G-koodia tulostimelle rivi riviltä (14). ReplicatorG-ohjelma sisältää myös manuaaliohjauksen tulostimelle.

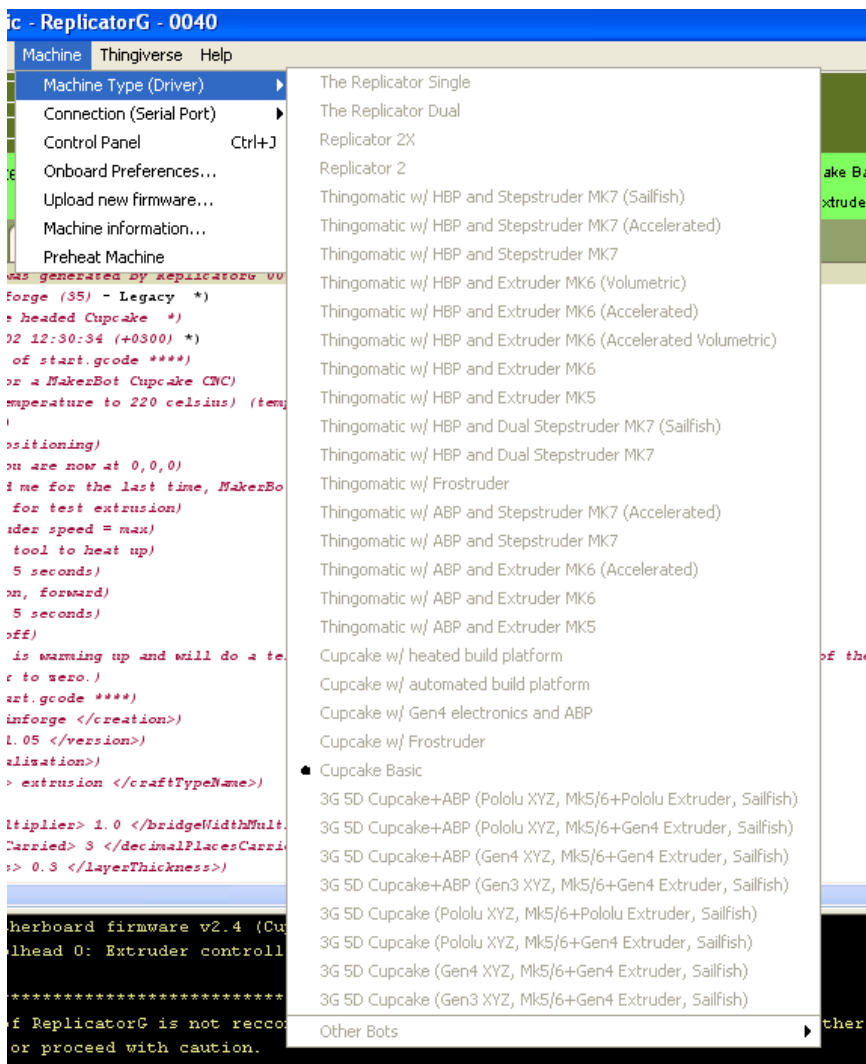


KUVA 5. ReplicatorG-ohjelman päänäkymä

Tulostimen ollessa kytkettynä TTL-kaapelin avulla tietokoneen USB-porttiin voidaan muodostaa yhteys tulostimen ja tietokoneen välille. Valitaan oikea USB-portti ReplicatorG:n valikosta Machine -> Connection. Tämän jälkeen yhteys voidaan muodostaa painamalla päänäkymässä olevaa Connect-painiketta. Kun yhteys on muodostettu, voidaan Build-painikkeella tulostinta ajaa gcode-välilehdessä olevan koodin mukaisesti.

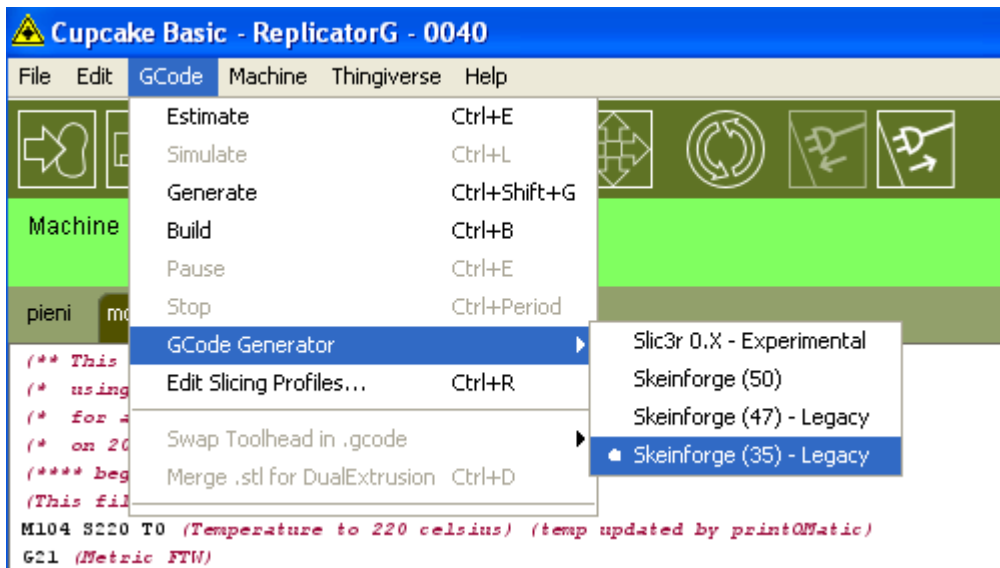
4.4.1 Tulostimen asetukset

ReplicatorG-ohjelmaa käytettäessä ensimmäinen askel on laitteen tyypin valitseminen. Laitteen tyyppi valitaan tulostinmallin, pursotuspään ja ohjauselektronikan mukaan. Laitteen tyyppi valitaan valikosta Machine -> Machine Type (Driver). Tässä työssä käytetyn tulostimen tyyppiä valitaan Cupcake Basic. (Kuva 6.)



KUVA 6. Laitteen tyyppin valitseminen

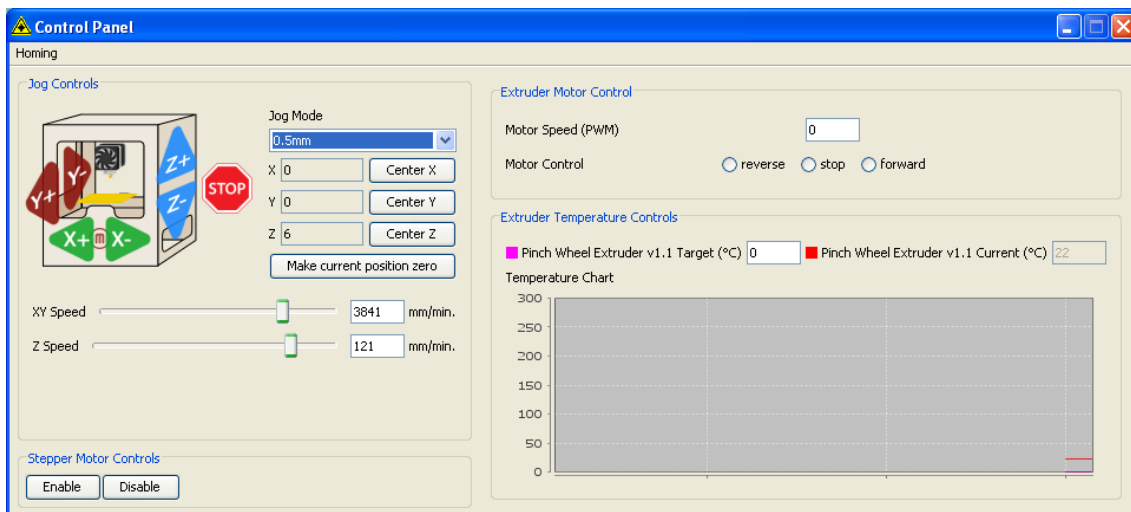
Seuraavaksi valitaan Gcode Generator Slicing Profile. Tämä profiili sisältää asetukset, kuinka G-koodi luodaan STL-tiedostosta. Profiili valitaan valikosta Gcode -> Gcode Generator. Eri profiileilla G-koodin käskyt ovat erilaiset. Tulostimien parantuessa on kehitelty erilaisia tapoja ohjata tulostinta, joten käskykantakin on muuttunut. MakerBot Cupcake CNC, jossa on DC-moottoriohjattu Plastruder MK4- tai MK5-pursotin (15), käyttää Skeinforge 35 -profiilia. (Kuva 7.)



KUVA 7. Gcode Generator Slicing Profilen valitseminen

4.4.2 Manuaalialajo

Manuaaliohjauspaneeli saadaan valittua päänäkymän Control Panel -näppäimestä (kuva 8). Manuaaliohjauspaneelista voidaan liikuttaa kaikkia akseleita käsiohjauksella. Ensin valitaan akselin nopeus ja kuljettava matka. Painamalla akselin +- tai --näppäintä voidaan akselia ajaa valitun matkan verran kyseiseen suuntaan valitulla nopeudella.

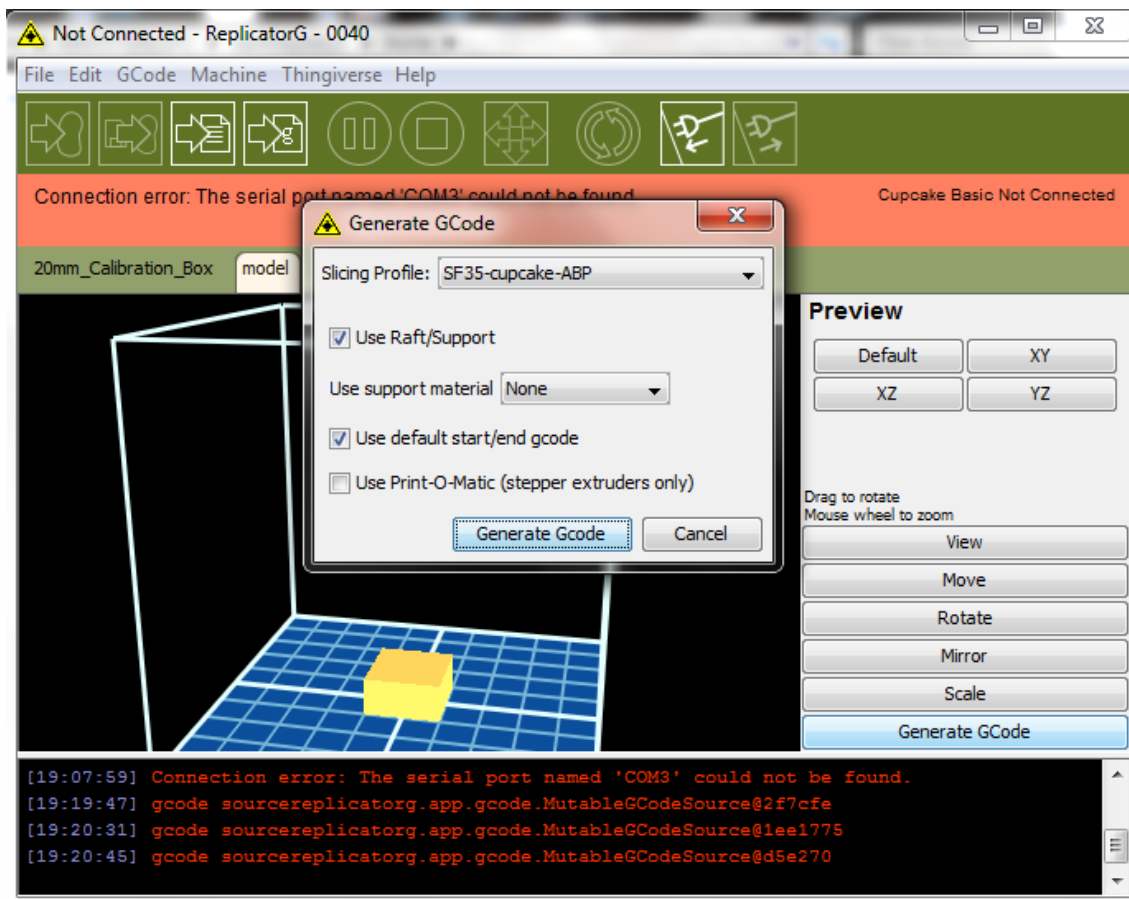


KUVA 8. Manuaaliohjauksen hallintänäyttö

Pursotuspäätä voidaan lämmittää syöttämällä haluttu lämpötila sille valittuun kohtaan. Ohjauspaneeli sisältää diagrammin, josta voidaan lukea pursotuspään lämpötila ja asetusarvo. Moottorin nopeutta säädetään arvojen 0 ja 255 välillä, jossa arvolla 0 moottori on pysähtyneenä ja arvolla 255 moottori käy täysillä.

4.4.3 G-koodin generointi

G-koodin generointiin tarvitaan STL-tiedosto. Esimerkkikappaleet löytyvät valikosta File -> Examples. STL-mallia voidaan esikatsella model-välilehdeltä, josta sitä voidaan myös käänellä ja skaalata tulostusalustaan sopivaksi. Kappale on hyvä kääntää sellaiseen asentoon, ettei synny tyhjän päälle tulostusta. Kappale generoidaan painamalla Generate GCode -näppäintä, minkä jälkeen asetusvalikko avautuu. Oppilaitoksen tulostin toimi hyvin kuvan 9 asetuksilla.



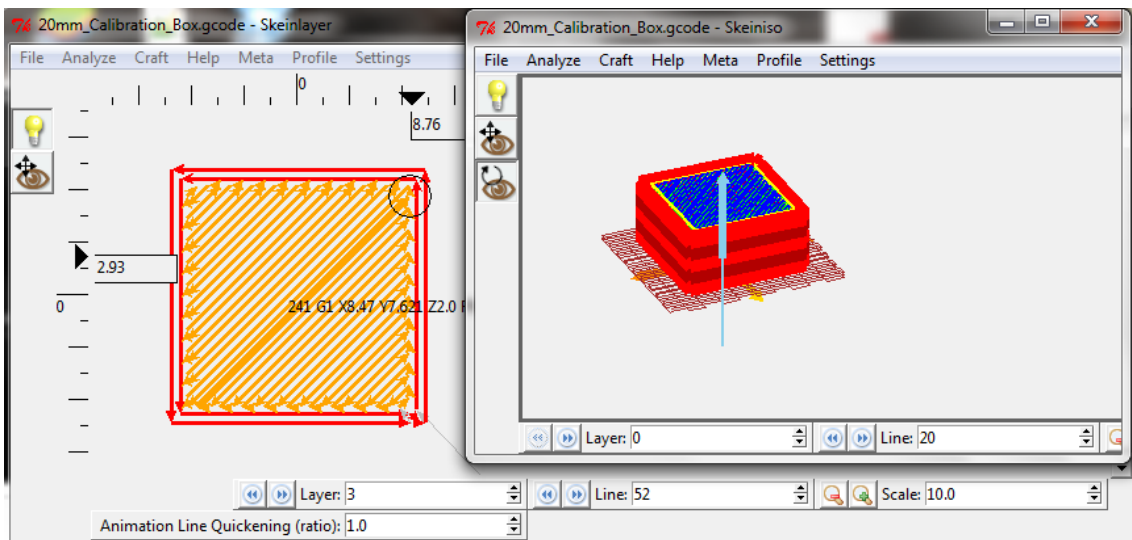
KUVA 9. G-koodin generointi

ReplicatorG-ohjelmaan sisäänrakennettu Skeinforge-työkalu kääntää STL-tiedoston G-koodiksi valittujen asetusten perusteella. Käännetty G-koodi muodostuu GCode-välilehdelle, josta sitä voidaan tarvittaessa muokata. Ulkoisen ohjelman avulla valmistettu G-koodi voidaan liittää myös kopioimalla se GCode-välilehteen.

4.4.4 Skeinforge-ohjelma

ReplicatorG sisältää Skeinforge-ohjelman, joka suunnittelee tulostuspään liikumisen tulostuksen aikana. Skeinforge viipaloi 3D-mallin kerroksittain ja valmistelee liikeradat valittujen asetusten perusteella.

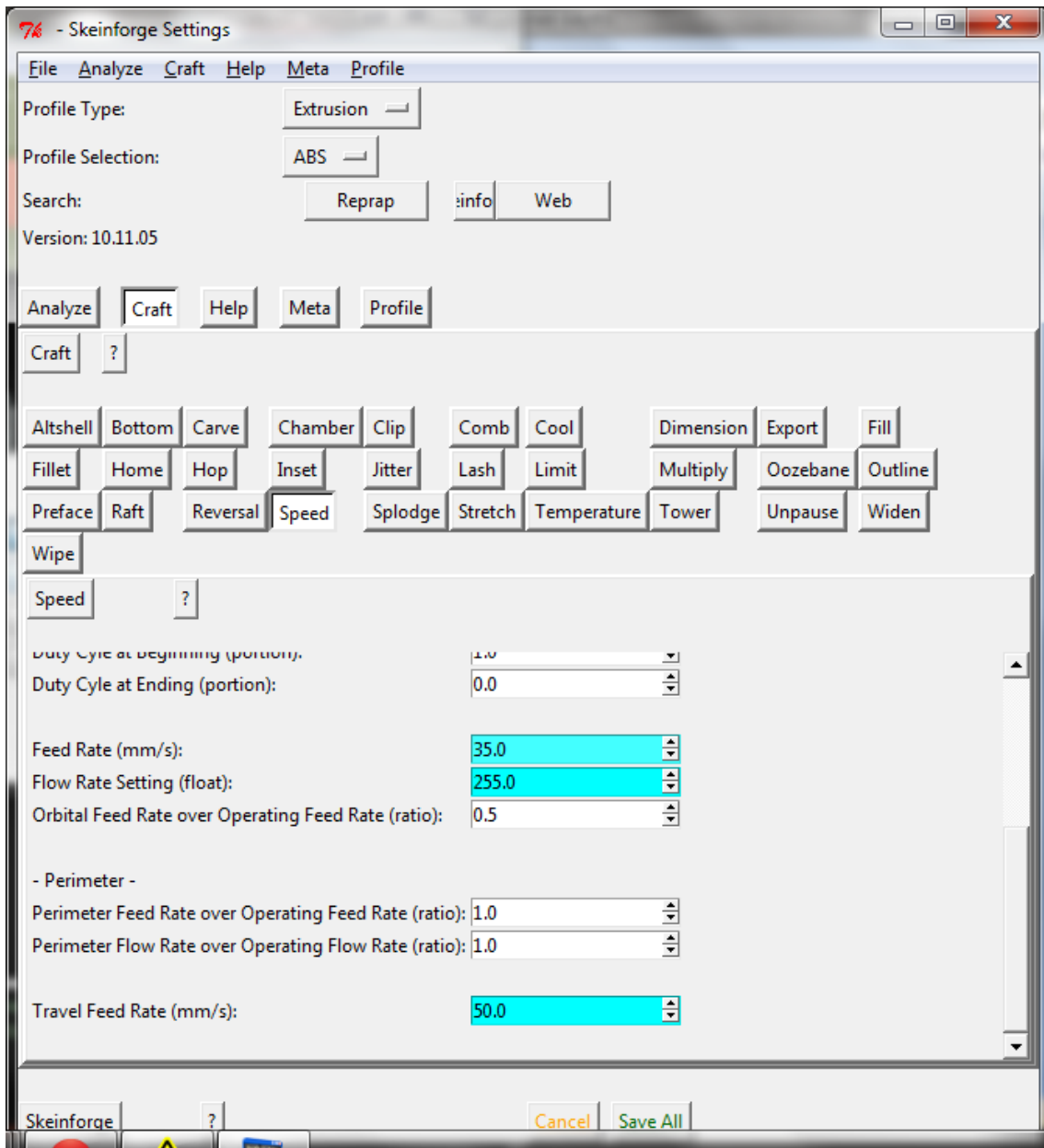
G-koodin liikeradat voidaan nähdä visuaalisesti vetämällä gcode-tiedosto ReplicatorG-ohjelmakansion sisältä löytyvän tiedoston ...\ReplicatorG\replicatorg-0040\skein_engines\skeinforge-35\skeinforge_application\skeinforge.py päälle. Tämä toiminto vaatii, että Python-ohjelma on asennettuna tietokoneelle. Skeinforge-ohjelman avulla voidaan tarkastella tulostuksen liikeratoja kerros kerrokselta. (Kuva 10.)



KUVA 10. Pythonilla avattu G-koodi

Skeinforge-profiilin asetuksia voidaan muuttaa ReplicatorG-ohjelman valikosta GCode -> Edit Slicing Profiles. Profili sisältää suuren määrän parametrejä, joiden avulla voidaan määrittää tulostuksen liikeradat. Skeinforge 35 -profiilin pa-

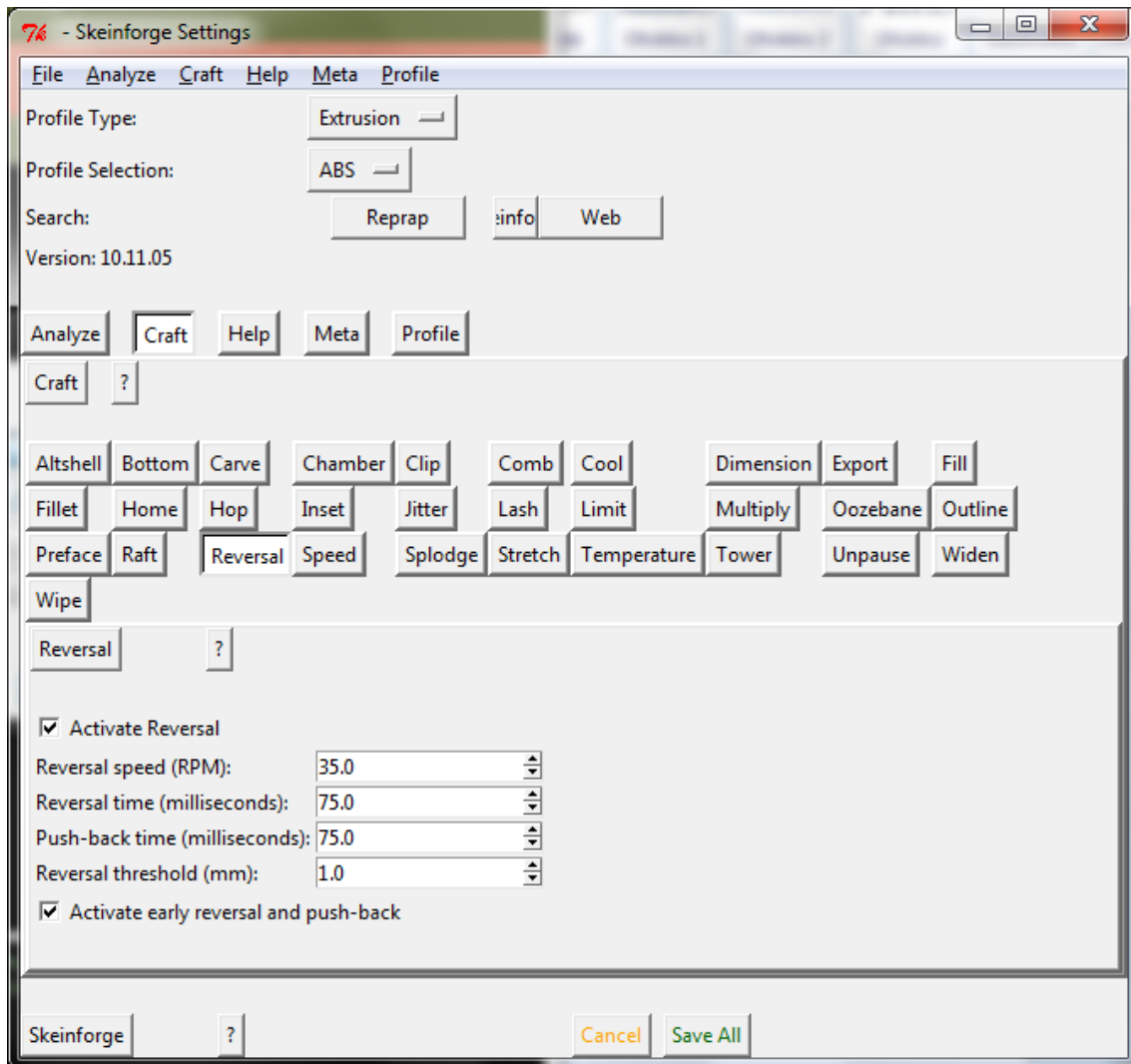
parametrien käyttöliittymä on hieman epäselvä, mutta esimerkiksi kerrospaksuuden parametreja voidaan muuttaa Carve-välilehden Layer Thickness -kentästä ja tulostimen liikeratojen nopeuden parametreja voidaan muuttaa Speed-välilehden Feed Rate -kentästä. (Kuva 11.)



KUVA 11. Liikenopeuden muuttaminen Skeinforge-asetuksista

Työssä muutettiin Oozebane- ja Reversal-asetuksia. Reversal-asetuksista voidaan muokata pursotuksen liikkeitä ennen ja jälkeen vapaita liikeratoja sekä vapaiden liikeratojen aikana (kuva 12). Toiminto saadaan päälle asettamalla

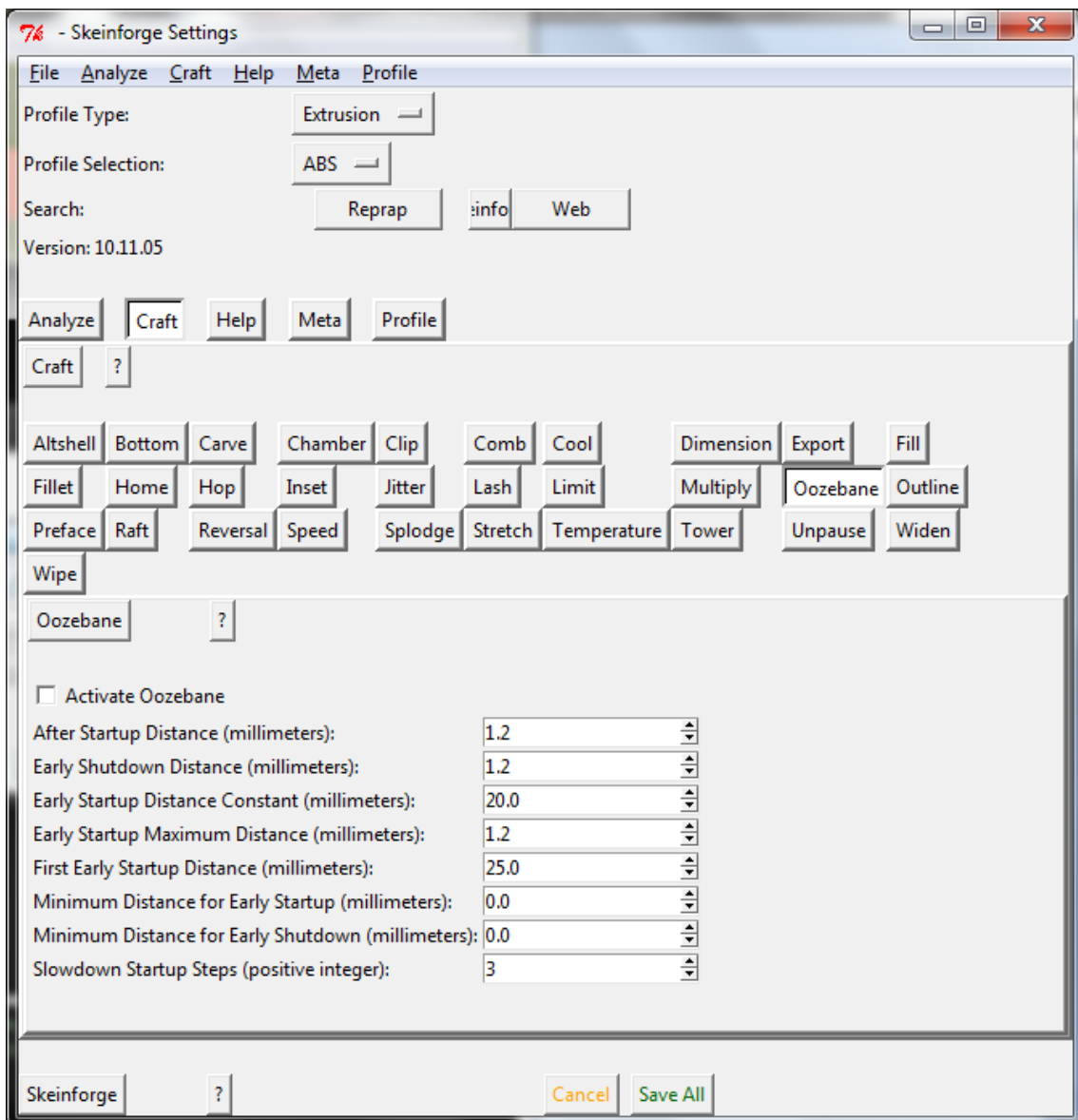
Activate Reversal -kohta aktiiviseksi. Tällä toiminnolla saadaan poistettua ruis-kuun vaikuttava paine riittävän ajoissa, jolloin pursotus loppuu ennen vapaalle liikeradalle siirtymistä. Asetuksista voidaan säätää pursotuksen nopeutta, peruutusajankohtaa sekä käynnistysajankohtaa.



KUVA 12. Skeinforge Reversal -asetukset

Pursottimen nopeutta säädellään G-koodissa komennolla M108 ja sen jälkeen asetetaan nopeus komennolla Sxxx, jossa xxx tarkoittaa numeroa väliltä 0 ja 255. Reversal-toimintoa käytettäessä S-kirjain muuttuu koodissa R-kirjaimeksi, eikä kyseinen tulostinmalli osaa lukea tätä käskyä. Tämä voidaan helposti muuttaa takaisin Notepad-tekstinkäsittelyohjelmalla etsimällä kaikki merkkijonot M108 R ja korvaamalla ne vastaamaan merkkijonoa M108 S.

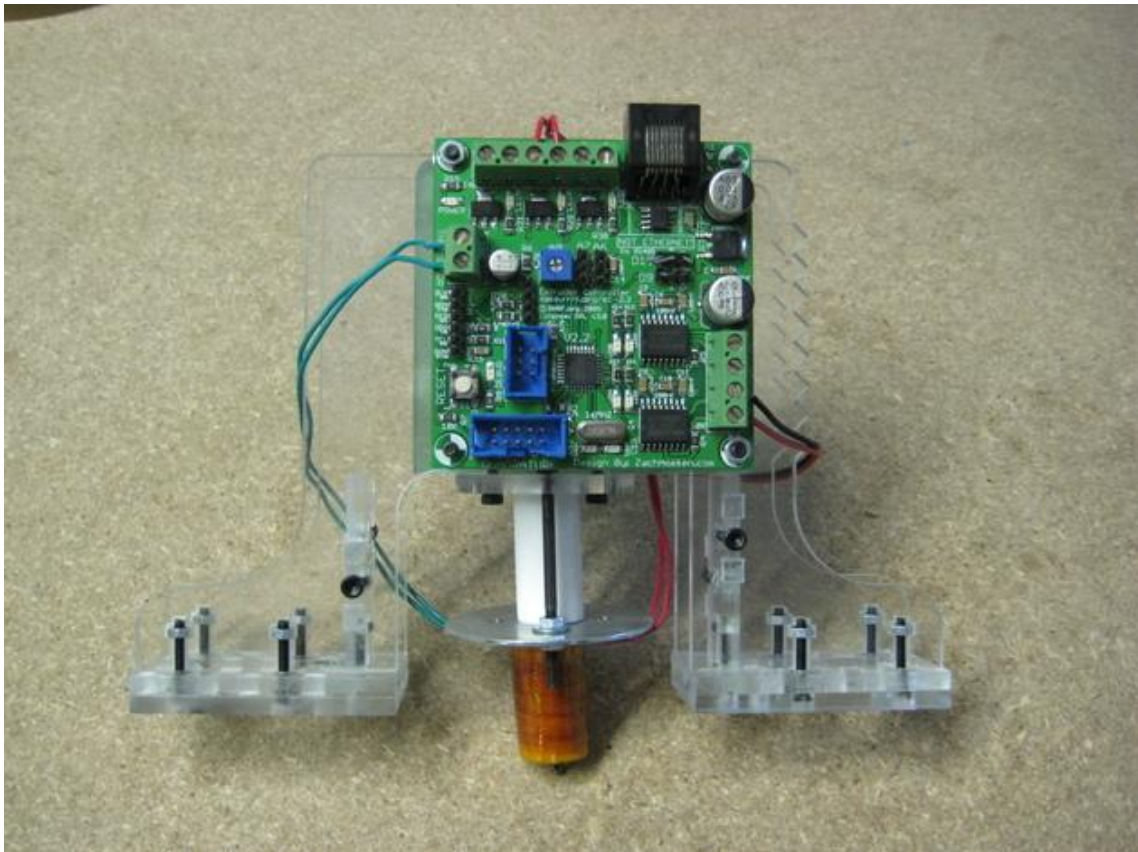
Oozebane-asetuksista voidaan muokata pursotuksen liikkeitä mutkissa (kuva 13). Toiminto saadaan päälle asettamalla Activate Oozebane -kohta aktiiviseksi. Asetuksista voidaan säätää liikkeiden nopeutta ennen ja jälkeen mutkia.



KUVA 13. Skeinforge Oozebane -asetukset

5 PURSOTUSPÄÄ

MakerBot Cupcake CNC -tulostimessa ollut vanha pursotuspää Plastruder MK4 syöttää sulatettua muovilankaa, joka tulostetaan tulostusalustalle (kuva 14). Pursotinpäähän sisältyy DC-moottori, lämmitin, lämpöanturi ja ohjainkortti.



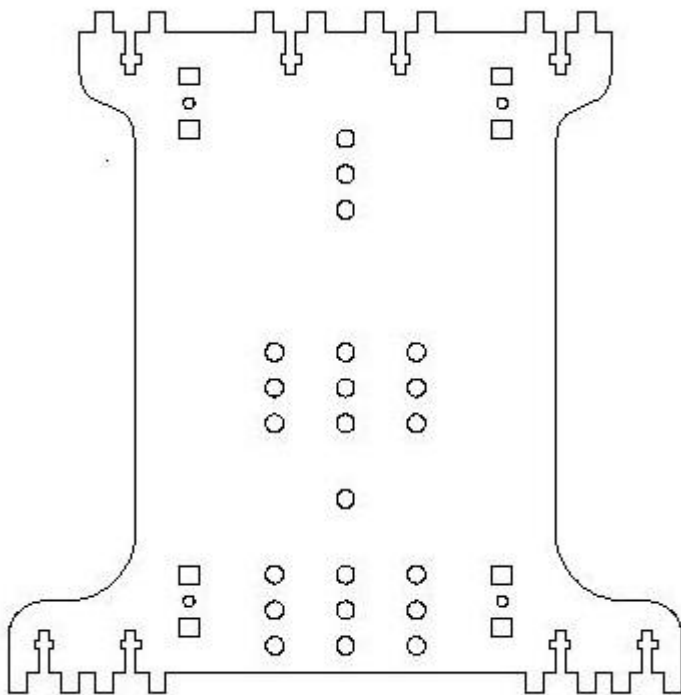
KUVA 14. Plastruder MK4 (16)

Vanhasta pursotuspäästä otettiin talteen Extruder Controller v.2.2 -ohjainkortti, joka päivitettiin ReplicatorG-ohjelman avulla askelmoottoriohjaukseen sopivaksi. Ohjelmistopäivitys käsitellään luvussa 6.1.

Uusi pursotin sisältää 20 ml:n lääkeruiskun ja askelmoottorin, joka työntää lääkeruiskun mäntää sisäänpäin (kuva 19). Pursottimelle suunniteltiin uudet osat pitämään ruiskua paikoillaan.

5.1 Osat

Uuden pursottimen rungon suunnittelussa käytettiin samantyylistä ratkaisua, kuin edellisessä pursottimessa oli käytetty (16). Materiaalina käytettiin 5,7 mm:n paksuista pleksiä. Osat suunniteltiin CAD-ohjelman avulla, ja suunnitelmat tallennettiin DWG-tiedostoksi. Tiedoston avulla voitiin leikata tarvittavat osat Oulun ammattikorkeakoulun vesileikkurilla. Vesileikkurin kalibrointi oli vielä kesken, jolloin osista tuli hieman epätarkat. Kuvassa 15 näkyy suunniteltu pursottimen takaseinä. Osien kuvat on esitetty liitteessä 3.

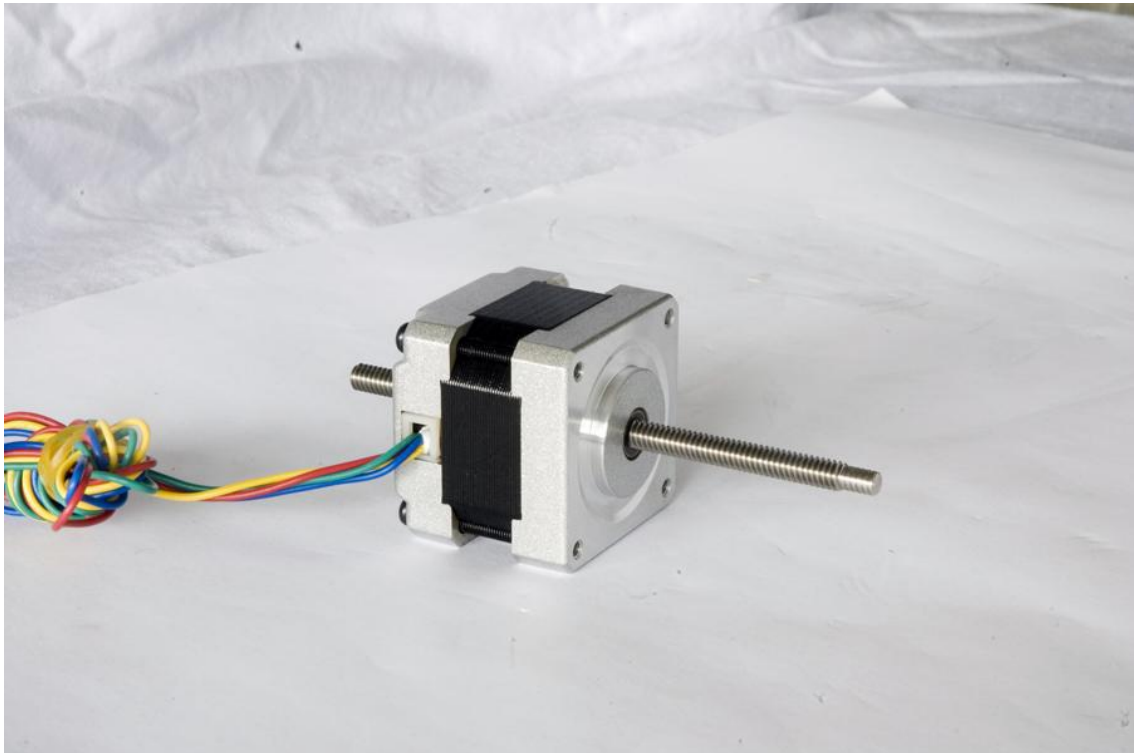


KUVA 15. Pursottimen takaseinä

5.2 Moottori

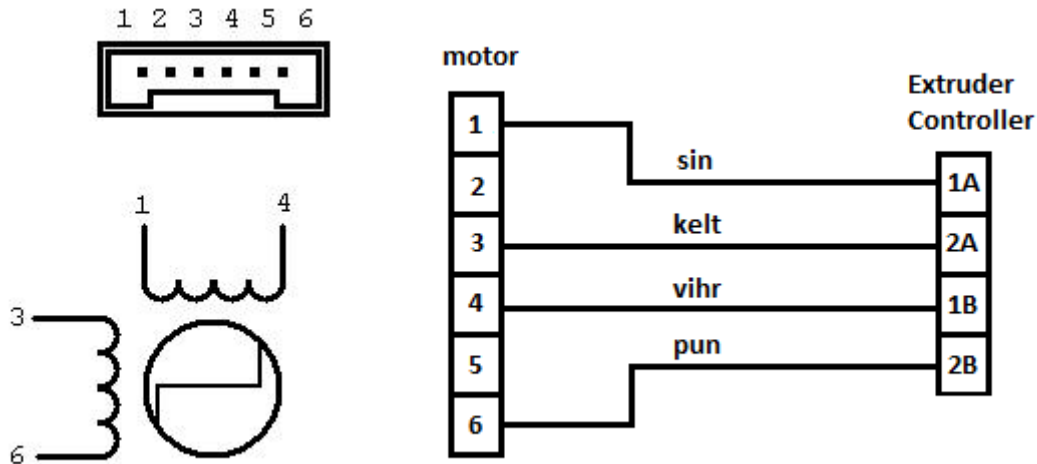
Moottorina käytettiin askelmoottoria, mikä mahdollistaa erittäin tarkan työskentelyn. Askelmoottori pyöri nimensä mukaisesti askel kerrallaan staattorikäämien napaisuutta vaihdettaessa. Askelmoottori tarvitsee ohjainkortin, joka suorittaa askelluksen. Tässä työssä askelmoottorin ohjauksen suorittaa vanha pursotinohjainkortti.

Pursottimessa käytettiin non-captive-tyyppistä moottoria (kuva 16), jossa akseli pääsee kulkemaan moottorin läpi. Yleisempi käytäntö on, että moottori pyörittää trapetsiruuvia ja trapetsimutteri aiheuttaa lineaariliikkeen. Tässä tapauksessa trapetsimutteri sijaitsee moottorin sisällä, jolloin moottorin pyöritäessä trapetsimutteria saadaan trapetsiruuvi, eli moottorin akseli, työntymään eteenpäin (17). Moottori ei tuota trapetsiruuville lainkaan kiertoliikettä vaan työntövoimaa. Trapetsiruuvi on kuitenkin lukittava, ettei se pääse pyörimään trapetsimutterin mukana. Moottorin tekniset tiedot on esitetty liitteessä 4.



KUVA 16. Non-captive askelmoottori

Moottorin akseli työntää suoraan lääkeruiskun mäntää, jolloin lineaarijohteita ei tarvita lainkaan. Moottori kytkettiin pursotinohjainkortin liittimiin 1A, 1B, 2A ja 2B. Valmistajan teknisissä tiedoissa moottorin kytkentäkuvassa oli virhe. Oikea kytkentä näkyy kuvassa 17.



KUVA 17. Askelmoottorin kytkentäkaavio

Ennen moottorin tilausta selvitettiin, riittääkö kyseisen moottorin voima pursotukseen. Mitattiin puristusvoiman tarvetta, kun materiaalina toimi rakennussilikon. Kaavan 1 avulla saadaan laskettua tarvittava työntövoima.

$$F = mg$$

KAAVA 1

missä

- F on voima,
- m kappaleen massa ja
- g maan vetovoiman kiihtyvyys.

Moottorin vääntömomentin tarve saadaan sijoittamalla Mekanexin tekemään ohjelmaan (18) lineaarivoima F , kierteen nousu p ja hyötysuhde.

Mitattiin pursotusvoiman tarve lisäämällä painoja kohtisuorassa asennossa olleen ruiskun männän päälle. Kaksi kilogrammaa riitti pursottamaan silikonia ja kolmen kilogramman painolla silikonia tuli riittävällä vauhdilla. Sijoittamalla kaa-

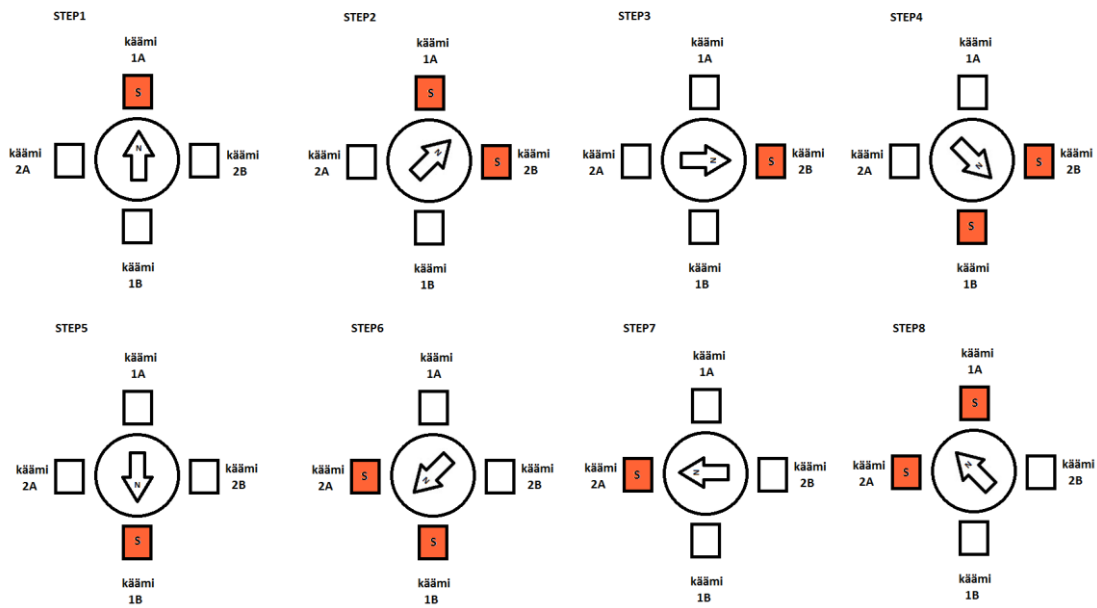
vaan 1 kappaleen massa m ja maan vetovoiman kiihtyvyys g saadaan voimaksi F 30 N, joka on ruiskun työntämiseen tarvittava puristusvoima.

Laskettiin Mekanexin tekemän ohjelman (18) avulla moottorin vääntömomentin tarpeen, kun tarvittava lineaarivoima on 30 N. Ohjelma vaati myös moottorin akselin kierteen nousun 1,0 mm (M5) ja hyötysuhteen, jonka arvioitiin olevan 0,2. Laskurin avulla saatiin tarvittavaksi vääntömomentiksi 0,02 Nm. Valittu askelmoottorin voima riittää pursotukseen todella hyvin, sillä moottorin vääntömomentiksi on ilmoitettu 0,21 Nm.

Moottorin tuottama työntövoima riittäisi hyvin myös paljon suuremman ruiskun käyttöön. Tällä saataisiin suurennettua yhden tulostuskerran aineen määrää. Askelmoottori on myös riittävän tarkka suuremmallekin mäntäkoolle.

5.3 Askelmoottorihjaus

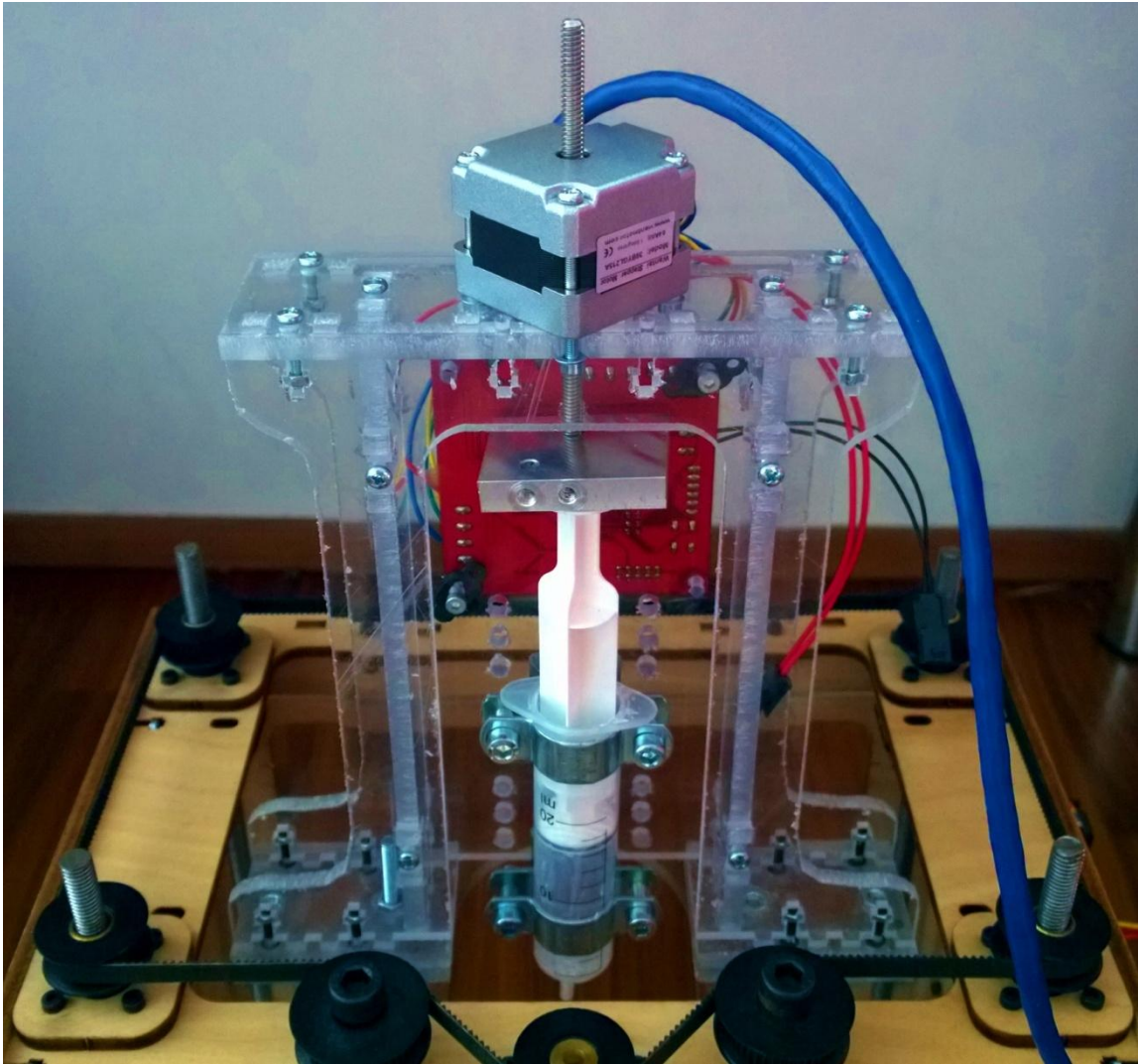
Pursotinhjainkortti Extruder Controller v2.2 päivitettiin versioon 2.3 release 3 w/ stepper support (beta) (ks. luku 6.1). Tämä versio sisältää askelmoottorihjauksen puoliaskelluksella. Puoliaskellus toteutetaan lisäämällä kahden askelen väliin askel, jossa pidetään kahden vierekkäisen käämin jännitettä yhtä aikaa päällä. Tällöin roottori sijoittuu kahden käämin väliin. Kuvassa 18 on esitetty askelmoottorin puoliaskellusperiaate.



KUVA 18. Askelmootorin puoliaskellusperiaate

5.4 Pursotuspään kokoaminen

Pursotuspään kokoaminen vei paljon aikaa, sillä vesileikkurin jälki oli epätasainen, eivätkä osat sopineet toisiinsa suoraan, vaan niitä piti työstää lisää. Mootorin asentoa käännettiin 45 astetta, sillä kiinnitys jouduttiin tekemään alhaalta päin. Ruiskun kiinnitykseen käytettiin KOPI Pk 20 -putkikiinnikettä. Kokoamisen jälkeen pursotuspää kiinnitettiin tulostimeen ja kytkettiin RepRap Motherboardiin ethernet-kaapelilla. Kuvassa 19 näkyy uusi pursotuspää kokonaisuudessaan.



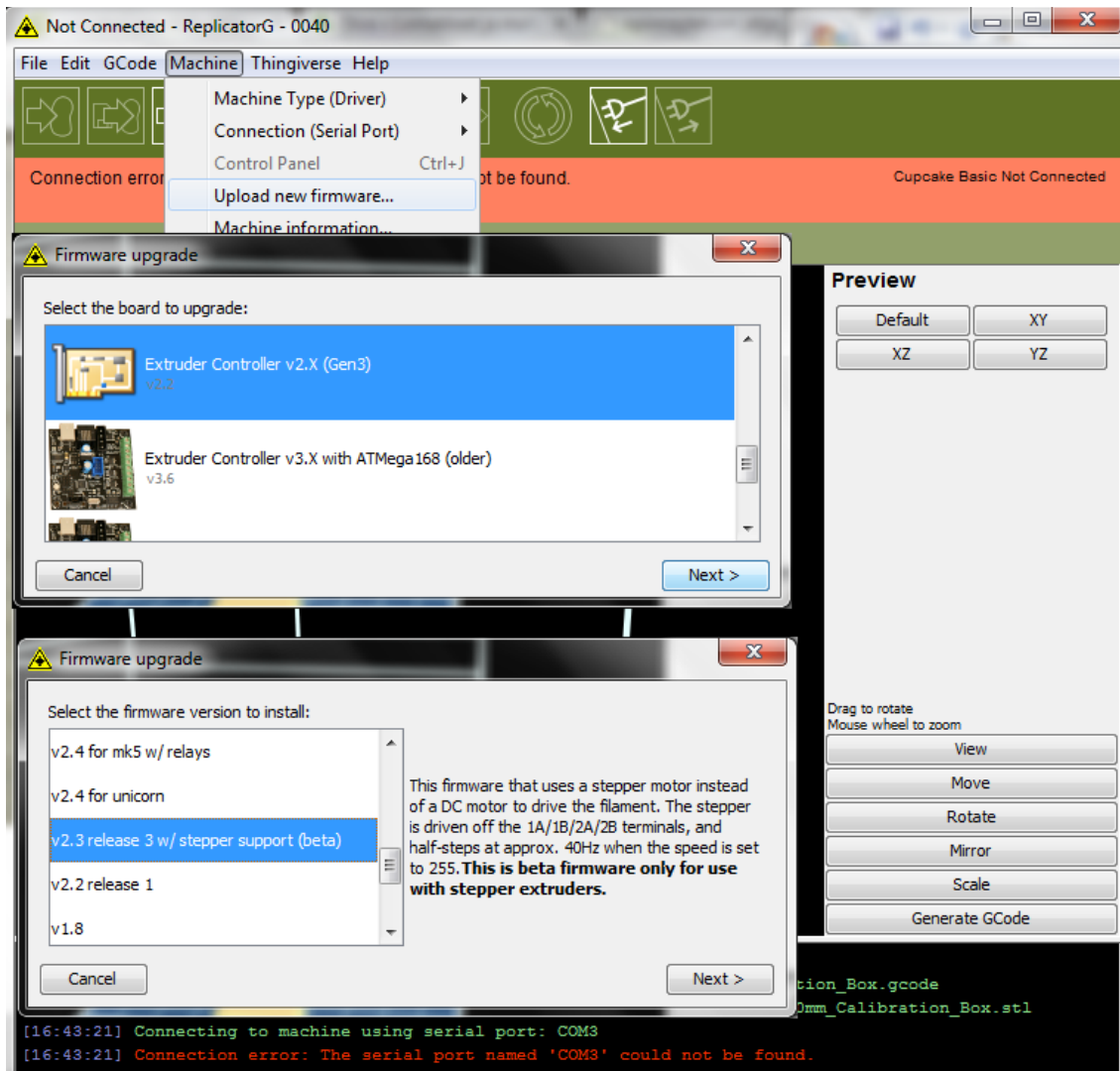
KUVA 19. Uusi pursotuspää

6 OHJELMOINTI

6.1 Ohjelmistopäivitys

Extruder Controller v.2.2 -ohjainkortti päivitettiin askelmoottorille sopivaksi. Ohjainkortti oli suunniteltu siten, että korttia voidaan käyttää sekä tasajännite- että askelmoottorihjaukseen. Firmware-päivitys suoritettiin siihen tarkoitukseen soveltuvalla ReplicatorG-ohjelmalla. ReplicatorG-ohjelmasta valitaan valikosta Machine -> Upload new firmware. Valitaan päivitettävän kortin tyyppi ja haluttu versio. Ennen pursotuspään ohjainkortin päivitystä päivitettiin RepRap Motherboard v1.2 (Gen3) versioon 2.4. Päivityksen aikana tulostimen Motherboard täytyy olla kiinnitettynä tietokoneeseen. Reset-näppäintä painetaan samanaikaisesti, kun päivitys käynnistetään.

Pursotinojainkortin päivitys tapahtuu vastaavanlaisesti, mutta usb-kaapeli liitetään Extruder Controller v.2.2 -ohjainkortin TTL-liittimeen. Extruder Controller v2.2 (Gen3) -ohjainkortti päivitettiin versioon 2.3 release 3 w/ stepper support (beta) (kuva 20). Laitteille oli myös uudempia versioita saatavilla, mutta niiden päivitys olisi vaatinut muutoksia myös elektroniikkaan.



KUVA 20. Extruder Controllerin päivitysnäytöt

6.2 Koeajo

Kokoamisen jälkeen suoritettiin koeajo. Ruisku täytettiin silikonilla ja ajettiin ReplicatorG-ohjelmalla tulostinta manuaalisesti. Moottorin koeajo sujui odotusten mukaisesti, sillä moottorin nopeus ja voima riittivät hyvin pursotukseen.

Koeajossa huomattiin, että moottorin nopeusalue on juuri oikea, kun pursotuspäässä käytetään 20 ml:n ruiskua. Ruiskun vaihdon yhteydessä täytyy akseli ajaa päästä päähän, jolloin tarvitaan kuitenkin suurempaa nopeutta. Nopeuden muuttamiseen tulisi päästä muuttamaan pursotinohjainkortin ohjelmiston koodia. Tässä työssä akseli ajettiin päästä päähän pyörittämällä akselia käsin.

6.3 Kalibrointi

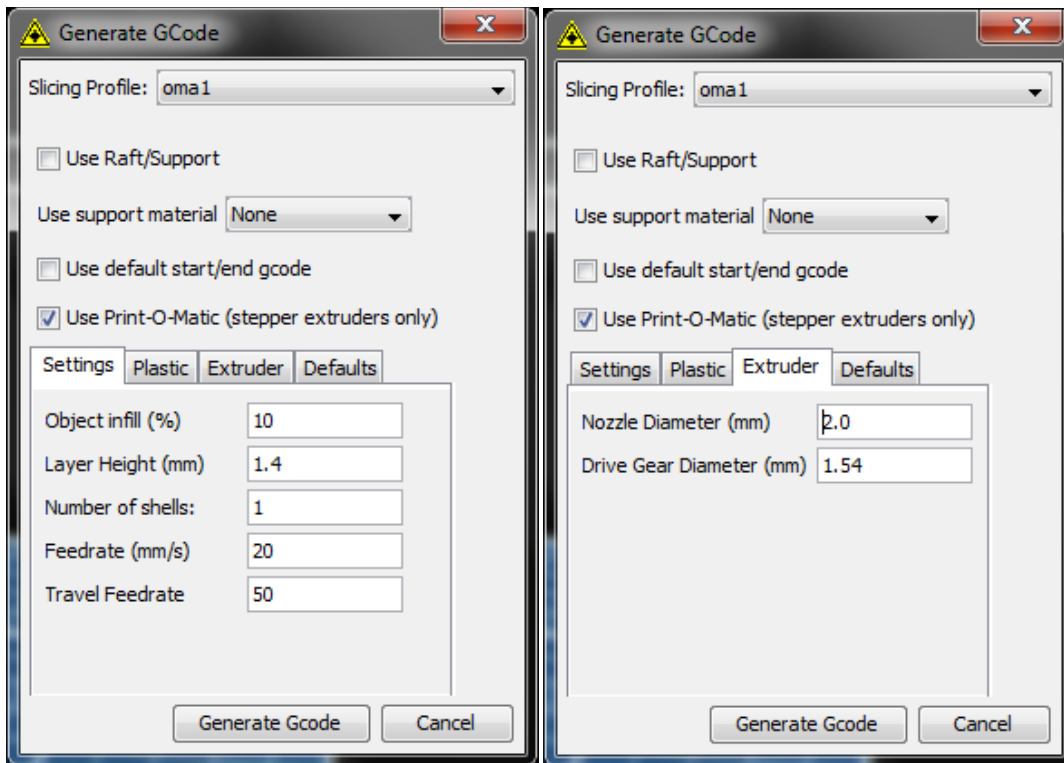
Ennen kalibrointia tehtiin ReplicatorG-ohjelmalla oma Skeinforge-profiili välilehdestä GCode -> Edit Slicing Profiles -> SF35-cupcake-ABP -> Duplicate. Profiili sijoitettiin ReplicatorG-ohjelman tiedostopolkuun ...\\ReplicatorG\\replicatorg-0040\\skein_engines\\skeinforge-35\\skeinforge_application\\prefs\\, jotta sitä voitiin muokata ReplicatorG-ohjelmalla. Profiili luotiin vastaamaan Slicing-Profilea SF35-cupcake-ABP, jolla tulostin toimi hyvin.

6.3.1 Aloitus- ja lopetuskoodi

Laitteen kalibrointi aloitettiin aloitus- ja lopetuskodein muokkaamisella. Nämä koodit määrittävät, kuinka tulostin toimii aloituksessa ja lopetuksessa. Koodit sijaitsevat ReplicatorG-ohjelman tiedostopolussa ...\\ReplicatorG\\replicatorg-0040\\skein_engines\\skeinforge-35\\skeinforge_application\\prefs\\oma1\\alterations. Poistettiin koodeista pursottimen lämmitykseen viittaavat rivit ja lisättiin muutama vaihe pursottimen puhdistamiselle. Aloituskoodi on esitetty liitteessä 5 ja lopetuskoodi on esitetty liitteessä 6.

6.3.2 Skeinforge-asetukset

Kalibroimiseen käytettiin valmista stl-mallia (20mm_Calibration_box.stl), joka löytyy RepligatorG-ohjelman esimerkit-valikosta. Tarkat Skeinforge-asetukset löytyvät valikosta GCode -> Edit Slicing Profiles, mutta niitä ei muokattu kalibroinnin yhteydessä. 3D-mallista saadaan luotua G-koodi painamalla Generate Gcode -näppäintä. Ennen G-koodin generointia tulee näytölle ikkuna, josta voidaan muokata muutamia G-koodin asetuksia. Kuvassa 21 näkyvät asetukset, joilla saatiin tulostettua riittävän hyvää jälkeä.



KUVA 21. G-koodin asetukset

Vanhan pursotuspään moottori vaihdettiin askelmoottoriksi, joten Use Print-O-Matic -valinnan avulla saadut lisäasetukset voitiin ottaa käyttöön. Asetuksista tärkeimpiä ovat kerrospaksuus, liikenopeusnopeus, matkanopeus, pursotuspaksuus ja nopeuden välitys. Feedrate-asetus muuttaa sekä pursotusnopeutta että liikeratojen nopeutta. Muuttamalla Drive Gear Diameter -asetusta saadaan muutettua liikenopeuden ja pursotusnopeuden suhdetta.

7 MATERIAALIEN TESTAUS

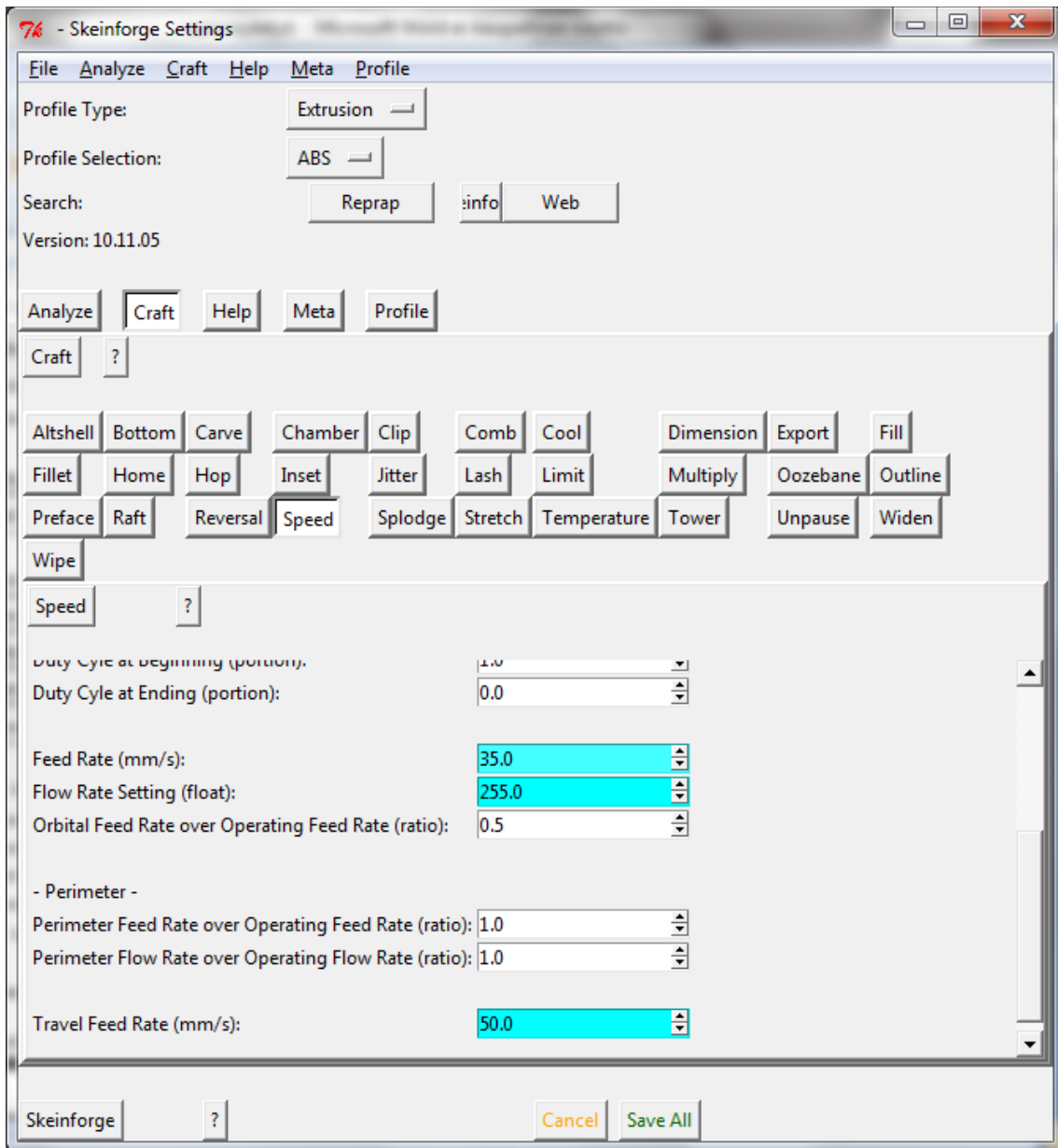
Työssä tulostusmateriaaleina toimi rakennussilikoni, korjausmassa Sugru ja muovailumassa Krea. Työssä tutkittiin eri materiaalien viskositeetin muutoksen vaikutusta tulostukseen, joten kyseiset aineet sopivat hyvin testeihin, sillä aineet ovat viskositeetiltään ja rakenteeltaan hieman erilaisia. Rakennussilikoni valittiin testeihin, sillä työn alussa arvioitiin, että silikonimainen aine voisi toimia hyvin tulostuksessa. Muovailumassa Krea valittiin testeihin, koska aineen viskositeettia voidaan muuttaa sekoittamalla siihen vettä ja aine voidaan kovettaa huoneenlämmössä. Sugru valittiin testausmateriaaliksi sen monipuolisten ominaisuuksien takia.

7.1 Tulostusasetukset

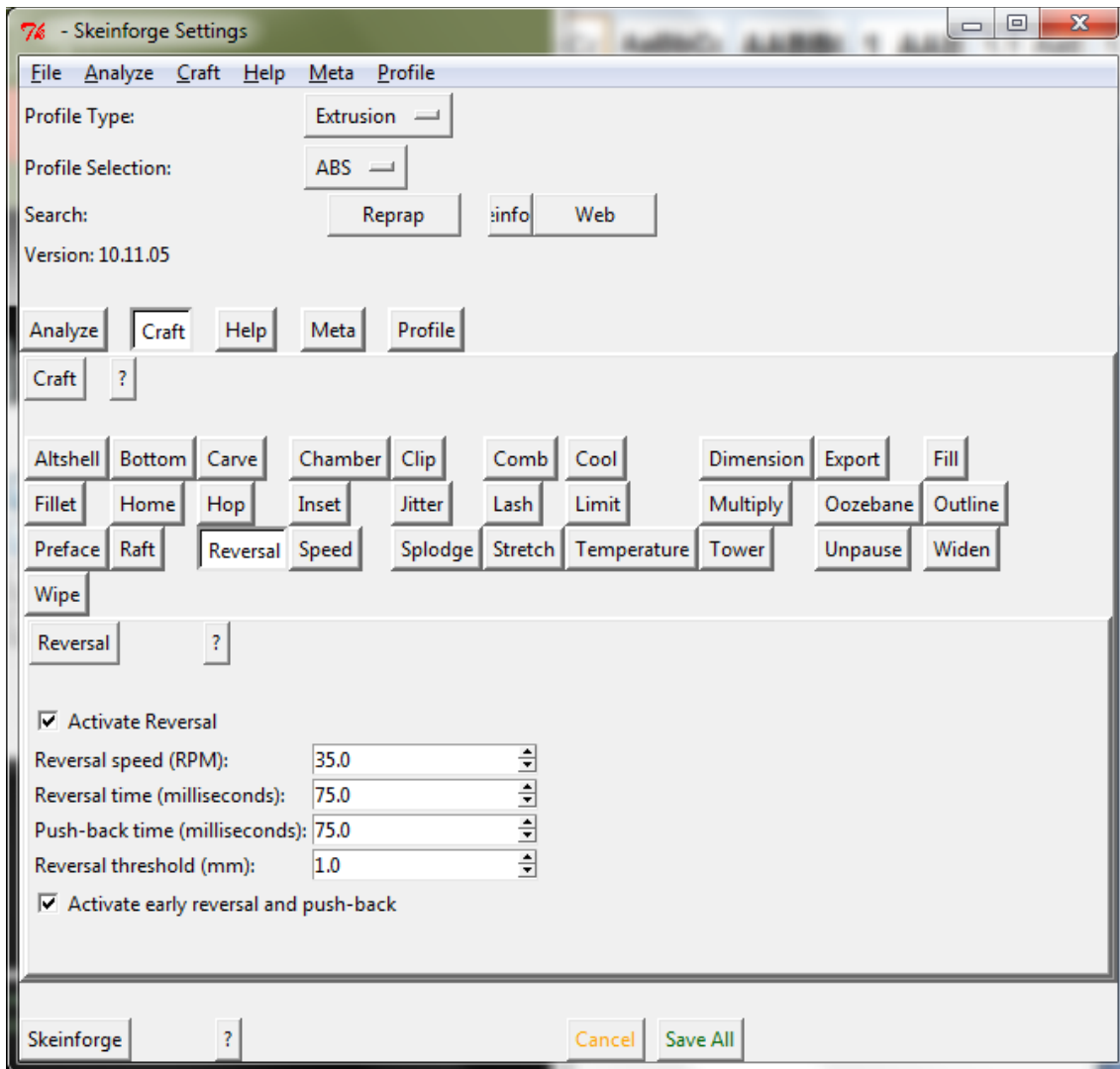
Testeissä käytettiin kahta erilaista kappaletta, jotka nimettiin kappaleeksi 1 ja kappaleeksi 2. Kappaleena 1 käytettiin ReplicatorG-ohjelman esimerkkivalikossa olevaa 20_mm_calibration_box.stl-mallia. Kappaleen 1 avulla testattiin kuinka tulostus toimii kiinteissä esineissä. Kappaleena 2 käytettiin osoitteessa <http://www.thingiverse.com/thing:73532/#files> olevaa Boxx_Insert_v2_2x2.stl-mallia, jota skaalattiin ReplicatorG-ohjelmalla kertoimella 0,3. Kappaleen 2 avulla testattiin kuinka tulostus toimii korkeissa seinissä.

Materiaalin testauksessa käytettiin seuraavia asetuksia, joita muokattiin alkuperäisestä:

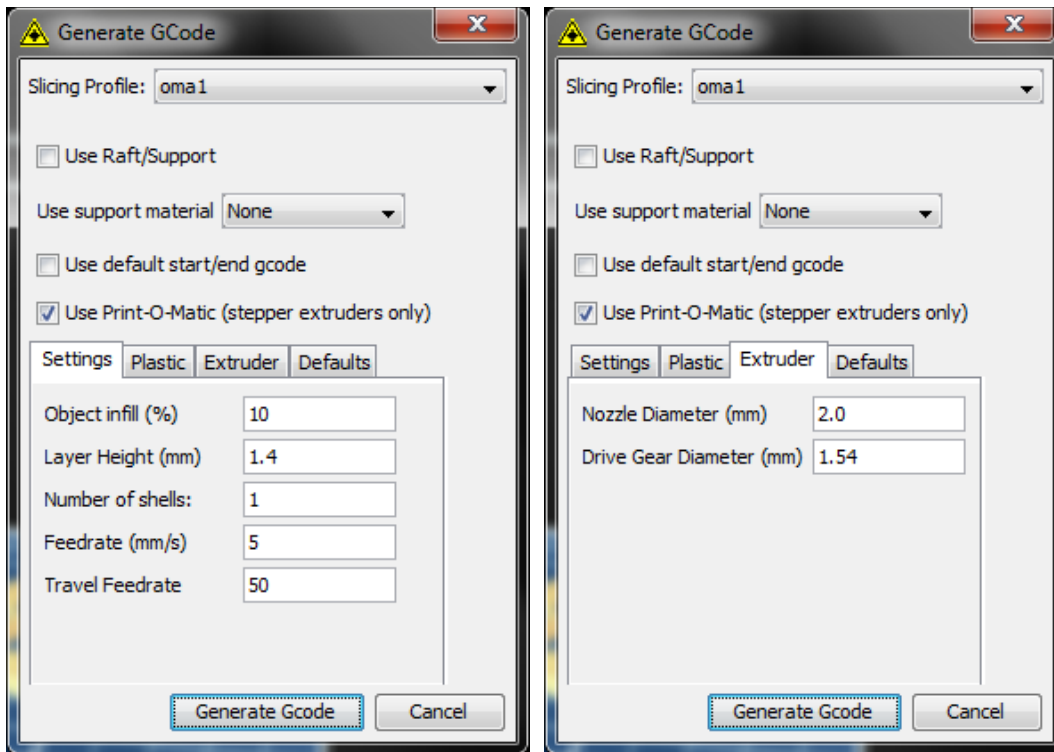
- Skeinforge Speed (kuva 22)
- Skeinforge Reversal (kuva 23)
- GCode (kuva 24).



KUVA 22. Skeinforge Speed -asetukset



KUVA 23. Skeinforge Reversal -asetukset



KUVA 24. GCode-asetukset

7.2 Silikoni

Rakennussilikonilla suoritettiin laitteen kalibrointi ja ensimmäiset testaukset. Silikoni on rautakaupasta ostettu rakennussilikoni, joka on hyvin juoksevaa materiaalia (kuva 25).



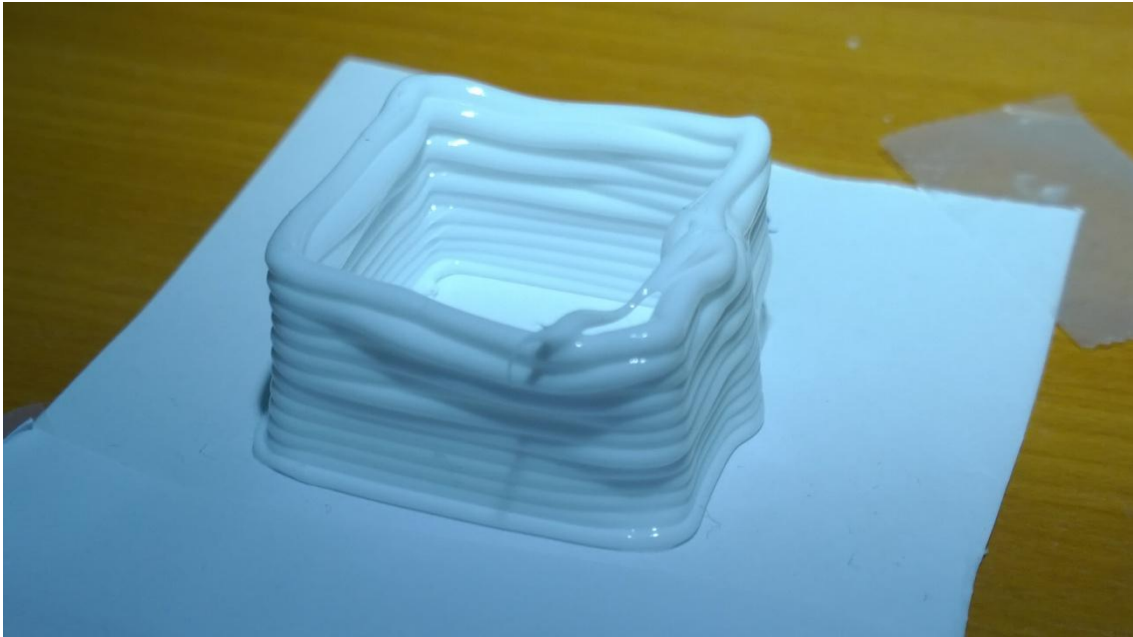
KUVA 25. Rakennussilikoni

Silikoni toimi erittäin hyvin pienten esineiden tulostuksessa. Sen ongelmaksi muodostui pitkä kuivumisaika, joka aiheutti rakenteen lyyhistymisen korkeaa kappaletta tulostettaessa. Pienten taukojen avulla silikonista saadaan tulostettua korkeampia esineitä. Silikonin notkeuden takia sitä ei voida tulostaa lainkaan tyhjän päälle, eikä sitä kuivumisen jälkeen voida irrottaa tulostusalustana olevasta paperista. Kuivumisen jälkeen silikonin on erittäin joustavaa ja palauttaa muotonsa aina takaisin. Kappaleen 1 (kuva 26) tulostuksessa huomattiin, että silikonin toimii erittäin hyvin kiinteän kappaleen tulostamiseen.



KUVA 26. Kappale 1

Kappaleen 2 (kuva 27) tulostamisessa huomattiin, ettei silikonin voida tulostaa korkeita kerroksia päällekkäin ilman tukirakenteita. Muutama kerros meni hyvin, mutta korkeimmat kerrokset alkoivat jo painua kasaan.



KUVA 27. Kappale 2

7.3 Korjausmassa Sugru

Sugru on käsin muovailtava kiinnitys- ja korjausmassa, joka on kehitelty korvaamaan ilmastointiteippi, nippusiteet, rautalanka ja muut korjausvälineet (kuva 28). Se on massa, joka kovettuu vuorokaudessa erittäin kestäväksi ja joustavaksi aineeksi. (19.)



KUVA 28. Korjausmassa Sugrun tuotepakkaus

Sugrulla tulostaminen oli vaikeaa. Sen viskositeetti oli liian suuri, jolloin puristusvoimaa tarvittiin todella paljon. Sugru ei myöskään kiinnittynyt kunnolla edelliseen kerrokseen.

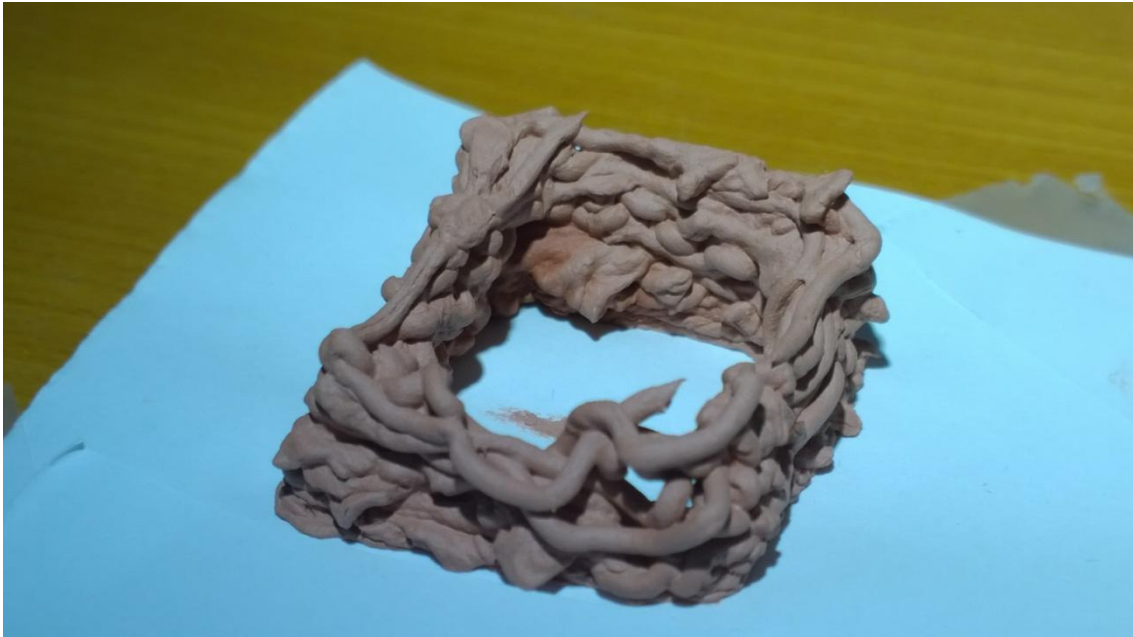
7.4 Muovailumassa Krea

Muovailumassa Krea (kuva 29) on ilmassa kuivuvaa massaa, jota käytetään askartelussa. Se on muovailuvahan tyylistä ja kovettumisen jälkeen samanlaista kuin savi.



KUVA 29. Muovailumassa Krea

Kreaa ei voitu pursottaa sellaisenaan, vaan siitä tehtiin juoksevampaa lisäämällä massaan vettä. Ensimmäinen seos sekoitettiin liian epätasaisesti, jolloin aine pursottui vaihtelevalla nopeudella. Tiiviimpää materiaalia pursottaessa ruiskuun kertyi painetta ja aineen muuttuessa juoksevammaksi materiaali purkautui ruiskusta todella nopeasti (kuva 30). Testeissä Kreaan sekoitettiin vettä seossuhteella 3:1 eli 3 osaa Kreaa ja 1 osa vettä. Pursotuksessa on mahdollista käyttää myös vähemmän vettä, jolloin pystytään tulostamaan korkeampia esineitä.



KUVA 30. Ensimmäinen testi Krealla

Edellisestä kokeesta viisastuneena laitettiin Krea-massa isoon Minigrip-pussiin ja vesi sekoitettiin aineeseen painelemalla seosta pussin läpi. Tällä menetelmällä aineesta saatiin riittävän tasalaatuista. Kappaleen 1 tulostus onnistui todella hyvin, ja tuloksena saatiin suhteellisen tasalaatuinen ja kova savea muistuttava kappale (kuva 31).



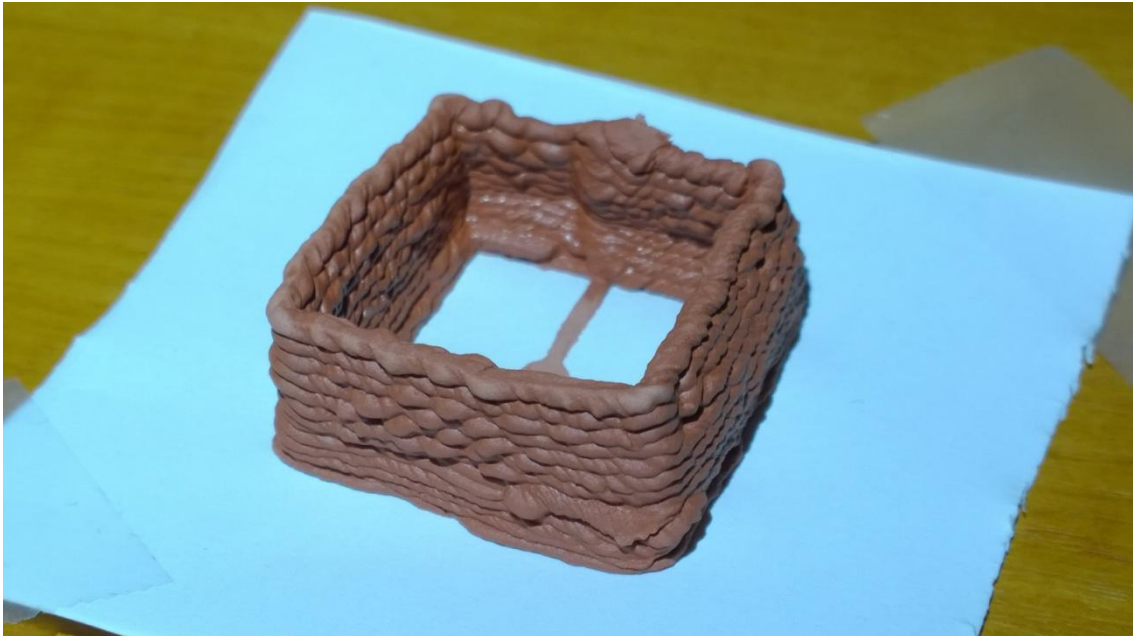
KUVA 31. Kappale 1

Kappaleen 2 tulostus onnistui hyvin ja jälki näytti lupaavalta, mutta hetki tulostuksen jälkeen kappale lyyhistyi kokoon (kuva 32). Kappaleen lyyhistymiseen voi vaikuttaa myös testipäivänä vaikuttava painostava ukonilma.



KUVA 32. Kappale 2

Kappaleen 2 tulostus uusittiin ja tulostettavaa kappaletta lämmitettiin hiustenkuivaajalla tulostuksen aikana ja tulostuksen jälkeen. Lämmin ilma nopeutti kappaleen kuivumista ja saatiin aikaan ehjä kappale. Kuvassa 33 näkyy, kuinka kappaleen lämmittäminen paransi tulosta.



KUVA 33. Kappale 2, jonka kuivumista autettiin lämmittämällä

Muovailumassa toimi tulostusmateriaalina hyvin kiinteitä kappaleita tulostettaessa, mutta kapeat seinämät eivät pysyneet riittävän pitkään kasassa. Jos kuivumisaikaa saataisiin nopeutettua tai massan viskositeettiä lisättyä, voitaisiin muovailumassa Krealla tulostaa vakuuttavia koriste-esineitä. Kuivumisen jälkeen massa lähti helposti irti tulostuspaperista.

7.5 Muita havaintoja

Materiaalin testauksessa huomattiin, että ruiskuun jää helposti ilmaa. Ruiskussa oleva ilma huonontaa tulostustarkkuutta puristuessaan enemmän kasaan kuin tulostettava materiaali. Jos mahdollista, niin ruiskun täyttö tulisi suorittaa imeväällä ainetta ruiskun kärjen kautta. Täyttö onnistuu myös jättämällä ilmarako pursottimen kärjestä mäntäosaan kuvan 34 mukaisesti.



KUVA 34. Ruiskun täyttö

8 PARANNUSEHDOTUKSIA

Työn aikana muodostui muutamia ideoita, jotka parantavat tulostimen toimintaa ja tulostuksen laatua:

1. Tulostimen liikkeessa vapaata liikerataa saattaa ruiskuun vaikuttava paine työntää tulostusainetta hallitsemattomasti tulostusalustalle ja pilata tulostuksen. Pursottimeen tulisi kehittää suutin, joka sulkeutuu, kun tulostin liikkuu vapaasti. Tämän voisi toteuttaa pienellä mekanismilla, joka solenoidin avulla työntyy ruiskun päälle. Solenoidia voisi liikuttaa samalla komennolla, jolla ennen on lämmitetty pursottimen päätä. G-koodiin täytyisi lisätä solenoidin käyttö aina, kun pursotus keskeytetään.
2. Ruiskun tilavuus loppuu nopeasti kesken, joten isompien kappaleiden tulostaminen ei onnistu. G-koodiin pitäisi lisätä automaattinen laskuri, joka laskee, milloin ruiskusta loppuu aine ja suoritetaan ruiskun vaihto.
3. Ruiskua vaihdettaessa pitäisi moottorin nopeutta saada säädelyä nopeammaksi. Tällä hetkellä ohjelma ajaa moottoria puoliaskelluksella, jota ei saada ajettua kuin 40 Hz:n askeltaajuudella. Nopeuden muuttaminen vaatii joko ohjainkortin ohjelmaan pääsyn, ulkoisen ohjauksen rakentamista tai ohjauselektronikan päivittämistä. Yksi vaihtoehto olisi päivittää laite 3G 5D Shield -versioksi (20).
4. Puristusvoimaa mittaamalla voidaan tunnistaa erilaisia materiaaleja. Mittaamisen avulla pursotuspää voisi automaattisesti säätää pursotuksen tarvetta.
5. Normaali lääkeruiskulla tulostettaessa tulostusjälki ei ole tasainen, sillä lääkeruiskun suuaukko on erittäin iso. Tulostusjälkeä voitaisiin parantaa käyttämällä erilaisia suuttimia.
6. Käyttämällä aineita, joita voidaan kovettaa koveteaineella, voidaan lyhentää kuivumisen aikaa. Tämä vaatisi kuitenkin erillisen järjestelmän rakentamista koveteaineelle.

9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia juoksevan materiaalin soveltuvuutta kolmiulotteiseen tulostukseen. Tutkimista varten kehitettiin MakerBot Cupcake CNC -tulostimeen laitteisto, jolla voidaan tulostaa juoksevaa materiaalia. Materiaalivalikoiman kasvaessa voidaan tulostimia käyttää useampaan eri käyttötarkoitukseen.

Työ aloitettiin tutustumalla eri materiaaleihin ja pohdittiin niiden soveltuvuutta tulostukseen. Kun todettiin silikonin ja saven soveltuvan hyvin tulostusmateriaaleiksi lääkeruiskun avulla, alettiin suunnitella uutta pursotuslaitteistoa. Mekaniikan suunnittelua helpotti non-captive-tyyppisen moottorin löytäminen, jonka ansiosta laitteeseen ei tarvinnut rakentaa muita liikkuvia osia. Laitteen runko suunniteltiin vanhojen osien tyyppisiksi.

Laitteiston kokoamisen jälkeen tutustuttiin ReplicatorG-ohjelmaan, G-koodiin ja Skeinforge-asetuksiin. Aluksi suunniteltiin, että muokattaisiin pursotusohjainkortin sisäistä ohjelmaa, jolloin G-koodiin ei tarvittaisi niin suuria muutoksia. Tutkimuksen jälkeen todettiin, että ohjelmiston muokkaaminen vaatisi liian suuren työn, joten tyydyttiin säätämään laite valmiilla ohjelmistoilla. Pursotin saatiin päivitettyä askelmoottorille sopivaksi, jolloin todettiin työn onnistuvan myös valmiilla ohjelmistoilla.

Päivityksen jälkeen aloitettiin pursotusasetusten testaaminen. Testauksen aikana tulostusmateriaalina toimi rakennussilikoni. Aluksi muutettiin G-koodin aloitus- ja lopetuskoodi vastaamaan uutta pursotuspäätä. Testauksessa käytiin läpi seuraavia asetuksia: tulostusnopeus, kerrospaksuus, tulostusleveys, pursotusnopeus, tulos- ja pursotusnopeuden suhde ja pursotuksen toiminta aloituksessa ja lopetuksessa. Kun oikeat asetukset löytyivät, testattiin eri materiaalin soveltuvuutta pursottimelle.

Työssä todettiin juoksevan materiaalin soveltuvan hyvin pikamallinnuksen tulostusaineeksi. Hyväksi materiaaliksi soveltuu silikonimainen juokseva materiaali, jonka pinta kovettuu suhteellisen nopeasti ja joka tarttuu edelliseen kerrokseen kiinni ja kykenee kantamaan riittävää kuormaa. Jatkokehityksen kannalta olisi tärkeää löytää materiaali, joka vastaa edellä mainittuihin vaatimuksiin. Hyvän

materiaalin löytyessä voitaisiin tulostinta käyttää todella monipuolisiin ratkaisuihin.

Työtä vaikeutti se, että MakerBot Cupcake CNC -tulostimen tiedot eivät olleet enää avoimesti saatavilla. Työn aikana löydettiin paljon eri ohjelmaversioita, mutta niiden soveltuvuudesta käytössä olevaan laitteeseen ei voitu olla varmoja, joten todettiin viisaimmaksi soveltaa valmiita ohjelmia mahdollisimman paljon. Jos vanhat ohjelmat löytyvät, niin parannusehdotuksien toteuttaminen helpottuu huomattavasti. Sovelluspäivitykseen ohjeet löytyvät RepRapin (21) ja MakerBotin (11) sivuilta.

Erilaisten aineiden tulostuksessa viskositeetin muutos ei vaikuttanut paljoa tulostuslaatuun, mutta aineen pitää olla tasalaatuista saman pursotuksen aikana. Eri viskositeetillä oleva materiaali saman ruiskun sisällä aiheuttaa painevaihtelua ruiskun eri osiin.

Tulostustarkkuutta haittasi suuri ruiskun suutinkoko. Pienemmällä suuttimella saataisiin paljon tarkempaa jälkeä, mutta kappaleiden seinän vahvuuden pitäisi kuitenkin pysyä riittävän suurena. Tulostustarkkuuden kasvaessa voitaisiin tulostaa monimutkaisempia kappaleita ja laatu paranisi.

Opinnäytetyö oli erittäin mielenkiintoinen ja opettava. Työtä tehdessä jouduttiin perehtymään CNC-koneen toimintamalliin, suunnittelemaan mekaniikkaa, tutustumaan uusiin ohjelmointikieliin sekä perehtymään erilaisiin materiaaleihin.

LÄHTEET

1. Kolmiulotteinen tulostus. 2014. Wikipedia. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Kolmiulotteinen_tulostus. Hakupäivä 26.5.2014.
2. Kirjalainen, Erkki 2012. MakerBot Replicator on yksi askel lähemmäs jokakodin 3D-tulostinta. Hilavitkutin. Saatavissa: <http://www.hilavitkutin.com/2012/01/16/>. Hakupäivä 27.5.2014.
3. Moilanen, Jani-Pekka 2012. Robotisoitu pikamallilaitte. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/45186>. Hakupäivä 10.6.2014.
4. R&D: Frostruder MK2. 2009. MakerBot. Saatavissa <http://www.makerbot.com/blog/2009/11/02/rd-frostruder-mk2/> Hakupäivä 2.6.2014.
5. Numeerinen ohjaus. 2014. Wikipedia. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Numeerinen_ohjaus. Hakupäivä 22.4.2014.
6. NC ohjelman rakenne ja NC koodit. 2001. Edu. Saatavissa: <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/nctekniikka/NCkoodit.html>. Hakupäivä 1.4.2014.
7. MakerBot Industries. 2014. Wikipedia. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/MakerBot_Industries Hakupäivä 28.3.2014.
8. Pakanen, Henri 2013. Pikamallinnustyökalu NC-työstökeskukseen. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/61835>. Hakupäivä 10.6.2014.
9. MakerBot on erittäin edullinen 3D- tulostin. 2010. Tekniikan maailma. Saatavissa: <http://tekniikanmaailma.fi/uutiset/makerbot-cupcake-cnc-edullinen-3d-tulostin>. Hakupäivä 10.5.2014.

10. MakerBot Cupcake CNC. 2012. MakerBot. Saatavissa:
<http://www.makerbot.com/> Hakupäivä 2.4.2014.
11. Makerbot Documentation Archive. 2012. MakerBot. Saatavissa:
<http://www.makerbot.com/support/archive/>. Hakupäivä 3.4.2014.
12. Generation 3 Electronics. 2012. RepRap. Saatavissa:
http://reprap.org/wiki/Generation_3_Electronics. Hakupäivä 3.4.2014.
13. CAD-mallista pikamalliksi. 2003. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/tekniikka/pikamallitekniikka/CAD- ja RP-tekniikka.php>. Hakupäivä 26.5.2014.
14. ReplicatorG. 2012. ReplicatorG. Saatavissa: <http://replicat.org/>. Hakupäivä 3.4.2014.
15. How to Makerbot Cupcake CNC. 2013. Vintage Makerbot. Sähköpostiryhmäviesti. Saatavissa: <https://groups.google.com/forum/#!topic/vintage-makerbot/FUj34e4406E>. Hakupäivä 4.4.2012.
16. Plastruder MK4. 2009. Thingiverse. Saatavissa:
<http://www.thingiverse.com/thing:964>. Hakupäivä 27.5.2014.
17. Stepper Motor ROB-10848. 2011. Sparkfun. Saatavissa:
<https://www.sparkfun.com/products/10848>. Hakupäivä 26.5.2014.
18. Vääntömomentin laskeminen ruuville. 2013. Mekanex. Saatavissa:
http://www.mekanex.se/ber/fi-vridmom_skruvdrift.shtml. Hakupäivä 16.4.2014.
19. Sugru korjausaine. 2013. Verkkokauppa.com. Saatavissa:
<http://www.verkkokauppa.com/fi/product/15416>. Hakupäivä 10.6.2014.
20. Rob Giseburt's 3g 5d Shield. 2011. MakerBot. Saatavissa:
<http://www.makerbot.com/blog/tag/3g-5d-shield/>. Hakupäivä. 27.5.2014.

21. Microcontroller firmware installation. 2013. RepRap. Saatavissa:
http://reprap.org/wiki/Microcontroller_firmware_installation. Hakupäivä
17.4.2014.

LIITTEET

Liite 1 Lähtötietomuistio

Liite 2 Laitetiedot

Liite 3 Pursottimen osat

Liite 4 Moottorin tekniset tiedot

Liite 5 Aloituskoodi

Liite 6 Lopetuskoodi



LÄHTÖTIETOMUISTIO

Työn tiedot	Tekijä ¹ Janne Terho	Tilaja ² Oamk / Konetekniikan osasto
	Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ³ Jari Viitala	
	Työn nimi ⁴ Nestemäisten materiaalien pursotus 3D-tulostimella	
	Työn kuvaus ⁵ Työssä tutkitaan ja toteutetaan nestemäisten materiaalien pursottamista 3D-tulostinta käyttäen. Olennaisena osana on laitteen soveltuminen erilaisen viskositeetin omaavien materiaalien pursottaminen. Ohjausteknisesti on otettava huomioon myös viskositeetin mahdollinen muuttuminen pursotuksen aikana. Sovelluskohteina ovat esimerkiksi poluretaanikumin, silikonin sekä erilaisten liimojen pursottaminen.	
	Työn tavoitteet ⁶ Erilaisten pursotettavaksi soveltuvien materiaalien tutkiminen. Pursotuslaitteiston prototyypin suunnittelu ja toteutus käytettäväksi Makerbot-pikamallilaitteella. Laitteen ohjauksen toteutus esimerkiksi arduino-mikrokontrollerilla sekä sen liittäminen osaksi pikamallilaitteen ohjauselektronikkaa ja ohjelmistoa.	
	Tavoiteaikataulu ⁷ Työ valmis 31.5.2014	
	Päiväys ja allekirjoitukset ⁸ 28.5.2014 Tekijän allekirjoitus  28.5.14 Tilaaajan allekirjoitus 	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite. 2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi. 3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta. 4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan. 5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat. 6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet. 7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa. 8. Lähtötietomuuistio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaaajan yhdyshenkilö 		

Laitetiedot:

Tulostin:

Makerbot cupcake CNC

moottorit:

Nema 17-askelmoottori

virtalähde:

400 W ATX

pääpiiri (Motherboard v1.2):

kortin tyyppi: atmega644p

pursotuspää :

plastruder MK 4

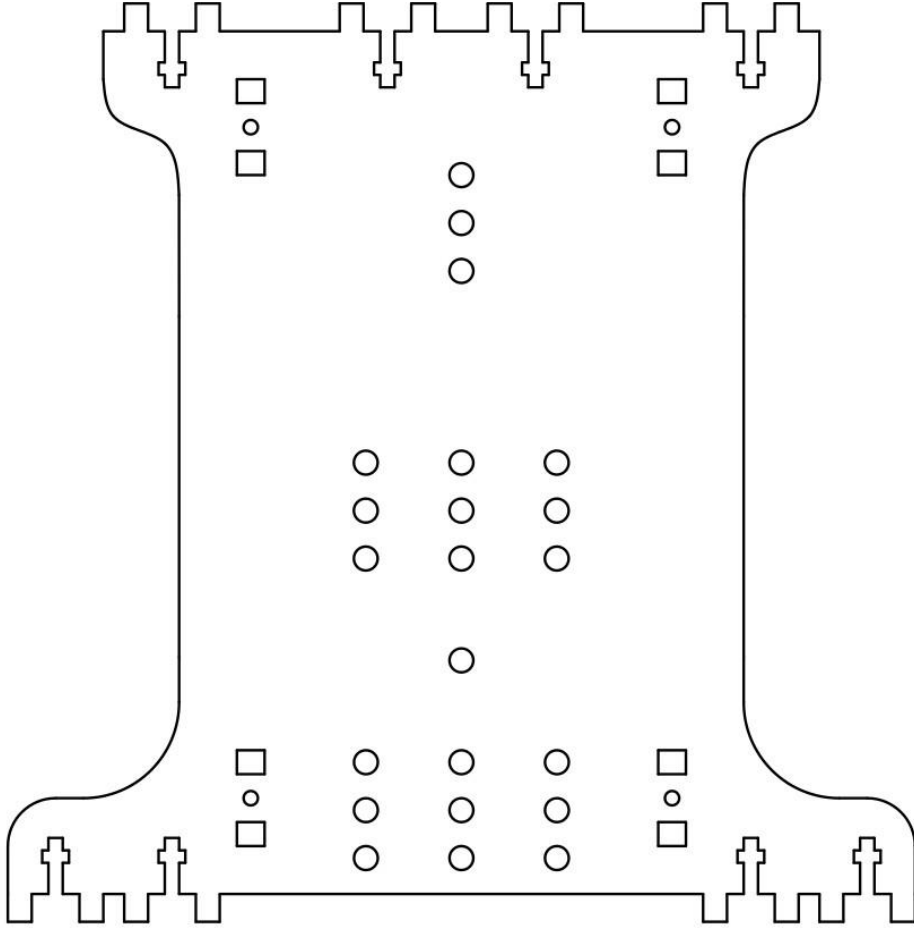

<http://www.thingiverse.com/thing:964>

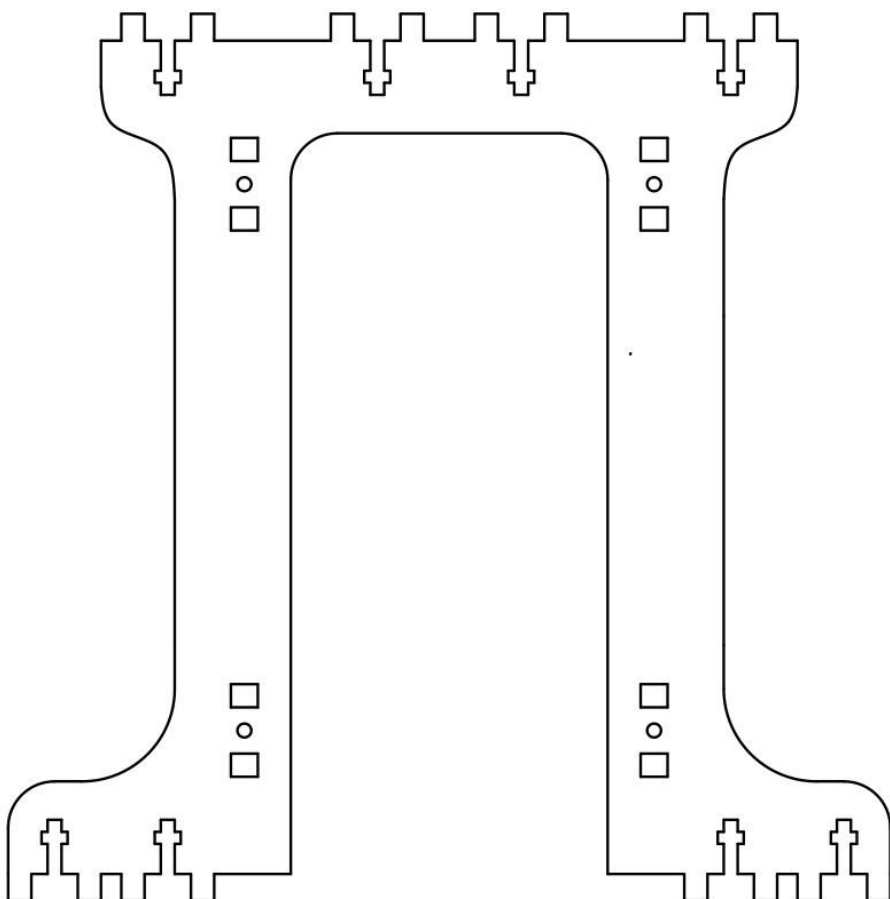

pursotusohjainkortti

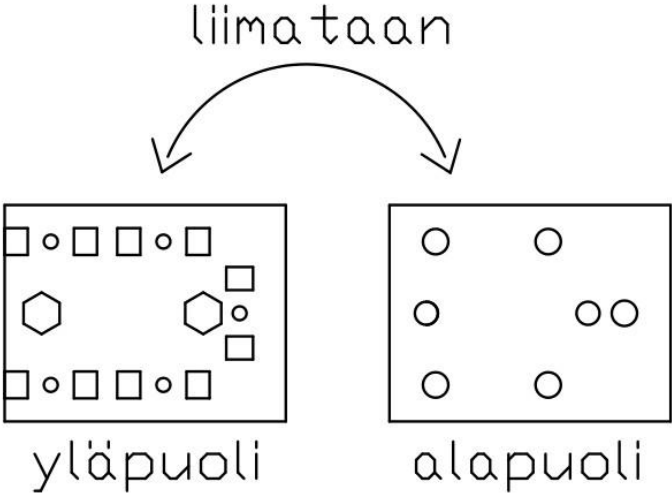

extruder controller v. 2.2

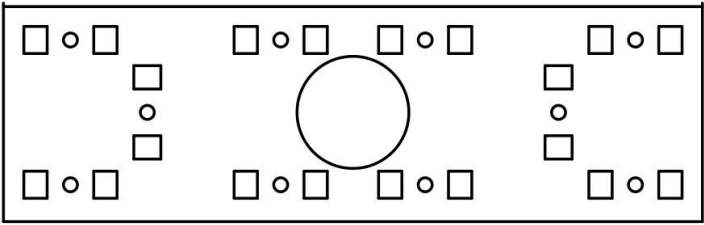

Kortin tyyppi: atmega168

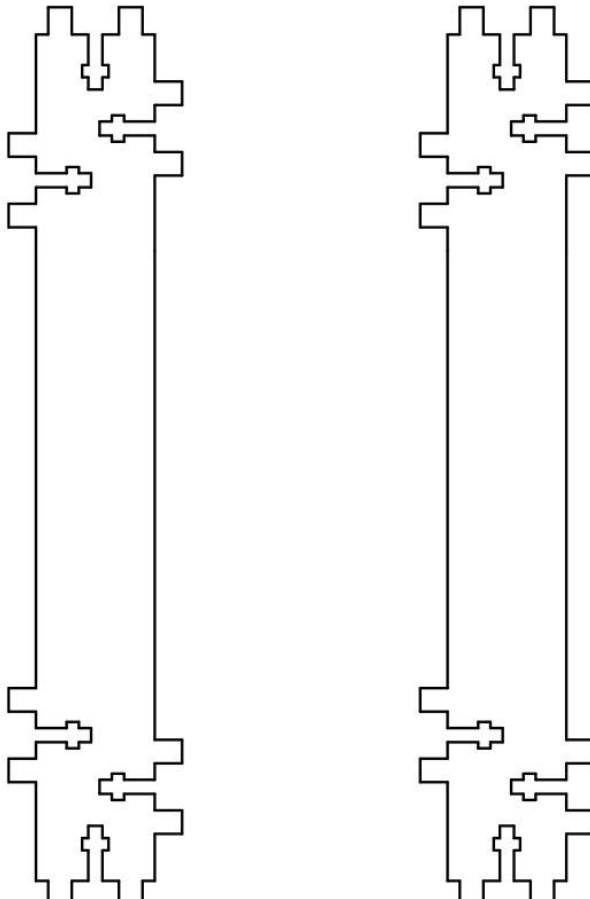

http://reprap.org/wiki/Extruder_Controller_2.2

Rev	Muutos	Rev pvm	Suun.		
					
Osa/Piirustus nro.		Osan nimitys	Standardi, muoto, mitat, malli	Laatu	kpl
Yleistoleranssit		Mittakaava	Liittyy 3D-tulostin	Nimitys Pursotin Takaseinä	
			Massa		
Piirt.	25.4.2014	JTerho	OAMK Tekniikan Yksikkö		Piirustusnumero
Suun.					
Tark.					
Hyv.					

Rev	Muutos	Rev pvm	Suun.			
						
Iso		Piirustus nro.	Ison nimitys	Standardi, muoto, mitat, malli	Laatu	kpl
Yleistoleranssit		Mittakaava	 Litty 3D-tulostin Massa	Nimitys Pursotin Etuseinä		
Piir-t.	25.4.2014	JTerho	OAMK Tekniikan Yksikkö		Piirustusnumero	
Suun.						
Tark.						
Hyv.						

Rev	Muutos	Rev pvm	Suun.
<p>liimataan</p>  <p>yläpuoli alapuoli</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">2 kappaletta kumpiakin</p>			
Osa		Pirustus nro.	
Yleistoleranssit		Mittakaava	Standardi, muoto, mitat, malli
		 Liittyy 3D-tulostin	Laatu Nimitys Pursotin pohjat
		Massa	kpl
Piirt.	25.4.2014	JTerho	
Suun.			
Tark.			
Hyv.			
OAMK Tekniikan Yksikkö			Pirustusnumero

Rev	Muutos	Rev pvm	Suun.			
						
Osa		Piirustus nro.	Osan nimitys	Standardi, muoto, mitat, malli	Laatu	kpl
Yleistoleranssit		Mittakaava	 Liitty 3D-tulostin Massa	Nimitys Pursotin katto		
Piir-t.	25.4.2014	JTerho		OAMK Tekniikan Yksikkö		
Suun.						
Tark.						
Hyv.						
			Piirustusnumero			

Rev	Muutos	Rev pvm	Suun.
			
Osa	Piiustus nro.	Osan nimitys	Standardi, muoto, mitat, malli
Yleistoleranssit	Mittakaava	 Liittyy 3D-tulostin Massa	Nimitys Pursotin Sivut
Piiirt.	25.4.2014	JTerho	
Suun.			
Tark.			
Hyv.			
OAMK Tekniikan Yksikkö			Piiustusnumero

常州市万泰电器有限公司 Hybrid Linear Actuators

39BYGL

SERIES HYBRID STEPPING MOTOR(混合式步进电机)

General Specifications(详细说明):

Step Accuracy..... ± 5%

Temperature Rise.....80°C Max

Ambient Temperature Range.....-20°C~+50°C

Insulation Resistance.....100MΩ Min.500VC DC

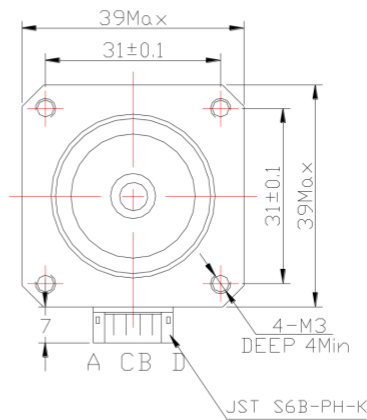
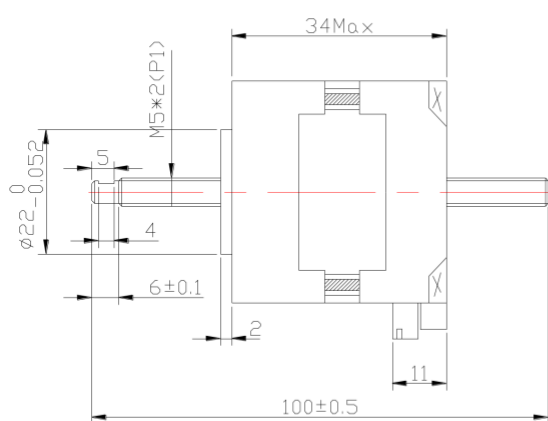
电机型号 Model	步长 Step distance mm/step	机身长 Motor Length L(mm)	相电压 Rate Voltage (V)	相电流 Rate Current (A)	相电阻 Phase Resistance (Ω)	相电感 Phase Inductance (mH)	静转矩 Holding Torque (N.m)	引线数 Lead Wire (NO.)	定位力矩 Detent Torque (kg.cm)	转动惯量 Rotor Inertia (kg.cm ²)	重量 Motor Weight (kg)
39BYGL215A	0.01	34	12	0.4	30	42	0.21	4	0.12	0.02	0.18

Dielectric Strength.....500V AC 1S

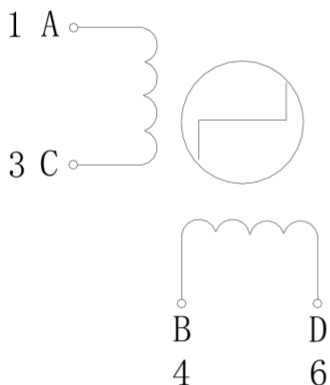
Electrical Specifications(技术数据):

*以上仅为代表产品，特殊产品可根据客户要求制作

Mechanical Dimensions(外型图)



Wiring diagram(接线图):



```
(** This GCode was generated by ReplicatorG 0040 **)
(* using Skeinforge (35) - Legacy *)
(* for a Single headed Cupcake *)
(* on 2014/05/20 18:55:39 (+0300) *)
(**** beginning of start.gcode ****)
(This file is for a MakerBot Cupcake CNC)
G21 (Metric FTW)
G90 (Absolute Positioning)
G92 X0 Y0 Z0 (You are now at 0,0,0)
(You have failed me for the last time, MakerBot)
G0 Z15 (Move up for test extrusion)
M108 S255 (Extruder speed = max)
M01 (asetä suoja paperi alustalle)
M101 (Extruder on, forward)
M01 (paina OK, kunnes aine tulee ulos ruiskusta)
M103 (Extruder off)
M01 (Jatka, kunnes pursotin on putsattu)
G0 Z0 (Go back to zero.)
M101 (Extruder on, forward)
G04 P1000 (Wait t/1000 seconds)
(**** end of start.gcode ****)
```

```
(Beginning of end.txt)
M102 (Extruder on, reverse)
G1 X40 Y40 F3300.0 (move platform to ejection position)
G1 X40 Y-40 F3300.0
G1 X0 Y-40 F3300.0
G04 P2000 (Wait t/1000 seconds)
M103 (Extruder off)
M01 (puhdista pursotin)
G1 X40 Y-40 F3300.0 (move platform to ejection position)
G1 X40 Y40 F3300.0
G1 X0 Y40 F3300.0
M01 (poista alusta)
G1 X0 Y0 F3300.0 (move nozzle to center)
G1 X0 Y0 Z10 F3300.0 (move nozzle to origin)
(end of end.txt)
```