



# CNC-jyrsimen rakennus FDM-tulostamista käyttämällä

Marko Turunen

OPINNÄYTETYÖ  
Elokuu 2020

Konetekniikka  
Koneautomaatio

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Koneautomaatio

TURUNEN, MARKO:  
CNC-jyrsimen rakennus FDM-tulostamista käyttämällä

Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä 25 sivua  
Elokuu 2020

---

Opinnäytetyö tehtiin osana Tampereen ammattikorkeakoulun konetekniikan alan tutkimusta 3D-tulostamisen hyödyntämisestä tuotantotekniikassa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia FDM-tulostamisen soveltuvuutta laiterakentamisessa.

Työn pääasiallinen tavoite oli suunnitella ja rakentaa CNC-jyrsinkone käyttämällä FDM-tulostustekniikkaa. Aikaisemman tutkimustiedon perusteella tiedettiin, että FDM-tulostustekniikalla tehdyissä kappaleissa esiintyy mittavirheitä. Työn aikana perehdyttiin myös syntyvien mittavirheiden aiheuttajiin. Mittavirheitä pyrittiin kompensoimaan erilaisilla keinoilla, joita sovellettiin käytäntöön työn edetessä.

Vaativuudet täyttävä CNC-jyrsin saatiin rakennettua käyttämällä FDM-tulostustekniikkaa ja soveltamalla mittavirheiden kompensointiin soveltuvia tekniikoita. CNC-jyrsimen tarkkuudet eivät kuitenkaan olleet odotetun mukaisia. Koneistusepä-tarkkuuksien aiheuttajaksi todettiin liian pieneksi mitoitettut X-akselin lineaarijohteet. Saatujen tulosten perusteella FDM-tulostustekniikka on soveltuva pienikokoisten CNC-jyrsinkoneiden rakentamiseen.

Jatkossa olisi hyödyllistä tutkia esimerkiksi eri tulostusohjelmistojen vaikutusta mittavirheisiin sekä 3D-suunnitteluohjelmien STL-muunnon ja laitteiden yksilöllisyyden vaikutusta mittavirheisiin. Erityisesti eri filamenttimateriaalien vaikutusta mittavirheisiin kannattaisi tutkia, koska niiden kehitys on voimakasta ja markkinoille saapuu jatkuvasti uusia. Näistä materiaaleista, erityisesti sekoitefilamenteista, saattaa olla saatavilla parempia ja vahvempia materiaaleja tuotantotekniikan tarpeisiin.

---

Asiasanat: koneenrakennus, lisäävä valmistus, cnc-jyrsin, kompensointi, tarkkuus

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Machine Automation

TURUNEN, MARKO  
Building a CNC Mill Using the FDM Printing Method

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 25 pages  
August 2020

---

This thesis was made as part of a larger study on using additive manufacturing in Production Engineering for the Degree Programme in Mechanical Engineering at Tampere University of Applied Sciences. The main goal was to research whether FDM printing is an applicable way to produce parts for machines. For this purpose, a CNC milling machine was designed and manufactured using the FDM printing technique.

It was known from previous research that FDM printing has poor accuracy. The causes for poor accuracy were studied beforehand and compensated using different methods. These methods were applied in practice in the manufacturing of the CNC mill's parts.

A working CNC mill was produced using the FDM printing technique by applying different methods for compensating poor measurement accuracy in the process. Based on the results of this study, it can be concluded that FDM printing is a viable way to produce parts for small-scale CNC milling machines.

It is suggested here that further studies on the accuracy and viability of using FDM printing as means of producing machine parts should be focused on different filaments, especially filament mixes.

---

Keywords: machine building, additive manufacturing, cnc-mill, compensation, accuracy

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	LAITTEEN VAATIMUKSET .....	7
	2.1 Laitteen tarkoitus.....	7
	2.2 Laitteen vaatimusten määrittely.....	7
	2.3 Koneen karkea suunnitelma.....	8
3	KONEEN OSIEN VALINTA.....	9
	3.1 Osien valinnasta yleisesti.....	9
	3.2 Runkomateriaalien valinta.....	9
	3.3 Voimansiirto ja akseliston osien valinta.....	10
	3.4 Elektronisen ohjaimen valinta .....	11
	3.5 Moottorien valinta.....	12
	3.6 Muiden elektronisten komponenttien valinta. ....	14
4	OSIEN MALLINNUS JA 3D-TULOSTAMINEN .....	15
	4.1 Tulosteiden ja kokoonpanon osien mallinnus.....	15
	4.2 3D-tulostin ja ohjelmisto .....	18
	4.3 Osien tulostaminen .....	19
5	KOKOONPANO .....	22
	5.1 Osakokoonpano ja työkalut.....	22
	5.2 Grbl-ohjelmisto ja elektroniikan kokoonpano.....	22
	5.3 Kokoonpanon viimeistely .....	25
6	LAITTEEN LOPPUTARKASTELU .....	27
	6.1 Laitteen tarkkuuksien mittaus.....	27
	6.2 Tarkkuusmittauksien tulokset.....	28
	6.3 Ongelmat ja niiden korjaus.....	29
	6.4 Vaatimusmääritysten tarkastaminen .....	30
	6.5 Laiteturvallisuus .....	31
7	POHDINTA JA KEHITYSEHDOTUKSET .....	33
	LÄHTEET.....	34
	LIITTEET .....	35
	Liite 1. PrucaSlicer Asetukset 1(5).....	35
	Liite 2. Tulostettavien osien linkkilista 1.....	40
	Liite 3. Tekniset piirustukset 1(5).....	41
	Liite 4. Rungon ja tulosteiden kokoonpanopiirustukset 1(6) .....	46
	Liite 5. Elektroniikan kytkentäkaavio 1.....	52
	Liite 6. Kokoonpanon tekniset piirustukset 1(4).....	53
	Liite 7. CNC-jyrsimen osien ja käytettyjen työkalujen listat 1(2).....	57

**LYHENTEET**

3D	Three-dimensional
CAD	Computer assisted drawing
CAM	Computer assisted manufacturing
CNC	Computer numerical control
FDM	Fused deposition modeling
PLA	Polylactide
PWM	Pulse width modulation
STL	Stereolithography file format
MDF	Medium-density fibreboard

## 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli tutkia FDM-tulostustekniikan soveltuvuutta laitteen osien rakentamisessa. Työ tehtiin osana Tampereen ammattikorkeakoulun konetekniikan alan tutkimusta 3D-tulostamisen hyödyntämisestä tuotantotekniikassa.

Työn tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa toimiva CNC-jyrsin FDM-tulostustekniikkaa käyttämällä. FDM-tulostustekniikan mittatarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkittiin aikaisempien tutkimustulosten pohjalta. Mittavirheiden kompensoimiseksi etsittiin erilaisia keinoja ja niitä sovellettiin käytäntöön CNC-jyrsimen rakentamisen yhteydessä.

## 2 LAITTEEN VAATIMUKSET

### 2.1 Laitteen tarkoitus

CNC-jyrsimen rakentamisen tarve syntyi kaiverrusharrastuksesta. Kaiverrusten tekeminen käsin on pikkutarkkaa ja fyysisesti vaativaa työtä. CNC-jyrsimen avulla voidaan luoda kaiverruksia ilman fyysisesti rasittavaa työtä.

CNC-jyrsinkoneen tarkoituksena on olla osana sellaisen tuotteen valmistusta, jossa käytetään kaiverrettua akryyliä. Jyrsinkoneella kaiverretaan asiakkaan toimittama kuva tai teksti asiakkaan valitsemaalle materiaalille. Kaiverretty tuote voidaan lopuksi sijoittaa osaksi suurempaa kokoonpanoa.

### 2.2 Laitteen vaatimusten määrittely

Laitteen vaatimusten määrittely on tärkeä ja hyödyllinen työkalu laitteen rakentamisen aloittamisessa. Määrittelyllä todennetaan vaatimusten täyttyminen koneen valmistuttua. Tekijän ollessa laitteen tilaaja ja rakentaja, ei vaatimusmäärittelyn kanssa tullut epävarmuutta siitä mitä tilaaja oikeasti halusi. (Fritz, C., MacCleery, B., Gutierrez, J., Walter, T. 1.2.2011. s.6.)

Opinnäytetyölle asetettiin budjetiksi 1000 €, jolla hankittiin rakentamiseen vaadittavat työkalut ja komponentit. Laitteelle asetettiin myös seuraavan listan mukaiset määritykset.

Laitteen tulee olla:

- Yksinkertainen ja turvallinen käyttää
- Edullinen rakentaa
- Kevyt ja helposti liikuteltava
- Helposti muokattavissa
- Rakennettu 3D-tulostetuista osista
- Riittävän tehokas akryylin työstöön.

### 2.3 Koneen karkea suunnitelma

Suunnitteluprosessissa käytettiin mekatronista lähestymistapaa. Mekatronisessa lähestymistavassa suunnitteluprosessi ei ollut lineaarinen vaan kaikkia laitteen osa alueita suunnitellaan samanaikaisesti. Samanaikaisella suunnittelulla ja tarkastelulla saavutetaan paras mahdollinen laite vaatimusten täyttämiseksi. (Fritz, C., MacCleery, B., Gutierrez, J., Walter, T. 1.2.2011. s.4.)

CNC-jyrsinkoneen suunnittelu sai paljon vaikutteita Nikodem Bartnikin tekemästä 3D-tulostetusta Dremel CNC-laitteesta. Bartnikin rakentaman CNC-laitteen runkorakenne näytti hänen julkaisemiensa videoiden perusteella toimivalta ratkaisulta, joten sitä käytettiin pohjana CNC-jyrsimen rakentamiseen (Bartnik. n.d). Karkeana pohjana alettiin suunnittelemaan 3-akselista CNC-jyrsintä, joka käyttää karteesisista XYZ-koordinaatistoa. Akselisto suunniteltiin liikuttamaan karamoottoria työstöalustan liikuttamisen sijaan.



### 3 KONEEN OSIEN VALINTA

#### 3.1 Osien valinnasta yleisesti

Suunnitteluvaiheessa CNC-jyrsimen osat valittiin punnitsemalla eri vaihtoehtoja taulukoimalla komponenttien hyviä sekä huonoja puolia. Osien valinnassa käytettiin myös aikaisempaa tuntemusta yleisesti käytetyistä 3D-tulostimien osista. Näihin yleisesti käytettäviin osiin kuuluvat esimerkiksi trapetsitangot, askelmootorit, v-aukkoinen alumiiniprofiili, delrin pyörät sekä pyörötankoiset lineaariakselit.

Osien hintojen ja ominaisuuksien vertailuun käytettiin kahta suurta verkkokauppa-alustaa, jotka toimittavat osia suurelta määrältä eri kauppiaita ja toimittajia. CNC-jyrsimen komponenttien hakemiseen käytetyt verkkokauppa-alustat olivat Aliexpress ja Amazon (amazon.de, aliexpress.com). MDF-levyt, pienrautatarvikkeet ja työkalut hankittiin paikallisesti pienrautakaupoista. Käytetyt paikalliset pienrautakauppiat olivat K-rauta, Bauhaus ja Prisma.

#### 3.2 Runkomateriaalien valinta

Koneen runkomateriaalin vaihtoehtoiksi muodostui alumiini tai teräs. Alumiininen V-aukko profiili valittiin sen muokattavuuden ja edullisen hinnan vuoksi. Runko-osan alumiiniprofiili oli saatavilla valmiiksi mittaan leikattuina ja sitä käytettiin myös yhtenä akseliston tukipisteenä.

Rungon alustaksi valittiin 400x500x20 mm kokoinen MDF-levy, jonka avulla runko-osa saatiin tukevoitua ja lisättyä siihen massaa. Tukevoinnilla ja massan lisäyksellä vähennettiin värinän aiheuttamaa resonointia. MDF-levyä käytettiin myös työstettävien kappaleiden kiinnitysalustana sen helpon työstettävyyden vuoksi.

Muiden runkoon kiinnittyvien osien tulostusmateriaaliksi valittiin PLA-muovi sen helpon tulostettavuuden, kustannuksen ja saatavuuden vuoksi. (3D-simplify n.d.)

Elektroniikan kokoonpanon pohjalevyksi valittiin alumiininen levy. Elektroniikkaosat suunniteltiin sijoitettavaksi alumiiniseen levyyn sen hyvien lämpöä johtavien ominaisuuksien vuoksi.

### 3.3 Voimansiirto ja akseliston osien valinta

CNC-jyrsimen lineaariliikkeen johteiksi valittiin taulukon 1 perusteella pyörötanko. Karkean suunnitelman ja koneen käyttötarkoituksen perusteella johteiden halkaisijaksi valittiin 8 mm. Samaa pyörötanko johdetta käytettiin kaikilla akseleilla. Pyörötangon lineaarilaakereiksi valittiin pyörötangon paksuuden mukaan LM8UU laakeri.

TAULUKKO 1. Johdetyypin valinta

Johdetyyppi:	Edut:	Haitat:	Kustannus:
Pyörötanko	Yleisesti käytetty 3D-tulostimien rakenteissa. kiinnitys rakenteeseen tangon päädyistä.	Ei vaadi koko matkalta kiinnitettävää rakennetta, joka tangon altistaa vääntymille.	10€/m
Kuulajohde	Hyvin tarkka ja jäykkä johde. Kiinnitys koko matkalta.	Vaatii rakenteen, johon se kiinnitetään.	40€/m
C-johde	Kuten pyörötanko mutta kiinnitetään koko matkalta	Vaatii rakenteen, johon se kiinnitetään.	30-40€/m

Akselien liikuttamiseen valittiin taulukon 2 perusteella trapetsikierretanko. X- ja Y-akseleille valittiin 8 mm nousulla olevat trapetsikierretangot. 8 mm trapetsikierretanko on yleisesti 3D-tulostimissa käytetty Z-akselistolla sen korkean tarkkuuden vuoksi.

TAULUKKO 2. Lineaarinen voimansiirto

Lineaariliikkeen voimansiirto:	Edut:	Haitat:	Kustannus:
Trapetsikierretanko	Tarkka, helposti saatavilla	Välyksetön mutteri aiheuttaa lisäkitkaa	14-20€/m
Kuularuuvi	Erittäin tarkka, välyksetön ja vähäkitkainen	Kuularuuvin kustannustaso on korkea	30-50€/m
Hammashihna	Kustannustehokas ratkaisu.	Tarkkuus ja vaikutus laitteen rakenteelliseen suunnitteluun	10-20€/m

Z-akselille valittiin tiheämmällä 2 mm nousulla varustettu 8 mm halkaisijan tanko. Tiheämpi Z-akselin trapetsikierretanko valittiin siksi, että sen pienempi nousukulma estää moottorin painautumista alaspäin askelmoottorin ollessa virrattomassa tilassa. Trapetsikierretankojen päätykohtiin valittiin tukilaakereiksi 608ZZ laakeri, koska niitä oli opinnäytetyön tekijällä jo entuudestaan ja ne sopivat hyvin tukilaakereiksi. Trapetsikierretankojen liittämiseen valittiin alumiiniset akseliliittimet.

### 3.4 Elektronisen ohjaimen valinta

CNC-jyrsin vaatii toimiakseen elektronisen ohjaimen. Elektronisen ohjaimen tarkoitus on muuttaa ohjaavalta tietokoneelta elektroniselle ohjaimelle tuleva tieto askelmoottorien liikkeeksi. Elektroninen ohjainlaite sisältää ohjelman, jonka avulla se antaa askelmoottorille oikean määrän askeleita suhteessa sen akselin lineaariseen liikkeeseen.

Löydetyt ohjainlaitteenvaihtoehdot taulukoitiin, ja niiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia ja soveltuvuutta vertailtiin. Taulukon 3 perusteella käytettäväksi ohjainlaitteeksi valittiin Arduino UNO ja CNC-Shield.

TAULUKKO 3. Ohjainlaitteen valinta.

Ohjainlaite:	Edut:	Haitat:	Soveltuvuus:	Kustannus:
STB 5100 MACH3 yhteensopiva ohjainlaite	CNC-laitteille suunnattu ohjainlaite.	Kallis ja vaatii erilliset ohjaimet askelmootoreille.	Suunniteltu CNC-kone ohjaukseen.	40-100€
Arduino UNO + CNC-Shield	Edullinen ja yhteensopiva Grbl ohjelman kanssa.	Soveltuvuus ammattilaiskäyttöön ei ole varmaa.	Soveltuu hyvin harrastemaisen CNC-laitteen ohjaimeksi.	10-15€
32-bit BigTreeTech SKR 1.3	Edullinen ja edistyksellinen ohjain. 3D-tulostimille suunnattu.	CNC-laite sopivaa ohjelmistoa ei löydetty tälle ohjaimelle.	Ei sovellu CNC-ohjaukseen tässä projektissa.	20-30€

CNC-Shield on valmiiksi yhteensopiva 3D-tulostimissa käytettävien askelmootorien ajureiden kanssa. Ohjaimiksi valittiin edulliset ja helposti säädettävät A4988 ajurit. A4988 moottoriajurien maksimi ulosantovirta on jäähdytettynä 2 A (Pololu n.d.).

### 3.5 Moottorien valinta

Askelmoottoreiksi valittiin Nema17 moottorit. Nema17 moottoreihin päädyttiin kontrollerin ja moottoriajuriin myötä. Valitut askelmoottorit ovat Usongshine 17 HS4401 1,5 A 0,420 Nm moottorit. (Usongshine tuotesivu)

Moottoreiden riittävä teho tarkastettiin laskennallisesti ruuvivoiman kaavalla (1)

$$F_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{h} \cdot F_1 \quad (1)$$

Kaavassa  $F_2$  on akselisuunnassa oleva voima,  $r$  on keskimääräinen kierteen säde,  $h$  on trapetsikierrretangon nousu kierrosta kohden ja  $F_1$  on moottorin tuottama aksiaalivoima (Valtanen 2016. s.181).

Valmistajan ilmoittama maksimaalinen vääntömomentti moottorille on 0,42 Nm ja sen akseli kiinnittyy trapetsikierrretankoon ulkohalkaisijastaan. Aksiaalivoiman selvittämiseen käytettiin voiman momentin perusyhtälöä:

$$M_m = F_1 \cdot r \quad (2)$$

Kaavassa  $M_m$  on moottorin tuottama momentti,  $F_1$  on moottorin tuottama aksiaalivoima ja  $r$  on voiman akselin säde. (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J., 2016. s.93)

Trapetsikierrretangon nousu ja halkaisija ovat 8 mm ja keskimääräinen kierteen säde on 3,75 mm. Sijoittamalla arvot ja yhdistämällä kaavat (1) ja (2) saadaan:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot 0,00375 \text{ m}}{0,008 \text{ m}} \cdot \frac{0,42 \text{ Nm}}{0,004 \text{ m}} = 309,25 \text{ N}$$

Tulokseksi saatu 309 N voima on riittävä CNC-jyrsimen akseleiden liikuttamiseen vaakatasossa. Kaavassa ei otettu huomioon lineaarilaakereiden eikä messinkimutterien aiheuttamia kitkavoimia.

Karamoottoriksi suunniteltiin aluksi sovellettavaksi käsikäyttöistä jyrsintä. Etusiessä sopivaa moottoria löytyi valmis moottoripaketti, jossa oli moottorin lisäksi ER11 karaliitin ja moottorin kiinnitystuki. Moottori on Xinhuangduo 200 W 12-48 V 3000-12000 RPM moottori.

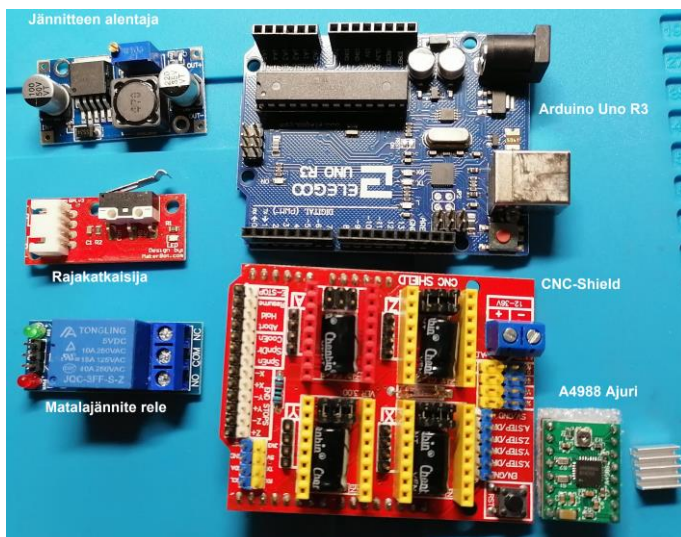
Karamoottorin ohjaimeksi valittiin merkitön MACH3 yhteensopiva PWM-ohjain (Pulse Width Modulation). PWM-ohjaus ei kuitenkaan ollut yhteensopiva Arduinon signaalitason kanssa. Ohjaimessa oli myös potentiometrillä tapahtuva moottorin ohjaus, joka otettiin käyttöön. Ohjaimen virransyötölle lisättiin matalajännitteinen releohjaus, joka mahdollisti moottorin käynnistämisen ja pysäytyksen Arduinon ohjauksella.

### 3.6 Muiden elektronisten komponenttien valinta.

Karamoottorille ja CNC-shield järjestelmälle valittiin erilliset virtalähteet sähköhäiriöiden välttämiseksi. Karamoottorille valittiin 48 voltin jännitteellä toimiva 200 wattinen Velika S-200-48 virtalähde. CNC-shield järjestelmään valittiin 24 voltin ja 120 watin Velika S120-24 virtalähde. Virtalähteen lisäksi hankittiin säädettävä jännitteenalentaaja, jolla alennettiin 24 voltin jännite 12 volttiin.

Virtalähteille tuotiin vaihtojännite pistokeliittimen kautta. Pistokeliittimeksi valittiin yleisesti 3D-tulostimissa käytettävä pistoke, jossa on myös paikka sulakkeelle ja virtakytkin.

CNC-jyrsimeen valittiin mekaaniset rajakatkaisijat. Valituissa rajakatkaisijat olivat valmiiksi juotettu liittimellä varustettuun piirilevyyn. Kuvassa 1 on esitetty osa laitteessa käytetyistä elektronisista komponenteista.



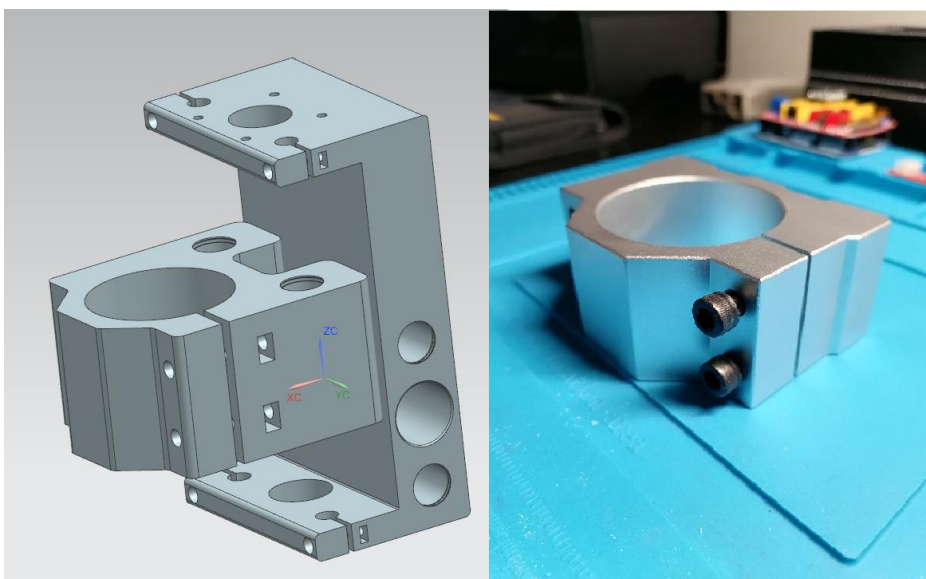
KUVA 1. CNC-jyrsimessä käytettyjä elektronisia komponentteja

## 4 OSIEN MALLINNUS JA 3D-TULOSTAMINEN

### 4.1 Tulosteiden ja kokoonpanon osien mallinnus

CNC-jyrsimen osat mallinnettiin Siemens NX 12 CAD-ohjelmistolla. Tavoitteena oli saada suunniteltua mahdollisimman yksinkertaiset ja helposti tulostettavat osat. Kokoonpanon muut osat kuten ruuvit, mutterit ja laakerit mallinnettiin fyysisten komponenttien sekä tuotekuvauksista löytyvien mittojen pohjalta.

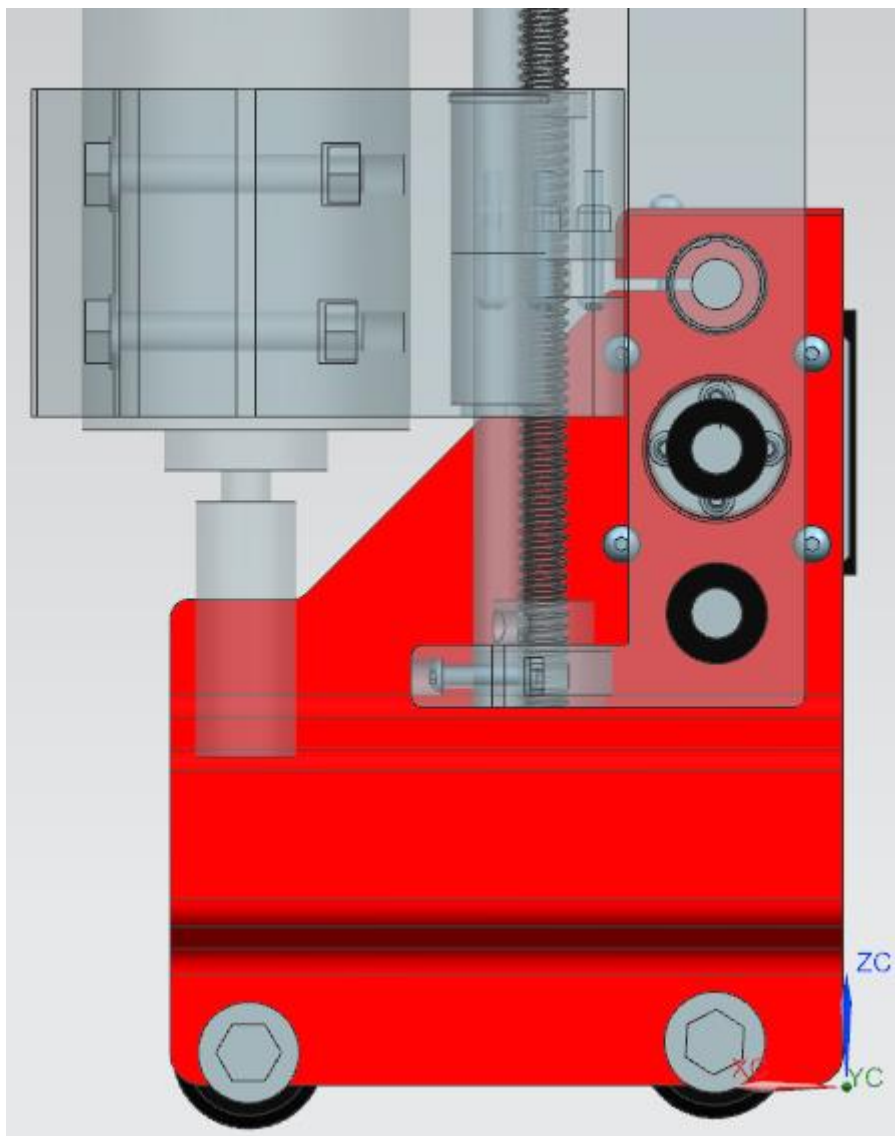
Karamoottorin kiinnikkeen suunnittelu sai ideansa tilatun karamoottorin mukana toimitetusta alumiinisesta moottorikiinnikkeestä. Kuvassa 2 on aseteltu vierekkäin 3D-malli karamoottori kiinnikkeestä ja karamoottorin mukana toimitettu kiinnike.



KUVA 2. Karamoottorin kiinnike ZX-akselitelineineen 3D-malli vrt. alumiinikiinnike.

Moottoria Z-suunnassa liikuttava osa suunniteltiin antamaan moottorille 75 mm liikkumisvara.

Lineaariakselit X ja Y yhdistävät osat suunniteltiin niin, että V-aukkoista alumiini-profiilia hyödynnettiin vastaanottamaan akseliston paino ja estämään karamoottorin painosta aiheutuvaa X-akselin momenttia. Kuvassa 3 on aseteltu päällekkäin karamoottorikokoonpano sekä XY-akseliston kelkan 3D-mallit.

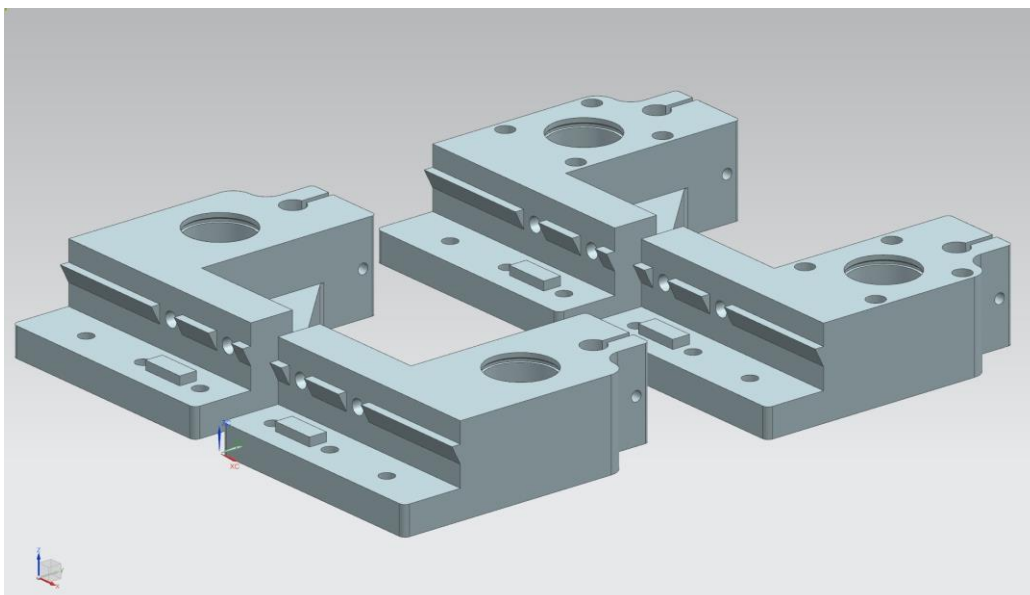


KUVA 3. XY-akseliston kelkka ja karamoottorikokoonpano 3D-malli.

X-akselin vastakkainen puoli luotiin piilottamalla moottorireikien piirre suunnitteluohjelmistossa ja tekemällä osasta peilikuva. Peilikuva tehtiin käyttämällä suunnitteluohjelmiston "mirror Assembly" työkalua.

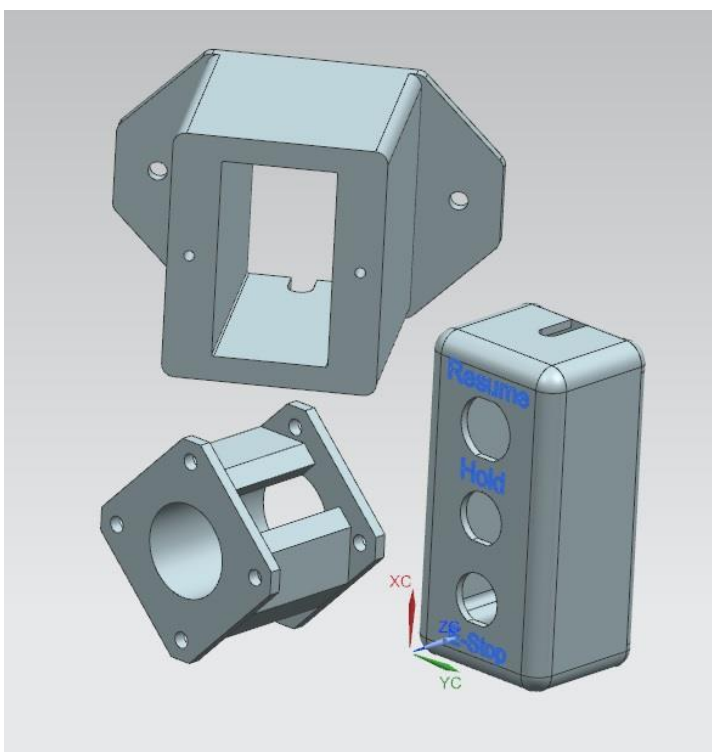
Y-akselien kulmaosien suunnittelussa käytettiin myös askelmoottorille tarkoitettujen reikien piirteen piilottamista ja tekemällä osista peilikuvat. Kuvassa 4 on näkyvillä kaikki neljä kulmaosaa 3D-mallina.





KUVA 4. Y-akselien päätyosien 3D-mallit.

Akselien käyttömootoreille suunniteltiin korokepalat, joiden avulla moottoriakselien kiinnittäminen trapetsikierretankoihin on helpompaa. Korokepala suunniteltiin niin että sen korottavaa mitta oli helppo muuttaa suunnitteluohjelmassa. Muita suunniteltuja osia olivat kiinnityskotelo virtapistokkeelle sekä laitteen ohjauksen nappikotelo. Kuvassa 5 on 3D-mallit korokkeesta, virtapistokkeen kiinnityskotelosta ja nappikotelosta.

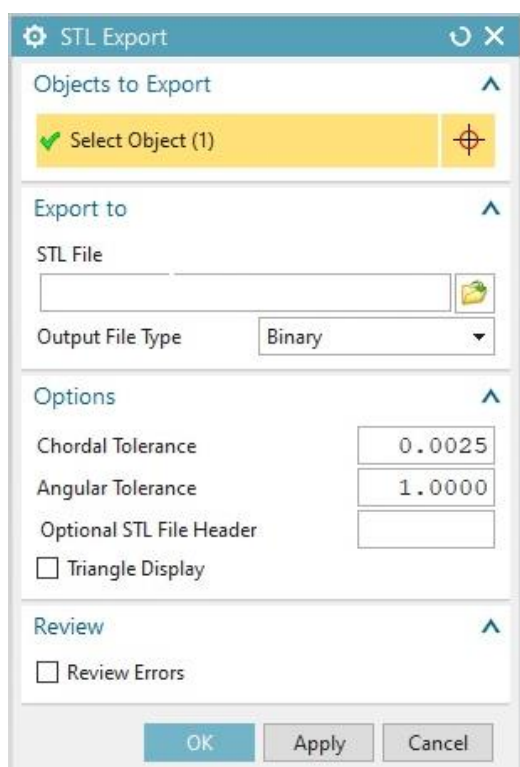


KUVA 5. Muut tulostettavat ja mallinnetut 3D-mallit.

## 4.2 3D-tulostin ja ohjelmisto

Suunnitellut kappaleet tulostettiin Creality-3D valmistamalla CR-10s FDM-tulostimella. Tulostimen laitevalmistaja on määrittänyt koneelle tulostustarkkuudeksi  $\pm 0,1$  mm (an-cadsolutions n.d.). Osien tulostamiseen käytettiin 1,75 mm paksuja PLA-filamentteja, joiden valmistajat ovat Eryone ja Geeetech.

3D-mallit muunnettiin STL tiedostomuotoon suunnitteluohjelmiston vientityökälulla. Vientityökälussa käytettiin kuvan 6 mukaisia asetuksia.



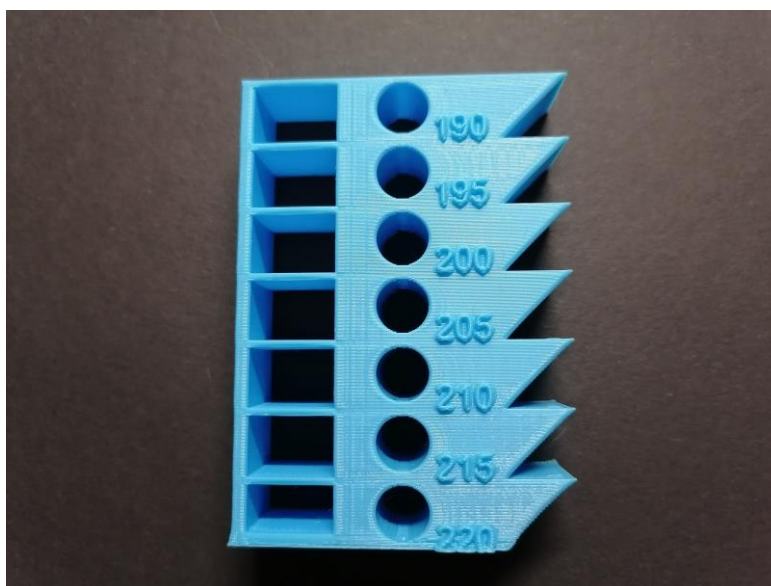
KUVA 6. STL viennin asetukset.

Tulostusohjelmana käytettiin PrusaSlicer ohjelmistoa, jolla STL tiedostot muunnettiin G-koodiksi. Ohjelmisto on Prusa Research 3D-laitevalmistajan tekemä versio Slic3r ohjelmistosta (PrusaSlicer n.d). Tulostuksessa käytettiin liitteen 1 mukaisia yleisiä asetuksia. Liitteen 1 asetuksista poiketen tulostuslämpötila valittiin erikseen filamentille parhaiten sopivaksi.

### 4.3 Osien tulostaminen

FDM-tulostuksen tarkkuuteen vaikuttaa tulostimen tarkkuuden lisäksi monet muutkin seikat kuten tulostusmateriaali, tulostusnopeus, jäähdytysparametrit, tulostusalustan lämpötila ja seinien lukumäärä (Hrițuc, A. et al. 2020). Näiden lisäksi tulostustarkkuuteen vaikuttaa myös vertikaalitason heittäily sekä filamentin paksuuden variaatiot (Hernandez, D. D. 2015). FDM-tulostuksen geometrisia tarkkuuksia voidaan kuitenkin ennakoida ja kompensoida (Boschetto, A. & Bottini, L. 2014).

Tulostaminen aloitettiin tulostamalla lämpötilatestitorni, jonka avulla tarkastettiin visuaalisesti filamentille sopivin lämpötila. Lämpötilatestitornin G-koodi saatiin Thingiverse nimisestä verkkopalvelusta, jonka osoite löytyy liitteestä 2. Sinisellä Geeetech PLA-filamentilla tulostettu lämpötilatestitorni kuvassa 7.



KUVA 7. Lämpötilatestitorni.

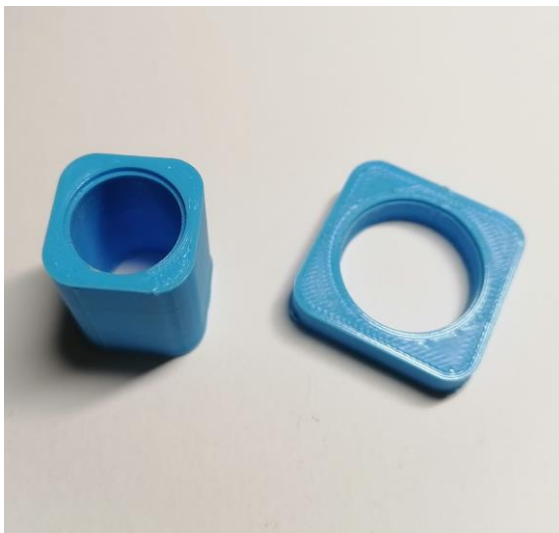
Optimaaliseksi valitun lämpötilan jälkeen tehtiin 3D-malli 20 mm korkeasta kuutiosta. Kuutio tulostettiin yksittäisellä ulkoreunalla ilman täyttöä, pohjaa ja kattoa. Onton kuution avulla mitattiin tulostuksen viivanleveyden oikea paksuus. Viivanleveydeksi asetettiin PrusaSlicer ohjelmistossa 0,45 mm ja se mitattiin tulostamisen jälkeen VIS merkkisellä työntömitalla, jonka tarkkuus on  $\pm 0,05$  mm. Mitatun viivanleveyden ollessa pienempi kuin asetettu, sitä kompensoitiin pursotuksen

kerroinasetuksella "Extrusion Multiplier". Kuvassa 8 on valkoisella Geeetech PLA-filamentilla tulostettu ontto kuutio.



KUVA 8. Valkoisella filamentilla tulostettu ontto kuutio.

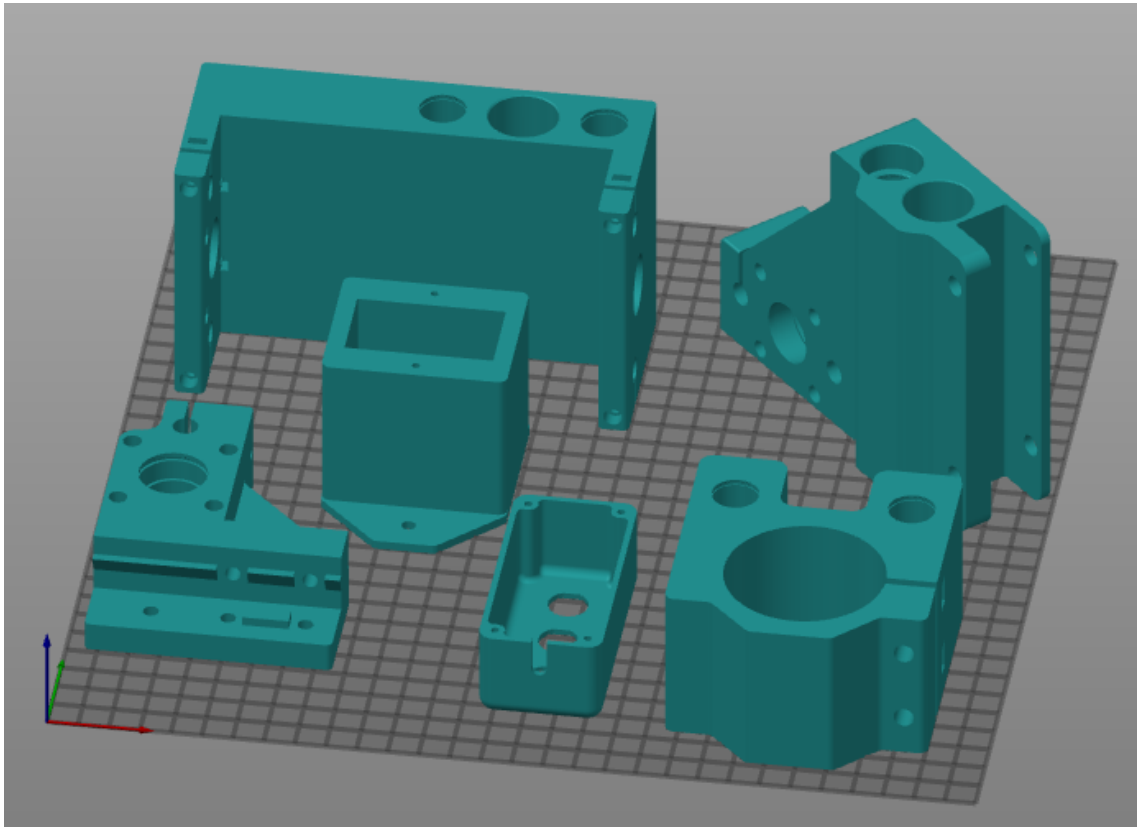
Tulosteisiin upotettaville laakereille tehtiin koetus-3D-mallit. Laakerien sovitusmallit tulostettiin ja niiden sisäpinnasta hiottiin pois tulostuksen kerroksenvaihdosta aiheutuva sauma. Rakentamisessa käytettäviä laakereita sovitettiin tulostettujen mallien sisään. Mallisovitteen ollessa liian ahdas, palattiin alkuperäiseen 3D-malliin ja suurennettiin reikäpiirrettä 0,1 mm kerrallaan ja tulostettiin uudelleen. Tulostusta jatkettiin, kunnes laakeri mahtui paikalleen pientä voimaa käyttämällä. Kuvassa 9 on laakerin sovitusmalli LM8UU ja 608ZZ laakereille.



KUVA 9. Laakerien koetustulosteet.

Laakerisovituksen omaaviin CNC-jyrsimen 3D-malleihin palattiin suunnitteluohjelmistolla ja laakerisovituksen halkaisija muutettiin samaksi kuin koetusmallissa. Nämä vaiheet suoritettiin uudelleen myös filamentin vaihdon yhteydessä.

Osat tulostettiin kuvan 10 mukaisessa Z-akselisuunnassa. Osien pitkät sivut asetettiin niin että ne tulostuivat tulostimen X-akselin liikkeellä.



KUVA 10. Tulosteiden suunta.

Kuvasta 10 poiketen, tulosteet tehtiin yksi kerrallaan. Osien tulostuksessa käytettiin 0,2 mm kerrospaksuutta, 3 kerroksisia seinämiä ja 60% kolmiokuvioista sisätäyttöä.

## 5 KOKOONPANO

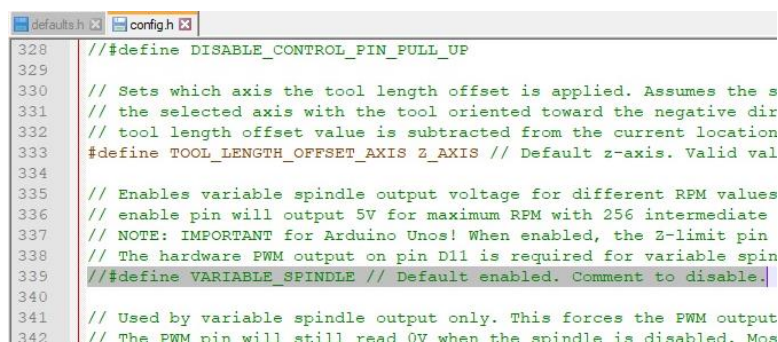
### 5.1 Osakokoonpano ja työkalut

CNC-jyrsin suunniteltiin vaiheittain kokoonpantavaksi. Ensimmäinen kokoonpanovaihe aloitettiin tekemällä liitteenä 3 olevien teknisten piirustuksen mukaiset pohjarungon osat. Pohjarungon osien työstön jälkeen niistä tehtiin liitteenä 3 olevan pohjarungon kokoonpanopiirustuksen mukainen kokoonpano.

Toisessa kokoonpanovaiheessa kokoonpantiin tulostetut osat. Tulostettujen osien reikäpiirteiden saumat hiottiin tasaisiksi ja trapetsikierretankojen muttereiden kiinnitysruuvien upotuksiin tehtiin kierteet M3-kierretapilla. Työstön jälkeen tulostetut osat kokoonpantiin liitteen 4 kokoonpanokuvien mukaisesti. Eroina kokoonpanokuvaan, Y- ja X-akselin vastakappaleisiin ei tulostettu askelmoottorien asennusreikiä.

### 5.2 Grbl-ohjelmisto ja elektroniikan kokoonpano

Elektroniikan kokoonpano aloitettiin asentamalla Grbl CNC -ohjainohjelmisto Arduino Uno R3 kehitysalustaan. Grbl ohjelmiston v1.1 ladattiin Grbl yhteisön GitHub sivustolta (GitHub<sup>1</sup> n.d). Ennen ohjelman lataamista Arduino Uno R3 kehitysalustaan muutettiin ladatun ohjelman config.h tiedoston karamoottorikäytön PWM ohjaus. Muutos tehtiin kuvan 11 mukaisesti, lisäämällä kaksi kenoviivaa komentorivin eteen.



```

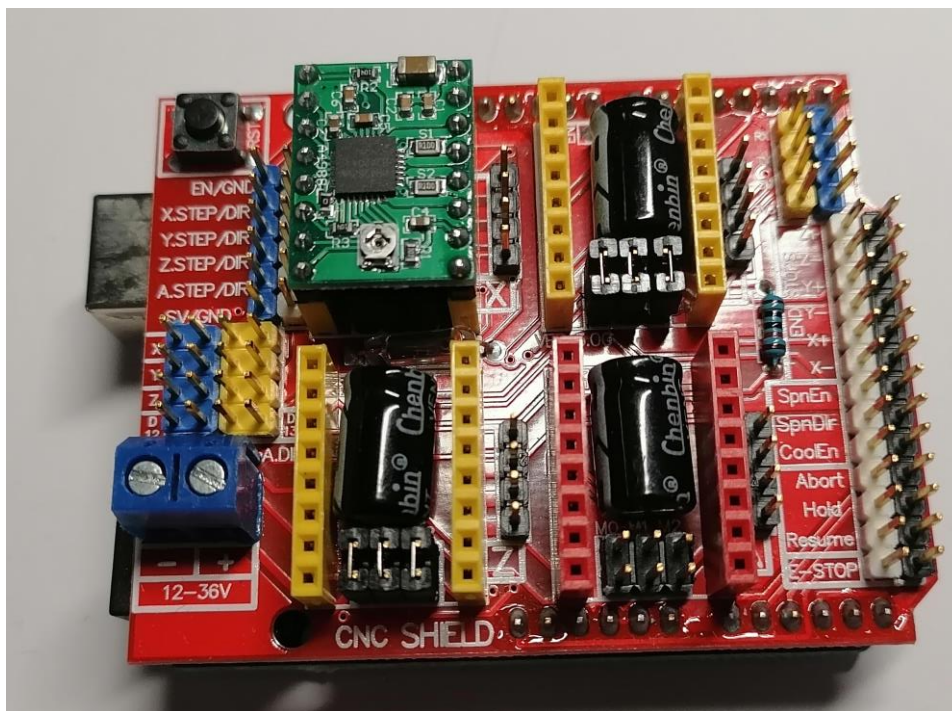
328 // #define DISABLE_CONTROL_PIN_PULL_UP
329
330 // Sets which axis the tool length offset is applied. Assumes the s
331 // the selected axis with the tool oriented toward the negative dir
332 // tool length offset value is subtracted from the current location
333 #define TOOL_LENGTH_OFFSET_AXIS Z_AXIS // Default z-axis. Valid val
334
335 // Enables variable spindle output voltage for different RPM values
336 // enable pin will output 5V for maximum RPM with 256 intermediate
337 // NOTE: IMPORTANT for Arduino Unos! When enabled, the Z-limit pin
338 // The hardware PWM output on pin D11 is required for variable spin
339 // #define VARIABLE_SPINDLE // Default enabled. Comment to disable.
340
341 // Used by variable spindle output only. This forces the PWM output
342 // The PWM pin will still read 0V when the spindle is disabled. Mos

```

KUVA 11. PWM-ohjauksen ohjelmamuutos

Muutoksen jälkeen ohjelma ladattiin Arduino Uno R3 kehitysalustaan käyttämällä Arduino IDE ohjelmistoa.

CNC-shield piirilevy asetettiin Arduino kehitysalustan päälle ja siihen liitettävät X ja Y ajurit konfiguroitiin hyppyliittimillä 1/16 askeleelle ja Z 1/8. 1/16 askeleen asettaminen tapahtui asettamalla hyppyliittimet piirilevyllä olevien X, Y ja Z ajuriliittimien välissä oleviin M0, M1 ja M2 liittimiin. Askelmoottorien ajurit asetettiin CNC-shield piirilevyn päällä X, Y ja Z merkittyihin liittimiin. Kuvassa 12 on askelmoottorin ajuri sekä hyppyliittimet asennettuna.



KUVA 12. CNC-shield, askelmoottorin ajuri ja hyppyliittimet.

Muu elektronikka liitettiin CNC-shield piirilevyllä liitteen 5 mukaisen kytkentäkaavion mukaan. Kyt kentöjen jälkeen säädettiin askelmoottorien ajureiden ohjausvirta oikeaksi kaavan 3 mukaisesti lasketulla  $V_{ref}$  arvolla.

$$V_{ref} = A_{motormax} \cdot 8 \cdot R_{sense} \quad (3)$$

Jossa  $V_{ref}$  on askelmoottorin ajurin potentiometrin keskipisteen ja maadoituspinnin välinen jännite,  $A_{motormax}$  on askelmoottoreille asetettu maksimivirta ja  $R_{sense}$  on askelmoottoriajurin piirilevyllä löytyvän S1 ja S2 resistorin vastusarvo. (e3d-online n.d.).

Askelmoottoriajurien S1 ja S2 vastusarvo oli 0,1 ohmia, jolloin kaavan 3 mukaisesti  $V_{ref}$  arvoksi saatiin:

$$1,5 \text{ A} \cdot 8 \cdot 0,1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1,2 \text{ V}$$

Asetusarvoksi asetettiin 10% pienempi kuin laskettu arvo, eli 1,1 V.

Elektronisten komponenttien toimivuus varmistettiin ajamalla moottoreita ja käynnistämällä ja sammuttamalla karamoottoria. Grbl ohjelmistolle myös asetettiin oikeat laiteparametrit. Laiteparametreihin kuului muun muassa kotipisteen, XYZ-akselien askeleita/mm -määrien ja akselien maksimiliikkumavarojen asettaminen (GitHub<sup>2</sup> n.d). Kuvassa 13 on oletusasetetut ja muutetut laiteparametrit vierekkäin.

[GC:G0 G54 G17 G21 G90 G94 M5 M9 T0 F0]	> \$\$
> \$\$	> \$\$
\$0=10	\$0=10
\$1=25	\$1=254
\$2=0	\$2=0
\$3=0	\$3=0
\$4=0	\$4=0
\$5=0	\$5=0
\$6=0	\$6=0
\$10=1	\$10=1
\$11=0.010	\$11=0.010
\$12=0.002	\$12=0.002
\$13=0	\$13=0
\$20=0	\$20=1
\$21=0	\$21=1
\$22=0	\$22=1
\$23=0	\$23=1
\$24=25.000	\$24=25.000
\$25=500.000	\$25=500.000
\$26=250	\$26=250
\$27=1.000	\$27=1.000
\$30=12000	\$30=12000
\$31=0	\$31=0
\$32=0	\$32=0
\$100=50.000	\$100=400.000
\$101=50.000	\$101=400.000
\$102=200.000	\$102=800.000
\$110=1000.000	\$110=2400.000
\$111=1000.000	\$111=2400.000
\$112=500.000	\$112=600.000
\$120=10.000	\$120=36.000
\$121=10.000	\$121=36.000
\$122=10.000	\$122=8.000
\$130=200.000	\$130=234.000
\$131=200.000	\$131=341.000
\$132=200.000	\$132=73.000

KUVA 13. oletusasetetut parametrit ja asetetut parametrit oikealla puolella.

Koettamiseen ja Grbl parametrien asettamiseen käytettiin bCNC GRBL CNC Command sender ohjelmistoa.



Parametrien asettamisessa tärkeimmässä roolissa oli oikean askelmäärän määrittäminen millimetriä kohden. Askelmäärä asetettiin ensin laskemalla todellinen askelmäärä X ja Y akselilta kaavan 4 avulla.

$$\frac{360^\circ}{M_{kulma}} \cdot \frac{Microstep}{T_{nousu}} \quad (4)$$

Jossa  $M_{kulma}$  on moottorin askelkulma,  $Microstep$  on askelmoottoriajuriin määritetty mikroaskelmäärä ja  $T_{nousu}$  on ruuvien nousu.

X ja Y akselille saadaan askelmääräksi millimetriä kohden kaavan 4 avulla.

$$\frac{360^\circ}{1,8^\circ} \cdot \frac{16 \text{ askelta}}{8 \text{ mm}} = 400 \frac{\text{askelta}}{\text{mm}}$$

ja vastaavasti Z akselille.

$$\frac{360^\circ}{1,8^\circ} \cdot \frac{8 \text{ askelta}}{2 \text{ mm}} = 800 \frac{\text{askelta}}{\text{mm}}$$

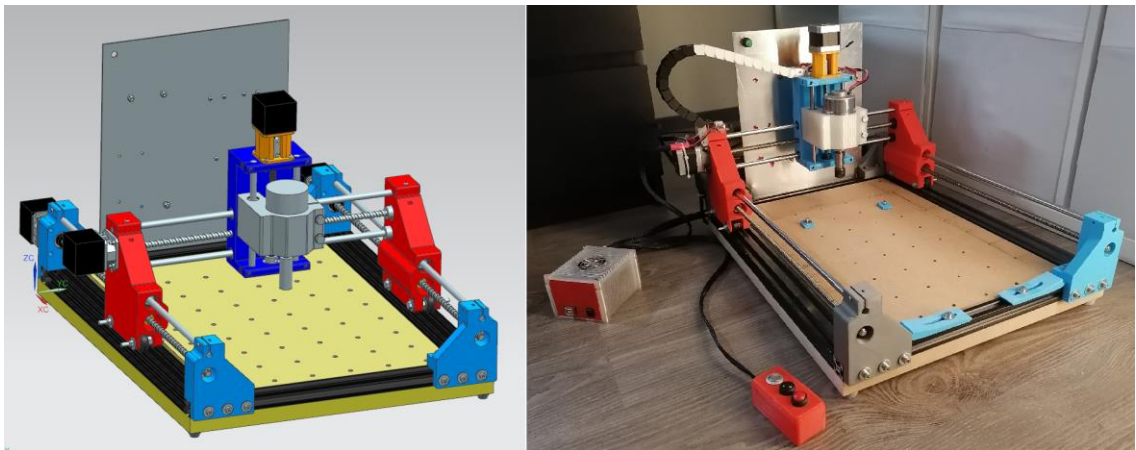
Arvoiksi asetettiin X ja Y akselille 400 ja Z akselille 800 askelta millimetriä kohden.

### 5.3 Kokoonpanon viimeistely

Sähköiset komponentit kiinnitettiin liitteenä 6 (3/4) olevan kuvan mukaisesti alumiinilevyyn. Elektroniikan kytkentään käytettiin askelmoottorien ja rajakatkaisijoiden mukana tulleita sähköjohtoja. Karamoottorin sähköistämiseen käytettiin 0,75 mm<sup>2</sup> laitejohtoa ja XT-60 liitintä.

Lopullinen kokoonpano suoritettiin liitteenä 6 olevien kokoonpanopiirustuksien mukaisesti. Suunnitteluvaiheessa ei otettu huomioon rajakatkaisijoiden sijainteja, joten ne asennettiin jälkikäteen kuumaliimaamalla jokainen sopivalle etäisyydelle akselin päätypaikasta.

Kokoonpanon lisäksi Arduino Uno R3 kehitysalustalle ja CNC-Shield yhdistelmälle tulostettiin kotelo, jossa on 40x40 mm tuuletinpaikka. Releelle ja jännitteenalentajille tulostettiin kiinnitysalustat ja filamentin ylijäämästä tulostettiin nivelletyn kaapelikourun osia. Verkko-osoitteet työssä käytettyihin thingiverse -palvelusta ladattuihin tulosteisiin löytyy liitteestä 2. Kuvassa 14 on näkyvillä 3D-malli ja rakennettu CNC-jyrsin vierekkäin. Kuvassa on myös näkyvillä sekä karamoottorille menevä nivelletty kaapelikouru että Arduino -kehitysalustalle tulostettu suojakotelo.



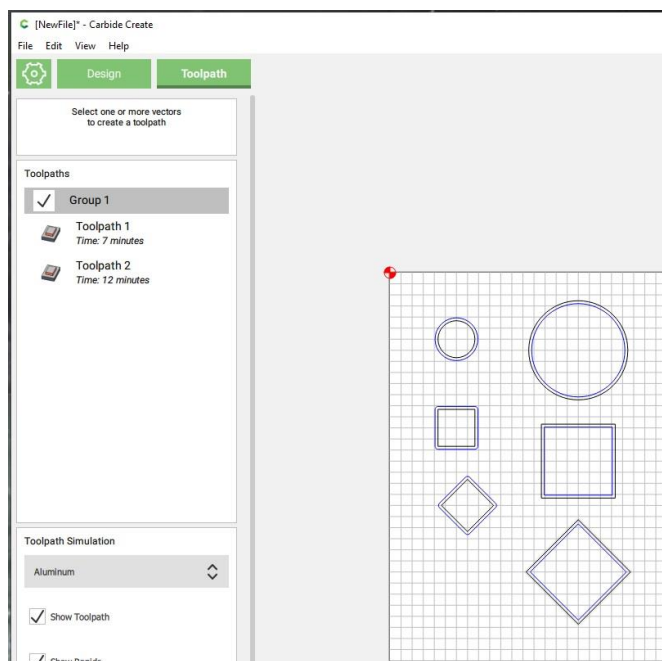
KUVA 14. 3D-malli kokoonpanosta ja rakennettu laite.

Liitteessä 7 on osalista kokoonpanossa käytetyistä komponenteista ja osista. Samassa liitteessä on myös lista rakentamisessa käytetyistä laitteista ja työkaluista.

## 6 LAITTEEN LOPPUTARKASTELU

### 6.1 Laitteen tarkkuuksien mittaus

Rakennetun CNC-jyrsimen työstötarkkuutta mitattiin tekemällä työstöohjelma käyttämällä Carbide Create CAM -ohjelmistoa. Työstöohjelmaan tehtiin neliön ja ympyrän muotoisia työstöratoja. Kuviot leikattiin akryylistä käyttämällä 0,5 mm leikkaussyvyyttä työkierron aikana. Työstöteränä käytettiin 3 mm paksua yksiteräistä yläleikkuuterää. Kuvassa 15 on Carbide Create ohjelmalla tehty työstörata.



KUVA 15. Carbide Create -koetyöstöohjelma.

Mittauksia tehtiin sekä neliö- että ympyrämuotojen halkaisijoista X ja Y suunnassa. Neliömuotoja asetettiin myös  $45^\circ$  kulmassa, jolloin saatiin yhdistetty X- ja Y-akselin työstötarkkuus mitattua.

Akryylintyöstön vastapainoksi tehtiin työstökoe myös 3 mm paksulle MDF-levylle. MDF-levystä leikattiin halkaisijaltaan 40 mm kokoisia ympyrän muotoisia levyjä ja sivumitaltaan 40 mm pituisia neliöitä.

Z-akselin työstötarkkuutta mitattiin työstämällä akryylilevyyn 1 mm syvä neliönmuotoinen ura. Neliön jokaiselta sivulta mitattiin urasyvyys.

Mittaukset suoritettiin käyttämällä VIS merkkistä työntömittaa, jolle valmistaja on määrittänyt tarkkuudeksi  $\pm 0,05$  mm. Tulokset taulukoitiin ja niiden perusteella pääteltiin laitteen työstötarkkuus.

## 6.2 Tarkkuusmittauksien tulokset

Alla on nähtävänä akryylistä koneistettujen kappaleiden mitat taulukoituna taulukkoon 4 Mitatuista arvoista laskettiin suurimmat erot ja taulukoitiin erikseen.

TAULUKKO 4. Työstettyjen kappaleiden mittaustulokset.

Akryylilevyn työstö	Määritetty X ja Y mitta mm	X-mitattu mm	Y-mitattu mm	X-ero mm	Y-ero mm
Neliö sisämitta	20*20	20	19,7	0	-0,3
Neliö ulkomitta	40*40	40	40,1	0	0,1
Ympyrä sisämitta	20	19,85	19,55	-0,15	-0,45
Ympyrä ulkomitta	53,66	53,8	53,6	0,14	-0,06
Vinoneliöt		sivu 1	sivu 2	erotus sivu 1	erotus sivu 2
Sisämitta	20*20	19,25	19,95	-0,75	-0,05
Ulkomitta	40*40	40,3	40,5	0,3	0,5
MDF-levystä työstetty					
Ympyrä sisämitta	40				
Leikkaus 1		39,95	39,8	-0,05	-0,2
Leikkaus 2		39,8	39,85	-0,2	-0,15
Leikkaus 3		39,95	39,8	-0,05	-0,2
Neliö sisämitta	40*40				
Leikkaus 1		39,95	39,85	-0,05	-0,15
Leikkaus 2		39,9	39,7	-0,1	-0,3
Leikkaus 3		39,9	39,7	-0,1	-0,3
X-max mm				-0,2	
Y-max mm					-0,45
Yhdistetty XY-max mm				-0,75	

Taulukon 4 arvojen perusteella ja lisäämällä mittalaitteen virhe tuloksiin voidaan laskea akseleiden työstötarkkuudet. X-akselin työstötarkkuudeksi saatiin  $\pm 0,25$  mm ja Y-akselin työstötarkkuudeksi saatiin  $\pm 0,5$  mm. Yhdistetty työstötarkkuus eli periaatteellinen laitteen työstötarkkuus on  $\pm 0,8$  mm.

Z-akselin työstötarkkuuden mittaustulokset ovat nähtävänä taulukossa 5. Taulukoon laskettiin mitan erot ja suurin ero taulukoitiin erikseen maksimiarvona.

TAULUKKO 5. Z-akselin työstötarkkuuden mittaustulokset

Z-akselin työstömittaus	määritetty Z-mitta mm	mitattu mitta mm	Mitan erotus
Neliön sivu 1	1	0,85	-0,15
Neliön sivu 2	1	0,7	-0,3
Neliön sivu 3	1	0,65	-0,35
Neliön sivu 4	1	1,55	0,55
Z-max mm			0,55

Taulukon 5 arvojen perusteella ja lisäämällä mittalaitteen virhe, saadaan Z-akselin työstötarkkuudeksi  $\pm 0,6$  mm.

### 6.3 Ongelmat ja niiden korjaus

Testauksen aikana huomattiin, että laitteen karamoottori nousi tai laski työkappaleessa Y-akseliliikkeen aikana. Syyksi rajattiin rakenteen joustavuus X-akselilla. Rakennemuutosta ei kuitenkaan tehty tämän työn puitteissa. Tämä ongelma aiheutti suuren eron työstötarkkuuksissa. Ongelmaa kompensoitiin pienentämällä työkierron Z-akselin työstösyvyyttä.

Ongelmia aiheuttivat myös rajakatkaisijat. Rajakatkaisijoiden vikatilaa syyksi selvitettiin askelmoottoreiden kaapeleista rajakatkaisijoiden kaapeleihin indusoituva häiriö. Häiriö saatiin poistettua rakentamalla rajakatkaisijoille elektroninen piiri optoerottimien avulla. Optoerottimille rakennettu piirilevy liitettiin Arduino kehitysalustaan mahdollisimman lyhyillä johtimilla indusoituvien häiriöiden välttämiseksi.

Akryylin työstämiseen oli vaikea löytää sopivia työstöarvoja ja se aiheutti terien tukkeutumista sekä huonoa työstöjälkeä. Työstöarvoja säätämällä onnistuttiin löytämään käytettäville akryylilevyille sopivat työstöarvot.

#### **6.4 Vaatimusmäärittysten tarkastaminen**

Vaatimusmäärittelyihin palattiin laitteen testauksen ja tulosten jälkeen. Saatujen tuloksien perusteella tehtiin johtopäätökset vaatimusmäärittelyiden täyttymiseksi.

CNC-jyrsinkoneesta saatiin rakennettua niin yksinkertainen kuin CNC-jyrsimestä voidaan saada. Käyttöliittymänä koneessa on vain 3 käyttönappia. Jyrsintä ohjataan muuten tietokoneohjelman kautta, lähettämällä työstöarvoja G-koodina.

Jyrsinkoneen budjetti oli 1000 €. Laitteen rakentamiseen kului noin 350 € ja 3D-tulostinlaitteeseen 420 €. Loput budjetista käytettiin rakentamisessa käytettyihin työkaluihin. Laitteen käyttämiseen ja työstöarvojen ohjelmointiin käytettiin ilmaisia vapaasti saatavilla olevia sovelluksia. Ohjaavan tietokoneen hintaa ei otettu huomioon budjetoinnissa.

Jyrsinkoneen lopulliseksi painoksi muodostui 13 kilogrammaa. Jyrsinkoneeksi laite on todella kevyt ja se on helposti siirrettävissä. Laitteen lopulliseksi mitoiksi muodostui 500x600x340 mm leveys, syvyys ja korkeus suunnissa.

Jyrsinkoneen osat saatiin suunniteltua ja tulostettua 3D-tulostimella. 3D-tulostamisen ansiosta jyrsinkoneeseen on helppo tehdä muutoksia ja lisäosia 3D-tulostamalla

Jyrsinkoneella voidaan kaivertaa ja koneistaa akryylilevyjä, alle  $\pm 1$  mm tarkkuudella. Tarkkuus ja työstöala riittävät siihen mihin jyrsinkone suunniteltiin. Lopulliseksi työstöalaksi muodostui A4-kokoinen alue.

## 6.5 Laiteturvallisuus

Laiteturvallisuus on hyvin tärkeä osa koneenrakennusta. Konedirektiivin mukaisesti valmistaja on vastuussa toimittamastaan laitteesta ja sen turvallisuudesta. Tässä työssä valmistettu CNC-jyrsin on kokeellinen kappale, eikä se tule kaupallisesti saataville.

CNC-jyrsimen rakentamisen yhteydessä tehtiin riskiarviointia koneen riskeistä ja vaaroista. Riskien arviointiin käytettiin taulukointia. Tässä arviotiin riskin vakavuus ja tehtiin toimintaehdotus millä riski voidaan minimoida tai poistaa kokonaan. Riskit taulukoituna ehkäisyehdotuksineen taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Riskien kartoitus ja ehkäisy

Havaittu riski:	Lisäselite:	Riskin taso:	Ehkäisyehdotus:
Silmävamma	Työstökappaleesta suurella nopeudella irtoavia muoviosia	Korkea.	Suojalasien käyttö ehkäisee silmävamman mahdollisuutta.
Viiltovamma	Terävä työstöterä, joka pyörii suurella nopeudella.	Matala.	Moottorin sammutus ja viiltosuoja hanskojen käyttö teriä vaihtaessa ehkäisee viiltovammoilta.
Puristumisvaara	Liikkuvien akseleiden välejä ei ole suojattu.	Keskitaso.	Laitteen päälle ei saa nojata tai koskea sen ollessa toiminnassa.
Sähköiskunvaara	Kytkenälevyn takaosa on avoin tuuletuksen maksimoimiseksi.	Matala.	Sähköisiin komponentteihin koskeminen laitteen ollessa kytkettynä tulee välttää.
Palovamma	Moottorit kuumenevat käytön aikana.	Matala.	Laitteen moottori osiin koskemista tulee välttää sen ollessa käynnissä ja sen jälkeen.
Pölyn / ilmapartikkelien vaara	Tiettyjen työstömateriaalien kanssa saattaa syntyä ilmapartikkeleita, jotka kulkeutuvat hengityselimiin.	Matala.	Työstettäessä ilmaan partikkeleita syntyviä materiaaleja tulee käyttää kasvomaskia.



## 7 POHDINTA JA KEHITYSEHDOTUKSET

Työn pohjalta rakennettu laite täytti vaatimusmäärittelyt onnistuneesti. Kuten oli odotettavissa, laite ei ollut niin tarkka kuin mitä alun perin oli suunniteltu. Laitteessa on vielä kehitettävää, kuten X-akseliston lineaarijohteiden jäykistäminen, kappalejäähdyttimen kehittäminen, leikkuujäteimurin kehittäminen ja karamootorille kierroslukumittarin rakentaminen.

Tutkimuskohteena ollut FDM-tulostaminen on hyvä ja edullinen keino tuottaa osia pieneen CNC-jyrsimeen. FDM-tulostamalla on mahdollista tuottaa tarkkoja tulosteita, kun huomioidaan lukuisista tekijöistä aiheutuvat mittavirheet.

Jatkotutkittavaa FDM-tulostamisen tarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä on paljon. Työn aikana pohdintaa aiheutti mahdollisten eri filamenttimateriaalien, eri tulostusohjelmistojen ja tulostuslaitteiden yksilöllisyyden vaikutusta mittavirheisiin. Lisäksi uusia ja seostettuja filamenttimateriaaleja saapuu markkinoille jatkuvasti. Uusista materiaaleista saattaa löytyä lujempia, rasitusta enemmän kestäviä ja helpommin tulostettavia filamentteja, kuin työssä käytetty PLA-muovi.

## LÄHTEET

- 3D-Simplify. n.d. Ultimate 3D Printing Material Properties Table. Luettu 10.6.2020. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- An-cadsolutions.fi n.d. Creality CR-10s-3D-tulostin tuotesivu. Luettu 16.6.2020. <https://www.an-cadsolutions.fi/tuote/creality-cr-10s-3d-tulostin/>
- Amazon: Tuotesivu n.d. Usongshine Stepper Motor Nema 17. Luettu 10.6.2020. [https://www.amazon.de/gp/product/B07MT8D8ZV/ref=ppx\\_od\\_dt\\_b\\_asin\\_title\\_s00?ie=UTF8&psc=1](https://www.amazon.de/gp/product/B07MT8D8ZV/ref=ppx_od_dt_b_asin_title_s00?ie=UTF8&psc=1)
- Bartnik, N. n.d. DIY 3D Printed Dremel CNC :21 Steps – Instructables. Luettu 10.6.2020. <https://www.instructables.com/id/DIY-3D-Printed-Dremel-CNC/>
- Boschetto, A. & Bottini, L. (2014) Accuracy prediction in fused deposition modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/153crqv/springer\\_jour10.1007%252Fs00170-014-5886-4](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/153crqv/springer_jour10.1007%252Fs00170-014-5886-4)
- E3D-Online n.d. VREF adjustment A4988. Luettu 18.6.2020. <https://e3d-online.dozuki.com/Guide/VREF+adjustment+A4988/92>
- Fritz, C., MacCleery, B., Gutierrez, J., Walter, T. 1.2.2011. Machine Design Guide. Luettu 27.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://lumen.ni.com/nicif/us/in-fomachinedesign/content.xhtml>
- GitHub. n.d. Grbl CNC Controller. Luettu 17.6.2020. <https://github.com/grbl>
- GitHub. n.d. Grbl v1.1 Configuration. Luettu 17.6.2020. <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Grbl-v1.1-Configuration>
- Hernandez, D. D. (2015). Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing. <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2015.1085>
- Hrițuc, A. et al. (2020) Accuracy of Polylactide Parts Made by 3D Printing. Macromolecular Symposia. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/153crqv/wj10.1002%252Fmasy.201900064n/a-n/a.](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/153crqv/wj10.1002%252Fmasy.201900064n/a-n/a.)
- Pololu. n.d. A4988 Stepper motor Driver Carrier. Luettu 18.6.2020. <https://www.pololu.com/product/1182>
- PrusaSlicer. n.d. PrusaSlicer – Prusa3D. Luettu 27.5.2020. <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2016. Tekniikan kaavasto. 16. painos. Porvoo: Bookwell Oy
- Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkirja. 21. painos. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.

**LIITTEET**

## Liite 1. PrusaSlicer Asetukset

1(5)

```

# generated by PrusaSlicer 2.0.0+win64 on 2020-06-04 at 13:29:23
bed_temperature = 63
bridge_fan_speed = 90
compatible_printers =
compatible_printers_condition =
compatible_prints =
compatible_prints_condition =
cooling = 1
disable_fan_first_layers = 3
end_filament_gcode = "; Filament-specific end gcode \n;END gcode for fila-
ment\n"
extrusion_multiplier = 1
fan_always_on = 1
fan_below_layer_time = 120
filament_colour = #29B2B2
filament_cooling_final_speed = 3.4
filament_cooling_initial_speed = 2.2
filament_cooling_moves = 4
filament_cost = 0
filament_density = 1.24
filament_diameter = 1.75
filament_load_time = 0
filament_loading_speed = 28
filament_loading_speed_start = 3
filament_max_volumetric_speed = 0
filament_minimal_purge_on_wipe_tower = 15
filament_notes = ""
filament_ramming_parameters = "120 100 6.6 6.8 7.2 7.6 7.9 8.2 8.7 9.4 9.9 10.0|
0.05 6.6 0.45 6.8 0.95 7.8 1.45 8.3 1.95 9.7 2.45 10 2.95 7.6 3.45 7.6 3.95 7.6
4.45 7.6 4.95 7.6"
filament_settings_id = ""
filament_soluble = 0
filament_toolchange_delay = 0
filament_type = PLA
filament_unload_time = 0
filament_unloading_speed = 90
filament_unloading_speed_start = 100
first_layer_bed_temperature = 65
first_layer_temperature = 210
inherits =
max_fan_speed = 85
min_fan_speed = 70
min_print_speed = 20
slowdown_below_layer_time = 5
start_filament_gcode = "; Filament gcode\n"
temperature = 205

```

2(5)

```
# generated by PrusaSlicer 2.0.0+win64 on 2020-04-06 at 08:44:40
avoid_crossing_perimeters = 0
bottom_fill_pattern = rectilinear
bottom_solid_layers = 3
bridge_acceleration = 0
bridge_angle = 0
bridge_flow_ratio = 1
bridge_speed = 60
brim_width = 0
clip_multipart_objects = 0
compatible_printers =
compatible_printers_condition =
complete_objects = 0
default_acceleration = 0
dont_support_bridges = 0
elefant_foot_compensation = 0
ensure_vertical_shell_thickness = 0
external_perimeter_extrusion_width = 0.45
external_perimeter_speed = 35
external_perimeters_first = 0
extra_perimeters = 1
extruder_clearance_height = 20
extruder_clearance_radius = 20
extrusion_width = 0.45
fill_angle = 45
fill_density = 20%
fill_pattern = triangles
first_layer_acceleration = 0
first_layer_extrusion_width = 0.45
first_layer_height = 0.2
first_layer_speed = 70%
gap_fill_speed = 20
gcode_comments = 0
gcode_label_objects = 0
infill_acceleration = 0
infill_every_layers = 1
infill_extruder = 1
infill_extrusion_width = 0.45
infill_first = 0
infill_only_where_needed = 0
infill_overlap = 25%
infill_speed = 65
inherits =
interface_shells = 0
layer_height = 0.2
max_print_speed = 80
max_volumetric_speed = 0
min_skirt_length = 0
notes =
only_retract_when_crossing_perimeters = 1
ooze_prevention = 0
```

```
output_filename_format = [input_filename_base].gcode
overhangs = 1
perimeter_acceleration = 0
perimeter_extruder = 1
perimeter_extrusion_width = 0.45
perimeter_speed = 50
perimeters = 3
post_process =
print_settings_id =
raft_layers = 0
resolution = 0
seam_position = aligned
single_extruder_multi_material_priming = 1
skirt_distance = 1
skirt_height = 1
skirts = 3
slice_closing_radius = 0.049
small_perimeter_speed = 20
solid_infill_below_area = 70
solid_infill_every_layers = 0
solid_infill_extruder = 1
solid_infill_extrusion_width = 0.45
solid_infill_speed = 40
spiral_vase = 0
standby_temperature_delta = -5
support_material = 1
support_material_angle = 0
support_material_auto = 1
support_material_buildplate_only = 0
support_material_contact_distance = 0.1
support_material_enforce_layers = 0
support_material_extruder = 1
support_material_extrusion_width = 0.35
support_material_interface_contact_loops = 0
support_material_interface_extruder = 1
support_material_interface_layers = 2
support_material_interface_spacing = 0.4
support_material_interface_speed = 100%
support_material_pattern = rectilinear
support_material_spacing = 2
support_material_speed = 70
support_material_synchronize_layers = 0
support_material_threshold = 45
support_material_with_sheath = 0
support_material_xy_spacing = 1
thin_walls = 1
threads = 4
top_fill_pattern = rectilinear
top_infill_extrusion_width = 0.4
top_solid_infill_speed = 40
top_solid_layers = 3
travel_speed = 120
```

3(5)

4(5)

```

wipe_tower = 0
wipe_tower_bridging = 10
wipe_tower_rotation_angle = 0
wipe_tower_width = 60
wipe_tower_x = 180
wipe_tower_y = 140
xy_size_compensation = 0

# generated by PrusaSlicer 2.0.0+win64 on 2019-08-25 at 14:21:23
bed_shape = 0x0,300x0,300x300,0x300
before_layer_gcode =
between_objects_gcode =
cooling_tube_length = 5
cooling_tube_retraction = 91.5
default_filament_profile = ""
default_print_profile =
deretract_speed = 0
end_gcode = M104 S0 ; turn off extruder\nM140 S0 ; turn off bed\nG1 X0 Y300
F1000 ; move finished print out front\nM84 ; disable motors\nM106 S0 ; turn off
cooling fan\n\n; play song\n;M300 S294 P200 ;D4: 294\n;M300 S588 P200 ;D5:
588\n;M300 S440 P200 ;A4: 440\n;M300 S392 P200 ;G4: 392\n;M300 S784
P200 ;G5: 784\n;M300 S440 P200 ;A4: 440\n;M300 S740 P200 ;F#5:
740\n;M300 S440 P200 ;A4: 440\nM117 Print Complete!!\n\n; Default S3D CR-
10 Ending Script\n; G28 X0 ; home x axis\n; M106 S0 ; turn off cooling fan\n;
M104 S0 ; turn off extruder\n; M140 S0 ; turn off bed\n; M84 ; disable motors\n
extra_loading_move = -2
extruder_colour = ""
extruder_offset = 0x0
gcode_flavor = marlin
high_current_on_filament_swap = 0
host_type = octoprint
inherits =
layer_gcode =
machine_max_acceleration_e = 5000,5000
machine_max_acceleration_extruding = 750,1250
machine_max_acceleration_retracting = 500,1250
machine_max_acceleration_x = 1000,1000
machine_max_acceleration_y = 1000,1000
machine_max_acceleration_z = 100,200
machine_max_feedrate_e = 50,120
machine_max_feedrate_x = 200,200
machine_max_feedrate_y = 200,200
machine_max_feedrate_z = 12,12
machine_max_jerk_e = 5,2.5
machine_max_jerk_x = 9,10
machine_max_jerk_y = 9,10
machine_max_jerk_z = 0.4,0.4
machine_min_extruding_rate = 0,0
machine_min_travel_rate = 0,0
max_layer_height = 0
max_print_height = 400
min_layer_height = 0.04

```

5(5)

```
nozzle_diameter = 0.4
parking_pos_retraction = 92
print_host =
printer_model =
printer_notes =
printer_settings_id =
printer_technology = FFF
printer_variant =
printer_vendor =
printhost_apikey =
printhost_cafile =
remaining_times = 0
retract_before_travel = 2
retract_before_wipe = 0%
retract_layer_change = 0
retract_length = 5.5
retract_length_toolchange = 10
retract_lift = 0.12
retract_lift_above = 0
retract_lift_below = 0
retract_restart_extra = 0
retract_restart_extra_toolchange = 0
retract_speed = 45
serial_port =
serial_speed = 250000
silent_mode = 0
single_extruder_multi_material = 0
start_gcode = M117 Here We Go!!!\nG28 ; home all axes\nM117 Purging Ex-
truder...\nG1 Z1.0 F3000 ; lift Z\nG1 X0.2 Y25 Z0.2 F3000.0 ; move to start-line
position\nG92 E0 ; reset extruder\nG1 X0.2 Y150.0 F1000.0 E15 ; draw 1st
line\nG1 X0.7 Y150.0 F3000.0 ; move to side 0.5mm\nG1 X0.7 Y50 F1000.0
E30 ; draw 2nd line\nG1 X0.7 Y25 F5000.0 ; quick wipe\nM117 Printing...\n\n;
Default S3D CR-10 Startup\n; G28 ; home all axes\n; G1 Z5 F3000 ; lift\n; G1
X20 Y2 F1500 ; avoid binder clips\n; G1 Z0.2 F3000 ; get ready to prime\n; G92
E0 ; reset extrusion distance\n; G1 X120 E10 F600 ; prime nozzle\n; G1 X150
F5000 ; quick wipe\n
toolchange_gcode =
use_firmware_retraction = 0
use_relative_e_distances = 0
use_volumetric_e = 0
variable_layer_height = 1
wipe = 0
z_offset = 0
```

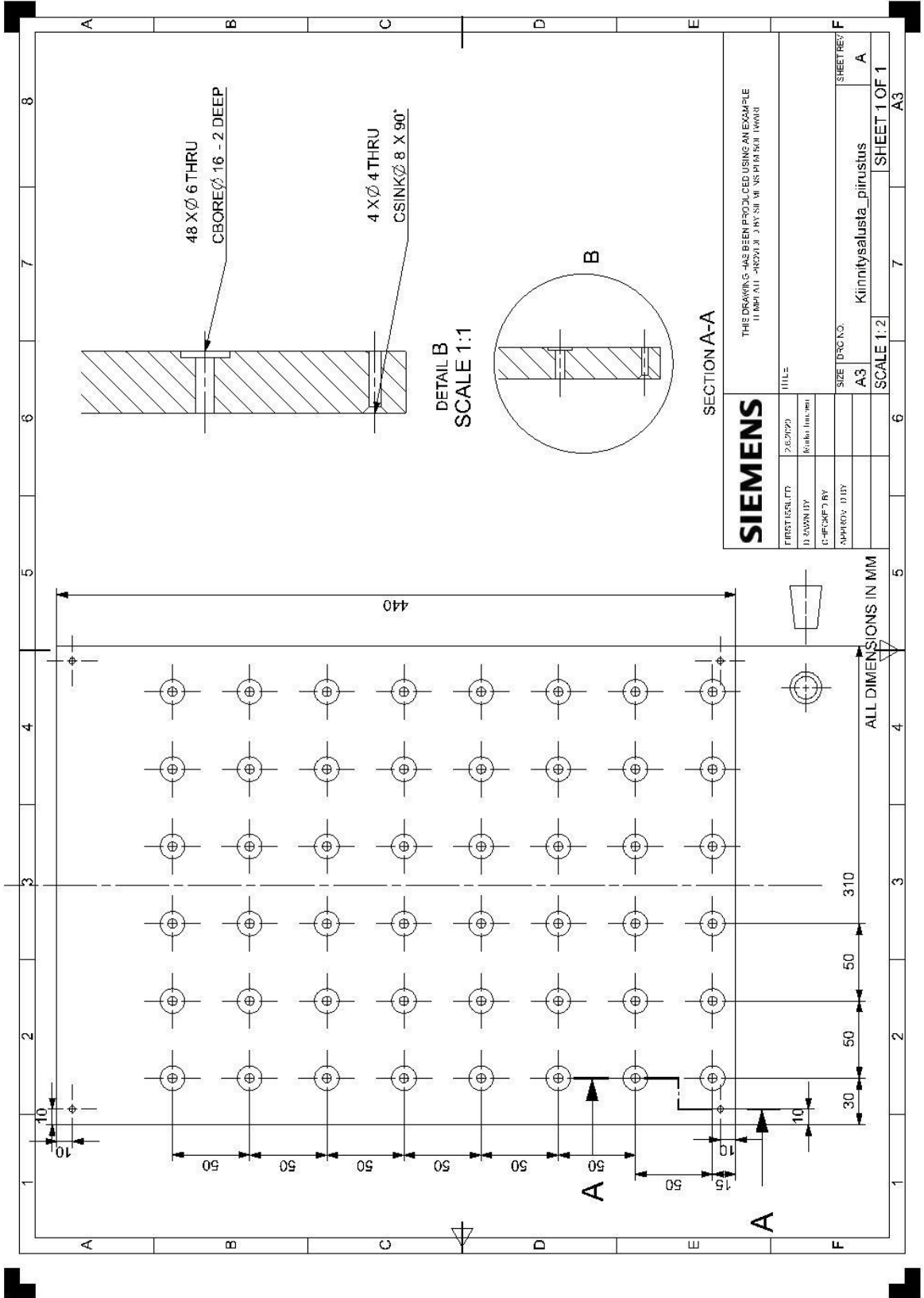
## Liite 2. Tulostettavien osien linkkilista

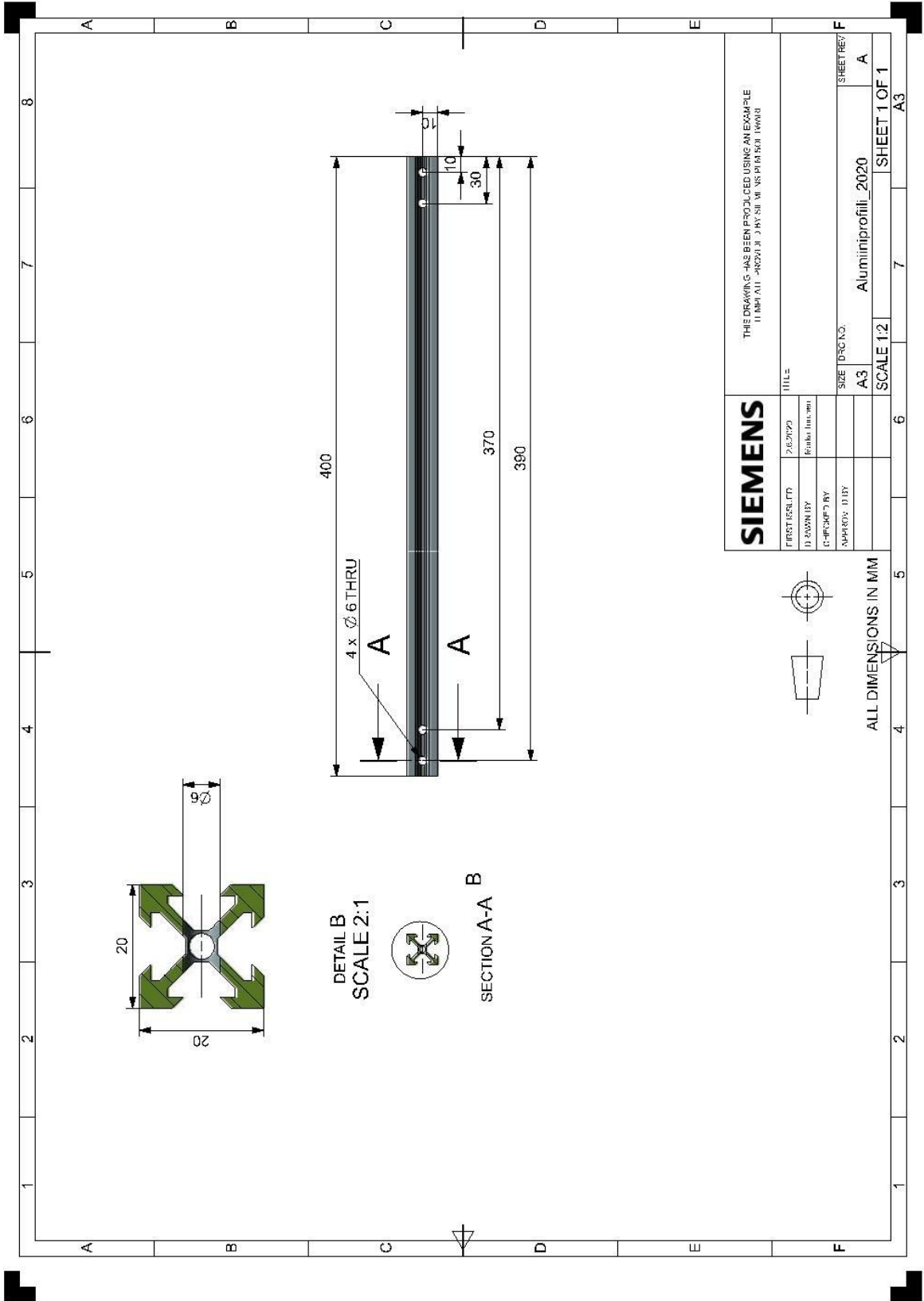
1

Tulostettavien osien linkkilista
Lämpötilatestitorni
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:2776323/files">https://www.thingiverse.com/thing:2776323/files</a>
nivelletty kaapelikouru
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:11978">https://www.thingiverse.com/thing:11978</a>
Jännitealentajan kiinnitysalusta
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:2156429">https://www.thingiverse.com/thing:2156429</a>
Releen kiinnitysalusta
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:2536646">https://www.thingiverse.com/thing:2536646</a>
Arduino + CNC shield kotelo
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:2807485">https://www.thingiverse.com/thing:2807485</a>
Tulostimen kalibroinnin apuvälineet
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:5573">https://www.thingiverse.com/thing:5573</a>
Suunnitellut 3D-tulostettavat osat STL muodossa
<a href="https://www.dropbox.com/sh/4ssp69qmzibgeu0/AABExF5So_eLwOid8HiP0xppa?dl=0">https://www.dropbox.com/sh/4ssp69qmzibgeu0/AABExF5So_eLwOid8HiP0xppa?dl=0</a>
Kappaleiden kiinnittämisen kiinnikkeet
<a href="https://www.thingiverse.com/thing:2127535">https://www.thingiverse.com/thing:2127535</a>







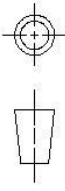


DETAIL B  
SCALE 2:1



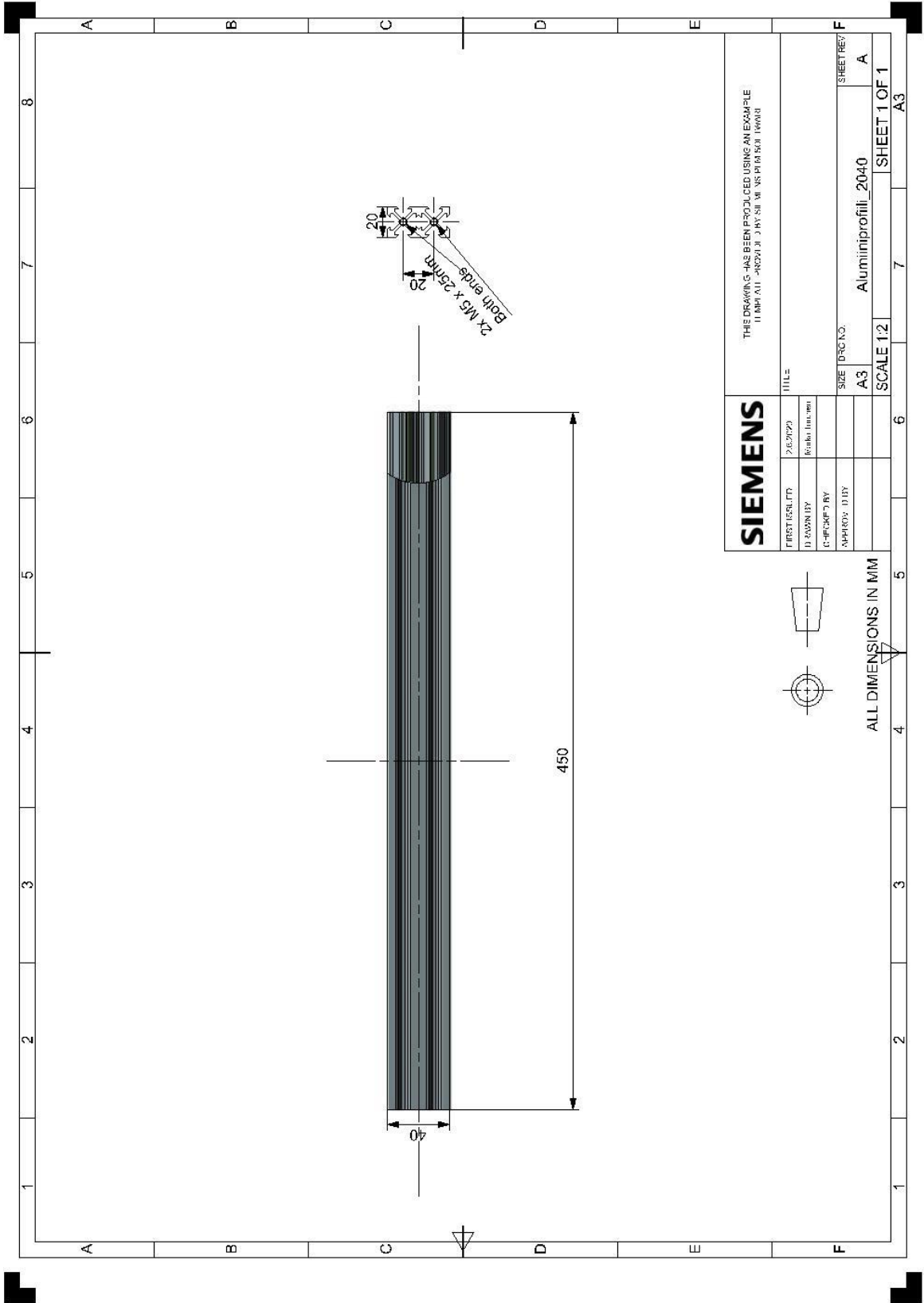
SECTION A-A

<b>SIEMENS</b>		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE FILE: A11 - R2020.01 - KY-SH-WR-PLM-FOR-10013	
FIRST RESULT	DATE	TITLE	
DRAWN BY	DATE		
CHECKED BY			
APPROVED BY			
		SIZE (Dwg. No.)	A3
			Aluminiprofil_2020
			SHEET 1 OF 1
		SCALE	1:2

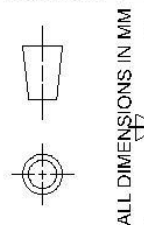


ALL DIMENSIONS IN MM

4(5)

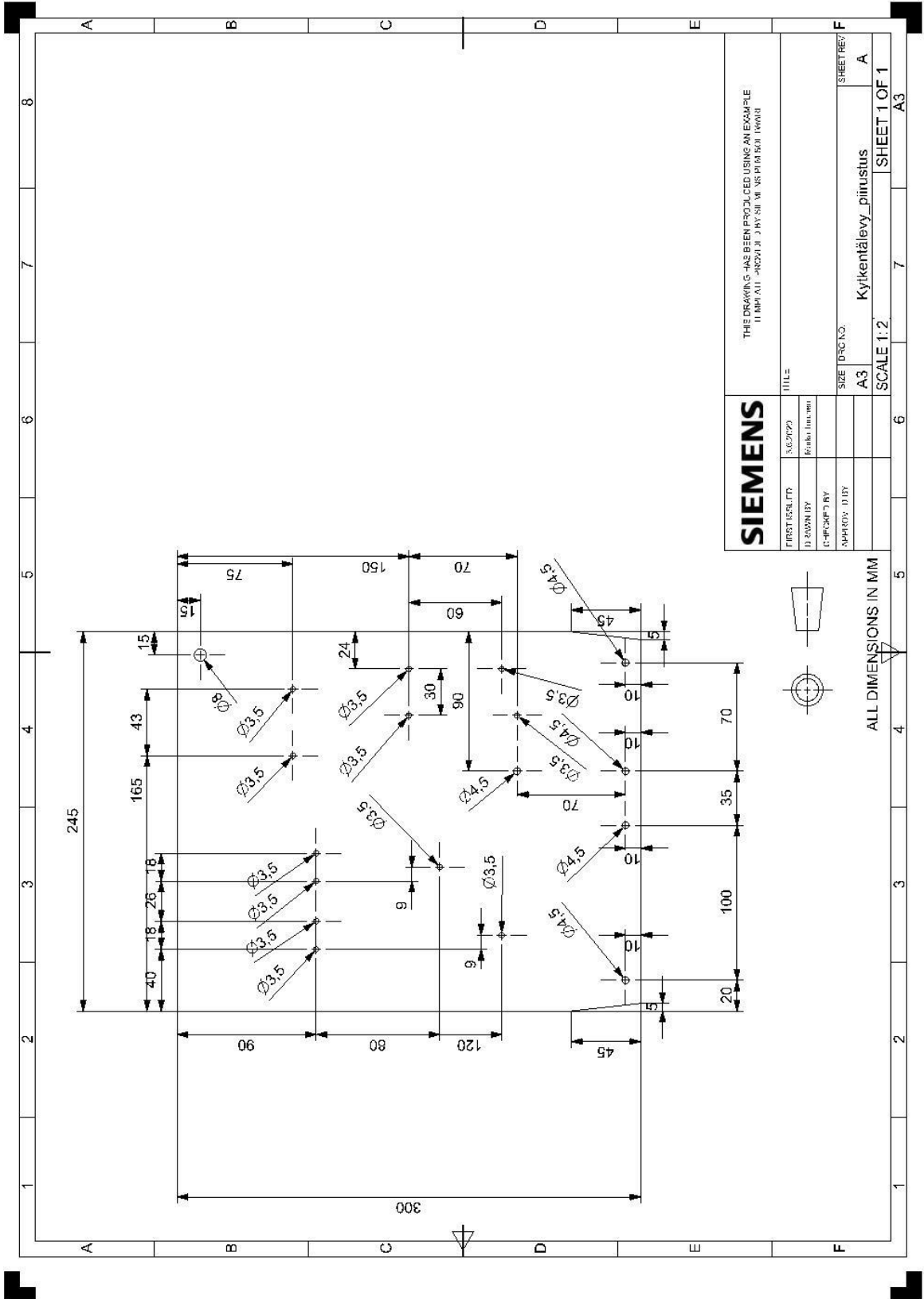


<b>SIEMENS</b>		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE FILE: A11 - R2021.01 - RY-SH-W-R-PM-501-100131	
FIRST RESULT DRAWN BY CHECKED BY APPROV. ID BY	DATE Revised Date	TITLE	SIZE / DRG. NO.
			A3
		Aluminiprofil: 2040	SCALE 1:2
			SHEET 1 OF 1



ALL DIMENSIONS IN MM

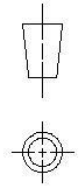
6	7	A3
1	2	3
4	5	6
7	8	



**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE  
FILE: A11 - PC201.B - KY.S11.WR.P1M.SCL.MW013

DATE	TITLE
DESIGNED BY Rouko Juntunen	
CHECKED BY	
APPROVED BY	
SIZE (DRC NO.)	A3
	Kytiketäulevy_piirustus
	SCALE 1:2
	SHEET 1 OF 1



ALL DIMENSIONS IN MM

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

SHEETREVI  
A

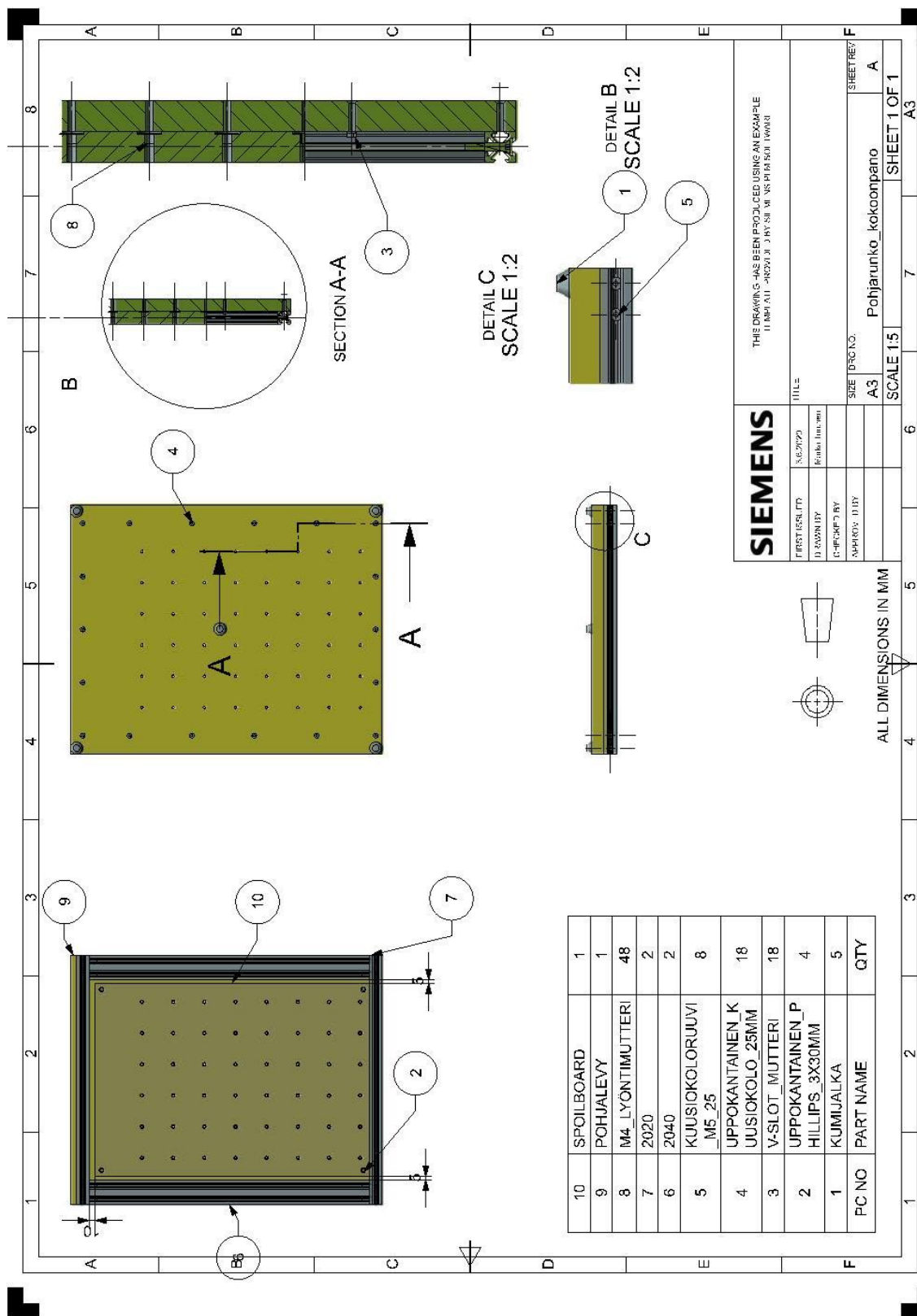
SHEETREVI  
A

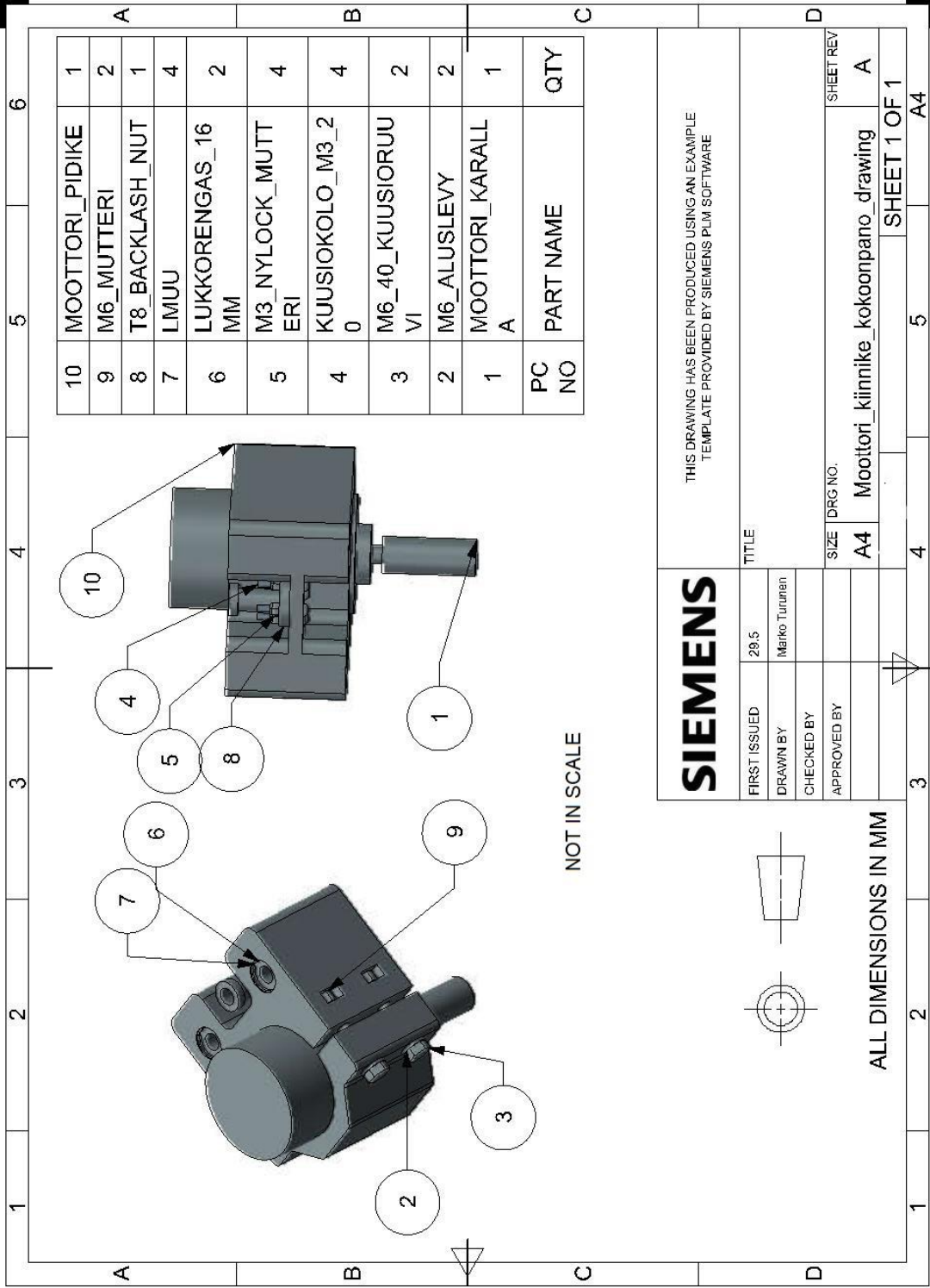
SHEETREVI  
A

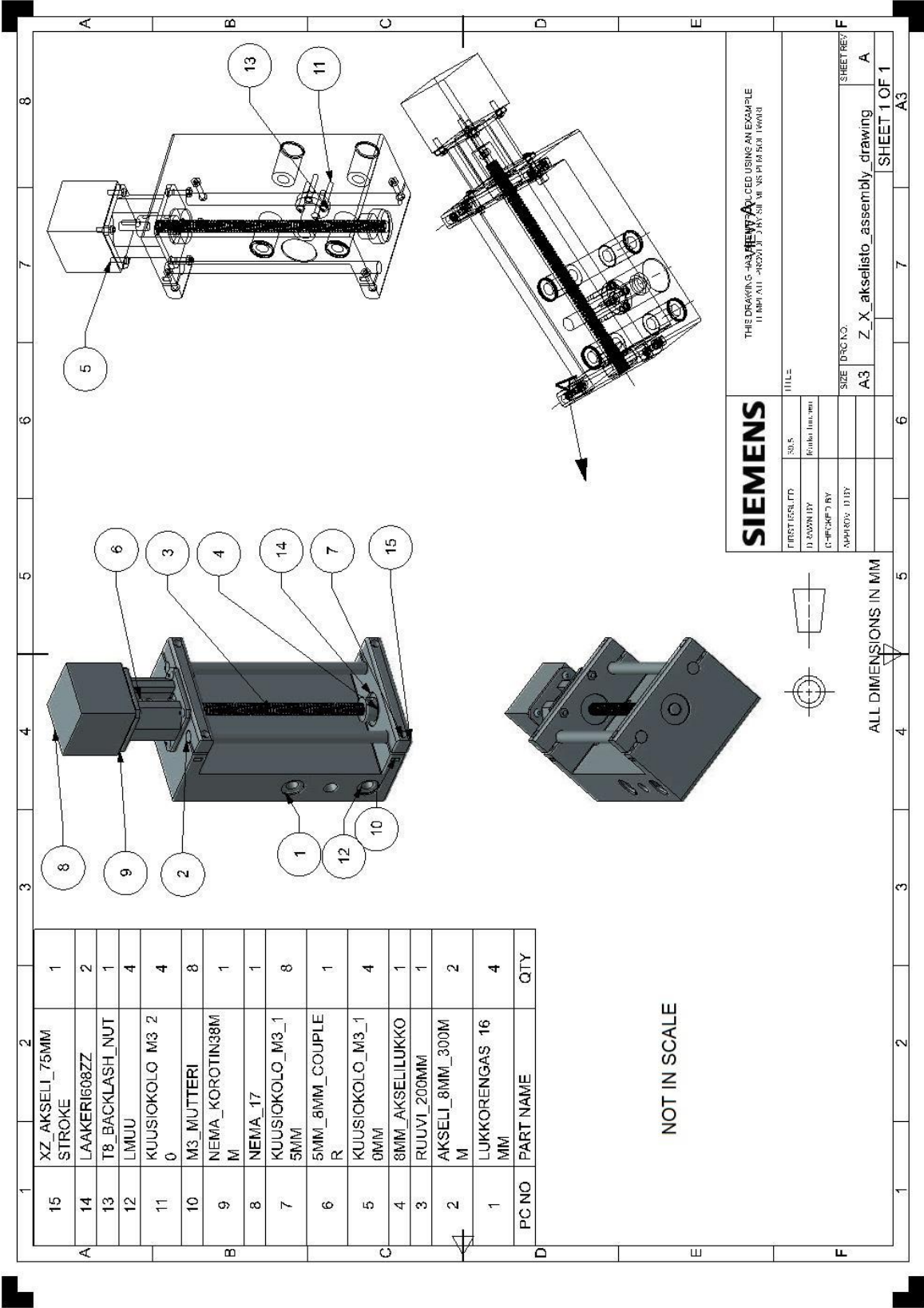
SHEETREVI  
A

Liite 4. Rungon ja tulosteiden kokoonpanopiirustukset

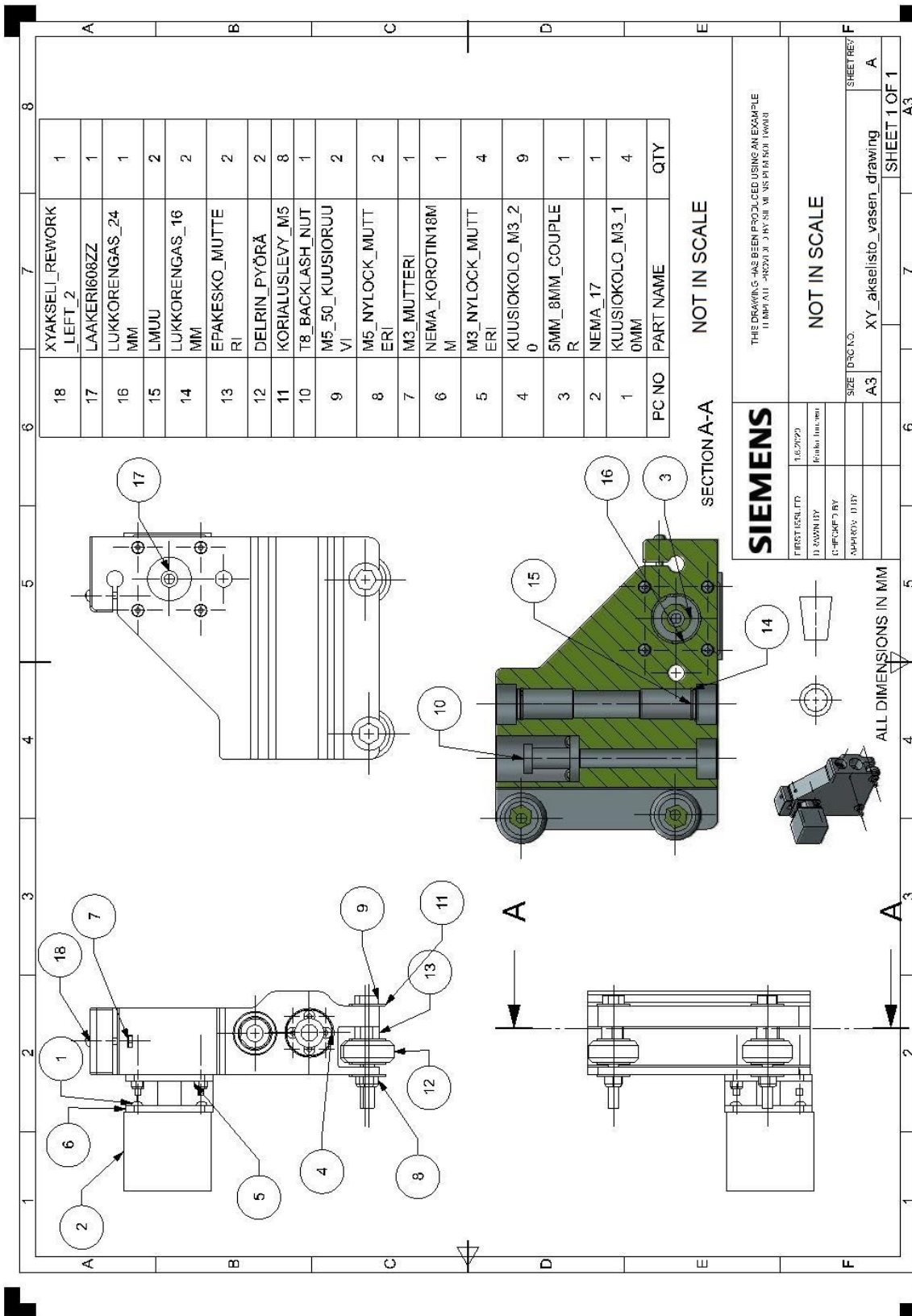
1(6)

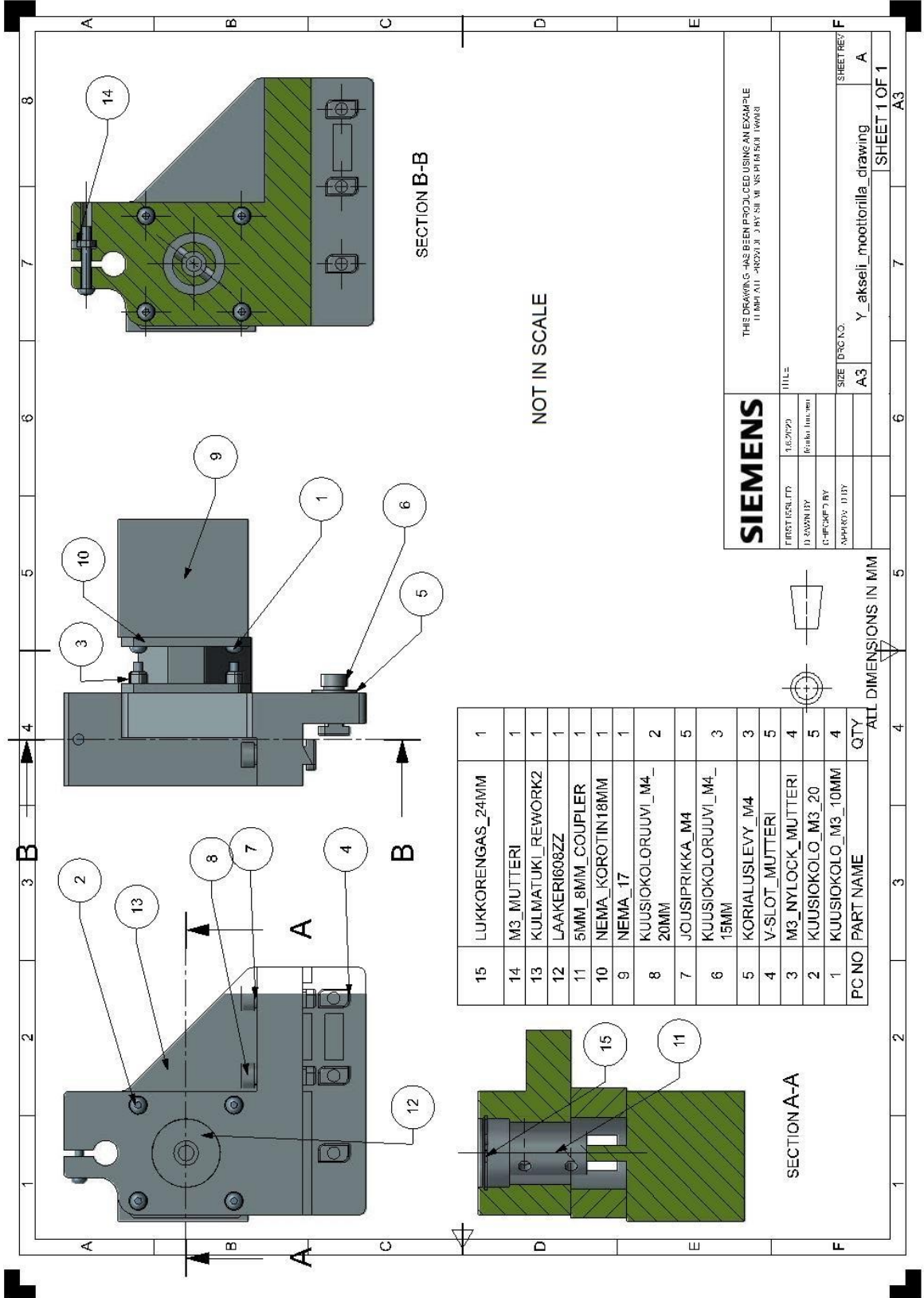


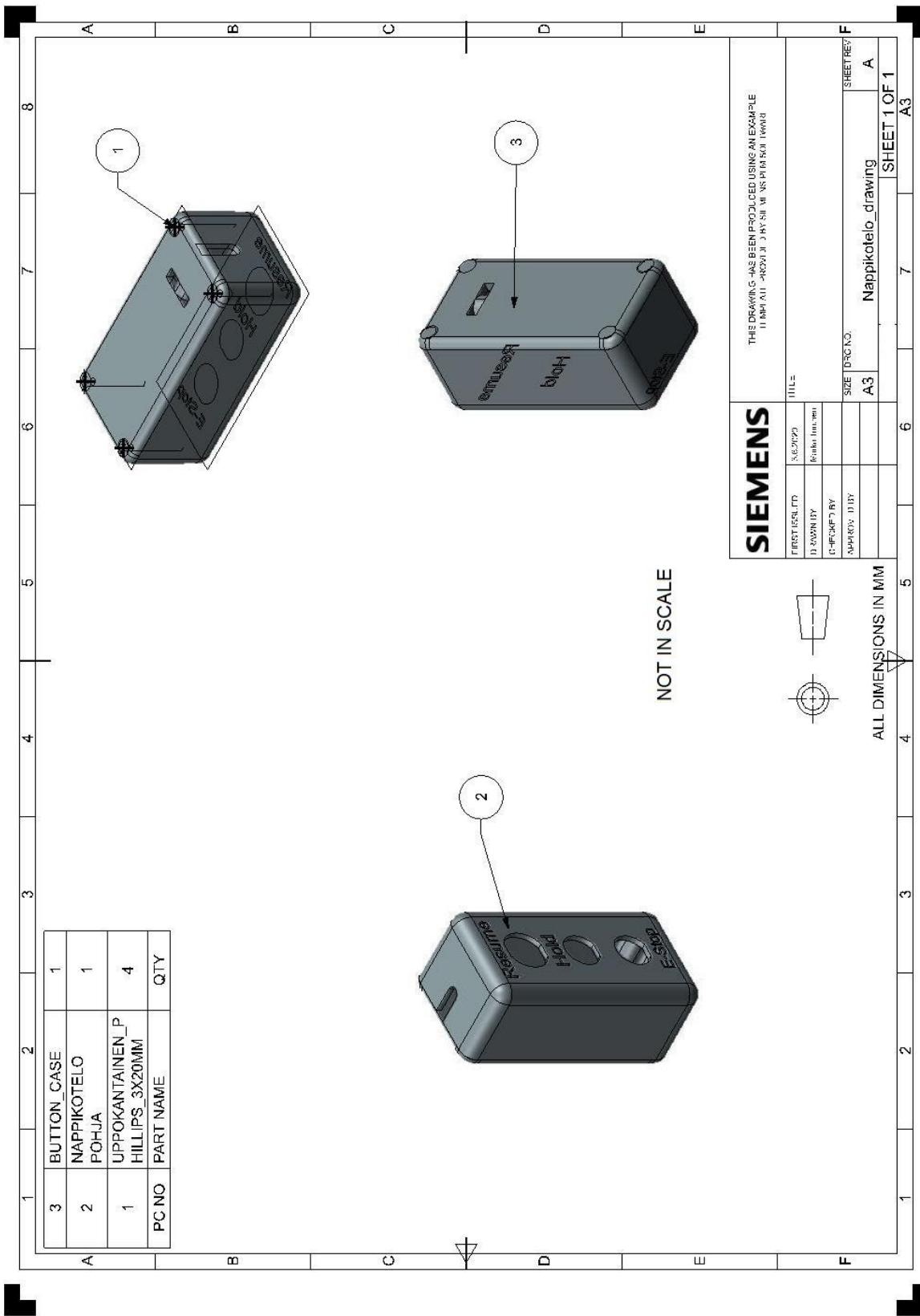




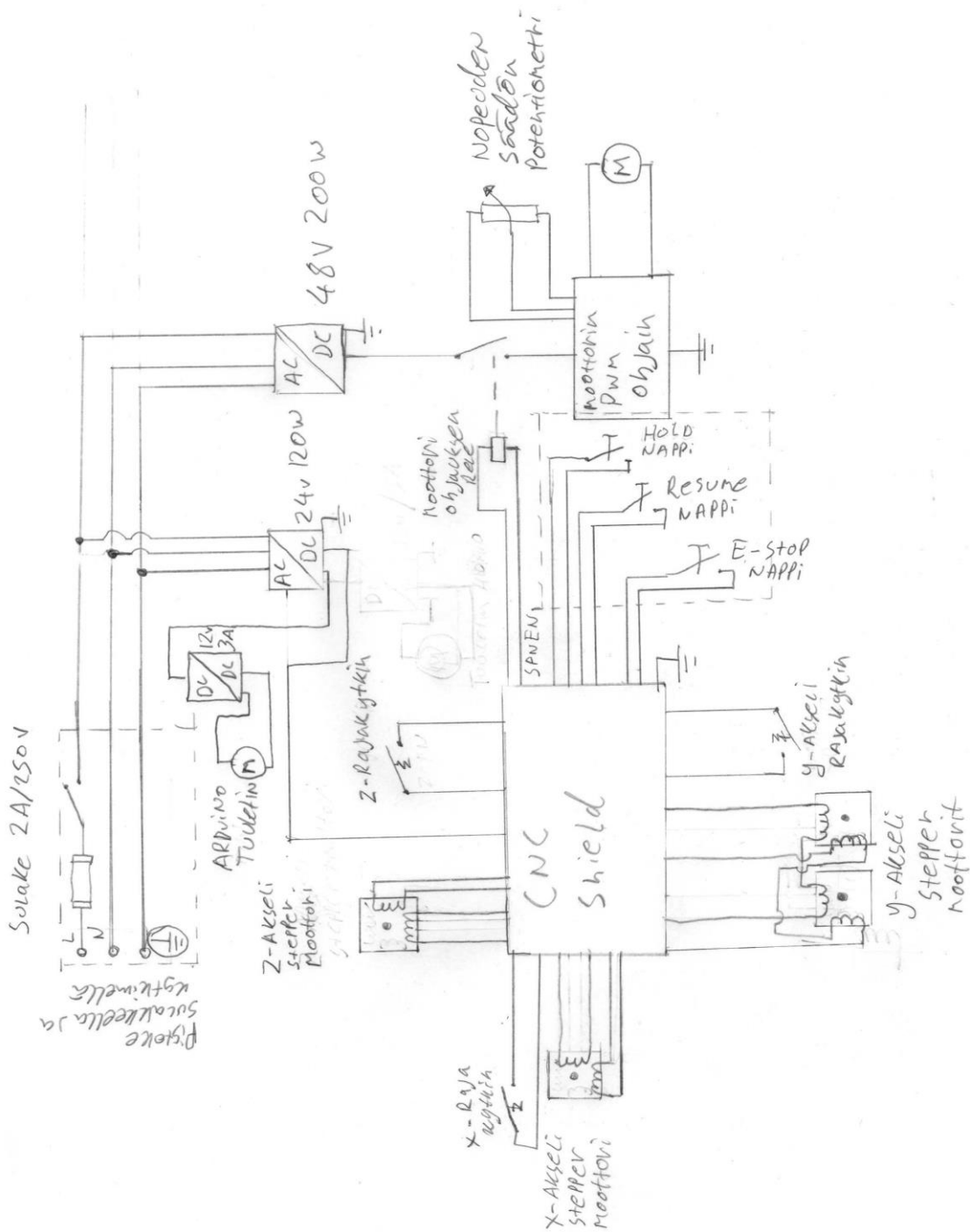


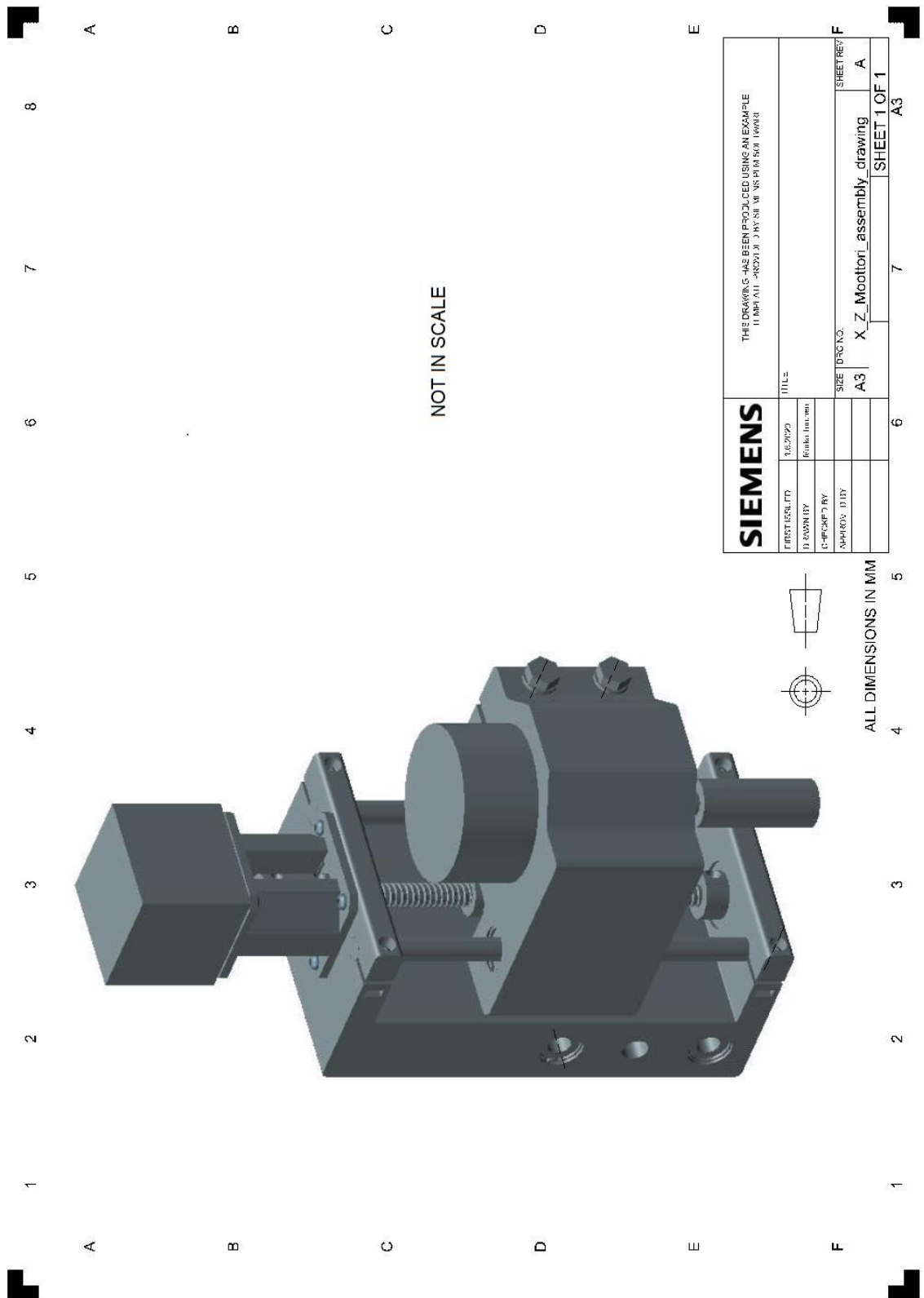


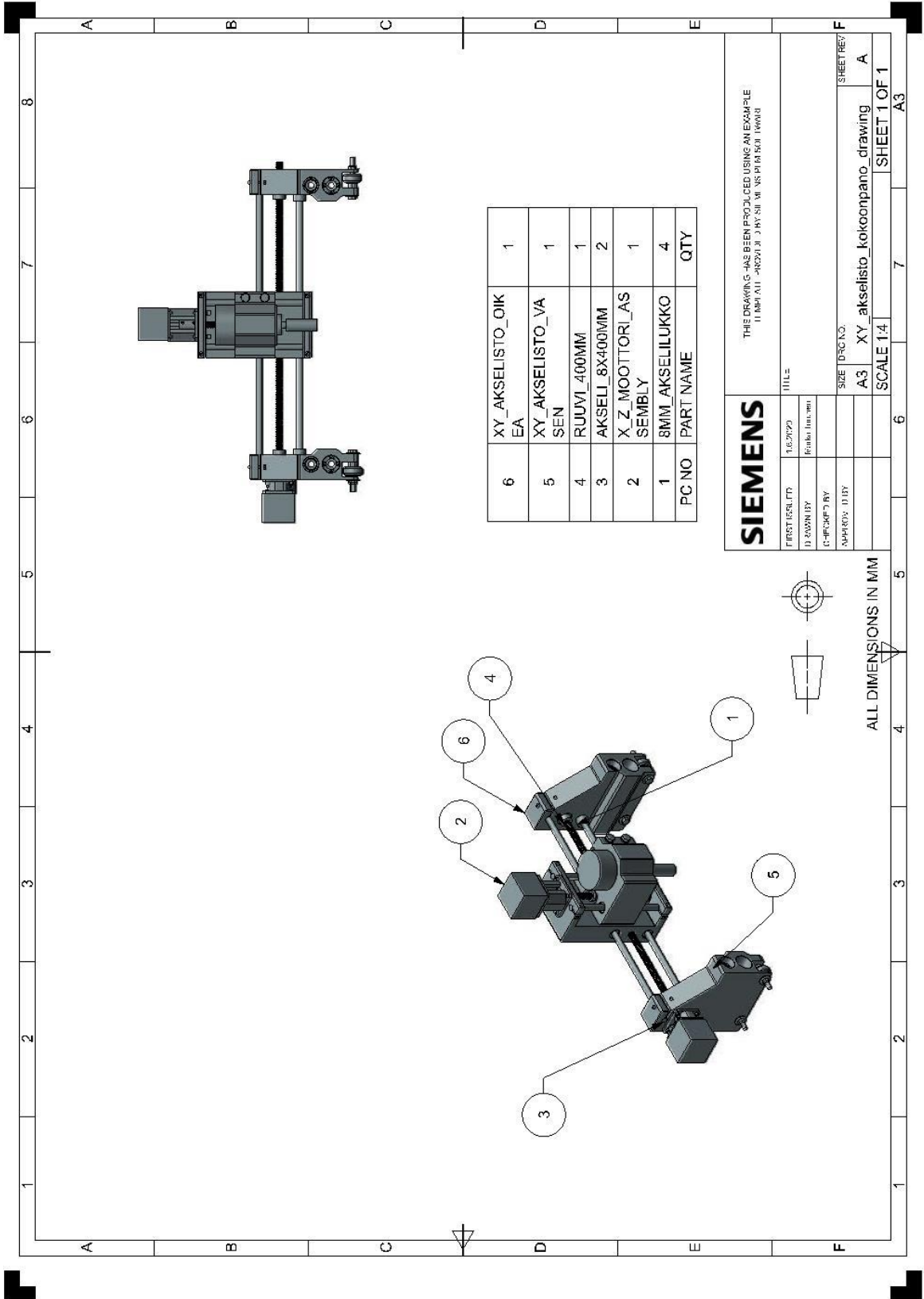


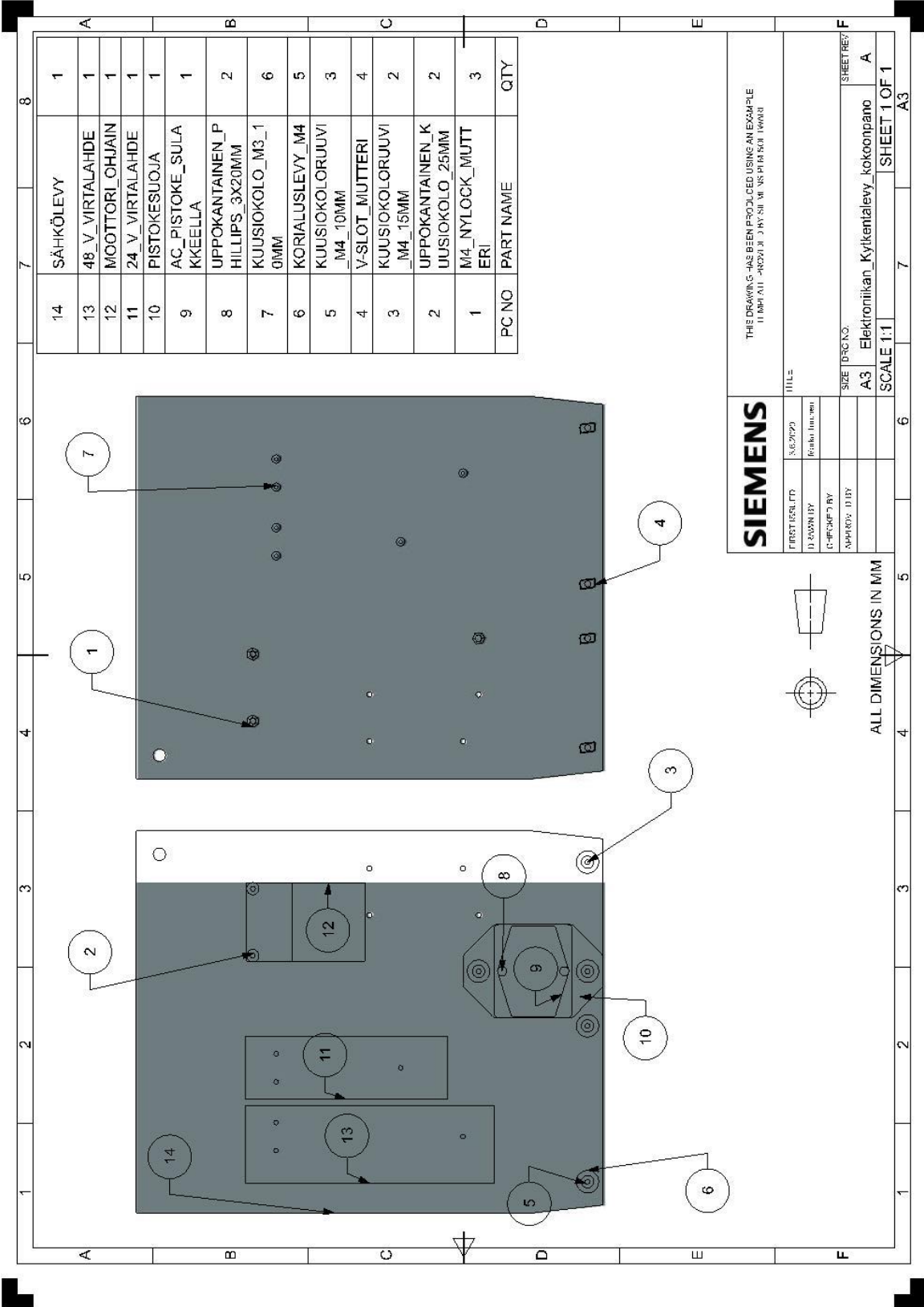


Liite 5. Elektroniikan kytkentäkaavio

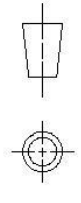






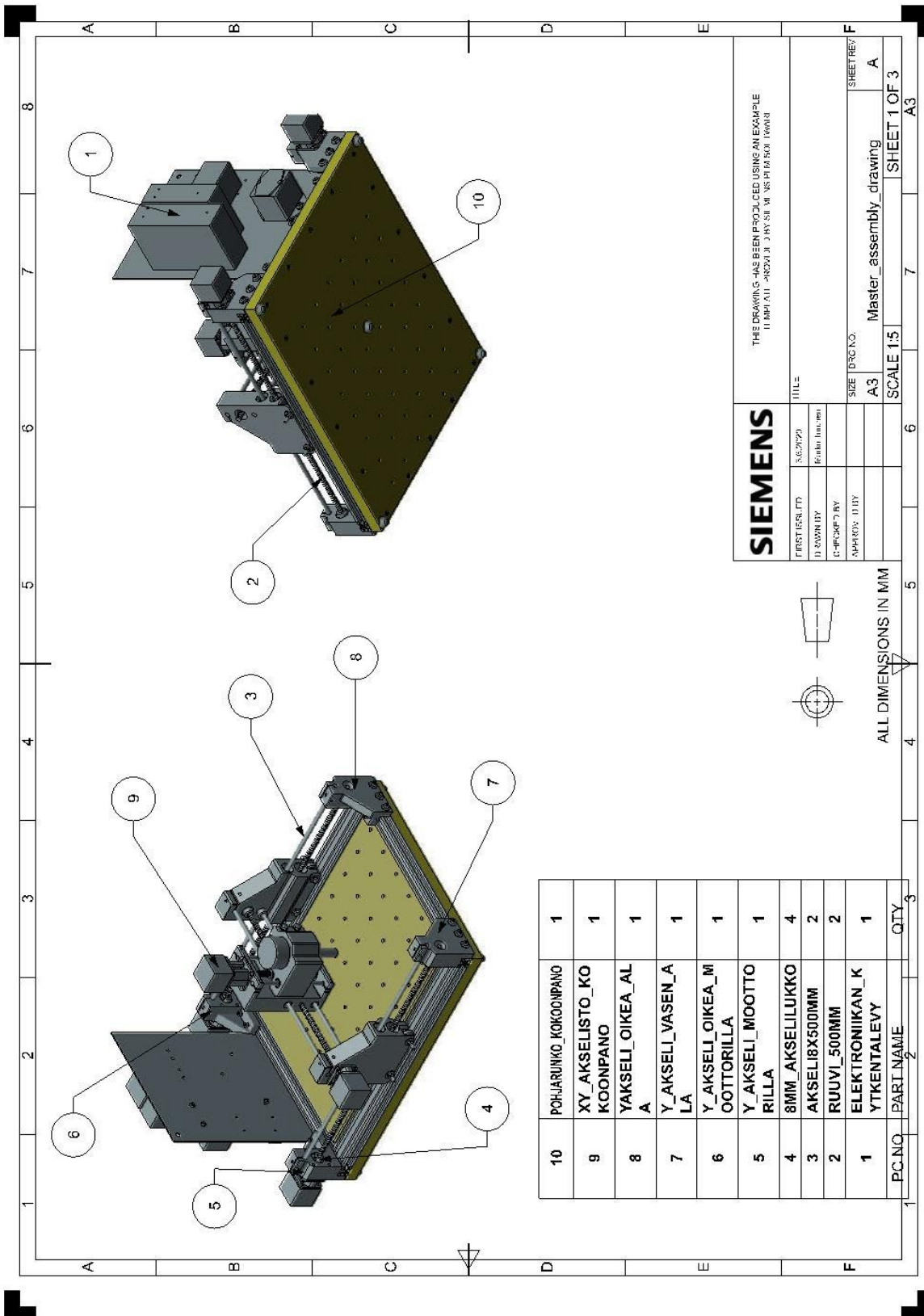


<b>SIEMENS</b>		NO. 2025	TITLE
FIRST RESULT	DESIGNED BY	DATE	
DESIGNED BY	CHECKED BY	APPROVED BY	
SIZE (Dwg. No.)	A3		Elektronikan_Kytientallevy_kokoonpano
SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1	



ALL DIMENSIONS IN MM

4(4)

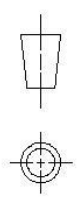


PC.NO	PART NAME	QTY
10	POHJARUNKO_KOKOONPANO	1
9	XY_AKSELISTO_KO KOONPANO	1
8	YAKSELI_OIKEA_AL A	1
7	Y_AKSELI_VASEN_A LA	1
6	Y_AKSELI_OIKEA_M OOTTORILLA	1
5	Y_AKSELI_MOOTTO RILLA	1
4	8MM_AKSELILUKKO	4
3	AKSELIØX500MM	2
2	RUUVI_500MM	2
1	ELEKTRONIIKAN_K YTKENTALEVY	1

**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE  
 II.MPI.A11 -PC200.JI -J.HY.SH.W -SR.PM.SCI.TM.WR

FIRST DESIGNED	DATE
DESIGNED BY	SCALE
CHECKED BY	SIZE
APPROVED BY	DRG.NO.
	A3
	Master_assembly_drawing
	SHEET 1 OF 3
	A
	A3



ALL DIMENSIONS IN MM



## Liite 7. CNC-jyrsimen osien ja käytettyjen työkalujen listat

1(2)

CNC-jyrsimen osalista

Osa	määrä		määrä
<b>Runko</b>		<b>Ruuvit, mutterit, prikät yms</b>	
20*40*450 mm Alumiiniprofiili	2	M4 korialuslevy	17
20*20*400 mm Alumiiniprofiili	2	M4 jousialuslevy	20
MDF levy 500*400*20 mm	1	M3 mutteri	16
MDF levy 440*310*20 mm	1	M3 Nylock mutteri	16
PLA-Filamentti 1,75 mm	4 kg	M3*20mm kuusiokoloruuvi	32
		M3*10mm kuusiokoloruuvi	22
<b>Voimansiirto</b>		M3*15mm kuusiokoloruuvi	10
T8-8 mm trapetsitanko 500 mm	2	M4*15mm kuusiokoloruuvi	14
T8-8 mm trapetsitanko 400 mm	1	M4*20mm kuusiokoloruuvi	8
T2-8 mm Trapetsitanko 200 mm	1	M4*10mm kuusiokoloruuvi	3
T2 välyksetön mutteri	1	M4 NYLOCK mutteri	3
T8 välyksetön mutteri	3	M4*60mm kuusiokoloruuvi	4
Laakeri 608zz	8	M4*25mm uppokantakuusioruuvi	20
		M5*50 kuusioruuvi	4
<b>Akselisto</b>		M5 nylock mutteri	4
8mm akseli 500mm	2	M5X25 kuusiokoloruuvi	8
8mm akseli 400mm	2	M5 korialuslevy	8
8mm akseli 300mm	2	Epäkesko mutteri 5/7mm	4
Lineaarilaakeri LM8UU	12	M4 kalustemutteri	48
POM laakeroitu pyörä	4	Uppokanta_phillips 3*20 mm	6
		Uppokanta_phillips 3*30 mm	4
<b>Elektroniikka komponentit</b>		4-8 mm verkkosukka	5m
200 W 48 V virtalähde	1	Alumiiniprofiilimutteri M4	38
120 W 24 V virtalähde	1	8 mm Akselilukko	9
Nema 17 askelmoottori	4	S.puolen lukkorengas 23 x1 mm	6
200W 48v 12000 RPM moottori ER11 teräkiinnittimellä	1	S.puolen lukkorengas 15 x1 mm	10
Moottorin nopeussäädin	1	Kumijalka	5
vaihtojänniteliitin sulakepesällä	1	Akseliliitin 5/8 mm	4
Rajakytkimet	3	M6*60 kuusioruuvi	2
5v/230v rele	1	M6 aluslevy	2
jännitteen alentaja 24/12v	1	M6 Mutteri	2
Arduino UNO R3	1	Painonappi	3
Arduino CNC-Shield V3	1	Alumiinilevy 300*245*2	1
40X40 12V tuuletin	1		
sulake 250V/2A	1		

Lista laitteen rakentamiseen käytetyistä työkaluista
<b>Runko osaan käytetyt työkalut</b>
Pylväsporakone
6 mm metalli poranterä
8 mm metalli poranterä
M5*0.8 mm kierretappi
Metalliviila
5mm puu poranterä
16mm puu poranterä
Creality CR-10s 3D-tulostin
Philips ruuvimeisseli
Sisäpuolisen lukkorengaan pihdit
ruuvipuristin
<b>Elektroniikan asennuslevyyn tarvittavat työkalut</b>
porakone
3 mm, 4 mm ja 8 mm metalliporanterä
viila
<b>Voimansiirtoon tarvittavat työkalut</b>
Rautasaha
viila
M3*0.5 kierretappi
<b>Kiinnittämisen työkalut</b>
Kuusioavain sarja
Pihdit
Jakoavain
<b>Elektroniikkaan tarvittavat työkalut</b>
kolvi
Juotos tina
Verolevy
Juoksute
Kutistesukka
Yleismittari
pieni lattapäinen ruuvimeisseli
Kuumaliimapistooli
Windows 10 tietokone