

Jyri Jaatinen

# 3D-tulostin

Opinnäytetyö  
Sähkötekniikan ko

Joulukuu 2016




MAMK

University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

	<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b> 14.12.2016	
<b>Tekijä(t)</b> Jyri Jaatinen	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> <b>Sähkötekniikan Koulutusohjelma</b> Sähkövoimatekniikka	
<b>Nimeke</b> 3D-tulostin		
<b>Tiivistelmä</b> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää onko PLA- tai ABS-muovia käyttävän 3D-tulostimen rakentaminen taloudellisesti järkevä vaihtoehto valmiin tulostimen ostamiselle. Tulostin suunniteltiin ja rakennettiin budjetin mukaan. Arvioitu budjetti tulostimen rakentamiseen oli noin 700 euroa. Työllä ei ollut toimeksiantajaa, vaan se on omakustanteinen.</p> <p>Minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta 3D-tulostimista, joten tulostimen suunnittelu vaati yleisen perehtymisen 3D-tulostamiseen, suosittuihin RepRap malleihin ja niiden ominaisuuksiin, sekä tulostamisessa käytettäviin ohjelmiin.</p> <p>Lopputuloksena rakensin budjetin mukaisen FDM-tyyppisen 3D-tulostimen, ja listasin siihen tarvittavat materiaalit. Työhön sisältyy myös valmistusohjeet rakentamaani 3D-tulostimeen.</p>		
<b>Asiasanat (avainsanat)</b> 3D-tulostin, 3D-tulostaminen, FDM-tulostaminen		
<b>Sivumäärä</b> 42 + 3	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>		
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Jyrki Liikanen	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b>	

## DESCRIPTION

 <b>MAMK</b> University of Applied Sciences		<b>Date of the bachelor's thesis</b>	
<b>Author(s)</b> Jyri Jaatinen		<b>Degree programme and option</b> Electrical engineering	
<b>Name of the bachelor's thesis</b> 3D-Printer			
<b>Abstract</b>			
<p>The goal of this thesis was to find out whether it is economically wise to build a 3D-printer that uses ABS or PLA plastic instead of purchasing a commercial one. The printer was designed and built according to a budget of 700 euros. This work was not done on request other than mine, and it was self-funded.</p> <p>Since I had no former experience in 3D-printers, designing one required a very tough out checking on 3D-printing, popular RepRap designs and their properties, and the programs used in 3D-printing in general.</p> <p>As a result of this work I built an FDM-type 3D-printer according to budget and made a list of required materials. Instructions for this printer are included.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>			
3D Printer, 3D-printing, FDM-printing			
<b>Pages</b>	<b>Language</b>	<b>URN</b>	
42 + 3	Finnish		
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>	
Jyrki Liikanen			

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	3D-TULOSTAMINEN .....	2
2.1	Ainetta lisäävä valmistus – Additive manufacturing .....	2
2.1.1	Jauhepetimenetelmä - Powder bed fusion.....	4
2.1.2	Laminointi - Sheet Lamination, Laminated Object Manufacturing... 4	
2.1.3	Nesteen polymerisointi - VAT Photopolymerisation .....	5
2.1.4	Sideaineruiskutus - Binder Jetting .....	5
2.1.5	Materiaalin ruiskutus - Material Jetting.....	5
2.1.6	Suora kerrostus - Direct energy deposition.....	6
2.1.7	Materiaalin pursotus - Material Extrusion .....	6
3	MATERIAALIT .....	8
3.1	ABS- ja PLA-muovit .....	8
3.2	Polykarbonaatti .....	10
3.3	HIPS ja PVA.....	10
3.4	Nylon .....	11
3.5	Wood Filament .....	11
3.6	PET ja PETT.....	12
3.7	TPE .....	12
4	TULOSTUSTEKNIikka .....	12
4.1	Tulostusprosessi.....	12
4.2	Jälkikäsittely .....	14
5	TULOSTIMEN SUUNNITTELU .....	16
5.1	Runko.....	16
5.1.1	Rungon kuvaus.....	16
5.1.2	Rungon rakentaminen .....	19
5.2	Elektroniikka.....	27
5.2.1	Arduino Mega 2560 .....	28
5.2.2	Ramps 1.4 .....	29
5.2.3	Sähkötekniinen materiaali.....	29
5.3	Syöttö.....	30
5.4	Lämpöpeti .....	32
5.5	Ohjelmat .....	33

5.5.1	Marlin Firmware .....	33
5.5.2	Pronterface .....	33
5.5.3	Slic3r .....	33
5.5.4	Repetier Host .....	34
5.5.5	Cura.....	34
5.5.6	123D Design .....	34
6	TULOKSET .....	35
7	POHDINTA .....	37
7.1	Kehitysehdotuksia.....	37
7.2	Tulevia suunnitelmia .....	38
8	KIITOKSET .....	39
	LÄHTEET.....	40
	LIITE	
	1 Materiaalilista	

## **KÄSITTEET**

**3D-file:** 3D-tiedosto on tietokoneavusteisesti luotu malli, joka kuvaa kolmiulotteista kappaletta. Usein 3D-tiedostoa kutsutaan myös 3D-malliksi. Tällaiset mallit ovat usein tulostettavassa muodossa.

**Curing:** Nestemäisen aineen, kuten resiinin, kovettaminen lopulliseen muotoonsa. Käytetään lähinnä SLA-tulostuksen yhteydessä.

**Curling:** Liian nopeasta viilenemisestä johtuva tulostusmateriaalin vetäytyminen. Esiintyy usein pohjaosissa ja aiheuttaa silloin kappaleen vääntymistä ja irtoamista tulostustasosta.

**Extruder:** Syöttölaitekokonaisuus, joka muodostuu Cold End- ja Hot End-laitteista. Cold End vastaa langan syötöstä ja Hot End sen lämmittämisestä lähellä tulostuspintaa.

**Filament:** Tulostusmateriaali, joka on lankamaisessa muodossa. Usein 3 mm tai 1.75 mm paksua kelalle kerittyä muovilankaa.

**Fotopolymeeriresiini:** Polymeeri, joka kovettuu tai kiinteytyy altistuessaan valolle.

**G-code:** Ohjelmointikieli, joka kertoo tietokoneavusteiselle koneelle, mitä ja kuinka tehdä. G-koodi siis määrittää koneen liikkeitä sekä niiden suunnan ja järjestyksen.

**Heat block:** Lämmitysblokki. Kattaa tulostuspään lämmitettävän keskusosan ja suuttimen.

**Heated Bed:** Tulostustasossa oleva lämpöalusta, joka pysyy määrättyssä lämmössä ja varmistaa siten tulostettavan kappaleen kiinnipysymisen.

**Infill:** 3D-tulostetun kappaleen täyttö. Kaikki kappaleet eivät ole kiinteitä, 100 % täytöllä tehtyjä kappaleita, vaan useimmiten osittain onttoja. Täyttö voi kattaa esimerkiksi

si 50 % kappaleen tilavuudesta, ja se voidaan toteuttaa vaikkapa hunajakennomuodostelmalla.

Layer Shifting: Tulostuskerroksen tulostuminen väärään paikkaan. Voi johtua lukuisista syistä, kuten hammashihnan luistamisesta.

Raft: Keino Warpingin välttämiseksi tulostaessa. Kappaleen pohjakerrosta tulostaessa kappale ympäröidään muutamalla kierroksella tulostusmateriaalia, jolloin tarttumapinta kasvaa eikä kappale irtoa niin helposti.

Support Material: Tukimateriaali. Joissain haastavissa tulostuksissa käytetään tukimateriaalia, jotta kappaleen tulostaminen on mahdollista.

Warping: Sama kuin Curling, mutta ainoastaan pöytätasossa.

## **LYHENTEET**

AM: Additive Manufacturing, ainetta lisäävä valmistus

CAD: Computer Aided Design, tietokoneavusteisesti luotu malli

DED: Direct Energy Deposition: Suora kerrostus

FDM/FFF: Fused Deposition Modeling tai Fused Filament Fabrication, molemmat viittaavat muovipohjaiseen materiaalin pursotusmenetelmään.

ME: Material Extrusion: Materiaalin pursotus

MJ: Material Jetting, Sideaineruiskutus

PBF: Powder Bed Fusion, Jauhepetimenetelmä

RepRap: Lyhenne nimelle Replicating Rapid Prototyper, eli laitteelle, joka kykenee tuottamaan merkittävän määrän omista osistaan.

SL/LOM: Sheet Lamination tai Laminated Object Manufacturing, Laminointi.

STL: Yleisin 3D-mallin formaatti. Muita tavallisia formaatteja ovat OBJ, SKP, 3DS, DXF ja SCAD



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyn tarkoituksena oli selvittää itse rakennetun 3D-tulostimen hintaluokka ja rankentaa ABS tai PLA käyttöinen 3D-tulostin omaan käyttööni. Arvioni tulostimen kustannuksille oli noin 700 euroa ja se osui hyvin lähelle rakennuskustannuksia. Tulostimen alustan suunnittelin ylimitoitetuksi, jotta jatkosovelluksille jää riittävästi tilaa.

Ensimmäinen 3D-tulostin rakennettiin vuonna 1987 Charles Hullin toimesta. Tämän stereolitografiakoneen silloinen rakennushinta nykyvaluutassa vastaa yli 600 000 euroa. (3dprintingindustry 2016.)

Nykyään 3D-tulostimet ovat yleisempiä, mutteivät vieläkään joka talouden tuote. Stereolitografia on edelleen kallis suuntaus, mutta moderni 3D-tulostin kotitalouskäytössä ei välttämättä ole mahdottomuus. Muovipohjaisiin tulosteisiin keskittyvien FDM-tulostimien hinta vaihtelee muutamasta sadasta muutamiin tuhansiin, mutta vaihtoehtona on myös tulostimen kustannustehokas rakentaminen itse.

Työn alkuosa keskittyy 3D-tulostamiseen yleisesti ja pyrkii antamaan kattavan kuvan käytössä olevista tekniikoista ja yleisistä tulostusmateriaaleista. Koska rakentamani tulostin edustaa yleisintä tulostintyyppiä, painoarvo on FDM-tulostamisella. Läpi käydään myös tulostustekniikan perusteita ja edellytyksiä.

Seuraavaksi käydään läpi rakentamani tulostimen suunnittelua ja toteutusta sekä rakentamisen kannalta huomioitavia seikkoja. Tähän osioon sisältyvät myös yleiset rakennusohjeet kullekin tulostimen osalle sekä lyhyt kuvaus hyödyntämistäni tulostus- ja apuohjelmista.

Loppuosa sisältää parannusehdotuksia ja tulevia suunnitelmia rakennetulle tulostimelle. Osio sisältää myös täyden listan käytetystä materiaalista.

## 2 3D-TULOSTAMINEN

Termi ”three dimension printing” ei ole virallinen termi, vaikka se kuvaakin hyvin kyseistä prosessia. 3D-tulostaminen on alun perin kantanut nimeä Rapid Prototyping (RP), ja alan kehittyessä ja monimutkaistuessa on siirrytty käyttämään termiä Additive Manufacturing (AM).

Rapid Prototyping kehittyi vastaamaan tarpeeseen tuottaa nopeasti tuote, joka toimi prototyypinä, eikä valmiina tuotteena, jota sen avulla pyrittiin kehittämään. Nykyään digitaaliseen malliin pohjautuvat tuotteet ja niiden mallinnukseen käytettävät tekniikat ovat huomattavasti tarkempia ja parempilaatuisia kuin Rapid Prototyping terminä pitää sisällään, joten moderni 3D-tulostaminen nimettiin Ainetta Lisääväksi Valmistukseksi, Additive Manufacturing. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 1-2.)

### 2.1 Ainetta lisäävä valmistus – Additive manufacturing

Ainetta lisäävä valmistus (Additive manufacturing (AM), tai Additive Fabrication (AF)) on yleinen termi kuvaamaan prosessia jossa digitaalisesti mallinnettu 3D-kappale tulostetaan kerros kerrokselta materiaalista riippumatta. Yleensä AM tarvitsee tietokoneen, 3D-mallinnusohjelman, materiaalin sekä tulostukseen sopivan laitteiston. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 1-2.)

Aluksi on luotava 3D-malli tulostettavasta kohteesta. Se voidaan suunnitella ja mallintaa tähän sopivalla ohjelmalla tai esimerkiksi skannata olemassa olevasta kappaleesta. CAD-tiedosto muunnetaan sopivaan formaattiin, useimmiten STL-tiedostoksi. Kappaleen muodon ja kolmioiden laskemiseen kuluva aika riippuu kappaleen monimutkaisuudesta, laskevan koneen tehosta, sekä käytettävästä ohjelmasta. Kun laskenta on suoritettu, digitaalinen kappale leikataan kerroksiksi, jotka vastaavat jokaista tulostettavaa kerrosta.

Seuraavaksi STL-tiedosto siirretään tulostavalle koneelle. Tulostusnopeuden parantaminen ja materiaalin ekonomisen käyttö edellyttää kappaleiden asettelua ja käytettä-

vän tulostusalan optimointia, erityisesti kun tulostetaan useita kappaleita samanaikaisesti.

Tulostaminen tapahtuu tietokoneen ohjaamana kerros kerrokselta. Suuttimen koko ja sitä kautta kerroksen paksuus määrittää tulostuslaadun lopullisen tarkkuuden, mutta myös tulostavan koneen ominaisuudet vaikuttavat lopputulokseen. FDM-tulostuksessa 0.254 mm on tyypillinen kerrospaksuus, mutta esimerkiksi stereolitografiassa kerrospaksuus voi vaihdella 0.05 – 0.1 mm välillä. Tulostettavan kappaleen maksimikoko riippuu tulostimen koosta ja tulostusjälki tulostusmenetelmästä ja laadusta.

Kun kappale on tulostettu valmiiksi ja jäähdytetty, se voidaan irrottaa tulostustasosta. Tulostuksen jälkeen kappaletta voidaan vielä jälkikäsitellä, esimerkiksi poistamalla tukitulosteita ja hiomalla pois ylimääräistä ainesta, tai kiillottamalla ja käsittelemällä pintaa haluttuun muotoon. Jälkityöt vaativat usein muita työkaluja ja riippuvat tulosaineesta.

Ainetta lisäävä tulostus voidaan jakaa seitsemään alaluokkaan: Jauhepetimenetelmä (Powder bed fusion), laminointi (Sheet Lamination), nesteen polymerisointi (VAT Photopolymerisation), sideaineruiskutus (Binder Jetting), materiaalin ruiskutus (Material Jetting), suora kerrostus (Direct energy deposition), ja materiaalin pursotus (Material Extrusion). (Longborough University 2016.)

Monet ainetta lisäävän valmistuksen termit on asetettu tietyille yhtiöille tekijänoikeuksien taakse, minkä seurauksena 3D-tulostuksen termistössä samalle asialle voi olla useita nimiä.

- Termi Fused Deposition Modeling (FDM) on Stratasys-yhtiön hallussa, minkä seurauksena lakiteknisistä syistä samalle tekniikalle on alettu käyttää termiä Fused Filament Fabrication (FFF)
- Stereolitography (SLA) tekijänoikeudet kuuluvat 3D Systems-yhtiölle. Samalle tekniikalle käytetään myös termiä SL. (Machine design 2016.)

### **2.1.1 Jauhepetimenetelmä - Powder bed fusion**

Menetelmässä hyödynnetään joko laseria tai elektronisädettä jauheen sulattamiseen. Tällä menetelmällä on runsaasti alalajeja, mutta yleisesti menetelmää käytetään metallisten tulosteiden luomiseksi kerroksittain. Kappale tulostetaan tyypillisesti 0.1 mm kerroksissa ja kappaletta lasketaan kerroksen valmistumisen jälkeen alaspäin. Kappale ei tarvitse tuentaa sillä se on kauttaaltaan metallipohjaisen jauheen peitossa. Tulostusmateriaalivalikoima on runsas, esimerkiksi terästä, ruostumatonta terästä, alumiinia ja titaania voidaan käyttää tulostusaineena. Menetelmän ongelmakohtia ovat hitaus ja suuri energiantarve. Tulostusjälki on myös riippuvainen jauhemateriaalin jyväkoosta. (Loughborough University 2016.)

### **2.1.2 Laminointi - Sheet Lamination, Laminated Object Manufacturing**

Laminointi on ensimmäisiä ainetta lisäävän valmistuksen menetelmiä. Periaatteessa mikä tahansa levymainen aine, jota voidaan leikata laserilla tai mekaanisesti, ja sen jälkeen liittää toisiinsa, voidaan käyttää laminointimenetelmässä. Laminointi jakautuu kahteen tekniikkaan, joista ensimmäisessä kerros ensin liitetään ja sitten leikataan (Bond-Then-Form), toisessa tekniikassa vastakkaisessa järjestyksessä (Form-Then-Bond). (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 222-223.)

Bond-Then-Form -prosessi koostuu kolmesta osasta: laminaatin asetus, liittäminen ja leikkaaminen. Laminaatin leikkauksessa laser tai mekaaninen leikkuri leikkaa laminaatin sen haluttua rajapintaa pitkin, leikaten myös ylijäävän materiaalin pieniin lohkoihin siten, että se on helppo irrottaa tulostamisen jälkeen. Ylijäämä toimii tulostettavan kappaleen tukena tulostamisen ajaksi. Tätä tekniikkaa hyödynnetään lähinnä paperitulosteissa ja topografia-kartoissa.

Form-Then-Bond -prosessia hyödynnetään metalliteollisuudessa. Etuna on mahdollisuus muokata kappaleen sisäpuolta toisin kuin Bond-Then-Form -prosessissa. Prosessissa on eliminoitu mahdollisuus vahingoittaa aikaisempaa leikkuupintaa. (Loughborough University 2016.)

### **2.1.3 Nesteen polymerisointi - VAT Photopolymerisation**

Kappale luodaan kovettamalla nestemäistä fotopolymeeri resiiniä UV-valon avulla. Kerros kerrokselta petiä lasketaan alaspäin siten, että kappaleen edellinen kerros on juuri ja juuri resiinin pinnan alapuolella. Lopputulos on laadukas ja melkoisen nopea. Tyypillinen kerrospaksuus tulostaessa on 0.025 – 0.5mm välillä. Kun tuloste on valmis, ylimääräinen resiini imetään pois tulostustilasta ja kappaletta odottaa jälkikäsitteily. Se puhdistetaan ylimääräisestä resiinistä alkoholin ja veden avulla. Tämä voi olla pitkäkin prosessi, sillä osat vaativat joskus runsasta hankaamista. Vaikka tulostettava kappale onkin jatkuvasti upoksissa, se ei kuitenkaan ole tuettu, kuten jauhepetimenetelmässä, vaan monimutkaiselle kappaleelle on tulostettava tukia. Myös nämä on poistettava jälkikäsitteilyssä. (Loughborough University 2016.)

### **2.1.4 Sideaineruiskutus - Binder Jetting**

Kappale tulostetaan syöttämällä sideaine jauhepedille. Tällöin tulostuspään kautta kulkevan materiaalin määrä pysyy hyvin pienenä. Sideainepisarat ovat tyypillisesti 80 µm halkaisijaltaan ja muodostavat jauheen kanssa pallomaisen kappaleen. Kun kerros on tulostettu, lasketaan jauhepetiä hieman alaspäin ja levitetään uusi kerros jauhetta. BJ-laitteissa on yleensä useita suuttimia, jolloin useiden keskenään samanlaisten kappaleiden tuottaminen on mahdollista. Tällöin aikaa säästyy huomattavasti, koska kappaleet syntyvät samanaikaisesti. Tulostettu kappale jätetään jauheen sekaan kovettumaan. Kun kappale on valmis puhdistettavaksi, ylimääräinen jauhe poistetaan usein paineilmalla. (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 205-207.)

Menetelmän etuina ovat monet samat ominaisuudet kuin jauhepetimenetelmässä. Tulostettavat kappaleet eivät tarvitse tukia ja tulostettaessa suuria määriä kappaleet voidaan tulostaa useisiin kerroksiin. (Loughborough University 2016.)

### **2.1.5 Materiaalin ruiskutus - Material Jetting**

Muistuttaa toimintaperiaatteeltaan perinteistä mustetulostinta, mutta tulostusaineena toimii nestemäinen fotopolymeeriliuos. Tulostaessa käytetään lukuisia tulostuspäitä, jotka syöttävät ainetta samanaikaisesti luodakseen tarvittavat kerrokset. Kerroksen kovettamiseksi käytetään UV-valoa. Prosessia toistetaan kunnes kappale on valmis. Tämän ansiosta kappale ei tarvitse jälkikäsittelyä vaan on valmis käyttöön heti alustalta irrottuaan. (DREAMS 2016.)

Materiaalin ruiskutuksen etuihin kuuluu sen mahdollisuus käyttää eri materiaaleja saman tulostuksen aikana samaan kappaleeseen. Tavallisesti tällainen kappale olisi tulostettava useista osista ja koottava yhdeksi jälkikäteen. Materiaaleina käytetään polymeerejä ja muoveja. (3dprinterpro 2016.)

### **2.1.6 Suora kerrostus - Direct energy deposition**

DED on tavallista tulostamista monimutkaisempi prosessi olemassa olevien kappaleiden korjaamiseksi. Yleensä DED koneessa on moniakselinen varsi, jonka päässä on suutin, jolla syötetään materiaali haluttuun kohtaan kappaletta. Se muistuttaa prosessina materiaalin pursotusta, mutta tulostuspää on liikuteltavissa kaikkiin suuntiin eikä ole sidoksissa mihinkään akseliin. Tavallisesti DED kone on 4- tai 5-akselinen. Syötetty materiaali sulatetaan laserilla tai elektronisäteellä. (Loughborough University 2016.)

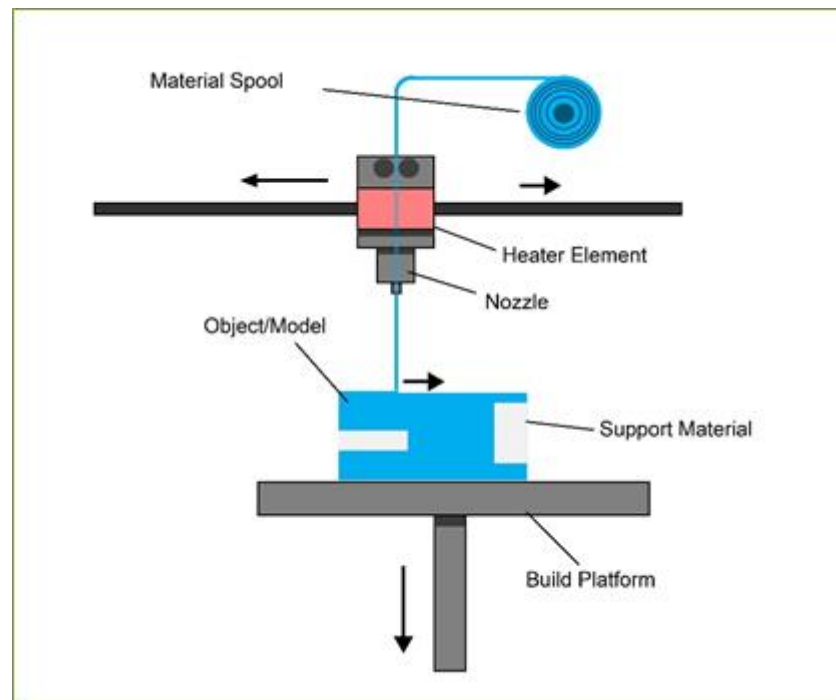
Materiaalina voidaan käyttää myös polymeerejä tai keraamisia tulosteita, mutta useimmiten käytetään metalleja joko jauheena tai lankana. Metallilanka on nopea, mutta epätarkempi vaihtoehto jauheeseen verrattuna. (Loughborough University 2016.)

### **2.1.7 Materiaalin pursotus - Material Extrusion**

Material Extrusion on eri materiaalien pursottamiseen perustuva tulostusmuoto. Tässä työssä keskityn yleisimmän materiaalia lisäävän tulostamisen (FDM, Fused Deposition Modeling) hyödyntämiseen. Se on myös yleisin 3D-tulostustapa, jossa kappale voidaan tulostaa suoraan 3D-mallin perusteella. Kuvassa 1 näkyy, kuinka nauhamainen tulostusmateriaali työnnetään lämmitysblokkiin, joka lämmittää sen sopivaan

lämpötilaan, jotta se voidaan tulostaa suuttimen läpi. Kappale tulostetaan lisäämällä ohuita kerroksia nauhamaista materiaalia toistensa päälle.

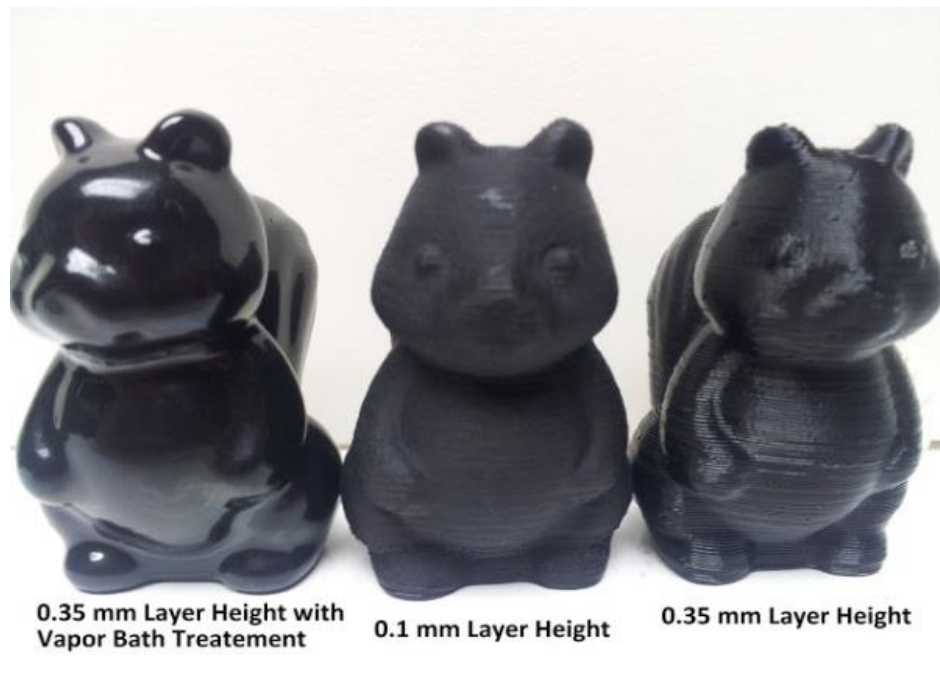
Yleisimpiä tulostusmateriaaleja ovat PLA- ja ABS-muovi. Kerroksittainen tulostaminen jättää kappaleeseen selkeät rajat, joten sen pinta ei ole sileä. Kappale voidaan kuitenkin viimeistellä asetonilla, joka tasoittaa epätasaisuuksia kappaleen pinnasta.



**KUVA 1. FDM-printing (Loughborough University 2016)**

FDM-tulostetun kappaleen pintaan jää aina epätasaisuuksia, jotka johtuvat kerroksista. Jopa erittäin tarkan 0.1mm tulostusjäljen raidat erottuvat selkeästi, vaikka kappale onkin tulostusjäljeltään laadukas. Kuvassa 2 verrataan ABS-muovista tulostettuja hahmoja. Ensimmäinen figuuri on tulostettu 0.35 mm suuttimella, mutta sen pinta on tasoitettu pitämällä hahmoa muutama minuutti lasipurkissa, jossa on haihdutettu samanaikaisesti asetonia. Toisena kuvassa on laadukas 0.1 mm suuttimella tulostettu kappale, ja kolmantena tasoittamaton 0.35 mm suuttimella tulostettu kappale.

Kappale jonka pinta on tasoitettu asetonilla muistuttaa huomattavasti valettua kappaletta. Sen pinnan epätasaisuudet ovat hävinneet ja vaikka tarkkuus ei ole parantunut, sen pinnan laatu on parempi kuin 0.1 mm suuttimella tulostetussa kappaleessa. (Engineering 2016.)



**KUVA 2. Pinnanlaatu (Engineering 2016)**

### 3 MATERIAALIT

Listatut materiaalit on tarkoitettu FDM-tulostukseen. Huomionkohteena ovat lähinnä suosituimmat yleistulostusmateriaalit ABS ja PLA. Myöhemmin mainittuja materiaaleja hyödynnetään erikoistilanteissa tai ominaisuuksiltaan vaativissa kappaleissa.

#### 3.1 ABS- ja PLA-muovit

ABS-muovi (Acrylonitrile Butadiene Styrene) on teollisuuden laajassa käytössä. Sitä hyödynnetään esim. teollisuusputkien, autokomponenttien, sähkörakennussarjojen, suojakypärien, keittiösovelluksien, musiikki-instrumenttien ja lelujen valmistuksessa. Suuri suosio johtuu ABS-muovin hyvistä ominaisuuksista, hyvästä kestävyydestä, hienoisesta joustavuudesta sekä lämmön kestosta.

3D-tulostamisessa (FDM) ABS on suosituin ja edullisin materiaali. Se soveltuu lukuisiin tarkoituksiin, ja sen pinta on helppo liimata, hioa ja maalata tai käsitellä asetonilla. Tulostusmateriaalina ABS muovia on yleisesti saatavilla lähes kaikissa mahdoli-



sisä väreissä. ABS-muovi sulaa noin 210–250°C, ja vaatii lämmitetyn alustan jotta tulostettuun kappaleeseen ei tule vaurioita taipumisesta ja halkeilusta.

ABS-muovin heikkoihin ominaisuuksiin kuuluu se, että sitä voidaan kierrättää mutta se ei ole luontaisesti hajoavaa. Se saattaa kuitenkin alkaa hajoamaan altistuessaan pitkiksi ajoiksi auringonvalolle. Tulostuskäytössä ABS-muovista vapautuu kaasuja jotka voivat ärsyttää samassa tilassa olevia, joten tulostaminen kannattaa suorittaa hyvin ilmastoidussa paikassa. Muovi kannattaa varastoida ilmatiiviiseen rasiaan, sillä se sitoo itseensä kosteutta ilmasta, mikä saattaa vaikuttaa tulostusjälkeen. (3D printing for beginners 2016.)

PLA on biohajoava kestopuovi, joka tuotetaan uusiutuvista luonnonvaroista. Se on tulostusaineena ekologinen valinta, ja sitä hyödynnetään lääketieteessä luontaisen myrkyttömän hajoamisensa vuoksi. Esimerkiksi murtumien korjaamiseen käytetyt ruuvit ja tapit hajoavat 6-24 kk aikana kehossa maitohapoiksi, eikä niitä ole tarpeen poistaa kirurgisesti. Muita PLA-muovin käyttökohteita ovat ruoan pakkaus, kertakäyttöruokailuvälineet, verhoilu ja hygieniatuotteet. Ominaisuuksiltaan PLA on yleensä kovaa mutta hieman haurasta.

PLA on vaikeampaa jälkikäsitellä kuin ABS, sillä sen maalaaminen vaatii akryylimaalin ja osien liimaaminen ei aina onnistu. Muovi ei siedä juurikaan lämpenemistä, vaan alkaa myös pehmetä jo 50°C. PLA-muovi myös jäähtyy hitaasti. PLA sitoo itseensä kosteutta ympäristöstä tehokkaammin kuin ABS, mikä vaikeuttaa oikean tulostuslämpötilan valintaa ja tekee muovista hauraampaa.

PLA-muovia pidetään kuitenkin helpoimpana muovina aloittaa 3D-tulostaminen. Tulostuslämpötila on 160–220°C, eikä se välttämättä vaadi alustan lämmittämistä, mutta 50–60°C lämpötila saattaa parantaa tulostuksen laatua. Sitä lämmittäessä ei synny myrkyllisiä päästöjä, joskin siitä lähtee PLA-muoville ominainen haju. Tulostaminen sisätiloissa on turvallista ilman erillistä tuuletusta. PLA-muovia on saatavilla lukuisissa väreissä ja ominaisuuksiltaan esimerkiksi joustavana, kumimaisena materiaalina. (3D printing for beginners 2016.)

### 3.2 Polykarbonaatti

Polykarbonaatti (PC) on hyvin kestävä termoplastinen materiaali, jota käytetään paljon esimerkiksi auto-, ilmailu- ja lääkealoilla. Polykarbonaatin suurimmat edut ovat sen suuri mekaaninen kestävyys ja lämmönsietokyky. Tulostetut kappaleet ovat tarkkoja ja kulutusta kestäviä, joten polykarbonaatti soveltuu hyvin vaativien prototyyppien tuottamiseen. Tulostettaessa polykarbonaattia perustason tulostuspäät yleensä palaavat, koska ne eivät kestä vaadittua 300°C lämpötilaa. Pedin tulisi lämmentä ainakin 138°C aseiteiseksi jotta kappaleen jäähtymisestä johtuva taipuminen saataisiin estetyksi. (3D printing from scratch 2016.)

### 3.3 HIPS ja PVA

Kappaleet joissa on runsaasti osia jotka on tulostettava ”tyhjän päälle”, ovat usein mahdottomia yksisuuttimiselle FDM-tulostimelle. Kaksi- tai useampisuuttimisella tulostimella on kuitenkin mahdollista käyttää tulostettavaa vesiliukoista tukiainetta. HIPS (High Impact Polystyrene) on myös elintarviketeollisuuden ja lääketieteen laajassa käytössä. Se on biohajoava polymeeri, joten se on vaaraton ihmisille ja eläimille. Yleisimmät ongelmat HIPS käytössä ovat sen ominaisuus kähertyä ja tarttua huonosti kiinni, mutta nämä ongelmat korjaantuvat lämpöpedillä.

PVA (Polyvinyl Alcohol) toimii samantapaisesti kuin HIPS, se on hyvä tukiaine ulokkeille ja kerroksille. Se on myrkytön, biohajoava ja vesiliukoinen polyvinyylialkoholi, jonka ongelmaksi muodostuu ainoastaan sen lämmönsietokyky. PVA liukenee kylmäänkin veteen, mutta liukeneminen on nopeampaa lämpimässä vedessä. Liuottaessa veden lämpötila tulisi kuitenkin pitää alle 70°C. PVA sopii yleisesti kaikkien lämpöpedillä varustettujen FDM-tulostimien käyttöön, mutta tulostuslämpötila ei saisi ylittää 225°C. Sekä HIPS että PVA sitovat itseensä kosteutta voimakkaasti, joten ne on säilytettävä kuivassa ja tiiviissä paikassa. (3D printing from scratch 2016.)

### 3.4 Nylon

Nylonin suosio tulostusaineena ei ole verrattavissa PLA ja ABS kanssa, joten tulostettavan nylonin löytäminen voi olla haastavaa. Suosituimmat Nylonit tulostuskäyttöön ovat Nylon 618, joka on väriltään luonnonvalkoinen ja Nylon 645, joka on melko kirkas mutta vaikea työstettävä, sekä Nylon PA6Polymer (Polyamide 6). Nylonmateriaalit imevät kosteutta itseensä, joten ne tulisi säilyttää kuivassa paikassa ennen tulostamista.

Nylon 618 ei tarvitse lämpöpetiä, sillä se ei juuri kutistu jäähtyessään. Sitä ei myöskään tarvitse jäähdyttää, mikä on myös käytännöllistä. Materiaali sitoutuu lujasti kiinni aiempiin kerroksiin ja muodostaa lujan lopputuloksen.

Nylon PA6Polymeeriä käytetään paljon autoteollisuudessa sen hyvien ominaisuuksien vuoksi. Se on hyvin kestävä materiaali ja usein käytetty raskasta kulutusta vaativissa kohteissa. Nylon PA6Polymeerin tulostusasetukset muistuttavat melkoisesti ABS muovin asetuksia, suositeltava tulostuslämpötila on 260°C. (3D printing from scratch 2016.)

### 3.5 Wood Filament

Wood Filament tunnetaan myös nimellä Wood ja on tavallisesta poikkeava tulostusmateriaali. Se koostuu kierrätetystä puusta ja sidontapolymeeristä, joten tulostettu kappale on hyvin puumainen, pinnan tuntua ja hajua myöten. Lämpötila vaikuttaa tulostusjälkeen ja tulosteen lopulliseen väriin, tulostuspään lämpö valitaan väliltä 175°C – 250°C. Jälkikäsittely on helpoin tehdä hiomapaperilla. Woodin heikkoutena on sen pehmeys verrattuna muihin tulostusmateriaaleihin, joten siitä ei ole käyttöesineiden materiaaliksi. Myös tulostusnopeus on pidettävä hitaana laadukkaan tulostusjäljen saavuttamiseksi. (3D printing from scratch 2016.)

### 3.6 PET ja PETT

PET (PolyEthylene Terephthalate) on muovipulloista tuttu kirkas, läpinäkyvä materiaali. Yleisesti korkeampi kerrospaksuus tulostettaessa johtaa parempaan läpinäkyvyyteen. PET on helppohko tulostettava laajalla lämpötila-alueella  $160^{\circ}\text{C} - 210^{\circ}\text{C}$ . Sekä PET että PETT imevät itseensä kosteutta ilmasta, mikä haurastuttaa tulostettujen kappaleiden rakennetta.

PETT on materiaalina kovempi ja jäykempi kuin PET, ja sitä voidaan verrata PLA:han. Tulostuksen kannalta ongelmana on usein kappaleen reunojen epätasaisesta jäähtymisestä seuraava lohkeilu (curling), jota voi välttää poistamalla jäähdystuuletin käytöstä. PETT on materiaalina suhteellisen tarkka tulostettava lämpötilan suhteen, sillä tulostettavan materiaalin lämpötilan tulee olla  $212^{\circ}\text{C} - 224^{\circ}\text{C}$ . (3D printing from scratch 2016.)

### 3.7 TPE

TPE on erittäin elastista ja se muistuttaakin ominaisuuksiltaan kumia. Se liimautuu hyvin yhteen lämpöpedin ja aikaisempien kerroksiensa kanssa, joten sillä on mahdollista tehdä laadukkaita tulosteita. Materiaali on myrkytöntä, mutta sitä ei suositella kosketuksiin elintarvikkeiden kanssa. Tulostuslämpötila on  $210^{\circ}\text{C} - 230^{\circ}\text{C}$ . (3D printing from scratch 2016.)

## 4 TULOSTUSTEKNIikka

### 4.1 Tulostusprosessi

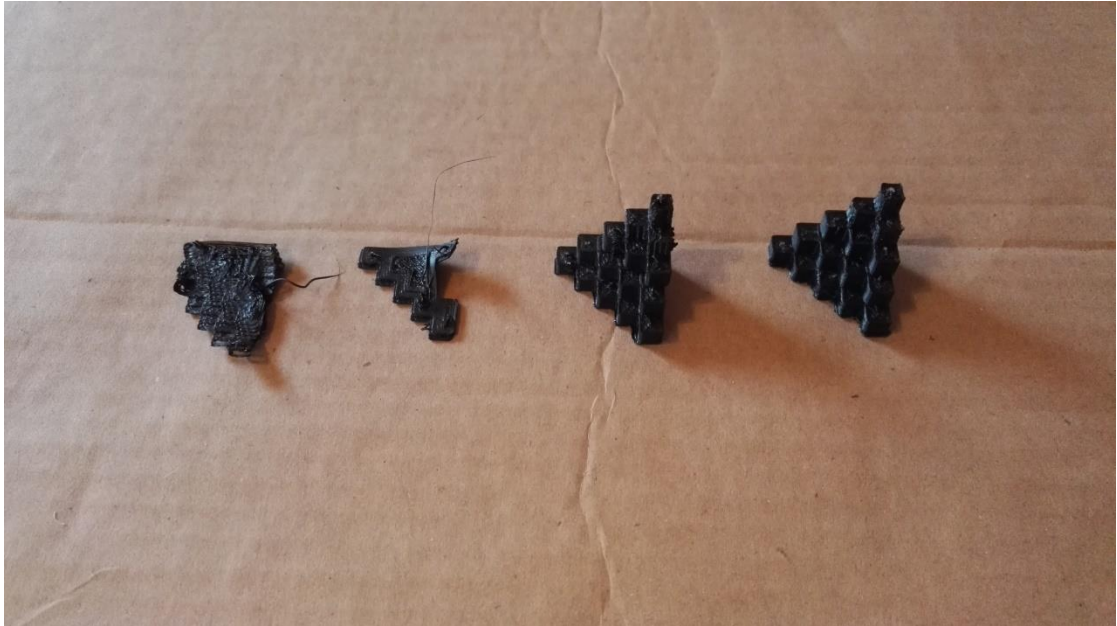
Tulostaminen alkaa lämpöpedin ja lämmitysblokin lämmittämisellä. Tänä aikana on hyvä muuttaa tarvittavat parametrit, tai asettaa valmiit alkuasetukset käytettävälle materiaalille. On syytä harkita tarvitaanko tulostettavan kappaleen ympärille ylimääräistä tarttumapintaa (brim), vai pysyykö kappale paikallaan koko tulostuksen ajan ilmankin. Kappaleen irtoaminen kesken tulostuksen voi olla tulostimelle vahingollista ja usein

haaskaa paljon materiaalia, joten ylimääräinen tarttumapinta ei yleensä ole haitaksi. Myös hyvin suuret kappaleet tavallisesti jäähtyvät reunoiltaan, mikä aiheuttaa rakoutumista (warping). Tarttumapinta helpottaa tätä vaivaa, mutta myös tulostusjäljen tasainen jäähdyttäminen tulostuksen aikana saattaa auttaa.

Ennen kuin kappale voidaan tulostaa, se täytyy pilkkoa. Ennen pilkkomista on mahdollista liikutella kappaletta tai skaalata se eri mittakaavaan. Kun lopulliset päätökset on tehty, kappale pilkotaan, ja ohjelma laskee sen G-koodin. Tällöin ohjelma myös ilmoittaa oletetun valmistumisajan sekä käytettävän materiaalin määrän.

Kun oikea lämpötila on saavutettu, tulostin hakee nollakohtat X-, Y-, ja Z-akseleille. Nollakohta haetaan ennen jokaista tulostusta, siten tulostin pysyy tarkkana joka kerralla. Ensimmäisen kerroksen oikea korkeus on tärkeä. Jos tulostustaso on liian korkea, kappale ei takerru kunnolla pedille, eikä pysy kiinni. Jos taas pinta on liian lähellä tulostuspäätä, materiaalin kulku suuttimen läpi saattaa estyä ja synnyttää tukoksen tai jopa rikkoa tulostuspään. Useimmiten tässä tilanteessa syöttölaite pureutuu kiinni materiaalinauhaan ja mahdollisesti juuttuu kiinni.

Kun tulostaminen on onnistuneesti aloitettu, on vielä syytä tarkkailla tulostusjälkeä. Jos asetukset ovat oikeat, tulostimen voi jättää tekemään työtään itsenäisesti. Alkuun ja uudella materiaalilla työskennellessä on kuitenkin syytä tarkkailla syöttääkö tulostin tarpeeksi materiaalia ja tulostuuko kappale oikein, takertuvatko kerrokset toisiinsa ja välttyäänkö tyypillisiltä tulostusvirheilä. Vaikka asetukset olisivat sopivat yhdelle materiaalille, ne saattavat olla täysin kelvottomat toiselle. Uudella materiaalilla alkuun pääseminen ottaa aikansa ja pienistä vastoinkäymisistä ei kannata masentua (kuva 3). Asetuksien saaminen kohdalleen onnistuu parhaiten tulostamalla pieniä koordinaatio-kappaleita, jotka ovat nopeita tulostaa, eivätkä vie paljon materiaalia.



**KUVA 3. Koordinaatiokappale**

Tutulla materiaalilla työskennellessä tulostimen voi jättää pitkäksiin aikaa tarkkailematta, mutta suuria kappaleita tulostaessa on hyvä käydä välillä varmistamassa että tulostaminen sujuu toivotulla tavalla.

Myös turvallisuus on syytä huomioida, sillä tulostimessa on osia joiden lämpötila on hyvin korkea. Tulostuspään lämpötila voi olla jopa 300°C vaativaa materiaalia tulos-tettaessa. Lapsia ja eläimiä ei tulisi päästää samoihin tiloihin aktiivisen tulostimen kanssa. Valtaosa tulostusmateriaaleista myös vapauttaa kuumentuessaan kaasuja, joille jatkuva altistuminen voi aiheuttaa erilaisia oireita.

Kun riittävän moni asia menee pieleen, viallinen tulostin voi aiheuttaa tulipalon. Periaatteessa pelkkä pilkkuvirhe koodissa lämpötilaa tulkitsevalle skaalaukselle voi johtaa tulostuspään sulamiseen ja muoviosien palamiseen. Tulostimen palaminen on harvinaista, mutta mahdollista.

#### **4.2 Jälkikäsittely**

Kappale irtoaa lämpöpedin lasilevystä itsestään, kunhan kappale on jäähtynyt tarpeeksi. Jos ohuita tai pieniä kappaleita irrottaa omatoimisesti heti tulostamisen jälkeen, kappale voi taipua tai muuten vioittua, koska se on vielä pehmeä. Lasin tulisi myös

mieluummin antaa jäähtyä itseksensä, sillä sen nopea jäähdyttäminen voi myös aiheuttaa jännitteitä ja rikkoa lasin.

Tulostuksen jälkeen tulosteen jälkikäsitteilyn olen hoitanut itse puukon, hiomapaperin ja asetonin avulla. Koska Bowden-järjestelmä vuotaa materiaalia hieman siirtymien aikana, jokaisessa tulosteessa on pientä korjaamista. Hiomapaperia en ole juurikaan käyttänyt, sillä pintalaatu on ollut hyvää, mutta se soveltuu parhaiten isojen pintojen tasoittamiseen. Hiomapaperi jättää sille tyypillisen vaalean hiomajäljen, joten kappale kannattaa jälkikäsitellä vielä asetonilla tai maalaamalla.

Asetonia kannattaa hyödyntää haihduttamalla sitä pienessä suljetussa astiassa johon työstettävä kappale mahtuu. Pienemmässä astiassa asetonihöyryn määrä suhteessa ilmaan kasvaa nopeammin, varsinkin jos haihdutus pintaa on lisätty esimerkiksi vuoraamalla seinät talouspaperilla. Sopiva haihdutusaika vaihtelee purkista ja kappaleesta riippuen, mutta jo 15 minuutin aikana kappaleen pinnan pitäisi pehmentyä ja alkaa kadottamaan tulostuksen kerroksista johtuvia pykälä. Kappaletta ei myöskään saa pitää purkissa liian kauan, muutoin se saattaa pehmentyä liikaa ja sulaa kokonaan. Kun kappaletta nostetaan purkista, on huomioitava että sen pinta on pehmeä. Nostettaessa varsinkin pienet yksityiskohdat saattavat vioittua herkästi.

Asetonilla on muitakin käyttökohteita kuin tulostetun kappaleen pinnan tasoittaminen. Sillä voi liimata ABS-muovia erittäin lujasti, tai pikemminkin juottaa kaksi kappaletta toisiinsa. Liimattavat pinnat kostutetaan asetonilla muutaman kerran ja muovin pehmentyessä kappaleet liitetään toisiinsa. Lopputuloksena kappaleet sulavat yhteen, ja asetonin haihtuu kappaleesta viimeistään muutamassa tunnissa.

Tulostettuani rattaat uuteen syöttölaitteeseen, totesin pulttien kahdeksankantaisten kolojen olevan liian tiukat. Puukkoa käyttäen se oli haastava muokata suuremmiksi ja edelleen symmetrisiksi. Kostutin kappaletta asetonilla, kunnes kolon sivut olivat riittävän pehmeät, että pultin saattoi painaa paikalleen. Kuivumisen jälkeen rattaassa oli täydellisesti pultille sopiva paikka.

## 5 TULOSTIMEN SUUNNITTELU

Tulostimen suunnittelu ja rakentaminen oli hidas mutta mielenkiintoinen projekti, sillä minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta 3D-tulostimen toiminnasta tai rakenteesta. Käytin kaksi viikkoa vain tutkiakseni muiden rakentamia tulostimia, runkojen valintoja, syöttömekanismeja ja tarvittavaa elektroniikkaa. Tästä valmistautumisesta huolimatta uusien tarvikkeiden tilaaminen ja osien vaihtaminen sekä suunnitelmien muuttaminen oli arkista, välillä budjetista joutui joustamaan ja ostamaan laadukkaampia osia kuin oli alun perin ollut tarkoitus, välillä tarvittiin osia, joiden tarvetta en osannut ennakoita. Taloudellisista syistä valtaosa näistä tuotteista saapui kiinasta, mutta välillä nopeaan tarpeeseen haettiin tavaraa paikallisesta rautakaupasta ja joskus jopa romuttamoilta.

### 5.1 Runko

#### 5.1.1 Rungon kuvaus

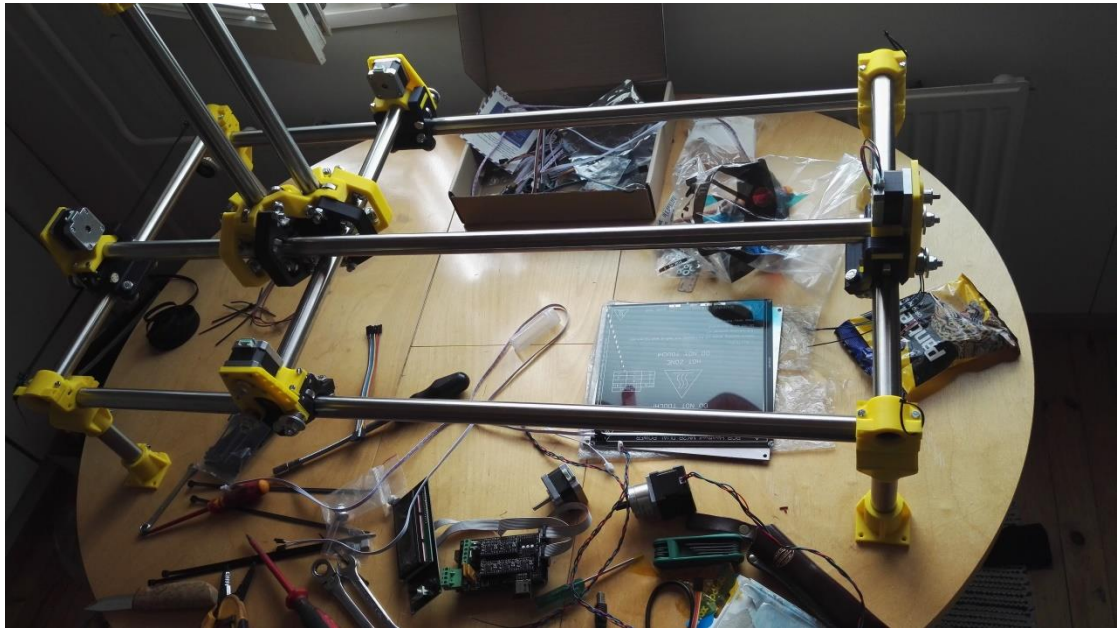
Rungoksi valitsin kuvassa 4 olevan CNC-koneen rungon joka löytyi osoitteesta <http://www.vicious1.com/assembly/>. Valintaperusteina olivat edullisuus, helppo koon muutettavuus tarpeen vaatiessa, sekä rungon verkossa saama positiivinen palaute. Rungon kaikki osat, putkia lukuun ottamatta, olivat tulostettavissa, ja kaikkien osien mallit olivat saatavilla sivustolla. Runkoon käytettiin 6 metriä kirkasta haponkestävää teräsputkea ja kaikki liikkuvien osien kontaktit putken pintaan laakeroitiin. Lopputulos on tukeva ja suhteellisen mittava, noin 90 x 50 x 20 cm kooltaan oleva tukirakenne.

Kaikki rungon muoviosat ovat Perttu Mäkysen tulostamia. Osat on mitoitettu siten, että valmiit reiät on puhdistettava poraamalla, jotta haluttu tarkkuus säilyisi. Kappaleita ei sen ohella tarvinnut jälkikäsitellä joidenkin osien reunojen hiomista lukuun ottamatta.

Rungon toiminta (kuva 4) perustuu siihen, että tulostuspää on sidoksissa Z-akselin osassa, jonka paikka määräytyy X- ja Y-akseleiden avulla. X- ja Y-akseleissa on molemmissa päissä askelmoottorit, jotka liikuttavat keskiakseleita hammashihnojen avulla.



la. Z-akseli tarvitsee vain yhden moottorin liikuttaakseen tulostuspäätä ylä- ja alasuunnassa, sillä se liikkuu näiden keskiakselien varassa.



**KUVA 4. Tulostimen runko**

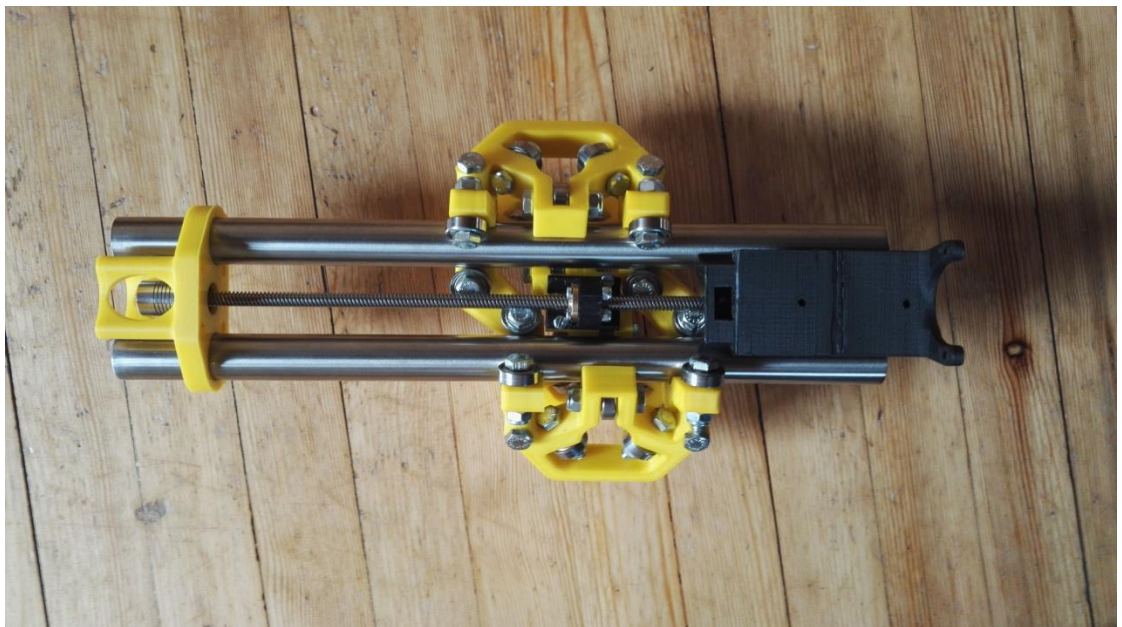
Runkotyypistä riippumatta olennaista on rungon tukevuus ja tasaisuus. Pienetkin korkeuserot ovat kriittisiä, puolen millin nousu tulostettavan kappaleen tasossa voi johtaa sen irtoamiseen tulostuspinnasta. Tätä voi korjata itsenäisesti säädettävillä lämpöpedin jaloilla, mutta mitä tasaisempi alusta on, sen parempi. Pitkät kappaleet kärsivät epätasaisuudesta erityisesti, sillä jos päätyjen korkeuksissa on eroja, virhe korostuu pitkällä matkalla. Myös ristimitta on tarkistettava, jotta voidaan varmistaa rungon symmetrisyys.

Tuin pohjalevyäni sen alapuolelta kahdella suoralla 1 x 1.5 tuumaisella lankulla, sillä levy itsessään ei ollut riittävän jäykkä säilyttääkseen muotonsa, vaan oli kaksi millia vajaa keskivaiheeltaan. Suoruus on helppo testata heti kun moottorit ovat ajettavissa, siirtämällä tulostuspäätä mahdollisimman lähelle nurkan nollakohtaa, ja ajamalla hitaasti vastakkaiseen reunaan. Mikäli tulostuspään ja pohjan väli pysyy minimaalisena, pohja on riittävän suora.

Z-akseli (kuva 5) osoittautui yllättävän painavaksi, sillä se sisältää itsessään 24 kpl M8-pulttia ja mutteria, vastaavan määrän 608-tyypin laakereita, 80 cm pituudelta 25

mm happoputkea sekä 40 cm M8-trapetsitankoa. Z-akselin kierretanko korvattiin trapetsitangolla kulumisen ja lämpenemisen vähentämiseksi. Pienenä pettymyksenä tuli trapetsin pultin hienoinen väljyys, mutta se ei juuri vaikuta tulostamiseen akselin painon takia. Trapetsitangon voiteluun käytin nanovaseliinia, ja se on toiminut erinomaisesti, liikkuvuus yhdellä askelmoottorilla on moitteeton.

Mitä pidemmässä varressa Z-akseli on, sitä epätarkempi se on. Korkeutta ei kannata ylimitoittaa, jos ei erikseen tiedä tarvitsevansa korkeita tulosteita. Korkeissa tulosteissa tulee muitakin ongelmia, kuten epätasainen jäähtyminen ja sen aiheuttamat pintavauriot.

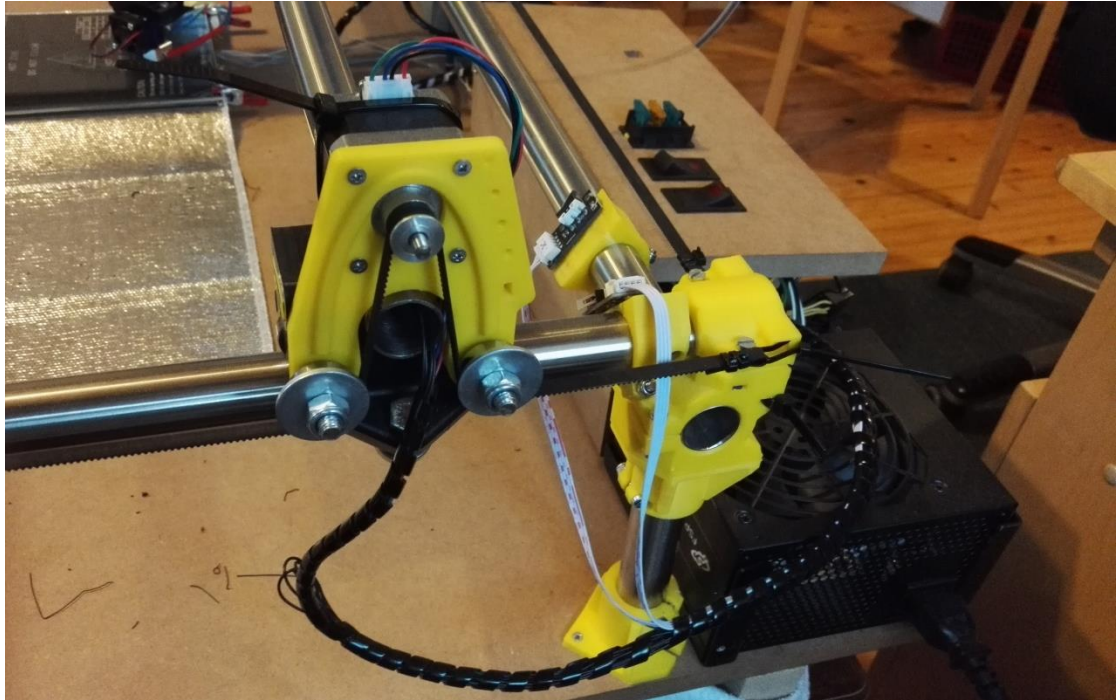


**KUVA 5. Z-akseli**

X- ja Y-akselit toimivat keskenään samanlaisilla komponenteilla, mutta eri tasoissa. Kuvassa 6 näkyy, kuinka johdot on kuljetettu putkea pitkin myös vastakkaiselle puolelle putken sisäpuolella. Moottoreita kannattelevista kappaleista löytyi mekaaninen heikkous kovan rasituksen alaisena, mikä mahdollisti hammaspyörän hyppäämisen hihnalla, aiheuttaen siirtymän (shifting layer), mutta se korjaantui kiristämällä moottorit putken pätyihin nippusiteillä.

Oikean virran määrittäminen X- ja Y-akselille oli myös tärkeää, sillä liian matala virta saa moottorit satunnaisesti jättämään askelia välistä, kun taas liian suuri virta

kuumentaa moottoreita huomattavasti. Kun siirtymä ensimmäisen kerran tapahtui, arvelin sen johtuvan liian kapeasta nylonvahvisteisesta hammashihnasta, mutta ongelma korjaantui varovaisella virran lisäämisellä. Myös nopeuden laskeminen vähentää kerroksen siirtymän riskiä.



**KUVA 6. X- ja Y-akseli**

Pohjalevy ja elektroniikan kotelointi on tehty massalevystä joka on ollut kuljetusalalla olevan tuttavani rahdin alusena. Kierrätysmateriaalia on myös tulostusmateriaalin teline joka on tehty vanhan sähkökaapin ovesta, sekä osa sähköjohdoista ja liittimistä, virtajohtoa ja muutama tuuletin jotka on hankittu romuttamolta.

### **5.1.2 Rungon rakentaminen**

Rakentaminen kannattaa aloittaa laittamalla kaikki laakerit paikoilleen. Pultteja kiristäessä kannattaa jättää hieman löysää, jotta laakerit eivät jumitu tai hierrä muoviosia. Hyvä nyrkkisääntö tiukkuudelle on, että pultteja pystyy juuri ja juuri kääntämään käsin. Jokainen kappale kannattaa tarkistaa kasaamisen jälkeen ja varmistaa, että laakerit pyörivät moitteettomasti.





**KUVA 7. Tulostimen jalka**

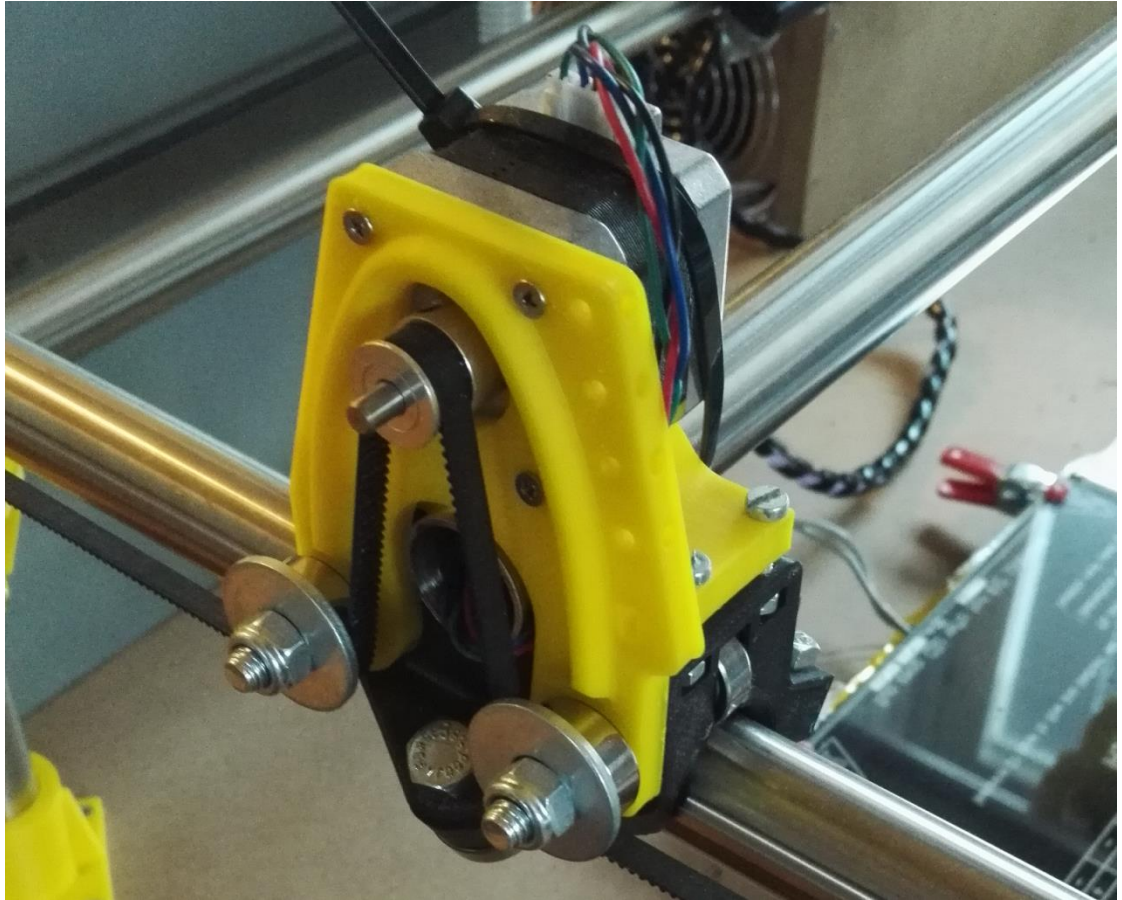
**TAULUKKO 1. Ulkokehä ja jalat**

3	kpl	100cm	putkea
3	kpl	50cm	putkea
4	kpl	15cm	putkea
28	kpl	M4 x 20	pultti
8	kpl	M4	mutteri
20	kpl	M4	nylock-mutteri
8	kpl	15mm	kalusteruuvi

Jalkoja (kuva 8) kasataan neljä kappaletta. Jalat on kasattava täysin, ennen kuin ne voidaan liittää X- ja Z-akselien putkiin. Normaalit mutterit ovat tarkoitettu ylimmille pulteille. On huomioitava, että 15 cm putki ottaa päädyistään kiinni vastakappaleisiin ja että jalat asennetaan oikein päin. Jalat sopivat runkoon myös väärin päin, mutta se aiheuttaa ongelmia hammashihnojen kiinnittämisessä. Lista tarvittavasta materiaalista on lueteltu taulukossa 1.

Rungon putkia ei kannata tiukata paikoilleen, sillä loput kappaleet on huomattavasti helpompaa pujottaa paikoilleen putken päästä, kuin kasata paikoilleen putken ympäril-

le, eikä se ole kaikkien osien kanssa mahdollistakaan. Hammashihnat kannattaa kiinnittää vasta viimeisenä, kun X-, Y-, ja Z-akselit ovat paikoillaan.



**KUVA 8. Liikkuva pääty, X- ja Y-akselit**

**TAULUKKO 2. X- ja Y\_ akselien liikkuvat päädyt**

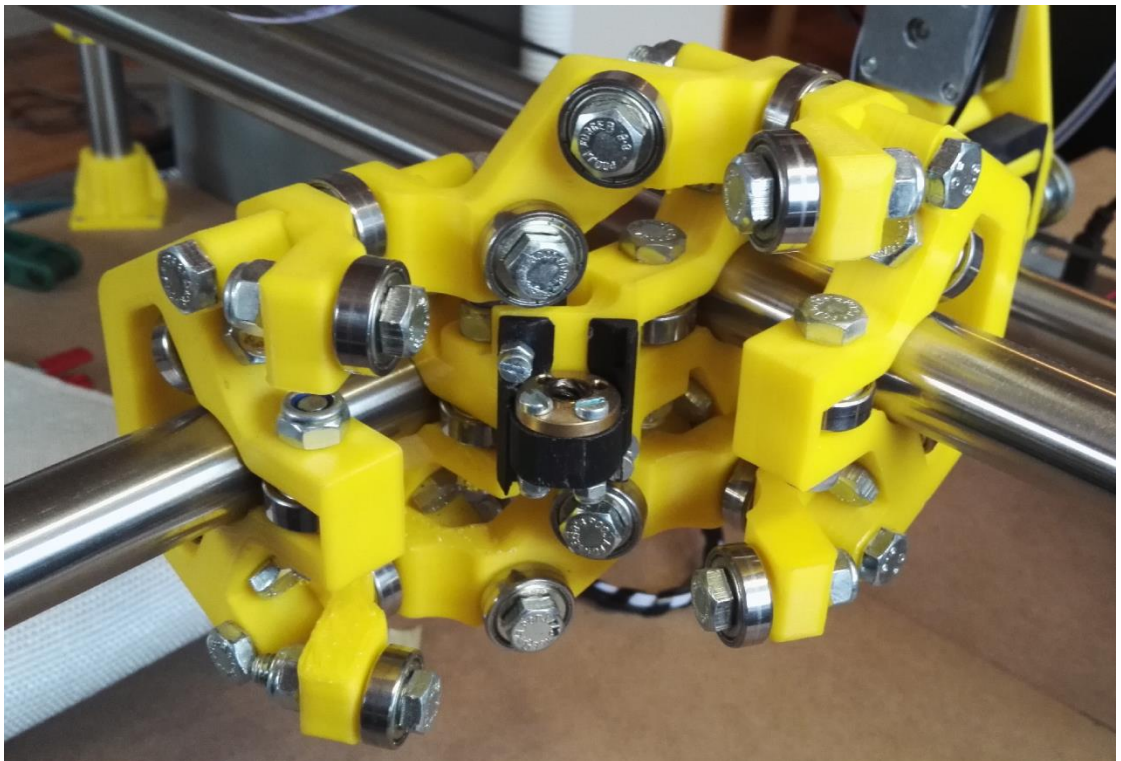
8	kpl	M8 x 70	pultti
12	kpl	M8 x 30	pultti
8	kpl	M8	aluslevy
16	kpl	M8	aluslevy, pieni
20	kpl	M8	nylock-mutteri
8	kpl	M4 x 20	pultti
8	kpl	M4	mutteri
28	kpl	608	laakeri

Liikkuvia päätyjä (kuva 9) kasataan neljä kappaletta. Pitkän pultin asennusjärjestys on: Pultti, aluslevy, pieni aluslevy, laakeri, pieni aluslevy, runko, laakeri, runko, nylock-mutteri. Tarvittavat materiaalit on lueteltu taulukossa 2.

Moottorit voi kiinnittää, mutta keskiakselia ei kannata kiristää paikoilleen, ennen kuin Z-akseli on valmis. Rungon putkia ei kannata edelleenkään kiristää.



**KUVA 9. Z-akselin kiinteä osa ylhäältä**



**KUVA 10. Z-akselin kiinteä osa edestä**

Z-akseli on hieman monimutkaisempi kasattava kuin muut osat, ja se on jaettu kahteen osaan, kiinteään ohjainosaan (kuvat 10 ja 11) ja Z-liikkeen tekevään korkeuden

säätävään liikkuvaan osaan (Kuva 12 ja 13). Tarvittavat materiaalit on lueteltu taulukoissa 3 ja 4.

### TAULUKKO 3. Kiinteä osa Z-akseli

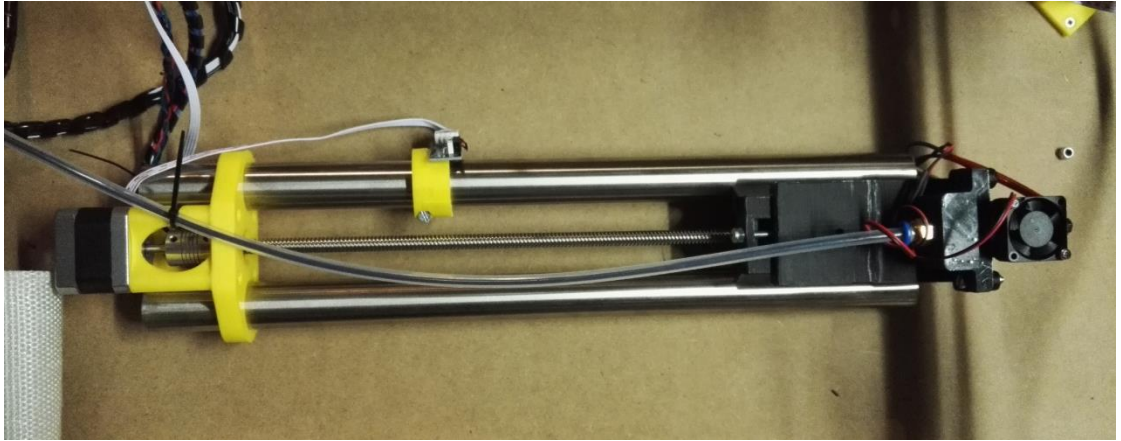
1	kpl	M8	trapetsimutteri
4		M8 x 80	pultti
20		M8 x 30	pultti
24	kpl	M8	nylock-mutteri
24	kpl	608	laakeri
4	kpl	M4 x 20	pultti
4	kpl	M4	nylock-mutteri

Kiinteä osa kannattaa aloittaa lyhyiden pulttien laakereiden kiinnittämisellä. Kun laakerit ovat paikallaan, kappale koostuu neljästä suuremmasta palasta ja trapetsimutterin kiinnikkeestä. Ylä- ja alakappaleissa on päädyissä lovet, joihin sivukappaleet sopivat vain tietyin päin. Näitä kohtia voi joutua hieman hiomaan, jotta palaset istuvat täydellisesti. Pitkät pultit kannattaa kiristää vasta, kun kaikki neljä pulttia ovat paikallaan.

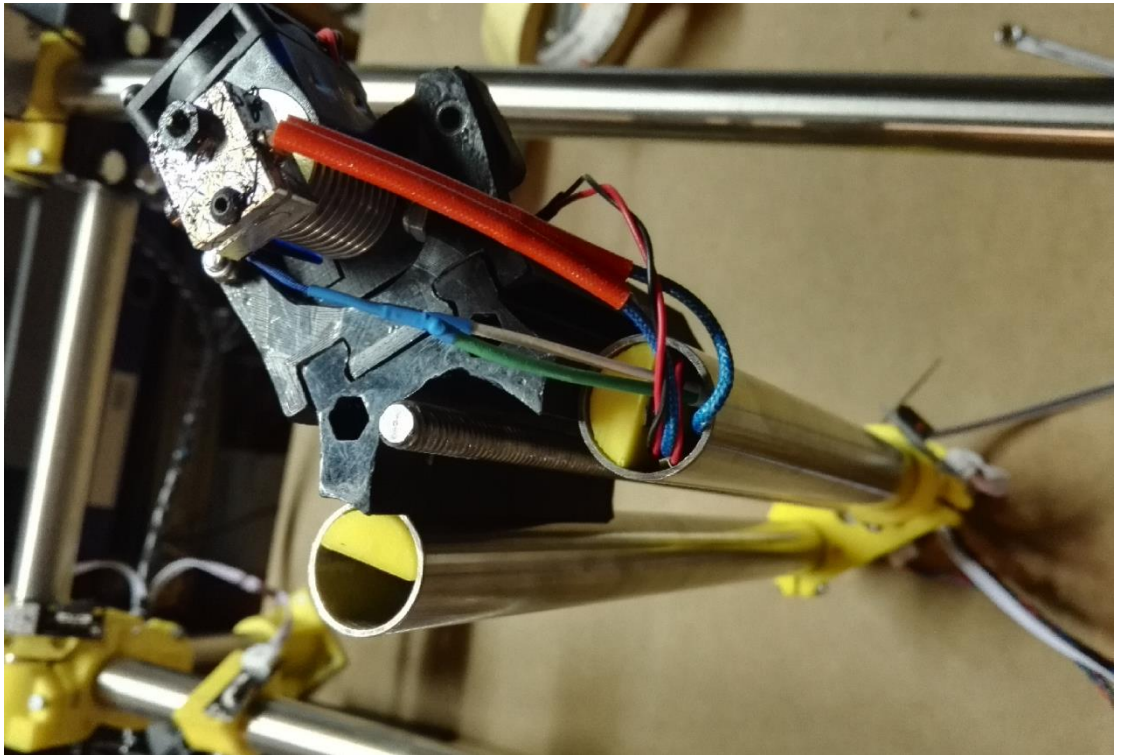
Kun ohjainosan runko on kasassa (kuvassa 11 kaikki keltaiset osat), voidaan kiinnittää trapetsitangon mutteri sen kiinnikkeeseen ja kiinnike runkoon. Kiinnikkeen etäisyyttä rungosta voi joutua myöhemmin säätämään esimerkiksi lisäämällä pieniä aluslevyjä, jotta mutterin ja trapetsitangon kulma olisi sopiva. Trapetsimutterin kiinnikepulttien kantoja voi joutua hiomaan, jotta ne saadaan mahtumaan paikoilleen.

Kun Z-akselin kiinteä osa, liikkuvat päädyt ja ulkokehä ovat valmiit, ne voidaan yhdistää. Kun osat on yhdistetty, on hyvä hetki tarkistaa putkien pituus ja ristimitta. Putkien kiinnikkeet kannattaa kiristää siirtämällä Z-akselin kiinteä osa ensin lähelle kiristettävää nurkkaa ja sitten ruuvaamalla kiinnikkeiden pultit riittävään tiukkuuteen.





**KUVA 11. Z-akselin liikkuva osa**



**KUVA 12. Z-liikkuva osa pohjasta**



**TAULUKKO 4. Liikkuva osa Z-akseli**

2	kpl	40cm	putkea
1	kpl	40cm	trapetsitanko
1	kpl	M8	kytkentäruuvi trapetsille
7	kpl	M4 x 20	pultti
1	kpl	M4 x 30	pultti
7	kpl	M4	nylock-mutteri
1	kpl	M4	mutteri
2	kpl	15mm	kalusteruuvi
1	kpl		söytöletkun adapteri
1	kpl	608	laakeri
1	kpl	Nema 17	askelmoottori
4	kpl	M3 x 10	pultti

Putkien alapäähän porataan reiät kahdelle pitkittäin halkaistun tangon muotoisille kappaleille. On hyvin tärkeää, että reiät ovat oikeassa linjassa, muuten Z-akselista tulee kiero. Reikiä paikoittaessa ne kannattaa piirtää putkien sisäpuolelle sijoitettavien kappaleiden avulla. Kun oikeat kohdat on merkattu, niihin kannattaa lyödä alut pistepuikolla, sillä varsinkin kovapintaisen putkien tarkka poraaminen on haastavaa.

Tavallinen M4-mutteri on pikakiinnikkeen lukkona. Kalusteruuvit ovat tulostuspään liittämiseksi, eikä niitä tarvitse vielä kiinnittää. Laakeri tulee kytkentäruuvien alapuolelle. Moottori kannattaa kiinnittää, sillä se ei ole minkään tiellä. Sähkötekniikan kytkemiset kannattaa suorittaa myöhemmin, mutta itse kiinnitin Z-akseliin telineen Endstop-katkaisijalle.

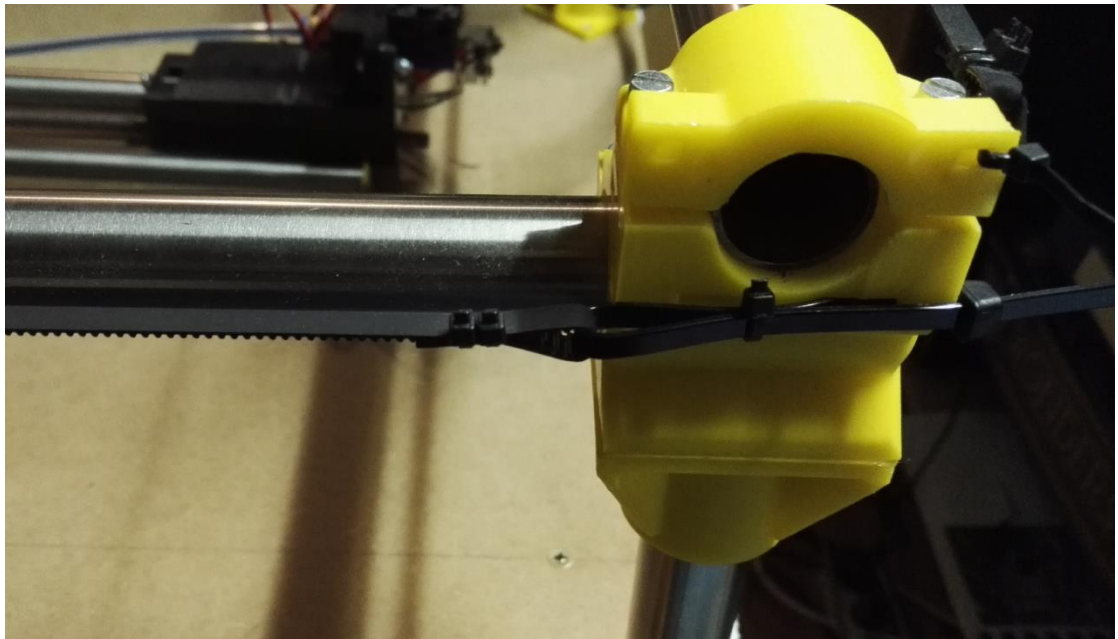
Kun Z-akselin liikkuva osa on valmis, sen voi oikeinkasattuna asettaa paikalleen syötämällä sen yläkautta Z-akselin kiinteään osaan. Trapetsitanko kannattaa voidella kevyesti vaseliinilla.

### TAULUKKO 5. Hammashihnat

4	m		hammashihna
4	kpl		hammaspyörä
1	ps	150 x 3,5	nippuside
1	ps	300 x 4,6	nippuside

Kun runko on valmis ja kaikki kiinnikkeet on kiristetty, voidaan kiinnittää hammashihnat ja pyörät. Nema 17 -perusaskelmootoreissa akseli on tasasivuinen, eli siinä ei ole pykälää. Akseliin voi viilata tasaisen sivun hammaspyörän pidon varmistamiseksi. Hammaspyörää kiinnittäessä kannattaa jättää hieman väljää moottorin ja hammaspyörän välille, jotta ylimääräistä kitkaa ei synny. Hihnan kulku moottoreille näkyy kuvassa 9, ja tarvittavat materiaalit on lueteltu taulukossa 5.

Hihnan kiinnittäminen nurkkiin onnistuu leveillä nippusiteillä. Hihnaan kannattaa tehdä lenkki painamalla hammaspinnat vastakkain ja puristamalla ne yhteen pienillä nippusiteillä (kuva 14). Hihnat kannattaa kiristää mahdollisimman tiukalle, mutta järjenkäytön rajoissa. Hihnat ovat nylonvahvisteista kumia, mutta saattavat kovan rasituksen alla katketa. Ylimääräistä hihnaa kannattaa olla varastossa, sillä kuluessaan hihna haurastuu ja saattaa katketa kesken tulostuksen.

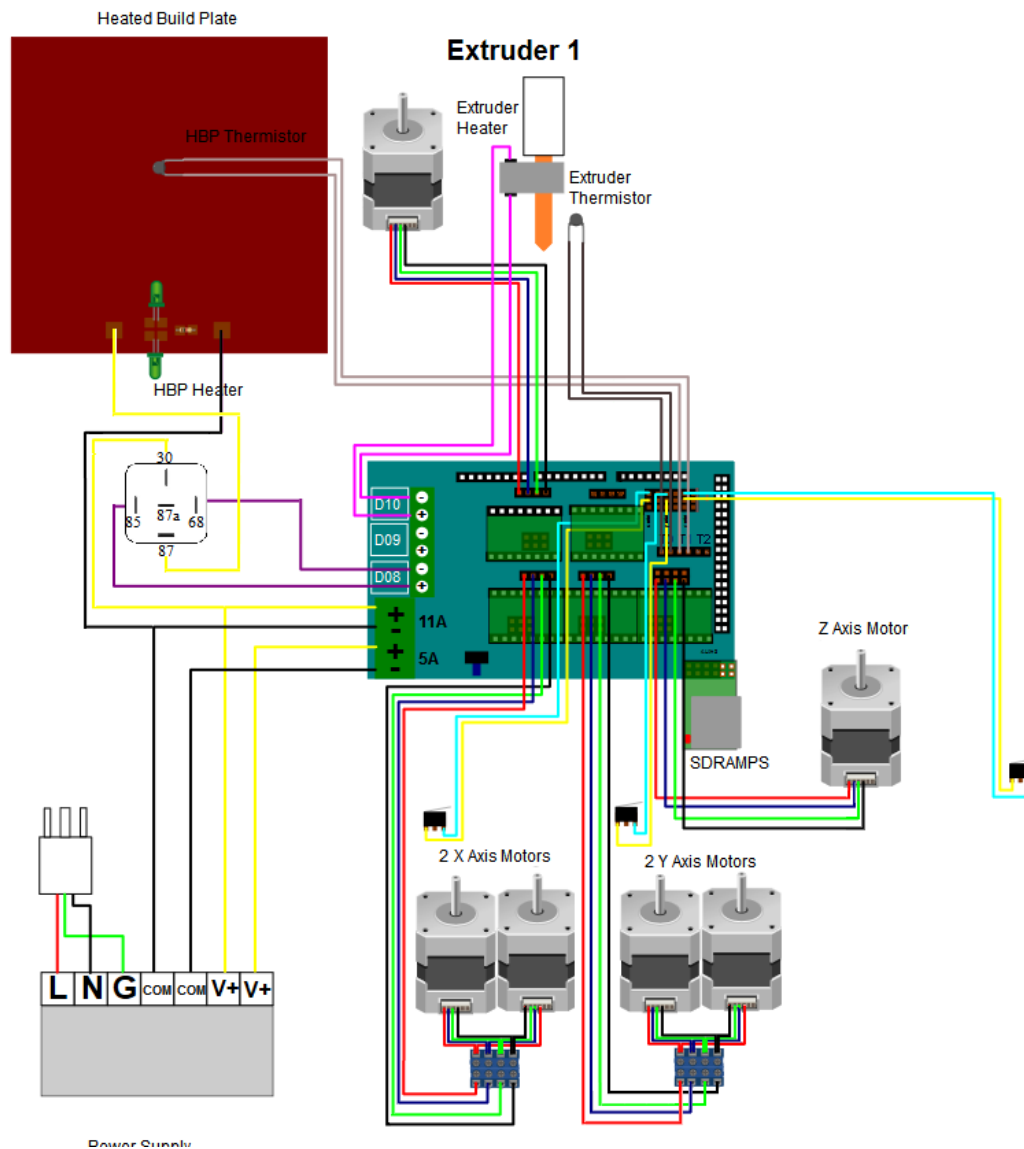


**KUVA 13. Hammashihnan kiinnitys**

## 5.2 Elektroniikka

Lista elektroniikasta löytyy liitteestä 2.

KytKentä poikkeaa yleisestä 3D-tulostimen kytkennästä moottoreiden osalta. Koska X- ja Y-akselit toteutetaan kahdella moottorilla, ne on kytkettävä ristiin niin, että veto-suunnat ovat vastakkaiset (kuva 15). Yksiväristä kaapelia käyttäessä on joskus vaikea pysytellä selvillä moottorien kytkemisessä, mutta suunta on helppo kokeilla myös jännitteettömästi. Kun moottorit on kytketty yhteen, pyöräyttämällä toista akselia myös toinen pyörähtää. Jos kytkentä on oikein päin, akselit pyörähtävät vastakkaisiin suuntiin.



KUVA 14. Peruskytkentä (RepRap.org, Rampswire14 2016)

Moottoreja ohjaaviin pololuihin on ehdottomasti liitettävä jäähdytyslementit, muuten ne palavat käytössä, tai saattavat kuumentuessaan vaurioittaa johtoja tai RAMPSia. KytKentäkuvasta puuttuvat sulakkeet ja tuulettimet.

RAMPSille ja Arduinolle kannattaa asentaa oma tuuletin, joka huolehtii niiden jäähdyttämisestä aina, kun tulostin on päällä. Myös tulostuspää tarvitsee jatkuvan jäähdytyksen, jotta sulatusalue kattaa vain suuttimen ja lämmitysblokin. Jos tuuletus ei ole käytössä, koko tulostuspää kuumenee ja tukkeutuu. Myös kiinnikkeet saattavat sulaa ja koko tulostuspää voi irrota. Kaikki tuulettimet ja lämpöpöpeti ovat sulakkeiden takana.

Ennen jokaista tulostusta haetaan nollapiste endstop-kytkimien avulla. Määritin oman nollapisteeni vasempaan alanurkkaan, pari senttiä tulostuspinnan alapuolelle. Endstopien sijoittamisessa joutuu käyttämään vähän luovuutta, sillä niille ei ole valmista paikkaa. Tein niille kiinnikkeet runkoon aikaisemmin korvaamistani Z-akselin pika-kiinnikkeistä, joille ei enää ollut käyttöä.

### **5.2.1 Arduino Mega 2560**

Tulostimen sydän on Arduino, avointa lähdekoodia käyttävä elektroniikka-alusta ja ohjelmointiympäristö. Arduinolle ladataan koodi, ja se jää Arduinon muistiin käytettäväksi. Alkuperäisenä alustana toimi Sainsmart Mega 2560 R3, joka paloi, mutta Arduino Mega 2560 on käytännössä identtinen.

Marlin firmware on tarkoitettu Arduino-pohjaisiin tulostimiin. Se on koodipohjana tulostimen toiminnalle. Arduinon Marlinin kautta ohjelmoitu numeeriset arvot kaikille tarvittaville suureille. Koska tulostimissa on joskus suuriakin eroja, nämä arvot on skaalattava kullekin tulostimelle sopivaksi. Esimerkiksi akselien liikkeet annettulla arvolla ja langan syöttö on skaalattava. Kun Arduinolle syötetään reaaliarvo, se antaa viestin liikuttaa askelmoottoreita. Skaalaus pyritään saamaan mahdollisimman lähelle realistista pituutta siten, että esimerkiksi käskyllä X +50 X-akseli liikkuisi 50

mm eteenpäin. Valitettavasti tätä ei voi muuttaa ”lennosta”, vaan koodi on ladattava Arduinolle uudelleen jokaisen tehdyn muutoksen jälkeen.

### **5.2.2 Ramps 1.4**

Eli RepRap Arduino Mega Pololu Shield on matalahintainen elektroniikka-alusta, jossa on paikat kaikelle, mitä perustasoisessa 3D-tulostimessa tarvitaan. Siinä on paikat viidelle pololulle, jotka vastaavat moottorien virransyötöstä, sekä kolmelle lämpöanturille, kahdelle tulostuspäälle, kolmelle Endstop-anturille, lämpöpedille, LCD-näytölle ja SD-kortille. RAMPS asettuu suoraan Arduinon päälle, mikä mahdollistaa älykkään ohjaamisen.

Pololut on jäähdytettävä alumiinikammoilla, sillä ne kuumenevat käytössä voimakkaasti. Liitin Arduinon ja RAMPSin yhteyteen myös 8x8 cm tuulettimen pitämään lämpötilaa kurissa. Komponenttien ylikuumentuminen on tyypillinen vika, joka usein korjaantuu lisäämällä jäähdytystä, mutta joskus komponenttien palaessa ne on järkevämpää korvata kalliimmilla, suurempia virtoja kestäville komponenteilla.

Ensimmäinen asentamani RAMPS osoittautui vialliseksi, mutta ongelman löytäminen oli vaikeaa, sillä RAMPS poltti komponentin alla olevasta Arduinosta, vioittumatta itse näkyvällä tavalla. Tarkkailin kuitenkin toisen Arduinon lämpenemistä ja kokeilin vaihtaa RAMPSin, kun Arduinon komponentin lämpötila nousi yli 80°C. Koska laitteisto toimi tämän jälkeen normaalisti, vian täytyi olla RAMPSissa. RAMPSin edullisuuden vuoksi oli helpompi vaihtaa koko alusta yhden vaikeasti korjattavan komponentin sijasta.

### **5.2.3 Sähkötekniinen materiaali**

Tavallisesti 3D-tulostimissa on paljon vakio-osia elektroniikan suhteen. Muutamia listoja tutkittuani minulla oli auttava kuva siitä mitä kaikkea tarvitaan, mutta riittävän hinta/laatu-suhteen löytäminen oli haastavaa. Lukuisia peruspaketteja on kuitenkin tarjolla ja osassa myös mahdollisuus tulostimen rakentamiseen itsenäiseksi. Tässä on lista valitsemani paketin osista:

1 X Sainsmart RAMPS 1.4

1 X Sainsmart Mega 2560 R3

- 5 X Sainsmart A4988 driver
- 1 X Sainsmart LCD 2004 with controller
- 1 X Sainsmart SD card breakout for RAMPS
- 2 X Sainsmart cooler fan for 3D ramps
- 6 X Sainsmart mechanical endstop with cable
- 1 X Sainsmart RAMPS 1.4 wiring cable
- 1 X SainSmart Heatbed MK2b
- 2 X thermistor for headbed (100K ohm)
- 1 X Borosilicate glass
- 1 X Aluminium bed mount plate
- 5 X NEMA 17 stepper motors
- 1 X Assembled J-head hotend nozzle. (0.4MM for 1.75MM filament)
- 5 X GT2 17T aluminum pulley
- 1 X 5M GT2 Timing belt
- 1 X USB Cable

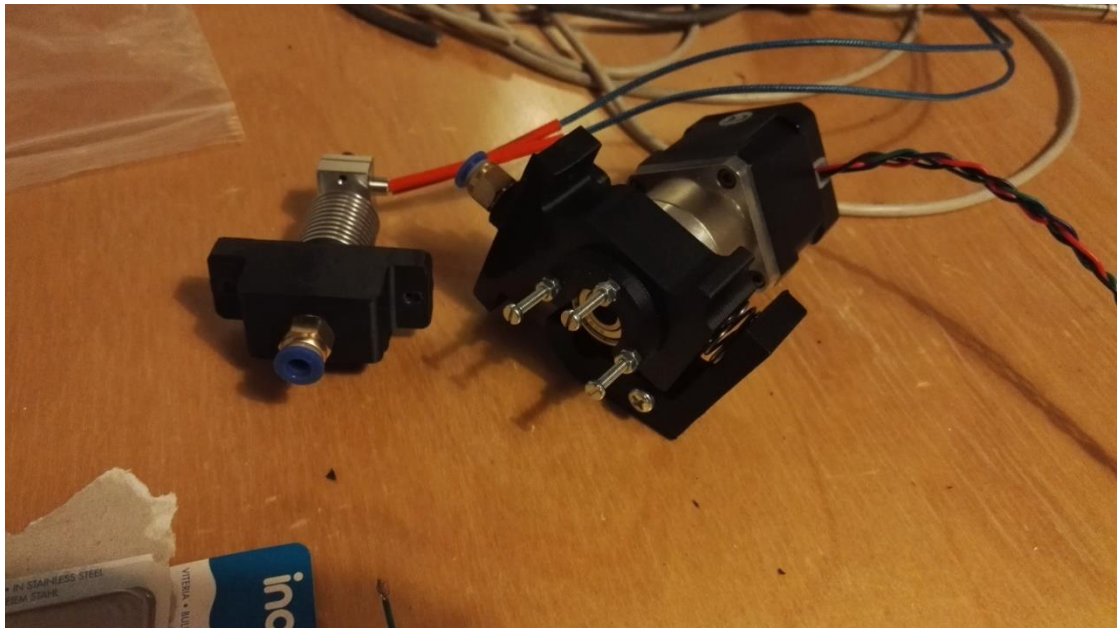
Paketti oli hyvin kattava, mutta korvasin muutamia osia. Korvaamani osat olivat syötön moottori, jonka korvasin planeettapyörästöllä varustetulla askelmoottorilla ja lämmitysblokki sekä suutin ja sen osat. Suuttimen myötä vaihdoin myös tulostusmateriaalin lankakoon kolmemilliseksi. Koska tulostimeni on keskivertoa isompi, tarvitsin myös runsaasti johtoa kaiken kytkemiseksi. Halvalla ostaessa kannattaa huomioida, että kaikki osat eivät välttämättä ole huippuluokkaa. Tästä paketista RAMPS ja yksi pololu olivat viallisia.

### 5.3 Syöttö

Tavallisesti syöttö on kiinteästi kiinni lämmitysblokissa, mutta tällöin syöttö on lisäpainona Z-akselilla. Valitsin Bowden-mallisen syötön, joka on Z-akselin ulkopuolinen syöttö (Kuva 16). Bowdenin toiminta perustuu materiaalin syöttämiseen muoviputkea pitkin lämmitysblokkiin. Hyötynä on Z-akselin painon keveneminen, joka kuormittaa kaikkia akseleita vähemmän ja mahdollistaa nopeammat liikkeet ilman hammashihnojen hyppimisen tai katkeamisen riskiä. Haittana on varsinkin siirtojen aikana tulostusmateriaalin ylimääräinen valuma (oozing). Se on kuitenkin vähennettävissä muuttamalla säätöjä ja vaatii erilaisten asetuksien kokeilemistä pitkällä aikavälillä. Esimer-

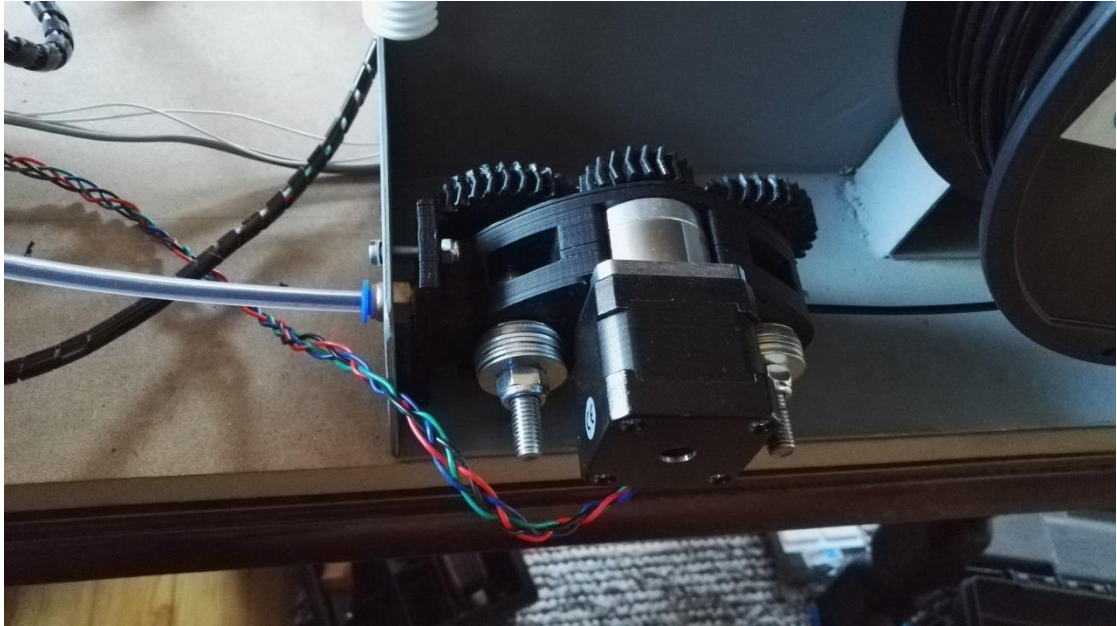
kiksi siirtymien aikana tulostusmateriaalia vedetään sisäänpäin, ja kun seuraava aloituspiste saavutetaan, syötetään materiaalia ulospäin yhtä paljon kuin sitä on vedettykin. Jos valumaa tapahtuu runsaasti tästä huolimatta, määrää täytyy kompensoida syöttämällä materiaalia takaisinpäin hieman enemmän kuin mitä alun perin on vedetty.

Muutaman kappaleen tulostamisen jälkeen totesin syötön välillä pureutuvan kiinni tulostusmateriaalinauhaan (filament). Aineen työntäminen lämmitysblokin läpi vaati yllättävän paljon voimaa, mikä on osittain Bowden-systeemin syytä. Moottorin teho oli riittävä, mutta langan kulutuksen kasvaessa syöttöpyörä söi kolon materiaalilankaan ja saattoi juuttua kiinni. Rullan aiheuttama kitka ei siis ollut riittävä liikuttamaan lankaa niin pienellä alalla, vaan rulla söi lankaan kolon.



**KUVA 15. Tulostuspää ja syöttölaite**

Vastauksena ongelmaan rakensin syöttölaitteen jossa on kaksi vetävää pyörää (Kuva 17). Sen käyttöönotto vaati moottorin suunnanmuutoksen ja uudelleenskaalauksen syöttönopeudelle.



**KUVA 16. Uusittu kaksiakselinen syöttö**

Tämän syötön pystyin jo tulostamaan itse. Syöttö on kytketty kiinni tulostusmateriaalilankatelineeseen. Tein telineen korkeaksi, jotta se on mahdollista koteloida tarpeen vaatiessa.

#### **5.4 Lämpöpeti**

Tällä hetkellä tulostimessa on yksi 20 x 20 cm lämpöpeti. Suurempien tai useampien käyttäminen vaatii toisen virtalähteen. Tavallisesti pedin alapuolella on 3 mm alumiinilevy, jonka tarkoitus on varastoida ja jakaa lämpö tasaisesti. Keskimmäisenä on litteä lämpöelementti ja päällimmäisenä borosilikaattilasi. Olennaista on, että lasi on riittävän paksu ja että se kestää lämpötilavaihteluita. Lasi kannattaa puhdistaa säännöllisesti esimerkiksi asetonilla, sillä pienikin lika tai pöly saattaa estää kappaleen tarttumisen tulostustasoon.

Peti on kiristetty pöytää vasten neljällä ruuvilla, ja jokainen nurkka on jännitetty ylöspäin jousella. Etuna on vapaa säätövara ja pienempi riski lasin särkymiselle ja pedin vioittumiselle vikatilanteessa, jossa Z-akseli painautuu petiä vasten. Lasi on puristettu kiinni lämpöelementtiin reunoiltaan neljällä pienoispuristimella.



## 5.5 Ohjelmat

### 5.5.1 Marlin Firmware

Marlin on hyvin suosittu firmware 3D-tulostimelle. Firmwarella tarkoitetaan softwarea, joka muuttaa g-koodin tulostamiseen tarvittaviksi liikkeiksi. Tulostimen yksilölliset skaalaukset tehdään Marliniin ja ladataan sitten Arduinolle, joka on yhteydessä RAMPSiin.

### 5.5.2 Pronterface

Pronterface on tulostusohjelma, mutta en hyödyntänyt sitä tulostuskäytössä lainkaan, vaan kokeillakseni tulostimen liikeratoja, langan syöttöä ja määrittääkseni X- Y- ja Z-akseleille askeleet, jotka vastasivat realistisia pituuksia. Pronterface oli ensimmäinen lataamani tulostusohjelma, mutta myöhemmin totesin Repetier Hostin olevan itselleni käytännöllisempi vaihtoehto jo pelkästään sisäänrakennetun Slic3r ohjelman ansiosta.

### 5.5.3 Slic3r

Slic3r nimensä mukaisesti ohjelma, joka pilkkoo 3D-mallin kerroksiin ja suunnittelee tulostusjärjestyksen. Sillä voi myös esimerkiksi suunnitella kappaleen täyttölaajuuden ja -kuvioinnin, tai suorittaa tulostuksen kahdelle kappaleelle eri asetuksilla. Tulostuksen aikana kappale on tarkkailtavissa myös näytöltä reaaliajassa. Ohjelma oli alkuun ilmestyessään jonkinlainen edelläkävijä, sillä monet ominaisuudet, jotka ilmestyivät ensimmäistä kertaa Slic3rissä, ovat löytäneet tiensä melkein kaikkiin kaupallisiin vastikkeisiin.

Slic3rin käyttölaajuus on hyvä, se tukee lähes kaikkia moderneja tulostimia, toimii Windowsilla, Macilla ja Linuxilla, ja on yhteensopiva monien muiden ohjelmien kanssa, mukaan lukien Repetier Hostin. Ohjelma on ilmainen ja kehitetty RepRap-yhteisön toimesta ei-kaupallisena projektina. (Slicer.org 2016.)

### 5.5.4 Repetier Host

Yksi syy Repetier Hostin valitsemiseksi oli sen yhteensopivuus Slic3r.in kanssa, toinen sen helppokäyttöisyys. Repetier Host mahdollistaa tulostimen kontrolloimisen ja näyttää jatkuvaa informaatiota laitteen toiminnasta. Vikakoodit helpottavat erilaisten ongelmien löytämistä ja esimerkiksi lämpöpedin sekä lämmitysblokin itsenäinen lämmittäminen tai tulostimen ohjaaminen on mahdollista tulostamisen ulkopuolella.

Repetier Hostin muistiin voi tallettaa eri asetuksia erilaisille tulostusmateriaaleille ja tulostuspäille, jopa eri tulostimille. Slic3r toimii eräänlaisena alaohjelmuna ja suorittaa omat tehtävänsä ilman että sitä tarvitsee käyttää erillisenä ohjelmuna. Tulostuksen eteneminen on seurattavissa reaaliaikaisena 3D-mallina, jossa tuorein tulostusjälki näkyy ”kuumana” eli punaisena materiaalina.

### 5.5.5 Cura

Kokeilin myös Curaa, joka on Ultimakerin ilmainen tulostus- ja pilkkomisohjelma. Siinä on runsaasti erilaisia parametreja ja muokkausmahdollisuuksia parhaan lopputuloksen saamiseksi. Cura on myös helppokäyttöinen ja nopea pilkkomaan 3D-mallin tulostettavaan muotoon. Sillä on myös muita käytännöllisiä ominaisuuksia, kuten 2D-mallin muuttaminen 3D-malliksi lataamalla jpg-muodossa oleva kuva suoraan tulostusalustalle. Cura antaa muutaman vaihtoehdon kuvan muokkaamiselle kappaleeksi ja sen jälkeen se on suoraan tulostettavissa.

Minulla oli kuitenkin ongelmia tulostustason korkeuden kanssa, joten jätin Curaan tutustumisen myöhemmäksi ja aloin työstää tulostusasetuksia Repetier Hostille.

### 5.5.6 123D Design

123D Design on yksinkertainen 3D-mallinnusohjelma, joka sopii aloittelijoille. Ohjelma on lähinnä kokeilukäytössä, koska minulla ei ole aikaisempaa kokemusta 3D-mallien tekemisestä. Latasin 123D Designin harjoitellakseni peruskappaleiden luomista. Olen tehnyt vain hyvin yksinkertaisia käytännönläheisiä malleja, kuten tukikehän löysälle USB-portille ja pesukoneen kannen lukon.

## 6 TULOKSET

Tulostin syntyi budjetin mukaan alle 700 euron hintaan ja todistettavasti toimii hyvin, mutta hieman hitaammilla asetuksilla kuin olisin toivonut (Hinta-arvio taulukossa 6). Liikuteltava massa on kuitenkin niin suuri, että tulostusnopeuden kasvattaminen vaatisi rungon tuennan ja suuremmat askelmoottorit. Tulostusala on normaalikokoinen, joten tulostettavan kappaleen maksimikoko noin 20x19x10 cm. Mikäli tämä tulostusala on riittävä, kannattaa tulostimesta tehdä pienempi. Se nopeuttaa ja mahdollisesti parantaa tulostustarkkuutta. Minulla kuitenkin oli alusta alkaen muutama vaihtoehtoinen kehityssuunnitelma ja aion ottaa ylimääräisen tilan hyötykäyttöön.

Jos kytkimiä käyttää, kannattaa miettiä tarkkaan, mitä kaikkea on tarve hallinnoida manuaalisesti. Kun tulostin oli valmis, olin laittanut lämmitysblokin tuulettimen kytkimen taakse. Yhden kerran se jäi laittamatta päälle lämmitysvaiheessa, minkä seurauksena suutin tukkeutui noin neljän sentin matkalta ja valtaosa tulostuspään komponenteista jähmettyi yhteen. Syöttölaite oli purettava ja porattava mahdollisimman tyhjäksi 3 mm poralla. Sen jälkeen jätin syöttölaitteen alumiiniosat yöksi asetoniin ja puhdistin ja erottelin osat toisistaan aamulla.

Paitsi tulostimen kasaaminen, myös sen hallinnoiminen vaati yllättävän paljon taustatutkimusta, ja sen oikeanlaisen käytön oppiminen vaatii aikaa. Kaikki ohjelmat eivät tue kaikkia tulostintyyppisiä, joten kannattaa perehtyä hankittavien osien yhteensopiavuuteen niiden ohjelmien kanssa, joita aikoo tulevaisuudessa käyttää.

**TAULUKKO 6. Hinta-arvio**

1	kpl	5	Kapton teippi	Jims
100	kpl	2	pääteholkki	Elgood
100	kpl	1	pääteholkki	
20	m	4,4	asennusjohto 0,5mm2	
100	m	14,4	asennusjohto 0,25mm2	
26	kpl	7,88	crimp-liitin	
1	kpl	54,99	Hot End Full kit 12V	Reprapworld
6	m	17,04	Timing belt 6mm	
2	kpl	24,98	ABS-spool black	
1	kpl	3,49	Motor coupling 8mm	
1	kpl	4,99	Leadscrew nut 8mm	
1	kpl	8	Leadscrew 8mm - 40cm	
8	kpl	3,76	Compression spring 25x10m	
1	kpl	2,79	Axial Fan 40x40x10 12V	
1	kpl	2,49	Axial Fan 30x30x10 12V	
1	kpl	262,88	Elektroniikka paketti	
6	m	30	happoputki	romuttamo
		0	Telinemateriaalit	
		0	rikkinäisiä powereita	
		20	rautakauppa materiaali	irtohankintoja
1	kpl	45,88	askelmoottori (planeetta 5:1)	
2	kpl	7,44	langanvetopyörä	
1	kpl	59,52	power 450W	
2	kpl	6,58	kytkin	
1	kpl	6,5	sulakerasia	
4	kpl	2,3	sulake	
1	pkt	1,99	Nippuside 2,5x100	
1	pkt	2,99	Nippuside 4,8x140	
1	kpl	3,99	rele	
1	kpl	0	pohjalevy	
70	kpl	34,72	laakerit 604	
2		6,65	blowden liittimet	
1,5	m	6,57	PTFE putki	
25		2,99	Abico liitin	
1	m	5	kutistesukka	
3	m	3	kierrenauha johdoille	
10	kpl	4,49	pienoispuristin	
		5,9	kaksipuoleinen teippi, Akasa	
		676,6	euroa	

## 7 POHDINTA

FDM-tyyppinen 3D-tulostin on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa rakentaa itse. Projektina tulostimen suunnitteleminen ja rakentaminen oli riittävän haastava, ja välillä oli tehtävä vaikeitakin ratkaisuja tilanteissa, joissa lopputuloksesta ei ollut selkeää kuvaa. Uskoisin kuitenkin, että suunnittelu ja rakennustyö, sekä uusien ohjelmien hallinnointi, on ollut hyvin kehittävää ja antanut aineksia suoriutua vastaavista projekteista jatkossakin.

Minulla oli runsaasti erinäisiä ongelmia ratkottavaksi eri vaiheissa rakennustyötä, ja niiden ratkaisemista hidasti usein osien vaihteleva saapumisaika. Tarvitsin yllättävän paljon osia, joita en ollut kuvitellut tarvitsevani, esimerkiksi lämpöä johtavaa kaksipuolista teippiä alumiinisten jäähdtyselementtien kiinnittämiseen.

Koen onnistuneeni työssäni ja uskon, että 3D-tulostimesta on minulle jatkossakin sekä iloa että hyötyä. Hyödynnysmahdollisuudet ovat hyvät, ja uskon, että tulostin maksaa itsensä vielä takaisin.

### 7.1 Kehitysehdotuksia

Johtoja vetäessä olisi kannattanut jättää enemmän ylimääräistä varaa ja tilan säästämiseksi powerista olisi kannattanut katkoa ylimääräisiä johtoja. Kolmen vuoden takuun vuoksi jätin powerin ehjäksi, mutta johdotus mahtuu hädin tuskin suojakoteloon. Kierteisellä johtojen kokoojalla on myös ikävä tapa tarttua kiinni johdonsuojakotelon teräviin reunoihin, joten se kannattaisi ehkä korvata suoralla halkinaisella suojaputkella.

Johdotuksen olisi voinut tehdä myös huomattavasti selkeämmäksi jo pelkästään käyttämällä useamman johtimen johtoja. Johdonsuojalaatikko on sisäpuolelta melkoisessa kaaoksessa, koska jokainen johdin on vedetty erikseen paikoilleen.

Päällä ollessaan tulostin on melko äänekäs Arduinon ja RAMPSin jäähdtyksen takia. Jäähdtykseen on varmasti olemassa äänettömämpiäkin vaihtoehtoja.

Bowden-systeemi on liian pitkässä putkessa toimiakseen tarkasti pienissä kappaleissa, joissa on paljon siirtymäpaikkoja. Jos tulostusmateriaalilla olisi putkessa vähemmän liikkumavaraa tai jos putki olisi puolet lyhyempi, tulostin saattaisi olla tarkempi.

Tehokkaampi virtalähde ja hieman suuremmat moottorit auttaisivat monella tapaa, mikäli pololut kestävät virran. Ne toisivat tarkkuutta ja nopeutta tulostimen liikkeisiin ja suurempi teho lämmittäisi lämpöpedin nopeammin. Nopeuden lisääminen tosin vaatii vinotuet rungolle, ja mahdollisesti vahvemmat hammashihnat.

Saattaisin valita lankakooksi 3 mm sijaan 1.75 mm. Aikaisemmin tulostusmateriaalia oli paremmin saatavilla 3 mm paksuisena, mutta 1.75 mm on alkanut vallata markkinoita. Etuna on se, että 1.75 mm syötetään nopeammin kuin 3 mm lankaa, joten suhteessa käytettyyn matkaan langan syöttö on tarkempaa. Periaatteessa 1.75 mm myös sulaa nopeammin lämmitysblokissa joten syöttönopeuttakin pystyy ehkä kasvattamaan ilman, että se vaatii syöttölaitteelta enempää voimaa.

## **7.2 Tulevia suunnitelmia**

Tulostin on mahdollista muuttaa myös itsenäiseksi, silloin se ei tarvitsisi tietokonetta avustamaan tulostamisessa, vaan kaikki säädöt tehtäisiin LCD-näytön ja kiinteiden kontrollien kautta. Tulostettavat kappaleet syötettäisiin SD-kortilla suoraan tulostimelle. Tähän muutokseen minulla on melkein kaikki materiaali jo valmiina. Minulla on valmiina myös noin 10 cm aikaisempia pidemmät jalat tulostuskorkeuden lisäämiseksi. Niiden kanssa on kuitenkin syytä laittaa vinotuet, jotta rungon tukevuus pysyy riittävänä.

Houkutteleva mahdollisuus olisi hankkia kaksoistulostuspää, jolloin voisin suorittaa täytön esimerkiksi 0.8 mm suuttimella, ja ulkokehän 0.25 mm. Tällöin tulostus olisi sekä nopeampaa että tarkempaa kuin aikaisemmalla 0.4 mm suuttimella. Kaksoistulostuspää ja ylimääräinen syöttölaite tarvitsisi ylimääräisen pololun, jolle on valmis paikka, sekä todennäköisesti suuremman virtalähteen.

Tulostinta voi tilankäytön suhteen kehittää kahteen vaihtoehtoiseen suuntaan. Joko laajennan tulostusalaa 30x60 kokoiseksi tai rakennan kiinnikkeen dremel-jyrsimelle ja

teen toisesta päädyistä jyrshintäpuolen. Pienenä ongelmana on jyrshinnästä lähtevä roska ja pöly, jolle pitäisi asettaa imuri, jottei pöly aiheuta palovaaraa tulostettaessa. Tulostusmateriaalikela pitäisi myös koteloida, ettei pöly päädy lämmitysblokkiin ja tuki suutinta.

## **8 KIITOKSET**

Haluan kiittää insinööri Perttu Mäkystä tuesta ja neuvoista sekä tulostetuista osista. Hänen kattavasta kokemuksestaan 3D-tulostamisen parissa oli runsaasti apua projektin eri vaiheissa.

## LÄHTEET

3D printing for beginners 2016. What material should I use for 3D printing? Www-dokumentti.

<http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>

Päivitetty 23.7.2016. Luettu 29.7.2016

3D Printing for Beginners, Glossary 2016. Www-dokumentti.

<http://3dprintingforbeginners.com/glossary/>

Päivitetty 23.9.2016. Luettu 9.12.2016

3D printing from scratch, 3D Printer Filament Types Overview 2016. Www-dokumentti.

<http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printer-filament-types-overview/>

Päivitetty 2.2.2016. Luettu 6.8.2016

3D printing industry 2016. The evolution of 3D printing: Past, Present and Future. Www-dokumentti.

<https://3dprintingindustry.com/news/evolution-3d-printing-past-present-future-90605/>

Ei päivitystietoa. Luettu 11.12.2016

3DPrinterPro 2016. Www-dokumentti.

<http://www.3dprinterpro.com/material-jetting-print-service/>

Ei päivitystietoa. Luettu 29.7.2016

Design, Research, and Education for Additive Manufacturing Systems 2016. Www-dokumentti.

<http://www.me.vt.edu/dreams/material-jetting/>

Ei päivitystietoa. Luettu 29.7.2016

Engineering, Smoothing Rough 3D Prints With Acetone Vapor 2016. Www-dokumentti.

<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/5371/Smoothing-Rough-3D-Prints-with-Acetone-Vapor.aspx>



Ei päivitystietoa. Luettu 12.8.2016

Gibson, Ian, Rosen, David, Stucker, Brent 2015. Additive Manufacturing Technologies 2010. 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, second edition. New York: Springer Science+Business Media.

Loughborough University 2016. Binder Jetting. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

Ei päivitystietoa. Luettu 7.7.2016

Loughborough University 2016. Direct Energy Deposition. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directenergydeposition/>

Ei päivitystietoa. Luettu 7.7.2016

Loughborough University 2016. Material Extrusion. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>

Ei päivitystietoa. Luettu 7.7.2016

Loughborough University 2016. Material Jetting. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

Ei päivitystietoa. Luettu 8.7.2016

Loughborough University 2016. Powder Bed Fusion. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

Ei päivitystietoa. Luettu 8.7.2016

Loughborough University 2016. Sheet Lamination. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>

Ei päivitystietoa. Luettu 8.7.2016

Loughborough University 2016. VAT Photopolymerisation. Www-dokumentti.

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Ei päivitystietoa. Luettu 8.7.2016

Machine design 2016. 3D printing tips and tech: get to know those acronyms. Www-dokumentti.

<http://machinedesign.com/manufacturing-equipment/3d-printing-tips-and-tech-get-know-those-acronyms>

Ei päivitystietoa. Luettu 12.9.2016

Slicer g-code generator for 3D printers 2016. Www-dokumentti.

About <http://slic3r.org/about>

Ei päivitystietoa. Luettu 22.11.2016

Vicious1 2016. Specifications. Www-dokumentti.

<http://www.vicious1.com/specifications/>

Ei päivitystietoa. Luettu 16.2.2016

**LIITE 1(1).**  
**Tulostimen Materiaali**

Tulostimen Materiaali

Rautakauppa materiaali - Runko

40	cm	M8	trapetsitankoa
1	kpl	M8	trapetsimutteri
1	kpl	M8	kytkentäruuvi trapetsille
4	kpl	M8 x 80	pultti
8	kpl	M8 x 70	pultti
2	kpl	M8 x 45	pultti
2	kpl	M8 x 40	pultti
28	kpl	M8 x 30	pultti
18	kpl	M8	aluslevy, h<16mm
8	kpl	M8	aluslevy, h=30mm
44	kpl	M8	nylock-mutteri
20	kpl	M3 x 10	pultti
42	kpl	M4 x 20	pultti
22	kpl	M4 x 16	pultti
36	kpl	M4	mutteri
53	kpl	608	laakeri
6	m	25mm	tasapintaista putkea

Sähkötarvikkeet ja liike - Runko

1	kpl		RAMPS 1.4 Shield
1	kpl		Arduino Mega 2560
3	kpl		steppermotor driver pololu
3	kpl		heat sink - jäähdytyslementti
1	kpl	450W	12V virtalähde (riittää yhdelle pedille)
6	m	GT2	hammashihna
4	kpl	GT2	16T hammaspyörä
5	kpl	Nema 17	askelmoottori johtoineen
1	pkt	150 x 3,5	nippuside
1	pkt	300 x 4,6	nippuside
25	kpl		Harwin-liitin, 1-rivinen 2 -napainen
40	m	0.5mm <sup>2</sup>	asennusjohto
30	m	0.25mm <sup>2</sup>	asennusjohto
1	kpl	80 x 80mm	tuuletin
3	kpl		endstop johtoineen
1	kpl		USB-kaapeli

asennusjohtoa hyödynnetään myös muissa osissa

**LIITE 1(2).**  
**Tulostimen Materiaali**

Syöttö ja tulostuspää

Syöttö 1

1	kpl	Nema 17	askelmoottori planeettapyörätöllä 5:1
3	kpl	M3 x 35	pultti
1	kpl	608	laakeri
1	kpl	6mm	syöttöletkun adapteri
2	kpl	10mm	jousi
3	kpl	M4 x 20	pultti
3	kpl	M4	nylock-mutteri
1	kpl	M8 x 30	pultti tai kierretanko
1	kpl	M8	langan syötön vetorulla (leveä)
2	kpl	20mm	kalusteruuvi

Syöttö 2

1	kpl	Nema 17	askelmoottori planeettapyörästöllä 5:1
4	kpl	M3 x 15	pultti
2	kpl	M4 x 20	pultti
2	kpl	608	laakeri
1	kpl	6mm	syöttöletkun adapteri
4	kpl	10mm	jousi
4	kpl	M8 x 240	pultti
2	kpl	M8 x 55	pultti
2	kpl	M8 x 30	pultti tai kierretanko
2	kpl	M8	langan syötön vetorulla (leveä)
4	kpl	M5	nylock-mutteri

Tulostuspää

1	kpl		suutin (1,75 tai 3mm)
1	kpl		lämmitysvastus
1	kpl	100k	termistori
1	kpl		lämmitysblokki
1	kpl		alumiinirunko
1	kpl	30 x 30mm	tuuletin 12v (pakollinen)
1	m	4/6mm	Bowden syöttöletku
1	kpl	M3 x 5	termistorin kiinnike pultti
1	kpl	M3 x 10	pultti
1	kpl	M3	aluslevy

Tulostuspään materiaali kannattaa hankkia pakettina, yllä oleva materiaali sisältyy yleensä kaikkiin valmiisiin täysmetallisten tulostuspäiden paketteihin. Vaihtoehtona on myös ostaa keraaminen tulostuspää, mutta ne sisältävät kiinteitä osia, joita on mahdotonta purkaa niiden tukkeutuessa tai vioittuessa. Ne eivät myöskään kestä suuria

## LIITE 1(3).

### Tulostimen Materiaali

lämpötiloja, vaan vioittuvat lämpötilan noustessa yli 260°C. Alla on lista tulostuspään kiinnikkeistä.

2	kpl	20mm	kalusteruuvi
2	kpl	M4 x 20	pultti
2	kpl	M4	nylock-mutteri
1	kpl	40 x 40mm	tuuletin 12v (tulosteen pinnan jäähdytys)

### Lämpöpeti

1	kpl	A x B	Heated bed
1	kpl	A x B	alumiinilevy, 3mm
1	kpl	A x B	borosilikaattilasi
2	m	1.5mm <sup>2</sup>	asennusjohto
1	kpl	SPDT	rele 12V
4	kpl	10mm	jousi
4	kpl	M4 x 40	pultti
4	kpl	M4	nylock-mutteri
1	pkt		lämmönkestävää kapton-teippiä
1	kpl	100k	termistori

Virrankulku pedille kannattaa kytkeä releen kautta, jotta virta ei polta RAMPSia. Tavallista relettä käyttäessä kannattaa myös huolehtia siitä, että ohjelmassa on viive releen kytkeytymiselle, jotta se ei kulu liian nopeasti.

### Virranjakelu ja kytkimet

2	kpl		vipukytkin
1	kpl	15A	Sulake (lämpöpeti)
3	kpl	5A	Sulake (tuulettimet)
14	kpl		abico naaras liitin, eristetty
1	kpl		Sulakelaatikko

Kytinten käyttö on periaatteessa vapaaehtoista, mutta päävirralle kannattaa asentaa jonkinlainen turvakytkin, jotta virran saa poikki hätätilanteessa. Tuulettimet asennetaan sulakkeiden taakse.