



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

TTÜ Mehaanika ja tööstustehnika instituut

# SELEKTIIVLASERSULATUSSEADME PRESSIMISSÕLME PROJEKTEERIMINE

THE PRESSING UNIT DESIGN FOR SELECTIVE LASER SINTERING MACHINE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ardo Kurg

Üliõpilaskood: 162986

Juhendaja: Mart Kolnes

Tallinn 2018

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 2018

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2018

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....2018

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**TTÜ Mehaanika ja tööstustehnika instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Ardo Kurg, 162986

**Õppekava, peeriala:** MATM02/15 Tootearendus ja tootmistehnika, Tootmistehnika

**Juhendaja:** Nooremteadur, Mart Kolnes

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Selektiivlasersulatusseadme pressimissõlme projekteerimine

(inglise keeles) The Pressing Unit design for Selective Laser Sintering Machine

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Patendi ja konkurentsi uuring
2. Pressimissõlme projekteerimine
3. Kontrollarvutused ja optimeerida erinevad sõlmed

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Taustauuring ja konkurentsianalüüs	27.02.2018
2.	Sõlmede valik ja analüüs	20.03.2018
3.	Sõlmede projekteerimine	04.04.2018
4.	Joonised, kokkuvõte ja töövormistamine	17.05.2018

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." .....201....a

**Üliõpilane:** Ardo Kurg

.....

"....." .....201....a

/allkiri/

**Juhendaja:** Mart Kolnes

.....

"....." .....201....a

/allkiri

*Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

## SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. PRINTIMISEST ÜLDISELT .....	9
2. TURU-ANALÜÜS .....	11
3. PATENDIUURING .....	13
4. NÕUDMISED OLULISTELE SÕLMEDELE .....	15
4.1 Pulbri doseerimine .....	15
4.2 Pulbri transport .....	15
4.3 Pulbri pressimine .....	16
4.4 Töölaua langetamine .....	16
4.5 Printimiskambri ventileerimine .....	16
4.6 Üldised nõuded .....	16
5. ERINEVAD LAHENDUSED .....	17
5.1 Pulbri doseerimine .....	17
5.2 Pulbri pindamismehhanism .....	20
5.3 Pulbri pressimine .....	22
5.4 Printimisaluse liigutamine .....	25
6. PNEUMOSÜSTEEM .....	28
6.1 Pneumoskeem .....	28
6.2 Sammdiagramm .....	29
7. ARVUTUSED .....	30
7.1 Pulbri pressimissilindri dimensioneerimine .....	30
7.2 Pulbri pindamismehhanismi silindri dimensioneerimine .....	31
7.3 Õhukulu arvutus .....	32
7.4 Vedrude valik pulbri pindamismehhanismile .....	32
7.5 Pulbri doseerimiskogus .....	34
8. SILINDRIRAAMI ANALÜÜS .....	36
9. DETAILIDE LÕIKAMINE .....	40
10. PRINTERI EHITAMINE .....	41
KOKKUVÕTE .....	51
SUMMARY .....	52

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
GRAAFILINE OSA .....	54

## EESSÕNA

Lõputöö teema pakkusid välja Tallinna Tehnikaülikooli vanemteadur Lauri Kollo ja nooremteadur Mart Kolnes. Töö teema „Selektiivlasersulatusseadme pressimissõlme projekteerimine“ kujunes välja projektist, mille eesmärk on uurida metalli printimisparameetreid ja parandada printimisprotsessi. Algmaterjal printimiseks on metallipulber, metallmaatrikskomposiidi puhul lisatakse juurde sideainet. Õhuke kiht pulbrit kantakse printimisalale ja laserkiirega sulatatakse pulbrit kuni tema sulamistemperatuurini. Sama protsessi korratakse kuni detaili valmimiseni. Plastifikaatorit kasutatakse sideainena, mis jätab detailile jääkpoorsuse peale paagutamist. Katsed pulbri tihendamise eel lasersulatust on andnud häid tulemusi poorsuse vähendamiseks ja projekti edasine töö on pulbri pressimisvõimalusega printeri projekteerimine. Tihendatud pulbriga detailis on vähem defekte ja on suurema tugevusega. Töös on mitmeid piiranguid, mis on ette antud projekti juhi poolt. Lõputöö esimeses pooles toimub andmete kogumine ja teemaga tutvumine. Teises pooles hinnatakse erinevaid lahendusi ning projekteeritakse lõplik variant. Kolmandas osas tehakse vajalikud arvutused, optimeeritakse erinevaid sõlmi ja koostatakse printer.

Antud lõputöö koostamisel tänan toetuse eest juhendajat Mart Kolnes ja projektijuht Lauri Kollo.

Selektiivlasersulatus, pressimissõlm, tihendamine, 3D printer, magistritöö

## SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärk on projekteerida pulbri pressimise seade printerile, mis prindib erinevatest metallidest ja metallmaatrikskomposiitidest detaile. Metallkeraamiliste detailide korral lisatakse pulbrisse polümeerseid sideaineid, mis tagavad parema pulbri voolavuse ja detaili koospüsivuse enne paagutamist. Õhuke kiht pulbrit kantakse printimisalale ning laserkiirega sulatatakse või vitrifitseeritakse valikuliselt detaili ristlõikepind kihthaaval. Pressimise korral tihendatakse pulber pulbrisängis enne laserkiirega sulatusprotsessi. Antud tsükli korralduse kuni soovitud kujuga detail on valmis. Sideainega detailid tuleb peale printimist paagutada, et tagada detaili füüsikalise mehaanilised omadused. Puhta metalse struktuuri korral ei ole paagutamine vajalik.

Lõputööl on koostöös Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja tööstustehnika instituudi projektiga praktiline väljund. Projekti eesmärk on uurida printimisel prinditud detaili füüsilisi omadusi erinevate lahenduste korral ning peale katsetamist ehitada esimene prototüüp. Hetkel on projekt faasis, kus on tõestatud pulbri pressimise positiivset mõju prinditava detaili füüsikalistele omadustele ja edasine töö eesmärk on luua seade, millega saaks edasiste katsetuste jaoks luua toimiv printer. Eelneva töö käigus on selgitatud välja pulbri pressimise surve kõvasulamite printimiseks, mis jääb vahemikku 6-9 kPa. Pressimise kasutamine parandas oluliselt pinnakvaliteeti ja detaili kujuhülbeid ning vähendas plastifikaatori kogust 10%. Pulpri osakeste suuruseks valiti 250  $\mu\text{m}$ , printimiskiiruseks 354 mm/s, viirutuste vahe 40  $\mu\text{m}$  ja kihi paksus 94  $\mu\text{m}$ . Pressimise tulemusena suudeti saavutada 96,4 %-line tihedus senise 53,7% asemel. [1] Käesoleva töö käigus tutvuti olemasolevate printeritega, mis on hetkel turul ning uuriti erinevaid patente, mis on seotud metalli printeritega.

Laseri fokuseerimiskauguse ja juhtimissüsteemi arendab välja Tehnolabor OÜ, kellel on kogemusi rohkem kui 20 aastat elektroonika ja erinevate tehnoloogiate arendamises. Käesolevas lõputöös käsitletavat sõlmed on pulbri doseerimine, pulbrikihi moodustamine, pulbri pressimine ja printimisaluse langetamine. Hetkel on olemas kaks printerit, kus on näha erinevate sõlmede lahendusi. Teatud kasutamisaja jooksul on täheldatud puudusi, mida tuleks võimalusel vältida. Pulpri vahetamiseks kulub palju aega, kuna etteandesüsteem koosneb paljudest väikestest osadest ja ligipääsetavus on piiratud. Hetkel kantakse pulbrit printimisalale pöördliikumise abil, mis hoiab kokku seadme mõõtmed, aga pindamismehhanismi elastomeerist elemendid, mis on kokkupuutes pulbriga, kuluvad ebaühtlaselt.

Pressimisvõimalusega keraamiliste ja metallkeraamiliste detailide valmistamiseks kasutatav printer loob rohkem võimalusi kasutajatele, kes tegelevad prototüübi valmistamisega, üksiktootmisega, teaduslike uuringutega või disaini kujundamisega. Prinditava detaili materjalina saab kasutada

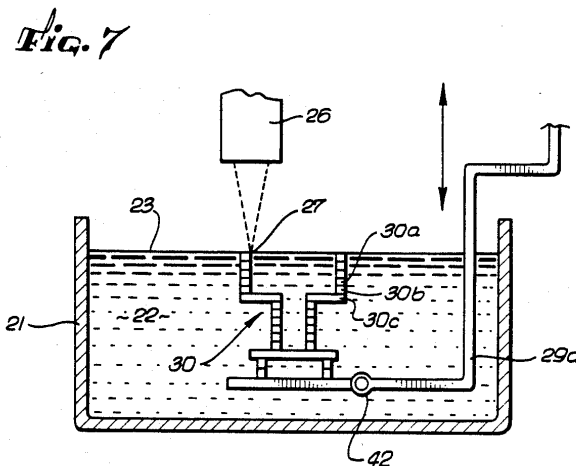
oksiide, boriide, karbiide ja silitsiide, kui ka puhtaid metalle nagu alumiinium, kuld, hõbe, teras, vask, titaan ja veel palju teisi metalle.



## 1. PRINTIMISEST ÜLDISELT

Kihtlisandustehnoloogia kasutamisel luuakse arvutis virtuaalne mudel, mis genereeritakse ümber printimiseks vajalikku formaati. 3D mudel on jagatud tasapindadeks ja iga kihiga kasvatatakse mudelit. Kihtide lisamist korratakse kuni viimase, pealmise kihini. Tasapinnal luuakse arvutis 2D pilt, kus vastava tarkvara abil defineeritakse töörajad printimiseks. Kihtide moodustamise võimalusi on erinevaid ja sõltub enamasti prinditavast materjalist. Stereolitograafia meetod on esimesi katsetusi selles valdkonnas, mille põhimõte seisneb valguse koosmõjul vedelike omaduste muutmist. Vedel polümeer muutub tahkeks selles punktis, kus laserkiir asetseb. Nii joonistab laser väli kontuuri mudelist ja täidab sisemise ruumi vastavalt vajadusele täismaterjaliga või luuakse võrestik tugevuse lisamiseks.

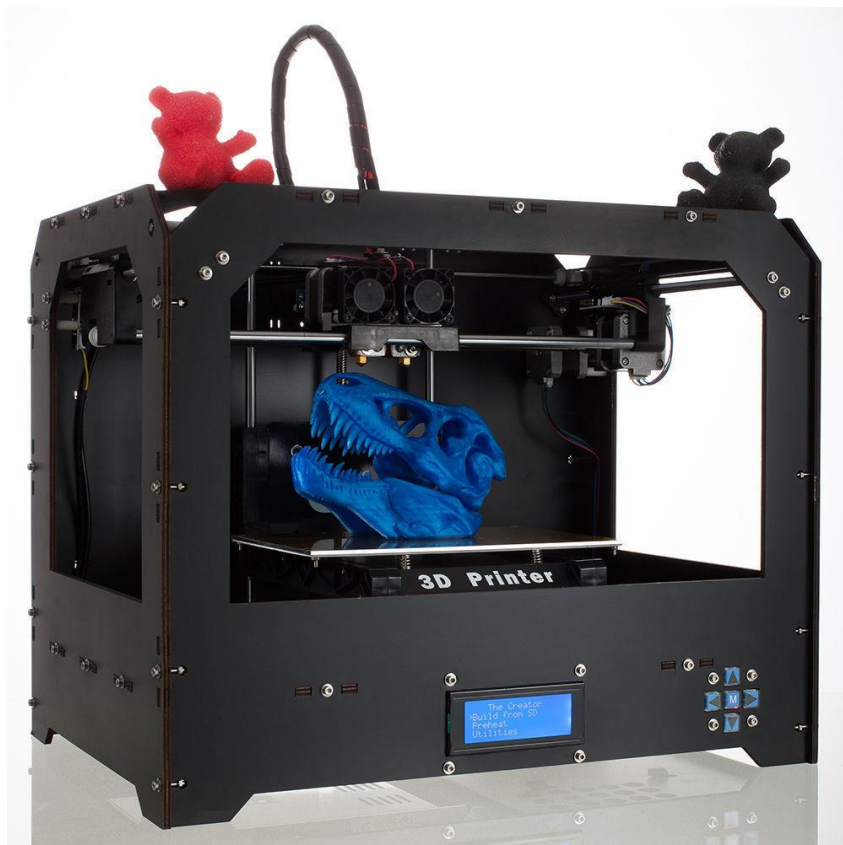
Stereolitograafia esimene patent on aastast 1984, kus Charles W. Hull patent US4575330A [2] kirjeldab kolmemõõtmelise prototüübi loomist (vaata Joonis 1.1). Käesoleva leiutise eelis on tööriistade puudumine ning disaineril on arvuti abil otsene ühendus stereolitograafiaseadmega.



Joonis 1.1 Stereolitograafia [2]

FDM (sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine) protsess on pärit 1980ndatest ja muutunud populaarseks väikekasutajale tänu oma taskukohasele hinnale. Toormaterjalina kasutatakse termoplastist kiudu, mida kuumutatakse sulamistemperatuurini ja lisatakse läbi düüsi õigesse kohta vajalik kogus materjali. FDM tehnoloogia leiutas Scott Crump, kes on 3D-trükiteenuste firma Stratasys Ltd asutaja. [3] Printimisel juhitakse tööalust või printimispead X ja Y koordinaatteljes tööradade tegemisel ning Z teljes toimub kihtide

kasvatamine. Kasutatavad materjalid on ABS, PC, PEI, PPSF. FDM on kõige levinum meetod maailmas. Kodukasutajale mõeldud printeri hinnad võivad jääda alla 300 euro (vaata Joonis 1.2). [4]



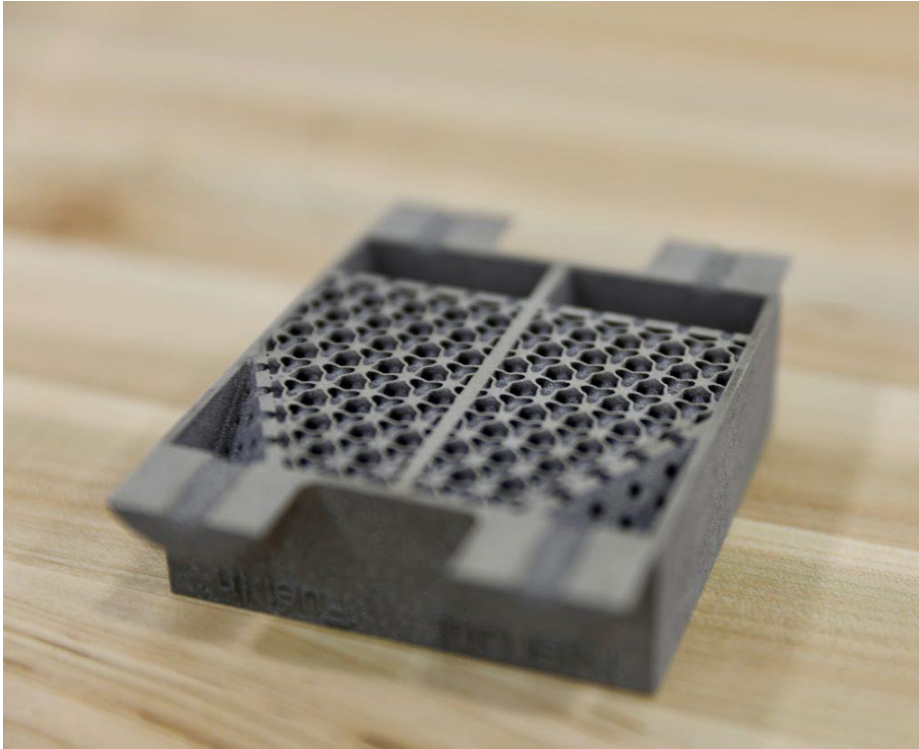
Joonis 1.2 3D printer CTC FDM [4]

## 2. TURU-ANALÜÜS

Keraamilised ja metall-keraamilised materjalid on kasutusel erinevates valdkondades oma omaduste poolest - kõrge inertsus, kõvadus ja temperatuurikindlus. Paagutatud detailide töötlemine on raske ja peale vormimist peab saavutama lõppkujulähedase kuju. Vormi tegemine nõuab investeringuid, mis tõstavad detaili hinda. Üksik- ja väikeseeriatootmisel on üks võimalus kasutada kihtlisandustehnoloogiaid. SLS (selektiivlasersulatus) tehnoloogia muutub pidevalt, langevad seadmete hinnad, muutuvad täpsemateks, kiiremateks ja prindivad parema kvaliteediga detaile. Kuni 45 kraadise nurga all ei vaja pinnad tugistruktuure ja nii muudab see väljaulatuvate osade printimise lihtsamaks. [5]

Antud tehnoloogia on veel arenemisjärgus ja lähiajal on antud valdkonnas oodata suuri edusamme. Prototüübi valmistamisel on tehnoloogia asendamatu, kuna mudel valmib kiiresti ja paranduste sisse viimine võtab vähe aega. 2009 aastal FDM patendi ja 2014 aastal põhipatendi aegumised kiirendasid printimise tehnoloogia arengut, aga SLS tüüpi printeri areng on jäänud tagasihoidlikuks. Hetkel on kolm suuremat ettevõtet, kes on suutnud väikeste kuludega teha suuremahulisi arendusi ja tulla turule konkurentsivõimeliste ja taskukohase hinnaga printeritega. Need on Sintratec, Sinterit ja Sharebot. [5]

Suuremad metalliprinteri tootjad on EOS, 3D System, SLM Solutions, General Electric, Trumpf, Farsoon Technologies, Stratasys. General Electric alustas 3D printimisega 10 aastat tagasi, kui nad said ülesandeks valmistada reaktiivmootorile keeruline ja efektiivsem kütusepihusti. Uus disain oli niivõrd keeruline, et keegi ei olnud võimeline seda valmistama tavapäraste tehnoloogiatega. Katsetused 3D printeriga olid edukad ja nii hakati antud tehnoloogiale otsima uusi rakendusi. Peagi arendati 3D prinditud mootori komponente rakettidele, mis suudavad satelliite orbiidile viia. Antud mootorid on keerulised, väikeste mõõtmetega ja koosnevad paljudest komponentidest. Teine suurem valdkond on implantaatide printimine. Skaneeritud mudelite abil on võimalik teha spetsiifilisi implantaate patsientidele kahjustanud luude asemele. Printimine on asendamatu tehnoloogia võrestike ja õõnsate detailide loomiseks (vaata Joonis 2.1). [6]



Joonis 2.1 3D prinditud keeruline võrestik [6]

Printimine on muutunud lihtsamaks ja muutunud populaarseks üle terve maailma. Hetkel on igaühel võimalik omada enda disainitud detaili. Metallist toodete printimisega tegelevad üle maailma paljud firmad, kes pakuvad oma teenust teistele. Kliendid laevad internetti oma mudeli üles, täpsustavad erinevad detaili parameetrid ja sihtaadressi ning koheselt kuvatakse info detaili hinna ja tarneaja kohta. Peale kinnitamist saadetakse detail printimisse, teostatakse kvaliteedikontroll ja siis saadetakse kliendile posti- või kullerteenuse kaudu. Näiteks firma 3D Hubs omab võrgustikku enam kui 140 riigis, mis tagab odava ja kiire tootmise laiale klientuurile. Materjali valik on lai, lisaks plastidele on võimalik printida roostevaba terast, alumiiniumi ja titaani. Plastide puhul on lisavõimaluseks lisada värvainet, mis annab tootele vajaliku tooni ja nii hoitakse kokku üleliigsete operatsioonide arvelt. [7]

### 3. PATENDIUURING

3D printimistehnoloogia on viimasel ajal teinud suuri edusamme mitmete tegurite koosmõjul. Vahepeal on järgi jõudnud juhtimissüsteemid, millel on suurem osa tagasisidel. Laserid on muutunud täpsemateks ja võimsamateks, mis muudab printimise kiiremaks. [5] SLS tehnoloogia on käsitletud patentides nr. US4863538 ja US5296062. Nende lahenduste puuduseks on, et kui vormitakse polümeeriga segatud keraamilisi või metall-keraamilisi pulbreid, siis peale polümeeri eemaldamist ning paagutamist on detailid suure poorsusega. [8] [9]

Metall-keraamiliste detailide valmistamiseks 3D printimise teel kasutatakse peamiselt kaudseid meetodeid. Antud juhul segatakse komposiidi pulber plastifikaatoriga ning kasutades 3D printimise meetodeid (Sulatatud Sadestamisega Vormimine, Lamineerimine, Sideaine Pihustamine, SLS jt.) antakse detailile kuju. Näiteks SLS meetodi puhul kasutatakse laserenergiat, et viia plastifikaator sula- või klaasistumistemperatuurini, tänu millele saab anda detailile kuju. Hilisema termotöötamise käigus toimub kas polümeeri reageerimine keraamilise komponendiga ja/või polümeeri eemaldamine kuumutamisega. Hilisem detaili tihendamine ning lõplik kuju antakse paagutamisega.

Antud meetodit kasutavad patendid on US5076869, ja US5431967A. Selle meetodi puuduseks on vajadus kasutada suhteliselt suur kogus plastifikaatorit, tänu millele on detailil paagutamise järgselt suur jääkpoorsus, suurusjärgus 30-50% (vt Hagedorn, Y. "Laser additive manufacturing of ceramic components: materials, processes, and mechanisms." Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications (2016): 163). Seetõttu kasutatakse antud protsessi puhul lisaetappi, kus detail infiltreeritakse metalli või metallisulamiga. Samuti kasutatakse vormimisejärgset pulberdetaili isostaatilist pressimist gaasi- või vedeliku keskkonnas. Antud meetodi puuduseks on lisanduv protsessietapp ning kujuhälvete tekkimine. [9] [10]

Väiksema poorsusega detailid on võimalik paagutamisega saada juhul kui suurendada pulbrisängis asuva pulbri pakketihedust. Üheks meetodiks on pulbri etteandelaba asendamine rullikuga, mis pulbrit etteandes pöörleb vastu päeva (US 20140271326 A1, WO2004/076101 A2). Antud meetodi puuduseks on, et kuigi saavutatakse teatav pulbrisängi tihenemine, ei ole see piisav täistihedate keraamiliste ja metall-keraamiliste materjalide paagutamiseks. [11] [12]

Teiseks suurema tiheduse saavutamise võimaluseks on granuleeritud pulbrite asemel kasutada pulbrilobri. Antud lähenemise puuduseks on vedelike viskoossuse muutumine, seega on raske tagada pikemaajalist protsessi stabiilsust

Kolmandaks võimaluseks on pulbrisäangi tihendamine plaadiga pressimise teel. Antud meetodit on kasutatud sideaine pihustamise meetodi puhul (US 5387380). Pressimist kasutatakse peale pulbrisäangi pealmise kihi pihustamist sideainega. Antud meetodi puuduseks on vajadus täpselt kontrollida peale kantava sideaine omadusi. Samuti on keeruline kasutada tahkeid sideaineid, mida saab peale kanda vedelas lahuses. Sarnast, plaadiga pressimise meetodit kasutatakse ka pihustusmeetodi puhul, millega saab valmistada kõrge tihedusega metall detaile (US 2004/0018107). [13] [14]

Samuti kasutatakse plaadiga pressimist meetodi puhul, kus pihustatakse sideainega pulbrikihile detaili negatiiv, mis takistab paakumist. Seejärel pressitakse kiht ning viiakse läbi lõpppaagutamine 3D printeris (WO 2015170330 A1). Antud meetodiga on keeruline valmistada keraamilisi detaile, kuna plastifikaatoreid ei kasutata ning keraamiliste detailide paagutamiseks vajatakse kõrgeid temperatuure. [15]

## **4. NÕUDMISED OLULISTELE SÕLMEDELE**

Metalliprinter koosneb paljudest erinevatest sõlmedest. Antud lõputöö ülesanne on lahendada pulbri koguse doseerimine, pulbri õhukese kihi moodustamine pulbrisängis, pulbri pressimine ning prinditava ala liigutamine kihipaksuse võrra allapoole. Erinevatel sõlmedel on mitmed piirangud ja sõlmede koostöö seab uusi piiranguid. Nende lahendamiseks tuleb leida variandid üksiktasemel ja seejärel suuremas plaanis.

### **4.1 Pulpri doseerimine**

Pulpri doseerimisel on oluline etteantav kogus. Liiga palju pulbrit lisades koguneb pulber väljapoole prinditavat tööala, mis pikaajalisel töötamisel võib tekitada töö käigus tõrkeid. Suurem kogus pulbrit tekitab rohkem tolmu, mis tekitab häireid laseri töös. Laseri kiir juhitakse läbi läätsede, millega reguleeritakse fokuseerimiskaugust, et pulbrit saaks paagutada. Fokuseerimiskauguse juhitakse prinditavast alast allapoole, mis muudab lasertäpi ristlõikepindala suuremaks ja kiirendab antud protsessi. Kaks peeglit juhivad laserkiirt printimise töölaual jälgides vajalikku kontuuri. Tolm suurendab oluliselt laseri väljaantava energia kadu materjali sulatusel. Teist tüüpi pulbri kasutamisel peab olema pulbri vahetus võimalikult lihtne ja kuluma minimaalselt aega. Pulpri pressimisel väheneb pulbri ruumala ja kihipaksus, seega peab doseeritav kogus olema suurem teatud koefitsiendi võrra, kui ühes kihipaksuse arvutatud maht.

### **4.2 Pulpri transport**

Pulber transporditakse töölauale doseerimispunktist ja pulber kantakse ühtlase õhukese kihina printimisalale. Ühe kihi paksus on reeglina 20-30 mikromeetrit. Pulpri etteandesõlm peab sooritama palju korduvaid tegevusi ja pulbri kogunemine liikuvate osade vahele on väga tõenäoline. Pulpri etteandmine peab olema täpne, esinema minimaalselt tõrkeid, olema lihtsa konstruktsiooniga ja pulbrivahetusel olema lihtsasti puhastatav. Pulpri transpordi kiirus peab olema reguleeritav. Transportimisel eraldub pulbrist tolmu ja vajadusel tuleb kiirust vähendada, et tagada ühtlased printimisparameetrid. Hetkel pole teada pulbrist eralduva tolmu maht sõltuvalt pulbri liikumiskiirusest. Laseri asukoht on printimisala kohal ja kaugus tööalast on 100-150 mm. Pulpri liigutamise mehhanism ei tohi segada laseri tööd ja peab olema laserist madalamal.

### **4.3 Pulbri pressimine**

Pulbri pressimisel tihendatakse pulber enne laseriga sulatamist. Pressimine vähendab poore ja loob ühtlase kihi. Kuna peale kantava kihi paksus on 20 mikromeetrit, siis on oluline, et pinnal ei ole kõrgemaid kohti, mis segavad laseril paagutamisprotsessi. Pulbri tera suurus on vahemikus 45+-10 mikromeetrit. Printimisala on ruudu kujuline ja külje pikkus on 100 millimeetrit. Pulbri pressimisjõud on 80 kg terve ala kohta ehk survejõud on 8000 kg/m<sup>2</sup>.

### **4.4 Töölaua langetamine**

Printimise tööala on samal tasapinnal töölauaga. Iga kihi lisamisel ja laseriga sulatamisel liigub printimisalus kihipaksuse võrra allapoole ning täidetakse uuesti pulbriga. Kuna pulber pressitakse kokku, siis peab arvestama kokkupressitud pulbri kihipaksusega. Printimise töölaua langetusmehhanism peab olema täpne ja taluma pressimiskoormust. Printitava detaili kõrgus on 100 mm. Printimise töölaua paksus on 30 mm ja vahetusel peab saama printimisaluse kergesti kätte, vajadusel tuleb printimisalus tõsta kõrgemale töölauast, et seadmega oleks mugav tööd teha.

### **4.5 Printimiskambri ventileerimine**

Sulatusprotsessis tekib põlemisprotsessile iseloomulikku suitsu ja see häirib laseri tööd. Kui laseri väljaantav energia neeldub enne pinnale jõudmist, on oht defektide tekkeks. Suitsu eemaldamiseks kasutatakse ventilaatorit, mis peab olema piisava õhuvooluga ja vastu pidama metallipulbri abrasiivsetele osakestele. Õhuvoolu hulk peab olema reguleeritav, et saada optimaalne õhuvoolu kiirus, mis tagab pulbri minimaalse tolmu tekke maksimaalse õhu väljatõmbe korral.

### **4.6 Üldised nõuded**

Iga sõlm seab piiranguid teistes sõlmedes ja parima lahenduse väljaselgitamisel tuleb arvestada kõikide komponentide koosmõju. Eesmärk on luua sobiv lahendus prototüübi projekteerimiseks. Seade peab töötama ilma tõrgeteta, et vältida printimisel seisakuid või töö uuesti alustamist. Samuti peab seadme hooldus ja printimisprotsessi vahelised seadistused olema kiiresti teostatavad ja kasutajasõbralikud.



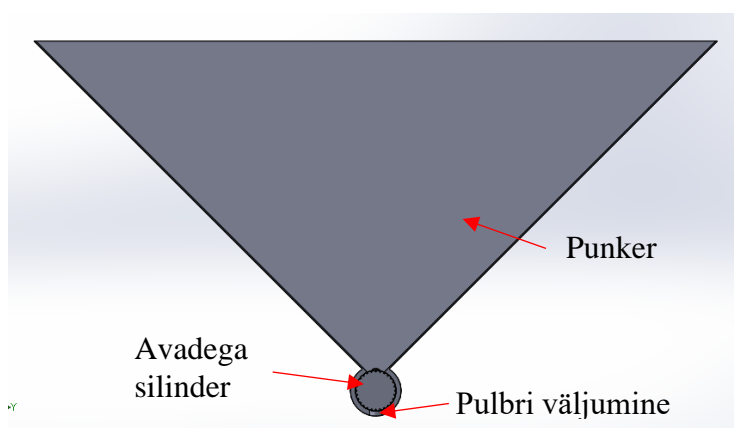
## 5. ERINEVAD LAHENDUSED

Printeri valmistamiseks on oluline analüüsida kõik erinevad sõlmed ja nende erinevad variandid. Selleks loon maatriksid ja hindan erinevate kriteeriumite alusel esitatud valikuvariante. Parima sõlme väljavalimisel kasutan kaalutud hindamise meetodit, kus hindan 5 palli skaalas ning parameetrite kaal on samuti 1-5-ni.

### 5.1 Pulbri doseerimine

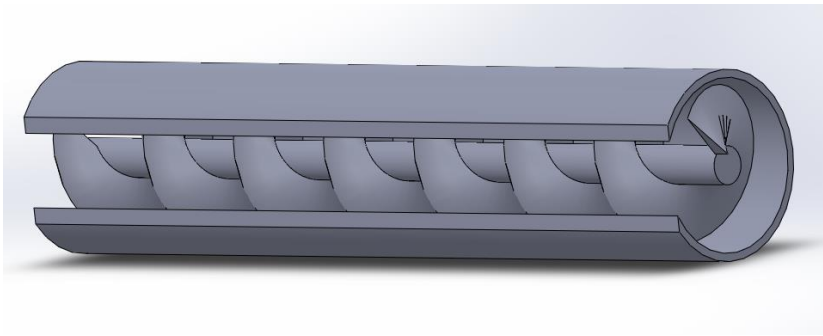
Pulbri doseerimisel on oluline pulbri täpne kogus ja pulbri minimaalne lendumine. Lenduv pulber kahjustab teisi liikuvaid komponente ja vähendab oluliselt nende eluiga. Pulbri väiksem kogus põhjustab suuremat poorsust ja defekte detaili pinnal.

Esimene lahendus põhineb silindrilisel võllil, millel on pinnal avad pulbri jaoks (vaata Joonis 5.1). Teatud pöördenurga korral doseeritakse vajalik pulbri kogus töölauale. Võlli ümber olev toru on korpuseks, võlli otsas on laagrid ja sammumootor. Korpuse üleval osas asub pulbri punker ja allosas ava pulbri väljumiseks.



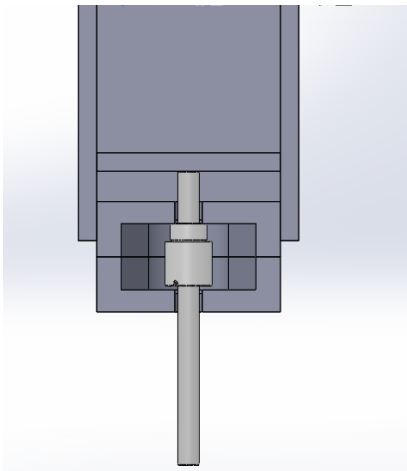
Joonis 5.1 Silindriga doseerimine

Teine lahendus teo etteandemehhanism, mille peamised komponendid on kruvi ja sammumootor (vaata Joonis 5.2). Kruvi pööramisega liigutatakse vajalik kogus pulbrit töölauale. Kruvi ühes otsas on punker ja teises osas pulbri väljumisava.



Joonis 5.2 Kruviga doseerimine

Kolmas lahendus põhineb töötasapinna all olevast punkrist (vaata Joonis 5.3). Punkri põhi liigub ülespoole ja pealmine osa on avatud. Kogu massi liigutatakse ülespoole kuulkrugi ja sammumootoriga. Tasapind liigutatakse üles prinditava kihipaksuse võrra.



Joonis 5.3 Doseerimine tõstmismehhanismiga

Maatriksi loomisel kasutan valikute hindamiseks järgmisi kriteeriumeid:

Töökindlus- tõrgete esinemisel printimisprotsessi ajal tekitab tööseisakuid, tekitab defekte või tuleb uuesti alustada printimisprotsessiga.

Hind- eelarve on piiratud ja komponentide hind ei tohi ületada eelarvet. Kallima komponendi saab lubada teise komponendi kvaliteedi arvelt.

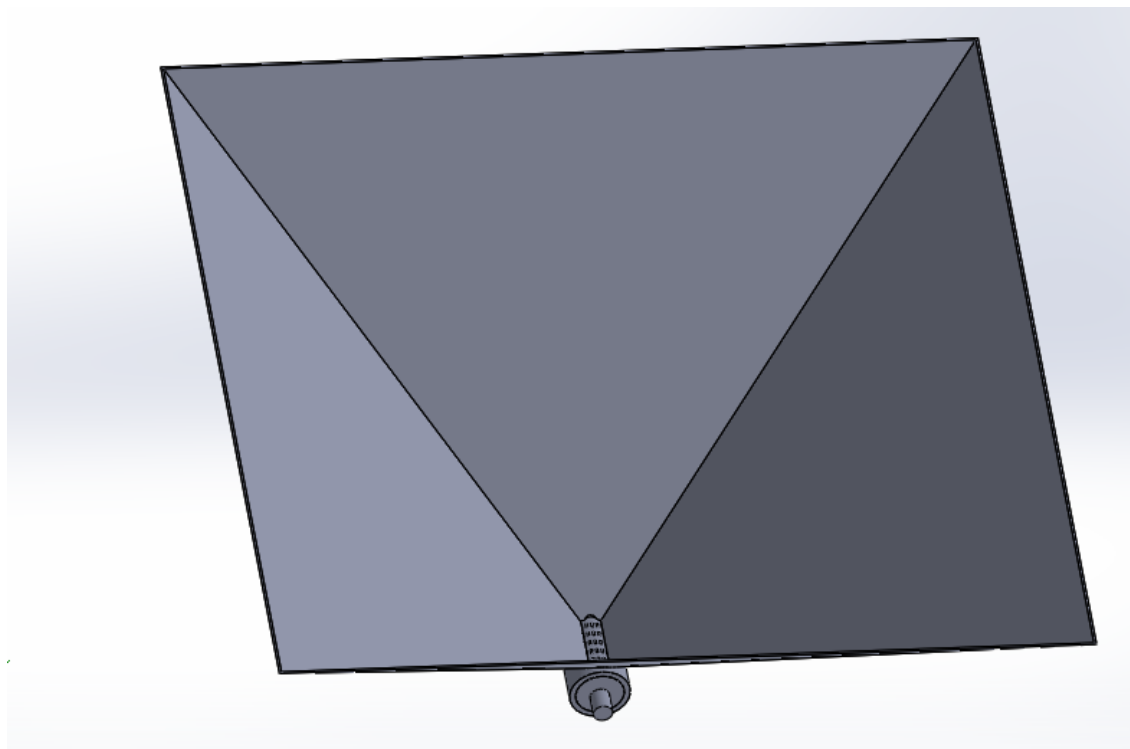
Hooldus- printeri remondil ja hooldusel peab iga sõlm olema eraldi monteeritav ja disainitud remonti teostavale isikule kasutajasõbralikult.

Puhastatavus/seadistamine- printimisvaheline seadistamisaeg peab olema lihtsasti teostatav, võtma vähe aega ja mitte sisaldama üleliigseid tööprotseduure. Pulbri vahetusele ei kulu liigset aega.

Tabel 5.1. Pulbri doseerimismaatriks

Nr	Parameeter	Kaal	Võll		Kruvi		Kamber	
			Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne
1	Töökindlus	5	4	20	5	25	3	15
2	Hind	3	4	12	4	12	4	12
3	Hooldus	3	5	15	4	12	4	12
4	Puhastatavus	5	5	25	3	15	4	20
Punktisumma				72		64		59

Pulbri doseerimist kasutan silindrilise võlli lahendust (vaata Joonis 5.4). Silindriline võll käib toru sees ringi ja võllile töödeldud avad kannavad pulbrit edasi. Üleval on pulbri anum ja all võlli pöörlemisel viiakse pulber väljumisavasse. Võll kinnitatakse laagripukkidega seadme lae alla, kus ei sega teiste komponentide tööd.

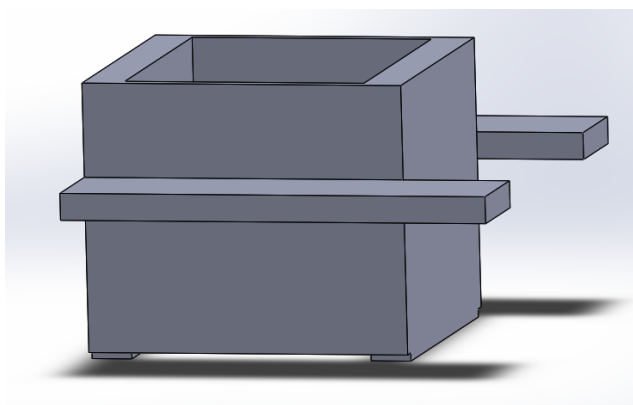


Joonis 5.4 Doseerimissõlm

## 5.2 Pulbri pindamismehhanism

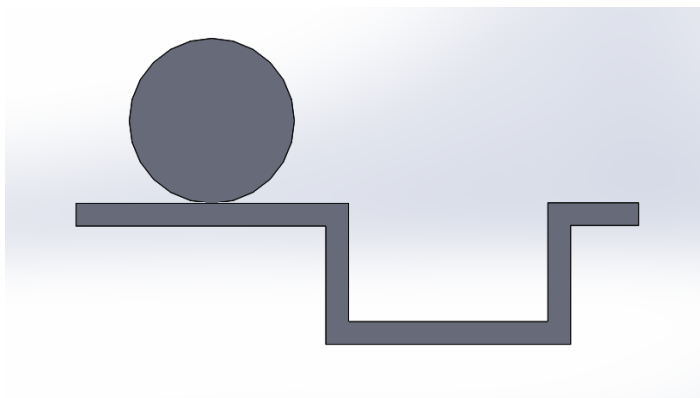
Pulbri transport printimisalale peab olema kiire, pulber katma ühtlaselt printimisala ja mitte koguma pulbrit ebavajalikesse kohtadesse. Analüüsimiseks on valikus kolm erinevat varianti.

Esimene lahendus põhineb kambril, kus sees on vajalik kogus pulbrit kihi moodustamiseks (vaata Joonis 5.5). Kamber asetseb doseerimiskohas, kus see täidetakse õige koguse pulbriga. Kambril esi ja tagakülg asetsevad risti liikumissuunaga ning need kambriseinad liiguvad töötasapinnast mõne millimeetri kõrgusele. Serva allosas on kummiäär, mis tööolukorras hakkab pulbrit liigutama. Vastavalt liikumissuunale on alumises asendis liikumissuunale vastavalt tagumine külg.



Joonis 5.5 Kambriga pulbri liigutamine

Teine lahendus koosneb rullist, mis doseerimiskohas rullib pulbri printimisalale (vaata Joonis 5.6). Rull surutakse teatud jõuga töölaua pinnale ja rulli liikumisel pulber liigutatakse printimisalale.



Joonis 5.6 Pulbri rullimine

Kolmas lahendus koosneb pöörlevast labast, mis asub doseerimispunkti ja printimisala vahel. Laba otsas on äärik, mis ei lase liigselt pulbril ruumi äärtesse koguneda. Tühjendamiseks on peale printimisala kamber, kus pulber koguneb. Laba all ääres on kummiäär, mis liigutab pulbrit doseerimispunktist printimisalale.

Maatriksi loomisel kasutan valikute hindamiseks järgmisi kriteeriumeid:

Kiirus- Printimisel on palju tsüklilisi protsesse ja ühe töötsükli ajakulu vähendamine toob kaasa suure ajalise kokkuhoiu.

Töökindlus- tõrgete esinemisel printimisprotsessi ajal tekitab tööseisakuid, tekitab defekte või tuleb uuesti alustada printimisprotsessiga.

Hind- eelarve on piiratud ja komponentide hind on ei tohi ületada eelarvet. Kallima komponendi saab lubada teise komponendi kvaliteedi arvelt.

Hooldus- printeri remondil ja hooldusel peab iga sõlm olema eraldi monteeritav ja disainitud remonti teostavale isikule kasutajasõbralikult.

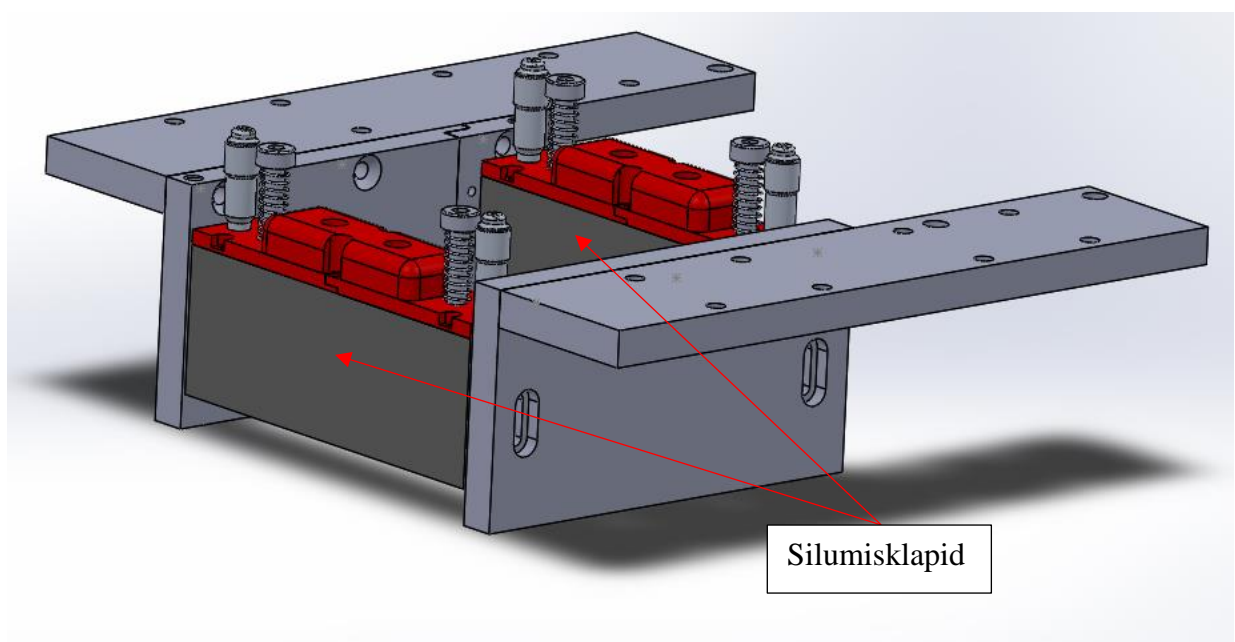
Puhastatavus/seadistamine- printimisvaheline seadistamisaeg peab olema lihtsasti teostatav, võtma vähe aega ja mitte sisaldama üleliigseid tööprotseduure.

Pulbri ühtlus- pulbri kihi moodustamisel printimisalale peab pulber olema ühtlaselt 20 mikromeetri paksusega, et tagada ühtlane struktuur detailis.

Tabel 5.2. Pulbri pindamismehhanismi maatriks

Nr	Parameeter	Kaal	Kamber		Rull		Laba	
			Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne
1	Kiirus	5	5	25	4	20	3	15
2	Töökindlus	5	5	25	3	15	4	20
3	Hind	3	3	9	5	25	4	12
4	Hooldus	3	3	9	5	15	4	12
5	Puhastatavus	5	5	25	5	25	5	25
6	Pulbri ühtlus	5	5	25	3	15	3	15
Punktisumma				118		115		99

Pulbri transpordil sai enim punkte kambri lahendus, mida kasutatakse printeri ehitamisel (vaata Joonis 5.7). Kamber on liikuva raamiga lineaarjuhkute peal, mis liigub siinil edasi-tagasi. Kambri esi ja tagaküljel on kaks silumisklappi (*sweeper*), mis vedru jõul surutakse vastu töölauda ja silindritega tõstetakse üles. Kui silumisklapp on all, transporditakse pulbri töölauale ja üleliigne pulber doseerimispunkti tagasi. Klapi all on kummitihend, mis mööda tasapinda liigub ja pulber ühtlase õhukese kihina printimisalale laotab. Tihendid on vahetatavad ja asendatakse uutega, kui on saavutatud maksimaalne kulumispiir. Klapid on reguleeritavad kahe mikrokruvikuga, et seadistada paralleelsus töölauda suhtes alumises asendis.



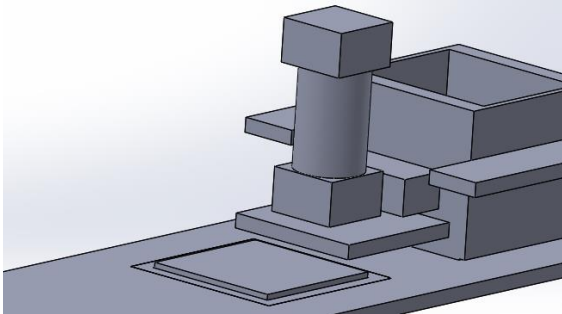
Joonis 5.7 Pulbri pindamismehhanism

### 5.3 Pulbri pressimine

Pulbri pressimine enne lasersulatust parandab prinditava detaili struktuuri. Pressimisprotsess toimub peale printimisala katmist õhukese kihi pulbriga ja enne sulatust. Pressimine peab olema mobiilne, kuna laser on printimisala kohal statsionaarne ja pulbri lisamisel on vaja alalt pidevalt üle sõita. Operatsioonide arvu vähendamiseks on mõistlik pressimise süsteem ühildada pulbri transpordi süsteemiga.

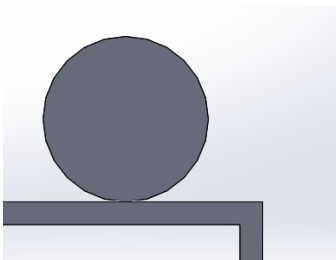
Esimene lahendus koosneb suruõhusilindrist ja pulbriga kontaktis olevast plaadist silindrivarre küljes (vaata Joonis 5.8). Peale ala katmist pulbriga liigub press printimisala

kohale ning suruõhusilindri rakendamisel pressitakse pulber tihedamaks. Silinder vabastatakse suruõhust ja plaat naaseb algasendisse, misjärel pressimissüsteem naaseb algasendisse.



Joonis 5.8 Silindriga pressimine

Teine lahendus koosneb rullist, mis veereb üle printimisala (vaata Joonis 5.9). Rull on vedruga pinge all ja vajadusel saab kruviga juurde reguleerida vedru pinget. Rull sõidab pidevalt kaasas pulbri transportsüsteemiga ja ei vaja positsioneerimist. Rull on printimisalast kitsam ja jääb ainult pulbri peale sõitma printimisalas.



Joonis 5.9 Rulliga pressimine

Kolmas lahendus põhineb vibratsioonil. Tald asetatakse pulbri peale ja vibratsiooni koosmõjul tihendatakse pulber tihedamaks.

Hindamiskriteeriumid:

Efektiivsus- pulbri pressimine peab olema ühtlane kogu alal ning andma oodatud tulemust.

Töökindlus- tõrgete esinemisel printimisprotsessi ajal tekitab tööseisakuid, tekitab defekte või tuleb uuesti alustada printimisprotsessiga.

Hind- eelarve on piiratud ja komponentide hind on ei tohi ületada eelarvet. Kallima komponendi saab lubada teise komponendi kvaliteedi arvelt.

Hooldus- printeri remondil ja hooldusel peab iga sõlm olema eraldi monteeritav ja disainitud remonti teostavale isikule kasutajasõbralikult.

Puhastatavus/seadistamine- printimisvaheline seadistamisaeg peab olema lihtsasti teostatav, võtma vähe aega ja mitte sisaldama üleliigseid tööprotseduure.

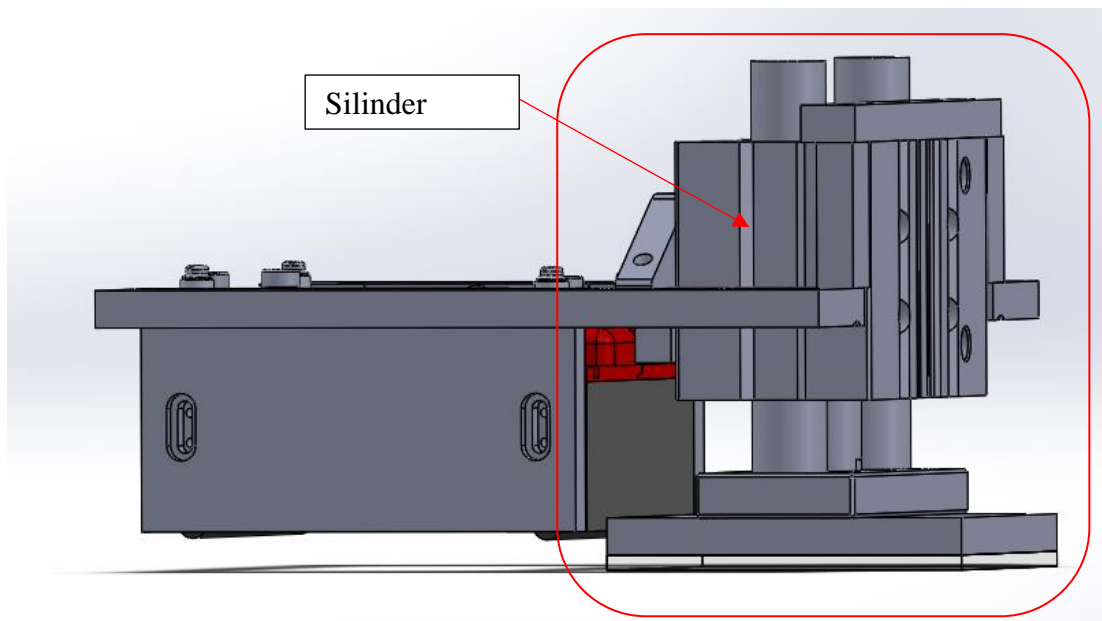
Kiirus- lühike tsükliäeg annab suurte korduste korral suure ajavõidu ja kiirendab oluliselt detaili valmimise aega.

Tabel 5.3. Pulbri pressimismaatriks

Nr	Parameeter	Kaal	Press		Rull		Vibratsiooniga plaat	
			Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne
1	Efektiivsus	5	5	25	4	20	4	20
2	Töökindlus	5	5	25	4	20	4	20
3	Hind	2	4	8	5	10	3	6
4	Hooldus	3	4	12	5	15	4	12
5	Puhastatavus	5	5	25	5	25	4	20
6	Kiirus	5	4	20	5	25	4	20
Punkti summa				115		115		98

Pressimissõlmel said press ja rull võrdselt punkte. Rulli pressimisvõime ei ole alati ühtlane ja võib seadme töös tekitada tõrkeid, seega eelistan silindriga pressimist, kus saab muuta pressimisjõudu surve muutmisega. Silinder on kinnitatud lineaarjuhkute külge ja liigub kaasa, kui pulbrit printimisalale viiakse. Kui üleliigne pulber eemaldatakse, jääb silinder printimisala kohal seisma ja tihendab töölauale laotatud pulbri.





Joonis 5.10 Pressimissõlm

## 5.4 Printimisaluse liigutamine

Detaili kasvatamine kihtidena kasvab detaili kõrgus, aga laseri fookus on seatud töölauda kõrgusele. Selleks peab iga kihi järel töölauda langetama kihipaksuse võrra. Antud sõlm peab taluma pressimise koormust ja tagama piisava täpsuse.

Esimene lahendus koosneb suruõhusilindrist ja positsioneerimisandurist. Silindrist lastakse välja sobiv kogus õhku, et tasapind langeks 20 mikronmeetri võrra. Silindri vars on jäigalt printimisaluse küljes ja teine osa kinnitub korpuse külge.

Teine lahendus koosneb Kuulkruvist ja sammootorist. Sammootori liikumisel teatud nurga korral langeb tasapinna kõrgus vastavalt pöördenurga suurusele. Kruvi keerme osa on risti printimisalusega ja ühendatud omavahel jäigalt. Mutter on liikuv osa, mis toetub laagritele ja sammootor liigutab mutrit rihmülekanega.

Kolmas lahendus põhineb hammasvöö, kus sammootor ajab ringi hammasratast teatud nurga võrra. Hammasvöö on printimisaluse küljes ja sammootor asub ülekanega korpuse küljes.

Hindamiskriteeriumid:

Täpsus- peab tagama pulbrikihi paksuse võrra liikumissammu.

Töökindlus- tõrgete esinemisel printimisprotsessi ajal tekitab tööseisakuid, tekitab defekte või tuleb uuesti alustada printimisprotsessiga.

Hind- eelarve on piiratud ja komponentide hind on ei tohi ületada eelarvet. Kallima komponendi saab lubada teise komponendi kvaliteedi arvelt.

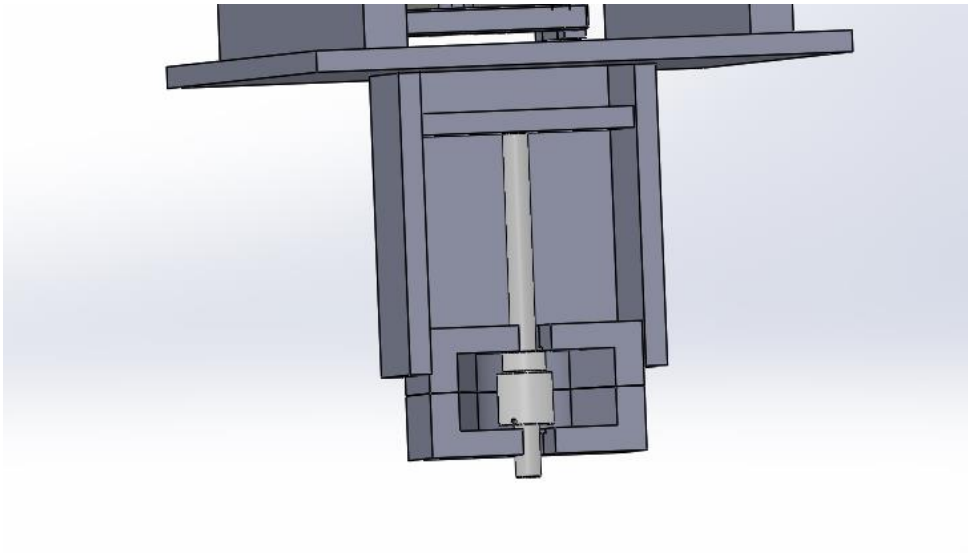
Hooldus- printeri remondil ja hooldusel peab iga sõlm olema eraldi monteeritav ja disainitud remonti teostavale isikule kasutajasõbralikult.

Puhastatavus/seadistamine- printimisvaheline seadistamisaeg peab olema lihtsasti teostatav, võtma vähe aega ja mitte sisaldama üleliigseid tööprotseduure.

Tabel 5.4. Printimiseluse liigutamismatriks

Nr	Parameeter	Kaal	Silinder		Kuulkruvi		Hammasvöö	
			Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne	Hinne	Kaalutud Hinne
1	Täpsus	5	3	15	5	25	4	20
2	Töökindlus	5	4	20	5	25	5	25
3	Hind	4	4	16	4	16	5	20
4	Hooldus	4	5	20	5	20	4	16
5	Puhastatavus	5	5	25	5	25	4	20
Punktisumma				96		111		101

Kuulkruvi kasutamisel on võimalik tagada suure täpsusega printimiseluse liigutamine (vaata Joonis 5.11). Kuulkruvi on jäigalt ühendatud printimiseluse külge. Kuulkruvi mutter kinnitatakse laagripukiga ja lisatakse rihmaratas rihmülekanne loomiseks sammootoriga.

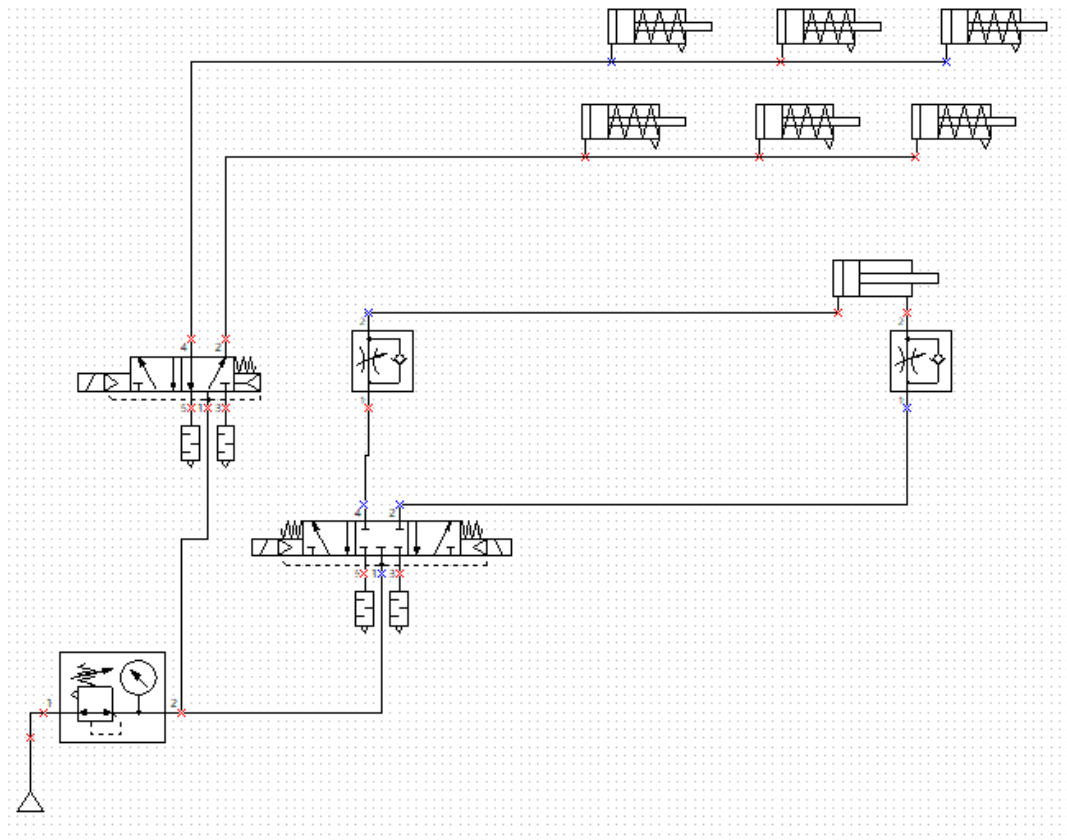


Joonis 5.11 Printimisala langetamine

## 6. PNEUMOSÜSTEEM

### 6.1 Pneumoskeem

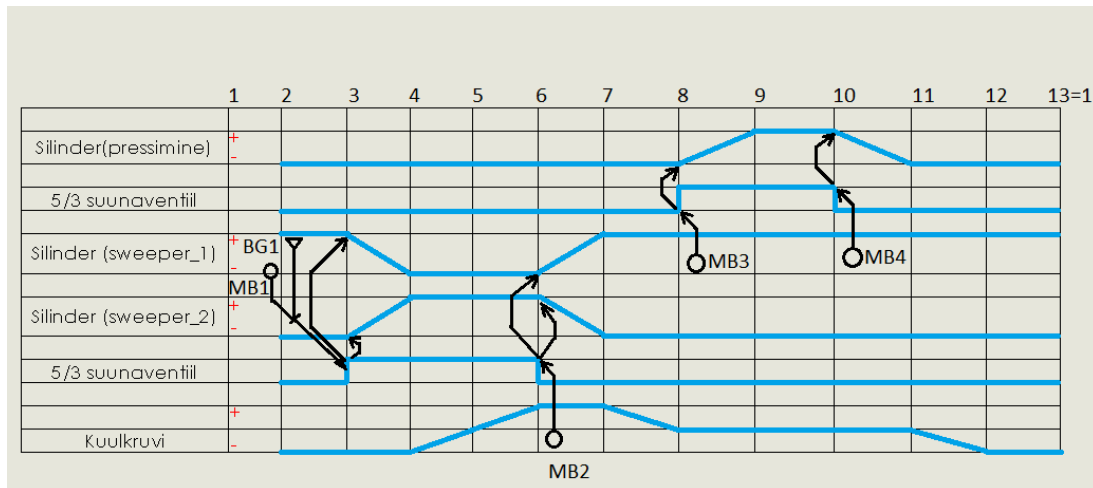
Pneumoskeem koosneb ühest pressimissilindrist ja kuuest silumisklapi silindrist (vaata Joonis 6.1). Üks silumisklapp koosneb kolmest väikse mõõtudega ühepoolse toimega silindrist. Pressimissilindri liikumiskiirust muudetakse vastuklapiga reguleerimisdrosseliga, mis on vahetult enne silindrit. Drosseleid on kaks ja on vastassuunalised, et reguleerida mõlemas suunas silindri kiirust. Silindreid juhitakse 5/3 suunaventiilidega. Silumisklapi kolm silindrit liiguvad koos ja kaks silumisklappi liiguvad sünkroonis. Kui üks silumisklapp on all, siis teine silumisklapp on üleval. Suunaventiilid on elektromagnet juhtimisega. Suruõhu ettevalmistusplokk eemaldab liigse niiskuse ja abrasiivosakesed. Suruõhu toide võetakse suruõhutrassist, kus õhust on juba eelnevalt eemaldatud niiskus ja tolm. Juhtimine on käsitsi ja algasendi fikseerimiseks on kontrolllüliti. Pneumoskeemi koostas PneuDraw tarkvaraga.



Joonis 6.1 Pneumo skeem

## 6.2 Sammdiagramm

Sammdiagrammil on kujutatud pressimissilindri, silumisklapi silindrite ja kuul kruvi omavahelist tööd (vaata Joonis 6.2). Sammmootori ja kuul kruvi mehhanismiga liigutatakse pulbri pindamismehhanism vajalikku kohta. Silumisklapid viivad pulbri printimisalale ja eemaldavad üleliigse pulbri. Pressimine toimub vahetult enne pulbri pindamismehhanismi algasendisse naasmist.



Joonis 6.2 Sammdiagramm

## 7. ARVUTUSED

### 7.1 Pulbri pressimissilindri dimensioneerimine

Katsete tulemusena on pulbri pressimisjõuks saadud 80 kg 100x100 mm plaadile, mis teeb 8000kg/m<sup>2</sup>. Leian sobiva silindri, mis suudab pressida piisava jõuga. Pressimisplaat ei tohi pöörelda ümber silindrivarre telje ja pressimisel peab tagama piisava täpsuse vältimaks pressimist konstruktsiooni ääre peale. Valin kahepoolse silindri ja teostan vajalikud arvutused. Rõhk süsteemis on 6 bar ehk 0,6 MPa ja saavutatav jõud on 800N. [1]

Kahepoolse toimega silindri positiivses suunas teoreetiline jõu arvutan järgmise valemiga [16]:

7.1

$$F_{teor}^+ = p * \frac{\pi * D^2}{4}$$

p- rõhk süsteemis, MPa;

D- silindri kolvi läbimõõt, mm;

Avaldan valemist silindri läbimõõdu [16].

7.2

$$D = \sqrt{\frac{4 * F_{teor}^+}{\pi * p}} = \sqrt{\frac{4 * 800}{\pi * 0,6}} = \sqrt{41,2} = 32,6 \text{ mm}$$

Silindri standardsed kolvi läbimõõdud on 32, 40, 50 mm.

Valin lähima suurima arvu standardsest, milleks on 50 mm.

Kontrollin koormustegurit, kus teoreetiliselt arendatav jõud peab olema suurem, kui rakendusest tulenev jõud. Kontrollitud koormustegur peab olema vahemikus 0,5-0,7 [16].

7.3

$$L_o = \frac{F_{vajalik}}{F_{sil\_teor}}$$

$$F_{vajalik}^+ = p * \frac{\pi * D^2}{4} = 0,6 * \frac{\pi * 50^2}{4} = 1177,5 \text{ N}$$

$$Lo = \frac{800}{1177,5} = 0,68$$

Koormustegur jääb soovitud piirkonda ja valitud silindrikolvi läbimõõt vastab nõuetele.

## 7.2 Pulbri pindamismehhanismi silindri dimensioneerimine

Silumisklapp on tavaolekus vedru survega alumises asendis ja all servas olev kummiriba toetub tasapinnale. Silindrite rakendumisel tõstetakse silumisklapp üles. Korraga on alumises asendis silumisklapp, mis asub liikumissuunas taga pool. Kui õige kogus pulbrit on doseeritud, viiakse pulber doseerimispunktist printimisalale. Seejärel muudetakse silumisklapi asendeid ja eemaldatakse üleliigne pulber doseerimispunkti. Ühel silumisklapil on kolm ühepoolset silindrit. Silindrite mõõdud on väikesed, seega valin maksimaalsed mõõtmed, mida saab kasutada antud konstruktsioonis. Silindri kolvi läbimõõt on 6 mm ja rõhk süsteemis on 6 bar ehk 0,6 MPa.

Ühepoolse toimega silindri positiivses suunas teoreetiline jõu arvutan järgmise valemiga [16]:

$$F_{teor}^+ = p * \frac{\pi * D^2}{4}$$

,kus

p- rõhk süsteemis, MPa;

D- silindri kolvi läbimõõt, mm;

$$F_{teor}^+ = 0,6 * \frac{\pi * 6^2}{4} = 16,96 \text{ N}$$

Üks silinder tekitab jõudu 16,96 N, kolm silindrit tekitavad jõudu ligikaudu 50 N. Valin koormusteguriks 0,7 ja läbi korrutades jääb jõuks 35 N.

### 7.3 Gaasikulu arvutus

Olenevalt printitava detaili keerukusest kulub ühe kihi printimiseks minimaalselt 10 sekundit, minutis kuus tsüklit. Pressimissilinder on kahepoolse toimega ja ühe tsükliga tarbib mõlemal suunal liikudes gaasi. Ühepoolsed silindrid tarbivad ainult positiivses suunas liikudes gaasi. Algasendisse naasevad vedru toimetel. Arvutan gaasikulu [16]:

7.5

$$Q = 2 \frac{\pi * D^2}{4} H * n * \frac{p + p_{atm}}{p_{atm}} = 2 \frac{\pi * 4^2}{4} * 2,5 * 6 * \frac{0,6 + 0,1}{0,1} = 971,9 \frac{cm^3}{min} = 0,1 \frac{l}{min}$$

p- rõhk silindris, MPa

$p_{atm}$ - ümbritseva õhu rõhk, 0,1MPa

n- käikude arv

H- kolvikõigu pikkus, cm

D- kolvi läbimõõt, cm

Kontrollimisel selgus, et pressimissilindri gaasikulu on väike ja silumisklapi silindrite gaasikulu ei ole otstarbekas arvutada.

### 7.4 Vedrude valik pulbri pindamismehhanismile

Vedru ülesanne on hoida klappi alumises tööasendis. Puhkeasendis suruvad silindrid silumisklapi üles. Silumisklapi raskus on 300 g ehk 3N. Et tekiks piisav hõõrdejõud pulbri transportimiseks, korrutan massi neljaga, mis on saadud katsetamise tulemustel. Kuna vedrusid on kaks, siis jagan jõu kahega, ehk 6 N . Vedru ei tohi olla tugevam, kui silindrite poolt avaldatud jõud, mis on 35 N. Silindrid tekitavad klapile jõudu 3,5 kg. Vedrusid on kaks



tükki, et tagada konstruktsiooni stabiilsus. Vedru nõutav varutegur on  $[S]=1,5$ . Valin Alas-kuul kodulehelt sobivate parameetritega survevedru ja kontrollin vedru tugevust. Valin Mehaanikainseneri käsiraamatust lk 285 Silindrilised surve-keerdvedrud survevedru traadi läbimõõt  $d=0,5\text{mm}$ , vedru keskläbimõõt  $D_m=6,3\text{mm}$ , koormamata vedru pikkus  $L_f=13,5\text{mm}$ . Vedru suurim lubatav koormus on  $6,6\text{ N}$ , mis on suurem klapi raskusjõust. Alas-kuul kodulehelt leian lähima vedru  $d=0,75\text{mm}$ ,  $D_m=6\text{mm}$ ,  $L_f=15\text{mm}$ . [17]

Esmalt leian vedru kõverusindeksi: [18]

7.6

$$C = \frac{R}{c}$$

$R=D_m/2$  telje kõverusraadius, mm

$c$ = vedru sisepunktide kaugus vedrutraadi teljest, mm: [18]

$$C = \frac{R}{c} = \frac{2R}{D_m} = \frac{2 * 3}{0,5} = 3$$

Ümartraadi korral ohtlikud punktid keeru sisepinnal nihkepingete kontsentratsiooni näitab Wahl'i tegur: [18]

7.7

$$K_W = \frac{4C + 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} = \frac{4 * 3 + 1}{4 * 3 - 4} + \frac{0,615}{3} = \frac{13}{8} + \frac{0,615}{3} = 1,83$$

Ümarristlõikega keerdvedru ristlõike sisepunktis mõjuva kohaliku suurima nihkepinge väärtuse saab arvutada valemiga: [18]

7.8

$$\max \tau = K_W \frac{T}{W_p} = 1,83 * \frac{6 * 0,003}{0,08} = 411,8 \text{ MPa}$$

$W_p$ - polaartugevusmoment

$T=F \cdot R$ - väändemoment

$F$ - keerddvedru telje sihil mõjuv jõud

$R$ - vedrutraadi kõverusraadius

Polaartugevusmomendi arvutan järgmise valemiga: [18]

7.9

$$W_p = \frac{\pi * D^3}{16} = \frac{\pi * 0,75^3}{16} = 0,08 \text{ mm}^3$$

$D$ - survevedru traadi läbimõõt

Materjali piirpingeks nihkel on tinglik voolepiir: [18]

7.10

$$\tau_{lim} = \tau_{0,2} = 800 \text{ MPa}$$

Vedru tugevusvaruteguri väärtuseks on: [18]

7.11

$$S = \frac{\tau_{0,2}}{\max \tau} = \frac{800}{411,7} = 1,94 > [S] = 1,5$$

Antud tulemus rahuldab etteantud tingimusi. Vedru jõud piisav hõõrdejõu tagamiseks. Silindrite poolt avaldatav jõud 35 N on oluliselt suurem, kui 6 N ja vedru tugevus ei ületa silindri jõudu.

## 7.5 Pulbri doseerimiskogus

Pulbri kogus ühes kihis on 200 mm<sup>3</sup>. Valin vööri läbimõõduks 20 mm. Vööri pinnale puuritakse avad, mis täidetakse pulbriga. Avad on poolkera kujuga ja nende läbimõõduks võtan 1; 1,5; 2 mm.

Leian poolkera ruumala: [16]

7.12

$$\frac{V}{2} = \frac{4 * \pi * r^3}{2 * 3}$$

$r$  - raadius

Nende ruumalad on 2,2; 7,13; 16,7 mm<sup>3</sup>.

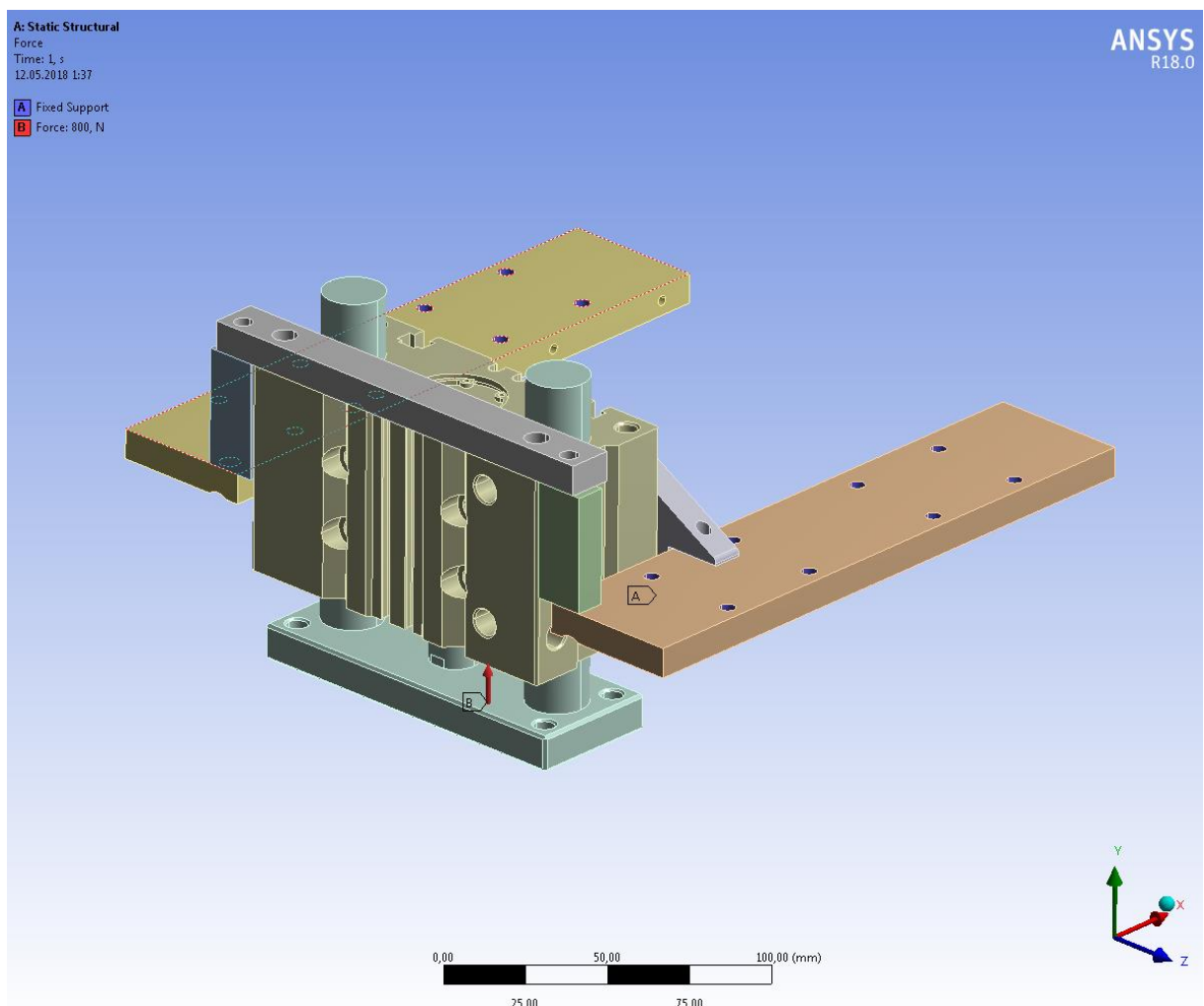
Ühes kihis on 200 mm<sup>3</sup> pulbrit. Rulli peal on ühes reas viis pesa. Valin pesa läbimõõduks 2 mm, mille ruumala on 16,7 mm<sup>3</sup>. Ühe rea ruumala on 83,5. 20 mm võllile mahub 18 rida ja ühe rea pöördenurk on 20 kraadi. Sammmootori pöördenurga täpsus on alla kahe kraadi ja vastab antud ülesandele. Pulbrit lisatakse teatud kordade järel, et vältida pulbri üle doseerimist.

## 8. SILINDRIRAAMI ANALÜÜS

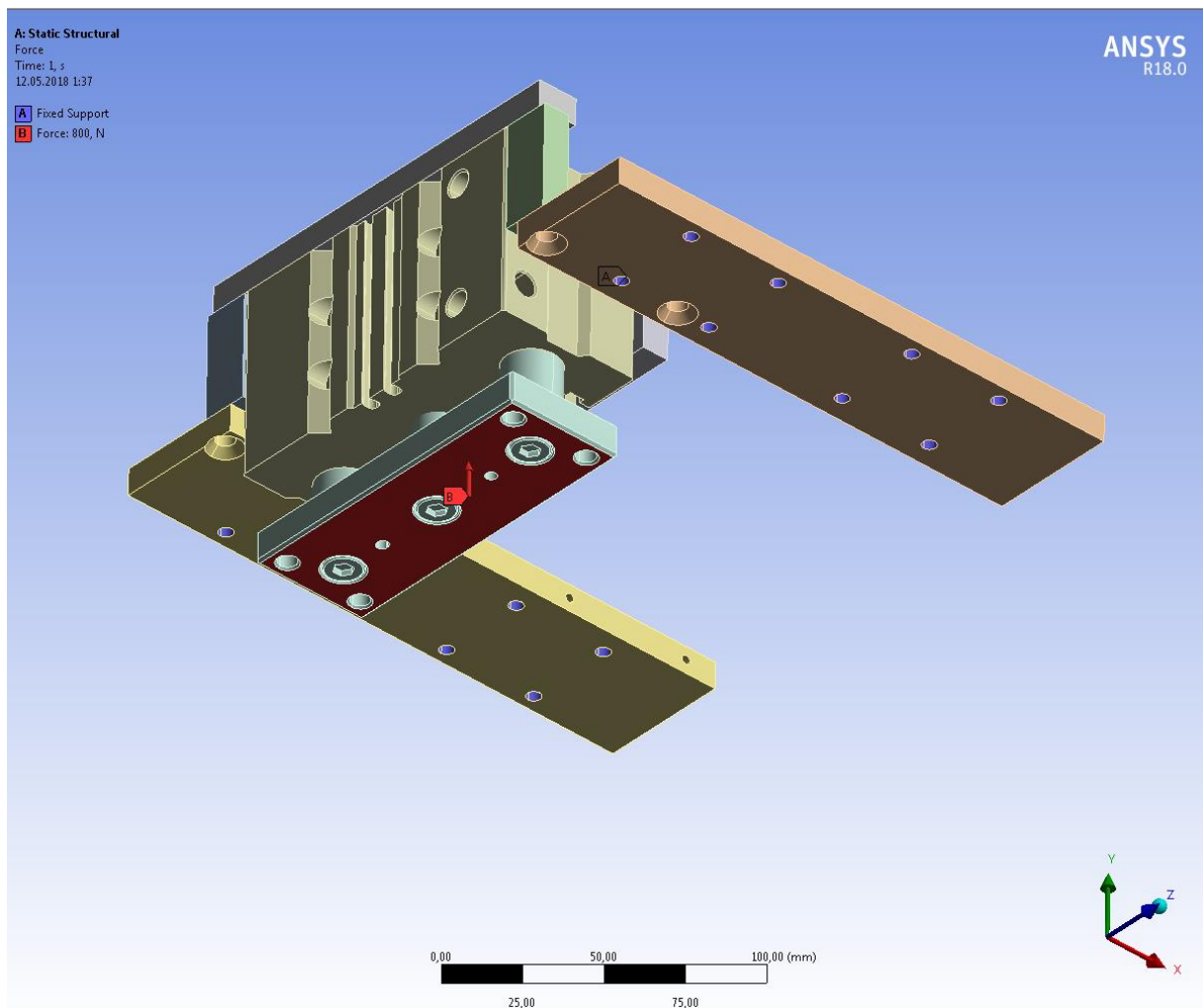
Silindril on kinnitamiseks neli keermestatud ava tagaküljel ja üleval samuti neli keermestatud ava. Kinnitades tagaküljel olevate avade kaudu silindri liikuva raami külge, tekib jõuõlg. Pressimisel on oluline pressimisplaadi paralleelsus printimistasapinnaga. Seega lisan lisaraami teisele poole silindrit, mille kinnitan kahe poldiga (vaata Joonis 8.1). Silindrile mõjuv jõud on 800 N (vaata Joonis 8.2) ja liikuv raam on kinnitatud juhikute külge. Kokku on neli juhikut ja igal juhikul on neli kinnitusava. Teen liikuvale raamile tugevusanalüüsi.

### Analüüsi ülesehitus:

- 16-st poldi avast fikseerisin koostu – kasutades *Ansys Fixed Support*'i
- Jõu määrasin silindrivarre pinnale suunaga +Y telje suunas,  $F=800\text{N}$



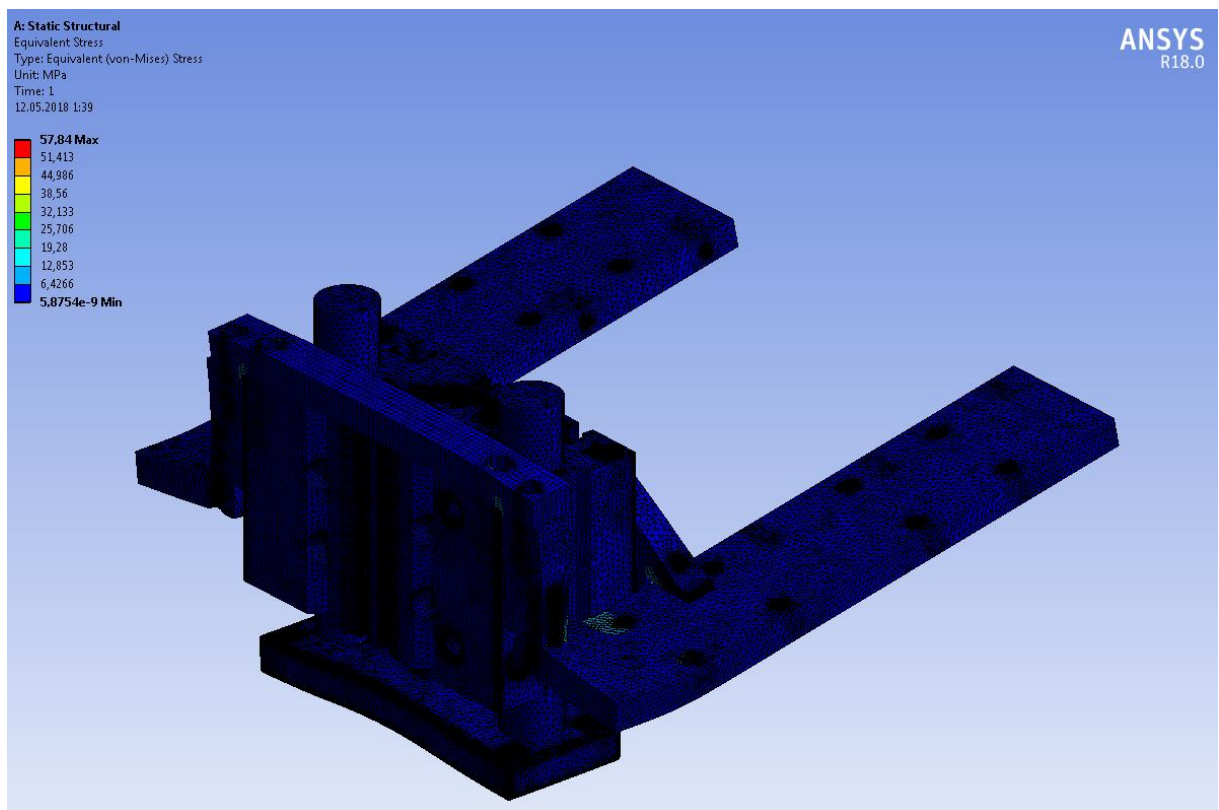
Joonis 8.1 Detaili fikseerimine



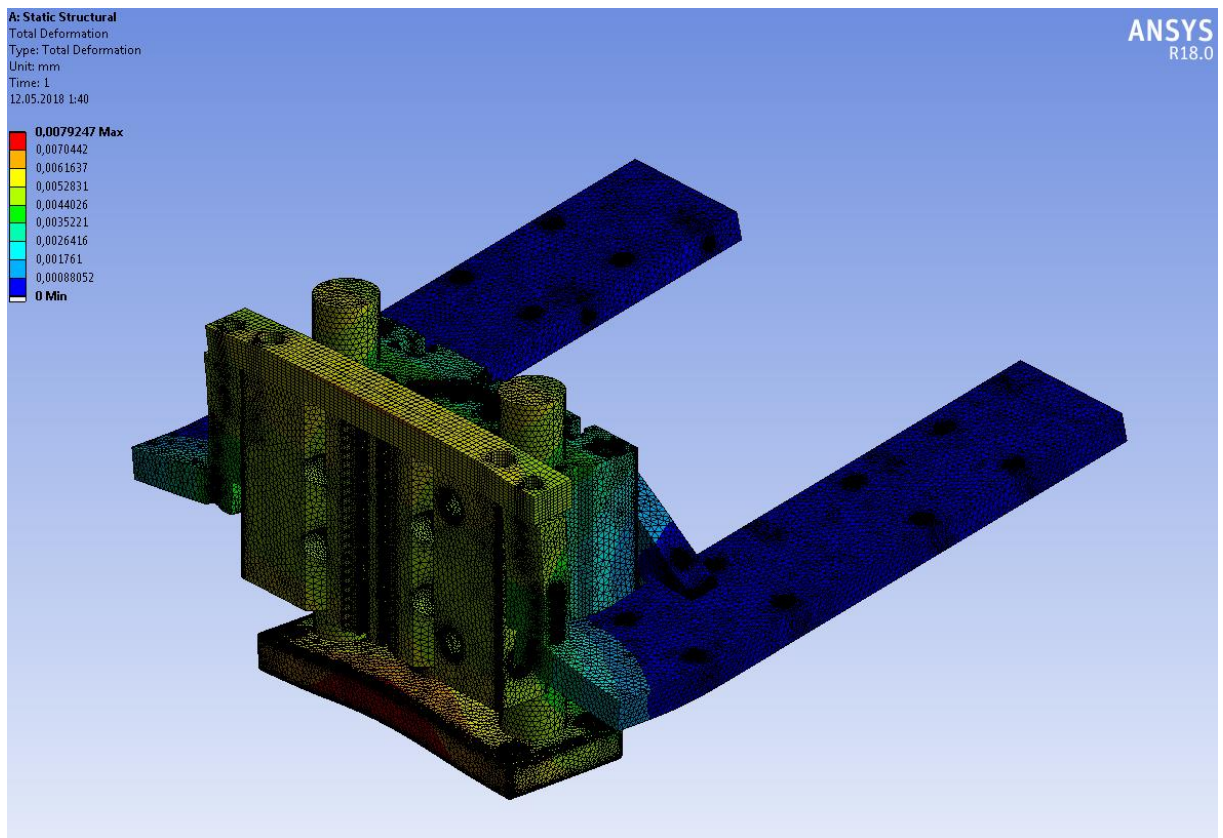
Joonis 8.2 Jõu määramine

## Tulemus:

Tulemusel hindasin *Equivalent Stress* (von-Mises) ja *Total Deformation*it. Antud lahendus peab vastu etteantud koormuse suure varuga. Maksimaalne pinge on 58 MPa (vaata Joonis 8.3) ja deformatsioon 7 mikromeetrit (vaata Joonis 8.4). Antud konstruktsiooni on võimalik oluliselt optimeerida, aga pulbri kogunemine printimissõlmedele seab piiranguid konstruktsioonile. Lisa töötlemine on ajakulukas, mistõttu kasutatakse olemasolevaid materjaliprofiile.



Joonis 8.3 *Equivalent stress*



Joonis 8.4 Total deformationit

## 9. DETAILIDE LÕIKAMINE

Detailid lõigatakse välja 10 mm paksust alumiiniumlehest, mille väljalõikamiseks kasutatakse vesilõikust. Tabelis on välja toodud detaili nimetus, gabariitmõõtmed ja kogus (vaata Tabel 9.1). Detailidest on tehtud lõikepingi jaoks DWG formaadis failid, mis edastatakse firma e-posti aadressile.

Tabel 9.1

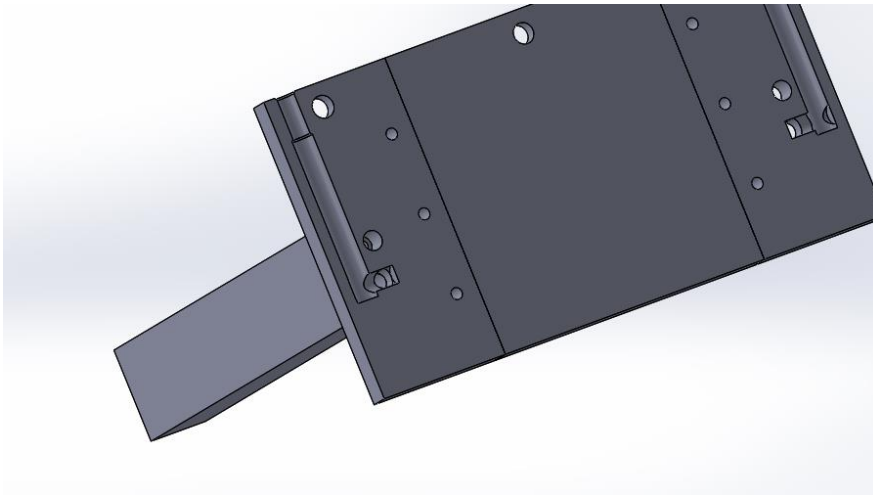
Detail	Mõõdud	Kogus
Töölaud	620x250	1
Printimiskambri sein 2	150x100	2
Printimiskambri sein 2	150x120	2
Printimisalus	100x100	1
Pressimisplaat	98x98	1
Silindri tagaplaat	168x45	1
Juhikute kinnitusplaat	200x47	2
Silumisklapi küljeplaat	120x65	1
Silumisklapi küljeplaat astmega	80x65	1



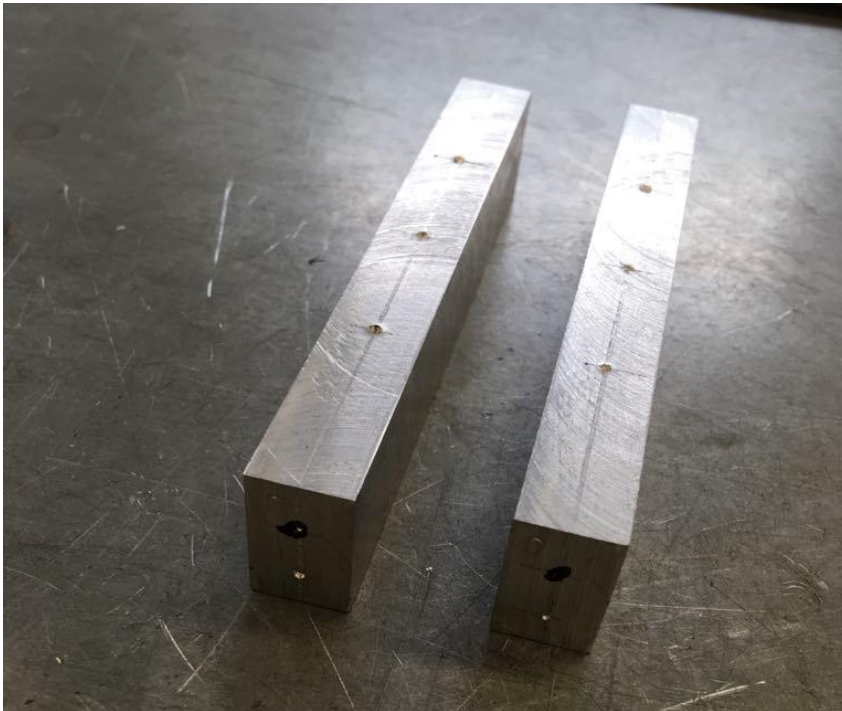
## 10. PRINTERI EHITAMINE

Printeri ehitamisel kasutati töökojas olemasolevaid seadmeid. Kasutada oli freespink, treipink, lintsaag ja puurpink. Materjal telliti Ossmet OÜ-st, kes lõikas vesilõikusega vajalikud detailid kiiresti välja 10 mm tahvlist. Materjaliks valiti EN AW 6082, mis on hea lõiketöödeldavusega ja keevitatavusega ning kergkonstruktsioonides kasutatav oma massi poolest. Tellitud detailidele sai lõikepingis märgitud avade asukohad, et vältida mõõtmisest tulenevaid eksimusi.

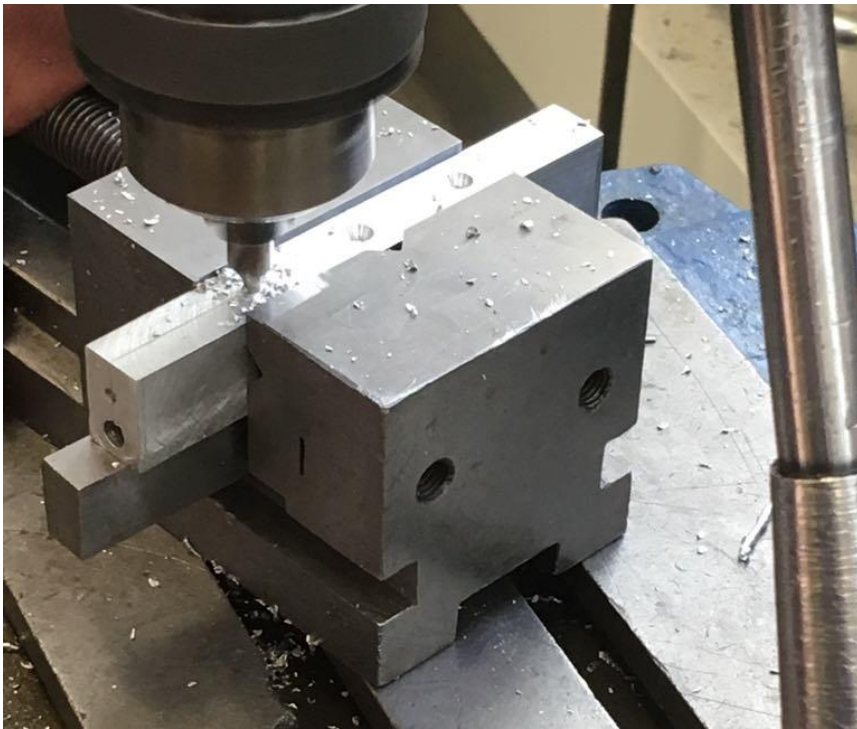
Printeri ehitamist alustati pulbri pindamismehhanismist. Kuna silindrid kinnitatakse silumisklapi sisse, siis ruum on piiratud. Silindrite õhutorud ei tohi jääda ette laserile ega teistele komponentidele. Õhutorud said kinnitatud küljeplaadile (vaata Joonis 10.1) ja silumisklapi hoidjale projekteeriti õhukanal. Küljeplaadi kinnitamiseks silindriraami külge kasutati poltliidet. Algud freesiti silindriraami välispinnad vastavasse mõõtu. Seejärel märgiti avade asukohad kärniga (vaata Joonis 10.2). Enne puurimist puuriti tsentripuuriga avad ette (vaata Joonis 10.3). Keermestatud avadele valiti sobiv keermeava puuri läbimõõt Masinamehaanika käsiraamatus lk 240. Õhukanal silindriraamile on pikk ja kanali puurimisel kasutati kruustange vältimaks kanali puurimist tsentrist kõrvale (vaata Joonis 10.4). Küljeplaadi kanali jaoks oli ruumi vähe ja puurimisega kanalite tegemine oli keeruline, mistõttu otsustati printida vajalikud detailid (vaata Joonis 10.5, Joonis 10.6). Kuna mudel oli juba olemas, siis kanali tegemine mudelis võttis vähe aega. Samas sai mudelis teha muudatusi ja valida optimaalsed mõõdud ja asukohad detailidele. Prinditud detailidelt tuleb eemaldada tugivõrestik (vaata Joonis 10.7) ja üle töödelda baaspinnad. Kanal kulgeb mööda kahte detaili ja kahe detaili vahele lisatakse keermeliimi, et tagada õhukanali tihedus. Pulpri silumisklapi pealmised katted sai samuti prinditud seest tühjad. Freesimine oli liiga ajakulukas ja sel hetkel oli pink töös. Keermestamine toimus puurmingis, kus padrunit keerati käsitsi, tagamaks ava ristsus tasapinnaga. Detailide liitmisel kasutati keermestatud liiteid hoolduse ja remondi lihtsamaks läbiviimiseks. Kasutati peitpeaga polte, et poldipead ei jääks välja. See aitab kokku hoida ruumi ja muudab puhastamise lihtsamaks. Viimasena lisati vedru ja minikruvik (vaata Joonis 10.8) enne printimisprotsessi algust silumisklapi paralleelsuse seadistamiseks (vaata Joonis 10.9).



Joonis 10.1 Kanali ristlõige



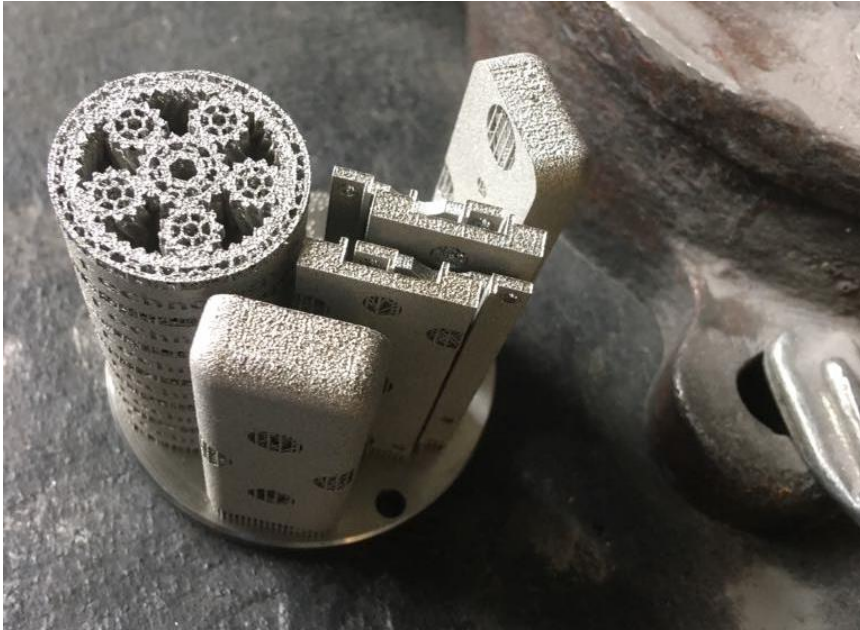
Joonis 10.2 Avade märkimine



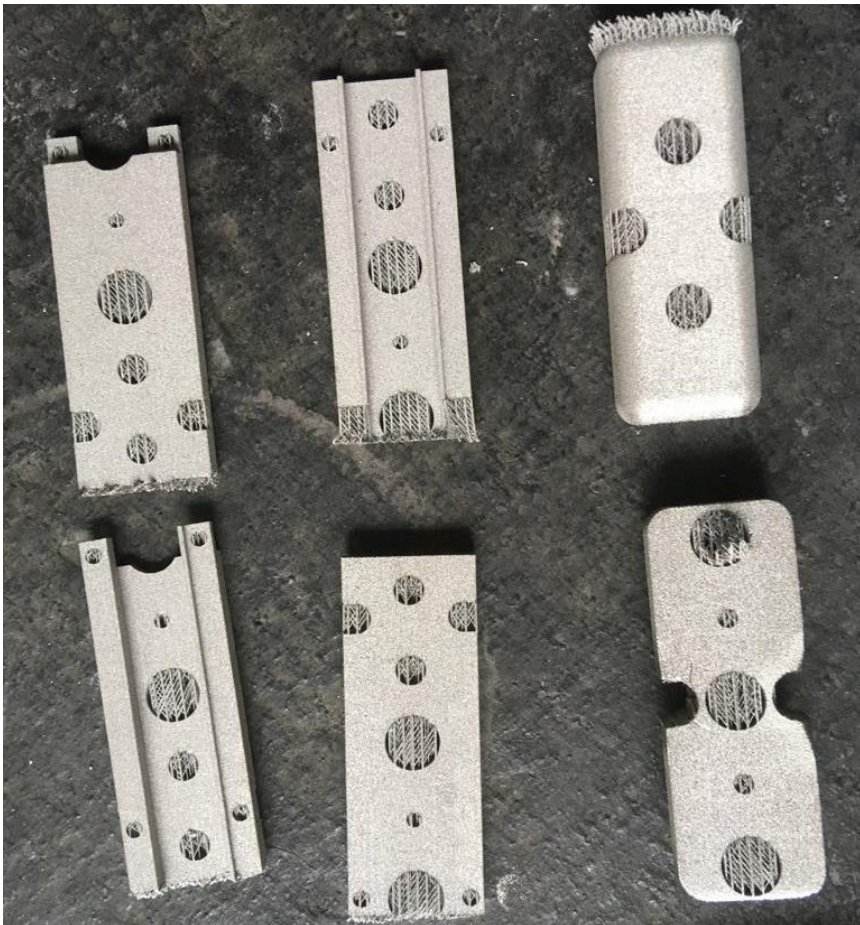
Joonis 10.3 Tsentripuuriga puurimine



Joonis 10.4 Keermestamine



Joonis 10.5 Prinditud detailid alusel



Joonis 10.6 Prinditud detailid aluselt eemaldatud

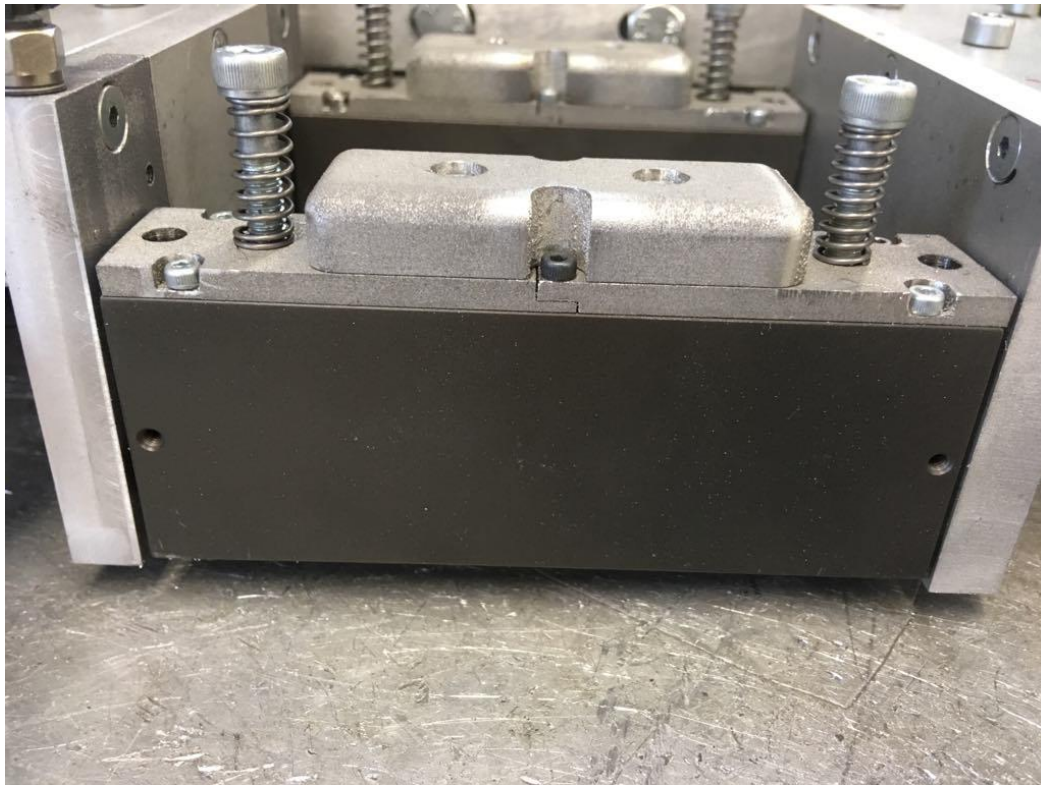




Joonis 10.7 Võrestiku eemaldamine



Joonis 10.8 Minikruvik silumisklapi paralleelsuse seadistamiseks



Joonis 10.9 Silumisklapp

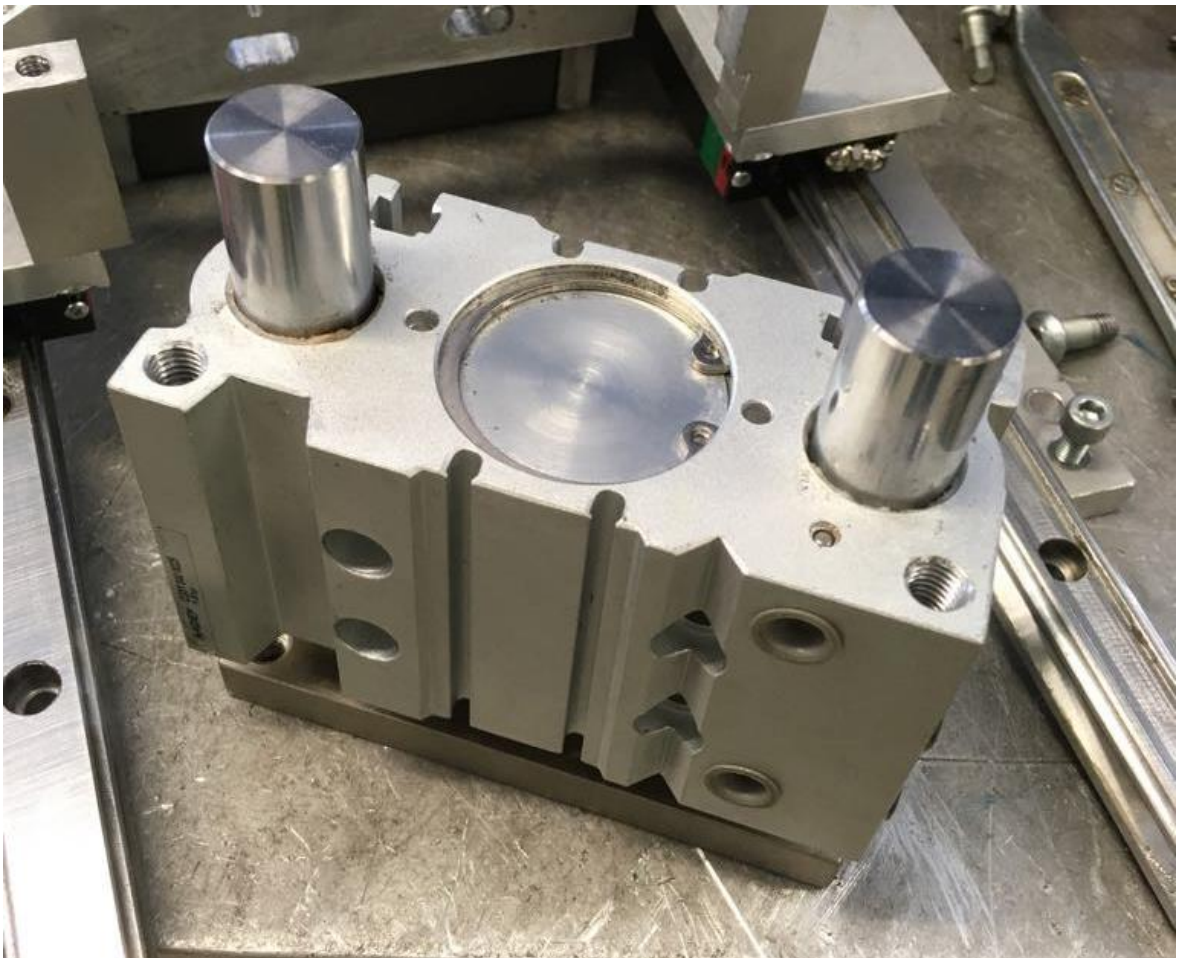
Pulbri pressimise sõlm asub silumisklapi ees ja liigub koos kaasa. Silindri kinnitamisel kasutati vesilõikusega välja lõigatud spetsiaalse kujuga tagaplaati (vaata Joonis 10.10), kus on silindri kinnitusavad sisse märgitud. Kinnitusavad on üle töödeldud. Eespool kasutati kahte sammast ja nende peale toetuvat tala. Silindril on olemas kaks tihvtiava, mille abil silinder koostamisel samasse asendisse jääb. Silindri tihvti avadesse sai treitud märkimistihvtid, mis asetati pessa. Seejärel asetati peale silindri tagumine kinnitusplaat ja haamriga koputades märgiti plaadile täpsed tihvtiava asukohad (vaata Joonis 10.11).

Kambri koostamisel arvestati kokkupanemisel paralleelsuse tagamist. Nelja plaadi koostamisel kasutati poltliiteid. Üks külg kinnitati kummalgi poolt peitpea poltidega, teine külg tavaliste sise-kuuskantpoltidega. Avade puurimisel kasutati töövahendeid ristsuse tagamiseks (vaata Joonis 10.12, Joonis 10.13) Pea peitmise jaoks freesiti pesad sobiva sügavusega (vaata Joonis 10.14). Seejärel freesiti langetusalus, mis freesiti 0,2 mm väiksem kambri mõõdust. Langetusalusele freesiti keskele ümar ava, millega kinnitati külge. Kuulkruvi mutter kinnitati laagrite abil pukki ja pukk kinnitati kambri alumisse äärde (vaata Joonis 10.15). Pulbri doseerimisel kasutati võlli, mis treiti 20 mm peale. Seejärel märgiti avade asukohad ja puuriti pesad pulbri doseerimiseks. Pulbri mahuti koostamisel kasutati keevitamist. Pulbri pressimissõlm koos printimisalus ja silumisklappidega on toodud välja joonisel 10.16.





Joonis 10.10 Silindri tagaplaat

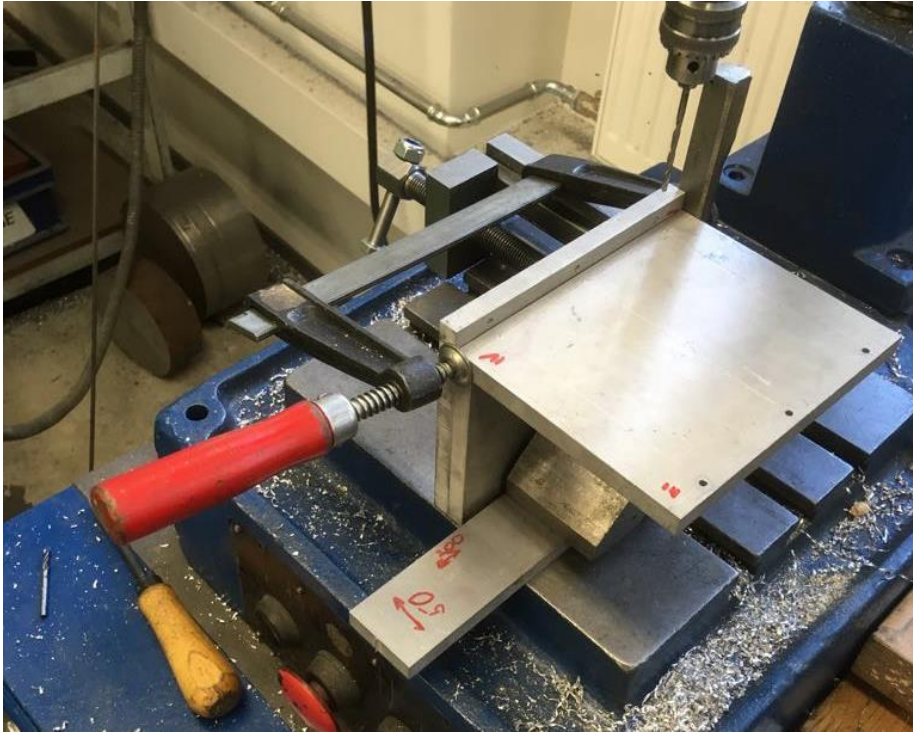


Joonis 10.11 Pressimissilinder



Joonis 10.12 Kambri puurimise ettevalmistus

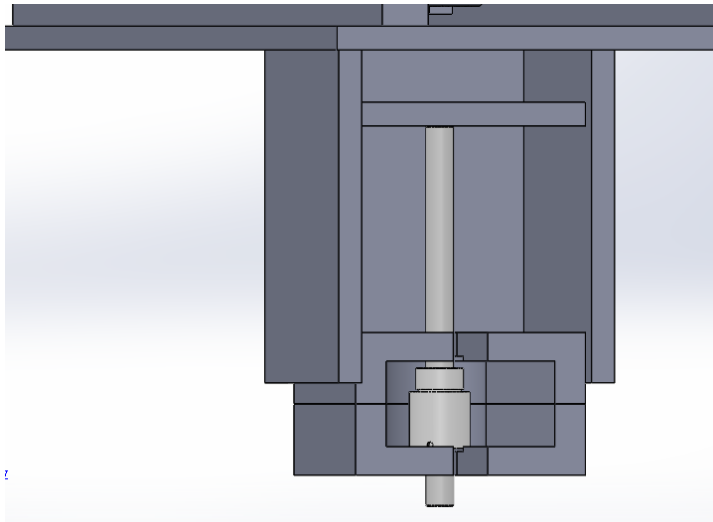




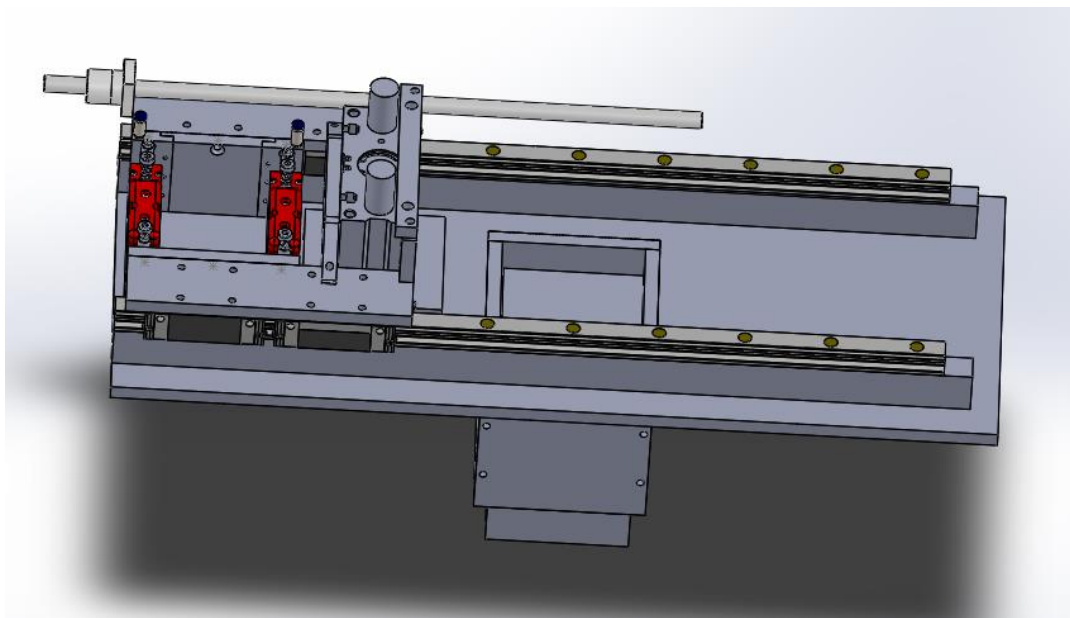
Joonis 10.13 Kambri puurimine



Joonis 10.14 Printimisaluse langetus kamer



Joonis 10.15 Printimiskamber



Joonis 10.16 Pulbri pressimissõlm koos printimisaluse ja silumisklappidega

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli projekteerida selektiivlasersulatusseadme pressimissõlm, tuua välja erinevate lahenduste eelised ja puudused ning kohandada teised sõlmed tihendamisvõimaluse kasutamiseks. Teemaga tutvumiseks sai alustatud patendiuuringust ja konkurentsianalüüsist, mis andsid ülevaate hetkel olemasolevatest seadmetest ja erinevate sõlmede lahendustest. Seni on kasutatud rulliga pulbri pressimist. Katse-tulemusi hinnates pole see lahendus piisav pulbri tihendamiseks. Pulpri pressimissõlme valikul kasutasin kahepoolse pneumosilindriga pressimist, millega saab muuta pressimisjõudu surve reguleerimisel. Pulpri doseerimisel kasutasin pesadega silindrilist võlli, mis pöörleb silindrilise toru sees. Selline süsteem muudab pulbri vahetuse kiiremaks ja puhastamise lihtsamaks. Pulpri transport doseerimispunktist printimisalusele kasutasin olemasolevat lahendust, kuna senise aja jooksul pole esinenud tõrkeid antud süsteemis. Muudetud sai liikumise trajektoori, enne liikus pulber poolringi kujuliselt, nüüd sirgjooneliselt. Printimisaluse langetamise valisin kuulkrui kasuks, kuna on võimalik tagada täpsus 20 mikromeetrit, kannatab pressimisjõudu ja on lihtsasti konstrueeritav.

Turu-uuringu järel valmis esimene mudel printerist, mis erines oluliselt lõpplahendusest. Turul pakutavad lahendused erinevate sõlmede teostamisel ja nende hind olid üheks põhilisteks kriteeriumiteks. Samas pidi tagama töökindlad lahendused sõlmedele, kuna iga tõrge printeris võib tekitada defekte prinditavas detailis või hoopis seistada printimisprotsessi ning printimist tuleb uuesti alustada.

Printeri ehitusel oli kasutada TTÜ Pulbermetallurgia labori töökoda, kus teostati vajalikud tööoperatsioonid. Materjaliks valisin EN EW 6082, mis tagas hea lõiketöötluse ja kerge konstruktsiooni. Osaliselt sai kasutatud olemasolevaid või seni täiendatud süsteeme, mille töös pole tõrkeid esinenud. Seade sai projekteeritud tulevikus võimalusega kasutada printimist laiema kasutusalaga. Plastide printimiseks on vajalik kõrgem temperatuur ja osad sõlmed valiti 200 °C temperatuuritaluvusega.

Edasine töö on lisada juurde laser ning muud ohutus- mõõtmis- ja juhtimissüsteemid. Seejärel toimub seadme katsetamine erinevate parameetrite korral ja uute arenduste katsetamine. Töö käigus saavutati püstitatud eesmärgid ja lahendati erinevate sõlmede koostöö. Käesoleva tööga ei jõudnud printer täiesti valmis ja esimesed katsetamised plaanitakse teha juba sügisel.

## SUMMARY

The purpose of this thesis was to design a pressing unit for selective laser sintering machine, to outline the advantages and disadvantages of different solutions, and to adapt other nodes to use the sealing capability. A study of patents and competitive analysis was done to get an overview of the current existing equipments and solutions of different nodes. So far the rolling method with reversed movement direction has been used. When evaluating the results of the test, this solution is not sufficient for compacting the powder. At the choice of the powder compactor, I used a double-sided pneumatic cylinder to compress the compression force by adjusting the pressure. When dosing the powder, I used a cylindrical shaft, which rotates inside the cylindrical tube. This system makes process of switching the powder faster and cleaning easier. To transfer the powder from the dosing point to the printing platform I used the already existing method due to the fact that during the time this method has been used, no errors in this system have occurred. The trajectory of powder movement motion was changed - from semi-circle trajectory to linear, straight-line trajectory. When choosing the printing base, the ball screw was chosen since it enables to maintain an accuracy of 20 micrometers, withstands the compressing power and is easy to construct.

After conducting the market research, the first model of the printer was completed, which significantly differed from the final solution. The available solutions currently offered by the market for the implementation of different nodes and their price were one of the main criteria when conducting the market analysis. At the same time the solutions had to provide the reliability for nodes since any errors in the printer might cause defects in the printable details or even more, stop the printing process and therefore require printing process to be restarted.

Pulbermatalur laboratory workshop was used to carry out the necessary operations. For the material I chose EN EW 6082 which ensured a good cutting work and an easy construction. Some of the existing or upgraded systems, that work without a failure, were partially exploited. The device was designed in a way to enable a wider range of applications in the future. Since a higher temperature is required for printing the plastics, some of the nodes with temperature tolerance of 200 ° C were selected.

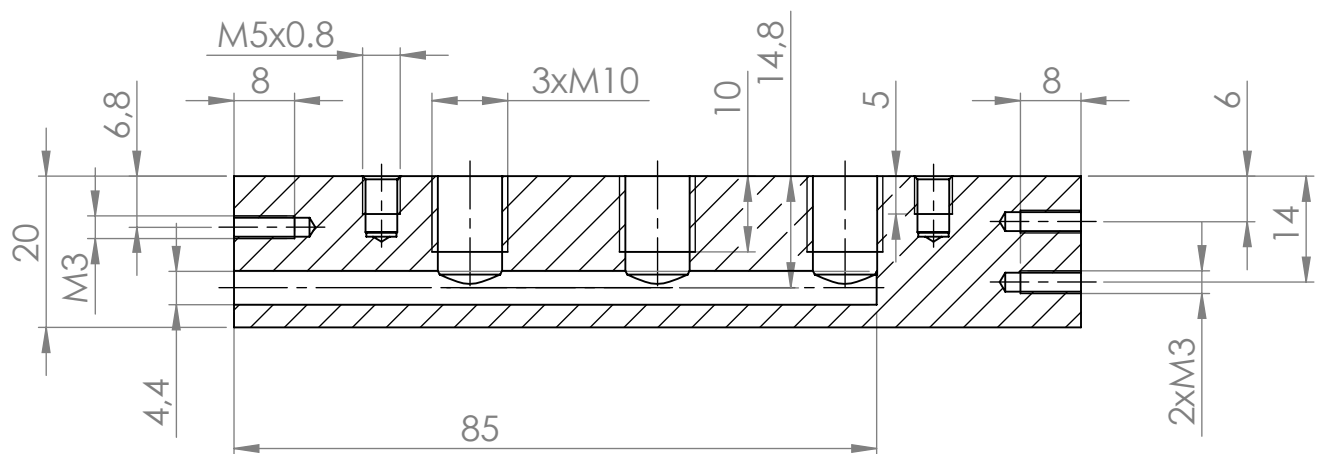
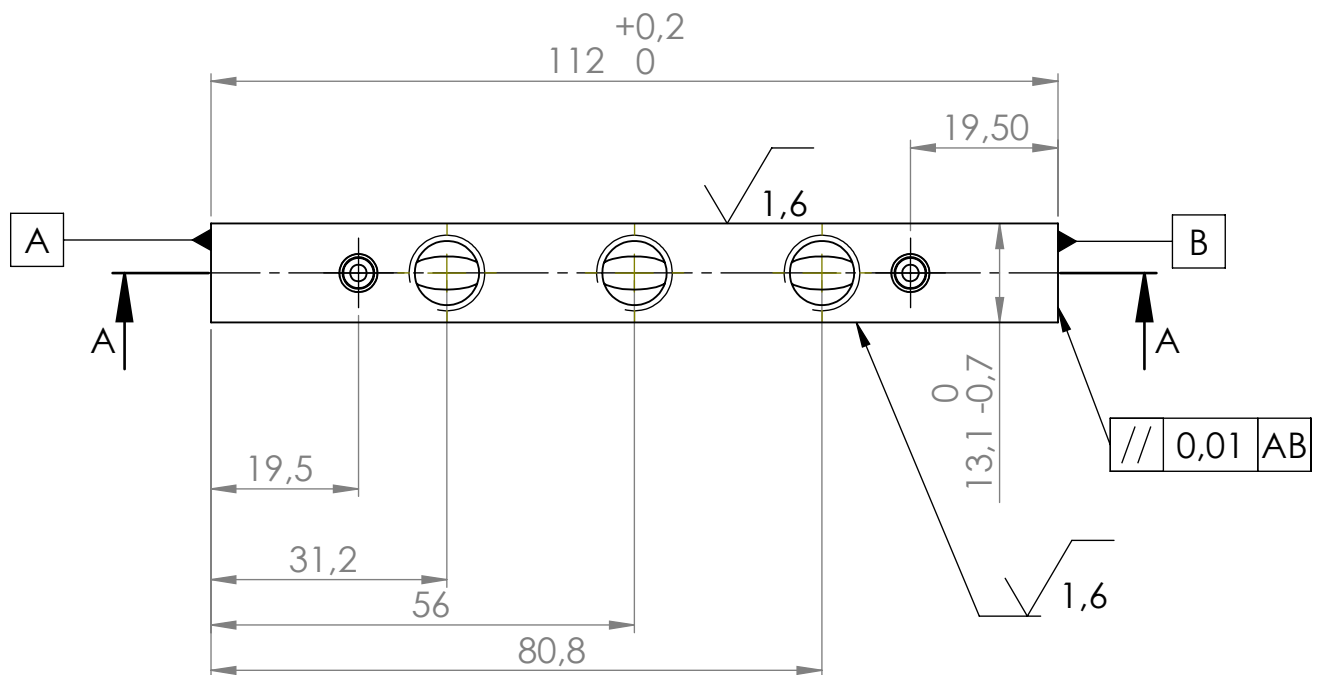
Further work will be done with the device - for example adding a laser and other safety, measuring and controlling systems. After that the device will be tested for various parameters and new developments. After the execution of the tasks of this thesis, the goals were achieved and the cooperation between the different nodes was solved. Within this masters thesis the printer was physically finished, the first tests are scheduled to take place in the fall.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Koort, „TITAANKARBIIDI BAASIL KERMISE VALMISTAMINE,“ TTÜ Mehaanika ja tööstustehnika instituut, Tallinn, 2017.
- [2] C. W. Hull, „Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography“. Patent US4575330A, 8 August 1984.
- [3] E. Palermo, „Live Science,“ 19 september 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>. [Kasutatud 5 mai 2018].
- [4] „eBay.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ebay.com/itm/Dual-Extruder-Drucker-fur-MakerBot-Replicator-PLA-ABS-3D-printer-CTC-FDM-2018/332520227849?hash=item4d6bc00409:g:vxSAAOSwfVpYpBq3>. [Kasutatud 05 mai 2018].
- [5] M. Molitch-Hou, „Engineering,“ 15 veebruar 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14316/Desktop-SLS-Industrial-3D-Printing-for-the-Masses.aspx>. [Kasutatud 04 May 2018].
- [6] T. Kellner, „General Electric Reports,“ 04 May 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ge.com/reports/just-press-print-3d-printing-summit-explores-manufacturings-exponential-future/>. [Kasutatud 10 May 2018].
- [7] „3D Hubs,“ mai 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.3dhubs.com/>. [Kasutatud 12 mai 2018].
- [8] C. R. Deckard, „Method and apparatus for producing parts by selective sintering“. Patent US4,863538, 17 oktoober 1986.
- [9] D. L. B. L. M. W. B. L. B. R. Deckard, „Multiple material systems for selective beam sintering“. Patent US5296062, 17 oktoobet 1986.
- [10] A. M. L. M. L. Bourell, „Selective laser sintering using nanocomposite materials“. Patent US5431967A, 5 september 1989.
- [11] D. H. C. E. Hidalgo, „Powder Distribution for Laser Sintering Systems“. Patent US 20140271326 A1, 15 märts 2013.
- [12] R. Robby Ebert, „Method and device for producing miniature bodies or microstructured bodies“. Patent WO2004/076101 A2, 26 veebruar 2003.
- [13] E. S. T. F. Michael Cima, „Three-dimensional printing techniques“. Patent US5387380A, 8 detsember 1989.
- [14] B. Khoshnevis, „Metallic parts fabrication using selective inhibition of sintering (SIS)“. Patent US20040018107A1, 23 juuli 2002.
- [15] Y. Sheinman, „Method and apparatus for 3d printing by selective sintering“. Patent WO 2015170330 A1, 8 mai 2014.
- [16] Herranen, H., Karjust, K., Kers, J. (2013). Mehaanikainseneri käsiraamat : Teine, täiendatud ja parandatud trükk. Tallinn : TTÜ Kirjastus.
- [17] „Alas-Kuul,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.alas-kuul.ee/vedrud/survevedrud-sf-tf?p=4>. [Kasutatud 18 märts 2018].
- [18] Klauson, A., Metsaveer, J., Põdra, P., Raukas, U. (2012). Tugevusõpetus : õpik kõrgkoolidele. Tallinn : TTÜ Kirjastus.

## **GRAAFILINE OSA**

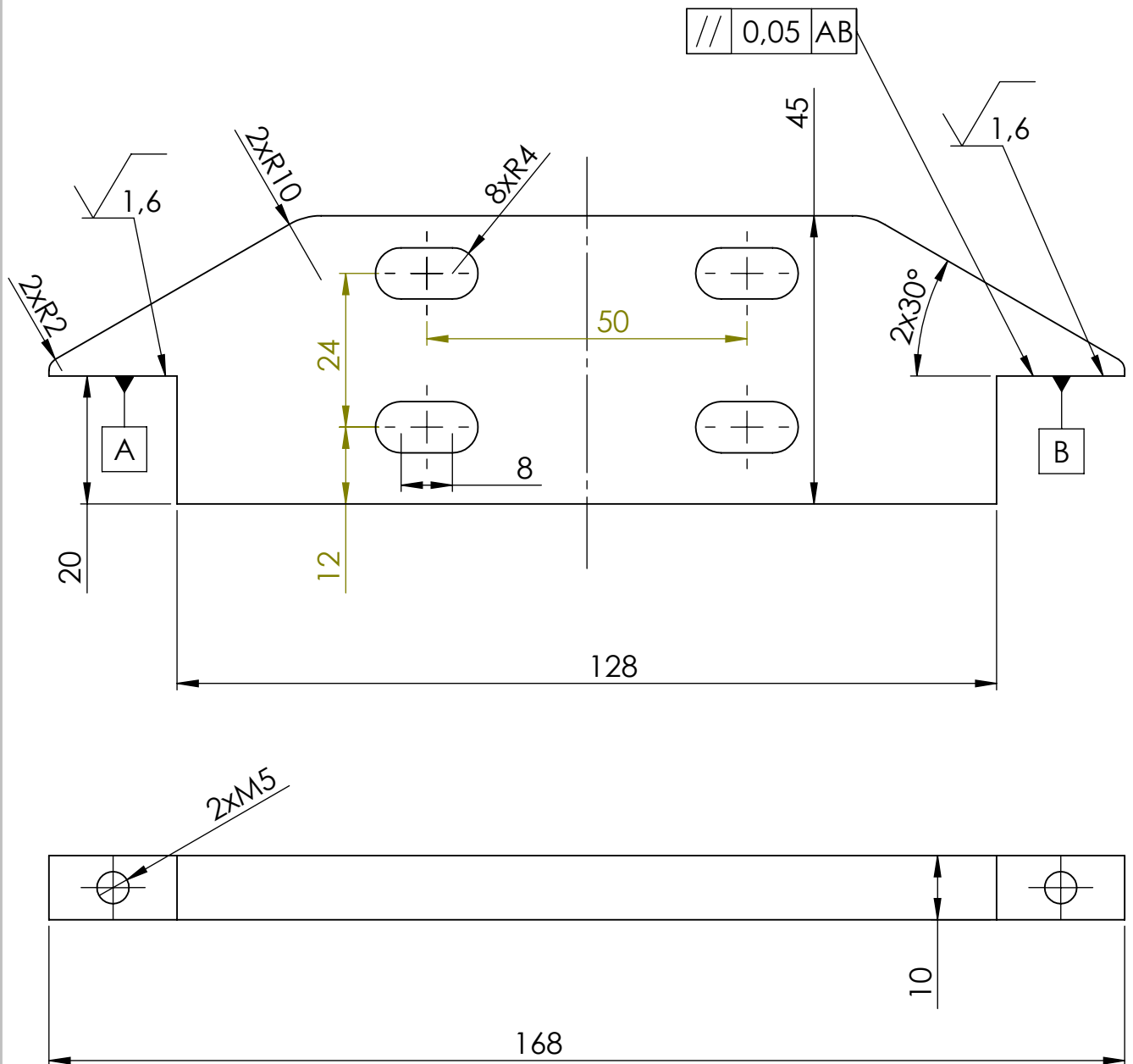
12,5/ (✓)



VAADE A-A  
MÕÕTKAVA 1 : 1

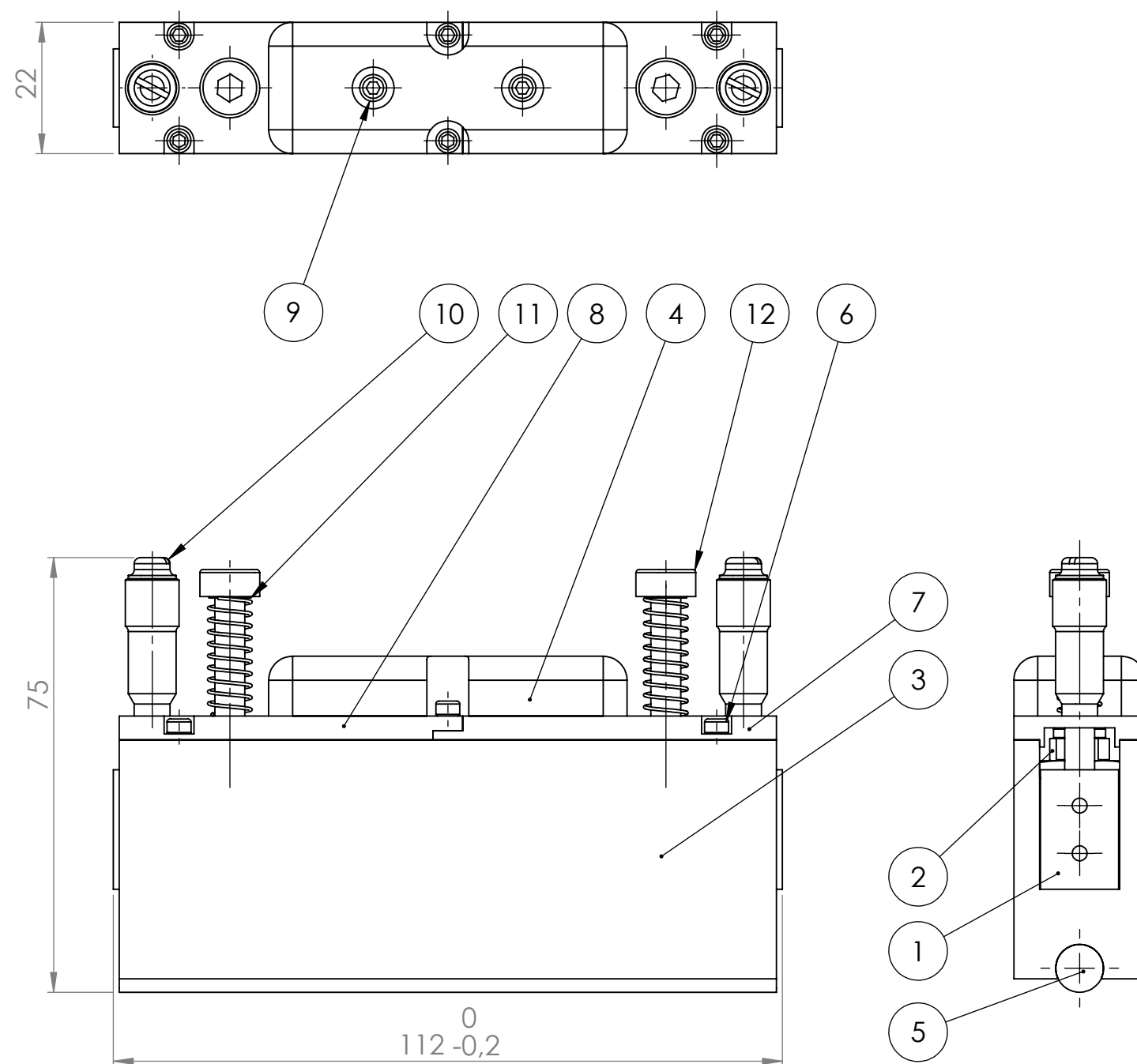
	Material: EN AW6082	Märkimata piirhõlbed: H13;+-IT13	Mass: 69g	Mõõt: 1:1
Teostas:	Ardo Kurg	Nimetus: <b>Silumisklapi raam</b>		
Kontrollis:	Mart Kolnes			
Kinnitas:				
Tallinna Tehnikaülikool Inseneri teaduskond		Leht: 1:1	Formaat A4	Tähis: 02.02.01

12,5/ ( ✓ )



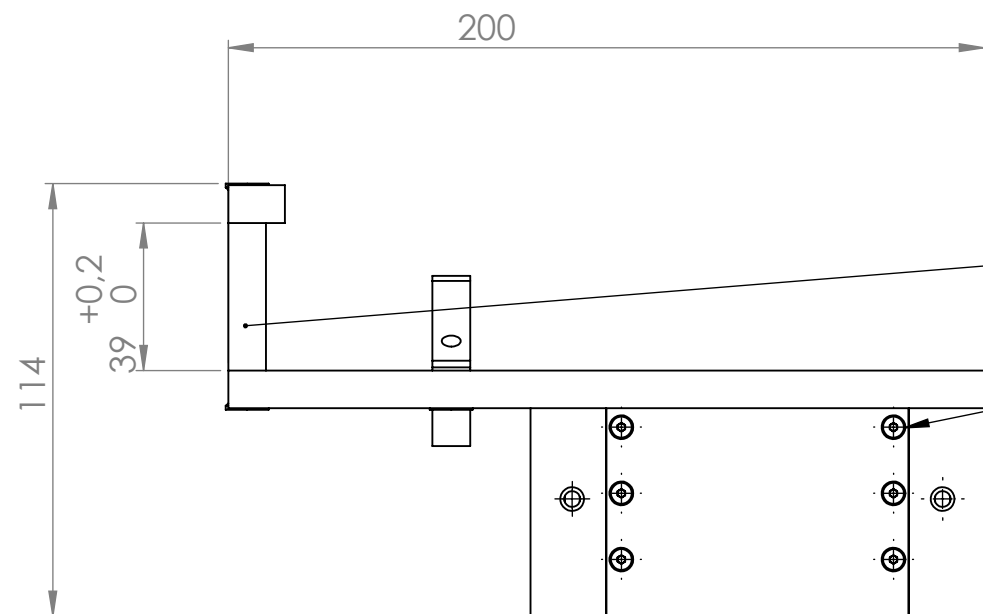
	Material: AW6082	Märkimata piirhálbed: H13; IT13	Mass: 152g	Mõõt: 1:1
Teostas:	Ardo Kurg	Nimetus: <b>Silindri tagaplaat</b>		
Kontrollis:	Mart Kolnes			
Kinnitas:				
Tallinna Tehnikaülikool Mehaanika teaduskond		Leht: 1:1	Formaat: A4	Tähis: 02.01.02



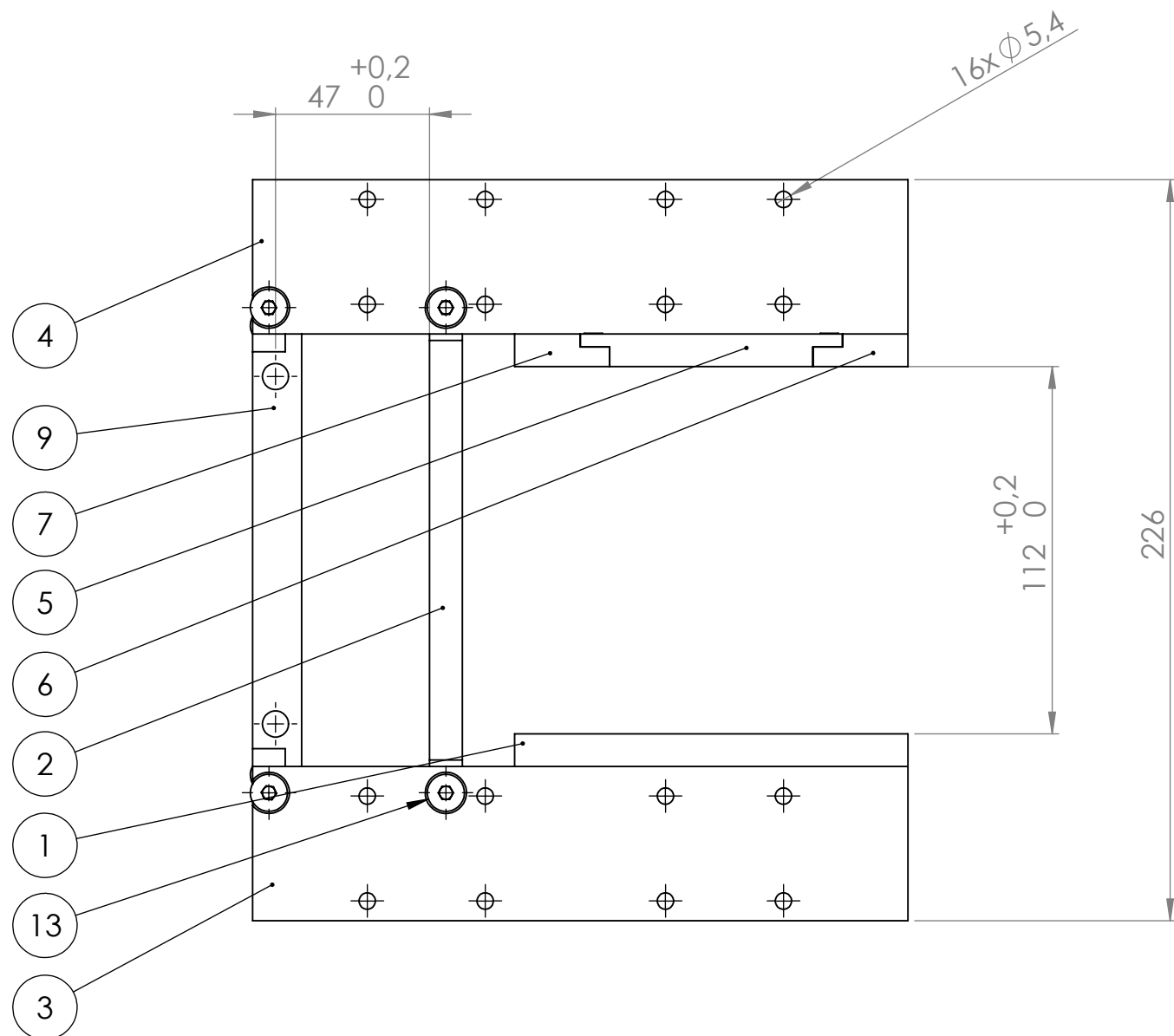
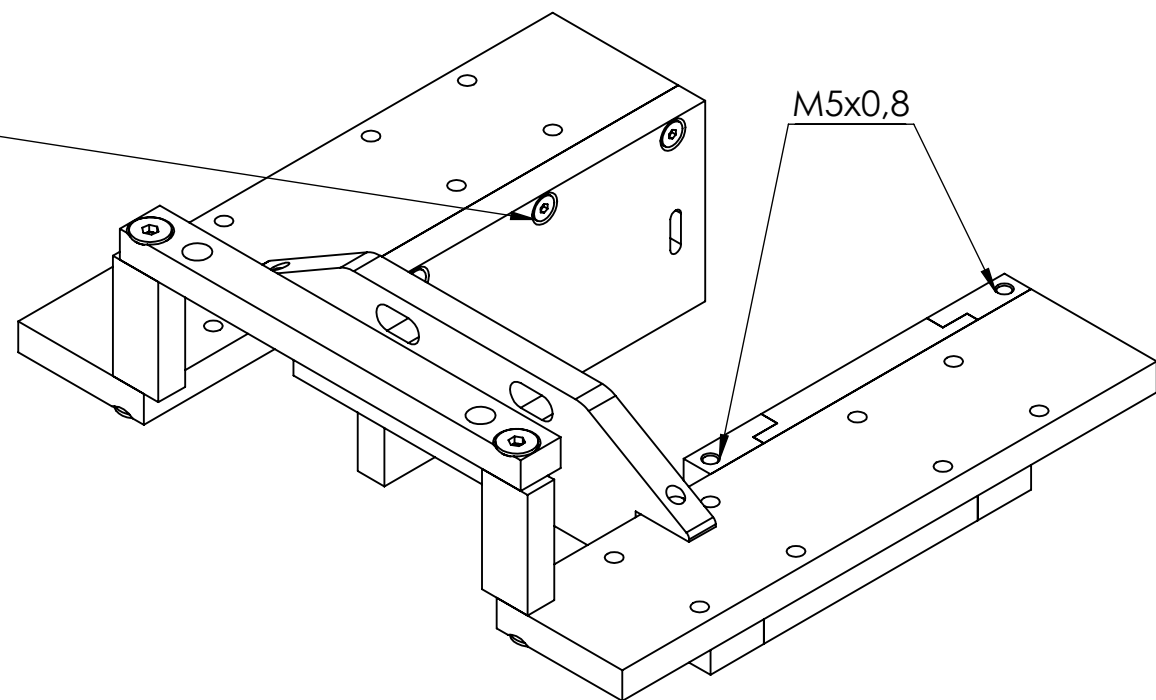


Osa	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
1	Silindri raam	02.02.01	1	
2	Silinder M10x1	02.02.02	3	
3	Silumisklapi raam	02.02.03	1	
4	Silindrite kattekaas	02.02.04	1	
5	Elastomerist element $\varnothing 8 \times 110$		1	
6	Sisekuuskantpolt M2.5x10		6	
7	Silindri parempoolne vahteramm	02.02.05	1	
8	Silindri vasakpoolne vahteramm	02.02.06	1	
9	Kruvi M2.5x12		2	
10	Seadekruvik		2	
11	Vedru		2	
12	Polt M5x30		2	

		Material:		Märkimata piirhälbed:		Mass:	Mõõt:
						285g	1:1
Teostas:	Ardo Kurg		Nimetus:  <b>Silumisklapp</b>				
Kontrollis:	Mart Kolnes						
Kinnitas:							
Tallinna Tehnikaülikool Inseneri teaduskond			Leht:	Formaat	Tähis:		
			1:1	A3	02.02.00		

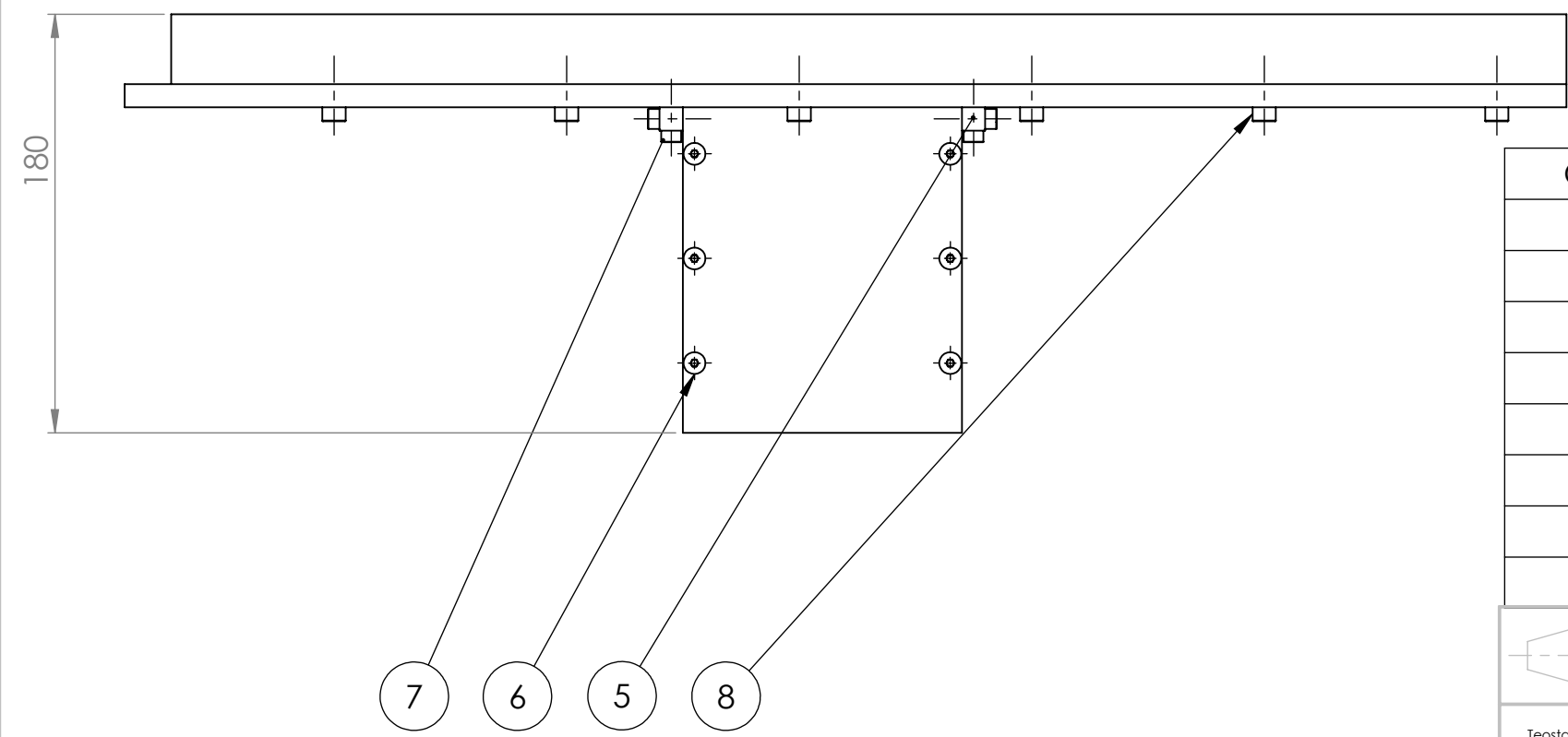
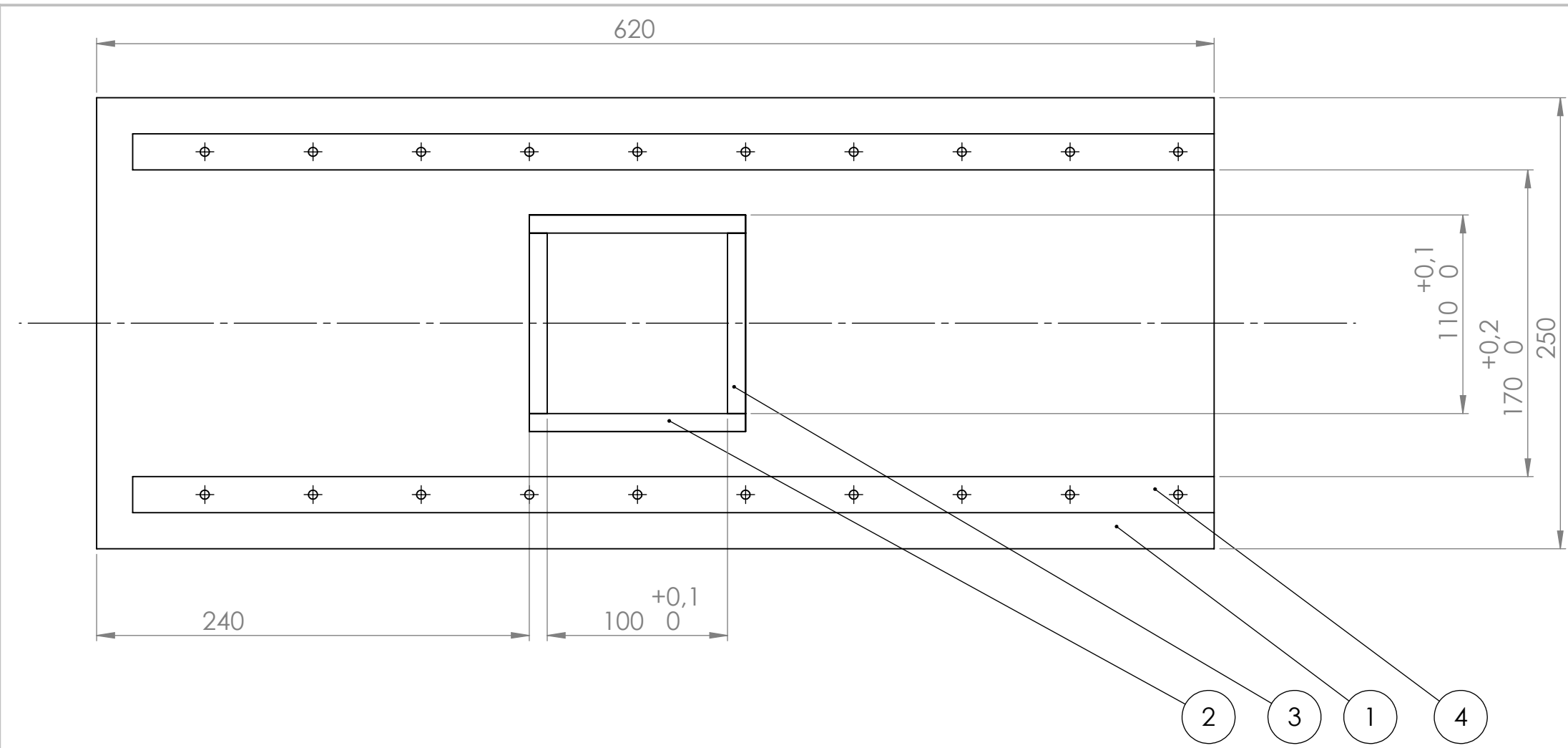


12  
8  
10



Osa	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
1	Kasti külg	02.01.01	1	
2	Silindri tagaplaat	02.01.02	1	
3	Liuguri kinnitusplaat parem	02.01.03	1	
4	Liuguri kinnitusplaat vasak	02.01.04	1	
5	Kanaliga keskmine kasti külg	02.01.05	1	
6	Kanaliga parem kasti äär	02.01.06	1	
7	Kanaliga vasak kasti äär	02.01.07	1	
8	Silindri kinnitussammas	02.01.08	2	
9	Silindri kinnituslatt	02.01.09	1	
10	Polt M3 x 8		6	
12	Polt M4 x 16		6	
13	Polt M6 x 16		6	

		Material:	Märkimata piirhälbed:		Mass:	Mõõt:
				1139g		1:2
Teostas:	Ardo Kurg	Nimetus:  Liikuv raam				
Kontrollis:	Mart Kolnes					
Kinnitas:						
Tallinna Tehnikaülikool Inseneri teaduskond		Leht: 1:1	Formaat: A3	Tähis: 02.01.00		



Osa	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
1	Alusplaat	01.00.01	1	
2	Templi kambri külg1	01.00.02	2	
3	Templi kambri külg2	01.00.03	2	
4	Siini kõrgendus	01.00.04	2	
5	Kambri kinnitus	01.00.05	2	
6	Peitpeaga polt M5 x 16		12	
7	Polt M5 x 16		8	
8	Polt M6 x 16		12	

		Material:		Märkimata piirhõbed:		Mass:	Mõõt:
						2786g	1:5
Teostas:	Ardo Kurg		Nimetus:  <h1>Alusraam</h1>				
Kontrollis:	Mart Kolnes						
Kinnitas:							
Tallinna TehnikaÜlikool Inseneri teaduskond			Leht:	Formaat	Tähis:		
			1:1	A3	01.00.00		