

Aleksi Moilanen

# Suuren tulostusvolyymin 3D-tulostimen suunnittelu ja toteutus



Insinööri (AMK)  
Tieto- ja viestintätekniikka  
Kevät 2022



KAMK • University  
of Applied Sciences

## Tiivistelmä

**Tekijä:** Moilanen Aleksi

**Työn nimi:** Suuren tulostusvolyymin 3D-tulostimen suunnittelu ja toteutus

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), tieto- ja viestintätekniikka

**Asiasanat:** 3D-tulostus, 3D-tulostimet

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa lankatulostusmenetelmää (FDM) hyödyntävä 3D-tulostin, jolla olisi 3D-tulostinmarkkinoista poikkeavan suuri tulostuskoko.

Ensimmäisissä suunnitelmissa tulostimelle kaavailtiin jopa 1000 x 1000 x 500 millimetrin kokoisen kappaleen tulostusmahdollisuus, mutta tämän saavuttamiseksi itse tulostimen koko olisi kasvanut niin suureksi, että sille olisi vaikeaa löytää säilytyspaikkaa. Tämän vuoksi tulostimen lopullista tulostuskokoa päätettiin pienentää 600 x 400 x 500 millimetriin. Laitteen ulkomitoiksi muodostui 1030 x 740 x 1100 millimetriä ja laitteen kokonaispaino oli noin 70 kilogrammaa.

Opinnäytetyön työosuus kattoi 3D-tulostimen mekaniikan sekä elektroniikan suunnittelun. Mekaniikkasuunnitteluun sisältyi tulostimen rungon sekä sen liikkuvien osien, kuten akselien suunnittelu. Suunnittelu toteutettiin Autodesk Fusion 360 -mallinnusohjelmalla. 3D-tulostimen elektroniikkasuunnitteluun sisältyi tulostimen emolevyn suunnittelu. Emolevyn tarkoituksena on ohjata kaikkia tulostimen liikkuvia osia sekä ohjata ja seurata tulostusprosessia ohjaukoodin sekä mitattavan anturidatan perusteella. Emolevyn suunnittelu toteutettiin Autodesk Eagle -piirilevynsuunnitteluohjelmalla.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi pientä jatkokehitystä vaativa 3D-tulostimen mekaniikka sekä täysin toimiva elektroniikka. Tulostinkokonaisuuden täyttä toimivuutta ei kuitenkaan saatu testattua, koska tulostimen tulostusohjelmisto päätettiin toteuttaa vasta opinnäytetyön jälkeen erillisenä projektina. Tulostimen toteuttamisessa alkuperäinen 2000 euron budjetti kuitenkin ylittyi 850 eurolla johtuen suurista toimituskuluista sekä ylimääräisistä jo kehitysprosessin aikana korvatuista osista.

Opinnäytetyöllä ei ollut erillistä toimeksiantajaa, vaan 3D-tulostin toteutettiin harrastekäyttöön.

## **Abstract**

**Author:** Moilanen Aleksi

**Title of the Publication:** Large Print Volume 3D Printer Design and Prototyping

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Information and Communication Technology

**Keywords:** 3D printing, 3D printers

The goal of this Bachelor's thesis was to design and build a 3D printer which uses the FDM printing method and has a larger printing size compared to the other printers on the market.

The first plans were to design a printer which could print a piece of up to 1000 x 1000 x 500 millimeters, but to achieve this, the size of the printer would have grown so large that it would be difficult to find space for the printer. It was decided to reduce the printing size to 600 x 400 x 500 millimeters. The external dimensions of the device were 1030 x 740 x 1100 millimeters and the total weight of the device was about 70 kilograms.

A part of the thesis covered the mechanics of the 3D printer and the design of the electronics. The mechanics of the design included the design of the printer body, as well as its moving parts such as shafts. The design was performed using Autodesk Fusion 360 modeling software. The electronics design of the 3D printer included the design of the printer's motherboard. The motherboard is used to control all the moving parts of the printer, and control and follow the printing process based on the control code and measured sensor data. The motherboard was designed using the Autodesk Eagle PCB design software.

The result of the thesis were the mechanics of a 3D printer that requires little further development, as well as fully functional electronics. The full functionality of the printer could not be tested, because it was decided to implement the printer's firmware as a separate project after the thesis. The initial budget of 2 000 euros was exceeded by 850 euros, due to high delivery costs and additional parts which were already replaced during the development process.

The thesis did not have a commissioner, so the 3D printer was designed and built for recreational use.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	3D-tulostusteknologiat .....	2
2.1	Pursotustulostus.....	2
2.2	Nestetulostus .....	4
2.3	Jauhetulostus .....	5
3	FDM 3D-tulostimet .....	7
3.1	Creality Ender 3 Pro.....	7
3.2	BCN3D Sigma D25 .....	8
3.3	CreatBot F1000.....	9
4	Tulostimen mekaniikkasuunnittelu .....	11
4.1	Tulostimen runko .....	11
4.2	Tulostuspäät.....	12
4.3	X-akseli .....	13
4.4	Y-akseli.....	14
4.5	Tulostusalusta.....	15
4.6	Z-akseli.....	16
5	3D-tulostimen emolevy .....	17
5.1	Mikrokontrolleri .....	18
5.2	Moottorinohjainpiirit .....	18
5.3	Tuulettimien ohjaus .....	19
5.4	Suunnittelu .....	19
6	Valmistuskustannukset.....	21
7	Yhteenveto .....	22
	Lähteet .....	23

## Lyhenneluettelo

<b>ADC</b>	Analog to Digital Converter. Analogia-digitaalimuunnin.
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control. Työstö- tai muun koneen numeerinen ohjaus.
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling. 3D-tulostusteknologia, joka perustuu muovipohjaisen materiaalin pursottamiseen.
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output. Yleiskäyttöinen lähtö-/tuloportti mikrokontrollereissa.
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated Circuit. Yksinkertainen kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä.
<b>SLA</b>	Stereolithography Apparatus. 3D-tulostusteknologia, joka perustuu tulostushartsin kovettamiseen ultraviolettivalolla tai laserilla.
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting. Metallin 3D-tulostusteknologia, joka perustuu metallijauheen sulattamiseen laserilla.
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering. 3D-tulostusteknologia, joka perustuu muovipulverin sulattamiseen laserilla.
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface. Synkroninen tiedonsiirtoväylä.
<b>USART</b>	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter. Tiedonsiirtoväylä.

## 1 Johdanto

Vaikka 3D-tulostus on monille vielä uusi tai tuntematon valmistustapa, on sillä jo historiaa yli 40 vuotta. Ensimmäiset 3D-tulostusteknologiat kehiteltiin jo 1980-luvulla, mutta kalliiden laitehintojen ja patentoitujen teknologioiden takia 3D-tulostus ei yleistynyt harrastekäyttöön kuin vasta vuoden 2005 jälkeen. [1.] Kun ensimmäiset patentit raukesivat, monet valmistajat pääsivät kehittämään harrastekäyttöön soveltuvia tulostimen rakennussarjoja ja teknologian kehittyessä yhä halvempia käyttövalmiita tulostimia.

Suuressa osassa markkinoiden 3D-tulostimissa tulostusalueen koko kuitenkin rajoittuu alle 300 x 300 x 300 millimetriin, joten suurempien kappaleiden tulostaminen ei ole mahdollista ilman kappaleen 3D-mallin muokkaamista. Ainoana vaihtoehtona on kappaleen pilkkominen pienemmiksi kappaleiksi, mikä vaatii lopullisen kappaleen kokoamisen, esimerkiksi erikseen suunnitelluilla liitoksilla tai liimalla mikä vaikuttaa kappaleen ulkonäköön ja aiheuttaa lisätyötä. Tämä myös heikentää kappaleen kestävyyttä huomattavasti ja voi myös muuttaa kappaleen lopullista kokoa, mikäli sitä ei ole huomioitu kappaleen 3D-mallissa.

Suuremman kokoluokan tulostimilla hinnat alkavat noin 5000 eurosta, joten harrastekäyttöön ne ovat hintaluokaltaan liian kalliita. Tästä syystä opinnäytetyössä pyrittiin suunnittelemaan ja toteuttamaan suuren kokoluokan 3D-tulostin noin 2000 €:n budjetilla.

## 2 3D-tulostusteknologiat

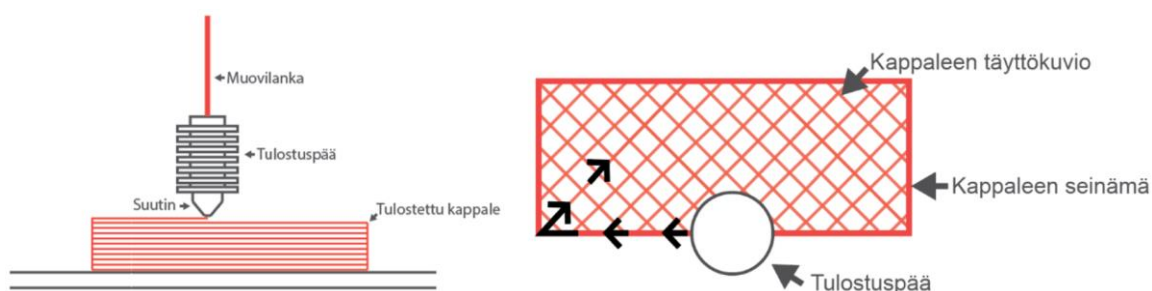
3D-tulostamisessa on käytössä monia eri teknologioita, jotka kaikki perustuvat 3-ulotteisen kappaleen kerroksittaiseen tulostamiseen [2]. Yleisimpiä 3D-tulostusteknologioita ovat:

- Pursotustulostus - Fused Filament Fabrication
- Nestetulostus - Stereolithography Apparatus
- Jauhetulostus - Selective Laser Sintering / Selective Laser Melting

Suurimmat erot tulostusteknologioiden välillä ovat niissä käytettävät tulostusmateriaalit ja tulostustekniikat. Myös tulosteiden ominaisuuksien ja vaadittavien jälkikäsittelyiden välillä on huomattavia eroavaisuuksia.

### 2.1 Pursotustulostus

Pursotustulostus (FDM) on 3D-tulostusteknologioista yleisin sen helppokäyttöisyyden sekä edullisuuden vuoksi. Se perustuu muovilangan pursottamiseen kuumennetun suuttimen läpi kerros kerrokselta tulostettavan kappaleen muotoon kuvan 1 mukaisesti. Tulostinpää pursottaa muovia kappaleen jokaisella kerroksella ensin kappaleen kyseisen kerroksen ulkoseinämien mukaan ja sen jälkeen se täyttää kappaleen sisäpuolelle jäävän alueen käyttäjän valitseman täyttökuvion mukaisesti.



Kuva 1. FDM-tulostusprosessi sivulta (vasemmalla) sekä ylhäältäpäin kuvattuna

Kappaleita ei kuitenkaan usein tulosteta 100 % täytöllä vaan kappaleiden täyttöprosentti valitaan kappaleilta vaadittavien mekaanisten ominaisuuksien, kuten lujuuden ja kestävyuden mukaan.

Esimerkiksi kappaleet, joiden ei tarvitse kestää minkäänlaista kuormaa tulostetaan usein 20 % täytöllä. Myös kappaleen kerrosvahvuudella sekä rasteriorientaatiolla on vaikutusta kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin [3]. Täyttöprosenttia ja kerrosvahvuutta muuttamalla saadaan myös pienennettyä tulostamisessa käytettävän muovin määrää ja tämän myötä kappaleen tulostuskustannuksia sekä lopullisen kappaleen painoa.

Tulostettu kappale ei vaadi erillistä jälkikäsitelyä, joten FDM-tulostus on hyvin yksinkertainen prosessi. Tämän myötä FDM-tulostin sopii hyvin myös pienempiin toimistotiloihin.

Huonoja puolia FDM-tulostamisessa muihin tulostusteknologioihin verrattuna on tulostuksen hitaus, joka johtuu tulostuspään kuljettavasta pitkästä matkasta jokaisella kerroksella. Myös kappaleiden kestävyys voi olla paikoittain huonompi kuin muilla teknologioilla mahdollisten kerrosten yhteen tarttuvuusongelmien takia.

Tulostamisessa käytettävästä muovilangasta on tarjolla hyvin monipuolinen valikoima tavallisia muovityyppejä sekä erikoismuoveja, kuten joustavia ja vesiliukoisia muoveja. Muovilangan hinta vaihtelee muovityypin ja ominaisuuksien mukaan noin 20–100 €/kg välillä. Taulukossa 1 on esitetty yleisimmät muovityypit, joilla kaikilla on erilaiset vaatimukset tulostuspään sekä tulostuspedin lämpötiloille, mutta suurimmalla osalla 3D-tulostimista pystytään tulostamaan yleisimpiä tulostusmateriaaleja.

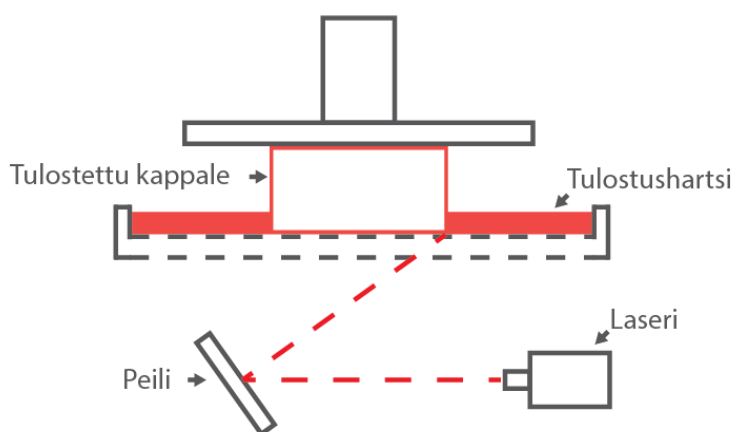
Taulukko 1 Yleisimmät FDM-tulostusmateriaalit [4]

Materiaali:	Tulostuspään lämpötila:	Tulostuspedin lämpötila:	Hyvät ominaisuudet:	Huonot ominaisuudet / vaatimukset:
PLA	185–220 °C	45–60 °C	Halvin, kestävä	Huono lämmönkestävyys
ABS	220–250 °C	95–110 °C	Hyvä lämmönkestävyys	Huonot tulostustoleranssit kutistumisen vuoksi
PETG	230–250 °C	75–90 °C	Helppo tulostettava	Vaikea jälkikäsitellä
Nylon	225–265 °C	70–90 °C	Kestävä, hieman joustava, hyvä iskunkestävyys	Ei sovellu kosteaan ympäristöön, vaatii säilytyksen ilmatiiviissä astiassa
PVA	185–200 °C	45–60 °C	Vesiliukoinen	Kallein, vaatii säilytyksen ilmatiiviissä astiassa kosteudelta suojattuna



## 2.2 Nestetulostus

Nestetulostus eli SLA-teknologia perustuu tulostushartsin kovettamiseen esimerkiksi peilillä heijastetulla laserilla tai ultraviolettivalolla. Jokaisen tulostuskerroksen välissä kappale nostetaan irti tulostusalustasta ja lasketaan takaisin halutun kerroskorkeuden päähän tulostusalusta. Näin kappaleen ja alustan väliin jää tulostushartsia, joka sitten kovetetaan uudeksi kerrokseksi kappaleeseen. Kuvassa 2 kuvataan SLA-tulostinta, joka on toteutettu laserilla ja peilillä.



Kuva 2. SLA-tulostusprosessi

Nopeammasta tulostusnopeudesta huolimatta SLA-tulostuksen tulostusprosessi on hieman pidempi kappaleen vaatiman jälkikäsittelyn vuoksi. Tulostetun kappaleen jälkikäsittelyprosessi vaatii kappaleen puhdistamisen ylimääräisestä tulostushartsista voimakkailla liuotusaineilla sekä kappaleen ulkopinnan kovettamisen UV-kammiossa [5].

SLA-tulostustekniikan suurena etuna on mahdollisuus tulostaa paljon pienempiä ja monimutkaisempia kappaleita kuin FDM-tulostuksella. SLA-tulostimien tulostustarkkuus riippuu pitkälti tulostimen hintaluokasta, mutta esimerkiksi alle 500 euron tulostimella päästään jopa alle 50 mikronin tulostustarkkuuteen. SLA-tulostimet ovat myös kooltaan paljon pienempiä kuin FDM-tulostimet, joten työpöytämallin tulostin ei vie paljoa tilaa. Tulostusprosessi vaatii kuitenkin puhdistus- ja kovetusyksikön, mutta näitä myydään nykyään hyvin kompaktin kokoisina laitteina.

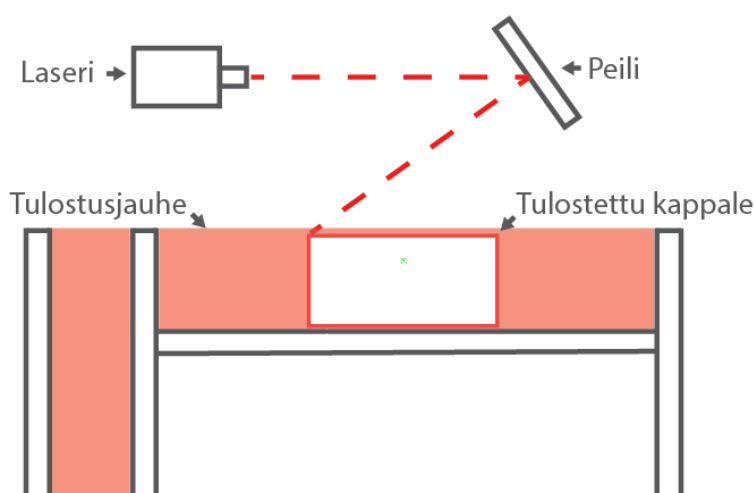
SLA-tulostuksessa käytettävät tulostushartsinesteet maksavat keskimäärin 50–100 €/kg riippuen ominaisuuksista, kuten kovuudesta ja joustavuudesta. Monet tulostuksessa käytettävät tulostushartsit ovat nesteinä myrkyllisiä, joten niitä täytyy käsitellä varoen suojavarusteiden kanssa

välttääkseen hartsin ihokontaktia. Hartsin on yleensä myös hyvin voimakkaan hajuista ja siitä erityyppien höyryjen hengittäminen voi olla vaarallista, joten toimistokäytössä SLA-tulostin vaatii hyvin ilmastoidun tilan sekä nesteitä käsitellessään henkilön on hyvä käyttää hengityssuojainta.

### 2.3 Jauhetulostus

SLS ja SLM ovat samankaltaisia jauheen sulattamiseen perustuvia tulostustapoja. SLS-tekniikassa materiaaleina käytetään nailonmuovia ja SLM-tekniikassa metallijauheita, kuten alumiinia, ruostumatonta terästä tai titaania [6].

Peilin kautta heijastetulla laserilla jauhe sulatetaan kappaleen muotoon. Jokaisen tulostuskerroksen välissä tulostusalusta lasketaan halutun kerroskorkeuden verran ja tulostetun kappaleen päälle levitetään uusi kerros jauhetta kuvassa 3 vasemmalla näkyvästä jauhevarastosta.



Kuva 3. SLA- ja SLM-tulostusprosessit

SLS- ja SLM-tulostuksessa käytettävien jauheiden hengittäminen on vaarallista, joten niiden kanssa täytyy käyttää hengityssuojaimia. Tulostuksen puhdistaminen ylimääräisestä jauheesta vaatii usein jälkikäsittelyaseman sekä mahdollisuuden siinä käytetyn jauheen kierrättämiseen. Tulostuksessa käytettävät jauheet myös maksavat moninkertaisen hinnan verrattuna tulostusnauhaan tai tulostushartsinesteisiin.

SLS- ja SLM-tulostimet ovat hinnaltaan huomattavasti FDM- ja SLA-tulostimia kalliimpia ja niiden hinnat alkavat noin 10 000 eurosta. Tulostimet ovat kooltaan myös huomattavasti suurempia ja

vaativat tilaltaan hyvän lämpötilan sekä ilmanvaihdon hallinnan. Näistä syistä kyseiset teknologiat eivät sovellu toimistokäyttöön.

### 3 FDM-3D-tulostimet

FDM-tulostin on yleisin 3D-tulostintyyppi. Tulostimen tarjonta markkinoilla on laaja, ja tulostimet eroavat toisistaan tulostusalueen koon, tulostuspäiden määrän tai muiden tulostusta helpottavien tai parantavien ominaisuuksien mukaan.

Tulostimien koot sekä niiden tulostusalueet vaihtelevat 100 x 100 x 100 millimetrin tulostusalueen työpöytätulostimista aina 2000 x 2000 x 1500 millimetrin tulostusalueen teollisuustulostimiin. Hyvin usein FDM-tulostimien tulostusalue on kuitenkin alle 300 x 300 x 300 millimetriä.

Tulostimissa voi olla yleisen yhden tulostuspään lisäksi toinen tai useampi tulostuspää, mikä tuo mahdollisuuden käyttää kappaleen tulostamiseen useampaa eriväristä tai -tyyppistä muovia. Tämä on hyvä ominaisuus muodoiltaan haastavamman kappaleen tukimateriaalin tulostuksessa, koska tukirakenteet voidaan tulostaa vesiliukoisella PVA- tai BVOH-muovilla.

Ominaisuuksiltaan eroja tulostimeen tuo esimerkiksi etähallintamahdollisuudet. Tulostimissa voi olla esimerkiksi kamera, jolla käyttäjä voi seurata tulostusprosessia etänä. Mikäli tulostus epäonnistuu, käyttäjä voi pysäyttää tulostuksen etähallinnan avulla.

#### 3.1 Creality Ender 3 Pro

Alle 1000 € hintaluokan esimerkkinä on harrastajien keskuudessa hyvin suosittu kuvan 4 Creality Ender 3 Pro -työpöytätulostin. Ominaisuuksiltaan tulostin on hyvin karsittu, mutta tulostimelle on tarjolla paljon erilaisissa päivitysmahdollisuuksia 3D-tulostusyhteisöissä, kuten Thingiverse [7]. Tulostimen tulostusalue on kooltaan 220 x 220 x 250 millimetriä, joten se riittää hyvin moniin koti- tai harrastekäyttöön tulostettavien kappaleiden tulostamiseen.

Tulostin on hinnaltaan yksi markkinoiden halvimmista kyseisen kokoluokan tulostimista maksaen ainoastaan 240 € eurooppalaisessa 3D-tulostusverkkokaupassa 3DJakessa [8].



Kuva 4. Creality Ender 3 Pro 3D -tulostin [8]

### 3.2 BCN3D Sigma D25

Noin 5 000 € hintaluokasta otettiin esimerkiksi kuvan 5 BCN3D Sigma D25 -tulostin. Ominaisuuksiltaan kyseinen tulostin on huomattavasti laajempi edelliseen verrattuna. Tulostimessa on käytössä kaksi tulostuspäätä, jotka tukevat kahden samanlaisen kappaleen, kahden peilikuvakappaleen tai kahden eri materiaalin samanaikaista tulostamista. Tulostimessa on myös mahdollisuus etähallintaan, jonka kautta käyttäjä voi laittaa tulostimen tulostamaan mistä tahansa. Tulostimen tulostusalue on kooltaan 420 x 300 x 200 millimetriä, joten tulostimella voidaan tulostaa suurempia kappaleita tai useampia pienempiä kappaleita samanaikaisesti.

Tulostimen hinta Suomessa on noin 4 300 €, joten se soveltuu parhaiten pienille yrityksille.



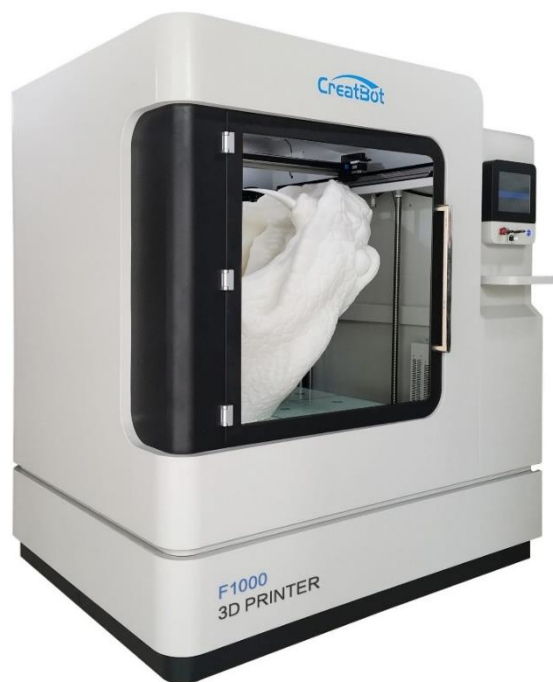
Kuva 5. BCN3D Sigma D25 3D -tulostin [9]

### 3.3 CreatBot F1000

Esimerkkinä suuremman kokoluokan tulostimesta on kuvan 6 CreatBot F1000 -tulostin, jossa on 1000 x 1000 x 1000 millimetrin kokoinen tulostusalue. Kyseisessä tulostimessa on suljettu tulostusympäristö, jonka lämpötilaa voidaan helposti seurata ja hallita. Tämä estää mahdolliset lämpötilan vaihtelun aiheuttamat tulostusvirheet, kuten tulostetun kappaleen irtoamisen tulostusalueesta kesken tulostuksen.

CreatBot F1000 -tulostimessa on kaksi erillistä tulostuspäätä, etähallinta sekä kamera, jonka kautta tulostusta voidaan seurata etänä. Tämä on tärkeä ominaisuus kyseisessä tulostimessa, koska sen maksimikokoluokan tulostukset voivat kestää jopa useita viikkoja.

Tulostimen hinta Suomessa on noin 37 000 euroa, joten hinnaltaan sekä tulostusalueen kooltaan se soveltuu enemmänkin isommille yrityksille.



Kuva 6. CreatBot F1000 3D -tulostin [10]

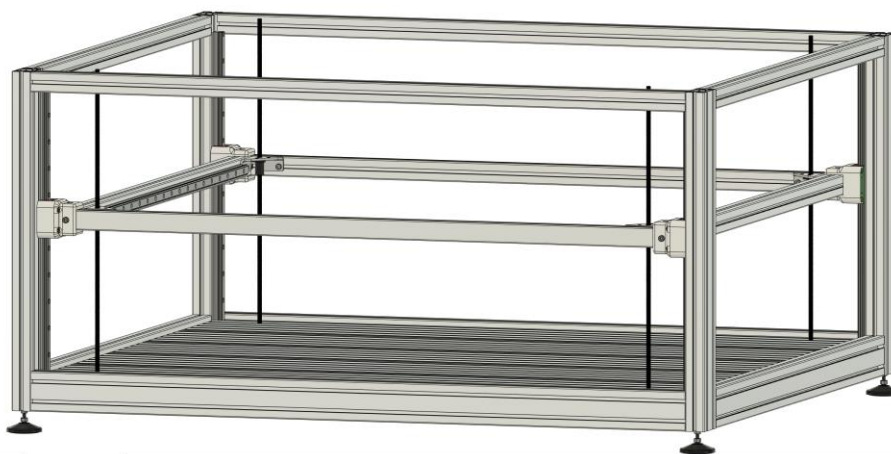
## 4 Tulostimen mekaniikkasuunnittelu

3D-tulostimen suunnittelussa ensimmäisenä vaiheena oli tulostimen rungon sekä sen mekaniikojen suunnitteleminen. 3D-tulostimessa kaksi tärkeintä osaa ovat yksi tai useampi tulostuspää sekä tulostusalusta. Tulostuspäiden sekä tulostusalueen täytyy pystyä liikkumaan X-, Y- ja Z-akseleilla. Toteutustapoja tähän on monia, mutta yleinen toteutustapa pienemmän kokoluokan tulostimissa on tulostuspään liikuttaminen X- ja Z-akseleilla sekä tulostusalueen liikuttaminen Y-akselilla.

Alkuperäisenä tavoitteena tulostimessa oli mahdollisuus tulostaa 1000 x 1000 x 500 millimetrin kokoisia kappaleita kahdella eri tulostusmateriaalilla samanaikaisesti.

### 4.1 Tulostimen runko

Ensimmäisissä suunnitelmissa ajatuksena oli, että tulostin olisi mahdollista muuntaa CNC-jyrsimeksi vaihtamalla tulostinpää CNC-jyrsinpäähän. Jyrsittävän kappaleen kiinnittäminen otettiin huomioon suunnittelemalla tulostimen pohja alumiiniprofiililevyistä, joihin kappaleen saisi helposti kiinnitettyä käyttämällä uramuttereita. Tässä tapauksessa tulostinpäiden täytyy liikkua pystysuunnassa tulostusalueen sijaan. Kuvassa 7 ensimmäinen suunnitelma kyseisten vaatimuksien mukaisesta rungosta.



Kuva 7. Ensimmäinen versio tulostimen rungosta



Alkuperäisten suunnitelmien mukainen tulostin olisi kuitenkin vienyt aivan liian suuren lattiapinta-alan sekä rungon hinta nousisi liian suureksi pohjassa käytettyjen alumiiniprofiilien korkean hinnan myötä. Näistä syistä tulostusalueen koko päätettiin pienentää 600 x 400 x 500 millimetriin, sekä CNC-jyrsimeksi muuntamismahdollisuus jouduttiin jättämään pois.

Tulostimen rungossa käytettiin 45 x 45 sekä 45 x 90 millimetrin alumiiniprofiileja. Sen lopulliset ulkomitat olivat 1030 x 740 x 1100 millimetriä, eli tulostimen vaatima lattia pinta-ala noin yhden kolmasosan alkuperäisten suunnitelmien mukaisen rungon lattiapinta-alasta. Kuvassa 8 suunnitelma tulostimen lopullisesta rungosta.



Kuva 8. Tulostimen lopullinen runko

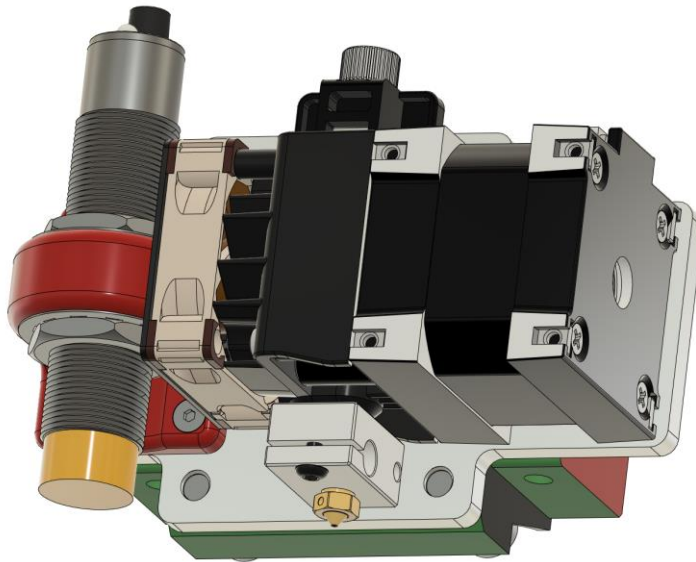
#### 4.2 Tulostuspäät

3D-tulostimen tulostuspään tärkein osa on kuumapäät. Sen tehtävänä on tulostuksessa käytettävän muovinauhan sulattaminen. Kuumapäät muodostuu lämpövastuksesta, lämpötila-anturista, jäähdytyslohkosta sekä suuttimesta. Monissa 3D-tulostimissa muovinauha syötetään kuumapäähän erillisellä tulostimen runkoon sijoitetulla askelmoottorilla, mutta joissain tapauksissa kuumapäät ja askelmoottori on voitu yhdistää. Tällöin kuumapäätä kutsutaan ekstruuderiksi.

Tulostimessa päätettiin käyttää suosittua E3D Hemera -ekstruuderia, joka käyttää 1,75 mm tulosnauhaa.

Kuumapään lisäksi tulostuspäässä on usein tulostusalustan kalibrointiin käytettävä anturi. Tässä tapauksessa anturina päätettiin käyttää kapasitiivista etäisyysanturia, joka tunnistaa sen eteen tuotavan kappaleen, eli tässä tapauksessa tulostusalustan.

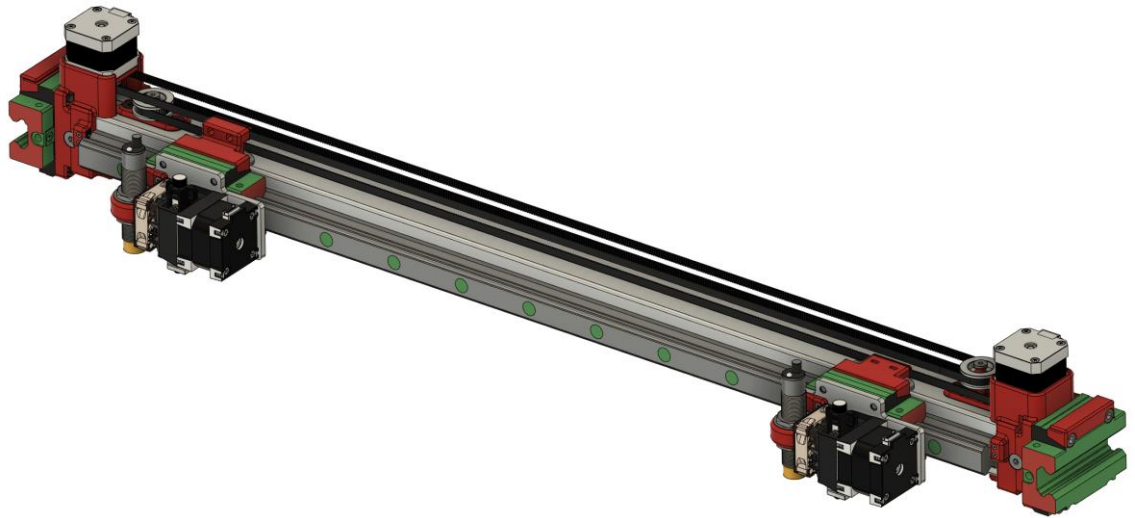
Kuvassa 9 on tulostimen tulostuspää eli lineaarikelkkaan kiinnitetty alumiinilevy, johon on kiinnitetty kapasitiivinen etäisyysanturi sekä ekstruuderit.



Kuva 9. Tulostimen tulostuspää

#### 4.3 X-akseli

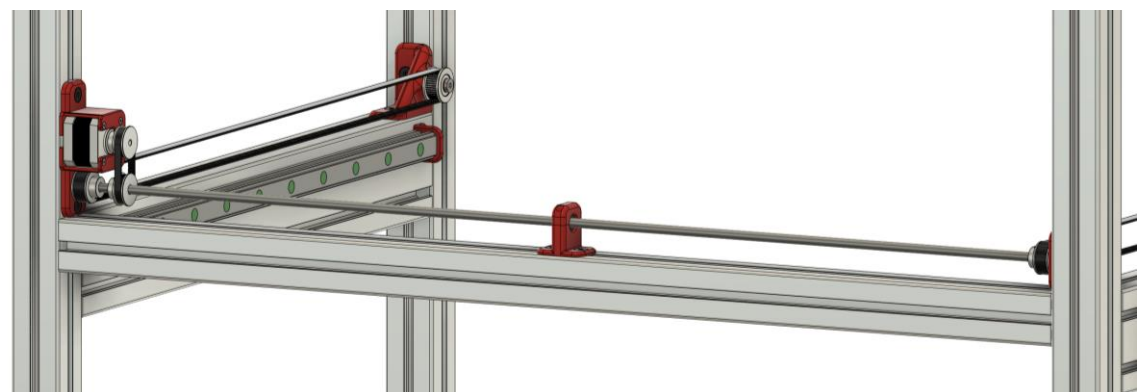
Tulostuspäiden sivuittais- eli x-akselin suuntainen liike toteutettiin lineaarijohteella sekä x-akselin molempiin päihin sijoitetuilla askelmootoreilla. Molemmat tulostuspäät kiinnitettiin hihnalla omiin askelmootoreihinsa, jotta ne voivat liikkua itsenäisesti toistensa asemasta riippumatta. Kuvassa 10 näkyy, kuinka hihnat on asetettu eri tasoon, jotta ne eivät häiritse toistensa liikettä. Molempiin päihin lineaarijohdetta sijoitettiin rajakytkimet, joiden avulla tulostin osaa ajaa molemmat tulostinpäät kotiasemaan.



Kuva 10. X-akseli

#### 4.4 Y-akseli

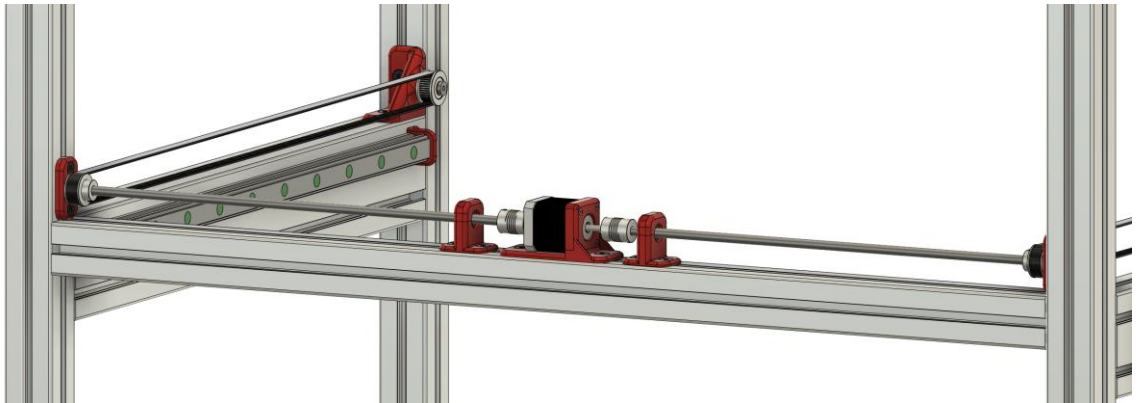
Tulostimen x-akselin syvyys- eli y-akselin suuntainen liike toteutettiin tulostimen takaosaan sijoitetulla akselilla ja sitä pyörittävällä askelmoottorilla. Askelmoottorin aikaansaama liike välitettiin x-akselille sen molempiin päihin kiinnitetyillä hihnapyörillä sekä hihnoilla. Kuvassa 11 näkyy ensimmäinen versio akselista, jossa askelmoottori sijoitettiin akselin toiseen päähän.



Kuva 11. Ensimmäinen versio y-akselista

Testausvaiheessa ongelmaksi ilmeni x-akselin liikkeelle saaminen sen suuren painon sekä huonolaatuisten lineaarikelkkojen takia. Ongelma korjattiin korvaamalla alkuperäinen askelmoottori

voimakkaalla läpiakselisella moottorilla ja sijoittamalla se tulostimen keskiosaan kuvan 12 mukaisesti.



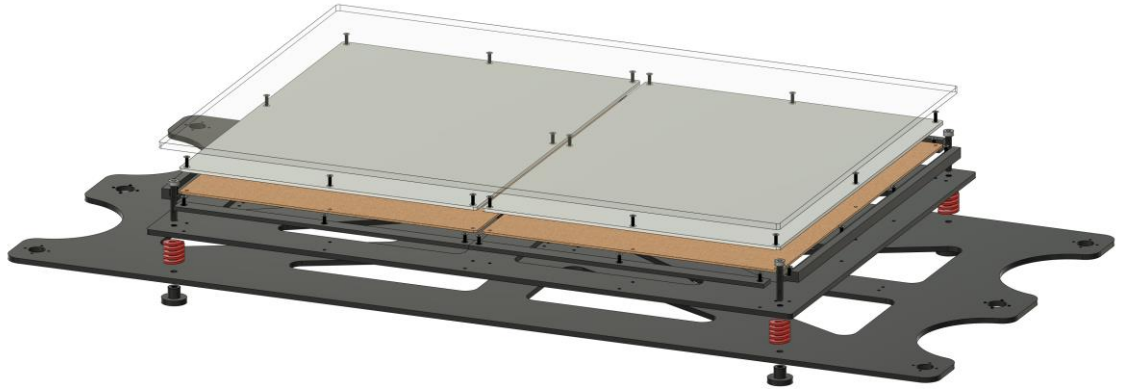
Kuva 12. Y-akselin uusi ratkaisu

#### 4.5 Tulostusalusta

3D-tulostimen tulostusalustan täytyy olla tasainen sekä lämmitettävä, jotta tulostettava kappale tarttuu siihen ongelmitta. Tulostusalusta suunniteltiin kahdesta alumiinilevystä. Alumiinilevyt kiinnitettiin toisiinsa sormiruuvein kiristettävillä pulteilla ja jousilla. Alumiinilevyjen väliin tulevat jouset mahdollistavat tulostusalustan tasaisuuden säätämisen.

Päällimmäiseen alumiinilevyyn kiinnitettiin kaksi isoa 300 x 400 millimetrin kokoista alumiinista lämpövastuslevyä, joihin ohjattava virta saa ne sekä niiden päälle asetettavan lasilevyn lämpiämään haluttuun lämpötilaan. Lämpötilan seuranta tapahtuu niissä olevilla lämpötila-antureilla. Alumiinilevy ja lämpövastukset eristettiin toisistaan ohuella korkkilevyllä, jotta lämpö välittyisi lasilevyyn eikä niiden alla olevaan alumiinilevyyn.

Tulostusalustassa oleva lasilevy on helposti irrotettavissa, jotta tulostetun kappaleen irrottaminen siitä olisi helpompaa. Lasilevyn päälle liimattiin karhea kalvo, joka helpottaa tulostuksen ensimmäisen kerroksen tarttumista tulostusalustaan. Se tarvittiin myös alustan kalibrointia varten, koska siihen käytettävä kapasitiivinen anturi ei tunnista lasia, vaan se vaatii läpinäkymättömän kappaleen. Kuvassa 13 räjäytyskuva tulostimen tulostusalustasta.

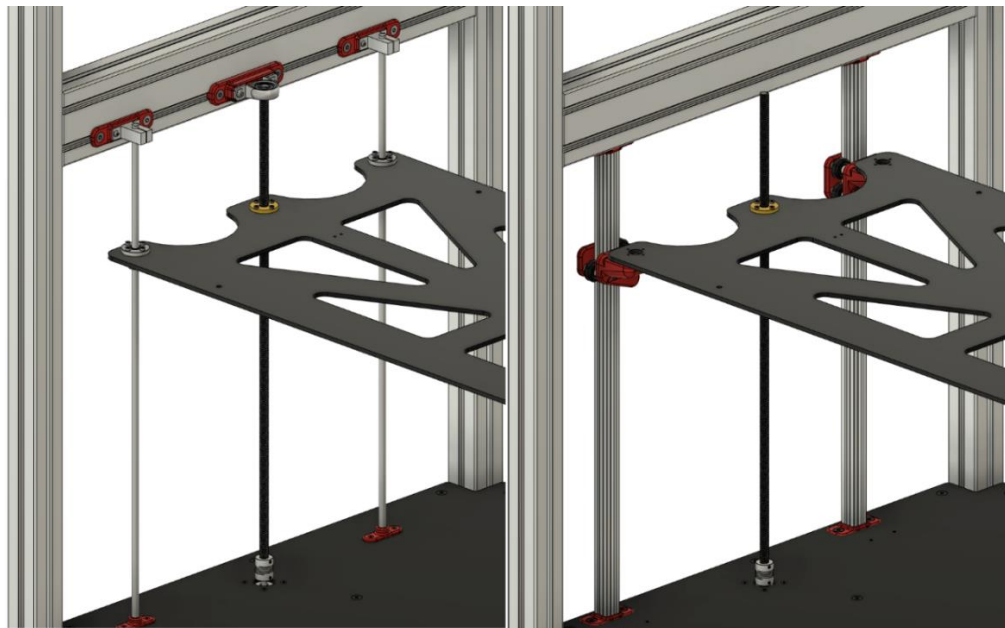


Kuva 13. Räjätyskuva tulostusalustan rakenteesta

#### 4.6 Z-akseli

Tulostusalustan z-akselin liike toteutettiin alustan molempiin päihin kiinnitettävillä trapetsisiruveilla, joita pyöritettiin tulostimen pohjalevyn alle sijoitetuilla askelmoottoreilla.

Ensimmäisissä suunnitelmissa alustaa tuettiin jokaiseen kulmaan sijoitetulla tangolla ja lineaarilaakerilla, mutta lineaarilaakereiden huonon liukuvuuden takia tulostusalusta ei liikkunut z-akselilla tasaisesti. Ongelma ratkaistiin vaihtamalla tangot V-Slot-lineaariprofiileihin ja lineaarilaakerit korvattiin 3D-tulostetuilla kelkoilla, jotka liikkuivat profiileja pitkin ongelmitta. Kuvassa 14 näkyy eroavaisuudet vanhan sekä uuden suunnitelman välillä.

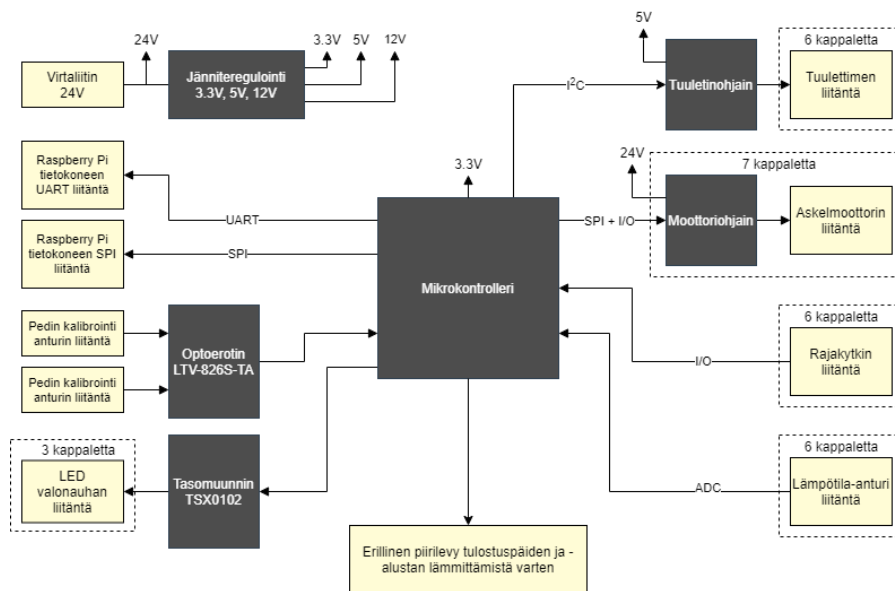


Kuva 14. Vanha (vasemmalla) ja uusi (oikealla) z-akselin toteutus

## 5 3D-tulostimen emolevy

3D-tulostimessa emolevyn tehtävänä on ohjata ja seurata tulostusprosessia sekä kaikkea tulostimen sisältämää elektroniikkaa. Kaupallinen tarjonta 3D-tulostimen emolevyille on laaja, mutta normaalista 4–5 moottoriohjaimesta poiketen suunniteltu tulostin tarvitsee seitsemän askelmoottoria sen suuren koon takia. Tämän takia emolevy täytyi suunnitella itse tulostimen vaatimuksien mukaiseksi.

Askelmoottorien lisäksi emolevyyn täytyi pystyä liittämään tulostimessa olevat tuulettimet, anturit, sekä tulostuspäiden ja tulostusalustan lämpövastukset. Kuvassa 15 on kaavio emolevyn sisältämistä piireistä sekä liitännöistä.



Kuva 15. Kaavio emolevyn sisältyvistä piireistä ja liitännöistä.

Monissa 3D-tulostimissa ohjaukoodi syötetään tulostimelle muistikortilla suoraan emolevyn kautta. Tässä tapauksessa päätettiin emolevyn yhdistää Raspberry Pi -mikrotietokone, jolla 3D-tulostimeen saisi toteutettua 3D-tulostimen etähallinnan sekä ohjaukoodin syöttämisen. Tämän lisäksi Raspberry Pi ja siihen liitetty kosketusnäyttö toimivat käyttöliittymänä tulostimen hallintaa ja tulostuksen seuranta varten.

## 5.1 Mikrokontrolleri

Emolevyn pääkomponentti on mikrokontrolleri, joka on ohjelmoitu hallitsemaan tulostimen toimintaa ohjaukoodin mukaisesti. Tulostusprosessissa se käy läpi komento kerrallaan ohjaukoodia ja sen perusteella hallitsee tulostimen moottoreita, tuulettimia ja lämpötiloja.

Mikrokontrollereiden valikoima on laaja ja vaihtoehtoja on useilta eri valmistajilta. Yleensä niiden valinnassa vaikuttaa sen tukemat ohjelmistokehitysympäristöt ja ohjelmointikielet. Mikrokontrollerin täytyy myös täyttää siihen liitettävien piirien sekä antureiden vaatimukset, kuten kommunikointiväylät.

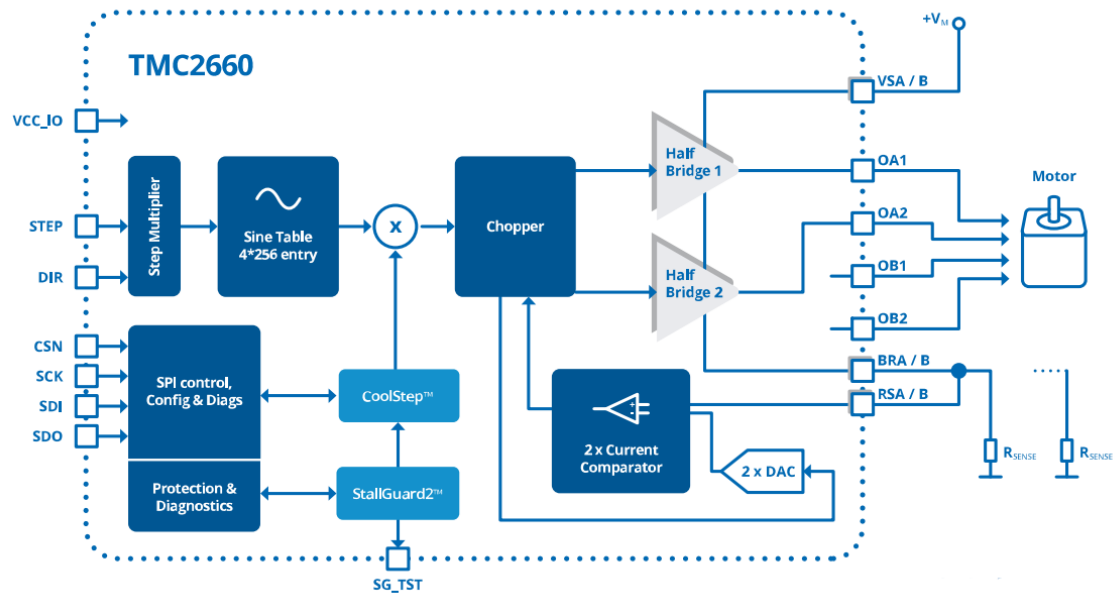
Tässä tapauksessa päätettiin käyttää STMicroelectronics STM32-tuoteperheen STM32F429-mikrokontrolleria. Kyseinen mikrokontrolleri on 32-bittinen ja se pohjautuu ARM Cortex-M4 teknologiaan.

## 5.2 Moottorinohjainpiirit

Askelmoottorien ohjaamiseen tarvitaan erilliset moottorinohjainpiirit, jotka ohjaavat askelmoottorin liikettä sekä suuntaa ohjauspulsseilla.

Askelmoottorinohjainpiirien valinnassa usein kannattaa panostaa niiden laatuun. Huonolaatuinen ohjauspulssi aiheuttaa askelmoottorien voimakkaan ääntelyn, joka ei ole toivottavaa varsinkin, kun tulostin on käytössä toimistotiloissa. Muita ominaisuuksia ohjainpiireissä ovat esimerkiksi niiden tukemat tiedonsiirtoväylät.

Moottorinohjainpiireiksi valittiin Trinamic TMC2660C-PA -moottorinohjaimet, jotka on suunniteltu 2-vaiheisen askelmoottorin ohjaukseen ja ne kykenevät tuottamaan 4A:n virran ohjauksen teessä. Kyseiset ohjainpiirit valittiin, koska ne on mahdollista konfiguroida SPI-väylän kautta ja askelmoottoria voidaan ohjata kuvassa 16 näkyvillä STEP ja DIR kontrollisignaaleilla käyttämällä mikrokontrollin GPIO-pinnejä. Useista videoista myös todettiin, että kyseisillä ohjainpiireillä askelmoottorit ovat huomattavasti hiljaisempia muiden valmistajien tarjoamiin vastaaviin piireihin verrattuna.



Kuva 16 Moottoriohjaimen lohkokkaavio

### 5.3 Tuulettimien ohjaus

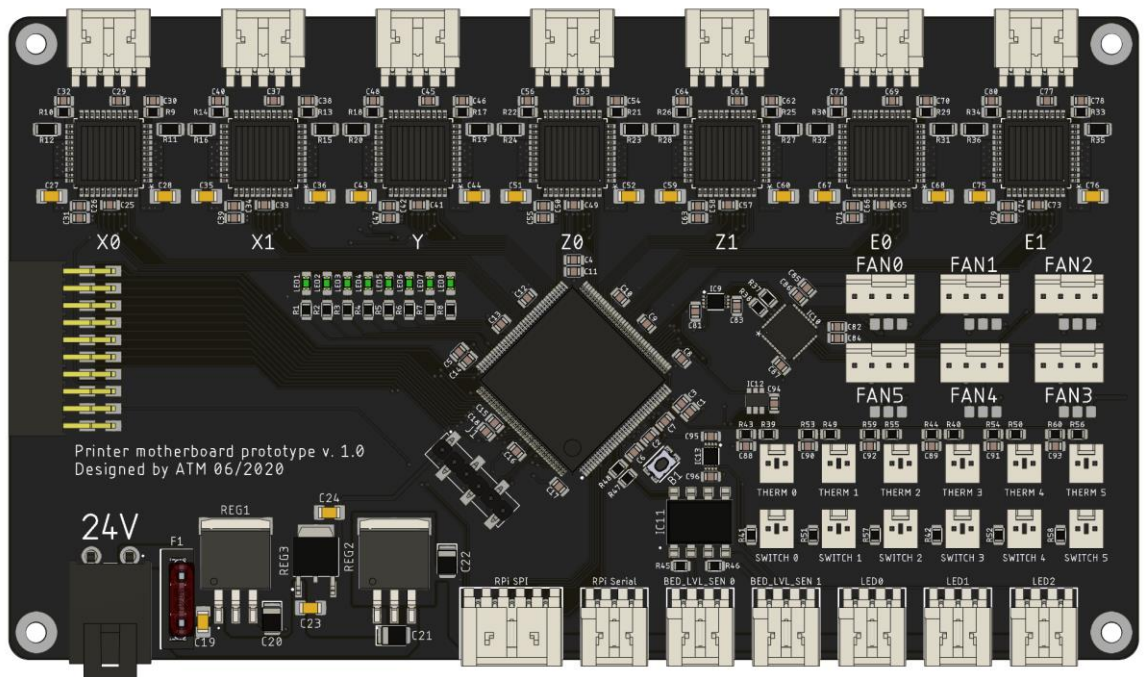
Tulostimeen valittiin käytettäväksi tuulettimia, joiden kierrosnopeutta voidaan säätää PWM-signaalin avulla. PWM-signaali olisi mahdollista toteuttaa tuulettimille myös mikrokontrollerilla, mutta tuulettimien ohjaukseen valittiin piiri, jolla voidaan hallita sekä seurata kaikkien tuulettimen kierrosnopeuksia.

Tuuletinohjauspiiriksi valittiin Maxim Integrated MAX31785, joka oli ainoa kuutta tuuletinta tukeva piiri. Kyseisellä piirillä tuulettimien ohjaus toteutuu I<sup>2</sup>C-väylän kautta lähetettävillä ohjauskomennoilla, joita mikrokontrolleri lähettää tuuletinohjauspiirille, kun tuulettimien kierrosnopeutta on tarvetta muuttaa.

### 5.4 Suunnittelu

Emolevystä suunniteltiin kaksipuoleinen piirilevy Autodesk Eagle -piirilevy-suunnitteluohjelmalla. Kuvassa 17 näkyy piirilevyn yläosassa askelmoottorien liitännät sekä moottoriohjainpiirit, keskellä mikrokontrolleri sekä oikealla alhaalla liittimet muulle emolevyyteen liitettävälle elektronikalle.





Kuva 17. 3D-malli tulostimen emolevystä

## 6 Valmistuskustannukset

Mekaanisten osien hinnaksi muodostui noin 1320 euroa. Tuosta summasta jo pelkästään tulostimen rungon osuus oli noin 720 euroa, koska se päätettiin tilata mittoihin leikattuna ja valmiiksi kasattuna. Rahaa olisi voitu säästää tilaamalla tarvittavat alumiiniprofiilit metritavarana ja leikkaamalla ne itse tarvittaviin mittoihin. Tämä kuitenkin olisi vienyt oman aikansa, joten rungon tilaaminen kasattuna katsottiin hyväksi vaihtoehdoksi.

Monissa muissa mekaanisissa osissa säästettiin tilaamalla ne kiinalaisilta valmistajilta, esimerkiksi Aliexpress-sivuston kautta. Tällä tavalla pyrittiin minimoimaan tappiot, mikäli suunnitelmiin täytyisi tehdä muutoksia ja osia ei käytettäisikään lopulliseen tulostimeen.

Tulostimen elektroniikkaan kokonaisuudessaan kului 1089,86 euroa. Kyseinen summa sisältää muun muassa piirilevyjen valmistuksen, kaikki emolevyille tulevat komponentit, ekstruderit, virtalähteet sekä johdot.

Mekaanisien osien sekä elektroniikan toimituskulut olivat yhteensä noin 440 euroa. Korkeat toimituskulut johtuivat siitä, että osia jouduttiin tilaamaan monelta eri tavarantoimittajalta.

Tulostimen materiaalikustannuksien kokonaishinnaksi tuli noin 2 850 euroa, joten se reilusti ylitti alkuperäisen budjetin. Hinta sisältää vain tulostimen materiaalikustannukset, joten siihen ei ole laskettu tulostimen suunnitteluun ja valmistukseen kulutettua aikaa tai esimerkiksi koululta käyttöön saatujen askelmoottoreiden ja alumiinilevyjen hintoja.

## 7 Yhteenveto

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa 3D-tulostin 1000 x 1000 x 500 millimetrin tulostusalueella. Tulostimeen käytettävä budjetti oli noin 2000 €.

Suunnittelun alussa kuitenkin huomattiin, että näin suuren kokoluokan tulostin veisi liian paljon tilaa ja ylittäisi budjetin. Tämän takia tulostusalueen koko pienennettiin 600 x 400 x 500 millimetriin, koska tässä tapauksessa tulostin mahtuisi hyvin esimerkiksi varastoon tai autotalliin.

Työn osuus tulostimen kehitysprosessista oli tulostimen mekaniikan ja elektroniikan suunnittelu, joten tulostimen ohjelmointi jätettäisiin myöhemmäksi projektiksi. Työn ohessa kuitenkin tehtiin tulostimelle testiohjelmisto, jolla pystyttiin testaamaan mekaniikan ja elektroniikan toiminta.

Tulostimen suunnittelu ja toteutus onnistui budjetin ylittämistä lukuun ottamatta hyvin. Lopputuloksena oli hieman jatkokehitystä vaativa mekaniikka sekä täysin toimivia elektroniikka 3D-tulostimelle, jonka kokoista ei markkinoilta saisi edes projektiin käytetyllä 2850 eurolla.

## Lähteet

- 1 Haines J. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? [internet]. [Viitattu 10.5.2022] Saatavilla: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- 2 The Types of 3D Printing Technology [internet]. [Viitattu 13.2.2021] Saatavilla: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- 3 Rankouhi B, Javadpour S, Delfanian F, Letcher T. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation [internet]. [Viitattu 10.5.2022] Saatavilla: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-016-0113-2>
- 4 Ultimate 3D Printing Materials Guide [internet]. [Viitattu 10.5.2022] Saatavilla: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- 5 Richter A. How To: Print, Clean, and Post-Process SLA 3D Prints [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-print-clean-and-post-process-sla-3d-prints>
- 6 Saunders S. Comparing Surface Finish and Post-Processing Methods for SLM 3D Printed Parts [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://3dprint.com/264952/comparing-surface-finishing-and-post-processing-methods-for-slm-3d-printed-parts/>
- 7 Thingiverse [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://www.thingiverse.com/>
- 8 Creality Ender Pro [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://www.3djake.fi/creality-3d-tulostimet-ja-osat/ender-3-pro>
- 9 BCN3D Sigma D25 [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://www.bcn3d.com/bcn3d-sigma-d25/>
- 10 CreatBot F1000 [internet]. [Viitattu 23.3.2021] Saatavilla: <https://www.creatbot.com/en/creatbot-f1000.html>