

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Karl-Jürgen Siilak

Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printeri uuendamine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

Veiko Vunder, PhD

Hans Priks, MSc

Tartu 2025

Resümee/Abstract

Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printeri uuendamine

3D-printimine on tänapäeval oluline igapäevaelu osa, võimaldades kiiret ja paindlikku tootearendust, tootmist ja erinevate individuaalsete lahenduste loomist. Ka ülikoolides on õppetöös ja teadus-arendustegevusteks kasutatavad kaasaegsed 3D-printerid väga vajalikud. Viimasel kümnendil on märgatavalt uuenenud nii printimistehnoloogiad, riistvara ja elektroonika kui ka tarkvaralahendused ja kasutatavad materjalid. Käesoleva bakalaureusetöö raames kaasajastati Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi 2016. aastal soetatud 3D-printer Mass Portal Grand Pharaoh XD, kasutades selleks modulaarseid ja vabavaralisi komponente. Uus kontrollplaat, modifitseeritud lõpulülitid ja prindipea, Klipper'i püsivara ning sellega seonduvate tarkvarade paigaldus ja testimine andsid tulemuseks kaasajastatud 3D-printeri, mille printimistulemus on samaväärne või parem uuendustele eelnenud tulemustega.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia, T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika, T170 Elektroonika

Märksõnad: 3D-printimine, kaasajastamine, uuendamine, Klipper, Mass Portal,

Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printer upgrade

3D-Printing is an important part of everyday life, allowing for quick and flexible product development, manufacturing, and creation of various individual solutions. Modern 3D-printers are a necessity in universities, for use in teaching and research. In the last decade, printing technologies, hardware, software, electronics, and materials used have significantly improved. In this bachelor's thesis, the Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printer, acquired by the University of Tartu Institute of Technology in 2016, was modernized using modular and freeware components. A new control board, modified endstops and print head, installation and testing of Klipper firmware and related software resulted in a modernized 3D-printer, with printing results which are equivalent to or better than the results before the upgrade.

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology, T125 Automation, robotics, control engineering, T170 Electronics

Keywords: 3D-printing, modernization, upgrading, Klipper, Mass Portal

Sisukord

Resümee/Abstract	2
Lühendid, konstandid, mõisted	6
Sissejuhatus.....	7
1. Ülevaade olemasolevast tehnoloogiast	8
1.1 3D-printimise üldprotsess	8
1.2 3D-printimise tehnoloogiad.....	9
1.3 3D-printerite areng	9
1.3.1 Muutused 3D-printerite levikus ja kättesaadavuses	9
1.3.2 Muutused FDM 3D-printerite riistvaras	10
1.3.3 Muutused tarkvaras.....	11
2. Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printer.....	13
3. Töö eesmärk ja nõuded lahendusele	16
4. Printeri analüüs ning uuenduste valimine	17
4.1 Printeri algseisu dokumenteerimine	17
4.2 Printeri analüüs.....	19
4.3 Uue püsi- ja tarkvara valimine	19
4.4 Uuendatava riistava valimine.....	20
5. Uuenduste rakendamine	23
5.1 Klipperi tarkvara paigaldamine	23
5.2 Klipperi püsivara paigaldamine	24
5.3 Vana kontrollplaadi eemaldamine ja ühenduste kaardistamine	25
5.4 Raspberry Pi 5 paigaldamine.....	27
5.5 BTT Octopus Pro V1.1 paigaldamine	28
5.6 Uuenduste töökindluse testimine	30

5.6.1 Samm-mootorite testimine	30
5.6.2 Lõpulülitite testimine.....	30
5.6.3 Termistorite testimine.....	32
6. Uuenduste testimine ja tulemuste hindamine. Järeldused.....	35
6.1 Uuenduste testimine kasutades Simplify3D viilutamistarkvara.....	35
6.2 Sisendi kujundamine	37
6.3 Uuenduste testimine, kasutades Orcaslicer viilutamistarkvara	38
6.4 Tulemuste hindamine ja soovitused edasiseks	39
Kokkuvõte.....	41
Tänuavaldused	42
Viidatud kirjanduse loetelu	43
Lisad.....	46
Lisa 1	46
Lisa 2	47
Lisa 3	47
Lisa 4.....	48
Lisa 5	49
Lisa 6	50
Lisa 7	50
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	51

Jooniste loetelu

Joonis 1. 3D-printimise üldprotsess. Autori täiendatud.....	8
Joonis 2. Octoprint ja Mainsail kasutajaliides.....	12
Joonis 3. Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-Printer	13
Joonis 4. RADDs kontrollplaadi ühendused	14
Joonis 5. Kiirusetesti Mudel	17
Joonis 6. XYZ-kalibratsiooni kuubiku mudel.....	18
Joonis 7. KIAUH kasutajaliides.....	23
Joonis 8. Klipper Firmware Configuration	24
Joonis 9. Avatud printeri pealtvaade.....	25
Joonis 10. Avatud printeri altvaade	25
Joonis 11. RADDs kontrollplaadi skeem	26
Joonis 12. Raspberry Pi 3B koos puutetundliku ekraani ja printerisse ühenduva alusega	27
Joonis 13. Kontrollplaadil tehtud šuntide muudatused. Autori täiendatud.....	28
Joonis 14. Lõpulüliti	31
Joonis 15. Lõpulülite skeem	32
Joonis 16. Klipperscreen'i kasutajaliides	32
Joonis 17. Kütteploki külgaade termopaari ühendusega.....	33
Joonis 18. Simplify3D viilutamistarkvara kasutades tehtud testprindid.....	35
Joonis 19. Pikendatud delta kalibratsiooni mudelil teostatavad mõõtmised.....	37
Joonis 20. Orcaslicer viilutamistarkvara kasutades tehtud testprindid	38

Lühendid, konstandid, mõisted

3D - kolmemõõtmeline

CAD (*Computer-aided design*) – Raalprojekteerimine on tehniliste jooniste ja mudelite loomine spetsiaalse tarkvara abil, arvutipõhine projekteerimine.

3D-printer – masin, mis loob ruumilisest raalmudelist kiht kihi haaval printides reaalse objekti

Viilutamistarkvara (*Slicer*) - muudab ruumilise raalmudeli kihtide seeriaks ning tõlgib need 3D-printerile arusaadavasse käskude jadasse

G-kood – automatiseeritud tööpingile käskude edastamise programmeerimiskeel

FDM – (*Fused Deposition Modeling*) - 3D-printimise meetod, mille käigus surutakse sulanud jõhvi läbi kuumutatud düüsi kuumaalusele, kus iga lisatud kiht sulandub eelnevate kihtide või aluse külge ning moodustab seeläbi 3D-objekti

Jõhv – termoplastiline material, mida kasutatakse FDM-tüüpi 3D-printerites

Driver – tarkvara riistvaraga liidestav seadme juhtprogramm

Ekstruuder - siin töös: 3D-printeris jõhv edasi või tagasi liigutav ning vastavalt vajadusele kuumutatud prindipea düüsi suunav komponent, mis koosneb mootorist ja söötmismehhanismist.

Samm-mootor – sünkroonmootor, milles rootor pöörduv elektromagnetilise impulsi toimetel iga kord kindla nurga võrra

Sisendi kujundamine (input shaping) - vibratsioonide kompenseerimise meetod, mida kasutatakse 3D-printerites eesmärgiga vähendada mehaanilisi resonantse ja nende tekitatud järelvibratsioone.

Sissejuhatus

Viimasel kümnendil on 3D-printimise valdkond teinud märkimisväärse arenguhüppe. Uuenenud on nii printimistehnoloogiad, riistvara ja elektroonika kui ka tarkvaralahendused ja kasutatavad materjalid. Seadmed, mida veel viis aastat tagasi peeti kõrgetasemeliseks, on tänapäeval tihti vananenud – eriti puudutab see suletud süsteemiga printereid, millel ei ole enam tootjapoolset tuge ja mille edasiarendamine on kas lakanud või säilinud vaid piiratud mahu. Elektroonikas on toimunud oluline üleminek 8-bitistelt 32-bitistele kontrolleritele, mootoridraiverid on muutunud vaiksemaks ja täpsemaks ning arenenud on erinevad abisüsteemid, mis toetavad printimise täpsust ja töökindlust.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis õppe- ja teadustööks kasutatava 2016. aastal soetatud 3D-printeri Mass Portal Grand Pharaoh XD (tootja Mass Portal SIA) kaasajastamine võimalikult modulaarsete ja vabavaraliste komponentidega, et luua alus seadme pidevaks edasiarendamiseks ning võimaldada selle tulevikus paindlikum ja kuluefektiivsem hooldus. Samuti on töö üheks oluliseks eesmärgiks säilitada või parandada printeri väljatrüki kvaliteeti võrreldes algse konfiguratsiooniga.

Töö käigus tutvuti 3D-printimise protsessi, tehnoloogiate ja tarkvaradega seotud kirjandusega, kaardistati printeri algseisund ning määratleti vajalikud muudatused vastavalt töö eesmärgile. Seejärel paigaldati uued riist- ja tarkvarakomponendid, testiti nende töökindlust ja väljatrüki kvaliteeti ning viidi läbi tulemuste hindamine. Tööprotsessi käigus tehti ka täiendavaid muudatusi vastavalt testimisel saadud tagasisidele.

1. Ülevaade olemasolevast tehnoloogiast

1.1 3D-printimise üldprotsess

3D-printimine on tehnoloogia, mille abil luuakse geomeetrisest kujutisest füüsilisi objekte materjalide järjestikuse (kihtide kaupa) lisamise teel [1]. Tüüpiline 3-D printimise protsess koosneb kolmest üldisest etapist: modelleerimine, viilutamine ja seadistamine ning füüsiline printimine koos järeltöötusega.



Joonis 1. 3D-printimise üldprotsess. Autori täiendatud

Etappide käigus toimuvad järgmised tegevused:

- Modelleerimise käigus koostatakse digitaalne 3D-mudel (CAD-mudel). Valminud mudel salvestatakse viilutamiseks sobivasse vormingusse, näiteks joonisel 1 [2] viidatud STL või OBJ-failina.
- Teise etapina imporditakse STL-fail viilutamistarkvarasse, kus 3D-mudel teisendatakse kihtide jadaks. Viilutamine on 3D-printimise protsessi keskne etapp, mis määrab, kuidas printer lisab kihthaaval materjali, et luua terviklik füüsiline objekt [3]. Sõltuvalt kasutatavast tarkvarast võimaldab viilutaja seadistada erinevaid printimisparameetreid ning teisendab 3D-mudeli printerile arusaadavateks käsklusteks, enamasti G-koodi kujul.
- Kolmas etapp hõlmab füüsilist printimist ja järeltöötlust. Pärast G-koodi saatmist 3D-printerisse algab objekti füüsiline printimine vastavalt printeri tüübile. Valminud objekt võib soovitud lõpliku kvaliteedi ja omaduste saavutamiseks vajada täiendavat järeltöötlust, näiteks plastiktugede eemaldamist või järelkõvastamist.

1.2 3D-printimise tehnoloogiad

3D-printimiseks on välja töötatud mitmeid kümneid erinevaid meetodeid [4,5], kuid tavakasutajale on üldjuhul kättesaadavad printerid, mis põhinevad kahel peamisel tehnoloogial.

- FDM (*Fused Deposition Modeling*) - tüüpiline FDM 3D-printer surub sulanud jõhvi läbi kuumutatud düüsi kuumaalusele, kus iga lisatud kiht sulandub eelnevate kihtide või aluse külge ning moodustab seeläbi 3D-objekti [6].
- SLA (*Stereolithography*) – SLA 3D-printerid kasutavad valgustundlikku vaiku ning tekitavad 3D-objekti kihid, kasutades vaiku kõvastavat UV-laserit, mis suunatakse vaiku sisaldavasse vanni [7].

1.3 3D-printerite areng

Viimase kümne aasta jooksul on 3D-printerid muutunud odavamaks, kiiremaks, täpsemaks ning kasutajasõbralikumaks. FDM 3D-printerite kontekstis on printerite täpsus ja töökindlus suurenenud tänu erinevatele uuendustele püsi- ja tarkvaras (näiteks täpsem automaatne kalibreerimine ning sisendi kujundamine (*input shaping*)) ning printeri koostisdetailides (nt kiiremad ja vaiksemad mootoridraiverid) [8].

1.3.1 Muutused 3D-printerite levikus ja kättesaadavuses

Ameerika tehnoloogiakonsultatsioonifirma Skyquest Technologies 2025. aasta raporti kohaselt müüdi 2015. aastal üle maailma ligikaudu 0,8 miljonit 3D-printerit, 2019. aastal 1,9 miljonit ning prognooside kohaselt ületab üleilmne müük 2030. aastaks 10 miljoni piiri [9]. Forbesi andmetel tarniti 2023. aasta neljandas kvartalis rekordiliselt ligi miljon alla 2500-dollarilise hinnaga lauapealset 3D-printerit, kusjuures järjest enam on nende seadmete ostjateks ettevõtted [8].

Müügikasvu oluline põhjus on seadmete hinna märkimisväärne langus. Kui 2014. aastal oli keskmine tarbijaklassi printeri hind ligikaudu 1000 dollarit, mis vastab 2025. aasta inflatsioonikohandusega 1218 eurole, siis 2016. aastaks oli hind langenud 400 dollarini ehk 480 euroni 2025. aasta väärtuses [9]. 2015. aastal kajastas Ameerika tehnoloogia- ja elektroonikaajakiri CNET CES 2015 messi, kus osales 57 3D-printerite müüjat ning printereid pakuti igas

hinnaklassis. Näiteks oli seal müügil XYZPrinting Da Vinci Junior, mille hind oli 350 dollarit, mis vastab 410 eurole 2025. aasta väärtuses. CNET pidas seda tõenäoliselt kõige taskukohasemaks tol ajal turul olnud 3D-printeriks [10]. 2025. aastaks on olukord oluliselt muutunud, kuna soodsaimad 3D-printerid on saadaval juba alla 200 euro (näiteks Bambulab A1-mini [11]). Lisaks on seadmete printimiskiirus oluliselt suurenenud. Kui XYZPrinting Da Vinci Juniori maksimaalseks printimiskiiruseks oli märgitud 120 mm/s, siis 2025. aastal turul olev Bambu Lab A1-mini võimaldab printida kuni 500 mm/s [12].

Ka tööstuslike 3D-printerite hinnad on langenud, muutes tehnoloogia kättesaadavamaks laiemale kasutajaskonnale. Lisaks on soodsa hinnaga (alates 250 USD) ja kiire Bambu Lab'i edu viinud turul muutusteni, kus ka professionaalsed kasutajad eelistavad sageli soodsamaid, tavatarbijale mõeldud seadmeid, mis pakuvad piisavat funktsionaalsust. Professionaalsete 3D-printerite müük on seetõttu langenud 33%. Siiski säilib professionaalsete seadmete nõudlus lõppkasutuse ja kõrgete nõudmistega prototüüpide tootmisel. Sellest tulenevalt kohandavad nii professionaalseks kasutuseks kui ka tavatarbijaturule suunatud tootjad oma tootevalikut, püüdes saavutada tasakaalu kvaliteedi, hinna ja kasutusmugavuse vahel. Turu arengut suunavad innovatsioon ja püüdlus muuta 3D-printimine kontorikeskkondades sama lihtsaks ja kättesaadavaks kui tavaprintimine [8].

1.3.2 Muutused FDM 3D-printerite riistvaras

Üheks olulisimaks 3D-printeri komponendiks on selle kontrollid, mis juhivad kogu printimisprotsessi, sealhulgas mootorite, kuumutite ja andurite tööd. Varasemad 8-bitist arhitektuuri kasutavad kontrollid sobivad endiselt kasutamiseks lihtsamates projektides, kaasaegsed 32-bitised mikrokontrollerid sobivad kasutuseks seal, kus on vaja kõrgemat kiirust, suuremat mälu ja arvukamalt sisendeid-väljundeid [13].

Kontrollerile on ühendatud samm-mootori draiverid, mis juhivad mootoreid, määrates, millal ja kui palju neil on vaja liikuda. Olenevalt mootori ehituses teevad need ühe pöörde ehk 360 kraadi kohta mingi kindla arvu samme. Näiteks Mass Portal Grand Pharaoh XD printeris kasutatavad mootorid teevad 400 sammu, st iga samm on 0,9-kraadi.

Mikrosamm-draiverid (*microstep drivers*) lubavad neid samme jagada väiksemateks osadeks läbi samm-mootori mähiste täpsema pingestamise ajastuse. Näiteks 16 mikrosammu puhul keeraks iga

mikrosamm mootorit 0,05625 kraadi. Aja jooksul on arendatud järjest suurema mikrosammude arvuga draivereid. Näiteks Reprap projekti jaoks tehtud RAMPS 1.4 (*RepRap Arduino Mega Shield*) kontrollplaat oli müügil koos A4998 või DRV8825 draiveritega, mis tegid vastavalt 16 ning 32 mikrosammu [14,15]. Uuemad draiverid nagu näiteks TMC2209 lubavad teha kuni 256 mikrosammu [16].

Lisaks mikrosammu juhtimise täpsusele on uuemad draiverid ka kasutajasõbralikumad. Kui varasemad, RAPS128 draiverid nõudsid mootori voolu seadistamist potentsiomeetri kaudu käsitsi [17], siis kaasaegsed TMC2209 draiverid võimaldavad seda teha automaatselt [16].

Olulisi edusamme on viimastel aastatel tehtud 3D-printerite küttekehade disainis. Kui varem kasutati traditsiooniliselt 3D-printerites padrunküttekehasid, mille kütteelement koosneb keraamilisest sisust ja selle ümber keritud takistist, siis uuemad on juba induksioon-küttekehad. Näiteks 2023. aastal turule toodud INo Trident võimaldab küttekehadel kiiresti nii soovitud temperatuuri saavutada kui ka maha jahtuda [18]. Tridenti tootja Plasmicsi väitel võtab 250 kraadi saavutamine vaid 4 sekundit, mis on 12 korda kiirem kui tavaline 50W küttekeha [19].

Müügile on tulnud ka erinevad sensorid, mis võimaldavad printeri tööd paremini jälgida, analüüsida ja kontrollida. Näiteks kiirendussensorid aitavad mõõta printeri resonantse ja vastavalt seadme tööd optimeerida, samas kui nivelleerimisandurite abil saab täpselt fikseerida prindialuse asendi.

1.3.3 Muutused tarkvaras

Kogu 3D-printimise protsessis kasutatakse erinevaid püsi- ja tarkvarasid (näiteks viilutamistarkvara ning erinevad kasutajaliidesed). Vahepealsete aastatega kasutusele võetud järjest võimsamad mikrokontrollerid ja avatud lähtekoodiga kogukondade kasv on oluliselt mõjutanud ja kiirendanud 3D-printerite tarkvara ja püsivara arengut.

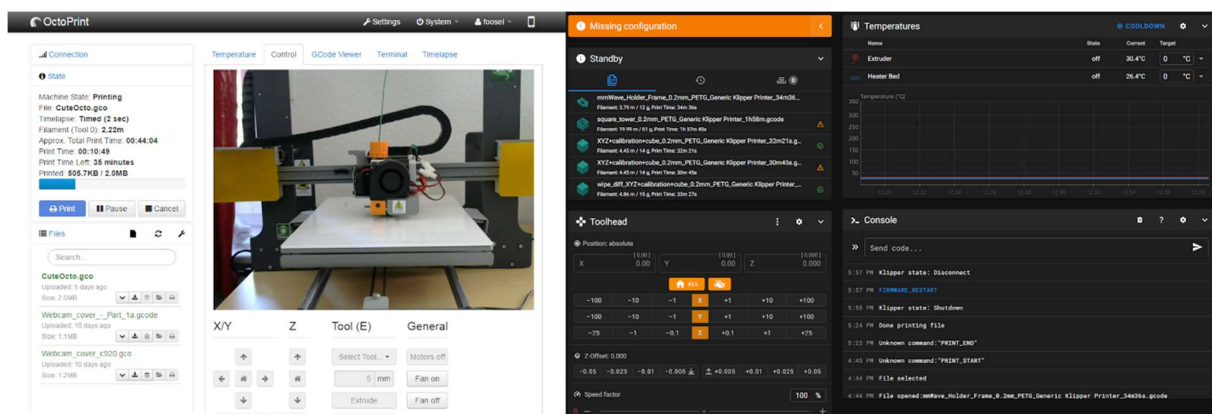
Näiteks Klipper, 2016. aastal loodud tarkvara uute funktsioonide areng [20]:

2018. Mesh alusetasandus: parandas esimese kihi kvaliteeti.

2020. Input Shaping ja Smooth Pressure Advance: vähendas vibratsioone ja parandas ekstrusiooni juhtimist.

2024. Adaptive Bed Mesh ja uued sensorid: automaatne vooditasanduse kohandamine ja tugi uutele sensoritele.

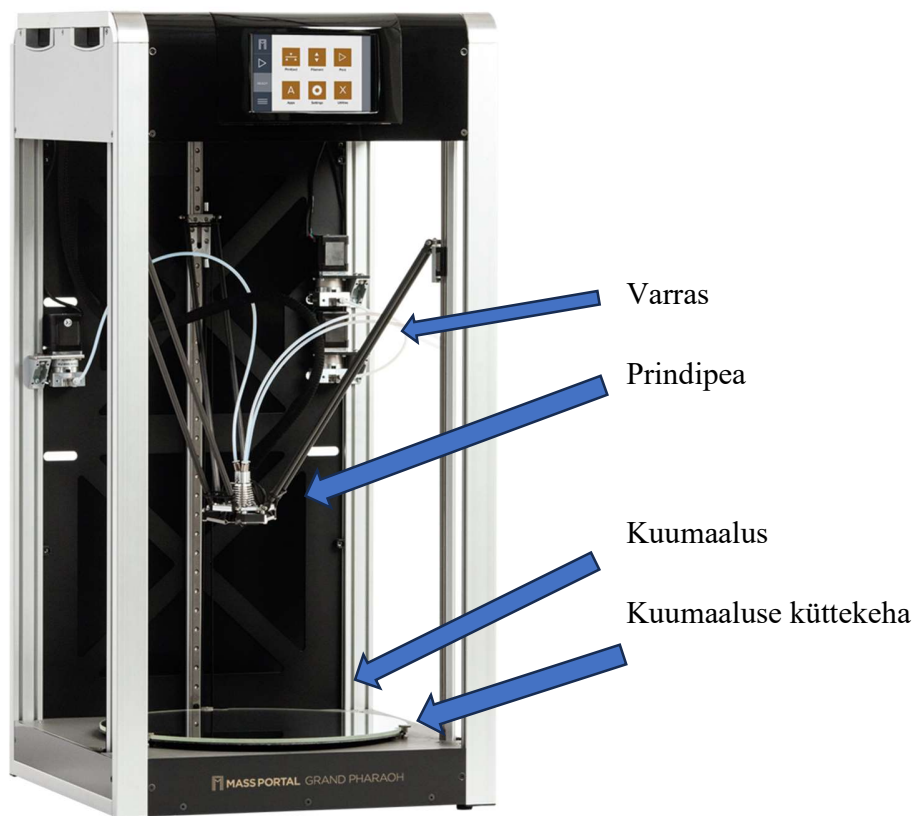
3D-printerite juhtimiseks kasutatavad graafilised kasutajaliidesed (*Graphical User Interface*, GUI) (Joonis 2 [21]) on samuti alates 2012. aastast, mil esmakordselt tutvustati OctoPrinti [21], olulise arengu läbi teinud. OctoPrintil oli ulatuslik, kuid ressursimahukas pistikprogrammide süsteem. Klipper populaarsuse kasvades tekkis aga vajadus n-ö kergemate ja reaalajas andmeid kuvavate liideste järele. Välja arendati spetsiaalselt Klipper jaoks loodud Mainsail ja Fluid. Mainsail pakub täna kiiret ja intuitiivset kasutajaliidest, toetades mitme printeri haldamist, detailset prindiajalugu, kuumaaluse tasandamise visualiseerimist ning G-koodi eelvaadet [22]. Fluid keskendub kohandatavusele ja makrode toetamisele, võimaldades kasutajatel luua otseteid sagedamini kasutatavatele käskudele.



Joonis 2. Octoprint ja Mainsail kasutajaliidesed

2. Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printer

Käesoleva töö eesmärgiks on joonisel 3 [23] kujutatud 2016. aasta Mass Portal Grand Pharaoh XD printeri kaasajastamine võimalikult modulaarsete ja vabavaraliste komponentidega, mis soosiks tulevikus printeri uuendamist ning võimaldaks vajadusel lihtsat komponentide väljavahetust.



Joonis 3. Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-Printer

Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printeri põhiosa koosneb Arduino Mega'st ja sellega ühendatud printeri kontrollplaadist RADDs (*RepRap Arduino-Due Driver Shield*) v1.5. RADDs kontrollib kuut 24V mootorit, millest kolm juhivad prindipead ning kolm kontrollivad printimiseks kasutatava materjali liigutamist (Joonis 4 [17]). Prindipea liigub kolme erineva samm-mootoriga ühendatud hammasrihma üles-alla liigutamise tulemusena. Iga hammasrihma külge on kinnitatud kelk, millele on omakorda kinnitatud prindipeani ulatuv varras.

Printeriga suhtlus toimub läbi printeris oleva Arduino Mega plaadiga ühendatud Raspberry Pi 3B ja sellega ühendatud puutetundliku ekraani. Lisaks on Arduinoga ühendatud ka printeri

Printeri voolualikatena kasutatakse kahte, seinakontakti ühendavat Mean Well toiteplokki.



Kuumaalusena kasutab printer metallist küttekeha peal asuvat 38 cm diameetriga klaasalust. Kolm laiade peadega kruvi kinnitavad kuumaaluse paika ja võimaldavad kalibreerida selle kõrgust. Küttekeha ise on printeri põhjast eraldatud alumisele poolele kinnitatud metallist vedrude abil.

RADDs v1.5 kontrollplaadile on installeeritud RAPS128 (*RADDs Power Stepper Driver with 1/128 Microstepping*) draiverid, mis lubasid RADDs-plaati kasutades teha kuni 128 mikrosammu.

Printeril oli kasutusel esialgne, seega vähemalt 10 aasta tagune Repetier püsivara, millega oli kaasas Simplify3D viilutamise tarkvara. Kasutajaliides oli samuti vana ja Mass Portal SIA enda toodetud.

3. Töö eesmärk ja nõuded lahendusele

Bakalaureusetöö eesmärk on 2016. aastal soetatud 3D-printeri Mass Portal Grand Pharaoh XD algseisu dokumenteerimine ning seejärel kaasajastamine, kasutades võimalikult modulaarseid ja vabavaralisi komponente, et luua alus seadme pidevaks edasiarendamiseks ning võimaldada selle tulevikus paindlikum ja kuluefektiivsem hooldus.

Samuti on töö üheks oluliseks eesmärgiks säilitada või parandada printeri väljatrüki kvaliteeti võrreldes algse konfiguratsiooniga.

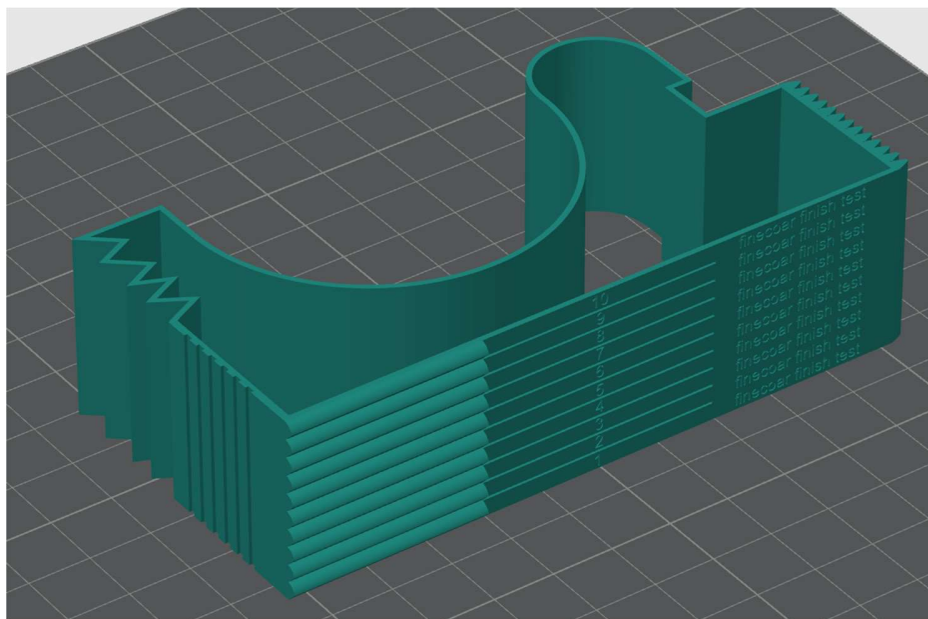
Nõuded lahendusele:

- Vabavaralised ning avatud lähtekoodiga püsi- ja tarkvaralised komponendid
- Modulaarsed, lihtsasti vahetatavad riistvaralised komponendid
- Valitud komponendid peavad võimaldama edasise arendamise
- Uued komponendid ei tohi halvendada printimiskvaliteeti

4. Printeri analüüs ning uuenduste valimine

4.1 Printeri algseisu dokumenteerimine

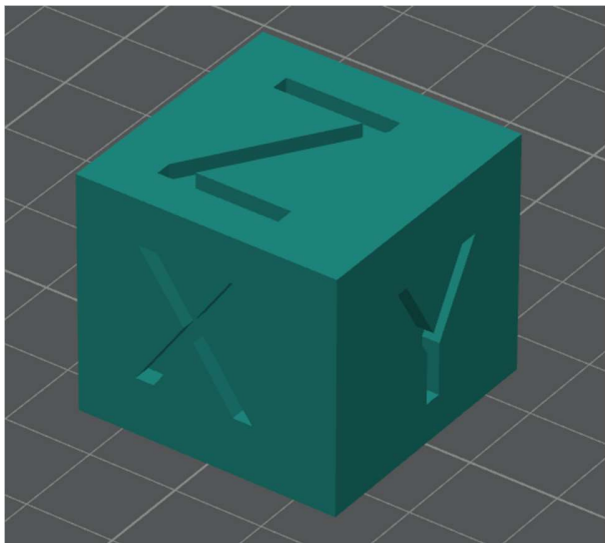
Printeri töö algseisu ja lõpptulemuse võrdlemiseks on vajalik kaardistada printeri töö algseis printimisprotsessis. Selleks valisin välja kaks erinevat testmodelit, mille abil on võimalik hinnata printeri jõudlust ja kvaliteeti erinevatel printimiskiirustel. Esimeseks prindiks valisin internetist leitud kiirusetesti [24], mis võimaldab võrrelda printeri alg- ja lõppseisu vastavalt seadistatud tingimustele (Joonis 5).



Joonis 5. Kiirusetesti Mudel

Leitud mudeli viilutamine toimus Mass Portal printeriga kaasa tulnud Simplify3D viilutamistarkvara abil. Mudel sai jaotatud kümneks erinevaks kõrguseks, millel oli igaühel määratud oma printimiskiirus. Selle testi peamiseks eesmärgiks oli kontrollida, kuidas muutub prindi kvaliteet eri olukordades, kui printimise kiirus muutub.

Teiseks testprindiks valisin XYZ-kalibratsiooni kuubiku [25], mida oleks võimalik välja printida nii algseisus kui lõppseisus ja mis võrdleks üldist prindi kvaliteeti ilma kiirust arvesse võtmata (Joonis 6). Mõlema prindi 3D-mudelid on leitavad lisas 2.



Joonis 6. XYZ-kalibratsiooni kuubiku mudel

Testprintide läbiviimisel ilmnas mitmeid probleeme, mis mõjutasid printimise kvaliteeti ja tulemusi. Olulisemad esinenud vead ning nende tagajärgede põhjal tehtud muudatused on koondatud Lisa 1 asuvasse tabelisse. Kuigi tabel ei hõlma kõiki katseprinte ja nende tulemusi, annab see hea ülevaate testitud mudelitest ja kasutatud materjalidest ning nende põhjal tehtud muudatustest printeri seadistustes ja tööprotsessis.

Esimeseks testprindiks valisin printeri tarkvaras juba olemasoleva testmudeli, kasutades printeris olnud ABS-jõhvi. Printimine algas edukalt, kuid jäi umbes 80% ulatuses valminuna pooleli, sest ABS-jõhv ummistas prindipea. Järgmine testprint ei jäänud kuumaaluse külge kinni ning siis otsustasin vahetada testmudelit, et katsetada printeri tööd erinevatel kiirustel, kasutades spetsiaalset kiirusetesti mudelit (Joonis 5). Pärast mitmeid ebaõnnestunud katseid, neile järgnenud analüüsi ja positiivse tulemuseta seadistuste muudatusi vahetasin juhendajate tagasiside põhjal ABS-jõhvi PLA vastu.

Jätkasin teste kahe erineva printeriruumis eelnevalt valmis olnud PLA-jõhviga (Lisa 1 Tabelis 1 vastavalt PLA1 ja PLA2). Esimene võimaldas teha mõned paljulubavad katsed, kuid ükski neist ei jõudnud planeeritud tulemuseni ning isegi parimad neist katkesid umbes 25% juures, sest jõhv ummistas düüsi. Proovisin erinevaid seadistusi, muutes temperatuuri ning kuumaaluse materjali, kuid ei saanud rahuldavat tulemust, testid katkesid düüsi ummistumise tõttu. Vahetasin jõhvi, kuid tulemused ei paranenud. Probleemide põhjusena tuvastasid lõpuks prindipea düüsi ummistuse,

mida ei olnud võimalik eemaldada isegi kloroformis leotades - mistõttu tuli düüs vahetada. Lisaks uuele düüsile, võtsin kasutusele ka järgmise, Prusa PETG, jõhvi ning hoolimata mõningatest ebaõnnestumistest sain esimesed edukad kiirusetesti prindid.

Testimise lõpetamiseks printisin XYZ-kalibratsiooni kuubikuid (Joonis 6) erinevatel kiirustel.

4.2 Printeri analüüs

Grand Pharaoh XD printeri kaasajastamise käigus tuvastasin mitmeid aspekte, mida oleks olnud võimalik printeri mugavamalt kasutatavaks ning töökindlamaks muutmiseks täiendada, kuid suurimaks probleemiks hindasin 2024. septembri seisuga vananenud püsi- ja tarkvara. Ettevõtte Mass Portal SIA on lõpetanud printeriga kaasa tulnud tarkvara arendamise ja toetamise ning RADDs plaadi kasutamise tõttu ei olnud võimalik seda uuendada kõige uuematele püsivaradele. Seetõttu oli vaja välja vahetada printeri kontrollplaat.

Kontrollplaadi asendamisega kaasnes ka mootorit kontrollivate draiverite vahetus, kuna algsel kontrollplaadil olevad draiverid ei olnud tõenäoliselt ühilduvad uuemate plaatidega. Lisaks võimaldas uuemate draiverite kasutuselevõtt suurendada töökiirust ja vähendada mürataset.

Printimisalusena on Grand Pharaoh XD printeris kasutusel 38 cm diameetriga klaasist alus. Printeri kasutajasõbralikumaks tegemise eesmärgil otsustasin lisada kuumaalusele magnetiga eemaldatava metallkatte. Selline lahendus mitte ainult ei lihtsusta valminud objektide eemaldamist, vaid suurendab printimisprotsessi täpsust, võimaldades kasutada ka magnetväljal põhinevaid sensoreid prindialuse kõrguse automaatseks kalibreerimiseks.

4.3 Uue püsi- ja tarkvara valimine

3D-printeri juhtimiseks sobivaima püsivara valik on seotud kasutusmugavuse, soovitud printimiskvaliteedi ja seadme edaspidiste laiendamisvõimalustega. Võrreldes Marlini ja Repetieriga pakub Klipper (vt Lisa 3 toodud tabel) mitmeid kaasaegseid eeliseid, mis toetavad nii täpset juhtimist, paindlikku konfiguratsiooni kui ka kaasaegse riistvara täielikku ärakasutamist.

Klipperi kasutaja saab printeri seadeid muuta reaajas ilma püsivara ümberkompileerimiseta, sest konfiguratsioon põhineb tekstipõhisel printer.cfg failil – erinevalt nii Marlinist kui ka Repetierist, mis nõuavad Configuration.h failide muutmist ja seejärel püsivara uuesti laadimist.

Klipper toetab sisendi kujundamist (*Input Shaping*), mille abil saab märkimisväärselt vähendada printimisel tekkivat “kaja” (echo, ringing) ehk ebatasasusi, mis tekivad prinditava objekti külgedele kiirete suunamuutuste tõttu printimisel ja on enamasti mehaaniliste põhjustega. Kuigi sisendi kujundamine on toetatud ka Marlinil, on Klipperile võimalik lisada kiirendusandur, et saada täpsemaid tulemusi. Klipperi Pressure Advance (survekompensatsioon) funktsioon aitab minimeerida plastiku tilkumist ja vähendab plastiku mulle nurkades pööramisel. Lisaks delegeerib Klipper keerukamad arvutused Raspberry Pi või muu SBC (Single Board Computer) kanda.

Lisaks toetab Klipper CAN-bus protokoll ja mitme MCU (microcontroller unit) kasutamist, mis annab olulise eelise laiendatavuse ja mooduliseadistuse kontekstis – näiteks CoreXY või IDEX printerid, mis vajavad keerukamat koordineeritud juhtimist.

Kasutajasõbralikkuse vaatenurgast on Klipperi välja arendatud mitu kaasaegset veebiliidest (nt Mainsail, Fluidd, OctoPrint), mis võimaldavad intuiitivset printimise juhtimist, reaajas jälgimist ning integreeritud G-koodi haldust ja kaameraga jälgimist.

Kokkuvõtvalt pakub Klipper vabavarana väga head tasakaalu tehnoloogilise võimekuse ja praktilise kasutatavuse vahel. Selle konfiguratsiooni paindlikkus, reaajas muudatuste tegemise võimalus, kõrgkvaliteetne liikumise juhtimine ning laiendatavus moodulriistvaraga loovad tugevad argumendid selle kasuks, et just Klipper sobib kõige paremini tänapäevasele kvaliteetsele FDM-printerile.

4.4 Uuendatava riistava valimine

Uue 3D-printeri kontrollplaadi valikuks seadsin järgmised tingimused:

- 32-bitine protsessor – lubab kasutada uusi ja potentsiaalselt vaiksemaid samm-mootori draivereid ning kindlustab, et printerile on võimalik paigaldada kaasaegset püsivara, mille jaoks 8-bitine protsessor on tõenäoliselt liiga aeglane.

- 24V sisendvool - printeris olemasolevate vooluallikatega ei ole probleeme ja nad jäävad kasutusse. See tähendab, et uue kontrollplaadi sisendiks peaks olema 24V.
- 8 või rohkem 24V mootori draiverit - printeri toiteallikad annavad välja 24V, seega tuleb valida 24V samm-mootoreid juhtida suutvad draiverid. Lisaks lubab suurem mootoridraiverite arv tulevikus lisada mootoreid teiste neid vajavate uuenduste tarvis.
- 4 või rohkem ventilaatori väljundit - algseisus on Grand Pharaoh XD printeris 12 ventilaatorit, mida kontrollitakse läbi 3 erineva väljundi. 4 või rohkem ventilaatori väljundit lubaks kontrollida kõiki olemasolevaid ventilaatoreid ja neid vastavalt vajadusele tulevikus juurde lisada.
- Eraldiseised Raspberry Pi - kuna töö üks eesmärkidest oli kaasajastada printer võimalikult modulaarsete ja vabavaraliste komponentidega, ei ole otstarbekas kasutada kontrollplaadile sisseehitatud Raspberry Pi'd.

Nende tingimuste järgi internetis tehtud otsingute tulemustel jäi valikusse 5 erinevat kontrollplaati.

- BIGTREETECH (BTT) Kraken [26]
- BTT Octopus Max EZ [27]
- BTT Octopus Pro V1.1 [28]
- MKS SKIPR V1.0 [29]
- Fystec Spider V3.0 [30]

Kontrollplaadi valimise käigus välistasin esmalt BTT Octopus Max EZ, kuna see nõuab spetsiaalseid BTT arendatud samm-mootori draivereid, mille saadavus väljaspool tootjat on piiratud - asjaolu, mis on vastuolus töö eesmärgiga.

Sarnastel põhjustel jätsin valikust välja ka MKS SKIPR, kuna see vajab mitmete funktsioonide kasutamiseks spetsiaalset MKS PI plaati, mis aga erineb tavalisest Raspberry Pi'st ning sellest sõltuvus võib tekitada probleeme tulevikus.

BTT Kraken ei sobinud, kuna sellel on integreeritud samm-mootori draiverid, mis ei võimalda neid tulevikus välja vahetada.

Lõpuks võrdlesin Fysetc Spider V3.0 ja BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaate. Need on väga sarnased, kuid Octopus plaadil on olemas põhjalikum tootjapoolne dokumentatsioon ning minu poolt läbi viidud taustauuringute põhjal on sellel hinnanguliselt ka suurem kasutajaskond.

Nendel põhjustel valisin printeri kontrollplaadiks BTT Ocopus Pro V1.1

Lisaks kontrollplaadile tellisin printerile uue kiirendussensori, mis lubab seda kasutada täpsema sisendi kujundamise (*input shaping*) jaoks ning vähendab oluliselt vajadust manuaalse kalibreerimise järele. Valisin BTT S2DW kiirendussensori, mis kasutab LIS2DW12TR kiipi, sest see on ADXL345 mudeliga võrreldes täpsem ning sel on Raspberry Pi'ga ühendusvõimalus läbi USB-C pordi.

Samuti sai valitud kuumaaluse nivelleerimisandur. Valisin BTT Eddy, kuna vastavalt Klipperi dokumentatsioonile peaks see veatult Klipperiga ühilduma ning andma kiired ning täpsed tulemused [31]. Lisaks sobib see hästi tööks koos juba tellitud metallist printimisalusega, kuna BTT Eddy kasutab printimisaluse analüüsimiseks magnetvälju.

Arvestades, et printeri püsivaraks valisin Klipperi, oli vaja ka sobivat arvutit, kuhu paigaldada Linux operatsioonisüsteem ning Klipper. Mass Portal printeril oli olemas Raspberry 3B miniarvuti, kuid kuna selle jõudlus on tänaseks päevaks ajale jalgu jäänud, otsustasin asendada selle suurema jõudluse ja efektiivsusega Raspberry Pi 5.

5. Uuenduste rakendamine

5.1 Klipperi tarkvara paigaldamine

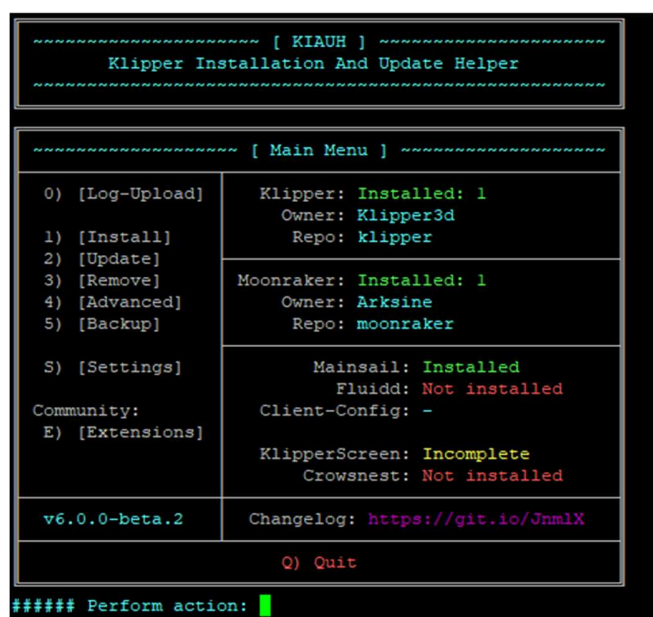
Klipperi tarkvara paigaldamine algas Linuxi operatsioonisüsteemi valikust. Kuna osa töö eesmärkidest oli printeri kasutajasõbralikumaks tegemine, otsustasin lisaks Klipperile kasutada ka Mainsail'i. Mainsail [22] on veebipõhine kasutajaliides, mis lubab ühendatud printeriga ühenduda läbi veebibrauseri ilma kasutajapoolseid programme paigaldamata.

Mainsaili eelis seisneb ka selles, et sellele on loodud spetsiaalne operatsioonisüsteem, MainsailOS [32], mis põhineb Raspberry Pi platvormil. Algse plaani kohaselt kavandati kasutada just MainsailOS'i Raspberry Pi 5 seadmel. Kahjuks selgus, et Raspberry Pi ametlik operatsioonisüsteemi paigaldaja Raspberry Pi Imager ei toeta Raspberry Pi 5 jaoks MainsailOS'i. Täiendav kontroll MainsailOS'i ametlikul veebilehel ei kinnitanud samuti Raspberry Pi 5 toe olemasolu. MainsailOS'i viimane suurem tarkvaraversioon oli avaldatud 2024. aasta jaanuaris ning see ei pakkunud isegi Raspberry Pi 4 tuge.

Seetõttu otsustasin kasutada Raspberry Pi OS 64-bitist versiooni, mis on Raspberry Pi platvormi jaoks optimeeritud Debianil põhinev operatsioonisüsteem. See valik võimaldas vähendada võimalike riistvarapõhiste probleemide riski ning tagas ühtlasi parema kooskõla KIAUH (Klipper Installation And Update Helper) [33] dokumentatsioonis soovitatud Raspberry Pi OS Lite'iga,

erinedes sellest vaid peamiselt graafilise kasutajaliidese olemasolu poolest.

Raspberry Pi OS operatsioonisüsteemi ja selle esmaste uuenduste paigaldamisele järgnes KIAUH tarkvara paigaldamine. Joonisel 7 kujutatud KIAUH on tööriist, mille eesmärk on lihtsustada Klipperi ja sellega seotud lisakomponentide paigaldamist ning uuendamist. Klipperi paigaldamisele järgnesid Moonrakeri ja Mainsaili installeerimine. Moonraker on Klipperi jaoks vajalik taustaserver, mis



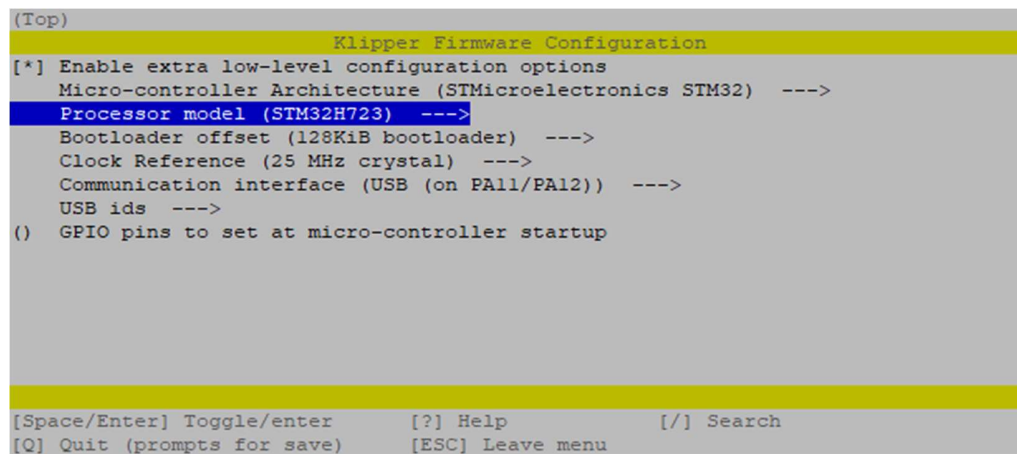
Joonis 7. KIAUH kasutajaliides

võimaldab kasutajaliidese kaudu suhtlemist, pakkudes API-teenuseid, mille kaudu Mainsail saab suhelda Klipperiga. Mainsail tagab mugava ja lihtsasti ligipääsetava veebipõhise kasutajaliidese printeri juhtimiseks.

Lisaks paigaldas Klipperscreeni, mis on spetsiaalselt puutetundlike ekraanide jaoks loodud kasutajaliides. Klipperscreeni saab seadistada käivituma automaatselt koos Raspberry Pi alglaadimisega või aktiveerida manuaalselt vastavalt vajadusele.

5.2 Klipperi püsivara paigaldamine

Printeri uuendamise esimene etapp hõlmas Klipperi tarkvara paigaldamist Raspberry Pi platvormile koos kasutajaliidestega, mis võimaldavad süsteemiga mugavalt suhelda. Sellele järgnes kontrollplaadi töökindluse ja ühilduvuse kontrollimine. Võtsin kasutusele BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaadi, millele laadisin püsivara üle USB-liidese. Selleks sai kasutatud Klipperi tarkvaraga kaasnevat tööriista *Klipper Firmware Configuration* (Joonis 8), mille abil konfigureerisin BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaadi jaoks sobiva püsivara. Konfiguratsiooni salvestamisele järgnes “make” käsu käivitamine, mille tulemusena genereeriti püsivara fail.



```
(Top)
Klipper Firmware Configuration
[*] Enable extra low-level configuration options
Micro-controller Architecture (STMicroelectronics STM32) --->
Processor model (STM32H723) ---->
Bootloader offset (128KiB bootloader) --->
Clock Reference (25 MHz crystal) --->
Communication interface (USB (on PA11/PA12)) ---->
USB ids ---->
( ) GPIO pins to set at micro-controller startup

[Space/Enter] Toggle/enter    [?] Help    [/] Search
[Q] Quit (prompts for save)  [ESC] Leave menu
```

Joonis 8. Klipper Firmware Configuration

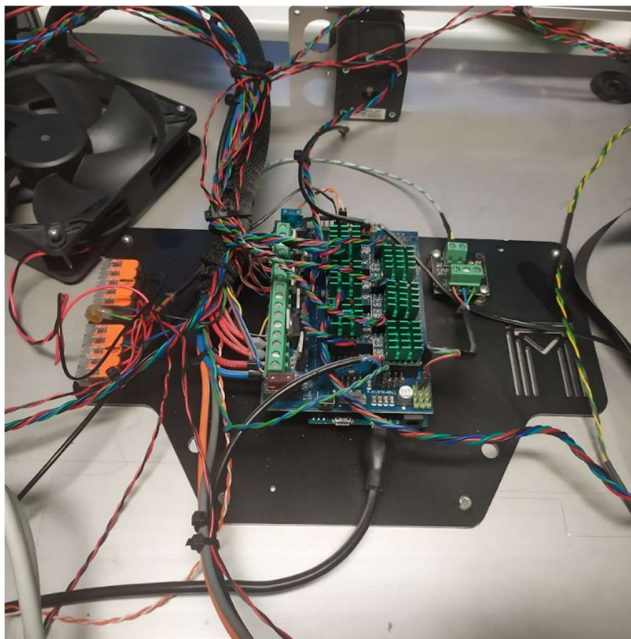
Püsivara kontrollplaadile paigaldamise protsess oli tehniliselt lihtne. Genereeritud püsivara fail tuli ümber nimetada nimele firmware.bin ning kopeerida tühjale, vormindatud SD-kaardile. Seejärel sisestasin SD-kaardi kontrollplaadil olevasse pesasse ning vajutasin plaadil asuvat

lähtestamise nuppu. Eduka paigaldamise indikaatoriks oli SD-kaardil asuva faili nimetuse muutumine FIRMWARE.CUR-ks.

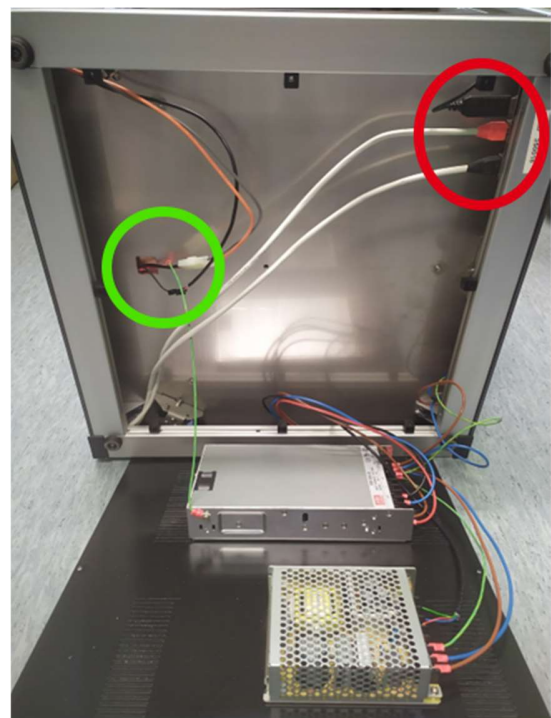
5.3 Vana kontrollplaadi eemaldamine ja ühenduste kaardistamine

Printeri uuendamise järgmine etapp hõlmas olemasoleva kontrollplaadi eemaldamist. Esmaseks sammuks oli printeri avamine, et tagada ligipääs kontrollplaadile. Eemaldasin printeri ülemist osa katva must plastikust katte ning seda hoidva Raspberry ekraani, et pääseda ligi printeri sisemusele.

Ventilaatori eemaldamisel muutusid nähtavaks joonisel 9 nähtav musta plastikust aluse külge kinnitatud kontrollplaat, selle kõrval paiknev termopaari võimendi ning vasakul küljel asuvad Wago klemmliistud.



Joonis 9. Avatud printeri pealtvaade



Joonis 10. Avatud printeri altvaade

Printeri toiteallikatest ning nende ühendustest parema ülevaate saamiseks avasin järgmisena printeri alumise osa. Joonisel 10 on roheline näha ringiga märgitud kuumaaluse ühenduskoht printeri aluse keskel. Lisaks kuumaaluse ja toitejuhtmetele on printeri allosas ka joonisel 10 punase

Printeri põhjaplaadil asuvad kaks Mean Well toiteplokki järgnevate parameetritega:

- Toitejuhtmeid järgides ja multimeetriga kontrollides selgitasin välja erinevate toitepingete paiknemise süsteemis ja märgistasin kaablid vastavate tähistega. Juhtmete kulgemise analüüs näitas, et printeri kontrollplaat kasutas 24 V pinget mootorite, küttekeha ja kuumaaluse toiteks. Samas 12 V liin oli ühendatud klemmliistudega ning 5 V liin oli kasutusel ainult Raspberry Pi ja selle puutetundlikku ekraani toite jaoks.



Tuginedes RADDs kontrollplaadi skeemile (Joonis 11 [17]) ning visuaalsele kontrollile, eemaldas in kontrollpladiga ühendatud juhtmed ning sildistas in need vastavalt nende funktsioonidele.

Lisaks kontrollpladile eemaldas in eraldiseiseva termopaari võimendi, kuna Klipper ei võimaldanud valitud BTT Octopus Pro pladiga termopaaride ühendust ning temperatuuriandurina oli plaanis kasutada RADDs-pladil termistori ühendusse ühendatud ning printipeani jooksvat juhet.

5.4 Raspberry Pi 5 paigaldamine

Kuna printer kasutas varasemalt Raspberry Pi 3B miniarvutit (Joonis 12), mis oli potentsiaalseks probleemikohaks, oli see vaja välja vahetada uuema Raspberry Pi 5 vastu.



Joonis 12. Raspberry Pi 3B koos puutetundliku ekraani ja printerisse ühenduva alusega

Asendas in Raspberry uuega. Puutetundlik ekraan jäi samaks, kuid versioonide erinevusest tingituna oli vajalik kasutada uut ühenduskaablit, kuna Raspberry Pi 5 kasutab erinevat

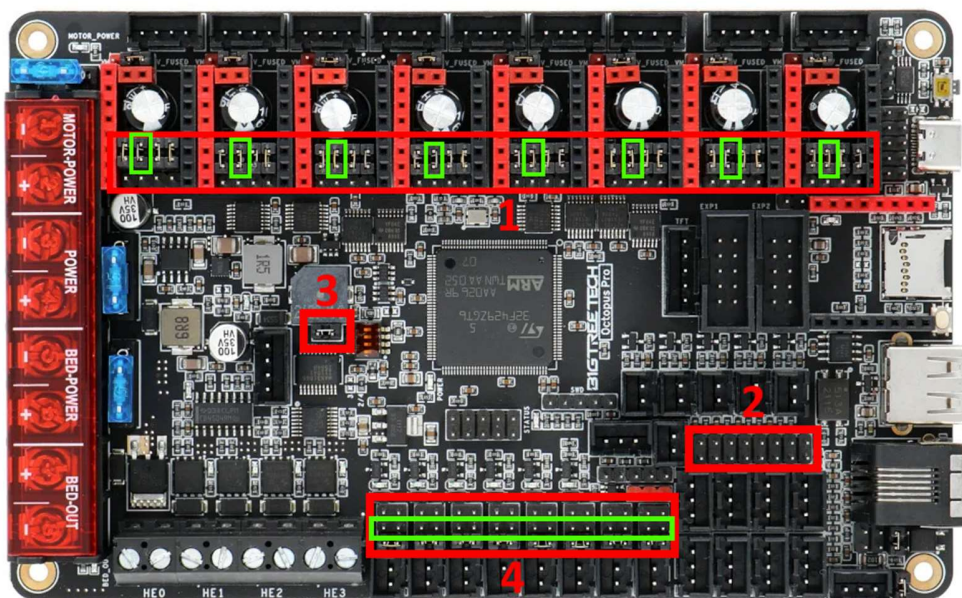
ekraaniliidest võrreldes Raspberry Pi 3B-ga. Kuna Raspberry Pi toide tuli otse printeri toiteploki, ilma kontrollplaadi vahenduseta, oli uut süsteemi kohe võimalik testida.

Testimisel ilmnas, et Raspberry Pi 5 lülitus lisaseadmete ühendamisel välja, kuna varasemalt Raspberry Pi 3B jaoks kasutatud toitekaabli ristlõige ei taganud enam piisavat voolu uuema ja võimsama Raspberry Pi 5 jaoks. Probleem lahendati, asendades kaablid suurema ristlõikega juhtmetega, mis said hiljem ühendatud kontrollplaadile.

5.5 BTT Octopus Pro V1.1 paigaldamine

Paigaldasin BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaadi printerisse, kasutades plaadi nurkades olevaid kruviauke ja metallist distantspukse, et tagada kontrollplaadi piisav kõrgus ja vältida kokkupuudet printeri alumiiniumist põhjaga. Pärast kontrollplaadi kinnitamist kohandasin olemasolevate toitekaablite pistikud, et need sobiksid uue kontrollplaadi ühendustega.

Ühendasin Raspberry Pi USB-C ja toite Octopus Pro kontrollplaadiga. Pärast ühenduste testimist eemaldasid plaadilt toite, et valmistada plaat ette šuntide seadistamiseks.



Joonis 13. Kontrollplaadil tehtud šuntide muudatused. Autori täiendatud

1. Joonisel 13 [34] märgitud šundid määravad TMC2209 draiveri kasutamise UART-režiimis.
2. Eemaldasin märgitud šundid, sest need lubavad kasutada *Stallguard*-funktsiooni – mis võimaldaks sensoritetu lõpulüliti funktsionaalsuse [35] ning mida ei olnud plaanis kasutada.
3. Octopus Pro plaadile on võimalik voolu anda läbi USB-C ühenduse. Kuna vajasin USB-C ühendust Raspberry Pi'ga suhtluseks, mitte voolu jaoks, eemaldasin märgitud šundi.
4. Joonisel punasega märgitud šundid lasevad muuta ventilaatorite kasutatavat pinget. Kõik printeris olevad ventilaatorid kasutavad 12V oli vaja šundid liigutada rohelisega märgitud kohtadesse.

Šuntide seadistuse kinnitamise järel ühendasin kontrollplaadile samm-mootori draiverid, millele paigaldasin eelnevalt jahutusradiaatorid, siis ühendasin prindipea liikumist juhtivad mootorid. Nende korrektse järjestuse määramiseks kasutasin Klipper'i näidiskonfiguratsiooni BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaadi jaoks ning Klipper'i konfiguratsiooni dokumentatsiooni [36]. Dokumentatsiooni alusel määrasin, et *stepper_a* ühendus vastab printeri eesosas paiknevale vasakpoolsele mootorile, *stepper_b* parempoolsele mootorile ning *stepper_c* tagumisele mootorile. Ühendasin mootorid vastavalt nende positsioonidele, kasutades delta-printerile sobivat konfiguratsiooni. Lõplikud konfiguratsioonifailid ja mõned vaheversioonid on leitavad lisas 4.

Ekstruuderite mootorite ühendamisel ei saanud kasutada järgmist porti 4, sest see on sillatud pesaga 3, mida on võimalik kasutada printerite z-telje mootorite sünkroonjuhtimiseks. Seega ühendasin ekstruuderite mootorid pesadesse 4-6.

Esmaseks testimiseks ühendasin kontrollplaadile ka lõpulülite andurid, mis annavad prindipea mootoritele signaali, kui need saavutavad maksimaalse liikumise printeri ülemises piirkonnas. Lõpulülite tööpõhimõtteks on lihtne optiline ja elektriline lüliti, mis sulgeb vooluringi, kui anduri ette asetub takistus, ning katkestab selle, kui anduri ees midagi ei ole. Määrasin iga prindipead liigutava mootori jaoks konfiguratsioonis vastava lõpulüliti. Ühenduskohtade valikul lähtusin juhtmete pikkusest, kuna olemasolevad juhtmed olid projekteeritud eelmise RADDS kontrollplaadi jaoks, jäid need uue kontrollplaadi jaoks lühikeseks. Juhtmete pikendamine ja konfiguratsioonis ühenduste määramine võimaldasid lõpulülite korrektset toimimist.

Kuumaaluse ühendamiseks vahetasin kasutusel olnud juhtmete otsikud ja ühendasin uuele plaadile. Konfiguratsioonis ei vajanud muudatusi. Prindipea küttekehadele oli vaja määrata konfiguratsioonis ühenduskoht ning seejärel need plaadile ühendada. Mõlema kütteelemendi temperatuuri monitoorimiseks lisati vastavad termistorid.

5.6 Uuenduste töökindluse testimine

5.6.1 Samm-mootorite testimine

Samm-mootorite testimiseks tuleb määrata nende konfiguratsioon. Klipperist saadud BTT Octopus Pro V1.1 nädiskonfiguratsioon paneb paika plaadiga seotud info, kuid spetsiifiline mootorite info on vaja sinna käsitsi sisestada. Selleks, et Klipper suudaks arvutada, kui palju mootorit liigutada on vaja, et hammasrihmale oleval kelk liiguks mingi kindla maa, on vaja konfiguratsiooni lisada mitu erinevat parameetrit.

1. *Rotation_distance* ehk pöörlemiskaugus määrab kauguse millimeetrites, mille kelk läbib mootori ühe täispöörde tulemusena. Selle arvutamiseks kasutasin hammasrihma hambavahe pikkust ning mootori rihmaratta hammaste arvu. Visuaalse kontrolli tulemusena sai pöörlemiskauguseks $2 \text{ mm} * 16 = 32 \text{ mm}$.
2. *Full_steps_per_rotation* näitab, mitu täissammu on vaja mootori ühe täispöörde saavutamiseks. Vastavalt kasutatud mootorite spetsifikatsioonile on väärtus 400.
3. *Microsteps* ehk mikrosammud määrab, kui mitu mikrosammu teeb samm-mootori draiver ühe täissammu jooksul. Kuigi kasutusel olevad TMC2209 draiverid suudavad teha kuni 256 mikrosammu, määrasin esmastel testidel selle väärtuseks 16, et lihtsustada süsteemi häälestust.

Klipperi "STEPPER_BUZZ" käsklusega testisin samm-mootoreid 1 cm kaupa edasi-tagasi liigutades vastavalt konfiguratsioonis määratud *dir_pin* suunale. Kõik töötasid tõrgeteta.

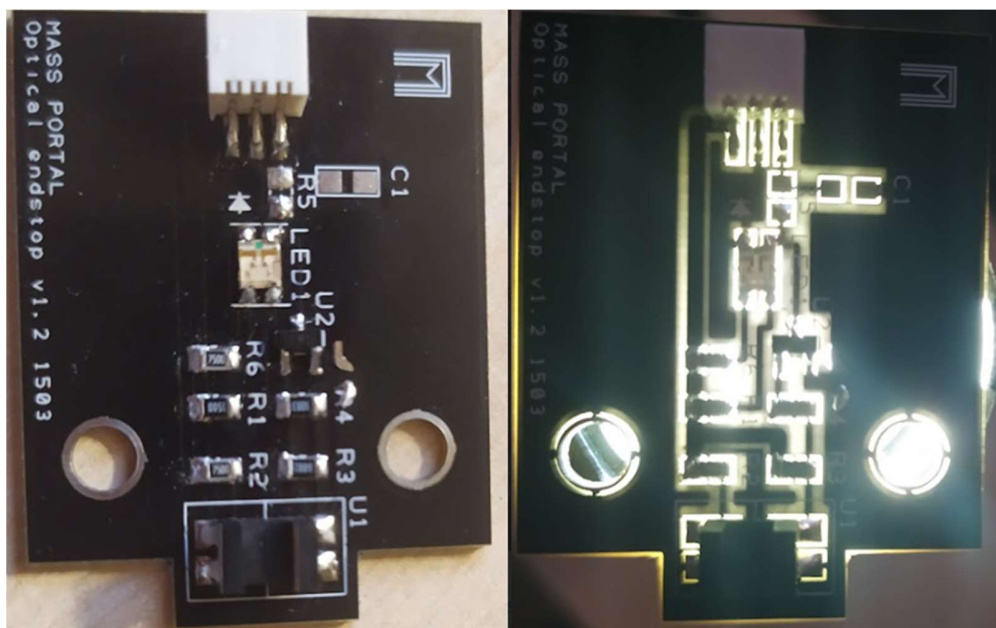
5.6.2 Lõpulülite testimine

Lõpulülite kontrollimiseks kasutasin käsku "QUERY_ENDSTOP" kelgu tavaasendis ja lõpulülite juures. Töökorras lüliti annab neis asendites erineva tulemuse. Kui loogikad on vastupidised, tuleb signaali pööramiseks konfiguratsioonis *endstop_pin* ette lisada hüüumärk (!).

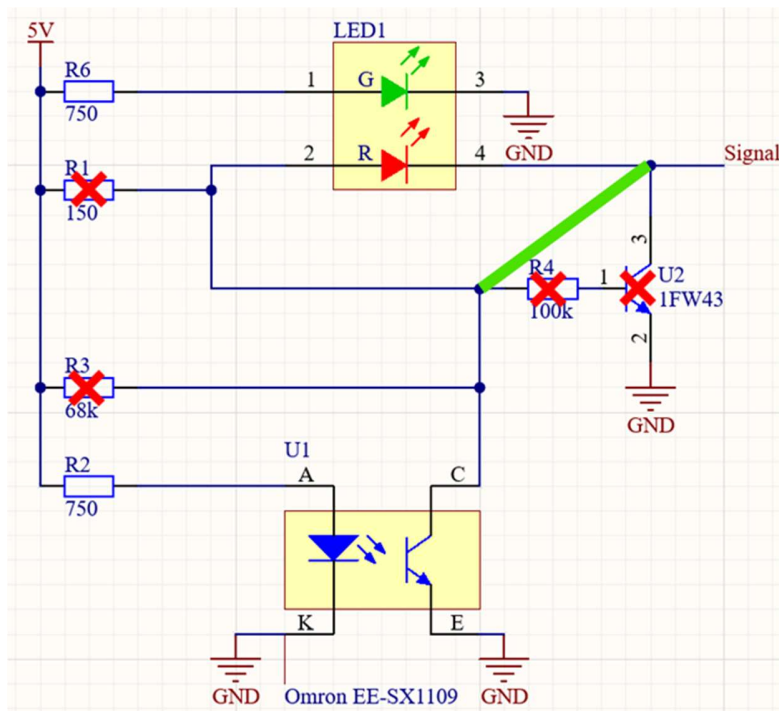
Käsklus “QUERY_ENDSTOP” andis staatuse ”open”, v.a lõpulüliti füüsiliselt kontrollplaadilt.

Probleemi diagnoosimiseks eemaldasin printerilt ühe lõpulüliti ning mõõtsin sellel olevaid pingeid multimeetriga. Mõõtmiste tulemusena leidsin, et lõpulüliti ei kontrollinud elektriahela katkestamist, nagu kasutuselolev kontrollplaat eeldas, vaid muutis ahela väljundit vastavalt 1,8 V või 3,4 V vahel.

Lõpulüliti tööpõhimõtte paremaks ülevaate saamiseks kasutasin tugevat valgusallikat, et trükkplaat läbi valgustada (Joonis 14) ja koostada skeem (Joonis 15)



Joonis 14. Lõpulüliti

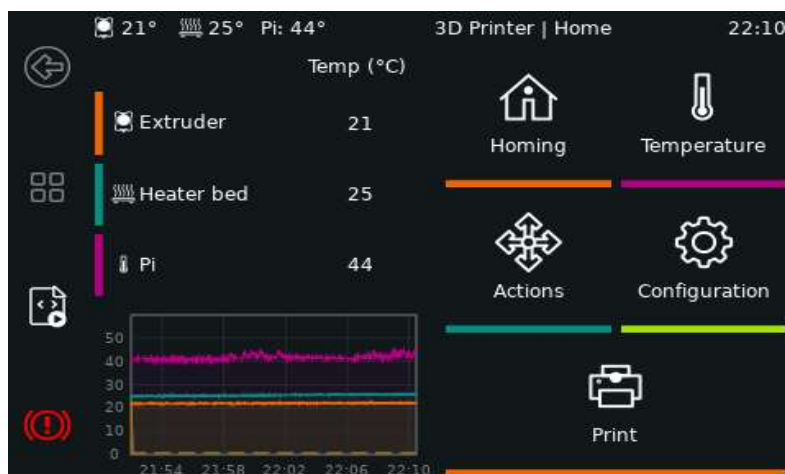


Eemaldasid trükkplaadilt takistid R1, R3, R4 ning transistori U2 ja kasutades vabanenud patju sildasin R4 komponendi ja U2 komponendi, tekitades ühenduse optilisest lülitist signaalin väljundini. Veendusin, et modifitseeritud skeem tagastas “QUERY_ENDSTOP” käsklusele ootuspärased pingnivood ja lõpulüliti olekud.

Joonis 15. Lõpulüliti skeem

5.6.3 Termistoride testimine

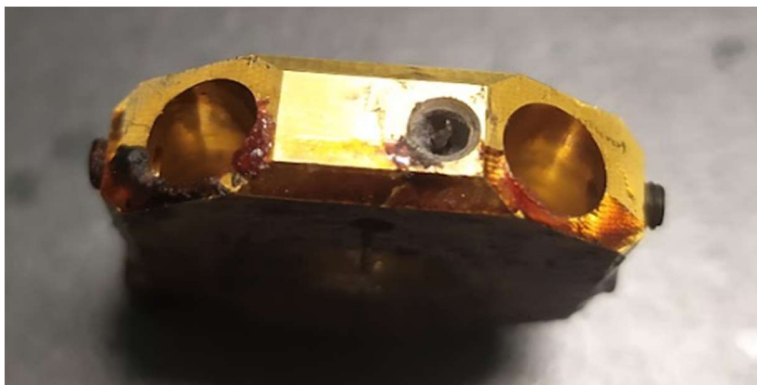
Termistoride esmane testimine viidi läbi Klipperscreeni [37] tarkvara abil, mis võimaldab hõlpsasti kontrollida printeri liikumist, soojenduselemente ning jälgida temperatuure.



Joonis 16. Klipperscreen'i kasutajaliides

Joonisel 16 [37] nähtava Klipperscreeni kaudu on võimalik nii kuumaaluse kui ka prindipea temperatuure vaadelda ja vajadusel muuta. Esmase kontrolli käigus tuvastasin, et mõlemad termistorid näitasid toatemperatuurile lähedasi väärtusi, mis viitas nende töökorrale.

Kuumaaluse temperatuur tõusis Klipperscreenis määratud väärtuseni ilma probleemideta. Prindipea küttekeha temperatuuri tõstmisel, aga Klipperscreenis kuvatav väärtus ei muutunud ning Klipper katkestas töö. Juhtmeid prindipeani järgides avastasin, et kütteplokki oli hoopis ühendatud printerilt kontrollplaadiga mitteühilduv termopaar.



Joonis 17. Kütteplokki külgvaade termopaari ühendusega

Kuna termopaar oli kütteplokki kinni jäänud (Joonis 17), tuli prindipea täielikult lahti võtta ja andur puurides eemaldada.

MAX31865, BTT Octopus Pro V1.1 kontrollplaadile integreeritud takistus-digitaalmuunduriga saab kasutada PT100 ja PT1000

andureid. Sobiva anduri leidmisel oli peamiseks kriteeriumiks kütteplokki anduriava mõõtmed. Valisin LABFACILITY XF-941-FAR PT100, mille neljajuhtmeline ühendus võimaldab kompenseerida juhtme takistust ning seeläbi saavutada täpsemaid mõõtetulemusi [38].

LABFACILITY sensori MAX31865 muunduri kasutamine nõudis konfiguratsioonis ning kontrollplaadil parameetrite muutmist ning kontrollplaadil DIP-lülite seadistamist. Seadistasin DIP-lülite 4-juhtmega PT100 sensorile vastavaks ning pärast vajalike pikenduste ja plaadiga liidestamiseks sobivate otsikute lisamist ühendasin PT100 sensori kontrollplaadiga.

Kasutades Klipperi konfiguratsioonikirjelduses olevat näitekonfiguratsioon MAX-tüüpi sensoritele lisasin printeri konfiguratsiooni MAX31865 sensorile vastava info. Konfiguratsiooni muudatuste salvestamiseks vajaliku Klipperi püsivara taaskäivituse järel ilmnes Klipperil viga “Thermocouple reader fault” - Termopaari lugeja rike.

Kahtlustades konfiguratsiooniviga, tegin muudatusi ja testisin alternatiivseid seadeid. Proovitud sai sünkroonse järjestiksuhtluse liidese (SPI) kasutamine läbi spi-siini ja läbi tarkvaralise SPI ning

selle ühenduste määramise. Testisin erinevaid seadete variatsioone ja DIP-lülite positsioone, kuid tehtud testide tulemused ei muutunud. Kuna PT100 nelja juhtmega sensorit on võimalik kasutada ka kahe juhtmega, testisin seda ka nii. Muutsin konfiguratsiooni ja DIP-lülid kahele juhtmele sobivale kujule, kuid testi tulemus ei muutunud. Kui sensor oli kontrollplaadile ühendatud, andis Klipper alati veateate. Logidest põhjalikumalt otsides leidsin kirje “MAX31865 RTD input is shorted”, ehk MAX31865 RTD sisend on lühistatud.

Testimiseks tellisin 2-juhtmeline PT 100 sensori, kuid ka testimisel tulemused ei muutunud. Küsitlused kontrollplaadi tootjale ja Klipperis foorumis ei andnud lahendust. Kuna kogutud info viitas, et sensorid olid õigesti ühendatud ja konfiguratsioon veatu, järeldasin, et MAX31865 muundur oli vigane ja lõpetasin selle kasutamise.

Kuna Klipperis konfiguratsioon võimaldab PT1000 temperatuurianduri kasutamist otse termistori ühendusviikude kaudu, otsustasin MAX31865 asemel kasutada seda lahendust. Tellisin PT1000 anduri, ühendasin selle otse kontrolleri termistori sisendile ning seadistasin Klipperis vastava temperatuurianduri tüübi (sensor_type: PT1000).

Pärast muudatuste salvestamist ja Klipperis taaskäivitamist töötas süsteem. Testimiseks kuumutasin andurit manuaalselt ning Klipperscreenil kuvatav temperatuur muutus vastavalt reaalsele temperatuurile, kinnitades, et uus andur ja seadistus toimivad ootuspäraselt.

Kuna Klipperis sisseehitatud konfiguratsioonis on olemas seadistused PT1000 sensori kasutamiseks läbi termistoride viikude, otsustasin vastava anduri tellida ja kasutada sisseehitatud konfiguratsiooni. Klipperit kasutades ei tekkinud enam varasemalt olnud viga ning manuaalselt sensori temperatuuri tõstes, muutus ka temperatuuri näit Klipperscreenil.

Paigaldasin PT1000 sensori prindipea kütteplokki, lisasin sellele pikenduskaabli, monteeringu prindipea uuesti kokku ja testisin Klipperscreeni kaudu temperatuuri tõstmist 150 kraadini. Tulemus oli positiivne, veateadet ei ilmunud ning temperatuuri näit tõusis.

Klipper toetab PID-kontrolli (proportsionaal-integraal-diferentsiaal-kontroll) ekstruuderite ja kuumaaluse jaoks. Termistorite testi viimase sammuna teostasin ekstruuderi PID seadistuste kalibratsiooni kasutades käsklust “PID_CALIBRATE”. Käskluse tulemuse salvestamine muutis printeri konfiguratsioonis olevaid PID parameetreid ning ekstruuderi kuumutamisel saavutatava temperatuuri täpsus ja stabiilsus tõusis.

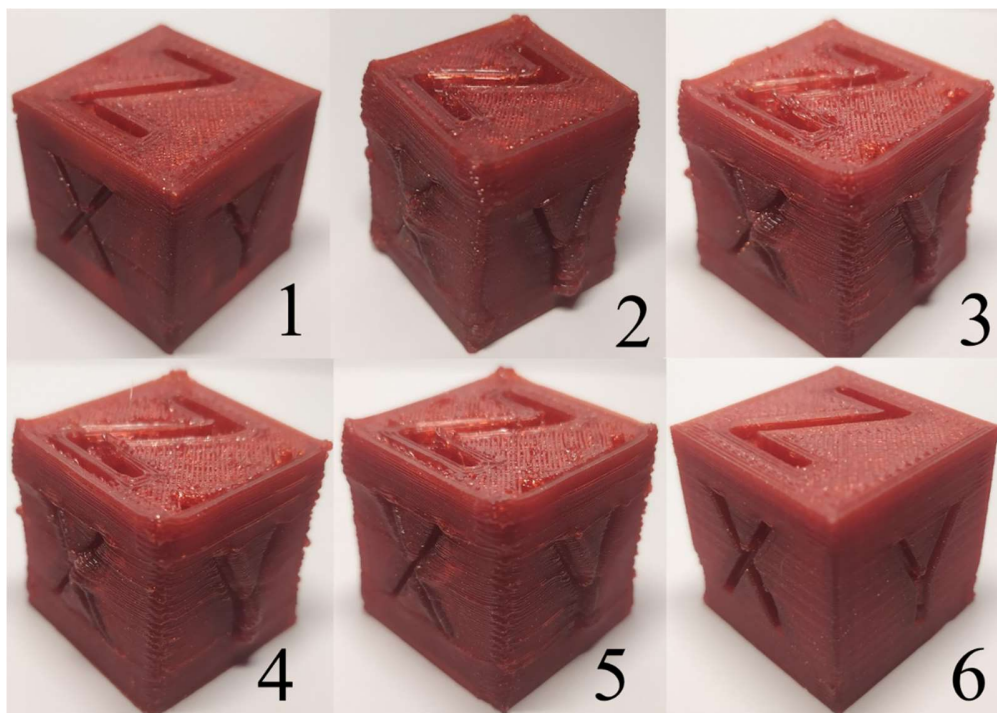
6. Uuenduste testimine ja tulemuste hindamine

6.1 Uuenduste testimine kasutades Simplify3D viilutamistarkvara

Varasemalt tehtud testprintide analüüs näitas, et osa probleemidest olid seotud kiirusetesti mudeliga, mille kuju ei soodustanud kuumaalusele kinnitumist. Samuti ei muutunud erinevate kihtide printimise ajakulu proportsionaalselt viilutajas seatud printimise kiirusega. Kuna ka mudel ise oli mõeldud 0,4 suurusega düüsi, mitte kasutusele oleva 0,6 suurusega düüsi jaoks, järeldasin, et enne ja pärast uuendusi tehtud kiirusetestide printide võrdlus ei annaks usaldusväärset tulemust.

Suurendades viilutamistarkvas XYZ-kalibratsiooni kuubikute printimise kiiruse 5000 mm/m (millimeetrit minutis) pealt 10 000 mm/m peale, langes printimise aeg 29 minutilt ja 55 sekundilt 27 minutile ja 10 sekundile, erinevus oli kõigest 2 minutit ja 45 sekundit, moodustades vaid 10% kogu prindi ajast. Kuna ka printide kvaliteedis ei olnud suuri erinevusi, otsustasin uuendusele järgnevatel testides hoida kiiruse 5000 mm/m ligidal ning mitte võrrelda printe kiiruse põhjal.

Kasutades Simplify3D viilutamistarkvara tegin uuendatud printeriga 5 XYZ-kalibratsiooni kuubiku printi, muutes iga prindiga Klipper'i või viilutaja konfiguratsiooni, kuni sain tulemuse, millega jäin rahule. Prindid on nähtavad joonisel 18.

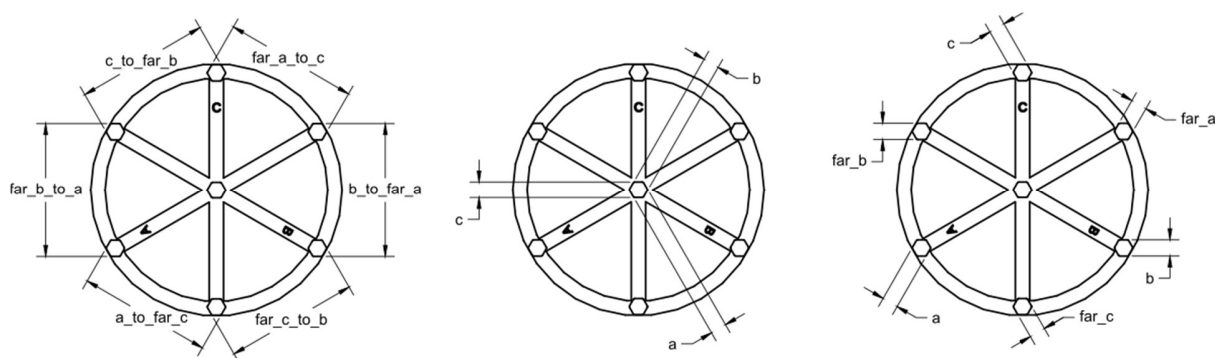


Joonis 18. Simplify3D viilutamistarkvara kasutades tehtud testprindid

Joonisel 18 kujutab 1. kuubik algseisu ning 2.-6. kuubik kujutavad printe erinevatel kalibratsiooni etappidel.

- Joonise 18 esimesel pildil on kuubik, mis prinditi printeri algses, uuendusteta seisundis. See kuubik toimib võrdlusalusena edasistele testidele.
- Teisel pildil oleva kuubiku printisin uuendatud printeriga. Ainsateks täpsustusteks olid printeri konfiguratsioonifaili sisestatud mõõtmised (nt prindipea varraste pikkused ja kõrgus kuumaalusest). Prindi tulemus ei olnud sirgete seinadega. Esines mitmeid suuri üleliigseid plastikurõngaid ning kuubiku kuju oli moonutatud – X- ja Y-telgede mõõtmised ei olnud kooskõlas Z-telje omadega. Mitmel juhul oli plastikut nähtavalt seinast väljapoole ulatumas. Klipperscreeni kaudu prindipea liigutamine ei olnud vastavuses nihikuga teostatud mõõtmise tulemusega.
- Kolmas kuubik
- oli prinditud pärast manuaalset delta kalibratsiooni. Klipperi tarkvara võimaldab seda läbi niinimetatud paberilehe testi: prindipea liigutatakse kuumaalusele lähedale ning selle kõrgust reguleeritakse, kuni prindipea avaldab paberile kergelt survet. Sama toimingut korratakse seitsmes punktis kuumaalusel. Saadud andmete põhjal teeb Klipper muudatused printeri konfiguratsioonifailis. Selle kalibreerimise järel paranes print oluliselt - seinad oli sirgemad ning nende mõõtmised olid täpsemad. Klipperscreeni kaudu prindipea liigutamine vastas nihikuga kontrollimisel eeldatule.
- Printimise täpsuse veelgi parandamiseks viisin järgmisena läbi pikendatud delta kalibratsiooni. See koosneb Klipperi dokumentatsioonist kättesaadava kalibratsioonimudeli aeglasest printimisest ja prindi tulemuse analüüsimisest. Seejärel oli vaja nihikuga teha joonisel 19 näidatud mõõtmised ning nende tulemused Klipperisse konsoolikäsuna sisestada. Info sisestamise ja kalibratsiooni arvutamise käsu sisestamise järel on võimalik arvutatud kalibratsiooni Klipperi konfiguratsiooni salvestada. Kuigi prindi esimeste kihtide nurgad oli teravamad ning seinte kvaliteet paranes, ei erinenud prindi üldine kvaliteet oluliselt eelnevast.
- Neljanda kuubiku printimisel täheldasin, et X- ja Y-tähtede ümber tekkinud plastikumullid olid tingitud viilutamistarkvara tagasitõmbe (*retraction*) seadistustest ning olid nähtaval viilutsamistarkvara eelvaates. Pärast selle funktsiooni eemaldamist ja uue testi teostamist (5. kuubik) kadusid mullid, kuid muus osas printkvaliteet ei paranenud.

- Pärast viienda kuubiku printimist märkas, et düüsile suunatud prindi jahutusventilaatorid ei töötanud. Ühendasin need klemmliistult lahti ning tegin uue ühenduse kontrollplaadile. Pärast funktsionaalsuse kontrollimist alustasin uue prindiga ning prindi tulemuseks saadud kuuendal kuubikul polnud eelnevalt esinenud puudusi. Seinad olid sirged, nurgad teravad, jääkplastikut ei esinenud ning prinditud XYZ-tähtede servad olid korrektsed. Ainsateks probleemideks olid kerge deformatsioon kuubiku ülemistes ja alumistes nurkades ning Y-tähe sees olev üleliigne plastikumass. Kuna need puudused esinesid ka esialgsetel testprintidel ning nende põhjuseks oli viilutamistarkvara, otsustasin järgmise sammuna viilutamistarkvara vahetada.



Joonis 19. Pikendatud delta kalibratsiooni mudelil teostatavad mõõtmised

6.2 Sisendi kujundamine

Sisendi kujundamine on vibratsioonide kompenseerimise meetod, mille eesmärgiks on vähendada mehaanilisi resonantse ja nende tekitatud järelvibratsioone. Klipperiga on selle kasutamiseks kaks põhilist meetodit.

Esimene meetod koosneb Klipperi dokumentatsioonis olevate testprintide tegemisest, nende tulemuste nihikuga mõõtmisest, tulemuste analüüsist ning nende konfiguratsiooni lisamisest. Selle järgneks veel mitu printi ja mõõtmist, et tulemused häälestada ning kontrollida.

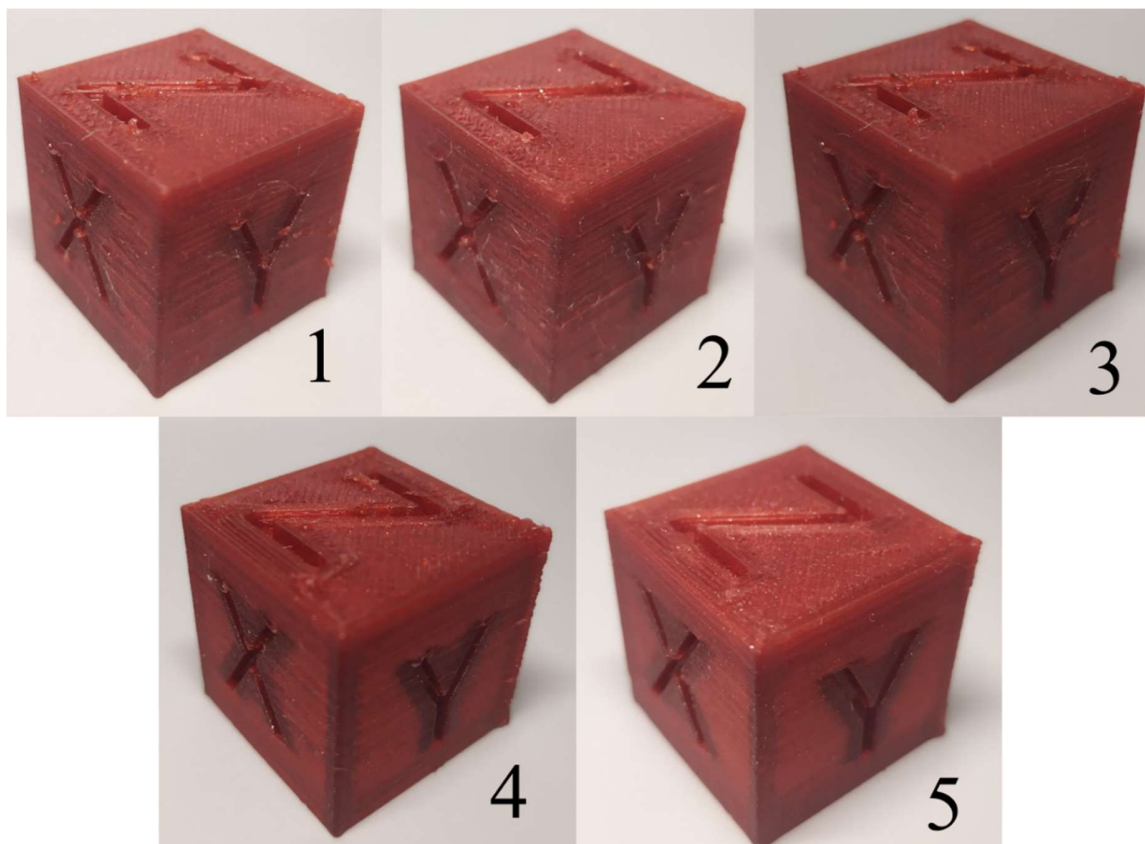
Teine meetod kasutab kiirendussensorit, mis kinnitatakse prindipeale ja mille tulemusi loetakse Klipperi resonantstestide ajal. Mõõtmiste tulemusena tehakse graafik tulemustest ning arvutatakse printerile sobivad kiirendus- ja kujundusmudeleid. Selles töös kasutasin teist meetodit.

Kinnitasin BTT S2DW kiirendussensori printeri prindipeale ning ühendasin selle Raspberry Pi USB porti. Paigaldasin sensorile vajaliku püsivara ning pärast sensori töö testimist lisasin sellele vastava info konfiguratsiooni. Resonantstestide tegemine toimus printeri X- ja Y-telgedel ükshaaval ning koosnes vastaval teljel prindipea edasi-tagasi liikumisest erinevatel sagedustel.

Lisa 5 ja Lisa 6 kirjeldavad vastavalt X-ja Y-telgedel mõõdetud resonantse ning Klipper'i poolt arvutatud erinevate kujundajate mõjutusi mõõtetulemustele. Koostatud graafikute põhjal lisasin vajaliku info Klipper'i konfiguratsiooni. Mõõtmistulemuste .csv fail on leitav lisa 7.

6.3 Uuenduste testimine, kasutades Orcaslicer viilutamistarkvara

Uueks viilutajaks valisin püstitatud eesmärgile vastavalt vabavaralise ja avatud lähtekoodiga tarkvara Orcaslicer. Uuendus andis kohe positiivse testitulemuse: prindi nurgad olid parema kvaliteediga, kuid erinevalt Simplify3D viilutamistarkvarast ei olnud selle viilutaja seaded veel printerile vastavad.



Joonis 20. Orcaslicer viilutamistarkvara kasutades tehtud testprindid

Joonisel 20 on näha valik Orcasliceriga tehtud printidest, kus kvaliteedi muutused tulenevad täielikult viilutaja seadistuste muutustest. Prindi esialgeteks seadistusteks sai määratud Orcasliceri põhjal saadud vaikeseaded. Mõned joonisel 20 kujutatud prindile tehtud muudatused olid järgmised:

1. Vähendasin prindipea liikumise kiirendusi Orcasliceri vaikeseadetest vahemikuni 1000-2500 mm/s. Seadsin prindipea maksimaalkiiruseks 150 mm/s.
2. Vähendasin seinte arvu kahele ning tagasitõmbe kiiruseks sai määratud 30 mm/s.
3. Printeri kiirendusteks määrasin vahemiku 1000-2000 mm/s. Eemaldasin tagasitõmbel pühkimise.
4. Suurendasin seinte arvu esialgsele kolmele ning muutsin nende printimise järjekorda. Eemaldasin kihtide muutuse vahelise tagasitõmbe. Muutsin pealmise kihi mustrit.
5. Suurendasin eendite printimise kiirust 50% pealt 100% peale ja tagasitõmmet 5 millimeetrini ning seinte tekitamiseks kasutasin klassikalist algoritmi.

Tehtud muudatused said teostatud erinevate eelmistel printidel esinevate probleemide eemaldamiseks. Näiteks pealmise kihi mustri muutmine vähendas üleliigsete plastiku jääknähtude arvu pealmisel kihil. Samuti eemaldas eendite printimise kiiruse suurendamine üleliigse rippuva plastiku X- ja Y-tähtede ülaosas. Erinevate muudatuste testimise tulemusena sain lõpuks prindi, mis oli sirgete seinte, teravate XYZ-tähtede ning algsetest printidest teravamate nurkadega. Tulemus oli parem kui eelneva viilutamistarkvaraga.

6.4 Tulemuste hindamine ja soovitus edasiseks

Uuendatud printeri testprintide tulemused olid võrdväärased või paremad võrreldes printeri algses seisus teostatud katsetega. Printeriga eelnevalt kasutusesoleva viilutamistarkvaraga viilutatud printide tulemused oli samaväärsed eelnevaga ning uuema viilutaja kasutamisel printide kvaliteet suurenes, prindi nurgad ja tähtede kontuurid muutusid teravamaks. Printides esinevad defektid tulenesid viilutaja seadistuste ebatäpsusest, mitte printeri mehaanilistest või elektroonilistest puudustest.

Töö käigus rakendatud tarkvaralised ja püsivaralised uuendused põhinesid kõik vabavaralistel ja avatud lähtekoodiga lahendustel, tagades süsteemi paindlikkuse ning võimaldades edaspidi lihtsalt

muudatusi ja uuendusi teostada. Samuti ei eelda kasutusele võetud riistvaralised lahendused konkreetse tootja toodetud komponente, sest eraldi paigaldatud kontrollplaat ja Raspberry Pi 5 miniarvuti, võimaldades vajadusel komponentide kiiret ja sõltumatut vahetust.

Uuema tarkvara kasutuselevõtt soosib edasiste uuenduste ja süsteemilaienduste lihtsamat rakendamist. Näiteks 3D-printimise protsessi jälgimiseks vajaliku veebikaamera lisamine nõuab üksnes Crowsnest tarkvara paigaldamist KIAUH-i tööriista kaudu ning sellele järgnevat seadistamist Mainsaili veebipõhises kasutajaliideses. Kuigi kaamera tüübist sõltuvalt võib olla vajalik teatud konfiguratsiooniparameetrite kohandamine, on nende muudatuste teostamine üldjuhul lihtne ning jõukohane ka algajatele kasutajatele.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames kaasajastati Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis õppe- ja teadustööks kasutatav 2016. aastal soetatud 3D-printer Mass Portal Grand Pharaoh XD. Eesmärgiks oli uuendamine läbi viia modulaarseid ja vabavaralisi komponente kasutades, et luua alus seadme pidevaks edasiarendamiseks ning võimaldada tulevikus selle paindlikum ja kuluefektiivsem hooldus, kusjuures printeri väljatrukkide kvaliteet pidi uuenduste tagajärjel algse konfiguratsiooniga võrreldes säilima või muutuma paremaks.

Töö käigus selgitati välja ja fikseeriti printeri riist- ja tarkvara algne olukord. Seejärel analüüsiti muudatusi 3D-printerite tehnoloogias viimase kümnendi jooksul, loodi võrdlev ülevaade kaasaegsetest erinevatest tark- ja püsivaralistest lahendustest ning seati nõuded uuendamiseks kasutatavatele lahendustele. Nõuete täitmiseks paigaldati uus kontrollplaat, tehti ümber lõpulülid ja modifitseeriti printipead, et paigaldada uus temperatuuriandur. Seejärel paigaldati 3D-printeri püsi- ja tarkvara Klipper ning sellega ühenduvad Moonraker, Mainsail ja Klipperscreen, testiti nende töökindlust ja printi kvaliteeti ning viidi läbi tulemuste hindamine. Tööprotsessi käigus tehti vastavalt testimisel saadud tagasisidele täiendavaid muudatusi.

Kasutatud püsi- ja tarkvaralised uuendused olid vabavaralised ning avatud lähtekoodiga. Kasutatud riistvaralised uuendused olid modulaarsed ning võimaldavad printeri edasist arendamist.

Uuendatud riist-, tark- ja püsivara kasutades tehtud testprintimisel saadi tulemuseks esialgsega võrdne või esialgsest parem printimiskvaliteet.

Kokkuvõtteks saab öelda, et 3D-printer Mass Portal Grand Pharaoh XD uuendused tehti vastavalt töös seatud eesmärkidele.

Tänuavaldused

Täna siiralt oma lõputöö juhendjaid Veiko Vunderit ja Hans Priksi, kelle nõuanded, suunamine ja toetus tegid võimalikuks käesoleva töö valmimise! Suur tänu teie aja ja pühendumuse eest! Eraldi soovin tänada Renno Raudmäed, kes aitas töö käigus olulistele praktilistele küsimustele vastuseid leida.

Lõputöös on teksti toimetamiseks kasutatud ChatGPT-4o (OpenAI) tekstirobotit. Kasutatud sisendid (prompt) hõlmavad endas näiteks fraase „sõnasta ümber“ ja „paranda loetavust ja koherentsust“. Nende sisendite abil saadud väljundi abil kontrolliti ja parandati osaliselt lõputöö teksti stiilivigu

A handwritten signature in dark ink, featuring a stylized, cursive script. The signature is positioned horizontally and appears to be a personal name or name of an institution.

Viidatud kirjanduse loetelu

1. Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manuf.* 1. jaanuar 2019;35:1286–96.
2. Campbell T, Williams C, Ivanova O, Garrett B. Could 3D printing change the World? Technologies, potential, and implications of additive manufacturing”. Atlantic Council. Strategic Foresight Report. 2011.
3. Tian, Jiarong. A review of 3D printing slicing algorithms [Internet]. [tsiteeritud 11. mai 2025]. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13077/3027129/A-review-of-3D-printing-slicing-algorithms/10.1117/12.3027129.short>
4. Schwaar, Carolyn. Complete Overview of the Types of 3D Printers. 2024 [tsiteeritud 16. mai 2025]; Available at: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
5. A Comprehensive List Of All 3D Printing Technologies (2023) | Manufactur3D. 5. veebruar 2021 [tsiteeritud 17. mai 2025]; Available at: <https://manufactur3dmag.com/a-comprehensive-list-of-all-3d-printing-technologies/>
6. What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained. All3DP [Internet]. 15. veebruar 2024 [tsiteeritud 17. mai 2025]; Available at: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
7. Stereolithography: SLA 3D Printing Simply Explained. All3DP [Internet]. 21. mai 2023 [tsiteeritud 17. mai 2025]; Available at: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
8. Schwaar C. A 3D Printer On Every Desk? Why Companies Are Buying More 3D Printers [Internet]. Forbes. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.forbes.com/sites/carolynschwaar/2024/05/02/a-3d-printer-on-every-desk-why-companies-are-buying-more-3d-printers/>
9. 3D printing Market: 10 million 3D Printers to Sold by 2030 Thanks to Declining Cost and Advancing Technology [Internet]. GlobeNewswire News Room. 2022 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/08/08/2494063/0/en/3D-printing-Market-10-million-3D-Printers-to-Sold-by-2030-Thanks-to-Declining-Cost-and-Advancing-Technology.html>
10. Ngo, Dong. 3D printing at CES 2015 (pictures) [Internet]. CNET. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.cnet.com/pictures/3d-printing-at-ces-2015-pictures/>
11. Bambu Lab A1 mini 3D Printer [Internet]. Bambu Lab EU. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://eu.store.bambulab.com/en-ee/products/a1-mini>
12. Da Vinci Junior 1.0 3D Printer by XYZ Printing [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.robot-advance.com/EN/art-3d-printer-da-vinci-junior-1-0-2861.htm>

13. 8-bit vs. 32-bit MCU: Choosing the Right Microcontroller for Your PCB Design [Internet]. Altium. 2018 [tsiteeritud 19. mai 2025]. Available at: <https://resources.altium.com/p/8-bit-vs-32-bit-mcu-choosing-right-microcontroller-your-pcb-design>
14. SainSmart Mega2560 + A4988 + RAMPS 1.4 3D Printer Kit For RepRap – SainSmart.com [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.sainsmart.com/products/mega-2560-a4988-ramps-1-4-3d-printer-kit>
15. 3D Printer Controller DIY Kit, RAMPS 1.4 + 2560 R3 Board + 5pcs A4988 Stepper Motor Driver & Heatsink for Arduino RepRap [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.amazon.com/Printer-Controller-Stepper-Heatsink-Arduino/dp/B08JM562FW>
16. TMC2209 Datasheet [Internet]. 2023 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/tmc2209_datasheet_rev1.09.pdf
17. RADDs plaadi kasutusjuhend. 2015 [tsiteeritud 16. mai 2025]; Available at: https://www.henschke-geraetebau.de/dr/UserGuide_v2.pdf
18. Peels, Joris. New Induction Nozzles Could Improve 3D Printing Quality and Reliability - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing [Internet]. 2022 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://3dprint.com/294752/plasmics-does-a-kickstarter-for-induction-nozzles-d/>
19. The Plasmics INo Trident - Plasmics GmbH [Internet]. [tsiteeritud 20. mai 2025]. Available at: <https://plasmics.com/inotrident>
20. Releases - Klipper documentation [Internet]. [tsiteeritud 20. mai 2025]. Available at: <https://www.klipper3d.org/Releases.html>
21. Häußge G. OctoPrint.org [Internet]. OctoPrint.org. [tsiteeritud 20. mai 2025]. Available at: <https://octoprint.org/>
22. Mainsail [Internet]. 2024 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://docs.mainsail.xyz>
23. Mass Portal Grand Pharaoh XD [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.3d-tulostus.fi/Mass-Portal-Grand-Pharaoh-XD-1>
24. Surface Finish Speed Test by ordnerino | Download free STL model [Internet]. Printables.com. 2024 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.printables.com/model/749906-surface-finish-speed-test>
25. 3cm XYZ Calibration Cube by DanteMakerWorld: Download Free 3D Models [Internet]. [tsiteeritud 17. mai 2025]. Available at: <https://makerworld.com/en/models/620163-3cm-xyz-calibration-cube>

26. BIGTREETECH Kraken V1.1 - High Current, 8-Axis Motherboard [Internet]. Biqu Equipment. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://biqu.equipment/products/kraken-for-voron-phoenix>
27. BIGTREETECH BTT Octopus Max EZ for 3D Printer [Internet]. Biqu Equipment. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://biqu.equipment/products/bigtreetech-btt-octopusmax-ez-for-3d-printer>
28. BIGTREETECH BTT Octopus Pro V1.0/V1.1 For 3D Printer [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://biqu.equipment/products/bigtreetech-octopus-pro-v1-0-chip-f446?variant=40144817979490>
29. makerbase. makerbase-mks/MKS-SKIPR [Internet]. 2025 [tsiteeritud 17. mai 2025]. Available at: <https://github.com/makerbase-mks/MKS-SKIPR>
30. FYSETC New upgrade Spider V3.0 32Bit Motherboard STM32F446 Control Mot [Internet]. FYSETC OFFICIAL WEBSITE. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://www.fysetc.com/products/fysetc-spider-v22>
31. Eddy Current Inductive probe - Klipper documentation [Internet]. [tsiteeritud 19. mai 2025]. Available at: https://www.klipper3d.org/Eddy_Probe.html?h=eddy
32. MainsailOS [Internet]. 2024 [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://docs-os.mainsail.xyz>
33. Klipper Installation And Update Helper [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://github.com/dw-0/kliauh>
34. Bigtreetech Octopus Pro V1.0.1 STM32F429ZE motherboard for 3D printers [Internet]. BOTLAND. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: <https://botland.store/motherboards-for-3d-printers/20840-bigtreetech-octopus-pro-v101-stm32f429zgt6-motherboard-for-3d-printers.html>
35. TMC drivers - Klipper documentation [Internet]. [tsiteeritud 19. mai 2025]. Available at: https://www.klipper3d.org/TMC_Drivers.html#sensorless-homing
36. Configuration reference [Internet]. [tsiteeritud 16. mai 2025]. Available at: https://www.klipper3d.org/Config_Reference.html
37. KlipperScreen/KlipperScreen [Internet]. KlipperScreen; 2025 [tsiteeritud 17. mai 2025]. Available at: <https://github.com/KlipperScreen/KlipperScreen>
38. Sachs R. Pt100 in 2-, 3- or 4-wire connection? [Internet]. WIKA blog. [tsiteeritud 19. mai 2025]. Available at: <https://blog.wika.com/en/knowhow/pt100-in-2-3-or-4-wire-connection/>

Lisad

Lisa 1

Tabel 1: Ülevaade peamistest printeriga tehtud testidest ning nende tulemuste põhjal läbiviidud muudatustest

	Print	Materjal	edukas print?	Tulemus	Muudatused
1	Benchy	ABS	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	-
2	Benchy	ABS	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	-
3	Kiirustest	ABS	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri suurendamine
4	Kiirustest	ABS	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri vähendamine
5	Kiirustest	ABS	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse pealse materjali vahetamine
6	Kiirustest	ABS	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri suurendamine
7	Kiirustest	ABS	Ei	Printeri otsiku küttekeha ei kuumenenud	Prindipea manuaalselt sisse lülitamine enne printimise algust
8	Kiirustest	ABS	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Filamendi vahetus
9	Kiirustest	PLA1	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri suurendamine
10	Kiirustest	PLA1	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri vähendamine
11	Kiirustest	PLA1	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri suurendamine
12	Kiirustest	PLA1	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri vähendamine
13	Kiirustest	PLA1	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea lahti võtmine ja puhastamine
14	Kiirustest	PLA1	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Muudatused prinditava mudeli seadistustes
15	Kiirustest	PLA1	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Filamendi vahetus
16	Kiirustest	PLA2	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri vähendamine
17	Kiirustest	PLA2	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri suurendamine
18	Kiirustest	PLA2	Ei	Printeri kuumaalus ja otsiku küttekeha ei kuumenenud	Küttekehade manuaalselt sisse lülitamine enne printimise algust
19	Kiirustest	PLA2	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri vähendamine
20	Kiirustest	PLA2	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Otsiku vahetus
21	Kiirustest	PLA2	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri suurendamine
22	Kiirustest	PLA2	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Filamendi otsa lõikamine
23	Kiirustest	PLA2	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse pealse materjali vahetamine
24	Kiirustest	PLA2	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Filamendi vahetus
25	Kiirustest	PETG	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	Kuumaaluse temperatuuri suurendamine
26	Kiirustest	PETG	Jah	-	-
27	Kiirustest	PETG	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Filamendi otsa lõikamine
28	Kiirustest	PETG	Jah	-	-
29	Kiirustest	PETG	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	-
30	Kiirustest	PETG	Ei	Printeri kuumaalus ja otsiku küttekeha ei kuumenenud	Küttekehade manuaalselt sisse lülitamine enne printimise algust
31	Kiirustest	PETG	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	Prindipea temperatuuri vähendamine
32	Kiirustest	PETG	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	-
33	Kiirustest	PETG	Jah	-	-
34	XYZ-kuubik	PETG	Jah	-	-
35	XYZ-kuubik	PETG	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	-
36	XYZ-kuubik	PETG	Jah	-	-
37	XYZ-kuubik	PETG	Jah	-	-
38	XYZ-kuubik	PETG	Ei	Filament jäi printeri otsikusse kinni	-
39	XYZ-kuubik	PETG	Ei	Printi ei jäänud kuumaaluse külge kinni	-
40	XYZ-kuubik	PETG	Jah	-	-
41	XYZ-kuubik	PETG	Jah	-	-

Lisa 2

Töö raames kasutatud 3D-printide mudelid:

<https://github.com/ut-ims-robotics/siilak-thesis-2025-massportal/tree/main/Mudelid>

Lisa 3

Tabel 2: Klipper, Marlin ja Repetier platvormide võrdlus.

Kriteerium / Püsivara	Klipper	Marlin	Repetier
Kasutajaliides	Ei sisalda sisseehitatud UI-d; kasutatakse koos Mainsail, Fluidt või OctoPrintiga	Sisseehitatud LCD-menüü; toetab erinevaid ekraane	LCD-menüü olemas; toetab erinevaid ekraane
Seadistamine	Tekstipõhine printer.cfg fail; muudatused ei vaja ümberkompileerimist	Vajab ümberkompileerimist pärast muudatusi Configuration.h failis	Vajab ümberkompileerimist pärast muudatusi Configuration.h failis
Funktsioonid	Input Shaping, Pressure Advance, CAN-bus tugi, mitme MCU tugi, makrod	Input Shaping (alates v2.1), Linear Advance, automaatne voodi tasandus	Linear Advance, mitme ekstruuderi tugi, CNC ja laserlõikuse režiimid
Riistvaratugi	Lai tugi ARM, AVR, STM32, RP2040, CAN-bus	Lai tugi AVR ja ARM platvormidele	Tugi AVR ja ARM platvormidele

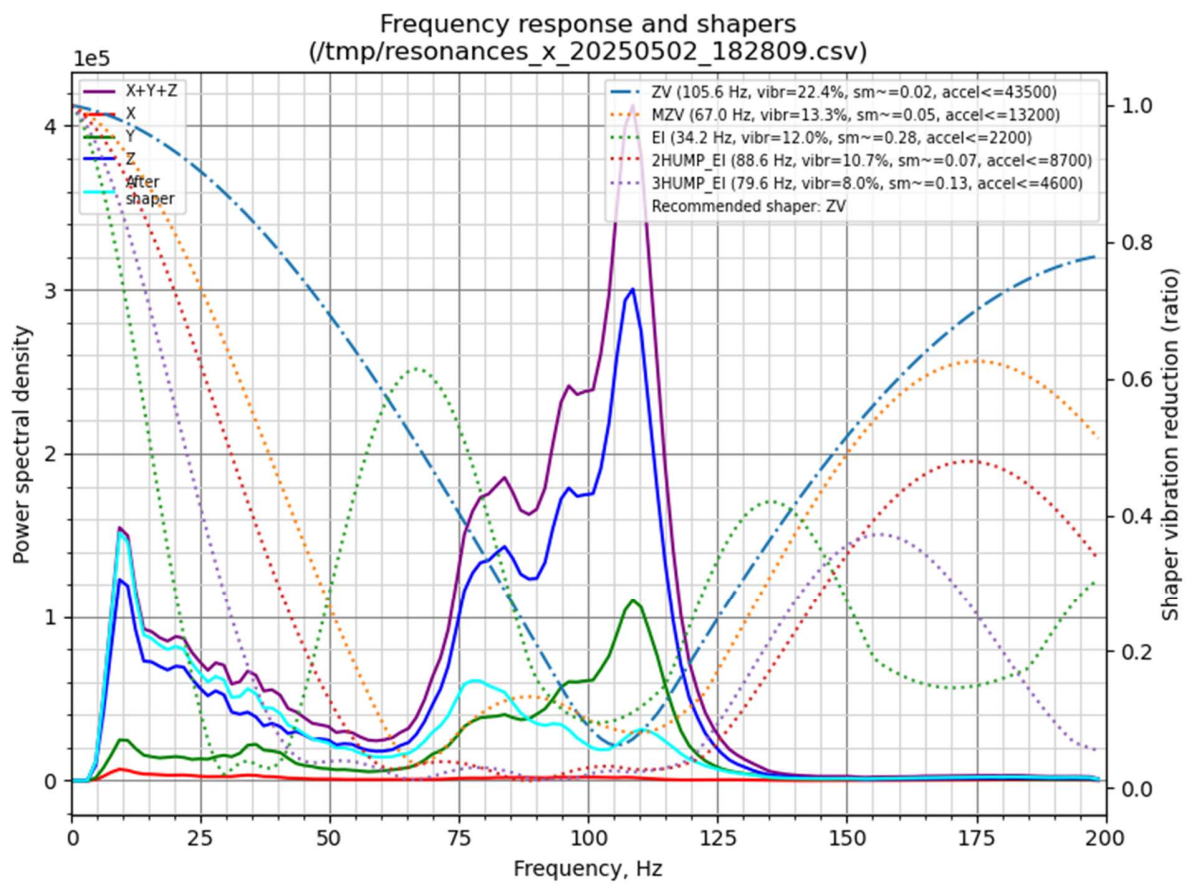
Kasutussõbralikkus	Kõrge: seadistused lihtsasti muudetavad, ei vaja ümberkompileerimist	Keskmine: vajab ümberkompileerimist, kuid laialdane dokumentatsioon	Keskmine: vajab ümberkompileerimist, kuid sisaldab veebipõhist seadistustööriista
Peamised kasutajad	Edasijõudnud kasutajad, kes soovivad kõrgemat jõudlust ja kohandatavust	Lai kasutajaskond alates algajatest kuni edasijõudnuteni	Kasutajad, kes soovivad lihtsat seadistust ja mitme printeri haldust

Lisa 4

Töö raames tehtud ja muudetud konfiguratsioonifailid:

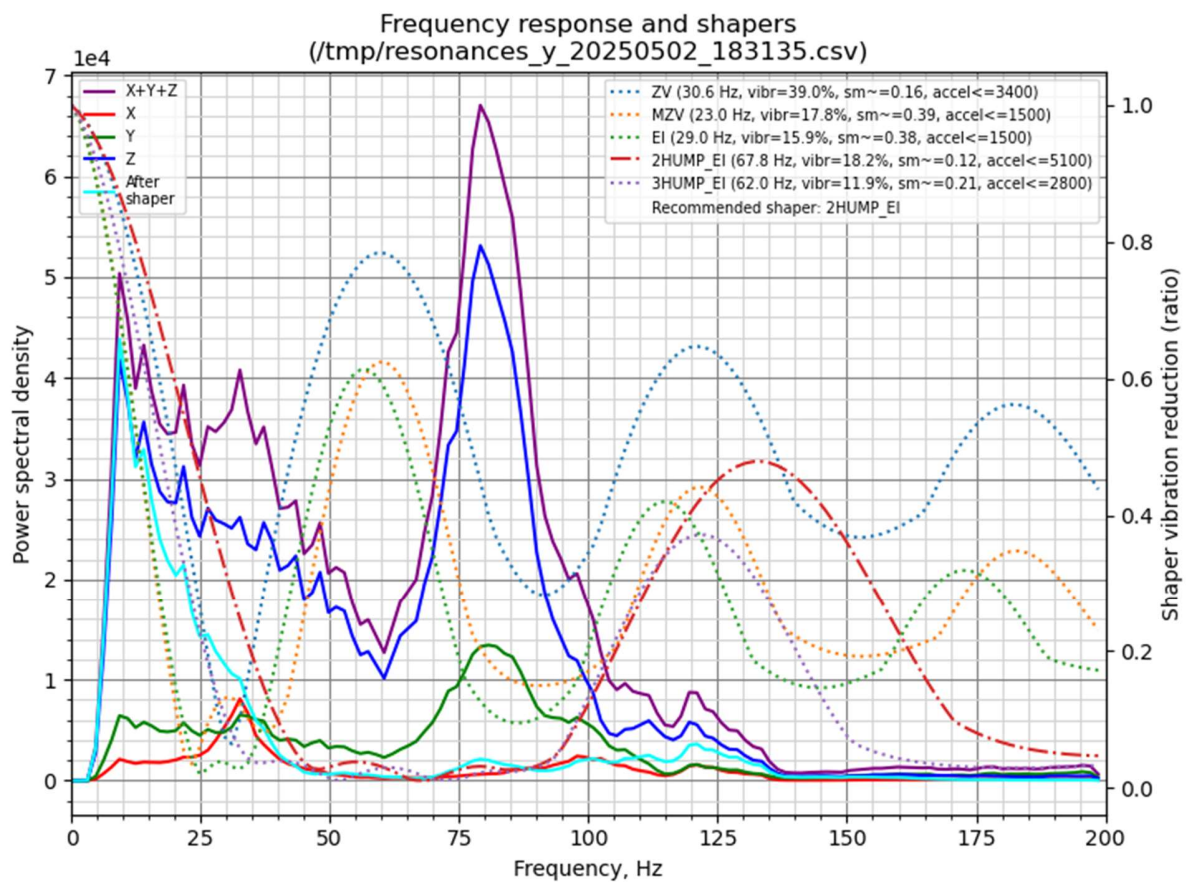
<https://github.com/ut-ims-robotics/siilak-thesis-2025-massportal/tree/main/Konfiguratsioonifailid>

Lisa 5



Joonis 1. X-telje sageduskarakteristik ja kujundajad

Lisa 6



Joonis 2. Y-telje sageduskarakteristik ja kujundajad

Lisa 7

Töö raames tehtud ja kasutatud mõõtmised:

<https://github.com/ut-ims-robotics/siilak-thesis-2025-massportal/tree/main/Mootmised>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl-Jürgen Siilak,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
„Mass Portal Grand Pharaoh XD 3D-printeri uuendamine“,
mille juhendajad olid Veiko Vunder ja Hans Priks
reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli
digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu
Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commons'i litsentsiga
CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele
suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse
kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl-Jürgen Siilak

20.05.2025