

Mauri Pulkkinen

# 3D-tulostimen käyttöttestaus ja sovelluksen valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

31.5.2014

Tekijä Otsikko	Mauri Pulkkinen 3D-tulostimen käyttöttestaus ja sovelluksen valmistus
Sivumäärä Aika	42 sivua + 2 liitettä 31.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	digitaalinen media
Ohjaaja	lehtori Aarne Klemetti
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli kartoittaa pursotustekniikkaa käyttävän 3D-tulostuksen prosessia mallintamisesta valmiiseen kappaleeseen saakka. Tarkoituksena oli selvittää, voidaanko 3D-tulostusta yhdistää langattomaan virransiirtoon upotetun sovelluksen muodossa. Insinööriyön tavoitteena oli selvittää 3D-tulostimen tulostusprosessiin liittyvät rajoitteet ja mahdollisuudet. Viipalointiohjelmistolle oli tavoitteena löytää oikeat asetukset, joilla tulostus 3D-tulostimella onnistui ilman ongelmia ja tulostusjälki oli paras mahdollinen. Tavoitteena oli valmistaa toimiva tuote, jossa yhdistetään 3D-tulostimella valmistettu runko ja siihen upotettu langatonta virransiirtoa käyttävä kaupallinen sovellus.</p> <p>Asetettuihin tavoitteisiin pyrittiin käyttämällä menetelmänä testausta. Viipalointiohjelman asetuksia muutettiin ja testikappaleita 3D-tulostettiin, kunnes optimaaliset asetukset ja tulostukseen liittyvät rajoitteet saatiin selville. Tuloksia heijastettiin aiheeseen liittyviin aiempiin tutkimuksiin, minkä pohjalta ehdotettiin tulevaisuuden kehityskohteita.</p> <p>Insinööriyön tärkeimpinä tuloksina olivat, että 3D-tulostettavan mallin oli oltava yhtenäinen eli tulostuspää ei saanut irrota tulosteesta missään vaiheessa, eikä tulostimen pysäytä-jatka-toimintoa voinut käyttää, koska se pilasi kappaleen. Insinööriyössä selvisi, että viipalointiohjelman asetuksista tulostettavan kappaleen lopputuloksen kannalta tärkeimmät olivat tulostuskohdan asettaminen origoon ja alku- ja loppuviipalekoodien muuttaminen käytettävän 3D-tulostimen suosituskoodeihin. Projektissa todistettiin, että 3D-tulostaminen on yhdistettävissä langattomaan virransiirtoon. Tätä tietoa voidaan käyttää perustana tekniikoiden kehitystyössä ja niiden yhdistämisessä.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, viipalointi, langaton virransiirto

Author Title	Mauri Pulkkinen 3D printer testing and application making
Number of Pages Date	42 pages + 2 appendices 31 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Digital Media
Instructor	Aarne Klemetti, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to map the printing process of a 3D printer entirely from modelling to finished part. The purpose was to sort out if 3D printing could be combined with an embedded wireless power transfer application. The objective was to research the limitations and possibilities of the 3D printer and to find the favourable settings in slicing software to secure the best possible print without encountering problems. Another goal was to successfully manufacture a working product combining 3D printed frame and embedded commercial wireless power transfer unit.</p> <p>The method used for achieving results was mainly testing. The settings of the slicing software were altered and test pieces were 3D printed until optimal settings and limitations in printing process were fully discovered. The results were reflected in earlier studies in the field and future development areas were suggested on the basis of those.</p> <p>The most important findings of the thesis were that the printed model had to be solid without gaps meaning that print head was to be connected to the model throughout the session. The printer's pause-resume print function was not to be used because it ruined the printed piece. The project clarified that the most important slicing software settings were positioning the bed center to origin as well as changing start and end G-codes to ones suggested by the 3D printer manufacturer. It was proven in the thesis that 3D printing could be combined with wireless power transfer. This information could be used as a basis in the development and merging of these technologies.</p>	
Keywords	3D printing, slicing, wireless power transfer

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lisäävä valmistus	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Yleisimmät pikavalmistustekniikat	4
2.3	Teollisuus	8
2.4	Yksityiset käyttäjät, yhteisöt ja pienyritykset	12
2.5	Yliopistot ja tutkimus	16
3	Proof of concept	18
4	Kappaleen valmistus	20
4.1	Työn tausta ja tavoitteet	20
4.2	Projektissa käytetty laitteisto ja ohjelmistot	20
4.3	Valmistaja 3000:n asettamat rajoitukset	23
4.4	Mallinnus- ja tulostusprosessi	25
4.5	Projektissa kohdatut ongelmat	30
4.6	Tulokset ja kehityskohteet	32
5	Yhteenveto	38
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1. Valmistaja 3000:n käyttöohje	
	Liite 2. Yhteenveto lisäävän valmistuksen tekniikoista ja nanomateriaaleista	



## Lyhenteet

3D	Three Dimensional. Kolmiulotteinen.
3DP	3D Printing. Stereolitografiaa muistuttava 3D-tulostustekniikka tai yleisnimitys lisäävälle valmistukselle.
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene. Öljypohjainen muovi.
CAD	Computer Aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CAMISHA	Computer Aided Manufacturing of Individual Shells for Hearing Aids. Tanskalaisen Widex-yhtiön käyttämä tekniikka yksilöllisten kuulolaitteiden valmistukseen.
POC	Proof of Concept.
FFF	Fused Filament Fabrication. Purostustekniikka. Yleisnimi pursotustekniikalle.
FDM	Fused Deposition Modeling. Purostustekniikka. Stratasysin patentoima nimi pursotustekniikalle.
LED	Light-Emitting Diode. Puolijohdekomponentti, joka säteilee valoa, kun sen läpi johdetaan sähkövirtaa.
PCL	Polycaprolactone. Polyeteenisukuinen muovi.
PLA	Polylactic acid. Täkkelyspohjainen, biologisesti hajoava kestopuovi.
SLA	Stereolithography. Stereolitografia.
SLS	Selective Laser Sintering. Lasersintraus.

## 1 Johdanto

Insinööriyössä selvitetään pursotustekniikkaa käyttävän 3D-tulostimen tulostusprosessia kappaleen suunnittelusta valmiiseen tuotteeseen saakka. Tulostimella valmistetaan tuotteen runko, johon upotetaan langatonta virransiirtoa hyödyntävä sovellus. Aihe valittiin, koska 3D-tulostusprosessi on mielenkiintoinen sen yksinkertaisuuden ja nopeasti saatavan konkreettisen tuloksen ansiosta. Työssä pääsee yhdistämään kahta kiehtovaa tekniikan sovellusta, 3D-tulostusta ja langatonta virransiirtoa. Työ tehdään Metropolia ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteessä oppilaitoksen 3D-tulostimella. Työn tavoitteena on

1. tutkia työssä käytettävän 3D-tulostimen, Valmistaja 3000:n, suorituskyky ja kartoittaa tulostimen rajoitteet ja mahdollisuudet
2. saada tietoa 3D-tulostusprosessin eri vaiheista, selvittää, mitä toimenpiteitä on tehtävä 3D-mallin suunnittelussa, sen viipaloinnissa ja tulostuksessa, ennen kuin valmis tuote on tulostettu
3. valmistaa onnistuneesti tuote, joka yhdistää 3D-tulostuksen ja siihen upotetun valitun sovelluksen, ja ehdottaa, millaista käytettyjen tekniikoiden kehitys on tulevaisuudessa.

Työn pääpainona on 3D-tulostusprosessin ja 3D-tulostimen kartoitus sekä viipalointiohjelmiston käyttö. Työssä ei keskitytä tarkemmin CAD-ohjelmistolla mallintamiseen eikä langattoman virransiirron teoriaan tai fysiikkaan, ja työssä käytetäänkin lähes valmista, langatonta virransiirtoa soveltavaa, kaupallista ratkaisua. Valmis tuote tulee olemaan testisovellus, joka on yksinkertainen ja jonka tarkoituksena ei ole muuta kuin todistaa tekniikoiden yhteensopivuus. Työn tavoitteet saavutetaan pääosin konkreettisesti testaamalla 3D-tulostinta ja prosessissa tarvittavia ohjelmistoja. CAD-ohjelmistolla mallinnetaan testikappaleita, joiden perusteella opitaan viipalointiohjelmistosta, 3D-tulostimesta ja niiden välisistä asetuksista. Testien perusteella kartoitetaan ja dokumentoidaan rajoitteet sekä oikeat asetukset, joiden perusteella lopullinen tuote valmistetaan.

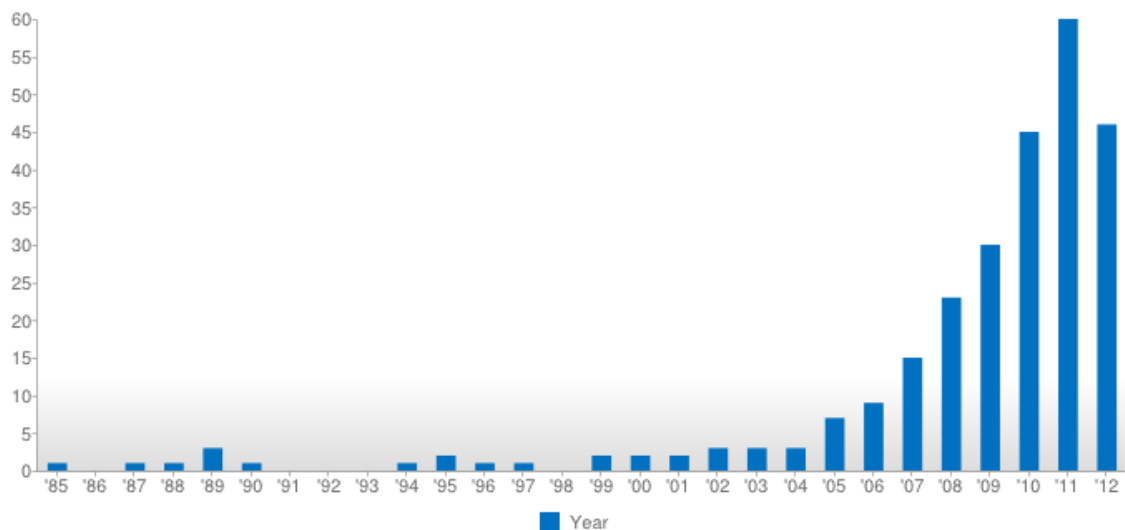
Insinööriöraportti alkaa teoriaosuudella, jossa esitellään, mitä lisäävä valmistus on, sekä yleisimmät pikavalmistusmenetelmät. 3D-tulostuksen tilaa esitellään eri aloilla, kuten teollisuus-, yksityis- ja tutkimuskäytössä, mikä antaa perspektiiviä tässä työssä valmistettavalle sovellukselle. Teoriaosuuden jälkeen esitetään, mitä tehtävän sovelluksen prosessin eri vaiheet sisältävät ja mitä niissä saadaan selville. Lopuksi tulosten pohjalta ehdotetaan tulevaisuuden kehityskohteita tekniikoihin liittyen.

## 2 Lisävä valmistus

### 2.1 Yleistä

Lisävä valmistusta eli kolmiulotteista (3D) tulostamista kuvataan englanniksi kolmella eri termillä, 3D printing (3DP), Rapid Prototyping (RP) ja Additive Manufacturing (AM), jotka kaikki tarkoittavat kolmiulotteisen esineen luomista tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmistolla (CAD) tehdystä 3D-mallista [1]. 3D-tulostus on siis ala, joka yhdistelee useaa teknologian sovellusta ja osaamisaluetta [2].

3D-tulostin rakentaa mallin alle 1 mm:n paksuisista kerroksista, kerros kerrokselta, alhaalta ylöspäin. Kerrokset määrittää ohjelmisto, joka jakaa CAD-mallin 3D-tulostimen ymmärtämään muotoon. Kerrokset voidaan rakentaa monella eri tavalla riippuen siitä, mitä tekniikkaa soveltavaa tulostinta käytetään. Yleisimmät menetelmät ovat sulatetun muovin pursotus kuumennetulle alustalle (Fused Deposition Modeling, FDM), muovijauheen kuumentaminen laserilla (Selective Laser Sintering, SLS) sekä valokovetteisen epoksihiyytelön kovettaminen laserilla (Stereolithography, SLA). Kolmiulotteisesta tulostuksesta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä lisävä valmistusta kokonaisuudessaan, mutta se on myös yksi valmistusmenetelmä [3]. Näitä kahta asiaa ei tule sekoittaa keskenään. [1].



Kuva 1. Vuosi, jona kyselyyn vastannut henkilö on käyttänyt 3D-tulostinta ensimmäisen kerran [4].

Lisäävä valmistus on reilut 20 vuotta vanha tekniikan ala, joka on ollut käytössä lähinnä teollisuudessa prototyyppien valmistusta varten [5]. Kuva 1 esittää, kuinka yksityisten käyttäjien kiinnostus alaa kohtaan on noussut viime vuosina uusien, pienempien 3D-tulostinten julkaisujen ja hintojen laskemisen myötä [4].

Lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa laadullisia, kustannuksellisia ja ajansäästöllisiä hyötyjä. Suurimpia hyötyjä koetaan olevan suunnittelupohjainen valmistus vastakohtana perinteistelle valmistusmenetelmien, kuten jyrsinnän ja leikkauksen, valmistuspohjaiselle suunnittelulle. Valmiita kappaleita voidaan luoda ilman geometrisia rajoituksia tai tarvetta kokoamiseen. [2.]

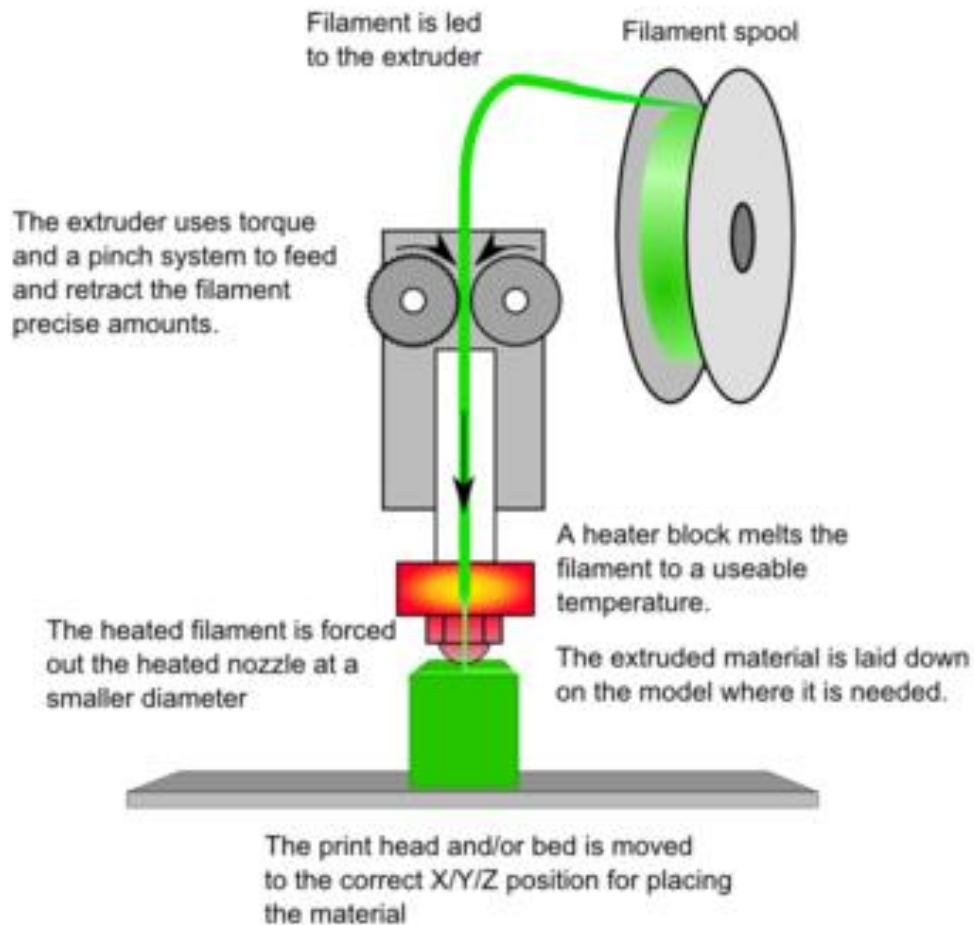
Tarvittavan raaka-aineen määrä vähenee, eikä jätettä synny yhtä paljon verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Positiivisena puolena listataan myös mahdollisuus käyttää kierrätettäviä materiaaleja. Itse tulostusprosessi sitoo myös hyvin vähän työntekijää. Tulostusprosessin käynnistämisen jälkeen tulostin valmistaa tuotteen loppuun automaattisesti. [2.]

Suunnittelu- ja ympäristöhyödyistä huolimatta lisäävän valmistuksen kasvua rajoittaa tulostettavien materiaalien rajallinen valikoima. Muovien, kuten PLA:n (Polylactic acid) ja ABS:n (Acrylonitrile butadiene styrene), lisäksi tulostettavat materiaalit rajoittuvat muutamaankin metalliin ja keraamiseen aineeseen. Kerros kerrokselta rakennettavien kappaleiden kestävyys ei myöskään ole yhtä vahva kuin perinteisillä menetelmillä valmistettaessa, joten käyttökohteet rajoittuvat testi- ja esityskappaleisiin tai tuotteisiin, joihin ei kohdistu kuormitusta. [2.]

## 2.2 Yleisimmät pikavalmistustekniikat

### FDM

FDM eli FFF-tekniikkaa (Fused Filament Fabrication) käyttävä 3D-tulostin pursottaa sulatettua muovia suuttimesta yleensä kuumennetulle alustalle luoden halutun tuotteen CAD-mallin perusteella [6]. Muovi on yleensä kelalla, ja sitä syötetään tulostimelle telojen läpi, jotka toimivat mäntinä työntäen muovia suuttimen läpi alustalle, kuten kuvassa 2 esitetään.



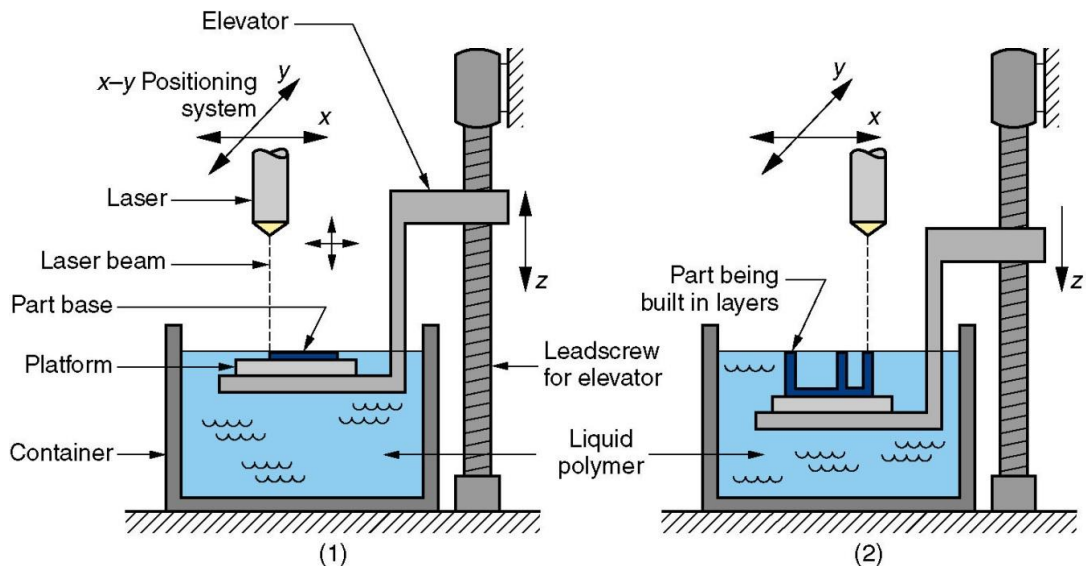
Kuva 2. FDM-tekniikkaa käyttävän 3D-tulostimen toimintaperiaate [7].

Tulostin rakentaa mallia kerros kerrallaan liikuttaen kolmessa tasossa (X, Y, Z) tulostuspäätä, alustaa tai molempia. Tulostimessa on mallista riippuen yksi tai useampia tulostuspäitä, joista jokainen toimii kuvassa 2 esitetyllä periaatteella. Jos tulostimessa on enemmän kuin yksi tulostuspää, käytetään sitä tai niitä yleensä tukimateriaalin pursotukseen, joka poistetaan lopullisesta tuotteesta [6]. FDM-tekniikkaa käyttävät 3D-tulostimet ovat yleisimpiä kaupallisista, kotikäyttöön tarkoitetuista tulostimista niiden koon ja hinnan kuluttajaystävällisyyden ansiosta.

## SLA

Stereolitografiatekniikkaa käyttävässä laitteessa säiliö on täytetty laserilla jähmetettävällä epoksihiyytelöllä kuvan 3 havainnollistamalla tavalla. Lasersäteen kovetettua ensimmäisen kerroksen lasketaan alustaa yhden kerroksen verran alaspäin,

jolloin kappaleen pinta peittyy epoksihiyytelöllä ja kone on jälleen valmis kovettamaan seuraavan kerroksen. Toiminto toistetaan, kunnes lopullinen tuote on valmis kuvan 3 osakuvien 1 ja 2 osoittamalla tavalla. Stereolitografia vaatii usein tukimateriaalin käyttöä, ja se poistetaan manuaalisesti lopullisesta tuotteesta. Tuote on valmis, kun se on tulostusprosessin jälkeen kovetettu uunissa [8].

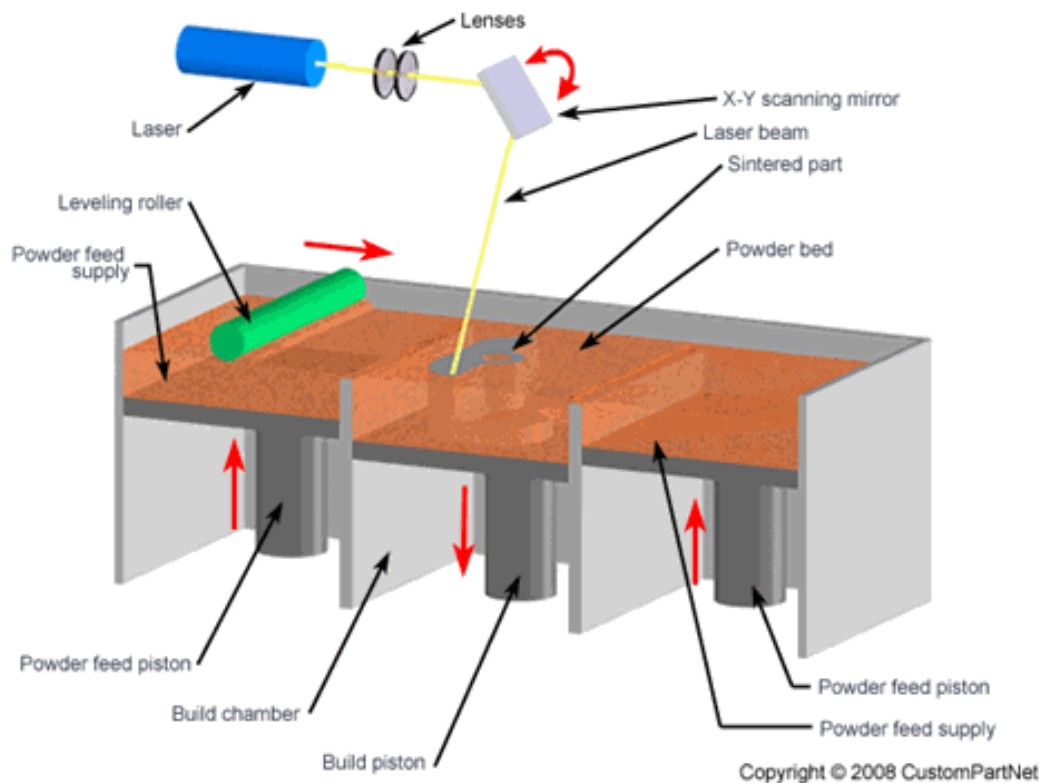


Kuva 3. Stereolitografian toimintaperiaate. 1) Tulostusprosessin alku, jossa pohjakerros on tulostettu. 2) Tulostusprosessi useita kerroksia myöhemmin. Lopullinen tuote alkaa saada muotoaan. [8].

Stereolitografia on nopea lisäävän valmistuksen tekniikka. Laitteiden ja niiden käyttöhinnan asiasta tekniikkaa käyttäviä koneita on enemmän teollisuus- kuin kotikäytössä. [8.]

## SLS

Lasersintrauksessa tulostusalustalle levitetään telalla kerros muovijauhetta, jota kuumennetaan laserilla halutuista kohdista, kunnes hiukkaset tarttuvat toisiinsa, kuten kuvassa 4 esitetään. Hiukkasia ei kuitenkaan kuumenneta sulamispisteeseen saakka, jolloin muovi alkaisi valua. Valmiin kerroksen jälkeen tulostusalustaa lasketaan kerrospaksuuden verran, jolloin tela levittää taas muovijauheen, joka kovetetaan laserilla edellisen kerroksen päälle. Kuten stereolitografiassa, prosessi toistetaan, kunnes lopullinen tuote on valmis. Tukimateriaalia ei valmistuksessa yleensä tarvita hiukkastekniikan ansiosta. [9.]



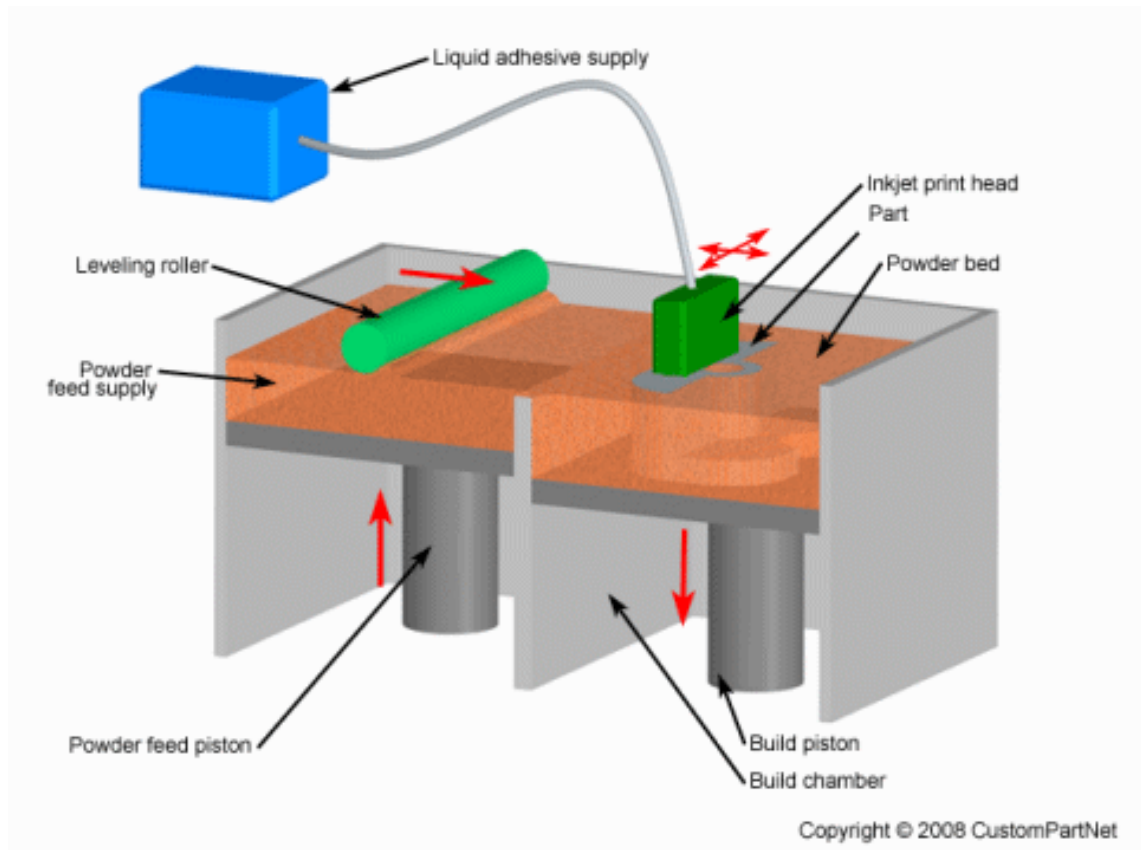
Kuva 4. Lasersintrauskone ja sen toimintaperiaate [9].

Lasersintrauskoneet on tarkoitettu lähes täysin teollisuuskäyttöön niiden hinnan, koon ja käyttötarkoitusten vuoksi. Tuotteita voidaan muovin lisäksi luoda erilaisista nailoneista, metallisekoituksista ja kuminkaltaisesta materiaalista. Tuotteiden jälkikäsittely voi vaatia lähes tuhannen celciusasteen lämpötilan. [9.]

### 3DP

Kolmiulotteinen tulostus on stereolitografiaa muistuttava lisäävän valmistuksen muoto. Alustalle levitetään samalla tavoin kerros jauhetta, mutta jäähdyttämiseen käytetään laserin sijaan nestemäistä kovetetta, kuten kuvasta 5 selviää. Kovete ruiskutetaan mustesuihku-tulostimista tutulla tulostuspäällä. Ylimääräinen jauhe jää tukemaan tulostettavaa kappaletta. Kappale rakentuu kerros kerrokselta tulostuspetiä laskemalla. Kappaleen valmistuttua ylimääräinen jauhe poistetaan harjaamalla. Kappaleeseen lisätään yleensä tiivistysainetta parantamaan lujuutta ja pintaa. [3.]





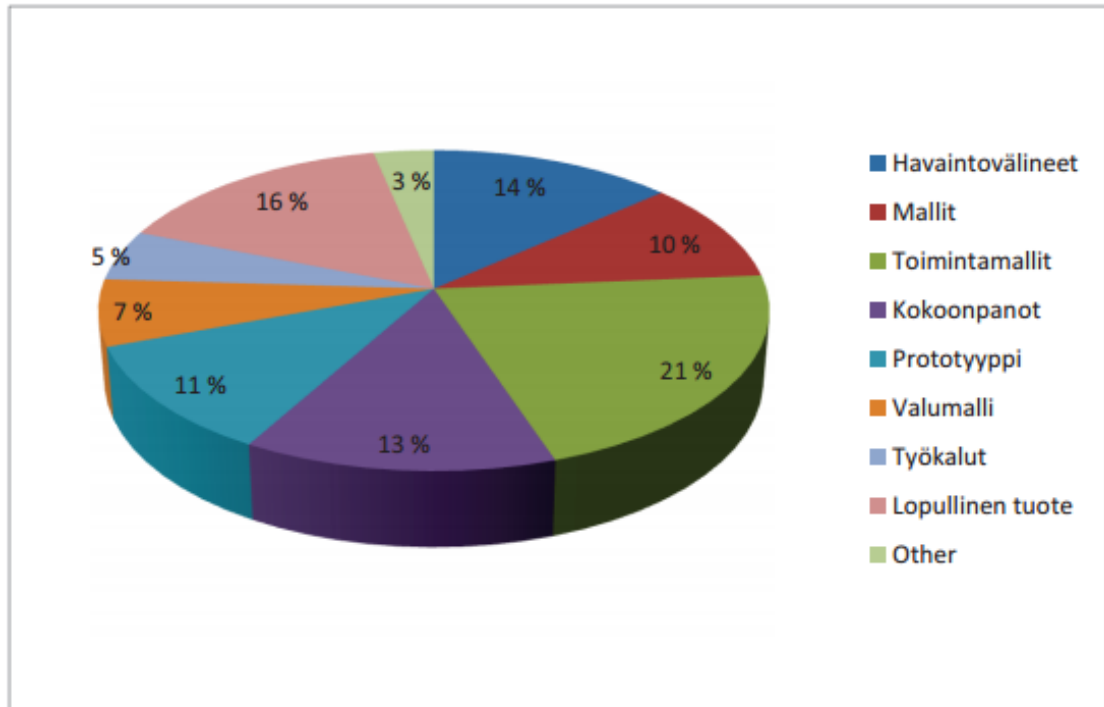
Kuva 5. Kolmiulotteisen tulostusmenetelmän (3DP) laitteen osat ja toimintaperiaate [3].

3DP on MIT:ssä (Massachusetts Institute of Technology) kehitetty valmistusmenetelmä, joka on lisensoitu usealle yhtiölle. Menetelmällä pystytään muovin lisäksi käyttämään keraamisia ja metallijauheita. 3DP:n etuja muihin valmistusmenetelmiin verrattuna ovat käytettävien jauheiden hinta ja tulostusprosessin nopeus. Laitteella voidaan tulostaa 2–4 kerrosta minuutissa. Valmistettavien kappaleiden lujuus ei kuitenkaan ole samaa tasoa kuin parhailla valmistusmenetelmillä, ja 3DP:llä valmistettuja osia käytetäänkin lähinnä vain malleina, joilla toiminnallinen testaaminen on hyvin rajallista. [3.]

### 2.3 Teollisuus

Kuvan 6 mukaan lisäävää valmistusta on teollisuudessa käytetty pääasiassa konsepti- ja testimallien luomiseen. Kuitenkin markkinoiden kehityksen ja asiakkaiden vaatimusten siirtyessä kohti yksilöllisempää ja joustavampaa palvelua yhtiöt ovat alkaneet kasvavissa määrin panostaa lisäävään valmistukseen. Lisäävän valmistuksen

tekniikoilla asiakkaille pystytään tarjoamaan yksilöllisempiä tuotteita yhä joustavammin ja nopeammin. Myös prosessien hallinnan ja johtamisen kannalta 3D-tulostustekniikat ovat ideaalisia valmistusmenetelmiä. [10.]

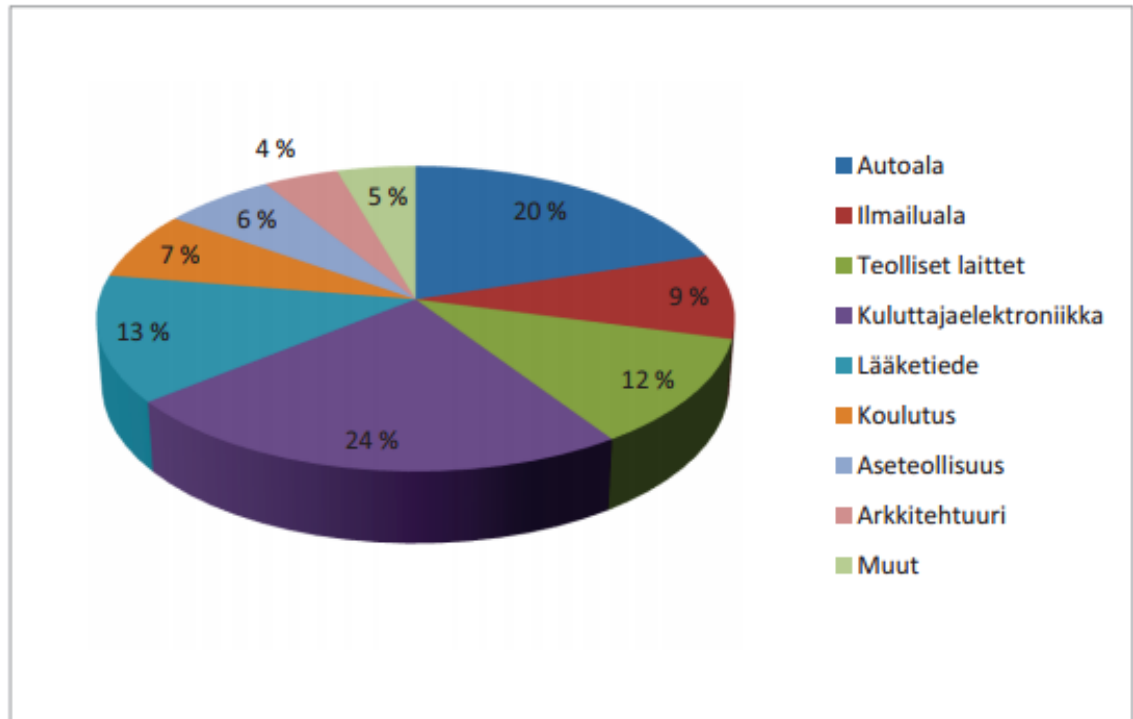


Kuva 6. Mihin yritykset käyttivät lisäävän valmistuksen menetelmiä vuonna 2008 [11].

Lean-periaatteiden mukaan valmistettaessa pyritään minimoimaan aikaa ja turhia toimenpiteitä, jotka eivät tuo arvoa tuotteelle ja asiakkaalle. Perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna 3D-tulostustekniikat vähentävät työvaiheita, kuten kokoamisen tarpeen, ja helpottavat laadunhallintaa. Valmistettava tuote saadaan myytiin nopeammin, mikä on tärkeää aloilla, joilla tuotteiden elinkaari on suhteellisen lyhyt. [10.]

Lisäävän valmistuksen menetelmiä käytetään monilla aloilla, joista merkittävimpiä ovat ilmailu-, autoilu- ja kulutustavara-alat sekä hammas- ja lääketieteen alat, kuten kuvan 7 diagrammista selviää. Usein 3D-tulostustekniikoita käytetään valmistamaan tiettyjä tuotteen osia, mutta yksinkertaisemmat tuotteet voidaan tulostaa kokonaan näitä tekniikoita käyttämällä. NASA (National Aeronautics and Space Administration) valmistaa Mars Roveriin, isoa autoa muistuttavaan kulkuneuvoon, jonka on tarkoitus tehdä miehitetty ajo Marsin pinnalla, yli 70 osaa FDM-tekniikkaa käyttävällä 3D-tulostimella [12]. Samaa tekniikkaa ilmailussa käyttää Bell Helicopter, joka rakentaa

ilma-alukseensa putkia kohtiin, joissa johdot yhdistyvät [13]. Ilmailualalla mielenkiintoa 3D-tulostusta kohtaan herättävät etenkin mahdollisuus tehdä osista kevyempiä ja parantaa niiden suorituskykyä [14].



Kuva 7. Lisäävää valmistusta käyttävät toimialat vuonna 2008 [11].

Useat suuret autovalmistajat, kuten BMW, Jaguar, Lamborghini ja Hyundai, käyttävät 3D-tulostusteknologiaa tuotteidensa valmistuksessa [15]. 3D-tulostimilla valmistetaan auton osia sekä työkaluja, jotka helpottavat autojen kokoamista [15]. Yhdysvaltalainen KOR EcoLogic -yhtiö on kehittänyt auton nimeltään Urbee 2 (kuva 8), jonka runko on kokonaan tulostettu 3D-tulostimella [16].



Kuva 8. KOR EcoLogic -yhtiön Urbee 2 -auton runko on tulostettu kokonaan FDM-tekniikalla [16].

Urbee 2:n tavoite on olla maailman ekologisin auto. Se kulkee moottoritieajossa 200 ja kaupunkiajossa 100 mailia gallonalla. Auton valmistuksessa käytettiin FDM-tekniikkaa, ja auto valmistettiin ABS-muovista [16]. Maanpuolustusliiketoiminta on myös yksi lisäävästä valmistuksesta kiinnostunut ala, jossa tutkimukseen ja kehitykseen on joissain maissa, kuten Yhdysvalloissa, panostettu paljon[17]. Tuotteita valmistetaan yhä kasvavissa määrin 3D-tulostustekniikoita hyödyntäen. Yhtiö nimeltä EOIR Technologies käyttää 3D-tulostusta panssarivaunujen tähtäinten massatuotantoon. Yhtiön mukaan valmistuskustannukset 3D-tulostustekniikalla ovat 60 % pienemmät kuin vanhalla valmistusmenetelmällä [17].

3D-tulostuksen suurin vaikutus on nähtävissä lääketieteen alalla. Se on muokannut monia osa-alueita lääketieteellisten laitteiden valmistuksessa. Lisäväällä valmistuksella on ollut suuri vaikutus kuulolaitteiden valmistuksessa. Noin 99 % kuulolaitteista, jotka tehdään sopivaksi yksilön korvaan valmistetaan 3D-tulostustekniikoita käyttämällä. Tanskalainen yhtiö Widex valmistaa kuvassa 9 esitettyjä kuulolaitteita käyttäen kehittämäänsä CAMISHA-tekniikkaa (Computer Aided Manufacturing of Individual Shells for Hearing Aids). Asiakkaan korvakäytävästä otetaan muotti käyttämällä

laserskannausta, jonka jälkeen muotti muutetaan 3D-malliksi ja tulostetaan 3D-tulostimella. [18.]



Kuva 9. Widex-yhtiön valmistamia kuulolaitteita. Kuulolaitteet valmistetaan yksilöllisesti asiakkaan korvakäytävään sopiviksi [18].

Lisäävän valmistuksen metodeja käytetään myös hammas-, selkäranka- ja lonkkaimplanteissa. Kuulolaitteisiin verrattuna implanttien valmistus on vähäistä, sillä muun muassa materiaaleja koskevat säädökset ovat tiukempia tuotteissa, jotka menevät kehon sisälle. Potentiaali on kuitenkin suuri tällä alalla, jossa tarvitaan yksilöllisesti rakennettuja, monimutkaisia tuotteita. Vaikka teknologia on vielä kehittyvä, se on muuttanut klinikoiden lähestymistapaa monimutkaisiin hoitoihin. [18.]

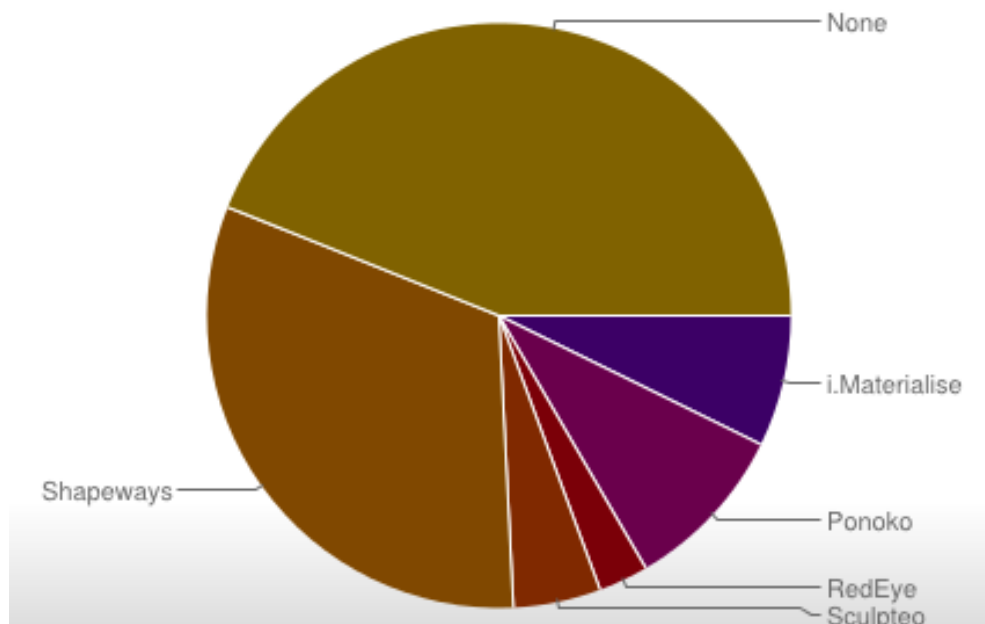
#### 2.4 Yksityiset käyttäjät, yhteisöt ja pienyritykset

Samaan aikaan, kun teollisuuden 3D-tulostimista tulee yhä kehittyneempiä, uudenlaisia, kotiin tai toimiston pöydälle mahtuvia, henkilökohtaisia 3D-tulostimia tulee markkinoille. Reilu vuosikymmen sitten halvimmat 3D-tulostimet maksoivat 45 000 Yhdysvaltain dollaria eli noin 33 000 euroa. Nykyään pöytäkokoisia 3D-tulostimia saa alle tuhannella eurolla, mikä on saanut yksityiset henkilöt, koulut ja pienyritykset kiinnostumaan alasta. Tämä on johtanut uusiin kehitysyhteisöihin ja pienyritysmalleihin. Jos vielä vuoteen 2007 mennessä yksityisen käyttäjän oli hankala muuttaa oma ideansa konkreettiseksi esineeksi, nykyään tarjolla on henkilökohtaisia 3D-tulostimia,

paikallisia tuotantomyymälöitä ja verkkopalveluita, jotka valmistavat tuotteita asiakkaan 3D-malleista. [19.]

### Verkkopalvelut

Verkkopalvelut tarjoavat yksityisille ihmisille mahdollisuuden konkretisoida itse suunnittelemansa tuotteet. Sellaiset palvelut kuin Shapeways, i.materialize, Ponoko, Sculpteo ja RedEye tarjoavat 3D-tulostuspalveluita yksityisille käyttäjille. Käyttäjä lataa verkossa suunnitelmansa 3D-mallin, joka tulostetaan ja postitetaan käyttäjälle. Kyselyn mukaan yli puolet 289 vastaajasta on käyttänyt 3D-tulostusta tarjoavia verkkopalveluita, kuten kuvasta 10 selviää. Suosituimmat palvelut, Shapeways ja Ponoko, tarjoavat verkossa myös kauppapaikkaa, jossa yksityiset käyttäjät voivat myydä suunnittelemaansa 3D-malleja ja valmiita tuotteita. Vaihtoehtoisesti käyttäjät voivat yhteisössä pyytää muita käyttäjiä suunnittelemaan heille tuotteita. Vaikka 3D-tulostusverkkopalvelut ovat tuore liiketoiminta-ala, se on kasvanut olennaisesti ei ainoastaan palveluiden määrässä vaan myös tarjonnan laajuudessa. Esimerkkinä Ponokon yhteistyö elektroniikkayhtiö Sparkfunin kanssa: se tähtää tarjoamaan monitoiminnallisia tuotteita yksityisille suunnittelijoille. [19.]



Kuva 10. Yksityisten ihmisten käyttämät 3D-tulostusta tarjoavat verkkopalvelut vuonna 2012. Kyselyyn vastasi 289 henkilöä. [4.]

Sellaiset palvelut kuin 100kGarages, CloudFab ja MakerFactory yhdistävät yksityisiä suunnittelijoita ja 3D-tulostinten omistajia ja tarjoavat laitteiden omistajille mahdollisuuden ansaita omilla laitteillaan. Palveluissa suunnittelijat voivat kartan ja listojen perusteella etsiä itseään lähinnä olevia tulostinten omistajia tai ladata suunnittelemansa mallin palveluun ja valita tulostinten omistajien tarjouksista mieleisensä. [19.]

#### Paikalliset tuotantomymälät

Paikallisia tuotantomymälöitä verkkopalveluiden mukaan on lähinnä Yhdysvalloissa. Tuotantomymälät eivät ole yhtä yleisiä ja suosittuja kuin verkkopalvelut käyttäjien keskuudessa, ja ne tarjoavatkin hieman erilaisen lähestymistavan henkilökohtaisten tuotteiden valmistukseen. [19.]

Merkittävimpiä tuotantomymälöitä 3D-tulostuksen alalla ovat TechShops, Fab Labs ja Hackerspaces. TechShopsilla on tuotantomymälöitä ympäri Yhdysvaltoja, ja ne tarjoavat tilat yhteisön jäsenille. TechShopeissa on laaja valikoima eri 3D-tulostustekniikoita käytäviä laitteita, ja jäsenet voivat valmistaa suunnittelemaansa tuotteita yksilön teknisestä taitotasosta riippumatta. Fab Labs on MIT:n ohjelma, johon kuuluu yli 50 valmistuspajaa 16 eri maassa. Pajoissa on 3D-tulostuslaitteita, joilla yhteisön jäsenet voivat luoda omia älykkäitä laitteita. [19.]

Hackerspaces eroaa lähestymistavaltaan TechShopista ja Fab Labista. Ne ovat yhteisöllisiä pajoja, joihin kokoontuu lähinnä alan harrastajia, joilla on eri koulutustaustat mutta yhteinen mielenkiinto tiedettä, teknologiaa ja digitaalista taidetta kohtaan. Hackerspacesiin liittyminen ei kuitenkaan vaadi koulutusta vaan mukaan oppimaan pääsee kuka tahansa kiinnostunut käyttäjä. Pajoissa on vertaisopetusta ja yhteisöllistä ongelmanratkaisua. TechShopeista ja Fab Labeista poiketen Hackerspacet ovat toisistaan riippumattomia, paikallisen yhteisön ryhmiä, joten laitteistot vaihtelevat paikkakunnittain. Hackerspaces-toimipisteitä on maailmanlaajuisesti noin 500. [19.]

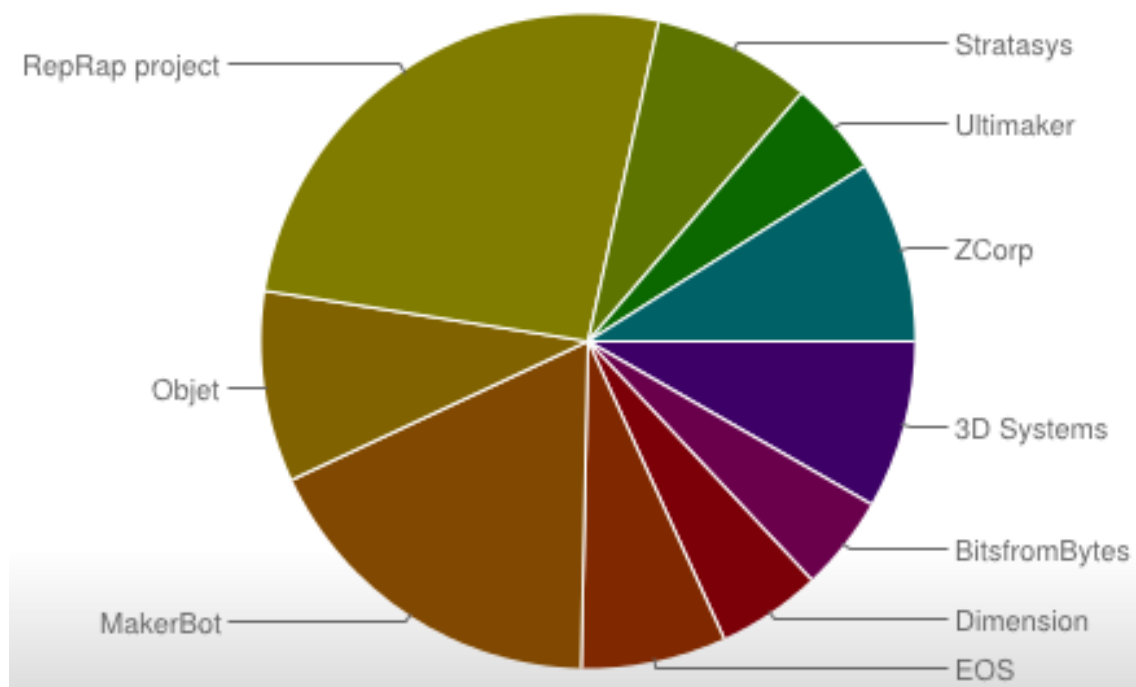
#### Henkilökohtaiset 3D-tulostimet

Henkilökohtaiset 3D-tulostimet ovat lisääntyneet alan harrastajien keskuudessa koon pienennyttyä pöytäkokoon ja hinnan laskettua. Yhä useampi yritys valmistaa



pöytäkokoisia, henkilökohtaisia 3D-tulostimia. Henkilökohtaiset tulostimet ovat ominaisuuksiltaan ja materiaalivalikoimaltaan suppeampia kuin teollisuuden tulostimet. Suurin osa kotiin tarkoitetuista tulostimista käyttää FDM-tekniikkaa.

Henkilökohtaisten 3D-tulostinten markkinoille tulo alkoi oikeastaan vuonna 2004, kun Bathin yliopiston professori Adrian Bowyer ja hänen valmistunut opiskelijansa Ed Sells käynnistivät RepRap-nimisen projektin [20]. Projektin tarkoituksena oli luoda edullinen 3D-tulostin, joka pystyy kopiaimaan itsensä. Avoimen lähdekoodin projektin piirustuksen ja materiaalit julkaistiin, niin että kuka tahansa pystyi osallistumaan projektin kehitykseen. Vaikka tänäkin päivänä 3D-tulostimen kokoaminen on vaikeaa, ovat tulostimet kehittyneet paljon yhteisön ponnistelujen ansiosta [20]. RepRap-projektiin pohjautuvat tulostimet olivat toukokuussa 2012 tehdyn tutkimuksen suosituimpia henkilökohtaisia 3D-tulostimia, kuten kuvan 11 diagrammi esittää.



Kuva 11. Eri valmistajien 3D-tulostinten suosio vuonna 2012. Kyselyyn vastasi 446 3D-tulostinta käyttänyttä henkilöä. [4.]

Toiseksi suosituin MakerBot ja BitsfromBytes ovat RepRap-projektista nousseita yrityksiä, jotka valmistavat henkilökohtaisia 3D-tulostimia. MakerBot Industries tarjoaa suosittua MakerBot-3D-tulostintaan 950 Yhdysvaltain dollarilla, ja BitsfromBytesin enemmän ominaisuuksia tarjoavan 3D-tulostimen saa 3 900 Yhdysvaltain dollarilla



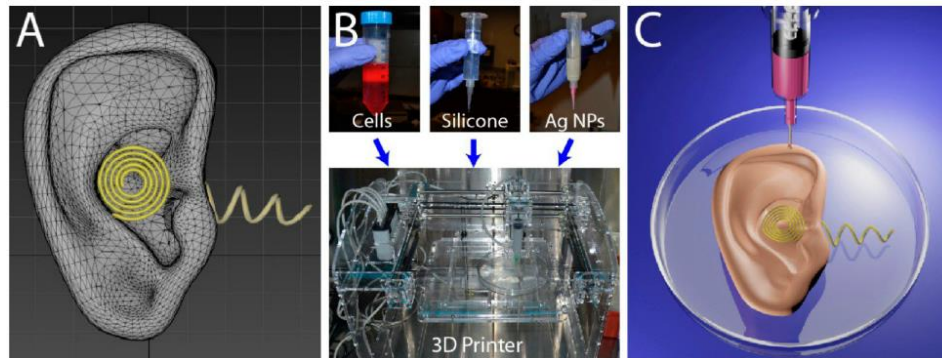
[19]. Myös teollisuustason 3D-tulostimista tunnettu Stratasys toi markkinoille vuonna 2009 edullisempia, yksityisille käyttäjille tai pienryhmille suunnattuja tulostimia. Stratasysin tulostimet ovat kuitenkin RepRap-projektin tulostimiin verrattuna parempia, ja hinnat ovatkin 10 000 ja 20 000 Yhdysvaltain dollarin välillä [21].

## 2.5 Yliopistot ja tutkimus

3D-tulostimilla voidaan tulostaa jo muotojen ja koon puolesta lähes mitä tahansa, mitä vain osataan 3D-ohjelmalla mallintaa. Seuraava askel 3D-tulostuksessa on toiminnallisuuden lisääminen tulostettuihin tuotteisiin. Yliopistojen ja alan tutkijoiden kiinnostuksen kohteena onkin uusien, esimerkiksi sähköä johtavien materiaalien 3D-tulostaminen. Tutkimusesimerkkejä on useilta aloilta, joista lääketiede on yksi mielenkiintoisimmista.

Suuri mielenkiinnon kohde lääketieteen alalla on kybernetiikka. Alalla tutkitaan biologisia metodeja ja luonnossa ilmeneviä systeemejä yhdistettynä tekniikkaan. Potentiaalina alalla on luoda ihmiskehon osia ja elimiä, joiden ominaisuudet vastaavat ihmisten omia elimiä tai ovat parempia. 3D-tulostuksella nähdään olevan edellytykset tällä tieteen alueella, esimerkkinä solujen syöttäminen monimutkaisiin 3D-rakenteisiin. [22.]

Princetonin ja John Hopkinsin yliopistojen tutkijat ovat 3D-tulostaneet kuvassa 12 kuvatun bionisen korvan yhdistämällä biologiset, rakenteelliset ja elektroniset osat. Silikoni muodostaa korvan rakenteen, johon syötetään soluja, ja hopeananohiukkasmassasta luodaan johtava kela, joka toimii vastaanottavana antennina havaiten elektromagneettisia signaaleja radiotaajuusalueella. Tulostimena valmistuksessa oli kolmipäinen pursotustekniikkaa käyttävä kaupallinen 3D-tulostin. [22.]



Kuva 12. CAD-malli tulostettavasta korvasta (A). Solut, silikoni ja hopea nanohiukkasmassaa (B). Alapuolella pursotustekniikkaa käyttävä Fab@Home-3D-tulostin. Miltä tulostettu korva oletettavasti näyttää (C). [22.]

Warwickin yliopistossa Englannissa tutkijat ovat kehittäneet tohtori Simon J. Leighin johdolla sähköä johtavan aineen nimeltä Carbomorph. Se on yhdistelmä PCL-muovia (Polycaprolactone) ja Carbon Black -nimistä materiaalia, joka on hiilen amorfinen muoto. Tutkijat tulostivat materiaalia FDM-tekniikkaa käyttävällä BFB3000-nimisellä 3D-tulostimella. Tulostamalla valmistettiin erilaisia sensoreita, jotka tunnistivat niihin kohdistettua räsitusta painettaessa ja taivutettaessa. Kokeen tarkoituksena oli valmistaa 3D-tulostettava, edullinen ja helposti saatavilla oleva materiaali. Materiaalin tarkoitus on korvata kalliimpia, sähköä johtavia materiaaleja, kuten hopeaa, jota on hankala tulostaa pursotustekniikalla. [23.]

### 3 Proof of concept

Proof of concept eli demonstraatio, jonka tehtävä on vahvistaa konseptin tai teorian toimivuus tosielämän sovelluksena. POC:n määritelmät ja tavoitteet vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Yritysmaailmassa POC on käsite, jolla pyritään osoittamaan potentiaalisille sijoittajille yrityksen, tuotteen tai palvelun taloudellinen kannattavuus. Teknologiassa ja insinöörisovelluksissa POC:na pidetään yleensä konseptia, joka todistaa esitetyn sovelluksen toimivuuden pienessä mittakaavassa. POC on siis prototyyppi, joka suunnitellaan määrittämään toteutettavuus, mutta ei toimittamaan lopullista tuotetta. POC:iin on aina määriteltävä selvästi, mitä sillä todistetaan ja millä asteella. POC:n tulosten on aina oltava mitattavissa, jotta niitä voidaan käyttää päätöksentekoprosessissa. [24.]

POC:n tavoitteet on voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Ensimmäinen ryhmä käsittää tavoitteet itse valmistettavalle tuotteelle tai palvelulle. Toinen ryhmä käsittää tavoitteet, jotka kuvaavat POC:n pohjalta, projektin avainhenkilöiden toimesta, tehtäviä toimia [25]. POC:n tavoitteita ovat muun muassa seuraavat:

- POC mahdollistaa
  - tuotteen ominaisuuksien ja kykyjen tutkimisen käytännössä
  - tuotteen ominaisuuksien helpon tutkimisen riskittömässä ympäristössä rajatulla vaivannäöllä.
- POC auttaa
  - projektiryhmän avainhenkilöitä rakentamaan paremman liiketoimintamallin ja vaikuttamaan liiketoiminnan päättäjiin
  - tunnistamaan, kohdistamaan ja poistamaan havaitut haasteet ja riskit
  - vastamaan kysymyksiin tuotantovaiheessa tarvittavaan teknologia-arkkitehtuuriin ja toiminnallisuuteen

- antamaan käytännön perehdytystä ohjaamaan toteutussuunnittelua. [25.]

POC-suoritusprosessi voidaan jakaa kolmeen osaan. Ensimmäinen vaihe on POC-ympäristön perustaminen, jota seuraavat skenaarioiden arviointi ja arvioinnin tulosten tarkastelu. POC-ympäristöä perustettaessa määritellään aluksi laite- ja ohjelmistotarpeet. Laitteiden tehon tulee vastata ohjelmistojen vaatimuksia. Laitteet ja ohjelmistot asennetaan askel askeleelta asennusoppaan mukaisesti. Lopuksi projektiryhmässä keskustellaan ja valitaan skenaarioita ja niiden arvostelukriteerit. Toisessa vaiheessa tuotteen kykyjä ja ominaisuuksia testataan valittujen skenaarioiden puitteissa ja tulokset dokumentoidaan tulosten tarkastelua varten. Kolmannessa vaiheessa määritellään projektin seuraavat askeleet tulosten tarkastelun pohjalta. Tarkastelun kohteita ovat muun muassa alueet, jotka eivät POC:ssa tyydyttäneet, haasteiden sekä riskien tunnistus ja käyttöönottoa vaikeuttavat tekijät. [25.]

Insinööriyössä on tarkoitus valmistaa POC-sovellus, joka yhdistää 3D-tulostuksen ja langattoman virransiirron. Sovellus valmistetaan, jotta sitä päästään tutkimaan käytännössä ja sen toimivuus voidaan todeta helposti. POC-sovellus auttaa havaitsemaan ongelmat tulostus- ja kokoamisvaiheessa, minkä perusteella sovellusta voidaan kehittää.

## 4 Kappaleen valmistus

### 4.1 Työn tausta ja tavoitteet

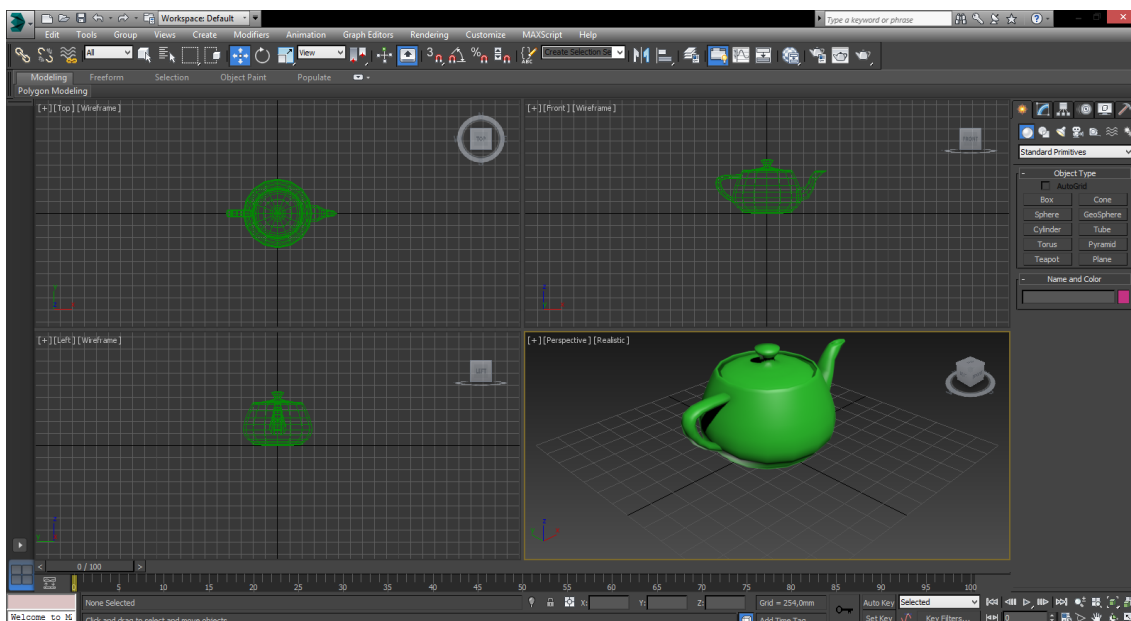
Insinööriyössä tehdyn 3D-tulostustyön tarkoituksena oli valmistaa tuote, jossa yhdistetään 3D-tulostustekniikkaa ja toiminnallisuutta. Työ oli suhteellisen yksinkertainen, pienessä koossa oleva POC-sovellus, jossa 3D-tulostimella tulostettiin runko keskinäisinduktanssia käyttäville kuparikeloille, joiden avulla siirretään virtaa langattomasti virtalähteeltä LED:lle. Työn pääpainona oli 3D-tulostin ja tulostusprosessi, joten langattoman virran siirron fysiikkaa ja teoriaa ei käydä tässä raportissa tarkasti läpi.

Tavoitteena oli valmistaa toimiva sovellus, joka todistaa tekniikoiden yhteensopivuuden. Sovelluksen pohjalta tutkittiin ja ehdotettiin, mitä mahdollisuuksia tekniikoiden yhdistäminen avaa tulevaisuudessa tekniikoiden ja materiaalien kehittyessä. Tavoitteena oli tutkia, mihin tulostimella pystytään sekä mitä rajoituksia ja haasteita tulostimen käyttöön liittyy. 3D-malli tulostettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteen 3D-tulostimella.

### 4.2 Projektissa käytetty laitteisto ja ohjelmistot

Autodesk 3ds Max 2014

Autodesk 3ds Max on ammattimaiseen 3D-mallinnukseen, -animointiin ja -renderöintiin tarkoitettu CAD-ohjelmisto. Sitä käytetään pääasiassa näyttävän 3D-grafiikan tekemiseen muun muassa peli- ja elokuvateollisuudessa. Kuvassa 13 näkyy teekannu Autodesk 3ds Max 2014:n oletusnäkyessä.

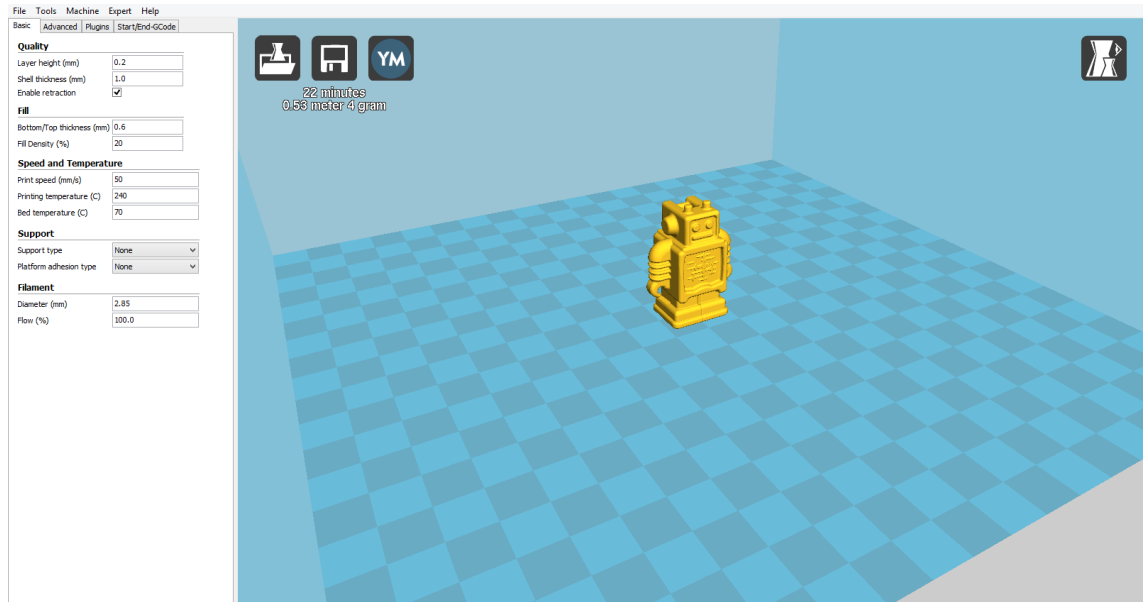


Kuva 13. Autodesk 3ds Max 2014:n oletusnäkömää.

Autodesk 3ds Max 2014 valittiin tämän työn tekemiseen, koska työn tekijällä oli aiempaa kokemusta 3D-mallinnuksesta tällä ohjelmistolla. Autodeskin verkkosivuilta voi ladata ohjelmiston opiskelijaversioon kolmen vuoden lisenssillä, mikä mahdollisti ohjelmiston käytön myös kotona.

## Cura

Cura on Ultimakerin tekemä viipalointiohjelma, jolla CAD-ohjelmistolla suunnitellut ja tallennetut tiedostot muutetaan 3D-tulostimen ymmärtämään muotoon. Cura on kevyt ohjelmisto, joka on ladattavissa Ultimakerin verkkosivuilta. Cura on nopeasti opittava ja helppokäyttöinen sen yksinkertaisen ja selkeän käyttöliittymän ansiosta. Kuvassa 14 on kuvakaappaus Curan aloitusnäkömästä.

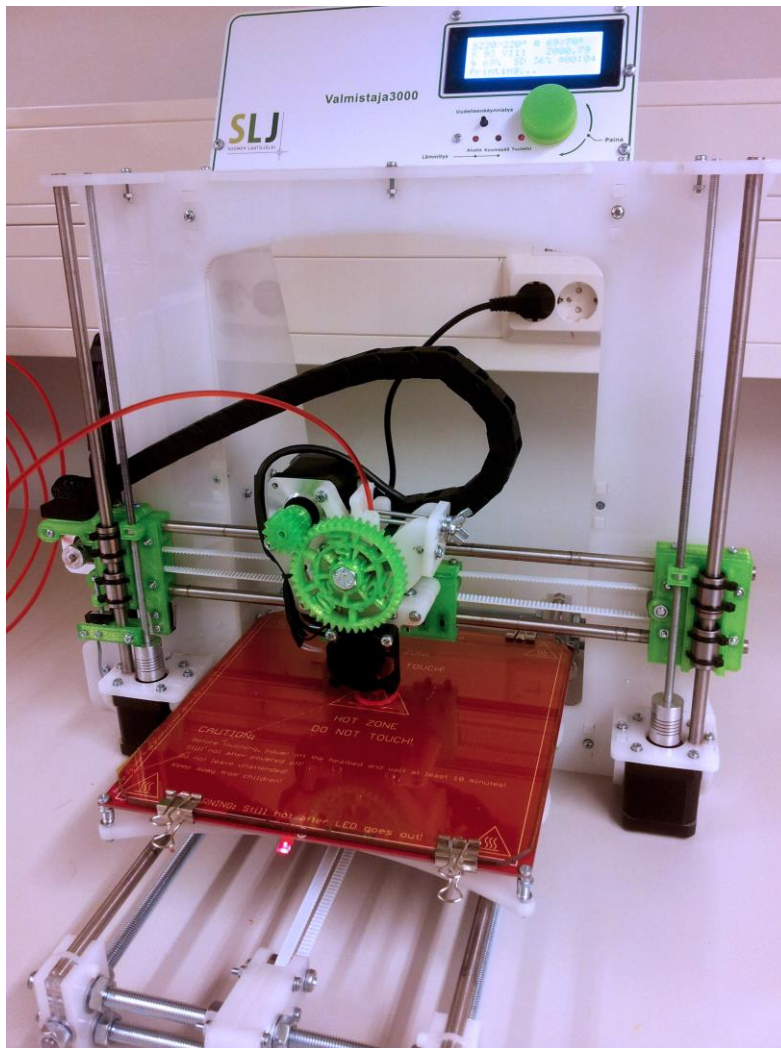


Kuva 14. Curan aloitusnäky. Oikealla on tulostettava esine suurinta mahdollista tulostuskokoa esittävän kuution sisällä. Vasemmalla on välilehtiä, joista säädetään tulostuksen asetuksia.

Cura valittiin viipalointiohjelmaksi sen helppokäyttöisyyden ja työssä käytetyn 3D-tulostimen toimittajan suosituksen perusteella. Ohjelma on ilmainen, mikä mahdollisti sen käytön myös kotikoneella.

### Valmistaja 3000

Valmistaja 3000 (kuva 15) on työssä käytetty 3D-tulostin. Valmistaja 3000 on Suomen Laatuajäljen valmistama tulostin, joka käyttää FDM-tulostustekniikkaa. Tulostin on Metropolian Leppävaaran toimipisteessä, jossa 3D-tulostamiseen liittyvä testaus ja itse työ tehtiin.



Kuva 15. Pursotustekniikkaa käyttävä Valmistaja 3000-3D-tulostin.

Tulostin on melko pieni, yksityis- tai opetuskäyttöön soveltuva laite. Suurin mahdollinen tulostuskoko on 200 x 200 x 150 mm, joka riitti mainiosti tämän työn puitteissa. Tulostimen osat ovat selitettynä Valmistaja 3000:n käyttöohjeessa (liite 1, kohta 1).

#### 4.3 Valmistaja 3000:n asettamat rajoitukset

Valmistaja 3000:n, tulostettavan kappaleen ulkomuotoon ja yksityiskohtien tarkkuuteen, asettamat rajoitukset selvitettiin pääosin testaamalla. Tulostettavien materiaalien tutkintaan käytettiin etsittyä tietoa ja Valmistaja 3000:n ohjekirjaa (liite 1). Valmistaja 3000-3D-tulostimella voi tulostaa kahta eri muovia, PLA:a ja ABS:a. PLA on tärkkelypohjainen, biologisesti hajoava kestmuovi. PLA:n yleinen tulostuslämpötila on 180–230 celciusastetta, eikä siitä tulostettaessa irtoa hajua tai haitallisia kaasuja.



PLA:sta tulostetut kappaleet ovat suhteellisen kestäviä, mutta eivät siedä kuumuutta. PLA valittiin materiaaliksi tähän työhön, koska sovellus ei joudu sietämään kuumuutta, ja PLA:a oli saatavilla runsaasti. [26.]

ABS on puolestaan öljypohjainen muovi, jonka valmistamiseen käytetään raakaöljyä. ABS on PLA:a kestävämpi, ja ABS:a käytetäänkin paljon teollisuudessa. ABS:n tulostuslämpötila on noin 210–260 celsiusastetta. Lämmitessään ABS tuottaa haitallisia kaasuja, joten ilmanvaihdosta on huolehdittava tulostettaessa. [26.]

Kuten kaikilla muillakin FDM-tekniikkaa käyttävillä 3D-tulostimilla, onttojen ja tyhjän päällä roikkuvien osien tulostaminen on hankalaa, ellei mahdotonta. Purostettavan kerroksen alla on oltava aina tarttumispintaa, joko edellinen tulostettu kerros tai tukimateriaalia, joka poistetaan jälkeensä valmiista kappaleesta. Tukipintojen käyttö lisää materiaalin kulutusta ja tulostusaikaa. Valmistaja 3000 pystyy tulostamaan 45 asteen kulmassa, jolloin pursotettava kerros on puoliksi edellisen kerroksen päällä ja puoliksi ilmassa.

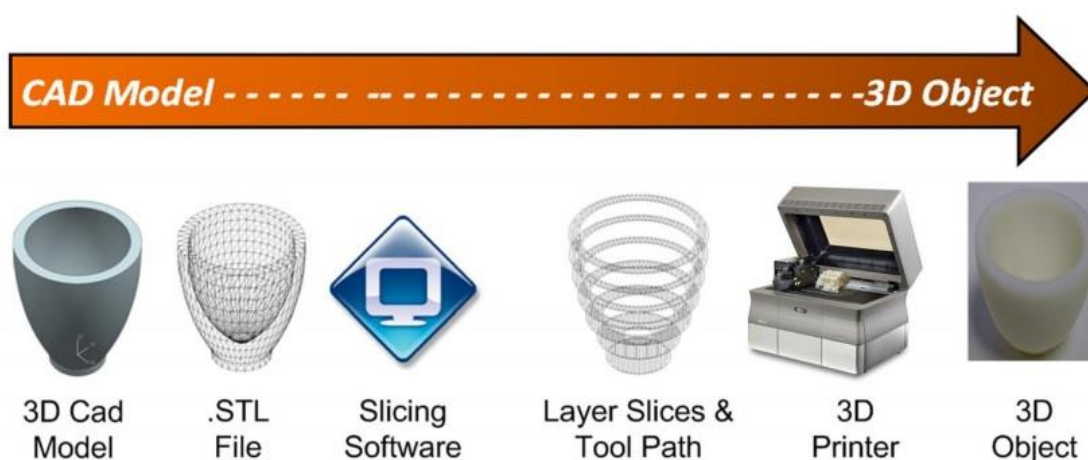
Tulostettaessa hyvin ohuita ja korkeita muotoja pursotettavan muovin jäähtyminen on ongelma. Tulostimen alkaessa pursottaa seuraavaa kerrosta vielä jäähtymättömän kerroksen päälle materiaali puuroutuu. Muutaman tällaisen kerroksen jälkeen koko malli menee pilalle. Ongelmaa voidaan hillitä pienentämällä kerroksen tulostusnopeutta, jolloin edelliselle kerrokselle jää kauemmin aikaa jäähtyä. Tulostusnopeus säädetään aluksi viipalointiohjelmassa, ja tulostuksen aikana sitä voidaan muuttaa tulostimen ohjauspaneelista. Tämä ei kuitenkaan ratkaise ongelmaa täysin, joten ohuita ja korkeita pintoja tulee välttää.

Kerros-paksuus rajoittaa yksityiskohtien tarkkuutta. Kerros-paksuudesta johtuen kappaleeseen jää kerrokset, jotka näkyvät selvästi läheltä katsottaessa. Selvimmin kerrokset näkyvät pyöreissä pinnoissa. Tarkempaa jälkeä saa käyttämällä ohuempaa tulostus-paksuutta, joka on säädettävissä viipalointiohjelmalla. Ohuempi kerros-paksuus pidentää kuitenkin tulostusaikaa huomattavasti ja saattaa muutoin huonontaa tulostus-jälkeä. Kerros-paksuuden oletuksena pitäminen on varmin tapa saada tasaista jälkeä.

Parhaan tuloksen saa siis suunnittelemalla kappaleen yksinkertaiseksi, ei onttoja kohtia sisältäväksi. Yksityiskohdat tulee rajoittaa mahdollisimman vähiin. Tällä varmistetaan kappaleen tasainen laatu ja mahdollisimman lyhyt tulostusaika.

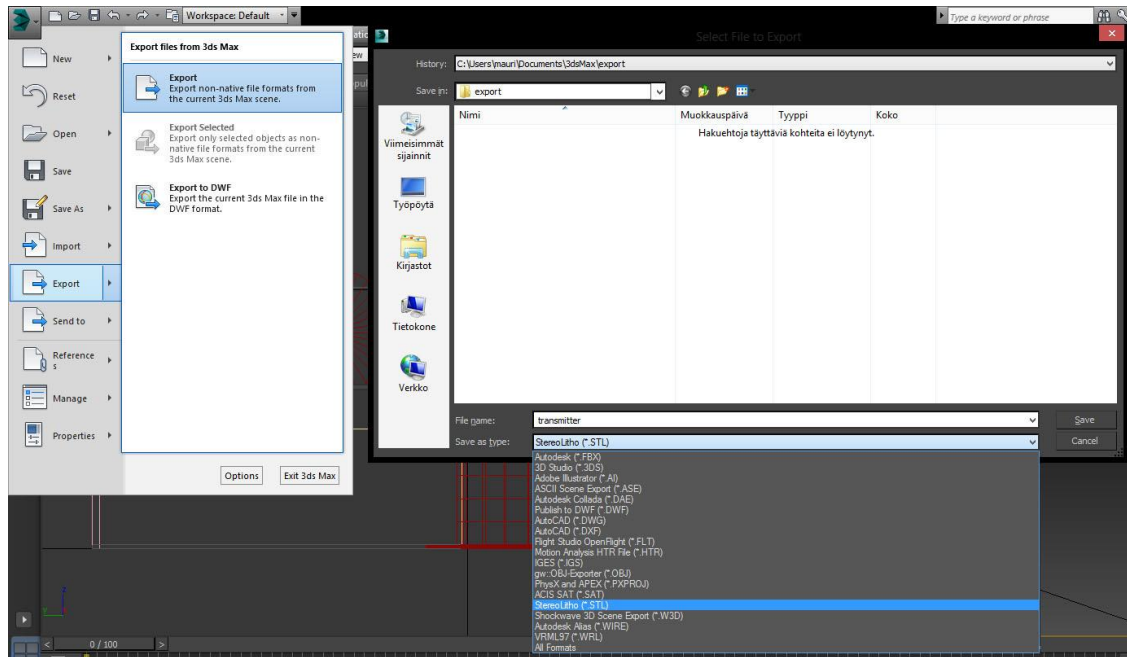
#### 4.4 Mallinnus- ja tulostusprosessi

Valmistettavan tuotteen suunnittelu- ja tulostusprosessi voidaan katsoa kolmivaiheiseksi. Vaiheet ovat CAD-ohjelmalla tehty 3D-mallinnus, viipalemallin teko 3D-mallista ja tulostus 3D-tulostimella, kuvan 16 havainnollistamalla tavalla.



Kuva 16. Mallinnus- ja tulostusprosessin vaiheet suunnittelusta valmiiseen tuotteeseen [10].

Mallinnus tehtiin Valmistaja 3000:n asettamien rajoitusten ja tulostukseen upotettavien osien mittojen perusteella. Mallinnukseen käytetty aika oli tämän projektin osalta suhteellisen pieni, sillä malli oli hyvin yksinkertainen. Eniten huomiota ja testaamista kappaleen mallinnuksessa käytettiin sopivan seinäpaksuuden löytämiseksi. Seinäpaksuuden tuli olla riittävä, jotta kappale ei hajoa, ja toisaalta riittävän ohut, ettei se huononna kappaleen sisään upotettujen kuparikelojen välistä magneettikenttää. Valmis 3D-malli tulee tallentaa STL-muotoon, jolloin se voidaan avata viipalointiohjelmalla. Autodesk 3ds Maxissa tiedoston STL-muotoon tallentaminen onnistuu Export-toiminnolla kuvan 17 esittämällä tavalla.

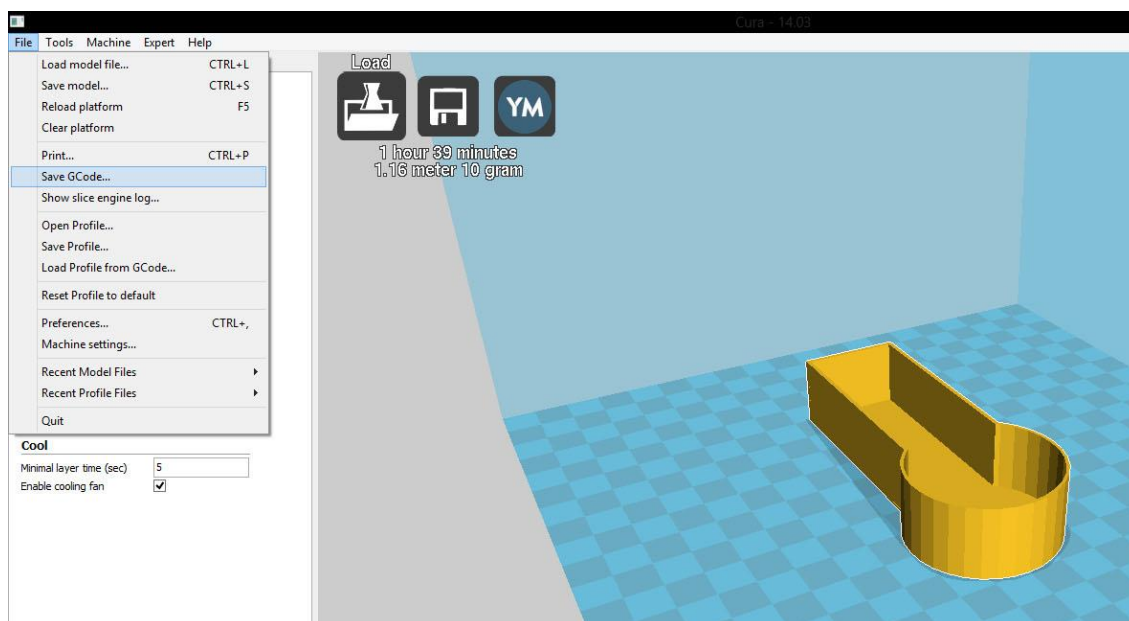


Kuva 17. Autodesk 3ds Max -ohjelmistossa STL-formaattiin tallentaminen onnistuu Export-toiminnolla.

STL-formaattiin tallennetun tiedoston muokkaaminen viipalointiohjelmalla oli helpoin ja vähiten aikaa vievä työvaihe, mutta muutamia muutoksia kuitenkin vaadittiin, ennen kuin kappaleesta tehtiin viipalemalli. Curan käyttöliittymässä mallin muokkaukseen tarvittavat välilehdet ovat vasemmalla. Seuraavat toimenpiteet oli tehtävä ennen viipalemallin tallentamista:

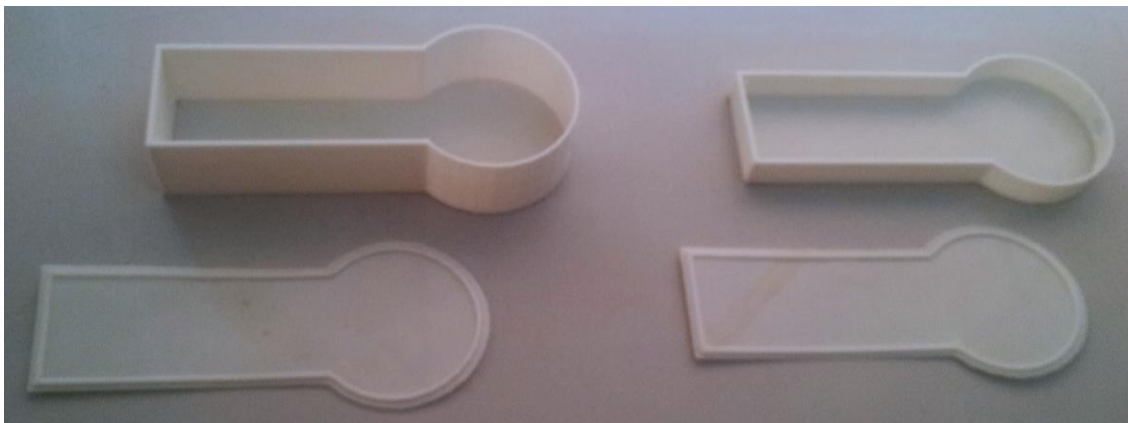
- Machine-valikosta valittiin Machine settings, jonka Machine center 0,0-kohdasta otettiin rasti pois, jotta Valmistaja 3000 tulosti mallin keskelle tulostusalustaa.
- Start/End-Gcode-välilehdeltä alku- ja loppukoodit vaihdettiin Valmistaja 3000:n käyttöohjeessa ilmoitettuihin koodeihin, jotka löytyvät liitteen 1 sivulta 20.
- Basic-välilehdeltä käytetyn PLA-langan paksuus (Filament diameter) vaihdettiin vastaamaan oikeaa.
- Advanced-välilehdeltä alimman kerroksen paksuuden (Initial layer thickness) arvo vaihdettiin lukuun 0.0, jolloin se oli yhtä paksu kuin muut kerrokset.

Jos pohjakerros on paksumpi kuin kolme neljäsosaa tulostimen suuttimen koosta, tulostuksen laatu kärsii eikä sitä suositella. Pohjakerroksen paksuuden ollessa suositellun alueen ulkopuolella ohjelma ilmoittaa siitä korostamalla Initial layer thickness -kohdan keltaisella. Negatiivisena puolena ohjelmassa oli avatun mallin koko. Malli aukesi aina hyvin pienenä, joten sen alkuperäisten mittojen tietäminen oli ehdotonta, jotta malli saatiin skaalattua oikean kokoiseksi. Valmiista mallista tehtiin viipalekuva eli se tallennettiin G-code-muotoon kuvan 18 indikoimalla tavalla.



Kuva 18. Kappaleesta tulee tehdä viipalemalli, jotta 3D-tulostin pystyy sen tulostamaan.

Useat 3D-tulostimet saadaan kytkettyä tietokoneeseen USB-kaapelilla, jonka avulla tulostus onnistuu suoraan viipalointiohjelmasta eikä Gcodea tarvita. Tulostus Valmistaja 3000:lla onnistuu kuitenkin ainoastaan SD-muistikortin kautta, joten G-code-tiedosto siirrettiin muistikortille tulostusta varten. Tulostus käynnistettiin Valmistaja 3000:n ohjauspaneelista. Neljän osan, jotka näkyvät valmiina kuvassa 19, tulostamiseen meni noin kolme tuntia.



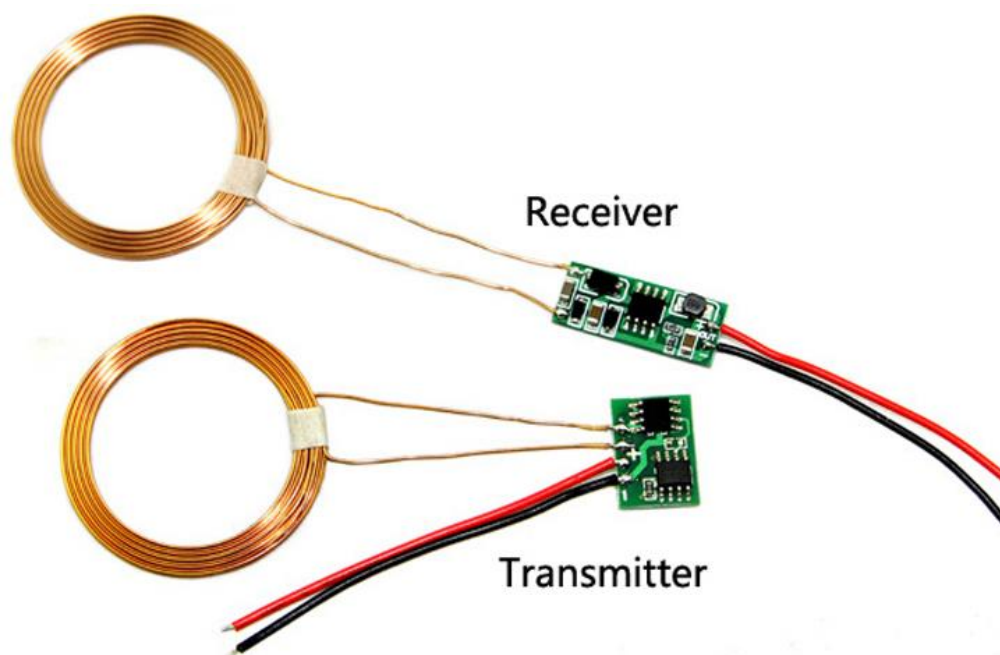
Kuva 19. Valmistaja 3000:lla tulostetut osat: kaksi erikorkuista runkoa, lähettimelle ja vastaanottimelle, sekä molempien kannet.

Tulostettaessa ei varsinaisesti tarvinnut tehdä muuta kuin valvoa konetta, että tulostusjälki pysyy hyvänä. Ajoittain tulostusnopeutta laskettiin 100 prosentista noin 75 prosenttiin, jotta edellinen kerros ehti jäähtyä tarpeeksi. Myös PLA-langan syöttöä kelalta koneelle valvottiin, ettei se mennyt solmuun ja katkennut.

#### Keskinäisinduktanssi ja langaton virransiirto

Keskinäisinduktanssi on sähkömagneettinen suure, joka mittaa kahden johtimen, kuten kuparilankakelojen, välistä magneettisen vuorovaikutuksen voimakkuutta. Lähettävä kela kytketään virtalähteeseen, joka tässä työssä oli 9 V:n paristo. Lähettävä kela muodostaa ympärilleen säteilemättömän magneettikentän, joka värähtelee MHz-taajuuksilla. Vastaanottava kela resonoi lähettävän kelan kanssa, ja virta siirtyy vastaanottavalle kelalle. Tässä työssä siirtynyttä virtaa havainnollistettiin vastaanottavaan kelaan juotetulla LED-valolla. Magneettikentän käytön hyöty verrattuna sähkömagneettisiin aaltoihin on tehokkuus. Vaikka lähtevä virta ei saavuta vastaanotinta, energia pysyy sitoutuneena lähettäjään eikä säteile ympäristöön. [27.]

Projektissa käytettiin kuvassa 20 olevaa valmista sovellusta, koska piirilevyt ovat siinä jo koottuja ja se sopi kokonsa puolesta mainiosti POC-sovellukseen [28].



Kuva 20. Virta siirtyy lähettimeltä langattomasti vastaanottimelle kuparikelojen ollessa lähellä [28].

Lähettimen (Transmitter) johtoihin kiinnitettiin liitin, johon 9V paristo saadaan kiinni ja vastaanottimen (Receiver) johtoihin juotettiin vastus ja yksi LED-valo. Näin pienellä sovelluksella langattoman virran suurin siirtoetäisyys on ainoastaan noin 2 senttimetriä. Etäisyyttä voidaan kasvattaa lisäämällä kuparilankaa keloihin. Tätä toimenpidettä ei ryhdytty tekemään tämän projektin puitteissa, sillä se olisi vaatinut alkuperäisten kelojen purkamista tai vaihtamista sekä mahdollisesti piirilevyjen muokkausta.

#### Kokoaminen ja viimeistely

Kun lähettimeen ja vastaanottimeen oli juotettu tarvittavat osat, ne upotettiin tulostettuihin runkoihin. Ongelmia tuotti lähettimen mahdolluttaminen runkoon, koska paristo vei suuren osan tilasta. Kannet eivät pysyneet kiinni tulostetuissa urissa painamalla, joten ne jouduttiin liimaamaan, mikä hankaloittaa pariston vaihtamista. Kuvassa 21 on valmis sovellus ja suurin mahdollinen kantoetäisyys, millä virta saadaan siirrettyä LED:lle.



Kuva 21. Valmis kappale, jossa virta siirtyy langattomasti lähettimeltä vastaanottimelle.

#### 4.5 Projektissa kohdatut ongelmat

Tulostettaessa testikappaletta tulostin pursotti alustalle harsomaista jälkeä, kuten kuvasta 22 ilmenee. Tämä johtui siitä, että kuumapää oli liian lähellä tulostusalustaa, jolloin pursotettava muovi ei mahtunut kunnolla ulos kuumapästä ja katkeili jatkuvasti. Ongelma oli korjattavissa kalibroimalla alusta uudelleen. Kalibrointi tehdään mekaanisesti ruuveja kiertämällä, ja se tulee suorittaa alustan jokaisessa nurkassa. Tarkat ohjeet alustan kalibrointiin ovat liitteen 1 kohdassa 4. Kalibrointi on tehtävä välittömästi, sillä ongelma johtaa helposti myös kuumapään tukkeutumiseen.





Kuva 22. Tulostusjälki harsottuu ja hajoaa, jos kuumapää on liian lähellä alustaa.

Valmistaja 3000:ssa on pysäytä-jatka-toiminto. Toiminto on hyödyllinen, jos tulostuksen aikana halutaan upottaa tulostettavaan kappaleeseen jotain manuaalisesti. Ongelmana on kuitenkin pursotuksen vähäinen jatkuminen pysäytyksen aikana. Mitä kauemmin tulostus on keskeytetty, sitä suurempaa muovipalloa tulostin kerää pysäytettyyn kohtaan. Kuvan 23 vasemmanpuoleisessa osakuvassa näkyy pallo kello 10:n kohdalla, johon tulostus pysäytettiin hetkeksi. Oikeanpuoleisen osakuvan kappaleessa tulostus keskeytettiin yli minuutin ajaksi noin puolessavälissä tulostettavaa kappaletta. Jatkettaessa tulostusta kuumapää hyppäsi jokaisella kerroksella pallon yli, jolloin seuraksena oli hajonnut tulostusjälki seuraavilla kerroksilla. Tulostusjälki kuitenkin tasoittui useita kerroksia myöhemmin, kuten kuvasta 23 näkyy. Väliin jääneet hajonneet kerrokset huonontavat kappaleen kestävyyttä ja tekevät ulkonäöstä ruman. Ongelman voi ratkaista lisäämällä malliin suunnitteluvaiheessa ”dummy”, osan, joka on erillään halutusta kappaleesta. Tulostus pysäytetään silloin, kun tulostin on rakentamassa dummya, jolloin halutun kappaleen laatu ei kärsi. Tämä kuitenkin pidentää hieman tulostusaikaa ja kuluttaa enemmän tulostusmateriaalia.





Kuva 23. Vasemmanpuoleisessa osakuvassa tulostuksen pysäytys näkyy pallona kello 10:n kohdalla. Oikeanpuoleisessa osakuvassa näkyy seuraus, kun tulostus pysäytetään keskellä tulostettavaa kappaletta.

Valmistaja 3000 kytketään päälle laittamalla pistoke rasiaan, ja pois päältä luonnollisesti irrottamalla pistoke rasiasta. Tulostinta ei saa kytkettyä valmiustilaan tai pois päältä napilla. Tulostimen virtalähde rikkoutui virtapiikin vuoksi rasiasta kytkettäessä. Projektin tulostustöiden tekeminen viivästyi viikolla uutta virtalähdettä odottaessa. Virtalähde on kiinnitettynä tulostimen runkoon neljällä ruuvilla ja piirilevyn neljällä johdolla. Virtalähteen edessä ei ole muita osia, joten sen vaihto onnistui kymmenessä minuutissa. Kehitysehdotuksena tulostimeen olisikin ylijännitesuojan lisääminen vastaavien vahinkojen estämiseksi.

#### 4.6 Tulokset ja kehityskohteet

Projektin lopputulos vastasi hyvin pitkälti odotettua. Valmis sovellus toimii tavoitteiden mukaisesti, ja se todistaa 3D-tulostuksen ja langattoman virransiirron yhdistämisen mahdollisuuden. Virta saadaan siirrettyä langattomasti paristolta LEDille, eikä magneettikenttä heikkene PLA-muovista tulostetun rungon takia.

Yllättävää projektissa oli 3D-tulostimen rajoitteellisuus. Valmistaja 3000 ei pystynyt tulostamaan niin monimutkaisia malleja, kuin oli odotettu. Projektin aikana opittiin tärkeää tietoa kolmiulotteisesta tulostamisesta FDM-tekniikalla Valmistaja 3000 -tulostimella. Projektin myötä opittiin ennaltaehkäisemään tulostettaessa ilmeneviä

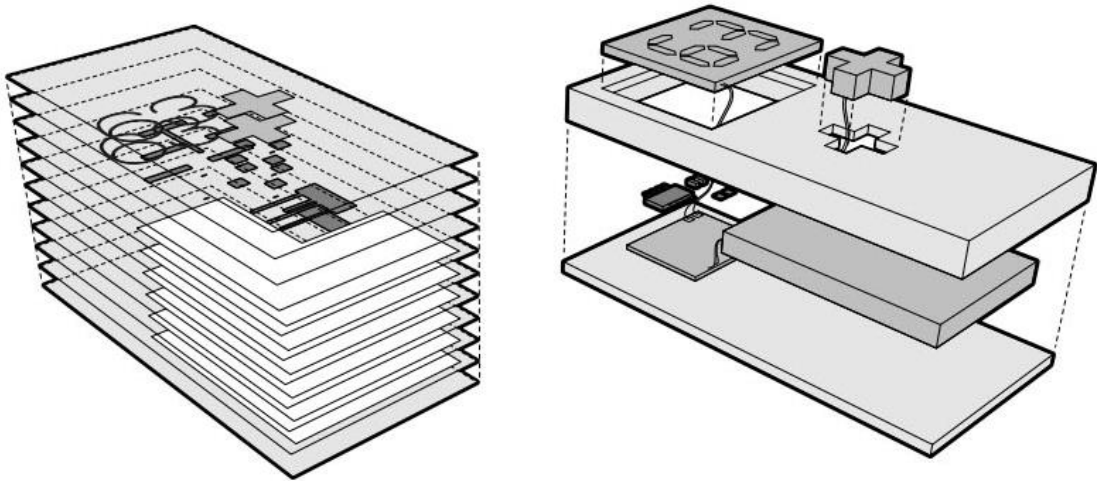
ongelmia ja reagoimaan niiden ilmetessä tulostuksen aikana. Tämän projektin pohjalta onkin hyvä pohtia lisäävän valmistuksen ja langattoman virransiirron yhdistämistä sekä tekniikoihin liittyviä mahdollisuuksia ja kehityskohteita.

Lisäävän valmistuksen menetelmillä voidaan nykyään tuottaa lukuisia erilaisia tuotteita. Tulevaisuuden kuvissa lisäävän valmistuksen on arveltu pystyvän lähes minkä tahansa tuotteen ja materiaalin tulostamiseen, ja osassa kirjoituksista 3D-tulostusta on kutsuttu jopa kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi. [29.]

Tämän työn puitteissa ei esitellä mahdollisia tulevaisuuden sovelluksia, vaan keskitytään muutamiin asioihin, joiden kehittäminen edesauttaisi lisäävän valmistuksen asemaa. Työssä esitellään lisäävän valmistuksen perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna suurin mahdollisuus, joka on valmistusvaiheen yksinkertaisuus, sekä se, mitä sen kehittämällä voidaan tulevaisuudessa saavuttaa. Pohdinnan kohteena on myös lisäävän valmistuksen ja nanohiukkasmateriaalien liitto, joka veisi toiminnallisuuden, kuten langattoman virransiirron, 3D-tulostamisen uudelle tasolle. Työssä otetaan kantaa siihen, miten CAD-ohjelmistojen tulee kehittyä, jotta lisäävä valmistus voisi yleistyä.

Tulostettu, ei koottu

Lisäävän valmistuksen suurin tavoite tulevaisuudessa on kokoamisvaiheen poistaminen valmistusprosessista. Tämä tarkoittaa, että aktiiviset komponentit tulostetaan kerros kerrokselta, sen sijaan että ne kootaan osakomponenteista, kuten perinteisissä valmistusmenetelmissä, mitä kuvan 24 oikeanpuoleinen osakuva esittää. [30.]



Kuva 24. Vasemmanpuoleisessa osakuvassa kappale on kokonaan tulostettu, kun oikeanpuoleisessa osakuvassa kappale on koottu eri osista [30].

Kuvan 24 vasemmanpuoleinen osakuva näyttää, kuinka aktiivisen komponentin voisi valmistaa yhdellä tulostuskerralla ilman kokoamisen tarvetta. Valmistettaessa voitaisiin tulostaa rakenteita toisten rakenteiden sisälle yhdistäen optisia ja mekaanisia kokonaisuuksia. Tähän ei vielä lisäävän valmistuksen menetelmillä kyetä, ja tämä tavoite vaatiikin laitteiston ja tulostettavien materiaalien kehitystä. Hyödyt teollisuudessa olisivat kuitenkin kiistämättömät. Kokonaan tulostetut kappaleet vähentäisivät erillisten osien määrää yksinkertaistaen toimitusketjua ja poistaisivat kokoamiseen menevät työvoimakulut. [30.]

#### Lisäävä valmistus ja nanoteknologia

Suppea materiaalien määrä on yksi keskeisimmistä esteistä monimutkaisempien kappaleiden 3D-tulostukseen. Suurin osa tällä hetkellä tulostuksessa käytettävistä materiaaleista on patentoituja polymeerejä, ja joillakin lisäävän valmistuksen tekniikoilla on mahdollisuus käyttää joitakin metalleja ja keraamisia aineita. Nanoteknologia tarjoaa mahdollisuuden edistää 3D-tulostusta muokkaamalla materiaalien perusominaisuuksia. Nanomittakaavassa aineet käyttäytyvät eri tavalla kuin massana ja voivat omata ainutlaatuisia optisia, sähkökemiallisia ja lämpöominaisuuksia, kuten taulukko 1 esittää sähkönjohtavuuden osalta. Näitä voidaan käyttää sovelluksissa sellaisilla alueilla kuin tunnistus (sensing), erottaminen (separation), nanoelektroniikka (nanoelectronics) ja diagnostiikka (diagnostics). [2.]

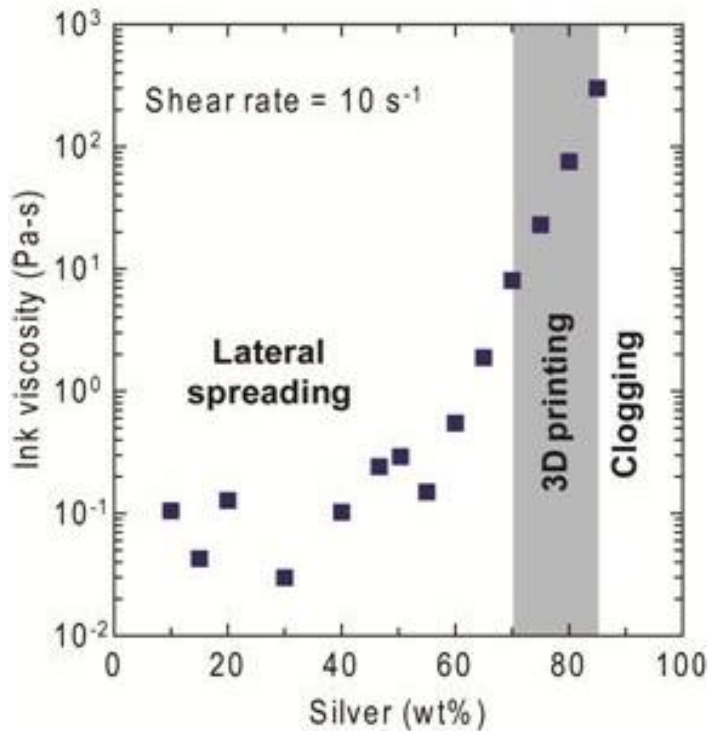
Taulukko 1. Metallinanohiukkasten sähkönjohtavuus verrattuna metallimassaan [5].

Metalli	Massan sähkönjohtavuus ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	Nanohiukkasten sähkönjohtavuus ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )
Hopea	1,6	2
Kupari	1,7	5
Alumiini	2,8	5
Nikkeli	7,0	20

Tällä hetkellä mielenkiinnon kohteena lisäävässä valmistuksessa käytettäviksi materiaaleiksi ovat metallinanohiukkaset, hiilinanoputket ja grafeeni, keraamiset ja puolijohdenanohiukkaset. Nanomateriaalien ja lisäävän valmistuksen yhdistämisessä on tutkittu lähinnä kuinka nanomateriaalit vaikuttavan tulostettavan kappaleen ominaisuuksiin, kuten kappaleen lujuuteen, mistä taulukko liitteessä 2 antaa tarkempaa tietoa. Seuraava askel on luonnollisesti nanomateriaalien käyttö toiminnallisuuteen. Useampien nanomateriaalien yhdistäminen 3D-tulostuksessa auttaisi siirtymään yksinkertaisista objekteista monimutkaisiin kappaleisiin, kuten aurinkokennoihin tai akkuihin, jotka avaisivat mahdollisuuksia myös langattoman virransiirron käytössä. [2.]

Vaikka nanomateriaalien ja lisäävän valmistuksen liitto kuulostaa lupaavalta, sisältyy siihen vielä monia haasteita. Varsinkin pursotustekniikkaa käyttävissä 3D-tulostustekniikoissa materiaalin kasautuminen on ongelma. Nanohiukkasten kasautuessa ne alkavat käyttäytyä massan tavoin ja menettävät ainutlaatuisia ominaisuuksiaan. Haasteena onkin kehittää materiaaliyhdisteitä, jotka sisältävät orgaanisia yhdyksaineita, jotka pitävät nanohiukkaset erillään vaikuttamatta niiden ominaisuuksiin. Ultraviolettivaloa kovettamiseen käyttävät 3D-tulostustekniikat puolestaan tarvitsevat sopivia nanomateriaaleja, joihin ultraviolettivalon aallonpituus ei vaikuta. [2.]

Toinen haaste pursotustekniikkaa käyttäviä 3D-tulostimia ja nanohiukkasia yhdistettäessä on tulostimen suuttimen tukkeutuminen. Tulostettavan nanomateriaalin ominaisuuksia voidaan säätää vaihtelemalla nanohiukkasten määrää kokonaisuudessaan. Kuitenkin liian ohut materiaali johtaa leviämiseen, jolloin ominaisuudet saattavat kadota ja tulostusjäljestä tulee huonoa, kuten kuvan 25 diagrammista selviää.



Kuva 25. Materiaalin viskositeetti ja hopeananohiukkasten määrän suhde [31].

Nanohiukkasten määrän ollessa puolestaan liian suuri materiaalin viskositeetti (kyky vastustaa virtaamista) kasvaa, jolloin materiaali ei virtaa ulos ja suutin tukkeutuu. Tulostettavia nanomateriaaleja ja 3D-tulostinten suuttimia tulee kehittää, jotta eri ominaisuuksia omaavat materiaalit virtaavat ulos suuttimesta. [31.]

#### CAD-ohjelmistot

CAD-ohjelmistoilla voidaan suunnitella kappaleen ulkoasun suhteen oikeastaan mitä tahansa. Suunnittelijan näkemyksen toteuttamisen esteenä voi kuitenkin olla CAD-ohjelmiston toimintaperiaatteet, mitä kutsutaan termillä *CAD overhead*. Tämä sisältää esimerkiksi yksityiskohtiin ja työnkulkuun liittyviä asioita kuten kappaleen ominaisuuksien järjestys, ristiriidat luonnoksessa ja osien paritusongelmat, jotka ovat tyypillisiä CAD-ohjelmistoille, mutta eivät välttämättä insinööritekniikalle. Näiden ominaisuuksien kehittyessä CAD-ohjelmistojen käyttäjät voivat keskittyä enemmän näkemyksensä toteuttamiseen eikä ohjelmiston sääntöihin. Tämä helpottaa ohjelmiston käyttöä, jolloin alottelijatkin voivat työskennellä asiantuntijoiden tavoin. [32.]

Kun CAD-ohjelmistoilla suunnitellaan tuotteita teollisuudelle, luonnollisena kehityskohteena on insinöörianalyysien yhdistäminen suunnitteluun. Tavoitteena on, että CAD-ohjelmistot tekevät kaiken laskentatyön, kuten elementti- ja kustannusanalyysit, sekä valmistettavuuteen ja liikkeeseen liittyviä testejä insinöörin puolesta [32]. 3D-tulostuksen kannalta tämä tarkoittaa muun muassa uusien tiedostoformaattien kehittämistä. Lisäävässä valmistuksessa tällä hetkellä käytettävät formaatit, kuten STL, sisältävät informaatiota ainoastaan kappaleen geometrisista rakenteista. Edistyneempiä, enemmän tietoa sisältäviä tiedostoformaatteja siis tarvitaan, jotta informaatiota toiminnallisista elektroniikkakomponenteista saadaan yhdistettyä 3D-tulostettaviin viipalemalleihin [33].

## 5 Yhteenveto

Lisäävä valmistus on ollut käytössä lähinnä ainoastaan teollisuudessa proto- ja testikappaleiden tulostamisessa. Viime vuosien aikana lisäävä valmistus on alkanut nousta myös yksityiskäytössä edullisempien ja pienempikokoisten 3D-tulostinten ansiosta. 3D-tulostus on herättänyt paljon mielenkiintoa ja saanut osakseen kiivasta keskustelua mediassa potentiaalisena perinteisten valmistusmenetelmien syrjäyttäjänä. Monien, vielä teoriassa toimivien hyötyjen lisäksi 3D-tulostukseen liittyy suuria haasteita, jotka tulee ratkaista, ennen kuin se voi yleistyä.

Lisäävän valmistuksen tekniikoiden noususta on kuitenkin näyttöä. Esimerkiksi lääketieteen alalla 3D-tulostusta käytetään kasvavissa määrin. Yksityiskäytössä todisteita ovat yhteisöprojektit uusien 3D-tulostinten rakentamiseksi sekä verkkopalvelut, jotka tarjoavat 3D-malleja myytäväksi ja tulostettavaksi. Tutkimus lisäävän valmistuksen alalla keskittyy tarkastelemaan mahdollisuuksia kohti monimutkaisempia, toiminnallisia 3D-tulosteita, mihin tämäkin opinnäytetyö paneutui.

Opinnäytetyössä saatiin tutkittua Valmistaja 3000:n toimintaan liittyviä rajoitteita ja mahdollisuuksia. Tulostimen rajoitteet liittyivät pääosin tulostettavan kappaleen geometriaan. Tärkeimpänä havaintona oli, että tulostettavasta kappaleesta tulee suunnitella yksinkertainen. Onttoja ja tyhjän päällä roikkuvia muotoja tuli välttää. Kappaleeseen mallinnetut välit sekä ohuet ja korkeat muodot tuottivat ongelmia tulostettaessa. Tulostimella onnistuttiin tulostamaan kuitenkin noin 45 asteen kulmassa nousevia muotoja, mikä mahdollisti muun muassa ympyränmuotoisen reiän jättämisen kappaleen pintaan. Viipalointiohjelman asetukset olivat tärkeitä tulostetun kappaleen lopputuloksen kannalta ja asetuksilla voitiinkin vaikuttaa merkittävästi kappaleen laatuun ja tulostusaikaan.

Suunniteltu sovellus saatiin onnistuneesti valmiiksi. Valmistaja 3000:lla tulostettuun runkoon upotettu sovellus toimi suunnitellulla tavalla, minkä pohjalta voitiin ehdottaa tekniikoiden tulevaisuuden näkymiä. Projektin aikana saatiin tärkeää kokemusta pursotustekniikalla tulostamisesta, kuten oli tavoitteenakin. Opinnäytetyön tekeminen oli minulle kokonaisuudessaan mielenkiintoinen projekti, jossa pääsin yhdistämään kahta tekniikan alaa, joista ennestään oli tietoa ainoastaan teoriassa. Projektia tehdessäni sain arvokasta tietoa 3D-tulostamisprosessista niin teoriassa kuin käytännössäkin, ja uskonkin syventäväni alaan tulevaisuudessa.

## Lähteet

- 1 Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. 2010. Rapid Prototyping: Principles and Applications 3<sup>rd</sup> Edition. World Scientific.
- 2 Ivanova, O. S.; Williams, C. B.; Campbell, T. A. 2011. Additive Manufacturing (AM) and Nanotechnology: Promises and Challenges. Verkkodokumentti. <<http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2011/2011-56-Ivanova.pdf>>. Luettu 30.1.2014.
- 3 3D Printing. 2008. Verkkodokumentti. Custompart.net. <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>. Luettu 7.2.2014.
- 4 Moilanen, Jarkko. 2012. Manufacturing in Motion: First Survey on 3D Printing Community. Verkkodokumentti. <<http://surveys.peerproduction.net/2012/05/manufacturing-in-motion/3/>>. Luettu 9.2.2014.
- 5 Joshi, P. C.; Dehoff, R. R.; Duty, C. E.; Peter, W. H.; Ott, R. D.; Love, L. J.; Blue, C. A. 2012. Direct Digital Additive Manufacturing Technologies: Path Towards Hybrid Integration. Verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6378353&tag=1>>. Luettu 4.2.2014.
- 6 Zein, I.; Hutmacher, D. W.; Tan, K. C.; Teoh, S. H. 2001. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. Verkkodokumentti. <[http://www.researchgate.net/publication/11566602\\_Fused\\_deposition\\_modeling\\_of\\_novel\\_scaffold\\_architectures\\_for\\_tissue\\_engineering\\_applications/file/79e4150b6c0a55bbcd.pdf](http://www.researchgate.net/publication/11566602_Fused_deposition_modeling_of_novel_scaffold_architectures_for_tissue_engineering_applications/file/79e4150b6c0a55bbcd.pdf)>. Luettu 11.2.2014.
- 7 Fused Filament Fabrication. 2014. Verkkodokumentti. RepRap. <[http://reprap.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication)>. Luettu 24.2.2014.
- 8 Brian, Marshall. 2011. How Stereolithography 3-D Layering Works. Verkkodokumentti. <<http://computer.howstuffworks.com/stereolith4.htm>>. Luettu 24.2.2014.
- 9 Selective Laser Sintering. Verkkodokumentti. Custompart.net. <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>. Luettu 24.2.2014.
- 10 Drummer, Dietmar; Williams Christopher. 2013. Additive Manufacturing. Verkkodokumentti. <<http://www.naefrontiers.org/File.aspx?id=39127>>. Luettu 19.2.2014.
- 11 Wohlers, T. 2009. Wohlers Report. Wohlers Associates, Inc.



- 12 NASA. 3D Printed Rover Parts. Verkkodokumentti. Stratasys.com. <<http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/nasa-mars-rover>>. Luettu 11.2.2014.
- 13 Bell Helicopter. Real Solution. Verkkodokumentti. Stratasys.com. <<http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/bell-helicopter>>. Luettu 12.2.2014.
- 14 Paulsen, J. A.; Renn, M; Plourde, R; Christenson, K. 2012. Printing Conformal Electronics on 3D Structures with Aerosol Jet Technology. Verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6378343>>. Luettu 4.2.2014.
- 15 Automotive Case Studies. Prototyping is the driving force behind great cars. Verkkodokumentti. Stratasys.com. <<http://www.stratasys.com/resources/case-studies/automotive>>. Luettu 14.2.2014.
- 16 Bargmann, Joe. 2013. Urbee 2, the 3D-Printed Car That Will Drive Across the Country. Verkkodokumentti. <<http://www.popularmechanics.com/cars/news/industry/urbee-2-the-3d-printed-car-that-will-drive-across-the-country-16119485>>. Luettu 17.2.2014.
- 17 Wile, Rob. 2013. 5 Huge Industries That Are Already Feeling The Effects Of 3-D Printing. Verkkodokumentti. <<http://www.businessinsider.com/five-fields-3-d-printing-is-already-transforming-2013-9>>. Luettu 25.2.2014.
- 18 Banks, Jim. 2013. Adding Value in Additive Manufacturing. Verkkodokumentti. <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6656987>>. Luettu 5.2.2014.
- 19 Mota, Katarina. 2011. The Rise of Personal Fabrication. Verkkodokumentti. <[http://delivery.acm.org/10.1145/2070000/2069665/p279-mota.pdf?ip=195.148.144.60&id=2069665&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=74A0E95D84AAE420%2E504FA65D0F5F15F4%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=328037560&CFTOKEN=26994550&\\_\\_acm\\_\\_=1398623700\\_1499d4f4a96e7ca9ebc473e1c6d5e01e](http://delivery.acm.org/10.1145/2070000/2069665/p279-mota.pdf?ip=195.148.144.60&id=2069665&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=74A0E95D84AAE420%2E504FA65D0F5F15F4%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=328037560&CFTOKEN=26994550&__acm__=1398623700_1499d4f4a96e7ca9ebc473e1c6d5e01e)>. Luettu 6.2.2014.
- 20 Bowyer, A. 2004. Wealth Without Money. Verkkodokumentti. <<http://www.reprap.org/wiki/BackgroundPage>>. Luettu 21.2.2014.
- 21 Stratasys Idea Series. Professional Desktop 3D printers. Verkkodokumentti. Stratasys.com. <<http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series>>. Luettu 12.2.2014.

- 22 Mannoor, M. S.; Jiang, Z.; James, T.; Kong, Y. L.; Malatesta, K. A.; Soboyejo, W. O.; Verma, N.; Gracias, D. H.; McAlpine, M. C. 2013. 3D Printed Bionic Ears. Verkkodokumentti. <<http://pubs.acs.org.ezproxy.metropolia.fi/doi/ipdf/10.1021/nl4007744>>. Luettu 13.2.2014.
- 23 Leigh, S.J.; Bradley, R.J.; Purssell, C.P.; Billson, D.R.; Hutchinds, D.A. 2012. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. Verkkodokumentti. <<http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.metropolia.fi/ehost/detail?vid=4&sid=5b80c6ad-9c75-4bf8-9ffe-2dd77f8dd9af%40sessionmgr4002&hid=4101&bdata=JnNpdGU9ZWVhc3QtbGl2ZQ%3d%3d#db=afh&AN=84716097>>. Luettu 3.2.2014.
- 24 Gottlieb, Seth. 2007. POC, Prototype, or Pilot? When and Why. Verkkodokumentti. <<http://contenthere.net/2007/03/poc-prototype-or-pilot-when-and-why.html>>. Luettu 5.3.2014.
- 25 Proof of Concept. Verkkodokumentti. Systemits.com. <<http://www.systemits.com/en/solutions/data-security/16-site-ingles/paginas-en/institutional/78-proof-of-concept>>. Luettu 5.3.2014.
- 26 Canessa, E.; Fonda, C.; Zennaro, M. 2013. Low-cost 3D printing for Science, Education & Sustainable Development.
- 27 MIT Demonstrates Wireless Power Transfer. 2007. MIT. Verkkodokumentti. <<http://www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070607171130.htm>>. Luettu 14.3.2014.
- 28 DIY Wireless Charging Transmitter + Receiver Solution Module. Verkkodokumentti. dx.com. <[http://www.dx.com/p/diy-wireless-charging-transmitter-receiver-solution-module-green-golden-dc-5-12v-194469#.U11bTPI\\_sd1](http://www.dx.com/p/diy-wireless-charging-transmitter-receiver-solution-module-green-golden-dc-5-12v-194469#.U11bTPI_sd1)>. Luettu 29.3.2014.
- 29 Williams, Christopher. 2014. Gimmicky for now but 3D printing may change future of manufacturing. Verkkodokumentti. <<http://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/industry/10617797/Gimmicky-for-now-but-3D-printing-may-change-future-of-manufacturing.html>>. Luettu 27.3.2014.
- 30 Willis, K.D.D.; Brockmeyer, E.; Hudson, S.E.; Poupyrev, I. 2012. Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. Verkkodokumentti. <[http://delivery.acm.org/10.1145/2390000/2380190/p589-willis.pdf?ip=195.148.144.60&id=2380190&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=74A0E95D84AAE420%2E504FA65D0F5F15F4%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=328037560&CFTOKEN=26994550&\\_\\_acm\\_\\_=1398627920\\_a68c3f6e54a3e309f18e5288741e5f7a](http://delivery.acm.org/10.1145/2390000/2380190/p589-willis.pdf?ip=195.148.144.60&id=2380190&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=74A0E95D84AAE420%2E504FA65D0F5F15F4%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=328037560&CFTOKEN=26994550&__acm__=1398627920_a68c3f6e54a3e309f18e5288741e5f7a)>. Luettu 5.2.2014.

- 31 Ahn, B.Y.; Walker, S.B.; Slimmer, S.C.; Russo, A.; Gupta, A.; Kranz, S.; Duoss, E.B.; Malkowski, T.F.; Lewis, J.A. 2011. Planar and Three-Dimensional Printing of Conductive Inks. Verkkodokumentti.  
<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3346051/>>. Luettu 9.2.2014.
- 32 Ray, Jeff. 2009. The Future of CAD. TCT Magazine 9/2009.
- 33 Butler, A.; Hodges, S.; Sarik, J.; Scott, J.; Villar, N. 2012. Combining 3D printing and printable electronics. Verkkodokumentti.  
<<http://research.microsoft.com/pubs/189096/07-sarik.done.pdf>>. Luettu 20.2.2014.

## Valmistaja 3000:n käyttöohje

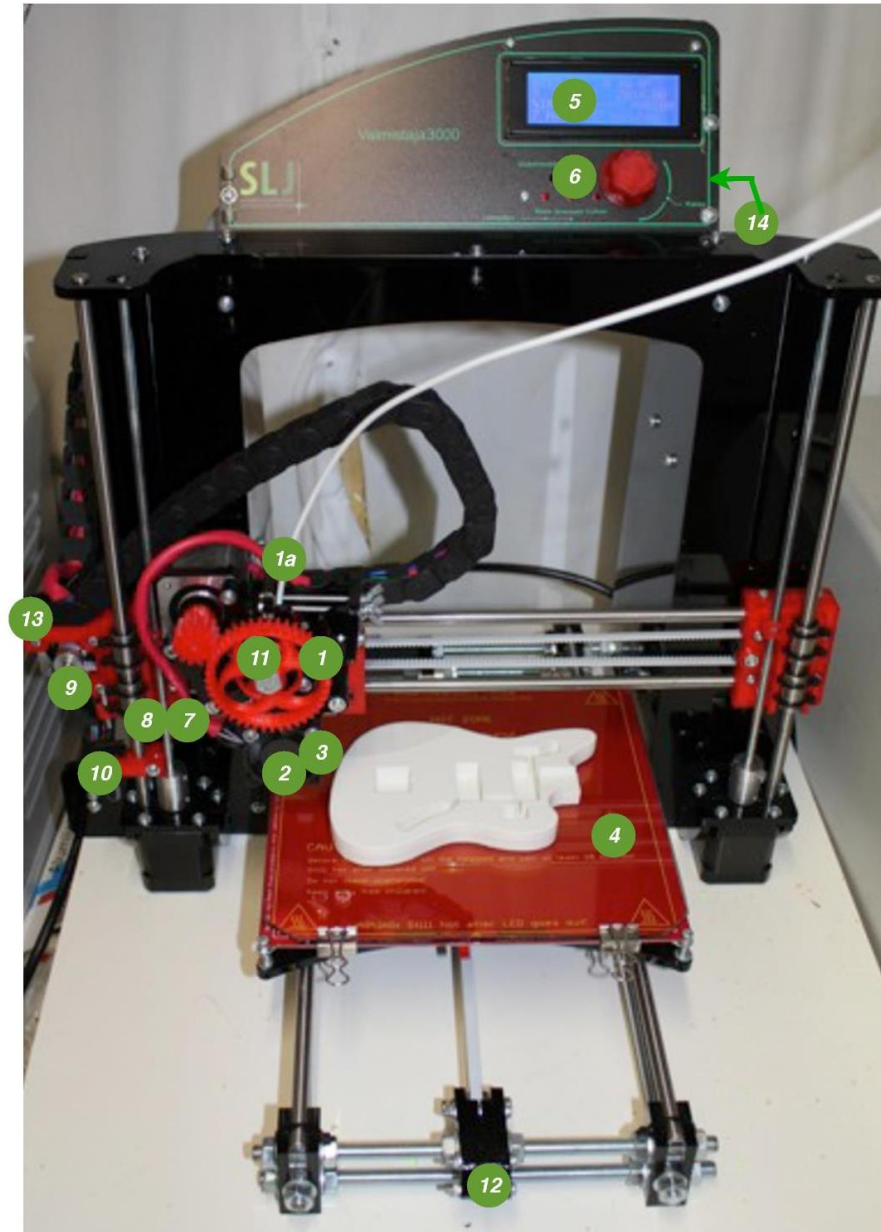
# Valmistaja 3000

Lue tämä ohje huolellisesti läpi, ennenkuin aloitat tulostimen käytön. Oikein ja huolellisesti käytettynä saat laitteestasi kaiken hyödyn ja se palvelee sinua mahdollisimman pitkään.

## Sisältö

- 1 Tulostimen osat
- 2 Ennen kuin aloitat
- 3 Valikot ja toiminnallisuudet
- 4 Alustan kalibrointi
- 5 Filamentti
- 6 Ohjelmistot
- 7 Testikappaleen tulostus
- 8 Ongelmanhallinta



# 1. Tulostimen osat



1 Eksruuderi

- Syöttää filamentin kuumapäälle
- 1a** Eksruuderin luukkumeکانیسم  
Pitää filamentin tiukalla vetoakselia vasten
- 2** Kuumapää  
Sulattaa filamentin ja pursottaa sulan massan alustalle. **Nimensä mukaisesti kuuma, älä koske!**
- 3** Puhallin  
Jäähdyttää kuumapään vartta, ettei filamentti sula kuin vasta kuumapään suutinosassa.  
Käytetään tulostettaessa PLA- lankaa. ABS- langalla tätä ei käytetä. **Älä koske pyörivään tuulettimeen!**
- 4** Alusta  
Kuumalevy, jonka päällä kapton- päällysteinen borosilikaattilasi. Tarvitaan, että tulostettava kappale tarttuu alustaan ja pysyy suorana. **Älä koske kuumana olevaan alustaan!**
- 5** Monitoiminäyttö  
Tulostimen toimintojen ohjaamiseen. Ks. Valikot ja toiminnallisuudet
- 6** Pyörövalintakytkin  
Tulostimen toimintojen ohjaamiseen. Ks. Valikot ja toiminnallisuudet
- 7** X- akselin rajakytkimen säätöruuvi  
X- akselin nolapisteen säätämiseen
- 8** X- akselin rajakytkin  
Määrää X- akselin nolapisteen
- 9** Z- akselin rajakytkimen säätöruuvi  
Z- akselin nolapisteen säätämiseen
- 10** Z- akselin rajakytkin  
Määrää Z- akselin nolapisteen
- 11** Y- akselin rajakytkin  
Määrää Y- akselin nolapisteen
- 12** Y- akselin hihnan kiristin  
Säätää Y- hihnan esijännityksen
- 13** X- moottorin kiinnityspisteet  
Säätää X- hihnan esijännityksen
- 14** Muistikortinlukija  
Micro SDHC- korttipaikka tulostettaville G-kooditiedostoille

## 2. Ennen kuin aloitat

- Aseta tulostin tasaiselle, mielellään vesiva´alla suoristetulle alustalle.
- Varmistu, ettei tulostimen päälle pase putoamaan mitn
- Tulostin tarvitsee mahdollisimman tasalmpoisen, vedottoman tilan. Hyvien tulosten aikaansaamiseksi, tilan lämpötilan on oltava yli +16 astetta.
- Huomioi, että tulostimessa on kuumia osia:
  - Kuumapää 
  - Alusta 
  - Vltt kosketusta näihin, palovamman vaara!
  - Älä jätä lasta yksin käynnissä olevan tulostimen läheisyyteen!
- Tulostin on shklite
  - Noudata normaalia varovaisuutta sähkölaitteen käytössä. Tulostin on IP22 - suojausluokan laite, jota saa kytt vain kuivissa sisätiloissa. Älä koske jnnitteellisiin osiin!
- Varmistu, että kaikki ruuvit ovat kiinni ja johtimia ei roiku
- Varmistu, että X- ja Y- kelkka liikkuvat ilman ylimääräistä vastusta
- Varmistu, että hihnat ovat tiukalla ja liikuttaessa kelkkoja, hihnat eivät hypi hampaiden yli
- Poista mahdolliset epäpuhtaudet alustasta esim. alkoholiin kastetulla rievulla. On rimisen tärkeää, että alustassa ei ole esim. sormenjälkiä, koska tulostettava kappale voi irrota alustasta kesken tulostamisen ja aiheuttaa jopa laitteen rikkoutumisen!
- Tulostimen ollessa käynnissä, sen osat tekevät kkinisi liikkeitä kovalla voimalla. Älä koske tulostimen liikkuviin osiin tai niitä tukeviin rakenteisiin laitteiden ollessa käynnissä!
- **Älä koskaan jätä tulostinta päälle kytkettynä ilman valvontaa!**

## 3. Valikot ja toiminnallisuudet

Tulostin on varustettu 4x20 merkkiä toistavalla LCD- näytöllä, jossa käytetään

valikkorakenteita toiminnallisuuksiin. Tulostinta ohjataan pyörövalintakytkimellä <sup>6</sup>. Perustilassa ollessa, pääset päävalikkoon painamalla pyörövalintakytkintä. Valinta tehdään pyörittämällä kytkintä myötä-, tai vastapäivään. Valinta aktivoidaan painamalla kytkintä. Mikäli mitään toimintaa ei havaita 30s. aikana, palaa laite perustilaan.

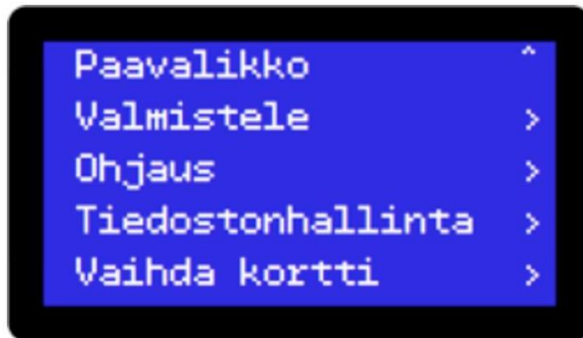
Näytön perustilassa löydät seuraavat tiedot:



- <sup>a</sup> Kuumapään reaaliaikainen lämpötila / asetettu lämpötila
- <sup>b</sup> Alustan reaaliaikainen lämpötila / asetettu lämpötila
- <sup>c</sup> X- akselin positio
- <sup>d</sup> Y- akselin positio
- <sup>e</sup> Z- akselin positio
- <sup>f</sup> Tulostuksen suhteellinen nopeus verrattuna g-koodin asetusnopeuteen. Tätä nopeutta voit muuttaa pyörittämällä pyörövalintakytkintä <sup>6</sup> laitteen ollessa perustilassa.
- <sup>g</sup> Tulostettavan tiedoston suhteellinen tulostettu määrä tähän mennessä
- <sup>h</sup> Tulostukseen käytetty aika tähän mennessä
- <sup>i</sup> Tulostimen tila



## Päävalikko



**Päävalikko** Menee takaisin päänäkymään

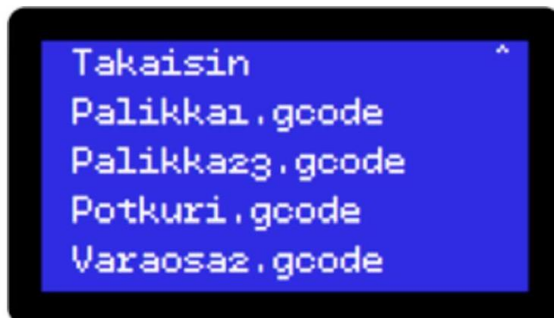
**Valmistele** Menee Valmistele- valikkoon

**Ohjaus** Menee Ohjaus- valikkoon

**Tiedostonhallinta** Mikäli olet asettanut kortin, voit selata tiedostoja

## Tiedostonhallinta- valikko

Voit valita tulostettavan kappaleen



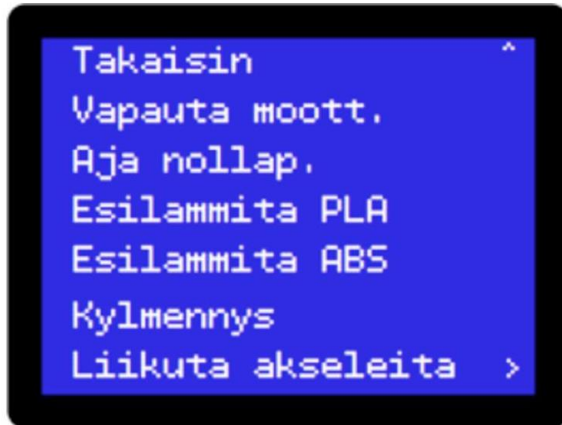
**Takaisin** Menee takaisin päävalikkoon

**Palikka1.gcode** Valittavissa oleva tiedosto SD- kortilla. Valittaessa tiedosto, tulostus lähtee automaattisesti käyntiin. G- koodissa olevat lämpötila- ja nopeusparametrit astuvat voimaan ja tulostin automaattisesti lämmittää suuttimen ja alustan haluttuun lämpöön kunnes lämpötilat on saavutettu, jonka jälkeen tulostin ajaa suuttimen nolllapisteeseen ja alkaa tuottamaan g- koodin mukaista kappaletta. Lisää g- koodeista tämän ohjeen Ohjelmistot- osuudessa.

...

## Valmistele- valikko

Toiminnot tulostimen akseleiden liikuttamiseen ja esilämmitykseen



**Takaisin** Menee takaisin päävalikkoon

**Vapauta moott.** Vapauttaa moottorit, jos haluat liikuttaa akseleita käsin

**Aja nollap.** Ajaa suuttimen X,Y,- ja Z akseleiden nollapisteeseen. Tämä on piste, josta tulostus aina aloitetaan.

**Esilämmmita PLA** Lämmittää suuttimen ja alustan PLA- muovin tulostukseen sopiviin lämpötiloihin

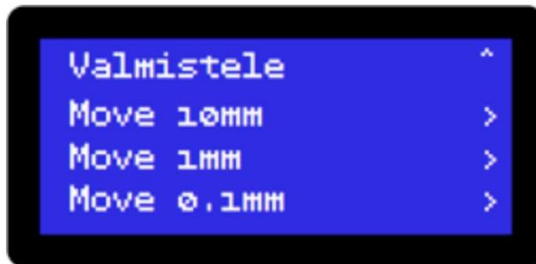
**Esilämmmita ABS** Lämmittää suuttimen ja alustan ABS- muovin tulostukseen sopiviin lämpötiloihin

**Kylmennys** Kytkee kuumapään lämmityksen pois päältä

**Liikuta akseleita** Täällä voit ajaa moottoreilla yhtä akselia kerrallaan haluttuun pisteeseen tai pursottaa filamenttia suuttimen läpi

## Liikuta akseleita- valikko

Täällä voit ajaa moottoreilla yhtä akselia kerrallaan haluttuun pisteeseen tai pursottaa filamenttia suuttimen läpi.

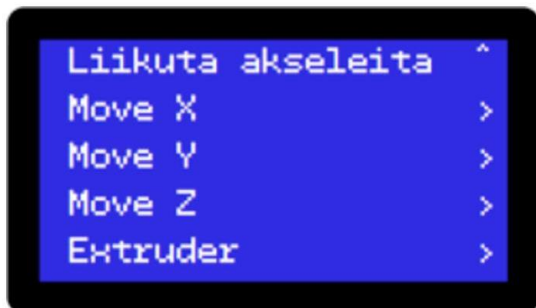


**Valmistele** Menee takaisin Valmistele- valikkoon

**Move 10mm** Voit liikuttaa X- ja Y- akseleita 10mm kerrallaan **ÄLÄ KÄYTÄ TÄTÄ**

**Move 1mm** Voit liikuttaa X- ja Y- akseleita 1mm kerrallaan **ÄLÄ KÄYTÄ TÄTÄ**

**Move 0.1mm** Voit liikuttaa X-,Y- ja Z akseleita 0.1 mm kerrallaan. Lisäksi voit pursottaa filamenttia suuttimen läpi 0.1 mm kerrallaan



**Liikuta akseleita** Menee takaisin Liikuta akseleita- valikkoon

**Move X** Voit liikuttaa X-akselia valitun määrän mukaan

**Move Y** Voit liikuttaa Y-akselia valitun määrän mukaan

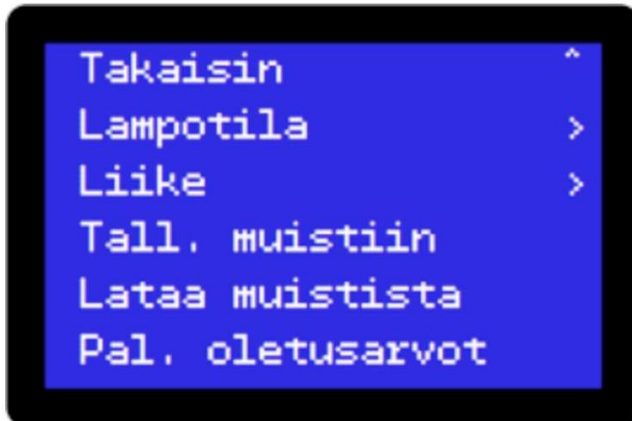
**Move Z** Voit liikuttaa Z-akselia valitun määrän mukaan

**Extruder** Voit pursottaa filamenttia suuttimen läpi valitun määrän mukaan. Extruderia ei voi ajaa manuaalisesti kuumapään ollessa kylmänä (tämä vaurioittaisi filamenttia)

Liikuta akseleita manuaalijolla ohjauspyörästä maltillisesti kääntämällä. Liian ripeä pyörytys aiheuttaa ” datatulvan” moottoreille.

## Ohjaus- valikko

Tässä valikossa on laitteen parametrit



**Takaisin** Menee takaisin päävalikkoon

**Lampotila** Laitteen lämpötilaparametrit

**Liike** Laitteen liikeparametrit

**Tall.muistiin** Tallentaa tehdyt muutokset laitteen EEPROM- muistiin

**Lataa muistista** Lataa muistista edelliset tallennetut parametrit

**Pal. oletusarvot** Palauttaa laitteen Firmwaressa olevat oletusparametrit

## Lämpötila- valikko

Laitteen lämpötilaparametrit. Riippuen tulostusmateriaalista, saatat joutua muuttamaan näitä.



**Ohjaus** Menee takaisin ohjaus-valikkoon

**Suutin** Asetettu suuttimen lämpötila (0-270)

**Alusta** Asetettu alustan lämpötila (0-135)

**Puhalt. nopeus** Asetettu puhaltimen nopeus (0-255). **Käytä ainoastaan joko 0 tai 255.**

**Autom. Lampo** Mikäli valittuna päälle (On), sallitaan g- koodin muuttua lämpötilaa ajon aikana. Emme suosittele.

**Min** Automaattisen lämmön alaraja

**Max** Automaattisen lämmön yläraja

**Kerr** Automaattisen lämmön noston ja laskun kulmakerroin

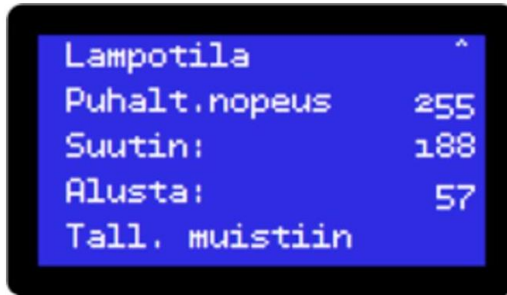
**PID-** Suuttimen lämpötilaoptimoinnin parametrit. Näillä säädetään keskusyksikön syöttämää PWM- taajuutta vastaamaan suuttimen ominaislämpötilakäyrää ajan ja sähkövirran funktiona. **Älä muuta!**

**PLA Esias.** Voit muuttaa Valmistele- valikon PLA- esilämmityksen arvoja langan, alustan ym. ulkoisten seikkojen mukaiseksi.

**ABS Esias.** Voit muuttaa Valmistele- valikon ABS- esilämmityksen arvoja langan, alustan ym. ulkoisten seikkojen mukaiseksi.

### Esiasetus- valikko

Voit muuttaa Valmistele- valikon ABS- esilämmityksen arvoja langan, alustan ym. ulkoisten seikkojen mukaisesti.



**Lämpötila** Menee takaisin Lämpötila-valikkoon

**Puhalt. nopeus** Asetettu puhaltimen nopeus (0-255). Käytä ainoastaan joko 0 tai 255.

**Suutin** Asetettu suuttimen lämpötila (0-270)

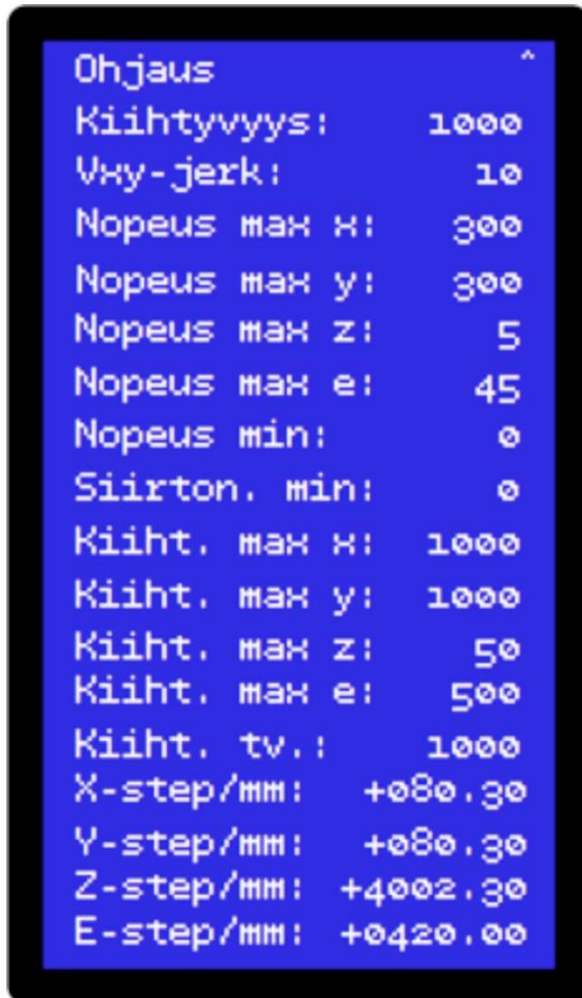
**Alusta** Asetettu alustan lämpötila (0-135)

**Tall. muistiin** Tallentaa tekemäsi muutokset laitteen EEPROM- muistiin



## Liike- valikko

Laitteen liikeparametrit. Laitteeseen tulee parametrit valmiiksi asetettuna, joten on epätodennäköistä, että tarvitset muuttaa näitä.



**Ohjaus** Menee takaisin Ohjaus-valikkoon

**Kiihtyvyyys** Akseleiden moottorien kiihtyvyyssparametri. **Älä muuta!**

**Vxy-jerk** Terävän kulman oikaisukerroin. **Älä muuta!**

**Nopeus max x** X- akselin maksiminopeus. **Älä muuta!**

**Nopeus max y** Y- akselin maksiminopeus. **Älä muuta!**

**Nopeus max z** Z- akselin maksiminopeus. **Älä muuta!**

**Nopeus max e** Ekstruuderin maksiminopeus. **Älä muuta!**

**Nopeus min** kaikkien akselien miniminopeus. **Älä muuta!**

**Siirton. min** kaikkien akselien tyhjän siirron miniminopeus. **Älä muuta!**

**Kiiht. max x** X- akselin maksimikiihtyvyyys. **Älä muuta!**

**Kiiht. max y** Y- akselin maksimikihtyvyys. **Älä muuta!**

**Kiiht. max z** Z- akselin maksimikihtyvyys. **Älä muuta!**

**Kiiht. max e** Ekstruuderin maksimikihtyvyys. **Älä muuta!**

**X-step/mm** Tällä määritellään X- akselin kerroin, millä softan ymmärtämä millimetri muuttuu millimetrin mittaiseksi liikkeeksi. Mikäli tulostuskappale on x- akselin suunnassa liian iso tai pieni, tätä arvoa muuttamalla muuttuu suhde.

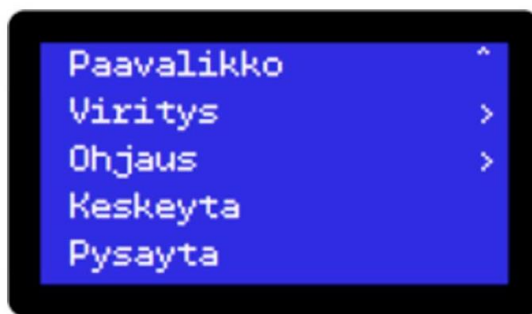
**Y-step/mm** Tällä määritellään Y- akselin kerroin, millä softan ymmärtämä millimetri muuttuu millimetrin mittaiseksi liikkeeksi. Mikäli tulostuskappale on x- akselin suunnassa liian iso tai pieni, tätä arvoa muuttamalla muuttuu suhde.

**Z-step/mm** Tällä määritellään Z- akselin kerroin, millä softan ymmärtämä millimetri muuttuu millimetrin mittaiseksi liikkeeksi. Mikäli tulostuskappale on x- akselin suunnassa liian iso tai pieni, tätä arvoa muuttamalla muuttuu suhde.

**E-step/mm** Tällä määritellään ekstruuderin kerroin, millä softan ymmärtämä millimetri muuttuu millimetrin mittaiseksi filamentin syötöksi. Mikäli tulostuskappaleeseen tulee liikaa tai liian vähän filamenttia, tätä arvoa muuttamalla muuttuu syöttökerroin. Katso myös tämän ohjeen luku **Viritys-valikko**.

## Päävalikko tulostuksen ollessa käynnissä

Tulostuksen ollessa käynnissä, valikko on toisenlainen. Näkyvissä on ainoastaan ne toiminnot, joita voit tehdä laitteen käynnissä ollessa.



**Päävalikko** Menee takaisin päänäkymään

**Viritys** Menee Viritys- valikkoon

**Ohjaus** Menee Ohjaus- valikkoon

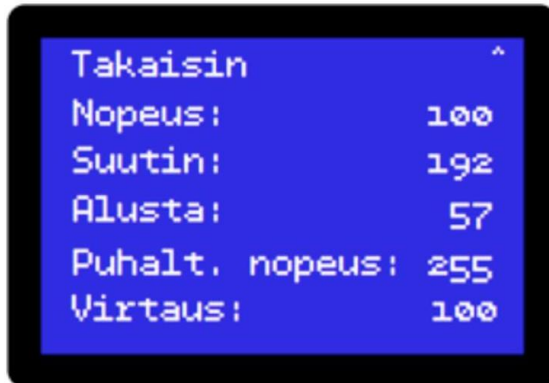
**Keskeyta** Keskeyttää tulostuksen ja g- koodin suorittamisen, mutta jättää moottorit päälle. Valittuasi tämän voit vielä jatkaa tulostusta siitä mihin se jäi.

**Pysayta** Pysäyttää tulostuksen. Et voi jatkaa samaa tulostusta enää.



## Viritys-valikko

Tulostuksen aikana muutettavat parametrit



**Takaisin** Menee takaisin päävalikkoon

**Nopeus** Tulostusnopeus suhteessa g- koodissa määriteltyyn. Sama kuin päänäkymässä.

**Suutin** Suuttimen asetustilanteen säätö

**Alusta** Alustan asetustilanteen säätö

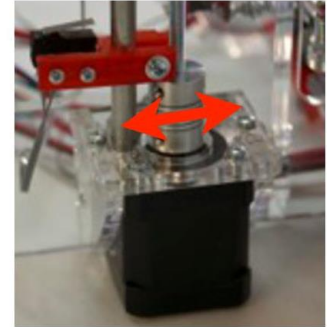
**Puhalt. nopeus** Puhaltimen asetuksen muuttaminen. Käytä ainoastaan 0 tai 255 arvoja

**Virtaus** Filamentin virtausnopeuden muuttaminen suhteessa g-koodissa määriteltyyn. Mikäli tulosteeseen tulee liikaa tai liian vähän materiaalia, tätä muuttamalla voit korjata tilanteen. Vinkki: Muuta vain vähän kerrallaan ja seuraa tulosta.

## 4. Alustan kalibrointi

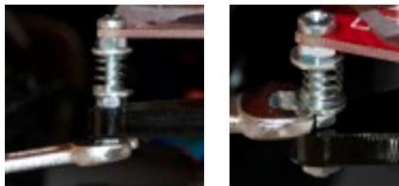
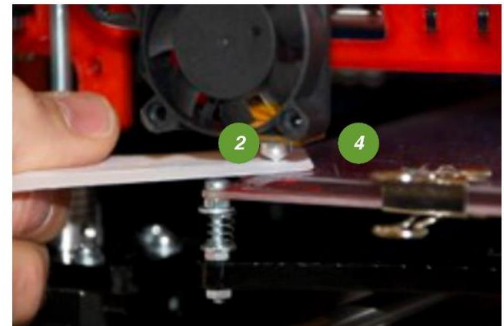
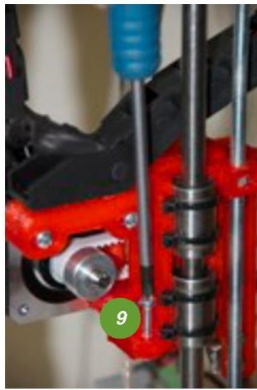
Tulostuksen onnistumisen kannalta tärkeimpiä asioita on alustan suoruus suhteessa akseleihin. Ilman oikeanlaista kalibrointia kappaleet eivät pysy kiinni alustassa tai alusta on liian lähellä kuumapäätä aiheuttaen tukkeumia. Tee kalibrointi huolellisesti useaan kertaan tarkistaen.

1. Varmistu, että tulostin on asetettu vakaasti tasaiselle, suoralle alustalle. Aja Z- akselia hieman ylös nollapisteestä (katso luku Valmistele- valikko). Tarkista vesivaa'alla tai mitalla, että tulostimen x- akseli (metallikiskot, joilla ekstruuderit liikkuu sivusuunnassa) on alustaan nähden täsmälleen suorassa. Mikäli näin ei ole, pyöritä sormin toista Z- akselia hieman myötä (liikkuu ylöspäin)- tai vastapäivään (liikkuu alaspäin), riippuen onko kyseinen pää liian ylhäällä tai alhaalla alustaan nähden.



2. Aja akselit nollapisteeseen (Valmistele- valikko-> Aja nollap.).

Säädä Z- rajakytkimen säätöruuvia **9** niin, että kuumapään **2** kärjen ja alustan **4** väliin ei enää mahdu paperia, mutta kuumapää on kuitenkin irti alustasta.



3. Aja seuraavaksi Y- akseli toiseen päähän alustaa. Tarkkaile, ettei kuumapää missään vaiheessa koske alustaan. Mikäli koskee, pysäytä liike välittömästi ja avaa alustan vasemman ylänurkan korkeuslukitusmutteri ja säädä alustaa alaspäin. Kun

olet saanut ajettua akselin nurkkaan, säädä alustan korkeus kuten nollapisteessä mutta käytä säätöön ainoastaan alustan korkeuden säätöä, ei Z- akselin korkeussäätöä.

4. Tee sama lopuille alustan kulmapisteille.

5. Tarkista ainakin kertaalleen kaikki kulmapisteet, ja hienosäädä tarvittaessa.

## 5. Filamentti(= tulostusmateriaalilanka)

Tulostin on suunniteltu pääasiassa PLA- ja ABS- filamenttien tulostukseen. Nykyisellään markkinoilla olevia 3d- tulostimiin tarkoitettuja filamenttivahuuksia on kaksi: 1,75mm ja 3mm. Tulostimme käyttää oletusarvoisesti 3mm filamenttia. Suosittelemme käytettäväksi SLJ-filamentteja, jotka on testattu nimenomaisesti tälle tulostimille sopivaksi. Näin välttyt turhilta laatuongelmilta sekä kappaleen alustaan tarttumis-, vääntymis sekä tukosongelmilta.

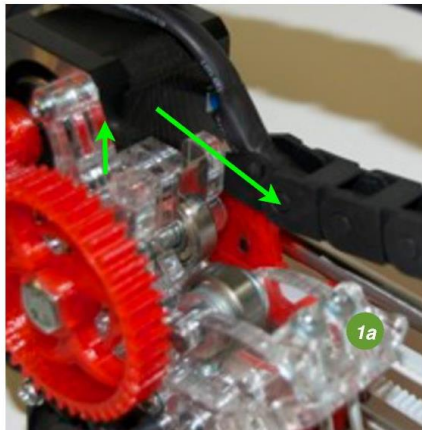
HUOM! PLA- filamenttia käytettäessä, puhaltimen **3** tulee aina olla päälle kytkettynä!! Mikäli puhallin ei pyöri, ja filamenttia lämmitetään, on vaarana, että lämpö nousee

kuumapään yläosassa yli filamentin sulamispisteen ja ekstruuderin **1** tukkeutuu! Liian pitkä seisottaminen (yli 10min) lämmöt päällä puhaltimen päällä ollessakin saattaa aikaansaada saman ilmiön PLA:ta käytettäessä. Mikäli esim. säätötyön takia joudut seisottamaan kuumapäätä lämmitettynä, on suositeltavaa pursottaa välillä filamenttia kuumapään läpi (Valmistele- valikko-> Liikuta aksleita -> Move 0,1mm ->Extruder)

ABS- filamenttia käytettäessä puhallinta **3** ei ole välttämätöntä käyttää.

### Filamentin syöttö

1. Aja Z- akselia muutama sentti ylös alustasta(Valmistele- valikko-> Liikuta aksleita -> Move 0,1mm ->Z)
2. Esilämmitä tulostin tulostuslangan mukaiseen lämpötilaan(Valmistele- valikko->Esilämmitä PLA tai Esilämmitä ABS). Odota, kunnes lämpötila on saavutettu.
3. Avaa ekstruuderin luukku **1a**.



4. Pyöristä filamentin päätä hieman esim. puhtaalla viilalla tms. ja työnnä sitten filamentti luukun pitkien ruuvien välistä vetoakselin alla olevasta reiästä niin pitkälle, että tunnet filamentin menevän kuumapään sisään. Filamentin pyöristäminen helpottaa operaatiota. Tulostimen ollessa uusi tai filamentin ollessa erityisen kierteistä, tämä saattaa tuntua hieman hankalalta, mutta filamentin kiertäminen





samalla työntäen usein auttaa filamentin etenemistä. Kun ekstruuderin hieman kuluu, tämä helpottuu oleellisesti.



5. Työnnä filamenttia varovasti, mutta määrätietoisesti kuumapäähän läpi, kunnes kuumaa filamenttia pursottuu kuumapästä.
6. Sulje ekstruuderin luukku <sup>1a</sup> pingottamalla luukun pinne ekstruuderin rungossa olevien olakkeiden yli niin, että luukun laakeri painaa tiukasti filamenttia vetoakselia vasten. Mikäli luukku tuntuu löysältä, kiristä luukun päässä olevia siipimuttereita, kunnes tiukkuus on sopiva. Älä kuitenkaan kiristä niin paljon, että laakeri painaa filamentin soikeaksi akselia vasten.

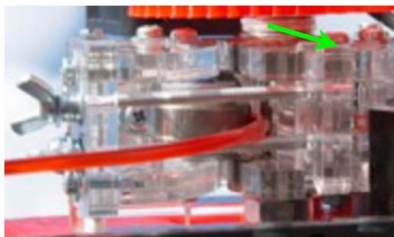
Uudesta ekstruuderista saattaa kuulua narinaa tulostettaessa. Ääni tulee filamentin hangatessa ekstruuderin filamenttikuilun seinämiä. Tämä kuuluu asiaan, eikä ole vaarallista.

Suosittelemme ripustamaan filamentin printterin yläpuolelle esim. kierretangosta tehtyyn pitimeen siten, että filamenttirulla pääsee pyörimään täysin vapaasti.

## Filamentin vaihto

1. Aja Z- akselia muutama sentti ylös alustasta (Valmistele- valikko-> Liikuta akseleita -> Move 0,1mm ->Z)
2. Esilämmitä tulostin tulostuslangan mukaiseen lämpötilaan (Valmistele- valikko->Esilämmitä PLA tai Esilämmitä ABS). Odota, kunnes lämpötila on saavutettu.
3. Avaa ekstruuderin luukku <sup>1a</sup>.
4. Työnnä filamenttia hieman, että sitä pursottuu kuumapäähän läpi.

5. Vedä vanha filamentti määrätietoisesti kerralla pois ekstruuderista. Mikäli pysäytät vedon matkalla, on suuri vaara, että sula filamentti jäähtyy rakenteisiin kiinni ja tukkii kuumapäähän yläosan.



6. Syötä uusi lanka kuten on kerrottu luvussa Filamentin syöttö.

7. Pursota uutta lankaa (Valmistele- valikko -> liikuta akseleita -> 0.1mm -> Extruder) ainakin 15 s. ajan, mikäli uusi lanka on eri väristä kuin vanha värisekoittuman poistamiseksi.

## 6. Ohjelmistot

Jotta voit tulostaa jotakin, täytyy sinulla olla ensin jokin kolmiulotteinen malli. Voit piirtää sen itse esim. Google Sketchup- ohjelmistolla ([www.sketchup.com](http://www.sketchup.com)), tai voit ladata tuhansia valmiita malleja osoitteesta [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com). Piirrettyäsi tai ladattuaasi .stl-tiedoston, täytyy se “viipaloida” tulostettaviksi kerroksiksi ennen tulostusta ja tallentaa G- kooditiedostoksi.

Tähän on olemassa lukuisia ohjelmistoja, joista esittelemme tässä luvussa yhden, alkuun pääsemiseksi.

### Ohjelmistoparametrit

Protobottiin ja Kotiproton tulostuslankoihin sopivat ohjelmistoparametrit, jotka ovat samat ohjelmistosta riippumatta:

Suure	In English	PLA	ABS	Kommentti
Suuttimen halkaisija(mm)	Nozzle size(mm)	0,35	0,35	Laitteen ominaisuus
E Steps/mm	E Steps/mm	420 tai 480	420 tai 480	Laitteen ominaisuus, mustarunkoiselle laitteelle 420 ja vaalearunkoiselle laitteelle 480
Max leveys(mm)	Max width(mm)	200	200	Laitteen ominaisuus
Max pituus(mm)	Max length(mm)	200	200	Laitteen ominaisuus
Max korkeus(mm)	Max height(mm)	150	150	Laitteen ominaisuus
Kuumennettava alusta	Heatbed	Kyllä	Kyllä	Laitteen ominaisuus
Ekstruuderin puhallin	Extruder fan	Kyllä	Ei tarvita	Laitte tukee, valinnainen (G- koodi M106 kytkee päälle M107 pois)
Kerros-paksuus(mm)	Layer height(mm)	0,15	0,15	0.20 on paksu, 0.10 on hienojakoinen, kokeile sopiva paksuus tulostettavan kappaleen mukaan
Ensimmäisen kerroksen paksuus(mm)	Initial layer height	0,20	0,20	Lisäämällä ensimmäiseen kerrokseen enemmän materiaalia, saadaan parempi tarttuvuus alustaan
Seinä-mävahvuus(mm)	Wall thickness(mm)	0,8	0,8	Suhteellisen hyvä laatu. Kokeile lisätä tai vähentää
Pohjan/Kannen vahvuus(mm)	Top/Bottom thickness(mm)	0,8	0,8	Suhteellisen hyvä laatu. Kokeile lisätä tai vähentää
Täyttöaste	Fill density	30%	30%	Kestävä kappale. Lisäämällä saat tiheämman kappaleen, vähentämällä harvemman. Mikäli vähennät, lisää pohjan/kannen vahvuutta vastaavasti.

Tulostusnopeus(mm/s)	Print speed(mm/s)	100	50	Lähtökohtaiset nopeudet, saat muutettua nopeutta laitteen kiertovalintakytkimellä myös tulostuksen aikana
Suuttimen tulostuslämpötilä	Printing temperature	193	240	SLJ:n langoille oletusarvoisesti sopivat lämpötilat. Voit kokeilla muuttaa ja katsoa, miten tulostusjälki muuttuu. PLA ei alle 170, ABS ei alle 220.
Alustan tulostuslämpötilä	Bed temperature	67	120	SLJ:n langoille kapton- päällysteiselle lasille sopivat keskiarvot. Kokeile, miten kappale pysyy paikallaan/vääntyy ja säädä tarpeen mukaan +/- 10 astetta.
Langan vahvuus(mm)	Filament diameter(mm)	2,96	2,96	SLJ:n lankojen keskipaksuus. Mittaa huolellisesti lankasi halkaisija useasta paikasta kahden desimaalin tarkkuudella. Tällä on suuri merkitys tulosteen laatuun. Mittaamiseen voit käyttää digitaalista työntömittaa tai vielä mieluummin mikrometriruuvia, mikäli saatavilla.
Pakkaustiheys	Packing Density	1,0	0,85	Eri muovilaaduilla on eri pakkaustiheys.
Takaisinveto	Retraction	Kyllä	Kyllä	Vetää lankaa takaisinpäin siirryttäessä. Vähentää/poistaa valumat.
Takaisinvedon nopeus (mm/s)	Retraction speed(mm/s)	30	20	Nopeus, jolla takaisinveto suoritetaan. Lisäämällä nopeutta, laatu paranee, mutta langan "sutimisen" riski kasvaa.
Takaisinvedon minimimatka (mm)	Minimum travel(mm)	4	4	Matka, joka vähintään täytyy olla siirryttäessä, että takaisinveto aloitetaan. Vaikuttaa oleellisesti takaisinvetojen määrään ja sitä kautta tulostusnopeuteen
Takaisinvedon mitta(mm)	Distance(mm)	3	3	Pituus, joka filamenttia vedetään takaisin pain. 3mm filamentilla n. halkaisija on hyvä lähtökohta.
Siirtonopeus(mm/s)	Travel speed(mm/s)	150	150	Nopeus siirrettäessä suutinta tyhjässä kohdassa
Max Z nopeus(mm/s)	Max Z speed(mm/s)	3	3	Z- akselin maksiminopeus
Pohjakerroksen nopeus(mm/s)	Bottom layer speed(mm/s)	20	20	Oltava huomattavan alhainen alustaan tarttumisen takia.
Kerroksen minimiaika(s)	Minimal layer time(s)	5	5	Vähimmäisaika, joka täytyy kestää, ennenkuin tulostetaan seuraava kerros. Mikäli tulostettava kappale on pieni, odotetaan, kunnes aika on kulunut. Tämä siksi, että edellisen kerroksen pitää ehtiä jäähtymään, ettei tulostuksen laatu kärsi. Mikäli teet kapeita, korkeita kappaleita, kasvata tätä arvoa reilusti!

## G-koodin alku ja loppuosat

G- koodi tulostuksen alkuun (Start G-code). Kopioi viipalointiohjelmaan oikeaan kohtaan.

Tämä lisätään G- koodiin aina, kun tehdään uusi viipalointi:

```
G21          ;metriset arvot
G90          ;absoluuttinen koordinaatisto
M106        ;tuuletin päälle. Jätä tämä pois jos tulostat ABSlla
G28 X0 Y0   ;X/Y nollapisteeseen
G28 Z0      ;Z nollapisteeseen
G92 E0      ;nollaa ekstruuderi
G1 F200 E3  ;syötä 3mm lankaa paineen tasaamiseksi
G92 E0      ;nollaa ekstruuderi
G1 F{travel_speed}
M117 Ny rintataan!!!
```

G- koodi tulostuksen loppuun (End G-code). Kopioi viipalointiohjelmaan oikeaan kohtaan.

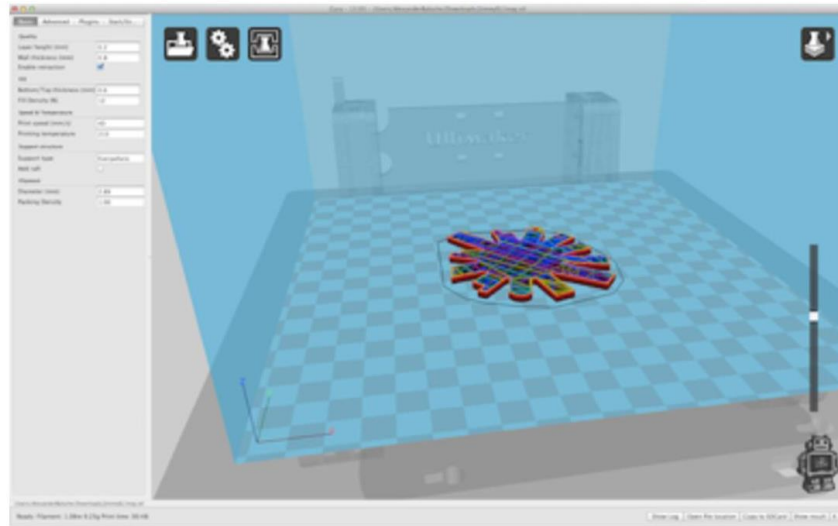
Tämä lisätään G- koodiin aina, kun tehdään uusi viipalointi:

```
M104 S0          ;suuttimen jäähdytys
M140 S0          ;alustan jäähdytys
M107             ;tuuletin pois päältä
G91             ;relatiivinen koordinaatisto
G1 E-1 F300     ;takaisinvedä filamenttia
G1 Z+0.5 E-5 X-20 Y-20 F{travel_speed} ;nosta Z akselia hieman
G28 X0 Y0      ;aja X/Y nollapisteeseen
M84             ;moottorit pois päältä
G90             ;absoluuttinen koordinaatisto käyttöön
M117 Valmis!
```



## Cura

Cura on helppokäyttöinen ja riittävän monipuolinen ohjelmisto .stl- kuvien viipalointiin. Cura on Ultimaker- tulostimen brandaama ohjelmisto. Se toimii muissakin tulostimissa, mutta se ei tue tietokoneella suoraan tulostamista USB- kaapelin kautta mm. Valmistaja 3000:a. Sen sijaan sen viipaloimat g- koodit voit kopioida Valmistaja 3000:n muistikortille ja tulostaa ne sieltä. Cura on ilmainen ja sen voit ladata esim. täältä:  
[software.ultimaker.com/old/Cura\\_12.12A.exe](http://software.ultimaker.com/old/Cura_12.12A.exe)  
Sivuilla on myös uudempiä versioita, mutta tätä kirjoitettaessa 12.12A- versio on monipuolisempi kuin uudemmat. Curalla viipaloitu tuloste on erittäin hyvälaatuinen ja se onkin ohjelmiston parhaita puolia.



## 7. Testikappaleen tulostaminen

### Asenna ohjelmisto

Asenna ” viipalointiohjelma” , esim. Cura tietokoneellesi. Seuraa ohjelmiston mukana olevia asennusohjeita. Mikäli asennat Cura:n, valitse tulostinlaitteeksi ”Other” (like Mendel).

### Tee parametriasetukset

Aseta ohjelmistoon kappaleessa Ohjelmistoparametrit - läpikäydyt taulukon mukaiset parametrit. Huomioi käyttämäsi tulostuslangan materiaali ja paksuus. Mikäli käytät tulostimen mukana tullutta, on se PLA- lankaa.

### Lataa testikappale

Lataa esim: <http://www.thingiverse.com/thing:9704>  
ja tallenna .stl- tiedosto tietokoneellesi.

### Prosessoi .stl- tiedosto G- koodiksi

Asentamalla ohjelmistolla

### Tallenna G- koodi tulostimen muistikortille

Aseta muistikortti tulostimen muistikortinlukijaan <sup>14</sup> metalliset liittimet katsojaan päin ja paina se pohjaan, kunnes se ”naksahdaa” paikoilleen.

### Tulosta

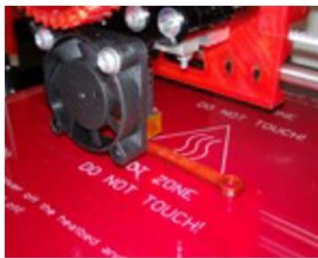
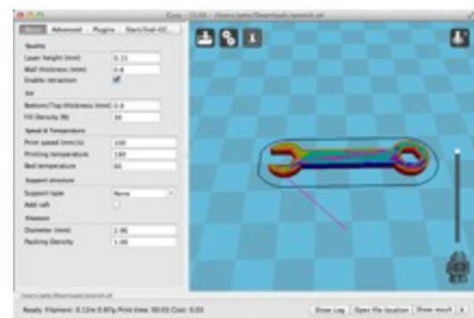
Mene **Tiedostonhallinta- valikkoon** ja valitse tallentamasi G-koodi pyörövalintapainikkeella. Tulostin alkaa lämmittämään kuumapäätä ja alustaa. Kun lämmitys on valmis, tulostin alkaa tulostaa.



## Tulostuksen jälkeen

Odota, että kuumapää ja alusta ovat jäähtyneet. Nosta kappale pois alustasta. Kappale voi olla tiukassa, joten saatat tarvita vääntää kappaleen irti alustasta esim. askarteluveitsen kärjellä. Varo kuitenkin painamasta alustan lasin päällä olevaa Kapton-kalvoa rikki. Mikäli kalvo repeää pahasti, niitä saa tilattua SLJ:ltä kyllä lisää. Vältä koskemasta sormilla lasiin; sormenjäljet estävät tulostuskappaleita tarttumasta lasiin. Mikäli lasiin on tullut sormenjälkiä, puhdista ne esim. sprillä ja puhtaalla kankaalla.

Onneksi olkoon!! Olet nyt tulostanut ensimmäisen konkreettisen, kolmiulotteisen kappaleen!!



## 8. Ongelmanhallinta

Yleisimpiä ongelmia, joita voi tulla vastaan

### Kappale irtoaa alustasta

- Z- nollapiste liian kaukana alustasta. Katso kappale [Alustan kalibrointi](#).
- Alustassa epäpuhtauksia
- Alustan lämpötila väärä

### Ensimmäiseen tulostuskerrokseen ei tule paljoo tai juuri yhtään filamenttia

- Z- nollapiste liian lähellä alustaa. Katso kappale [Alustan kalibrointi](#).
- Ehdottomasti korjattava. Aiheuttaa helposti kuumapään tukoksen!

### Filamenttia ei tule ekstruuderista

- Tarkista, että kuumapää on asetetussa lämpötilassa.
- Filamentti ei pääse vapaasti kulkemaan ekstruuderille. Tarkista filamentin vapaa kulku.
- Filamentti painuu soikeaksi. Tarkista, ettei ekstruuderin luukku **1a** ole liian tiukalla.
- Filamentti on liian löysällä. Tällöin vetoakseli "sutii". Tarkista, ettei ekstruuderin luukku **1a** ole liian löysällä.
- Vetoakseli on "sutinut" kolon filamenttiin. Tarkista avaamalla ekstruuderin luukku. Mikäli "sutimista" on tapahtunut, poista filamentti ekstruuderista ja puhdista vetoakselin urat esim. hammasharjalla tai askarteluveitsen kärjellä. Tämän jälkeen katkaise filamentista epätasaiset kohdat pois ja syötä filamentti taas ekstruuderiin.
  - Mikäli filamenttia ei tule käsin painamalla kuumapään läpi, on kyseessä tukos. Tukostapauksessa katso erillinen dokumentti "Tukkeutuneen kuumapään avaaminen". Sen saat pyytämällä osoitteesta oskari@sljffinland.com.
- Joskus voimakkaasti kiharalla oleva filamentti ajautuu vetoakselin reunaan ja jää "sutiimaan". Poista filamentti ja puhdista vetoakseli.

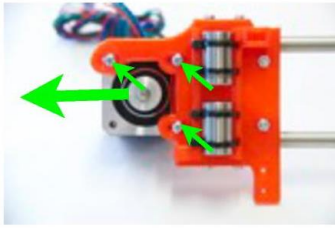
### Kappale taipuu tulostettaessa

- Tietyssä määrin tämä on normaalia etenkin pitkissä/laajapintaisissa kappaleissa. Mikäli taipumista on paljon, jatka eteenpäin.
- Alustassa on epäpuhtauksia
- Alusta ei ole tasaisesti kalibroitu/ siirtynyt pois kalibroinnista. Katso kappale [Alustan kalibrointi](#).
- Alustan lämpötila on väärä. Joko liian kylmä tai liian kuuma. Etenkin PLA vääntyy liian kuuman alustan takia. ABS taas usein liian kylmän.
- Kuumapään lämpötila on väärä filamentille. Kokeile tulostaa hieman kuumempaan.
- Tulosteessa on liikaa täytettä suhteessa pinta-alaan. Kokeile vähentää "filliä" tai ohentaa yhtenäisen pohjan/kannen paksuutta
- Kokeile muuttaa tulostusnopeutta
- Tulostuspaikka on vetoisa

### Hihna kulkee epätasaisesti, hyppii hampaiden yli tai osuu rakenteiden seinämiin

- Tämä aiheuttaa tulosteisiin kummallisia siirtymiä ja loppu tuloste on pilalla
- Suorista hihnalinja ja kiristä

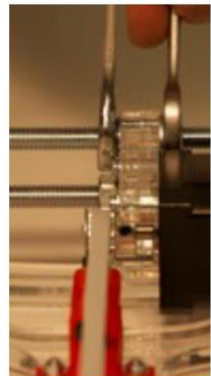
## X- hihnan kiristys



1. Löysää kuvan ruuvit. Älä irroita kokonaan.
2. Vedä hihna tiukemmalle
3. Kun hihna on riittävän tiukalla, kiristä ruuvit.
4. Mikäli hihna ottaa hihnapyörän jompaan kumpaan reunaan, avaa hihnapyörän kuusiokoloruuvia hieman ja siirrä hihnapyörää siten, että hihna kulkee sen keskellä.
5. Kiristä sen jälkeen ruuvi (ei liian tiukalle, ettei ruuvin kolo pyöristy tai kierteet vaurioidu)

## Y-hihnan kiristys

1. Löysää kuvan 13mm mutterit siten, että hihnankiristin pääsee liukumaan niiden välissä
2. kiristä ruuvia, kunnes hihna on riittävän kireällä
3. Kiristä mutterit. Tarkista, että hihna kulkee keskellä laakeriparia. Mikäli hihna vaelttaa liikkeessa toiseen laitaan, koita kääntää ja kiristää hihnankiristin sellaiseen asentoon, että hihna kulkee keskellä.
4. Paina hihnankiristimen laakeripäätä hieman alaspäin ja kiristä, mikäli hihna ottaa kiinni Y- kelkan hihnan kiinnittimeen.
5. Tarkista moottorin puoleinen hihnalinja. Mikäli hihna ottaa jompaan kumpaan reunaan hihnapyörää, löysennä moottorin kiinnikkeiden muttereita ja liikuta siten, että hihna kulkee hihnapyörän keskellä.



## Päänäkymässä näytössä lukee Err:MINTEMP

- Jomman kumman termistorin virtapiiri on poikki. Tarkista, että kaikki liittimet on kiinnitetty ja johtoja ei roiku/ole poikki

## Kuumapää tai alusta ei lämpene

- Virtapiiri poikki, tarkista, että kaikki liittimet on kiinnitetty ja johtoja ei roiku/ole poikki

## Puhallin ei pyöri

- Tarkista, ettei puhaltimen potkurin välissä ole epäpuhtauksia
- Tarkista, että G- koodissa on alussa M106
- Tarkista, että esilämmitysasetuksissa on puhaltimen nopeus 255
- Tarkista, että kaikki liittimet on kiinnitetty ja johtoja ei roiku/ole poikki

## Jokin akseleista “murisee, pörisee, rämisee” eikä liiku kunnolla

- Tarkista, että kaikki liittimet on kiinnitetty ja johtoja ei roiku/ole poikki

## Tulostin ei käynnisty ollenkaan

- Tarkista, että pistotulppa on kytketty pistorasiaan ja virtalähteessä palaa vihreä valo
- Tarkista, että kaikki liittimet on kiinnitetty ja johtoja ei roiku/ole poikki



## Yhteenveto lisäävän valmistuksen tekniikoista ja nanomateriaaleista

Nanomaterial AM Method	Metal Nanoparticles	Carbon Nanotubes and Nanowires	Semiconductor and ceramics Nanoparticles
<b>Stereolithography (SL)</b>	N/A	Increase tensile stress and fracture stress, more brittle parts, decrease elongation at break [56, 57]	TiO <sub>2</sub> - increase tensile strength and modulus, flexural strength and hardness . Improved thermal stability [77].
<b>Laser Sintering (LS)</b>	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexural modulus lower, parts less dense, electrical conductivity significantly enhanced [58].</li> <li>• Decrease in impact strength, formation of aggregates within a polymer [59].</li> <li>• Improved mechanical properties, good distribution within polymer, but rough final surface [60].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silica – parts stiffer but more brittle [75].</li> <li>• Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PS – enhance sintering characteristics, formation of compact structure, increase impact strength and tensile strength, samples more ductile and tougher [79].</li> <li>• Ca-P and CHAp – improved compressive strength and modulus, high cell viability [80].</li> </ul>
<b>3D Printing (3DP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fe for Steel parts – decrease creep deflection, and shrinkage [41].</li> <li>• Ag for Ag parts - less distortion and shrinkage. Improved sintering [42].</li> </ul>	N/A	N/A
<b>Fused Filament Fabrication (FFF) (Robocasting, Direct Writing, or Onidirectional Printing)</b>	Ag NPs ink - microelectrodes (layered and arches), flexible substrate, steady electrical response for at least 750 bending cycles [43].	Increase in tensile stress and tensile modulus, decrease in elongation at break. Increase in cell proliferation rate [62].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TiO<sub>2</sub> – reduce rod bending, but promote shrinking and folding. On flexible substrate, preserve shape after repeated bending [76].</li> <li>• BaTiO<sub>3</sub> – increase shear stress and elastic modulus of inks [78].</li> </ul>