



EESTI MAAÜLIKOOL
Tartu Tehnikakolledž

Hans Eduard Säre

**3D PRINDITUD ABS-DETAILIDE ATSETOONIGA
JÄRELTÖÖTLEMISE MÕJU NENDE
PINNAVIIMISTLUSELE JA TÄPSUSELE**

THE EFFECT OF ACETONE VAPOR POLISHING ON
SURFACE QUALITY AND DIMENSIONS OF 3D PRINTED
ABS PARTS

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö
Tehnotroonika õppekava

Juhendajad: Nooremteadur Tormi Lillerand, *MSc*
Vanemlektor Kaarel Soots, *PhD*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö lühikokkuvõte	
Autor: Hans Eduard Säre		Õppekava: Tehnotroonika	
Pealkiri: 3D printitud ABS-detailide atsetooniga järeltöötlemise mõju nende pinnaviimistlusele ja täpsusele			
Lehekülgi: 58	Jooniseid: 20	Tabeleid: 4	Lisasid: 3
Osakond: Tartu Tehnikakolledž ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: T155 Pinded ja pinnatehnoloogia Juhendaja(d): Tormi Lillerand, MSc , Kaarel Soots, PhD Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			
<p><i>FFF</i>-tehnoloogiaga 3D printitud detailide pinnad on karedad, kuna neid luuakse kihtide kaupa ja kihtide vahele jääb süvis. Erinevate järeltöötlusviisidega, millest üks on atsetoonjäreltöötlus, on võimalik nende pinnakvaliteeti parandada. Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida atsetoonjäreltöötlemise mõju 3D printitud <i>ABS</i> detailide kvaliteedile. Kvaliteet tähendab antud lõputöö raames madalat pinnakaredust ja välismõõtmete muutumatust. Uurimiseks 3D printiti 15 katsekeha, millega tehti 3 korduskatset 5 erineva järeltöötlusajaga: 5, 15, 30, 45 ja 60 minutit. Katsekehasid järeltöödeldi selleks eraldi valmistatud järeltöötluskambris. Järeltöötluskambri ehitamist oli alustatud eelmisel aastal Egert Pedassaare lõputöö raames. Olemasolevale järeltöötluskambrile tehti parendusi. Uuriti atsetoonjäreltöötlemise mõju 3D printitud <i>ABS</i> detailide välismõõtmetele, pinnakaredusele ja detailisusele. Katsekehasid mõõdeti enne ja pärast järeltöötlust ja võrreldi tekitatud muutusi katsekehades. Lõputöö käigus selgus, et konkreetse järeltöötluskambriga kasutatud sätetel oli mõistlikum järeltöötusaeg 15 kuni 20 minutit. 15 minutiga oli pinnakareduse näitaja R_a muutunud keskmiselt 7,4 μm algselt mõõdetud pinnakaredusest, mis jäi vahemikku 8,8-10,3 μm olenevalt katsekehast. Pärast 15 minutit järeltöötlust oli katsekehad omandanud läikiva välimuse. Pikemaajalisel järeltöötlusel paranes muutus R_a väärtus kuni 9 μm, saavutades minimaalse väärtus 0,75 μm. 15 ja enam minutisel järeltöötlusel hakkasid katsekehad deformeeruma. Katsekeha teravad nurgad muutusid ümarateks ja tekkisid kujukõõbed. Juba 5 minutiline järeltöötlus parandab <i>ABS</i> detailide pinnakvaliteeti, seejuures jättes välismõõtmed muutumatuks.</p>			
Märksõnad: masinaehitus, deformatsioonid, pinnakvaliteet, pinnakaredus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's / Bachelor's / Professional Higher Education Thesis	
Author: Hans Eduard Säre		Curriculum: Technotronics	
Title: The effect of acetone vapor polishing on surface quality and dimensions of 3D printed ABS parts			
Pages: 58	Figures: 20	Tables: 4	Appendixes: 3
Department : College of Technology Field of research and (CERC S) code: T153 Coatings and surface treatment Supervisors: Tormi Lillerand, MSc, Kaarel Soots, PhD Place and date: Tartu 2021			
<p>Parts 3D printed with <i>FFF</i> technology have a rough surface. This is due to the <i>FFF</i> process which makes peaks for the layer lines and valleys between them. This can be mitigated with post-processing. One type of chemical post-processing is acetone vapor polishing. The goal of this thesis is to study the effects on acetone vapor polishing on 3D printed <i>ABS</i> part quality. Part quality is defined as lowered surface roughness and minimal changes in part dimensions. In this thesis, fifteen parts were post-processed with five different post-processing lengths: 5, 15, 30, 45 and 60 minutes. The parts were vapor polished in a purpose-built post-processing chamber. The construction of the chamber was started last year by Egert Pedassaar as part of his thesis. Before post-processing the apparatus was improved. To assess the effects of the post-processing on part quality, the author looked at part dimensions, surface roughness and part detail. Measurements were taken before vapor polishing and after, and the result compared. It was found that for this apparatus and with the chosen settings, the ideal post processing time was 15-20 minutes. With fifteen minutes surface roughness R_a had changed on average by $7.4\mu\text{m}$ from its original value of $8,8-10,3\mu\text{m}$ and the parts had a glossy finish. After fifteen minutes of post processing, the change in R_a increased to $9\mu\text{m}$ to a minimal value of $0,75\mu\text{m}$ but the parts started rapidly deforming. Most of the deformations were at the edges, which became round. Even brief five-minute post-processing yielded a decrease in the surface roughness.</p>			
Keywords: mechanical engineering, deformations, surface quality, surface roughness			

SISUKORD

KASUTATAVAD LÜHENDID	5
SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	7
1.1. FFF ja FDM tehnoloogia	7
1.2. ABS polümeer	8
1.3. Atsetoonjäreltöötus	9
1.4. Mehaanilised järeltöötusviisid	9
2. MATERJAL JA METOODIKA	11
2.1. Järeltöötuskamber	11
2.3. Katsekeha valik	13
2.4. Katsekehade valmistamine	14
2.5. Atsetoonjäreltöötuse metoodika	18
2.6. Katsekehade mõõtmine	19
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS	22
3.1. Järeltöötuskambri parendamine	22
3.2. Järeltöötuse mõju katsekehadele	24
3.3. Sügavuse mõõtmistulemuste analüüs	25
3.4. Laiuse mõõtmistulemuste analüüs	26
3.5. Kõrguse mõõtmistulemuste analüüs	27
3.6. Pinnakareduse mõõtmistulemuste analüüs	28
3.7. Y sümboli jalg	31
3.8. Pinnakareduse ja välismõõtmete muutuse seos	33
3.9. Järeltöötuskambri edasiarendussoovitused	34
KOKKUVÕTE	37
KASUTATUD KIRJANDUS	38
LISAD	39
LISA A. Seadme kooste- ja detailjoonised	40
LISA B. Elektriskeem	56
LISA C. Katsekeha detailjoonis	57
LIHTLITSENTS	58

KASUTATAVAD LÜHENDID

Lühend	Inglise keeles	Eesti keeles
FFF	– <i>fused filament fabrication</i>	Termoplastse filamendi kihthaaval 3D printimine
ABS	– <i>acrylonitrile butadiene styrene</i>	Akrüülnitriilbutadieenstüreen
FDM	– <i>fused deposition modeling</i>	Termoplastse filamendi kihthaaval 3D printimine
ASA	– <i>acrylonitrile styrene acrylate</i>	Akrüülnitriil Stüreen Akrülaat
CNC	– <i>computer numerical control</i>	Arvprogrammjuhtimine
3D	– <i>three-dimensional</i>	Kolme dimensiooniline
PLA	– <i>polylactic acid</i>	Polülaktiline hape
CPE	– <i>chlorinated polyethylene</i>	Klooritud polüetüleen
PC	– <i>polycarbonate</i>	Polükarbonaat
TPU	– <i>thermoplastic polyurethane</i>	Termoplastne poliüuretaan
95A	– <i>polyurethane 95A</i>	Polüuretaan 95A
PP	– <i>polypropylene</i>	Polüpropeen
PVA	– <i>polyvinyl alcohol</i>	Polivinüülalkohol
NFC	– <i>near-Field Communication</i>	Lähiväljaside
PTFE	– <i>polytetrafluoroethylene</i>	Polütetrafluoroetüleen

SISSEJUHATUS

3D printimine on viimaste aastatega muutunud suhteliselt odavaks viisiks valmistada väikeses mahus detaile. Üks levinumaid 3D printimise tehnoloogiaid on *FFF-fused filament fabrication*, mida kasutades on 3D printitud detailide küljed karedad, kuna neid printitakse kihtide kaupa ja kihtide vahele jääb süvis. Pinnakareduse eemaldamiseks tuleb detaile järeltöelda. Üks järeltötluse tehnoloogiaid on atsetoonjäreltötlus, mida saab kasutada, kui detailid on printitud polümeerist, mis lahustub atsetoonis. *ABS* ehk akrüülnitriilbutadienüstüreen on üks selline polümeer, mis lahustub atsetoonis ja mida saab atsetooniga järeltöelda.

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida atsetoonjäreltötluse mõju 3D printitud ABS detailide kvaliteedile. Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgnevad ülesanded:

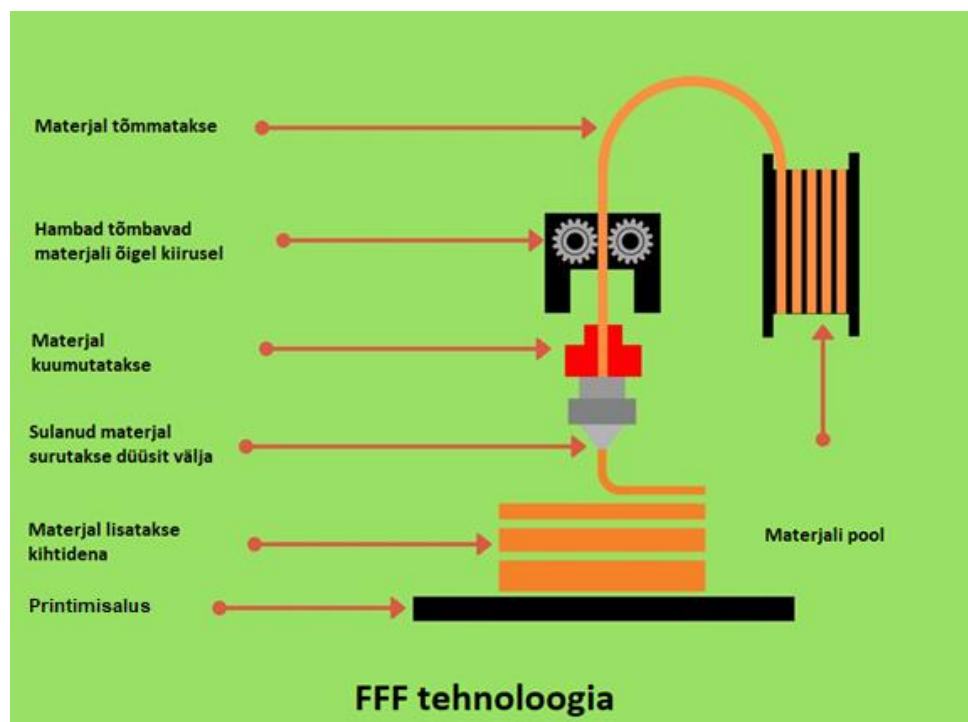
- 1) tutvuda asjakohase kirjandusega;
- 2) tutvuda olemasoleva järeltötluskambriga;
- 3) olemasoleva järeltötluskambri konstruktsiooni parendamine;
- 4) järeltötluse meetodika väljaselgitamine;
- 5) järeltöeldavate katsekehade valik;
- 6) järeltöeldavate katsekehade valmistamine;
- 7) järeltötluskambri katsetamine;
- 8) tulemuste analüüs ja järeltötluskambri parendusettepanekute tegemine.

Töö lõpuks selgub, kui suurt mõju avaldab atsetoonjäreltötlus 3D printitud ABS detailidele pinnakaredusele ja mõõtmetele.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. FFF ja FDM tehnoloogia

FFF, tuntud ka kui *FDM- Fused deposition modeling* on 3D printimise tehnoloogia, kus polümeeri surutakse kuuma düüsi, kus see sulatatakse. Sulatatud termoplastse polümeeri juga surutakse eelnevate juba tahenenud polümeeri kihtide külge. Enamik *FFF* printereid on Descartesi koordinaatsüsteemis, kus 3D printeri pea saab alusplaadi suhtes liikuda X, Y, Z telgede sihis. Kihtide printimine käib X-ja Y-teljes: kui üks kiht on prinditud, siis liigutakse Z teljes ja alustatakse järgmine kihi printimist. Z-teljes liikumise kaugus sõltub kihi paksusest, see omakorda oleneb printerist, kasutatavast materjalist ja soovitud tulemusest. Joonisel 1 on välja toodud *FFF* 3D printeri tööpõhimõtet. [1]



Joonis 1. FFF tehnoloogiat kirjeldav pilt. [1]

FFF tehnoloogia suurim eelis teiste 3D printimise tehnoloogiate ees on selle odavus ja kättesaadavus. Nii *FFF* 3D printerid kui ka nendes kasutatavad materjalid on suhteliselt odavad ja kergesti kättesaadavad võrreldes teiste 3D printimise tehnoloogiatega.

1.2. ABS polümeer

ABS polümeer koosneb kolmest monomeerist: akrüülnitriilist, butadieenist ja stüreenist. See kuulub terpolümeeride perekonda. *ABS*'i materjaliomadused tulenevad selle alkomponentide omadustest ja on näha tabelis 1. [2]

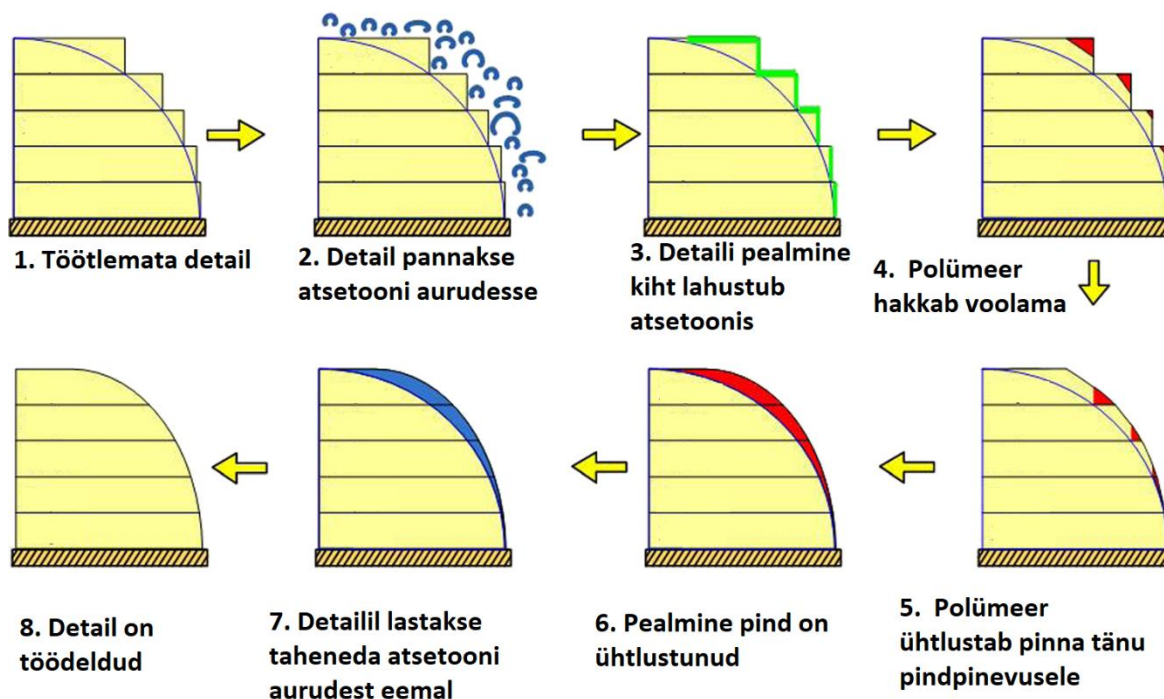
Tabel 1. *ABS*'i omadused [2]

Omadus	Suurus
Soovituslik kõrgem temperatuur kasutusrakenduses	80 °C
Soovituslik madalam temperatuur kasutusrakenduses	-20 °C
Sulamistemperatuur	105 °C
Kõvadus	R110
Vastupidavus ultraviolettkiirgusele	halb

Lisaks tabelis loetletule talub *ABS* polümeer hästi löökkkoormusi ja see on oma kerguse kohta üsna tugev. *ABS* polümeer on suhteliselt laialt levinud tarbekaupade valmistamiseks enda materjaliomaduste tõttu.

1.3. Atsetoonjäreltöötlus

Atsetooniga järeltöötlus on keemiline töötlusviis, kus atsetooni aurud lahustavad detaili pealmise kihi, muutes selle voolavamaks. Lahustunud kiht voolab pindpinevuse tõttu kokku. Töötamise käigus paraneb detaili pinnakaredus, kuid pika järeltöötlusajaga kaob detailsus. [3] Joonisel 2 on näha järeltöötlusprotsessi etappe.



Joonis 2. Atsetoonjäreltöötamise protsess. [4]

Atsetoonjäreltöötlust ei saa teha kõikidele polümeeridele. Seda saab teha vaid nendele polümeeridele, mis sisaldavad ühendeid, mis lahustuvad atsetoonis nagu stüreen *ABS'is* või *ASA's*. [2, 5, 6]

1.4. Mehaanilised järeltöötlusviisid

Lisaks keemilisele järeltöötamisele saab seda teha ka mehaaniliselt. Mehaanilisel järeltöötamisel eemaldatakse materjali ja seega detaili mõõtmed muutuvad. Pealmised

mehaanilised järetöötlusviisid on: lihvimine, liivapritsimine, voolabrasiivtöötlus, kuummasintöötlus, tünnviimistlus ja vibratsioonviimistlus. [7]

Käsitsi lihvimine on üks odavamaid järeltöötamise meetodeid [7]. Lihvida saab liivapaberiga, terasvillaga ja viiliga [7]. Lihvimise pealmised miinused on lõpptulemuse ebatäpsus ja ebahühtlus, kuna see sõltub suuresti lihviija oskustest [7]. Lisaks ei saa lihvida väga keerukaid kujusid [7]. Võimalik on ka lihvida tasalihvpingiga, kus töö tulemus on oluliselt täpsem, kuid sellega on võimalik töödelda vaid tasapinnalisi detaile.

Liivapritsimine on materjali pritsimine väiksete ja kiirete liivaosakestega. Liivaga pritsimine annab detailile mati välimuse. [7]

Voolabrasiivtöötlus on materjali töötlusviis, kus kasutatakse edasi-tagasi voolavat abrasiivi. Abrasiiv on tavaliselt polümeer, milles on abrasiivosakesed. [7]

Kuummasintöötamise korral töödeldakse detaili kuuma teraga, mis on paigutatud CNC pinki. Tera liigub kontaktis detaili välispinnaga ja sulatab materjali, jättes siledama pealiskihi. Kuummasintöötamise peamiseks miinuseks on aparatuuri hind ja seadistusaeg. [7]

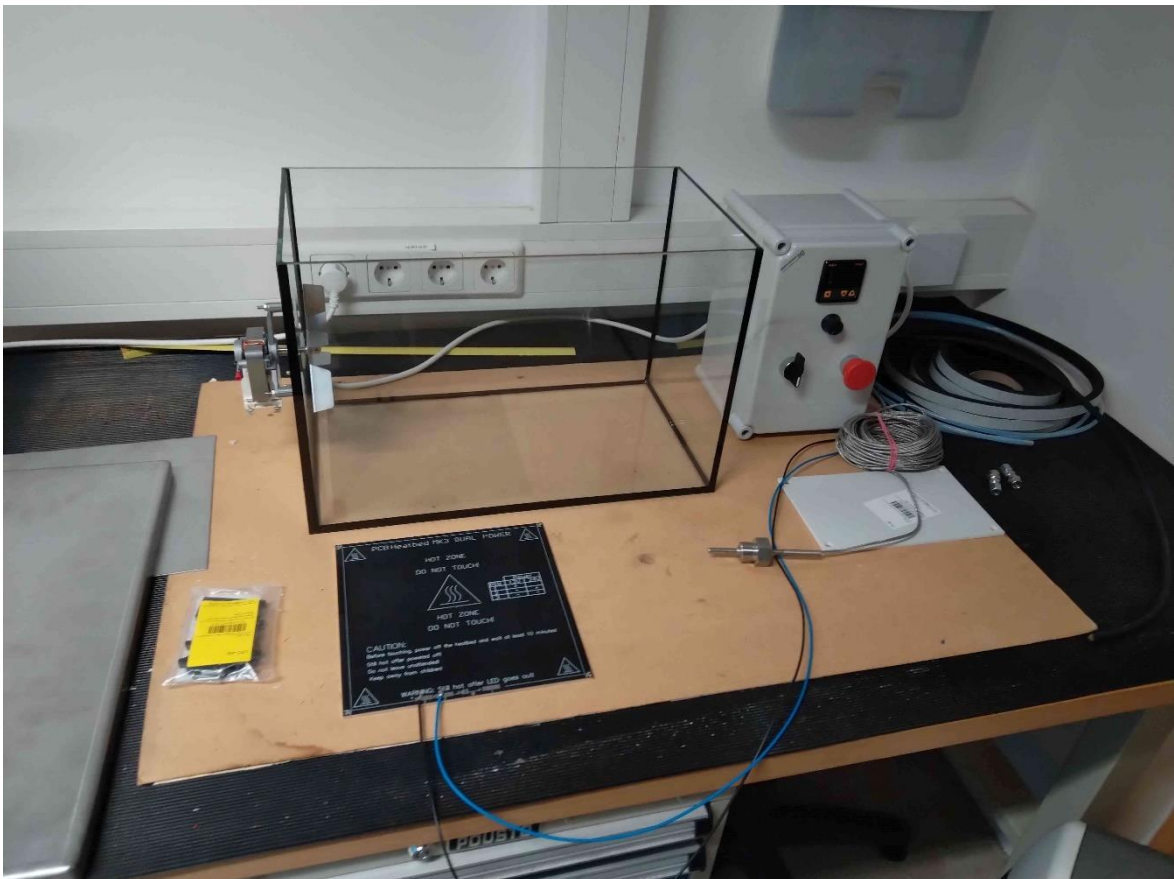
Tünnviimistlus on materjali abrasiivtöötlus, kus detailid pannakse pöörlevasse silindrisse koos abrasiivosakestega ja veega. Silindri pöörlemise tõttu hõõruvad abrasiivosakesed vastu detaile, muutes neid siledamaks. [7]

Vibratsioonviimistlusele pannakse detailid vibreerivasse anumasse koos abrasiivosakestega. Anuma vibreerimine põhjustab abrasiivosakeste hõõrumist vastu detaile ja seeläbi detailide lihvimist. [7]

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Järeltöötuskamber

Järeltöötuskambri konstrueerimist alustati eelmine aasta „3D prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogia“ lõputöö raames, kuid see ei saanud valmis [8]. Pooleli olevat järeltöötuskambrit on näha joonisel 3.



Joonis 3. Lõputöö „3D prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogia“ raames valminud järeltöötuskamber.

Järeltöötuskambri eesmärk on kuumutada atsetooni, et see aurustuks kiiremini. Atsetooni kuumutamiseks kaasneb kambri õhutemperatuuri tõus. Suurema õhutemperatuuri tulemusel mahub kambris olevasse õhku atsetooni auru rohkem. Atsetooniaurud paiknevad kambris, kus need lahustavad 3D prinditud *ABS* detaili pinnakihi. Järeltöötuskambrit kuumutatakse

järeltöötuskambri all oleva kütteelemendiga MK3, mida juhib Selec TC-533AX temperatuuri kontrollier. Temperatuuri kontrollier saab tagasisidet PT100 temperatuuriandurit. Lisaks on kambri ventilator, mis tekitab kambri turbulentset õhu liikumist. Ventilatori pöörlemissagedust juhib mootori kiiruse regulaator FR4-GSB. [8]

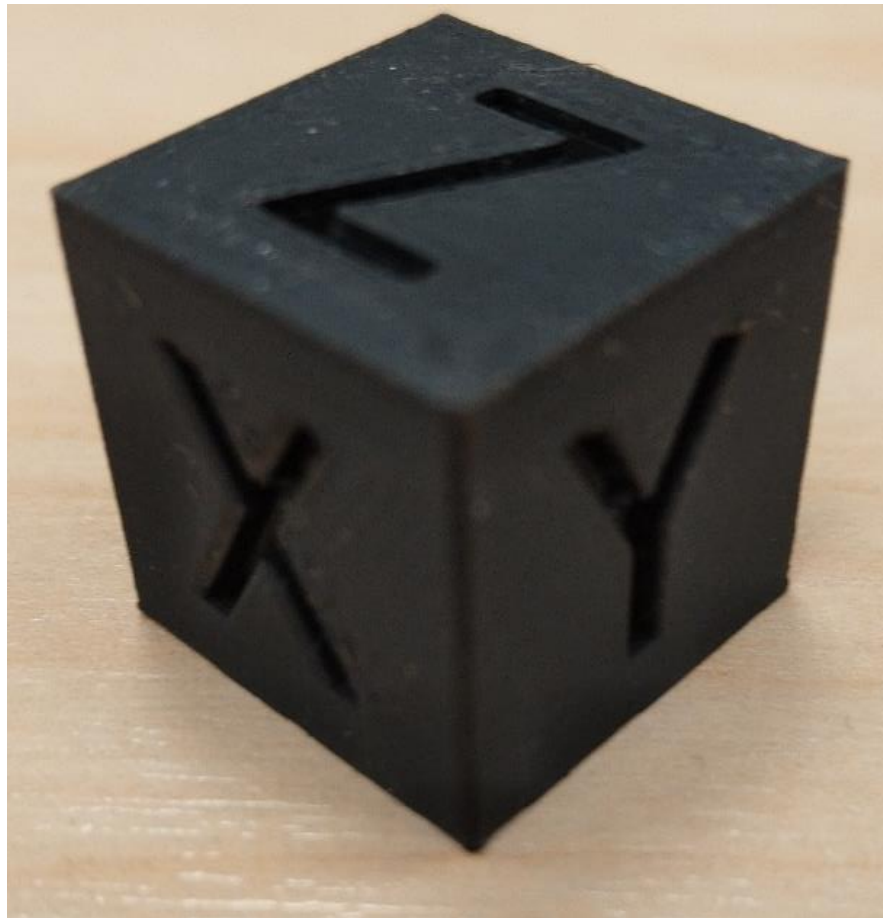
Kahjuks ei olnud joonisel 3 nähtav seade valmis. Selle töökorda seadmiseks püstitati järgnevad ülesanded:

- 1) parendada olemasolevat elektriskeemi;
- 2) vahetada välja temperatuuri sensor väiksemate gabariitmõõtmetega sensori vastu;
- 3) ühendada mootor elektriskeemiga;
- 4) tihendada kambri kaas;
- 5) tihendada läbiviik järeltöötuskambri seinast;
- 6) programmeerida temperatuuri kontrollier;
- 7) projekteerida ja valmistada järeltöötusseadmele alus;
- 8) projekteerida ja valmistada mootorile ümbris, mis tagaks kasutaja ohutuse;
- 9) lisada alus, kuhu peale saaks panna katsekehad järeltöötuse ajal.

Ülesannete täitumisel peaks valmima töötav atsetoonjäreltöötusseade.

2.3. Katsekeha valik

Katsekehaks valiti XYZ kuubik, kuna see on laialt levinud ja kergesti kättesaadav mudel 3D printerite kalibreerimisel. Katsekeha on näha joonisel 4. [9]



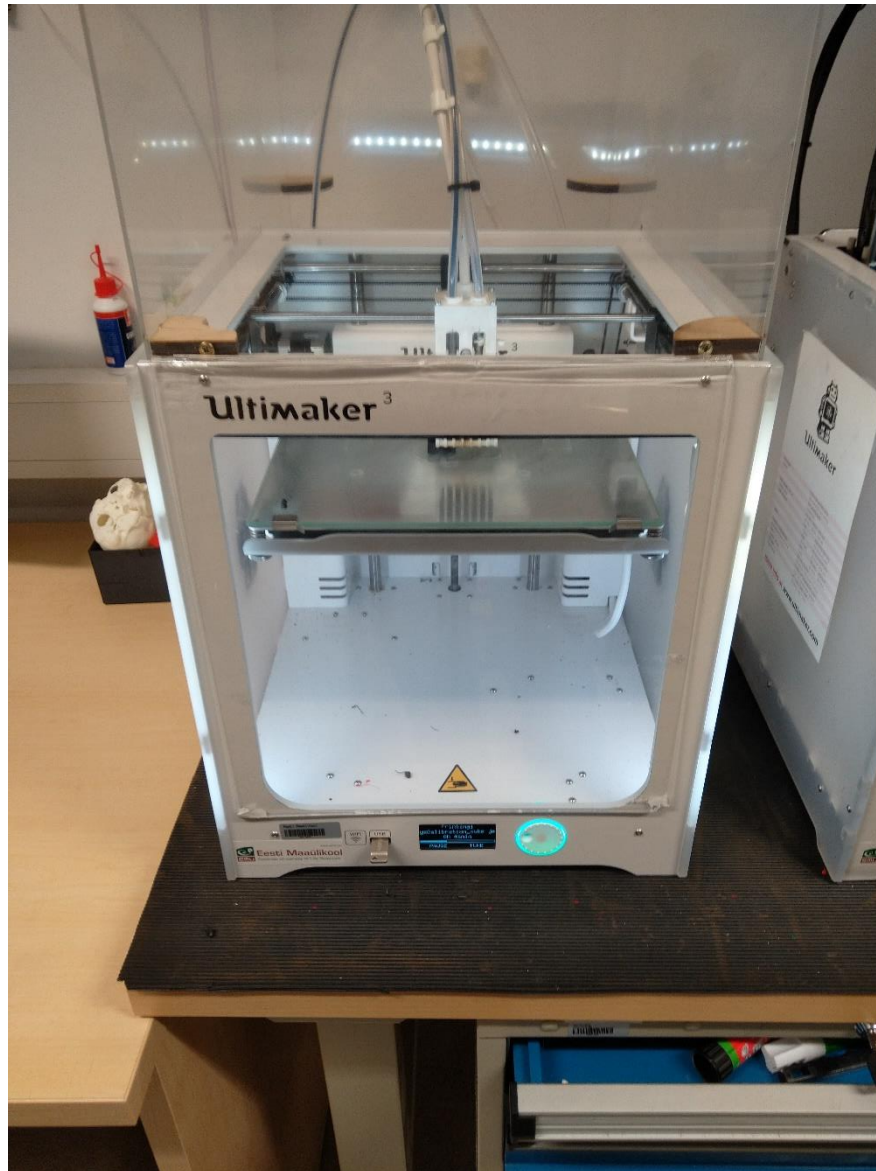
Joonis 4. Prinditud katsekeha. [9]

Katsekeha valikul arvestati, et sümbolita külgedelt on võimalik mõõta pinnakaredust, mis tuleneb *FFF* protsessist ja tähtede kontuurilt on visuaalselt näha deformeerumist. Mudel on 20 mm x 20 mm x 20 mm kuubik, mille pealmisel küljel on süvendina Z sümbol, ühel küljel süvendina X sümbol ja teisel süvendina Y sümbol, ülejäänud küljed on siledad.

Katsekeha detailjoonis on leitav lisast C.

2.4. Katsekehade valmistamine

Katsekehad 3D prinditi mustast *ABS* polümeerist. Katsekehade printimiseks kasutati 3D printerit Ultimaker 3, mis oli muudetud kinniseks, et hoida prinditava detaili ümber soojust, mis vähendaks temperatuuri langemisest tulenevat kahanemist 3D printimise ajal. Konkreetset 3D printerit on näha joonisel 5.



Joonis 5. Ultimaker 3, millega prinditi katsekehad.

Printimiseks kasutati Ultimaker 3 3D printerit, kuna see oli ülikoolis olemas ja võimaldas printida ABS polümeeri. Ultimaker 3 tehnilisi andmeid on näha tabelis 2.

Tabel 2. Ultimaker 3 tehnilised andmed [10]

Printeri tehnilised andmed	
Pintimispeade arv	2 printimispead see, mida ei kasutata, tõuseb üles
Printimisala suurus	Ühe printimispeaga 215 x 215 x 200 mm kahe printimispeaga 197 x 215 x 200 mm
Filamendi läbimõõt	2,85 mm
Kihi eraldusvõime	Düüs 0.2 mm - 150 - 60 µm Düüs 0.4 mm - 200 - 20 µm Düüs 0.8 mm - 600 - 20 µm
Telgede täpsus	X – 12,5 µm, Y – 12,5 µm, Z – 2,5 µm
Pintimispea liikumiskiirus	30–300 $\frac{mm}{s}$
Materjali printimiskiirus	<24 $\frac{mm^3}{s}$
Printimisalus	Kuumutatav, klaasist
Printimisaluse temperatuuri vahemik	20–100°C
3D prinditavad materjalid	Nylon, <i>PLA</i> , <i>ABS</i> , <i>CPE</i> , <i>CPE+</i> , <i>PC</i> , <i>TPU 95A</i> , <i>PP</i> , <i>PVA</i> , Breakaway
Düüsi võimalikud diameetrid	0,25 mm 0,40 mm 0,80 mm
Printimispea temperatuurivahemik	80–280°C
Printimispea kuumenemisaeg	<2 min
Printimisaluse kuumenemisaeg	<4 min (20->60°C)
Müratase	50 dBA
Materjalituvastus	Materjali tuvastuseks <i>NFC</i> andur
Ühenduvus	<i>Wi-Fi</i> , <i>LAN</i> , <i>USB</i> port
Toitepinge	100–240 V 4 A, 50–60 Hz 221 W maksimaalselt
Toiteploki väljund	24V 9,2 A
Soovitatav tarkvara	Ultimaker Cura, Cura Connect
Toetatavad failitüübid	3D mudelid: STL, OBJ, X3D, 3MF Käsustik: G ja GCODE Pildiformaadid: BMP, GIF, JPG ja PNG

Katsekeha mudeli STL fail avati tarkvaraga Cura. Cura tarkvara oli seadistatud 3D printeri Ultimaker 3 tööradade genereerimiseks. STL formaadis katsekeha jooniselt loodi 3D printeri jaoks töörajad. Töörajad loodi Cura tarkvaras olevate seadistuste järgi, mis on välja toodud tabelis 3.

Tabel 3. Cura tarvava sätted katsekeha printimiseks

Tarkvara säte	Inglise keeles	suurus	ühik
Ühe kihi kõrgus	<i>Layer height</i>	0,1	mm
Esimese kihi kõrgus	<i>Initial layer height</i>	0,2	mm
Printimisjoa laius	<i>Line Width</i>	0,4	mm
Mitmest kihist koosneb sein	<i>Wall line count</i>	3	
Ülemise ja alumise kihi paksus	<i>Top/ bottom thickness</i>	0,8	mm
Pealmiste kihtide arv	<i>Top Layers</i>	8	
Alumiste kihtide arv	<i>Bottom Layers</i>	8	
Alumise ja ülemise kihi printimismuster	<i>Top/ bottom pattern</i>	Jooned (<i>lines</i>)	
Välimine kiht prinditakse enne sisemisi	<i>Outer before inner walls</i>	Vale (<i>False</i>)	
Horisontaalne suurendustegur	<i>Horizontal expansion</i>	0	mm
Täite määr	<i>Infill density</i>	20	%
Täite muster	<i>Infill pattern</i>	Jooned (<i>lines</i>)	
Täide prinditakse enne seinu	<i>Infill before walls</i>	Õige (<i>True</i>)	
Printimispea temperatuur	<i>Printing temperature</i>	230	°C
Töölaua temperatuur	<i>Build plate temperature</i>	90	°C
Materjali voolu kordaja	<i>Flow</i>	100	%
Printimispea liikumiskiirus printimise ajal	<i>Print speed</i>	30	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Printimispea liikumiskiirus täite printimisel	<i>Infill speed</i>	40	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Printimispea liikumiskiirus seinade printimisel	<i>Wall speed</i>	30	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Esimese kihi printimise kiirus	<i>Initial layer speed</i>	25	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Kiirenduse juhtimine	<i>Enable acceleration control</i>	Õige (<i>True</i>)	
Kiirendus printimise ajal	<i>Print acceleration</i>	4000	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$
Kiirendus täitmise ajal	<i>Infill acceleration</i>	4000	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$
Printimispea kiirus enne peatumist	<i>Print jerk</i>	10	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Materjali tagasitõmme	<i>Enable retraction</i>	Õige (<i>True</i>)	
Materjali tagasitõmbe pikkus	<i>Retraction distance</i>	6,5	mm
Materjali tagasitõmbe kiirus	<i>Retraction speed</i>	25	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Väikseim kaugus, millest üle minna tagasitõmbega	<i>Retraction minimum travel</i>	0,8	mm
Printimispea ei liigu printimisalast välja	<i>Combing mode</i>	Täite sees (<i>within infill</i>)	
Printimispead tõstetakse, kui materjali tõmmatakse tagasi	<i>Z hop when retracted</i>	Õige (<i>True</i>)	
Printimispea tõstmise kõrgus	<i>Z hop height</i>	2	mm
Prinditava detaili jahutamine	<i>Enable print cooling</i>	Õige (<i>True</i>)	
Ventilaatori kiirus	<i>Fan speed</i>	50	%
Ventilaator saavutab kiiruse kihil	<i>Regular fan speed at layer</i>	108	
Enne printimist lastakse printimispeast materjali läbi	<i>Enable prime blob</i>	Õige (<i>True</i>)	
Detaili töölauale kinnitumine	<i>Build plate adhesion type</i>	Ei ole (<i>None</i>)	

Algselt valmistati kakskümmend viis katsekeha. Katsekehad märgistati viieliikmeliste partiidena. Esimene katsekehade partii kulus järeltöötlemise aegade välja selgitamiseks. Viies partii oli varupartii juhuks kui mõne katsega, midagi valesti läks. Märgistatud katsekehasid on näha joonisel 6.



Joonis 6. Märgistatud katsekehad.

Katsekehade märgistamiseks kasutati lõiketööstust. Lõiketööstust kasutati, kuna arvati, et värv lahustuks atsetooni aurudes ja sellega tehtud märk jääks loetamatu.

2.5. Atsetoonjäreltöötuse meetoodika

Katseid tehti järetöötuskambris, mis oli paigutatud tõmbekappi. Temperatuur ruumis oli 22°C, mis ei muutunud katsete tegemise ajal. Esmalt lülitati järetöötuseade sisse ning pandi seadme ventilaator maksimaalsel kiirusel pöörlema. Seejärel lasti kütteplaadil kuumeneda temperatuurini 57°C. Pärast seda asetati üks katsekeha metallseibile ja see omakorda keraamilisele alusele, mis asetati järetöötuskambri põhja keskele. Lõpuks mõõdeti mensuuriga 100 ml atsetooni ja valati see järetöötuskambri põhja ja pandi järetöötuskambrile kaas peale.

Katseid tehti viie erineva kestvusega: 5, 15, 30, 45 ja 60 minutiga. Iga järeltöötusajaga tehti kolm korduskatset. Kui katseaeg oli möödunud, siis võeti kambri kaas pealt ja võeti katsekeha koos alusega järetöötuskambrist välja ning lasti sellel tõmbekapis taheneda. Katsekeha võeti koos alusega, kuna see muutus järeltöötus kambris äärmiselt plastseks, kuid tahenes järeltöötus kambrist väljas. Ilma aluseta katsekeha kambrist välja võtmine oleks kaasa toonud katsekehade soovimatut deformeerumist. Enne korduskatsete tegemist lasti ära aurustuda üleliigselt atsetoonil, mis oli veel järetöötuskambris, et atsetooni kogus järeltöötuskambris oleks sama iga katse ajal.

2.6. Katsekehade mõõtmine

Katsekehade mõõtmiseks kasutati erinevaid mõõteriistu. Kõiki mõõteriistu, mida lõputöö tegemisel kasutati on näha tabelis 4.

Tabel 4. Mõõteriistad

Mõõteriist	Kasutus
Mikromeeter Mitutoyo no.293-230	Kõrguse, laiuse ja sügavuse mõõtmine
Pinnaaredusmõõtur Mitutoyo SJ-210	Kareduse mõõtmine
Temperatuuri andur PT-100	Kütteplaadi temperatuuri juhtimine
Mensuur Assistent ISO 4788 100 ml	Atsetooni koguse mõõtmine
Termokaamera FLIR lepton 3.5	Katsekambri väliskeskkonna temperatuuri kontrollimine katsekambri ehituse analüüsiks
Nutitelefoni CAT S62 pro taimer	Järetöötuse pikkuse määramiseks
Mikroskoop Discovery V12	Katsekehade optiliseks mõõtmestamiseks
Kaamera Canon EOS 6D(WG)	Katsekehade pildistamiseks
Etalon pikkus (1mm) 510970	Katsekehade optilise mõõtmise mõõtkava loomiseks

Katsekehasid mõõdeti enne ja pärast järeltöötlust. Mõõdeti katsekeha kõrgust, laiust, sügavust, pinnakaredust ja Y sümboli jala laiust.

Kõrgust, laiust ja sügavust mõõdeti mikromeetriga Mitutoyo no.293-230. Laiuse ja sügavuse mõõtmisel teostati viis mõõtmist. Mõõdeti katsekeha nurkade kaugust vastaskülje samast nurgast ning katsekeha keskpunkti kaugust vastaskülje keskpunktist. Kõrgust mõõdeti kohtadest, kus ei olnud tehtud lõiketöötlust katsekehade märgistamiseks. Laiuse all mõeldakse selle lõputöö raames katsekeha Y sümboli ja selle vastaskülje vahelist kaugust. Sügavuse all mõeldakse selle lõputöö raames katsekeha X sümboliga väliskülje ja selle vastaskülje vahelist kaugust.

Iga keha pinnakaredust mõõdeti karedusmõõturiga SJ-210 viis korda X sümboli vastasküljelt. Mõõtmiseks kasutati standardit ISO-1997, R proviili, GAUSS filtrit, λ_c väärtust 2,5 mm, λ_s väärtust 8 μm , N väärtust 5. Mõõtepea alustas liikumist Z sümboliga külgneva serva äärest ja liikus risti printimiskihtidega. Esimene mõõtmine oli Y sümbolist kõige kaugemal ja järgnevad mõõtmised järjest lähedamal. Mõõdeti nelja parameetrit R_a , R_q , R_z ja R_{sm} .

R_a on keskmine pinnakaredus. R_a väärtust arvuatakse valemi 2.1 järgi

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|, \quad (2.1)$$

kus R_a on keskmine karedus μm ;

n – mõõtmistulemuste arv;

i – mõõtmistulemuse järjekorranumber;

Y_i – kindla mõõtmistulemuse erinevus keskmisest μm [11].

R_q arvutatakse valemiga

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2}, \quad (2.2)$$

kus R_q on kareduse dispersioon μm ;

n – mõõtmistulemuste arv;

i – mõõtmistulemuse järjekorranumber;

Y_i – erinevus kindla mõõtmistulemuse erinevus keskmisest μm [11].

R_z arvutatakse valemiga

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}, \quad (2.3)$$

kus R_z on mõõtmisvahemike suurimate erinevuste keskmine μm ;

Z_n – mõõtevahemiku kõrgeima ja madalaima punkti vahe [11].

R_{sm} arvutatakse valemiga

$$R_{sm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{si}, \quad (2.4)$$

kus R_{sm} on keskmine kareduse laius μm ;

n – lainetuste arv;

i – lainetuste järjekorranumber;

X_i – ühe lainetuse laius μm [11].

Selleks, et tulemusi analüüsida, arvutati katsekeha mõõdu muut. Mõõdu muut arvutati valemiga

$$\Delta X = K_p - K_e, \quad (2.5)$$

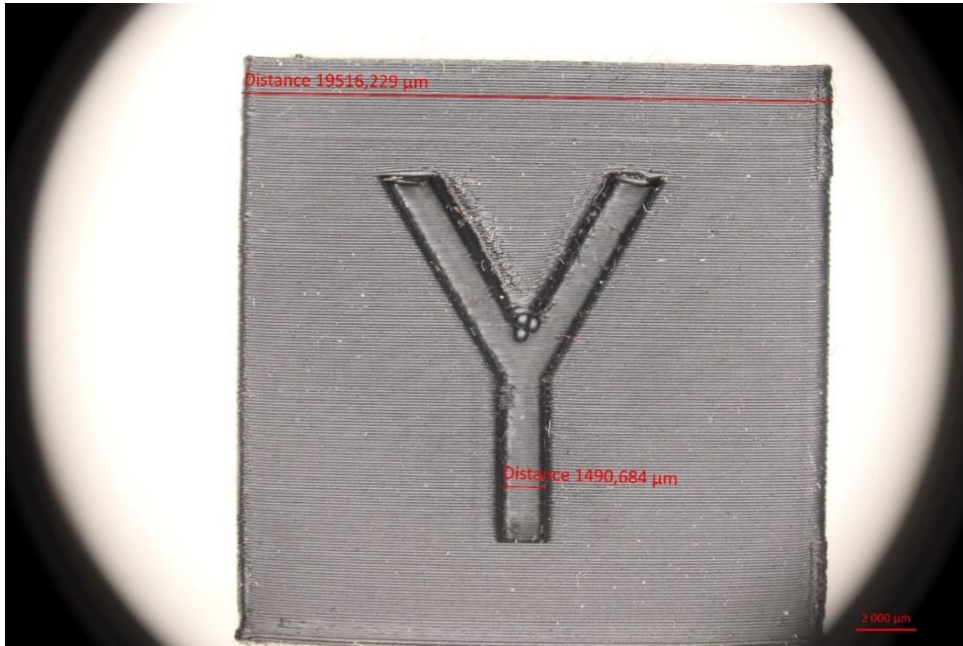
kus ΔX on mõõdu muut peale atsetoontöötlust;

K_p – mõõtmistulemuste keskmine pärast atsetoontöötlust;

K_e – mõõtmistulemuste keskmine enne atsetoontöötlust.

Mõõdu muudu kasutamine tagab selle, et uuritakse vaid järeltöötlusel tekkinud muutusi.

Y sümboli jalga mõõdeti optiliselt. Katsekehad pildistati kaameraga EOS 6D(WG) läbi mikroskoobi Discovery V12 suurendusega 11.1X. Sama suurendusega pildistati ka etalonplaadil olev mõõtskaala. Mõõdeti programmis Zen lite 2011 etalonplaadil olevalt mõõtskaalalt valitud mõõdu pikslite arv. Pikslite arvust tehti mõõtkava, millega mõõdeti katsekehadest tehtud pildid. Mõõdeti katsekeha laiust, et kontrollida mõõtkava täpsust ja mõõdeti Y sümboli jalga. Mõõdetud katsekeha on näha joonisel 7.



Joonis 7. Optiliselt mõõdetud katsekeha.

Olenemata sellest, et katsekehad 3D prinditi kõik ühesuguse käsustikuga, olid katsekehad üksteisest erinevad. Erinevused tulenesid 3D printimisel tekkinud defektidest, nagu katsekeha osaline lahtitulek töölaualt.

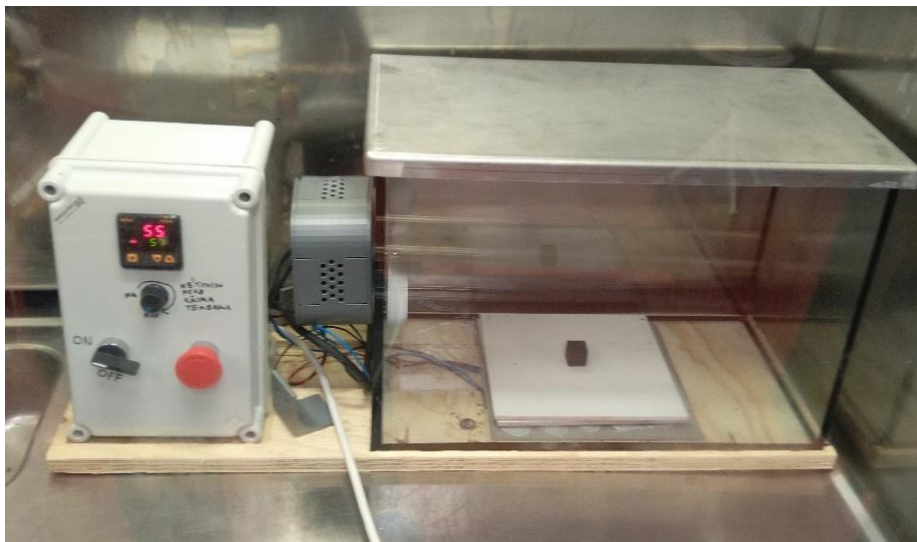
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1. Järeltöotluskambri parendamine

Järeltöotlusseadmega tehti järgmised tööd:

1. parendati elektriskeemi;
2. automaatkaitseülilidid vahetati välja PL6-C2/2 vastu, kuna transformaatori induktiivsus oli liiga suur;
3. programmeeriti temperatuuri kontrolleri;
4. tihendati kambri kaas olemasoleva tihendiga;
5. mootorile tehti ümbris;
6. vahetati välja temperatuuri andur PT100 väiksema PT100 anduri vastu;
7. tehti mootori võllile tihend;
8. freesiti kogu seadmele vineeralus;
9. muudeti koomuslüliti;

Parandatud järeltöotluskamber on toodud joonisel 8.



Joonis 8. Järeltöotlusseade pärast parendust.

Algne elektriskeem ei olnud korrektselt koostatud, mis väljendus kütteelemendi inertsuses. Sellepärast korrigeeriti elektriskeemi, mille peale hakkas kütteelement tööle. Kütteelemendi

tööle hakkamisel selgus, et automaatkaitselülitid lülitusid mõnikord välja, kui masin sisse lülitada. Selle vältimiseks vahetati 1 A automaatkaitselülitid 2 A vastu välja. Muudeti koormuslülitit, et see jääks sisselülitatuks. Vahetati välja suur temperatuuriandur PT100 väiksemate gabariitmõõtmetega PT100 temperatuurianduri vastu, mis mahuks kütteleadi ja aluse vahele. Ühendati ventilaatori mootor ja kontrolliti, et see töötaks. Muudeti koormuslülitit, et see jääks sisselülitatuks. Muudetud elektriskeem on leitav lisas B.

Olemasolevale seadmele tuli lisaks projekteerida seadme alus, mootori ümbris, mootori võlli tihend ja kambri ja juhtpaneeli kinnitusviis alusele. Kõik need seadme osad projekteeriti Solidworks tarkvaras. Projekteeritud järeltöötlusseadme osasid on näha lisas A.

Järeltöötlusseadme aluse materjaliks valiti vineer, kuna see oli autorile kättesaadav ja see võimaldas sinna sisse freesida taskud. Taskutesse on võimalik panna klaaskamber, juhtpaneel ja küttelelement. Alus on projekteeritud sedaviisi, et kütteelement asub klaaskambri keskel ja klaaskamber toetub sellele. Lisaks on juhtmete juhtimis taskud.

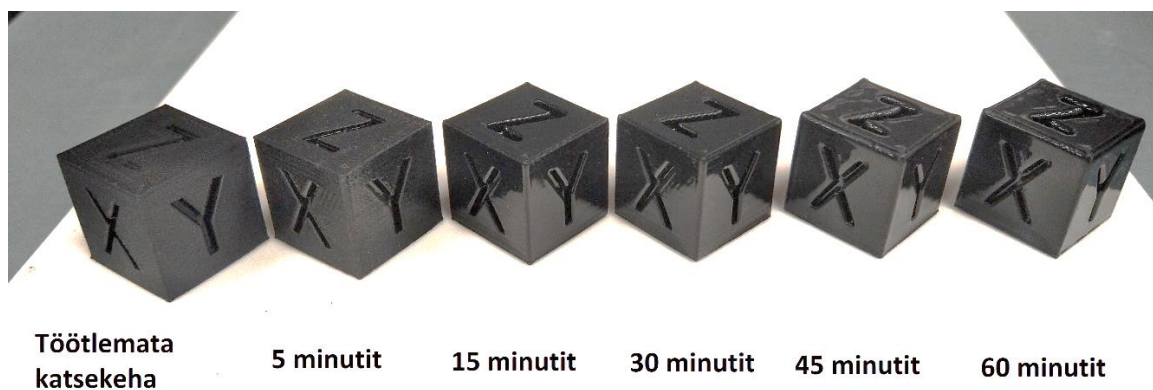
Mootori võlli tihendamiseks projekteeriti puks. Puksi materjaliks valiti PTFE. PTFE valiti, kuna see on üks vähestest tihendimaterjalidest, mis on vastupidav atsetooni aurudele [12]. Puks treiti välja PTFE ümarmaterjalist. Mootori võlli tihendi ühendamisel selgus, et mootori kinnitusavad ei olnud tsentreeritud. Mootori võlli ava keskele saamiseks tuli muuta mootori kinnituseibe.

Mootori ümbris projekteeriti, et isoleerida 230 V pinget, mis läheb mootori klemmidele. Mootori ümbrisele projekteeriti juhtmeava ja õhutusaugud, mis takistaks atsetooni aurude kontsentreerumist mootori ümbrises. Mootori ümbris projekteeriti kinnituma mootori külge läbi mootori kolme kinnituskoha. Mootori ümbris koosneb kolmest osast. Osad kinnituvad üksteise külge tänu nende sees olevatele nagadele. Mootori ümbris 3D prinditi Ender 3 3D printeril PLA polümeerist.

Klaaskambri aluse külge kinnitamiseks ei ole palju viise. Autor otsustas, et kõige mõistlikum viis seda teha on klaaskambri külge liimida nurk ja see kinnitada eraldi aluse külge. Selleks projekteeriti nurk, mille ühel nurga poolel on avad, millest saab kinnitusvahendid läbi panna ja teisel on süvised, mis tekitabavad liimile rohkem pindala, mille külge haarata. Need 3D prinditi Ender 3 3D printeril PLA polümeerist.

3.2. Järeltöötuse mõju katsekehadele

Katsekehad olid peale järeltöötlust visuaalsel vaatlusel muutunud. Muutust näeb joonisel 11.

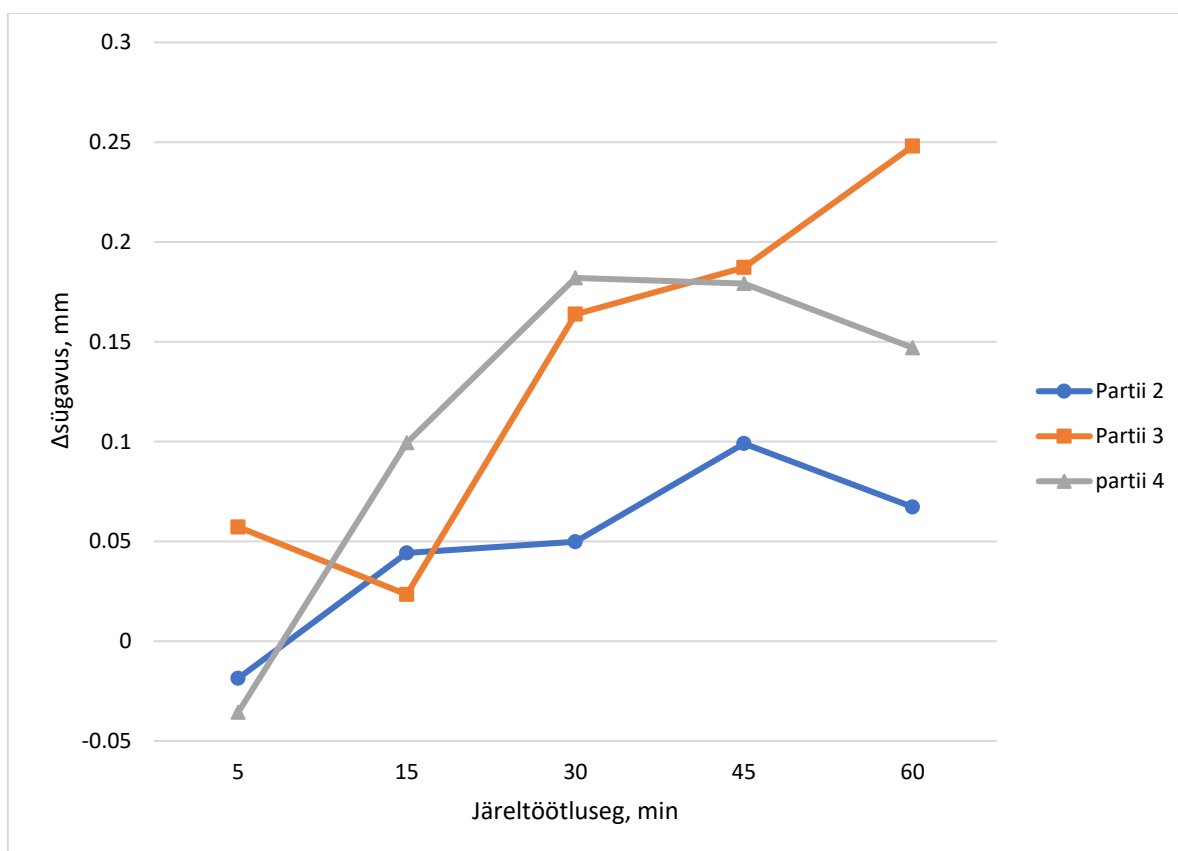


Joonis 11. Katsekehad erineva järeltöötlusajaga.

Jooniselt 11 on näha, et pikemajalisel järeltöötlusel on suurem mõju katsekehadele, kui lühiajalisel. Peale 15 minutit järeltöötlust muutuvad algselt matid katsekehad visuaalselt läikivaks. Pikemal järeltöötlusel muutuvad katsekeha servad ja nurgad kumeraks, see ilmneb eriti hästi 45 ja 60 minuti pikkusel järeltöötlusel.

3.3. Sügavuse mõõtmistulemuste analüüs

Katsekeha sügavuse analüüsimiseks kasutati sügavuse muutu. Katsekeha sügavuse mõõtmised enne järeltöötlust jäid vahemikku 20,06-20,16 mm. Joonisel 12 on näha katsekeha suuruse muutust erinevatel järeltöötuse aegadel.



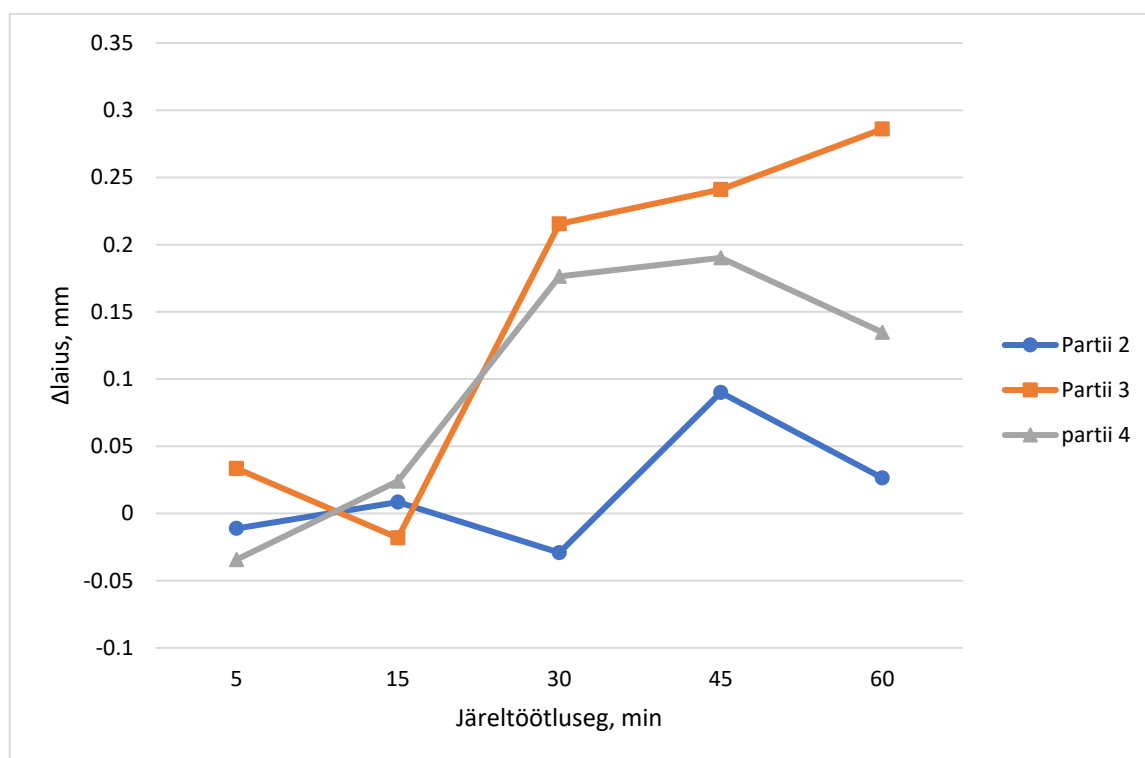
Joonis 12. Keskmise sügavuse muut erinevatel järeltöötusaegadel.

Jooniselt 12 on näha, et pikema järeltöötuse puhul muutuvad katsekeha välismõõtmised. Kolmanda partii katsekehadel tekkisid üle 0,05 mm deformatsioonid juba viie minuti jooksul. Neljandal partiil tekkisid need viieteistkümne minuti jooksul ja teisel partiil kolmekümne minuti jooksul. Katsekehade suuremad deformatsioonid hakkavad tekkima kolmekümne ja enam minuti järeltöötuse puhul. Kõige suurem muutus esines 3. partii 60 minutilises järeltöötuses, kus katsekeha suurenes peaaegu 0,25 mm. Siinkohal tasub märkida, et suurim muutus esines katsekeha servades. Katsekeha servad olid pikemate järeltöötusaegade

muutunud kumerateks. Materjal oli liikunud katsekeha teravatest nurkadest pindpinevuse tõttu katsekeha tsentri poole. Sügavuse muut tulenebki sellest materjali liikumisest. See muut tuleb eriti välja, kuna iga katsekeha kohta tehtud viiest mõõtmisest neli olid nurkades.

3.4. Laiuse mõõtmistulemuste analüüs

Laiuse kohta käivad täpselt samad märkused, mis käisid sügavuse kohta. Katsekeha laiuse mõõtmised enne järeltöötulust jäid vahemikku 20,00-20,24 mm. Laiuse muutu erinevatel atsetoontöötuluse pikkustel on näha joonisel 13.



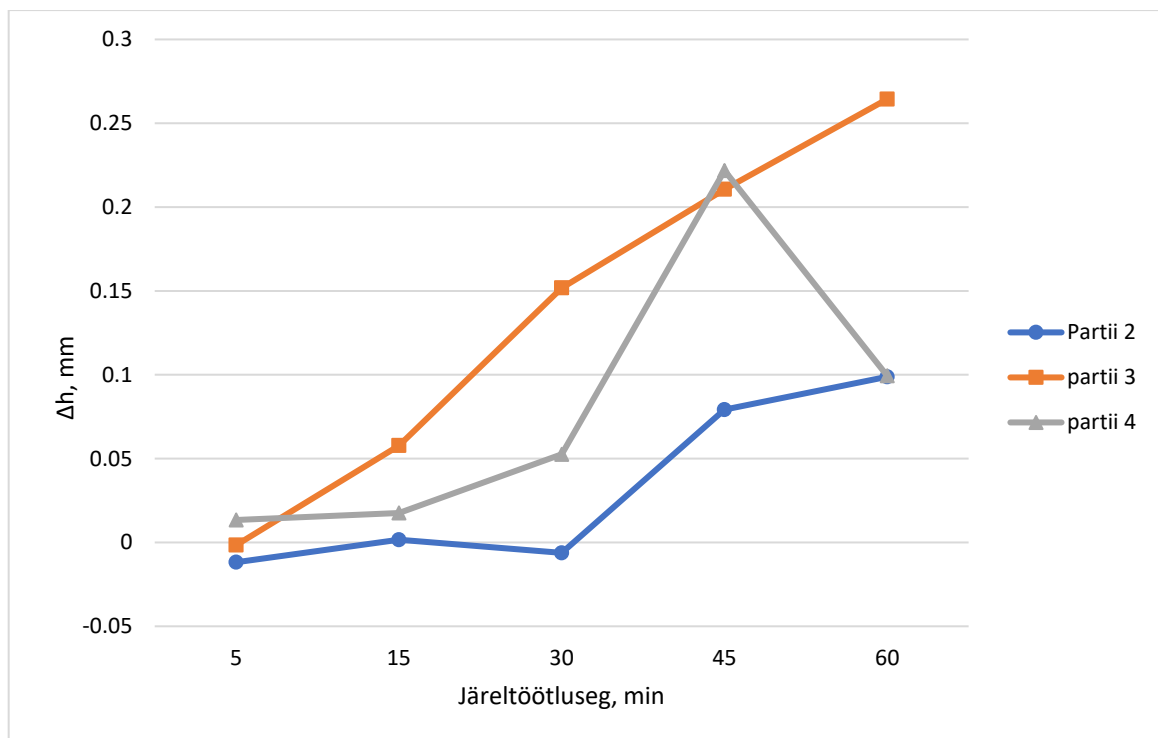
Joonis 13. Keskmine laiuse muut ajas.

Nagu oli näha sügavuse puhul, siis suureneb laius järeltöötuluse pikenedes. See tuleneb samadel põhjustel nagu sügavuse puhul. Materjal liigub teravatest servadest eemale. See materjali liikumine põhjustab kujuhälbeid. Jooniselt 13 tuleneb, et kuni viieteistkümnenda minutini muutuvad katsekehade välismõõtmised vähem kui 0,05 mm. Suuremad muutused tulevad kolmekümne ja enam minuti järeltöötuluse puhul. Kolmekümnendaks minutiks on 3.

ja 4. partii katsekehad suurenenud enam kui 0,15 mm võrra. Suurim muutus toimus 3. partii 60 minutilises järeltöötuses, kus katsekeha suurenes peaaegu 0,3 mm.

3.5. Kõrguse mõõtmistulemuste analüüs

Kõrgus suurenes järeltöötlemise pikenedes, nagu on välja toodud joonisel 14.



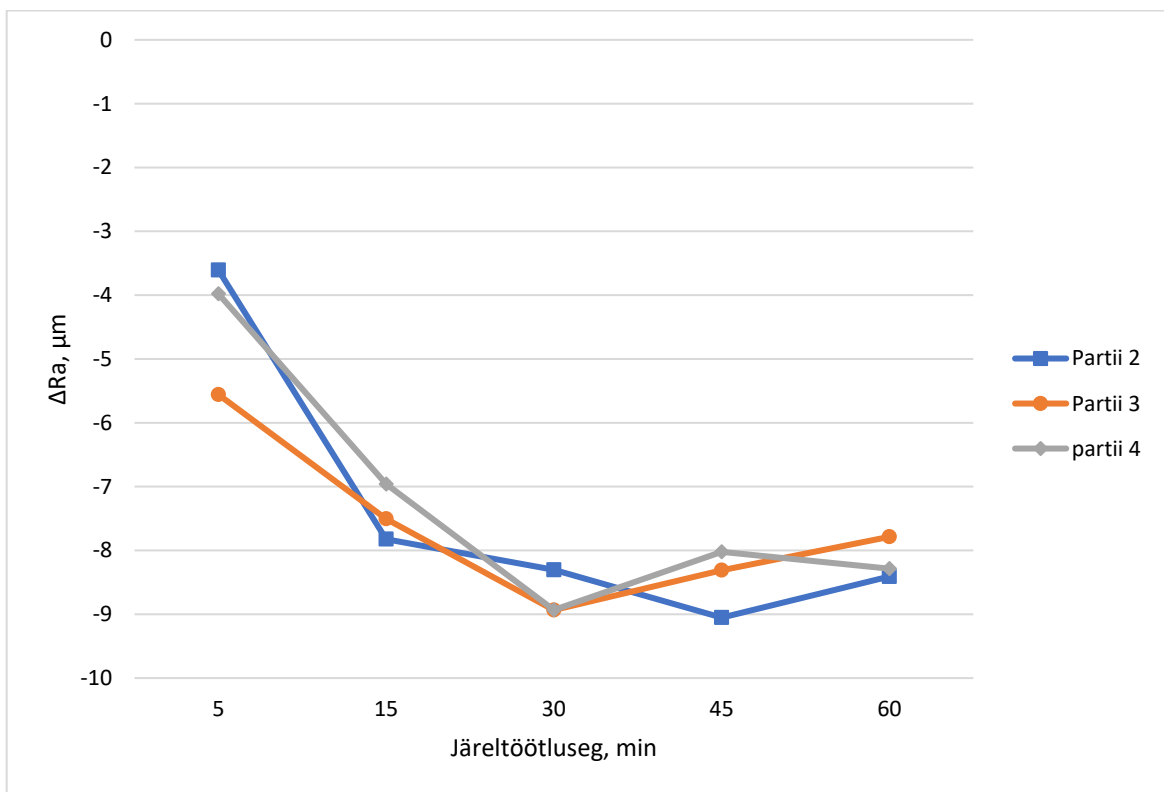
Joonis 14. Keskmise kõrguse muut ajas.

Katsekeha laiuse mõõtmised enne järeltöötlust jäid vahemikku 19,91-20,06 mm. Kõrguse juures ei saa välja tuua, et suurenemine toimus enamasti katsekeha servades, kuna katsekehi mõõdeti vaid kohtadest, kus ei olnud tehtud lõiketöötust. Selle piiranguga ei olnud võimalik katsekehasid nii süsteemselt mõõta, nagu seda oli võimalik teha külgede puhul. Teine erinevus külgedega on asjaolu, et põhja kui tehnoloogilist külge ei töötlenud atsetoonaurud, kuna see oli kontaktis metallseibiga, mille pärast aurud ei pääsenud sinna nii kergesti kui külgede juurde. Sellegipoolest nagu jooniselt 14 näha, tuleb kõrguse juures välja katsekeha deformeerumine pikemate järeltöötus aegade puhul. Viieteist minutisel järeltöötusel on 3. partii suurenenud 0,05 mm võrra. Suurim muutus oli samuti toimunud 3. partiis, kus 60. minutil oli katsekeha suurenenud 0,26 mm.

3.6. Pinnakareduse mõõtmistulemuste analüüs

Pinnakareduse puhul mõõdeti nelja parameetrit R_a , R_q , R_z ja R_{sm} . Kõik parameetrid muutusid märgatavalt juba lühikese järeltötlusajaga.

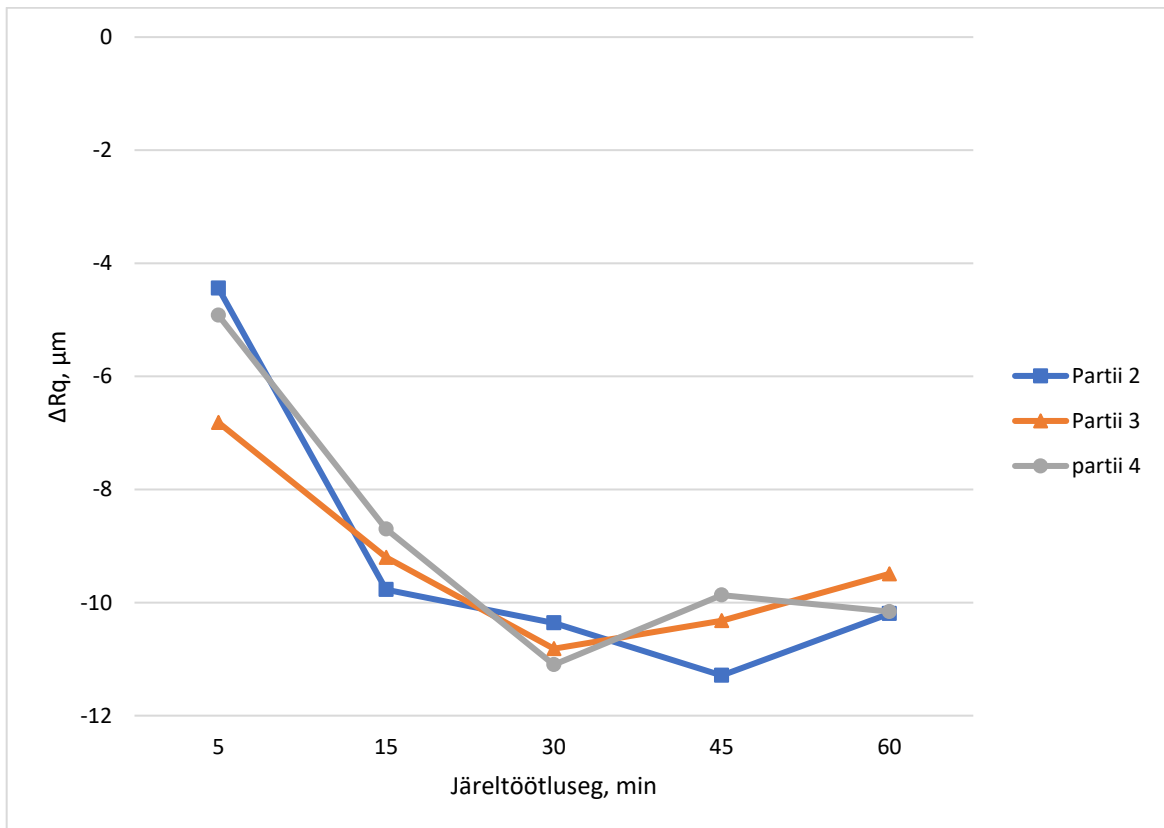
Esmalt vaatame parameetrit R_a ehk mõõtetulemuste keskmist erinevust mõõtetulemuste keskmisest, ehk keskmist karedust. R_a muutub erinevatel atsetoontötlusaegadel toob välja joonis 15.



Joonis 15. Keskmise R_a muut erinevatel järeltötlusaegadel.

Keskmine R_a väärtus enne järeltötlust oli $9,54 \mu\text{m}$. Jooniselt 15 on näha, et juba viie minutiline järeltötlus avaldab märgavalt mõju keskmisele pinnakaredusele vähenedes $4-5 \mu\text{m}$. R_a väärtus väheneb viieteist minutiks umbes $7 \mu\text{m}$ ja selle keskmine väärtus on $1,5 \mu\text{m}$. Pikemaajalisel järeltötlusel vaheneb pinnakaredus keskmiselt vaid $0,5 \mu\text{m}$ võrra. Suurim pinnakareduse langus toimus 2. partii 45 minutilise järeltötluse puhul, kus pinnakaredus langes keskmiselt $9 \mu\text{m}$ võrra.

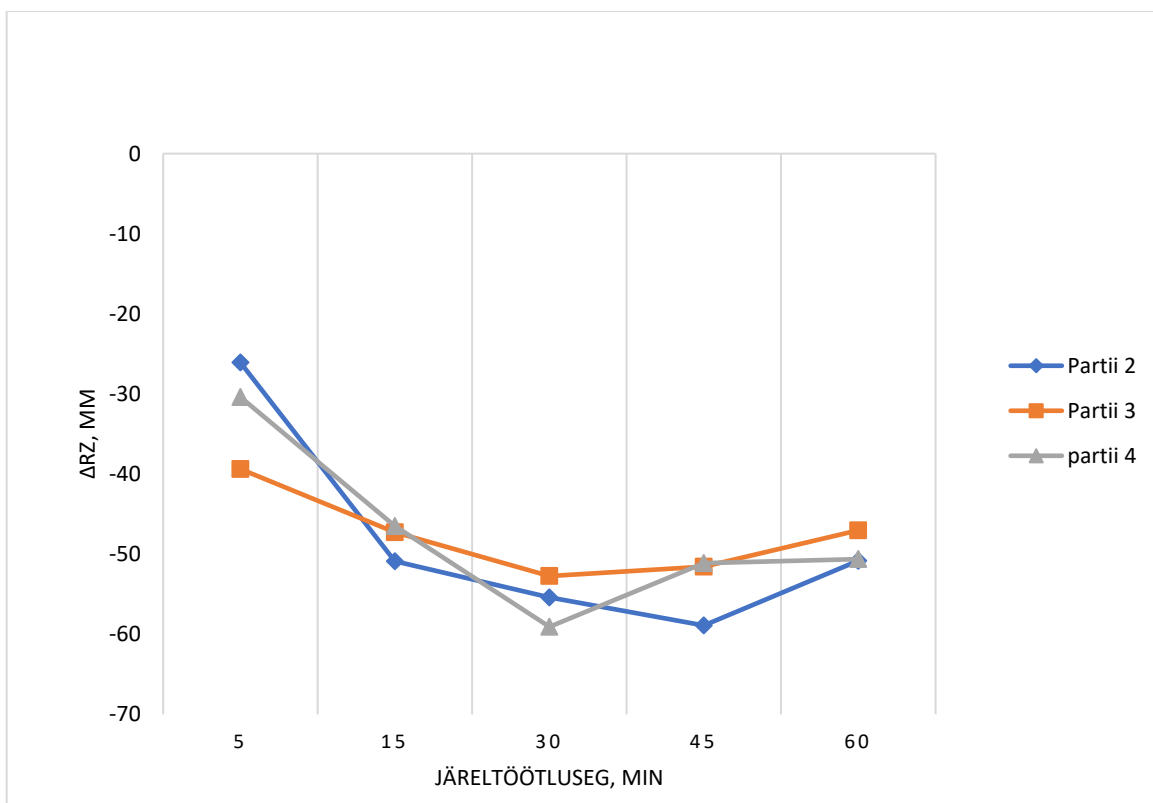
R_q ehk kareduse dispersioon muutub sarnaselt R_a muudule. R_q muut on kajastatud joonisel 16.



Joonis 16. Keskmine R_q muut erinevatel järeltöötusaegadel.

Keskmine R_q väärtus enne järeltöötlust oli 11,76 μm . Jooniselt 16 on näha, et kareduse dispersioon muutub juba viie minutise järeltöötusega 4 μm võrra. Viieteistkümenedaks minutiks on kareduse dispersioon langenud keskmiselt 9,2 μm ja selle keskmine väärtus oli 1,9 μm . Edasine järeltöötus langetas seda väärtust kuni 0,6 μm võrra.

R_z on mõõtevahemiku suurimate erinevuste keskmine. R_z muutust erinevatel atsetoontöötamise pikkustel on leitav joonisel 17. Jooniselt 17 on näha, et R_z väärtus ei muutu oluliselt pärast viieteistkümne minutit atsetoontöötlust.



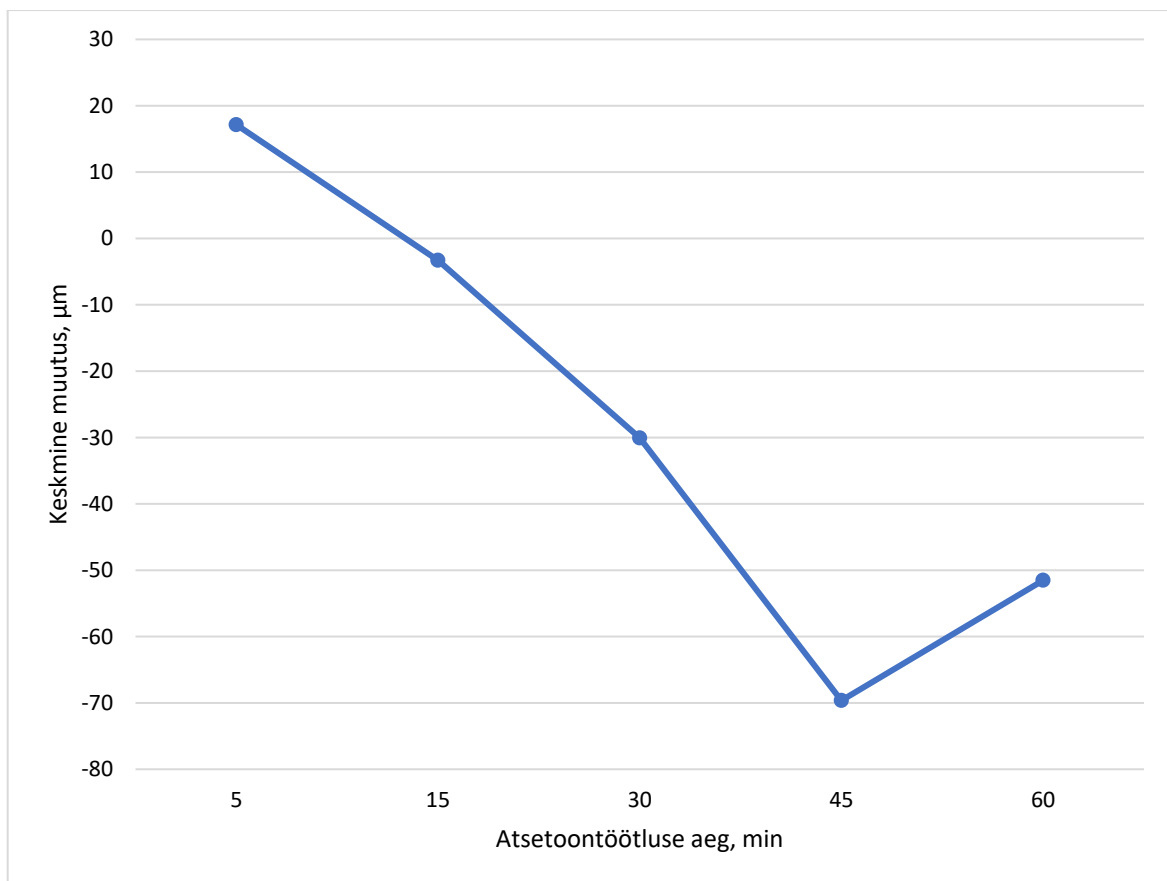
Joonis 17. Keskmine R_z muutus erinevatel järeltöötusaegadel.

Keskmine R_z väärtus enne järeltöötlust oli 58,43 μm . Joonisel 17 on näha, et esimese viie minutiga langeb keskmine kareduse kõrgus 26-39 μm . Viieteistkümne minutiga on kareduse kõrgus langenud keskmiselt 48 μm ja saavutanud väärtuse 7,1 μm . Edasine järeltöötus vähendab keskmist väärtust 2,1 μm võrra. Suurim kareduse kõrguse langus toimus 4. partii 30 minutiliselt järeltöötusel, kus R_q langes 59 μm .

R_{sm} , ehk keskmise kareduse laiuse väärtust kahjuks graafiliselt väljendada ei ole võimalik, kuna kareduse laius oli vaevu mõõdetav pärast viie minutilist järeltöötlust. Kõikidelt katsekehadelt, mida töödeldi atsetooniga viisteist ja enam minutit, oli keskmise kareduse laius sedavõrd suur, et see oli karedusmõõtja SJ-210 mõõtepiirkonnast väljas.

3.7. Y sümboli jalg

Jooniselt 18 on näha Y sümboli jala keskmist muutust erinevatel atsetoontöötuse pikkustel.



Joonis 18. Keskmine Y jala sümboli muut erinevatel atsetoontöötuse pikkustel.

Joonisel 18 on näha, et viie minutiga muutub Y sümboli jalg laiemaks ja edasisel järeltöötusel muutub see kitsamaks. Need tulemused ei pruugi aga korrektsed olla, kuna Y sümboli jalga mõõdeti vaid ühe katsekeha kohta üks kord enne ja pärast atsetoontöötust, mistõttu mõjutab üks mõõtmine keskmist väga palju. Esimese kahe järeltöötusaja puhul on üks kolmest mõõtmisest mõõtetulemuste järgi laiemaks läinud. Viie-minutilise atsetoontöötuse puhul on teised mõõtetulemused nullilähedased. Viieteistkümne-minutilise järeltöötusel on teised mõõtetulemused natukene kitsamaks läinud.

Põhjus, miks selline mõõtevigade võis sisse tulla, on probleem mõõteviisis. Mõõtetulemuse määrab pilt, mida tehti läbi mikroskoobi. Katsekehad muutusid järeltötluse ajal läikivateks ja läikivatelt katsekehadelt peegeldus valgus mikroskoopi tagasi, mis lõi kontrastsed äärejooned, mis võivad olla petlikud. Neid äärejooni on näha joonisel 19.

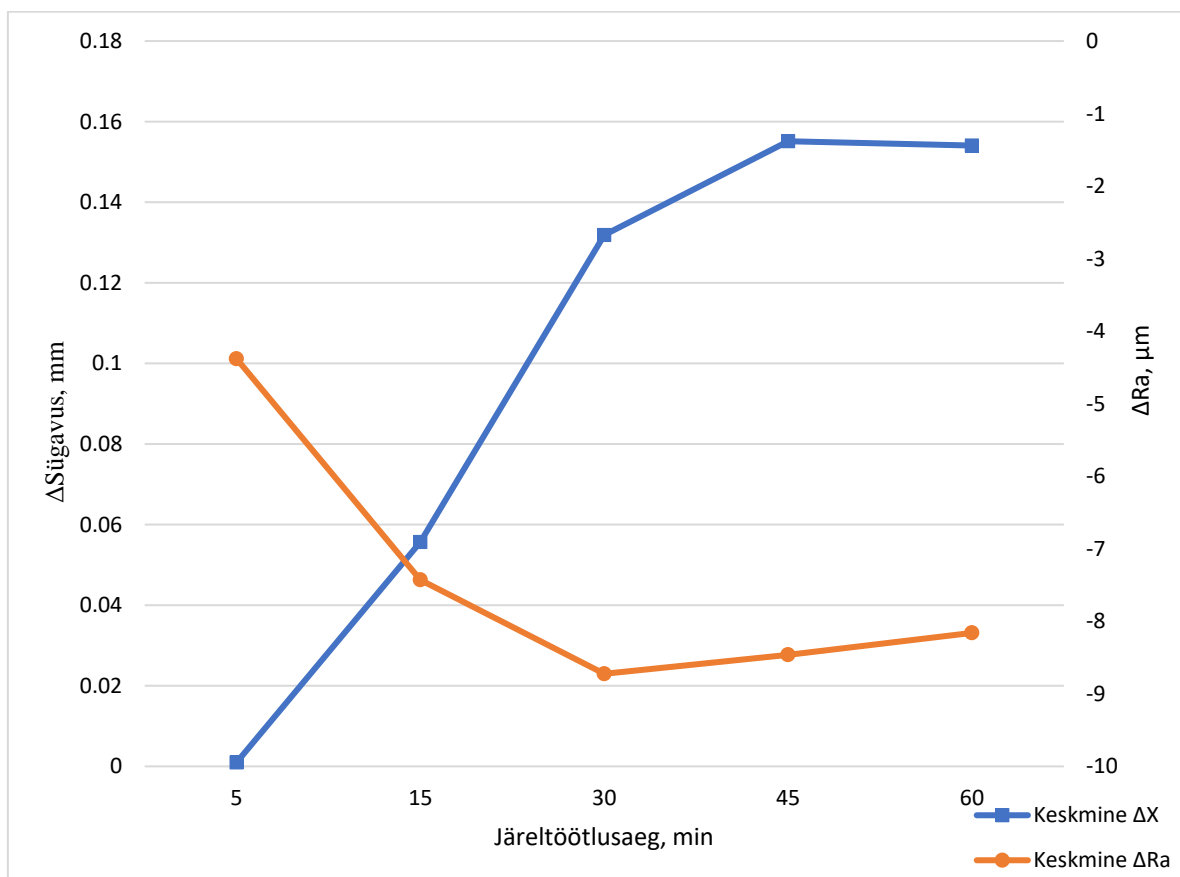


Joonis 19. Optiliselt mõõdetud katsekeha 4.3 peale järeltötlust.

Seda probleemi oleks saanud lahendada rohkemate mõõtmistega või katsekehade matiks tegemisega.

3.8. Pinnakareduse ja välismõõtmete muutuse seos

Pinnakareduse muutus toimus katsekehas suhteliselt kiiresti. Juba viie minutilise järeltöötusega oli pinnakaredus langenud peaaegu 4 μm võrra. Seevastu välised deformatsioonid tulid välja pikema järeltöötusajaga. Seda toob välja joonis 20.



Joonis 20. Sügavuse muutuse seos pinnakareduse R_a näitaja muuduga.

Jooniselt selgub, et viieteistkümne minutiga vähendatakse R_a väärtust üle 7 μm ja gabariitmõõtmete muutused on väiksemad kui 0,06 μm . Pikemaajalise järeltööluse puhul väheneb pinnakaredus veel 1 μm võrra, kuid katsekeha välismõõtmed hakkavad järsult suurenema. Katsekeha välismõõtmed suurenevad 30 minutilisel järeltöötusel 0,13 mm. Sellest võib oletada, et antud järeltöötuskambri puhul ja kasutatud järeltöötus parameetritega on optimaalne järeltöötusaeg viisteist kuni kaksikümmend minutit.

Pikemaajaliste järeltöötluste puhul hakkavad detailid deformeeruma ja kaovad ära teravad servad.

3.9. Järeltöötluskambri edasiarendussoovitused

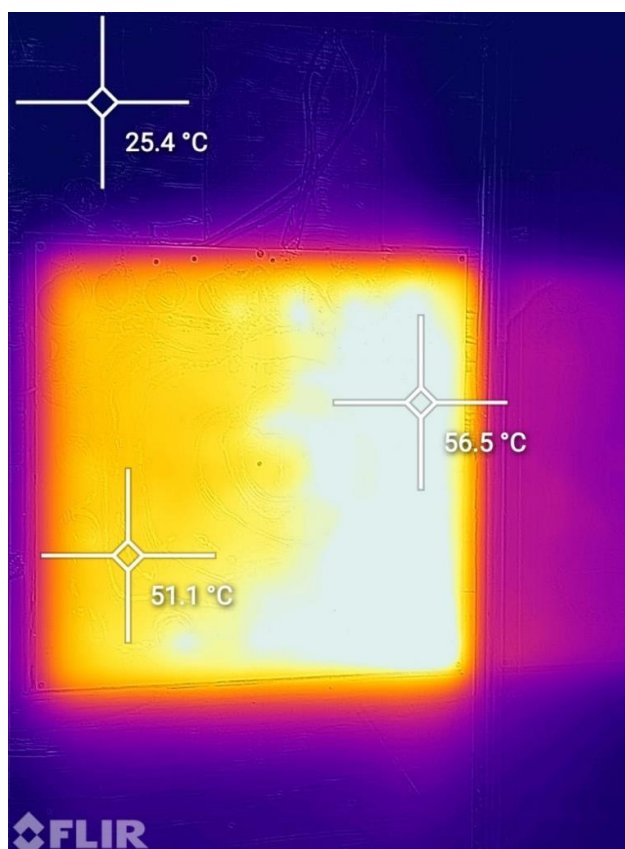
Järeltöötluskambri kasutusel selgus, et sellel on teatud puudujäägid, mida võiks selle edasiarendusel parandada. Autori arvates suurimad murekohad olid:

1. atsetooni aurud kondenseerusid järeltöötluskambri kaanel ja tilkusid alla;
2. klaaskambri mootori kinnitusavad ei olnud tsentreeritud;
3. järeltöötluskambri põhi ei olnud ühtlase temperatuuriga;
4. järeltöötluskamber oli suur ja sellega kaasnes suur atsetooni kulu;
5. mootori ümbris deformeerus mootorist tuleva soojuse tõttu;

Kaanel aurude kondenseerumise probleemi saab lahenda mitut moodi. Esimene võimalus on isoleerida kambri kaas, mis vähendaks sellel kondenseeruva atsetooni hulka. Teine võimalus oleks teha kambri riiulsüsteem, mille pealmine riiul juhiks kondenseerunud atsetooni järeltöötluskambri seintele, mida mööda need saaks järeltöötluskambri põhja voolata. Riiulsüsteem suurendaks lisaks järeltöötluskambri tootlikust, kuna saaks rohkem väikseid detaile korraga järeltöödelda.

Järeltöötluskambri mootori kinnitusavad ei olnud tsentreeritud mootori väntvõlli ava suhtes. Ülemine ava oli võlli avale lähedamal kui kaks alumist ava. Selle tõttu tuli muuta mootori kinnituseks mõeldud vahepukse, millega tihendati järeltöötluskambrit ja välditi klaasi purunemist. Järgnevatel klaaskambritel võiksid need olla tsentreeritud. Teine võimalus oleks jätta avad tegemata ja juhtida ventilaatorit läbi klaaskambri elektromagnetite tekitatud magnetvälja abil. See lahendus oleks soositum, kuna vähendaks võimalikke atsetooniaurude lekkekohti.

Järeltöötuskambri põhi ei olnud ühtlase temperatuuriga. Temperatuuri erinevust järeltöötuskambri põhjas on näha jooniselt 9.



Joonis 9. Termokaamera Flir Lepton 3.5 mõõdetud temperatuurid atsetoonjäreltöötuskambri põhjast.

Nagu jooniselt 9 on näha, siis ei levi soojus ühtlaselt kambri põhja mööda, vaid jääb küttekeha ümbrusesse. Küttekeha ümbruses on järeltöötuskambri põhi kuni 56,5°C, aga sellest eemal vaid 25,4°C. Seda probleemi saab lahendada kahel moel. Esmalt on võimalik kasutada kahte kütteelementi, mis tagaks järeltöötuskambri suhteliselt ühtlase kuumutamise. Teiseks on võimalik teha väiksem järeltöötuskamber. Väiksem järeltöötuskamber tagaks sealhulgas ka väiksema atsetoonkulu.

Mootori ümbris 3D prinditi PLA polümeerist, mis deformeerus mootorist tuleva soojuse mõjul. Deformeerumist on näha joonisel 10.



Joonis 10. Mootori ümbrise deformatsioon.

Deformatsioonide vältimiseks on võimalik printida suurem mootori ümbris, mis hajutaks paremini mootorist tuleva soojuse. Võimalus 3D printida mootori ümbris kõrgemaid temperatuure taluvamast polümeerist, nagu ABS või ASA.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöös uuriti atsetoontöötluste mõju 3D prinditud ABS detailide kvaliteedile. Uuriti atsetoontöötluste mõju detailide pinnakaredusele ja välistele mõõtmetele erinevatel järeltöötlusajadel. Selleks, et seda uurida, tehti töökorda atsetoonjäreltöötlustekamber, mille tegemist alustati eelmine aasta „3D prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogia“ lõputöö raames. Lisaks tehti järeltöötlustekambri alus, mootori raam, võllitihend ja kinnitusnurgad ja parendati elektriskeemi. Uurimisobjektiks valiti 20 mm laiuste külgedega kuubik, mille kolmel küljel olid sümbolid X, Y või Z. Katsekehad 3D prinditi ABS polümeerist 3D printeril Ultimaker 3. Kokku prinditi kakskümmend viis katsekeha, millest viieteist kasutati katsete tegemiseks. Katseid tehti viie järeltöötlusajaga 5, 15, 30, 45 ja 60 minutit. Katsekehasid mõõdeti enne ja pärast järeltöötlust. Mõõdeti katsekehade kõrgust, laiust, sügavust, pinnakaredust ja Y sümboli jala laiust.

Atsetoonjäreltöötlustega on võimalik parandada 3D prinditud ABS detailide pinnakvaliteeti. Selgus, et antud järeltöötlusteseadmega kasutatud sätetel on optimaalne järeltöötlusajad viieteist kuni kakskümmend minutit. Sellise järeltöötlusajaga ei ole kuju deformatsioonid väga suured, kuid pinnakvaliteet paraneb keskmiselt 7,4 µm võrra. Edasisel järeltöötlustel hakkavad järeltööteldava detaili mõõtmed järsult muutuma. Pika järeltöötluste puhul muutuvad detailid servadeks. Järeltöötluste käigus muutuvad detailid välimuselt läikivaks. Kuigi juba viieminutilise järeltöötlustega on detailide pinnakvaliteet oluliselt paranenud, siis ei ole mõistlik nii lühikest järeltöötlusajaga kasutada, kuna edasisel järeltöötlustel välismõõtmed oluliselt ei muutu, kuid pinnakvaliteet märgatavalt paraneb.

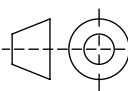

Järeltöötlustekambri edasiarendamiseks võiks sellele teha riisüsteemi, mis laseks rohkem detaile korraga järeltöötlustekambris sisestada ja juhiks eemale järeltöötlustekambri kaanel kondenseeruva atsetooni, muuta mootori ümbrise materjali, vähendada klaaskambri suurust atsetoonikulu vähendamiseks ning kambipõhja temperatuuri ühtlustamiseks ja vahetada ventilaatorisüsteem välja magnetväljaga juhitava süsteemi vastu, mis kaotaks ära avad järeltöötlustekambri seinas.

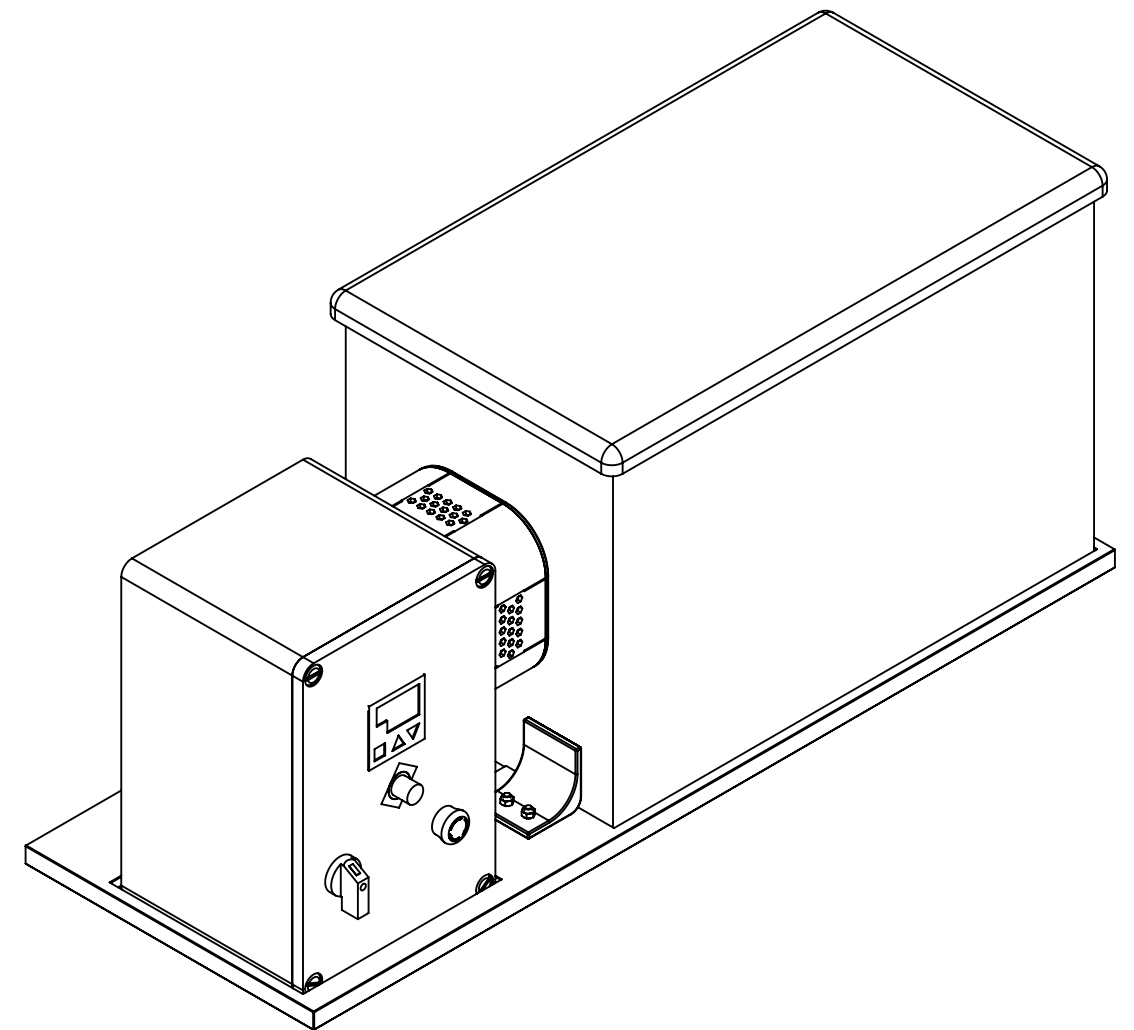
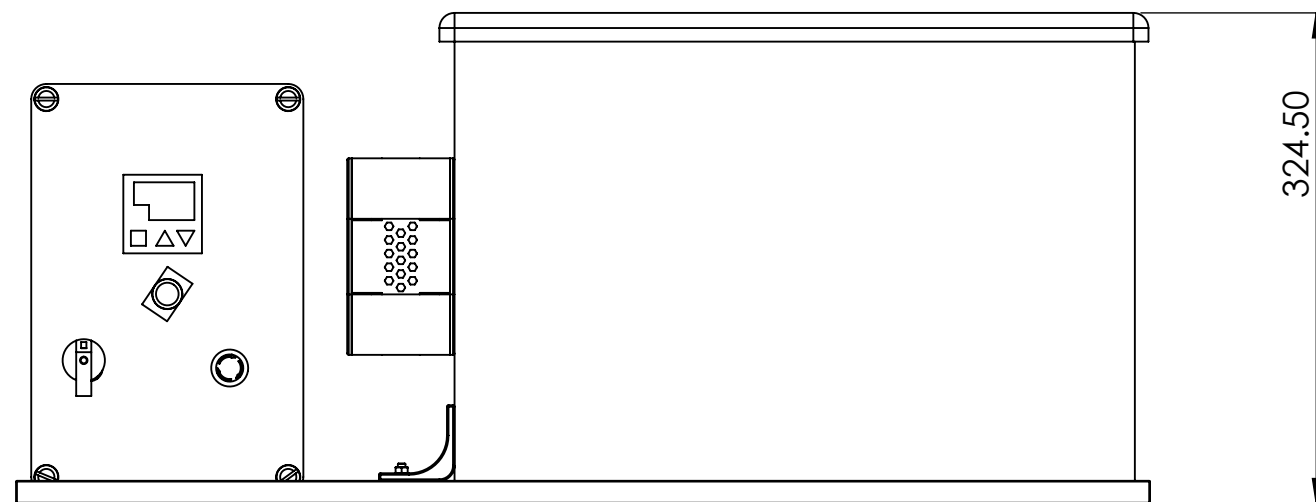
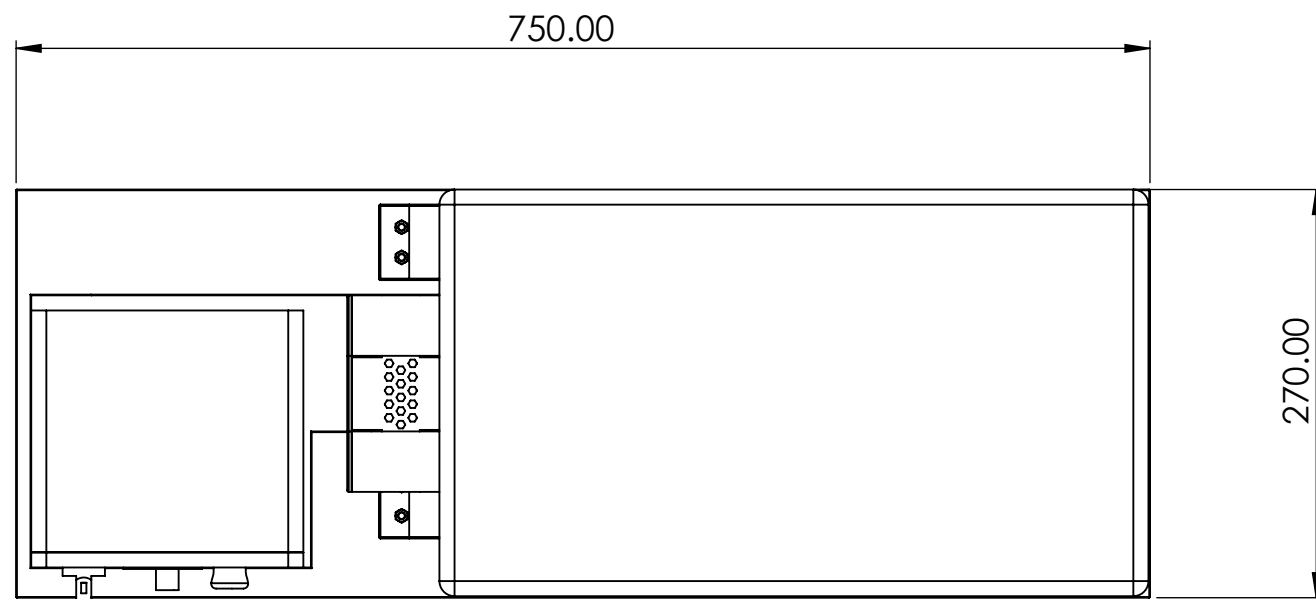
KASUTATUD KIRJANDUS

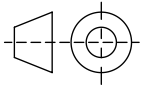
- [1] **MANUFACTUR3D.** (2018). *How FDM/FFF 3D Printing Technology Works?.* *MANUFACTUR3D* [e-ajakiri]. <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology/>. (16.05.2021).
- [2] Dynalab. [Veebileht]. https://web.archive.org/web/20100515054832/http://www.dynalabcorp.com/technical_info_abs.asp. (18.05.2021).
- [3] **Woods S.** *How To Easily Cold Acetone Vapour Smooth & Finish 3D Prints.* *Rigid.ink*, [e-ajakiri]. <https://rigid.ink/blogs/news/acetone-vapor-smoothing>. (18.05.2021).
- [4] **Kuo C. -C., Wang C.-W., Lee Y.-F., Liu Y.-L. ja Qiu Q.-Y.,** *A surface quality improvement apparatus for ABS parts*, New Taipei City, Taiwan
- [5] **Bowman.** Open 3D. (2012). [Veebileht]. <https://depts.washington.edu/open3dp/2012/05/abs-solvents-4-good>
- [6] **Gillespie C.** (2018). *Acetone and Styrofoam Experiment.* *Sciencing*, [e-ajakiri]. <https://sciencing.com/acetone-styrofoam-experiment-2768.html>. (18.05.2021).
- [7] **Chohan J. S. ja Singh R.** (2016). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal*, . Vol. 23, No. 3, pp. 495-513.
- [8] **Pedassaar E.** 2020. 3D prinditud detailide järeltöötlemise tehnoloogia. Bakalaureusetöö. Eesti Maatülikooli tehnikainstituut. Tartu.
- [9] **iDig3Dprinting.** (2016). *XYZ 20mm Calibration Cube.* [Veebileht]. <https://www.thingiverse.com/thing:1278865>. (18.05.2021).
- [10] Ultimaker 3 Installation and user manual. Ultimaker. Ultimaker, 2017, p. 11
- [11] SURFTEST SJ-210 Surface Roughness Measuring Tester SJ-210 User's Manual, (2009) Mitutoyo.
- [12] Marco Rubber and Plastics. [Veebileht]. <https://www.marcorubber.com/o-ring-chemical-compatibility-chart.htm#null=&chemId=16>. (18.05.2021).

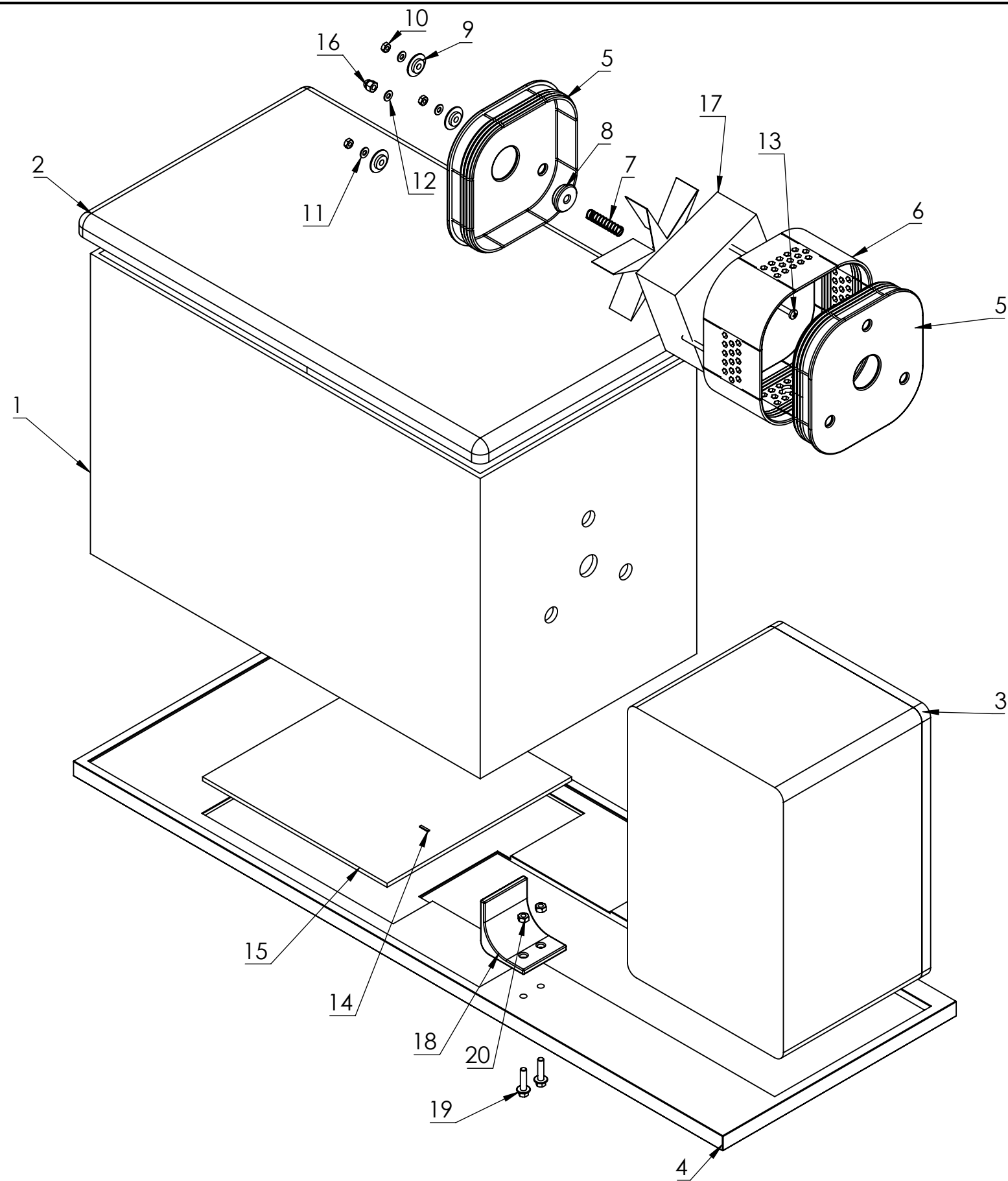
LISAD

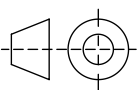
LISA A. Seadme kooste- ja detailjoonised

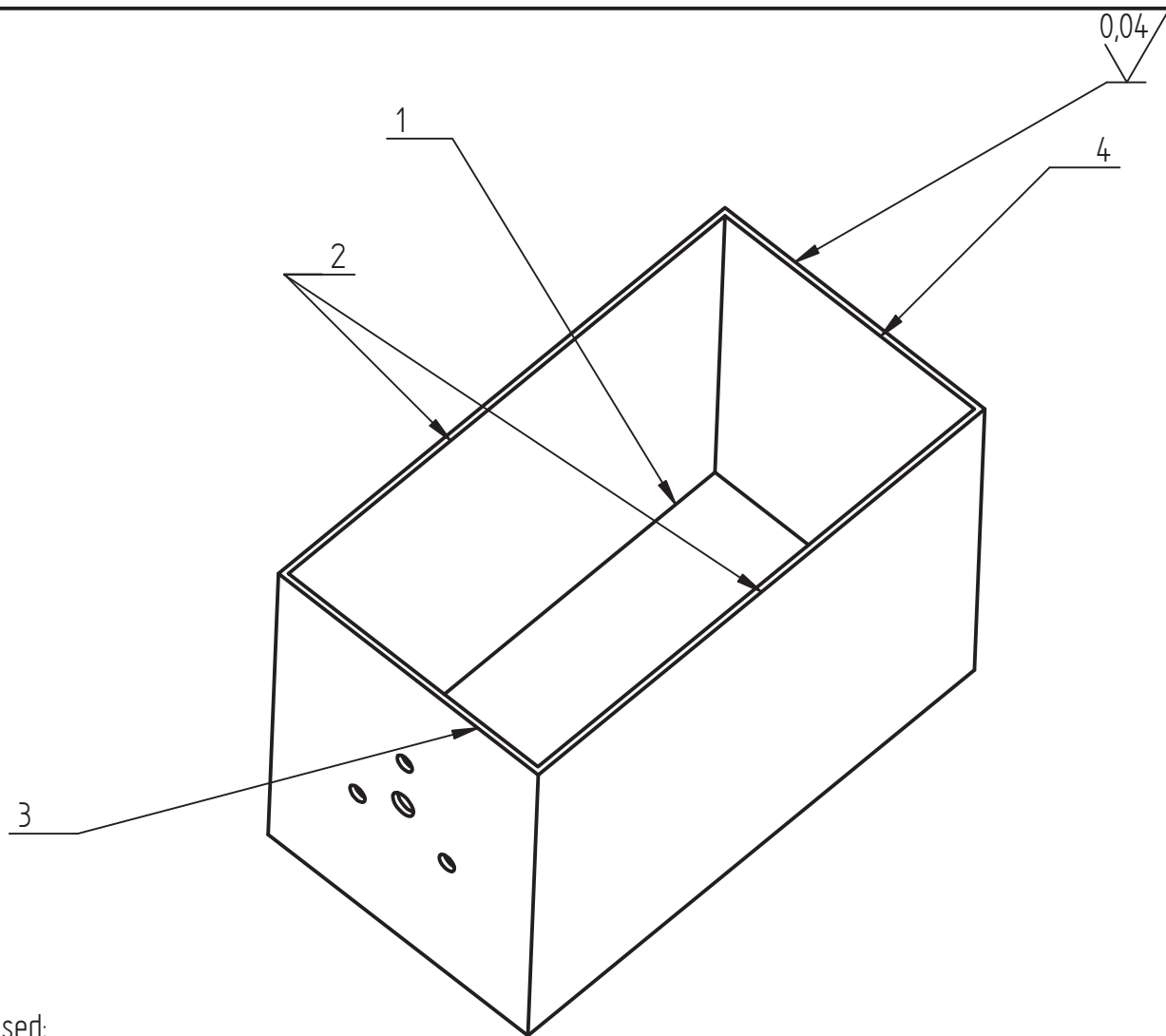
1		Järeltöötuskamber	TN 21/160416 A 01 01 K	1	[8]
2		Järeltöötuskambri kaas tihendiga	TN 21/160416 A 01 02 K	1	
3		Järeltöötus seadme juhtpaneel	TN 21/160416 A 01 03 K	1	
4		Järeltöötus sedame alus	TN 21/160416 A 01 04 D	1	
5		Mootori korpuse ots	TN 21/160416 A 01 05 D	2	
6		Mootori korpus	TN 21/160416 A 01 06 D	1	
7		Mootori võlli verdu, CS 0,75X8X35		1	
8		Mootori võlli tihend	TN 21/160416 A 01 08 D	1	
9		Mootori kinnitus tihend	TN 21/160416 A 01 09 D	3	
10		Mutter, DIN-933-M4 x 10		3	
11		Seib, DIN 125A- 4		3	
12		Seib, ISO7090-A2-200HV-5		1	
13		Masinkruvi DIN 7985 M4 X 40		3	
14		Temperatuuri andur PT100		1	
15		Kütteelement MK3		1	
16		Mutter M5 x 0,8 DIN 1587		1	
17		Mootor koos tiivikuga		1	
18		Järeltöötuskambri kinnitus nurk	TN 21/160416 A 01 18 D	2	
19		Polt DIN 6921 M5x20		4	
20		Mutter, DIN 934 M5		4	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Näitamata piirhälbed:	Mass: 17,2 kg	Mõõt: 1:1
Teostas	Hans Eduard Säre		Nimetus:		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand		Järeltöölusseadme koost		
Kinnitas					
			Leht: 1 / 3	Tähis: TN 21/160416 A 01 00 K	



	Materjal: Hans Eduard Säre	Näitamata piirhälbed:	Mass: 17,2 kg	Mõõt: 1:5
Teostas	Kaarel Soots, Tormi Lillerand	Nimetus:		
Kontrollis		Järeltöölusseadme koost		
Kinnitas				
		Leht: 2 / 3	Tähis: TN 21/160416 A 01 00 K	



	Materjal:	Näitamata piirhälbed:	Mass: 17,2 kg	Mõõt: 1:4
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöölusseadme koost		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand			
Kinnitas				
		Leht: 3 / 3	Tähis: TN 21/160416 A 01 00 K	



Märkused:

1. klaasi paksus 5mm,

2. kambri gabariitmõõtmed: 450x250x300mm

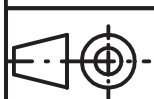
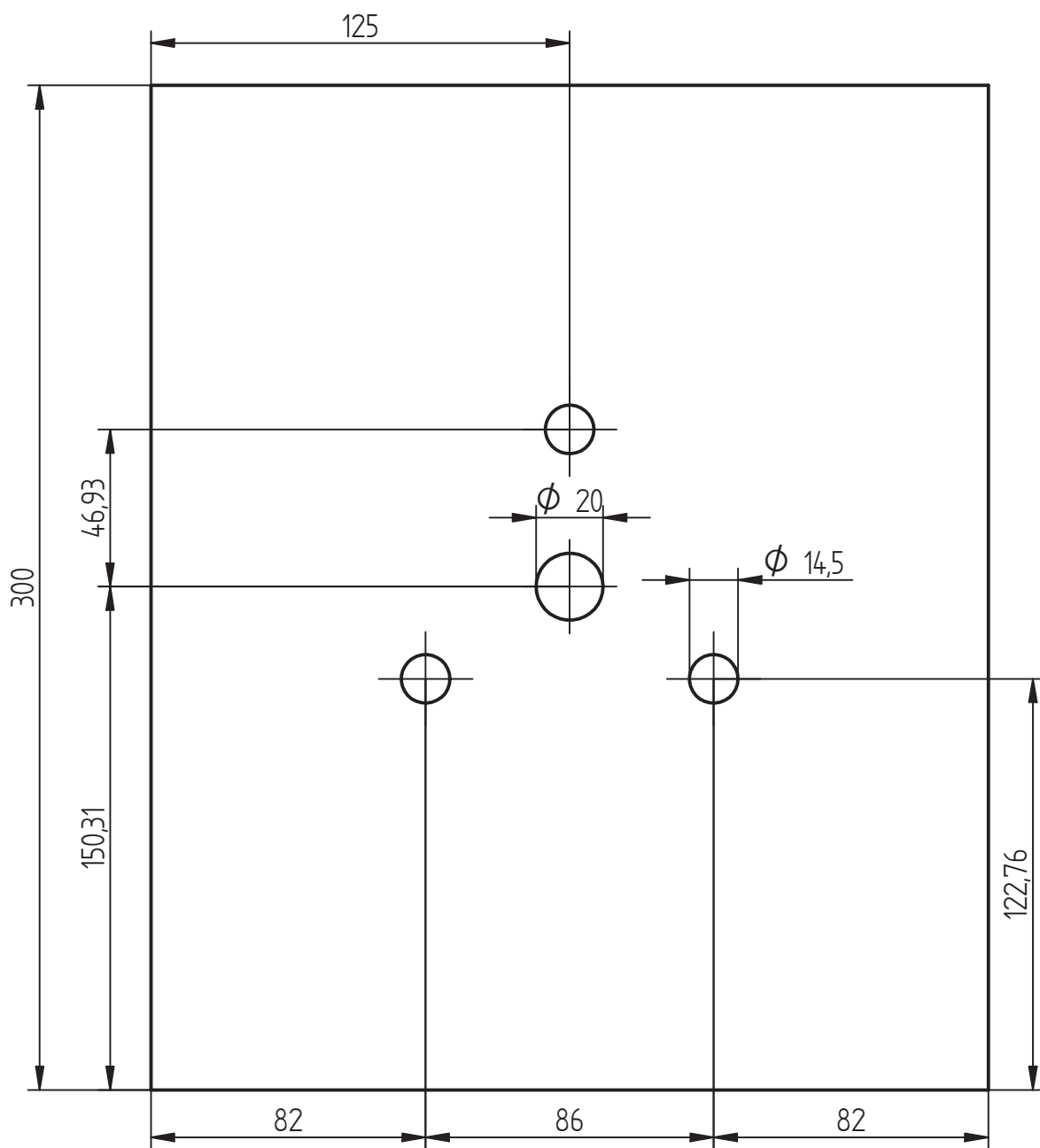
4		Töötlemiskambri külg 3 300x250, karastatud klaas		1	
3		Töötlemiskambri külg 2, karastatud klaas	TA 20/170457 A 02 03 D	1	
2		Töötlemiskambri külg 1 300x440, karastatud klaas		2	
1		Töötlemiskambri põhi 240x440, karastatud klaas		1	

Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
-----	------	-------------------	-------	------	--------

	Materjal:	Näitamata piirhälbed:	Mass:	Mööd:
	Karastatud klaas	ISO 2768 - mK	6,73kg	1:5

Teostas:	Egert Pedassaar	Järeltöötlusamber [8]
Kontrollis:	Kaarel Soots, Tormi Lillerand	
Kinnitas:		

	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences	Leht:	Tähis:
		1/1	TN 21/160416 A 02 00 K



Materjal:
Karastatud klaas

Näitamata piirhälbed:
ISO 2768 - mK

Mass:
0,97 kg

Mööd:
1:2

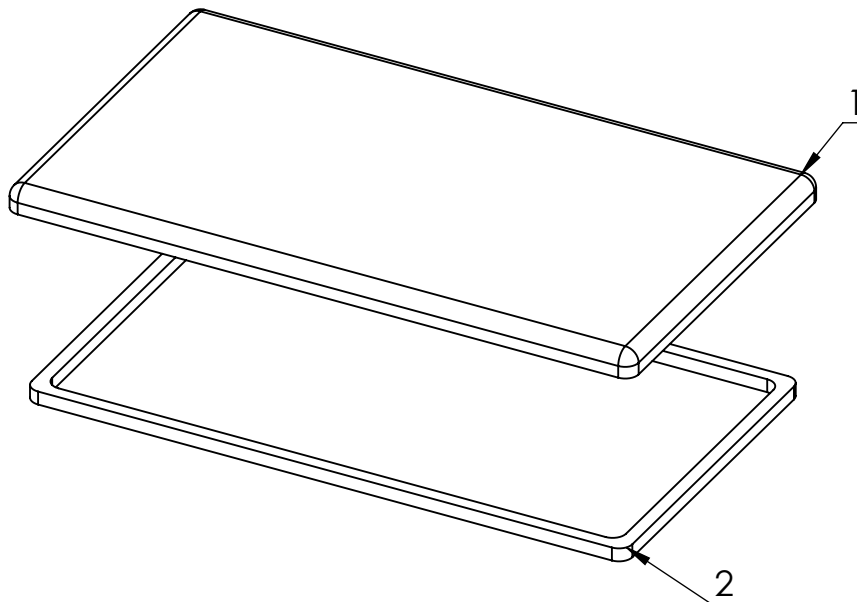
Teostas: Egert Pedassaar

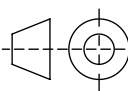

Nimetus:

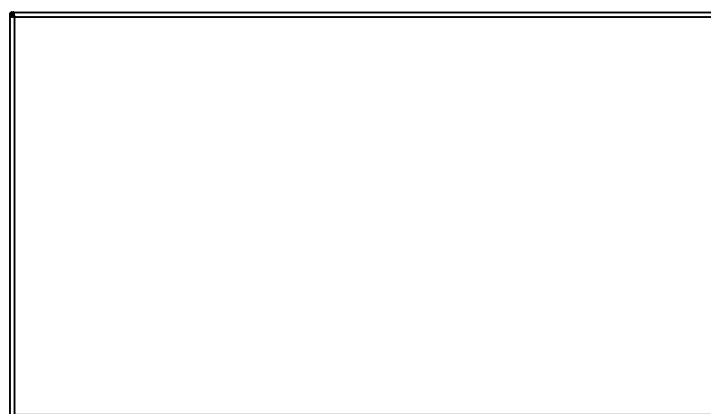
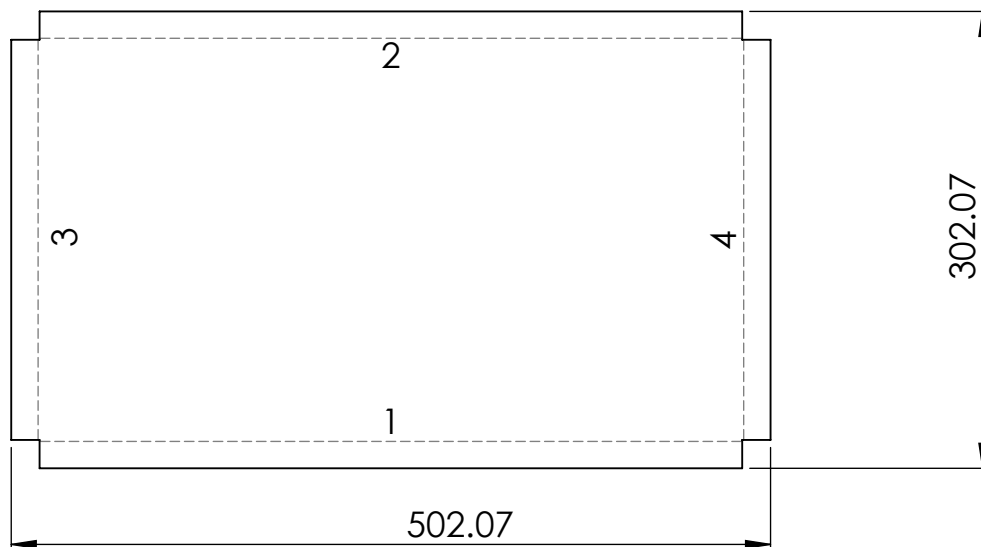
Kontrollis: Kaarel Soots, Tormi Lillerand

Järeltöötuskambri külg 2 [8]

Kinnitas:

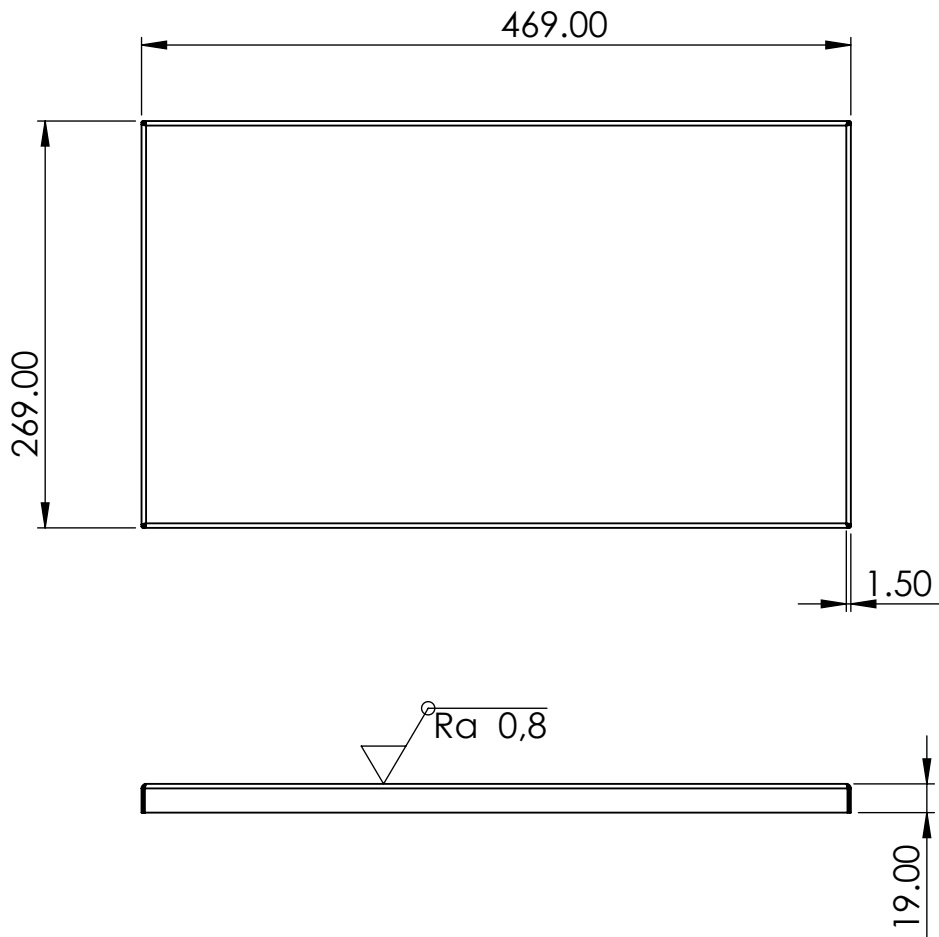


2		Tihend, EPDM		1	
1		Järeltöötuskambri kaas, RV teras	TN 21/160416 A 02 01 K	1	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 1805 g	Mõõt: 1:5
Teostas	Hans Eduard Säre		Nimetus: Järeltöölusseadme kaas tihedniga		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand				
Kinnitas					
			Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 A 01 02 K	

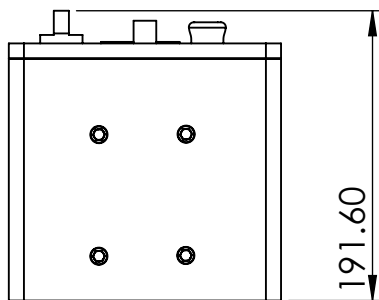
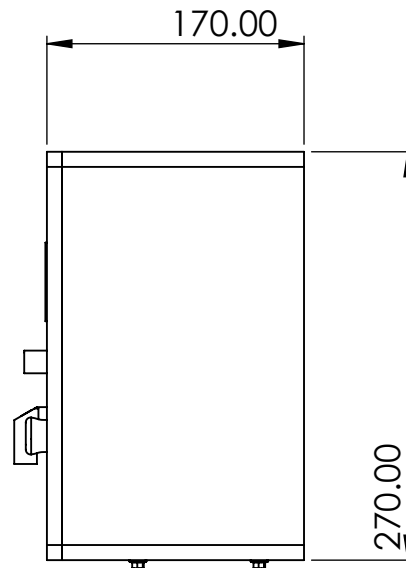
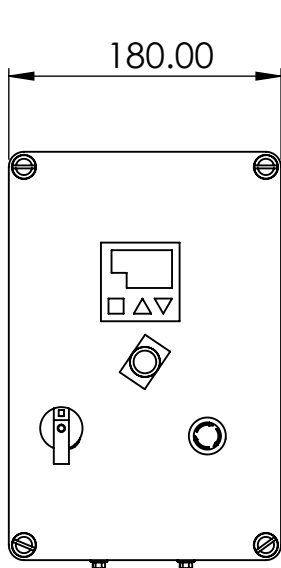


4	1,5 mm	90 deg	Alla
3	1,5 mm	90 deg	Alla
2	1,5 mm	90 deg	Alla
1	1,5 mm	90 deg	Alla
Järjestus	Raadius	Painutusnurk	Suund

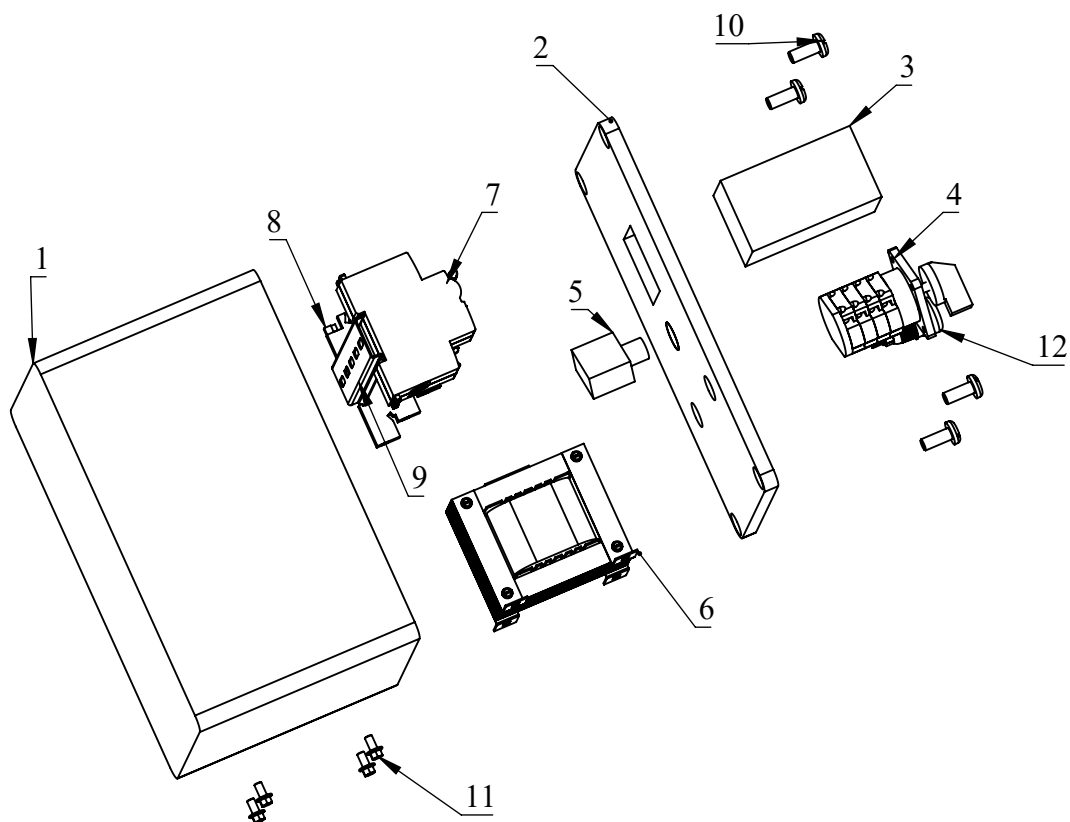
	Materjal: RV Teras	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 1805 g	Mõõt: 1:5
	Teostas Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöölusseadme kaas pinnalaotusega		
Kontrollis Kaarel Soots, Tormi Lillerand				
Kinnitas				
	Leht: 1 / 2	Tähis: TN 21/160416 A 03 01 D		



	Materjal: RV Teras	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 1805 g	Mõõt: 1:5
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus:		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand	Järeltöölusseadme kaas pinnalaotusega		
Kinnitas		Leht: 2 / 2	Tähis: TN 21/160416 A 03 01 D	



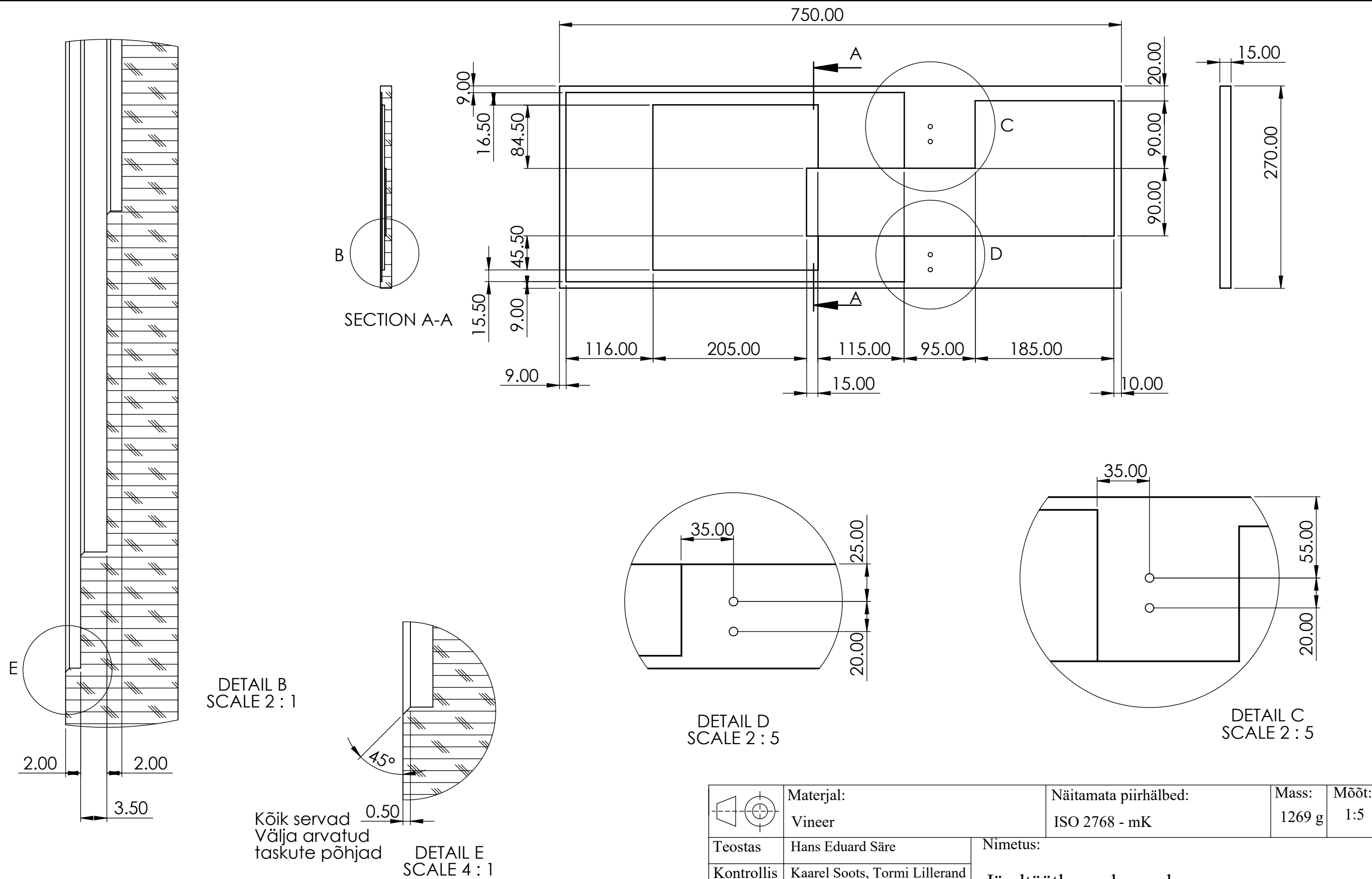
	Materjal:	Näitamata piirhálbed:	Mass: 4,6 kg	Mõõt: 1:5
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöölusseadme juhtpaneel		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand			
Kinnitas				
		Leht: 1 / 2	Tähis: TN 21/160416 A 01 03 K	



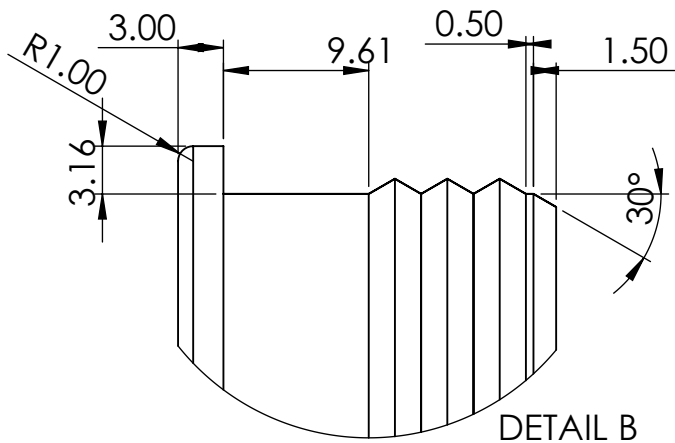
12		Hädastopp lüliti SGB2-BJ542		1	
11		Polt, DIN 6921 - M5 x 10 - 8.8		4	
10		Kruvi M10 x 20, ISO 1580		4	
9		DIN liist, RV teras		1	
8		Relee RFT1C0024		1	
7		Kaitselüliti PL6-C2/2		1	
6		Transformaator 16224-9921		1	
5		Pingeregulaator FR4-GSB		1	
4		Koormuslüliti SGB2-BJ53		1	
3		Temperatuuri kontrolleri TC533AX		1	
2		Karbi CA-32s kaas, polüester		1	
1		Karp CA-32s, polüester		1	

Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Näitamata piirhalded:	Mass:	Mõõt:
				4,6 kg	1:5

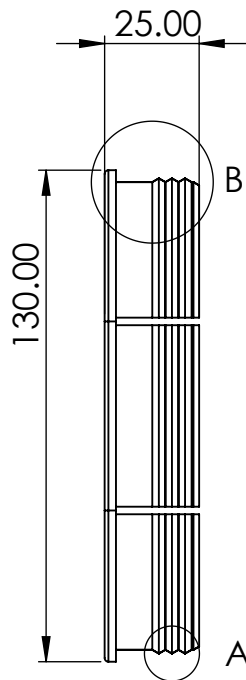
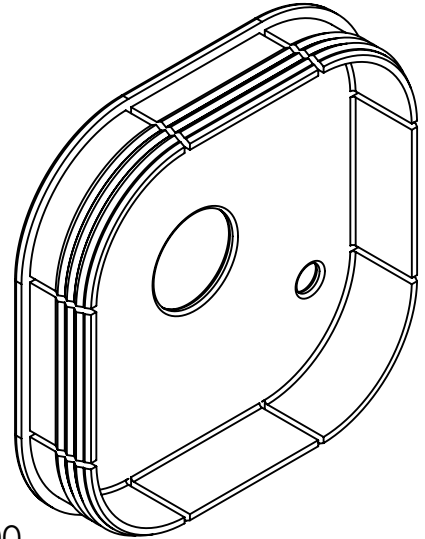
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöötuseadme juhtpaneel
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand	
Kinnitas		



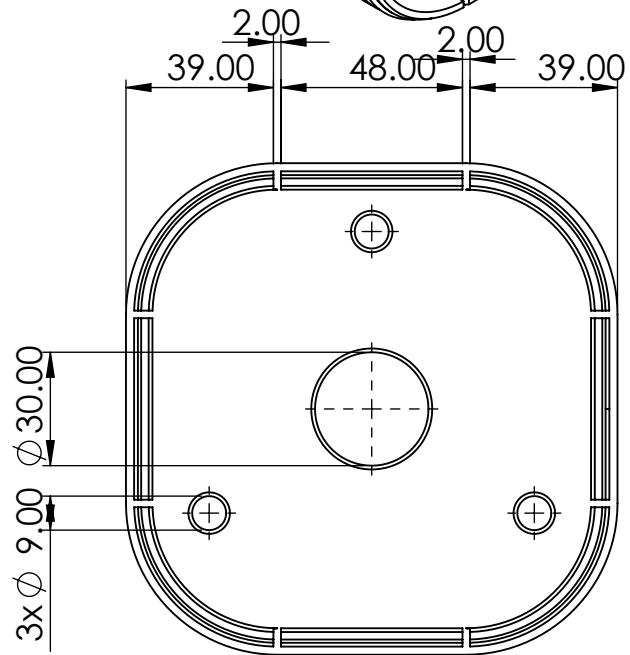
	Materjal: Vineer	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 1269 g	Mõõt: 1:5
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöötlus sedame alus		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand			
Kinnitas				
		Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 A 01 04 D	



DETAIL B
SCALE 2 : 1

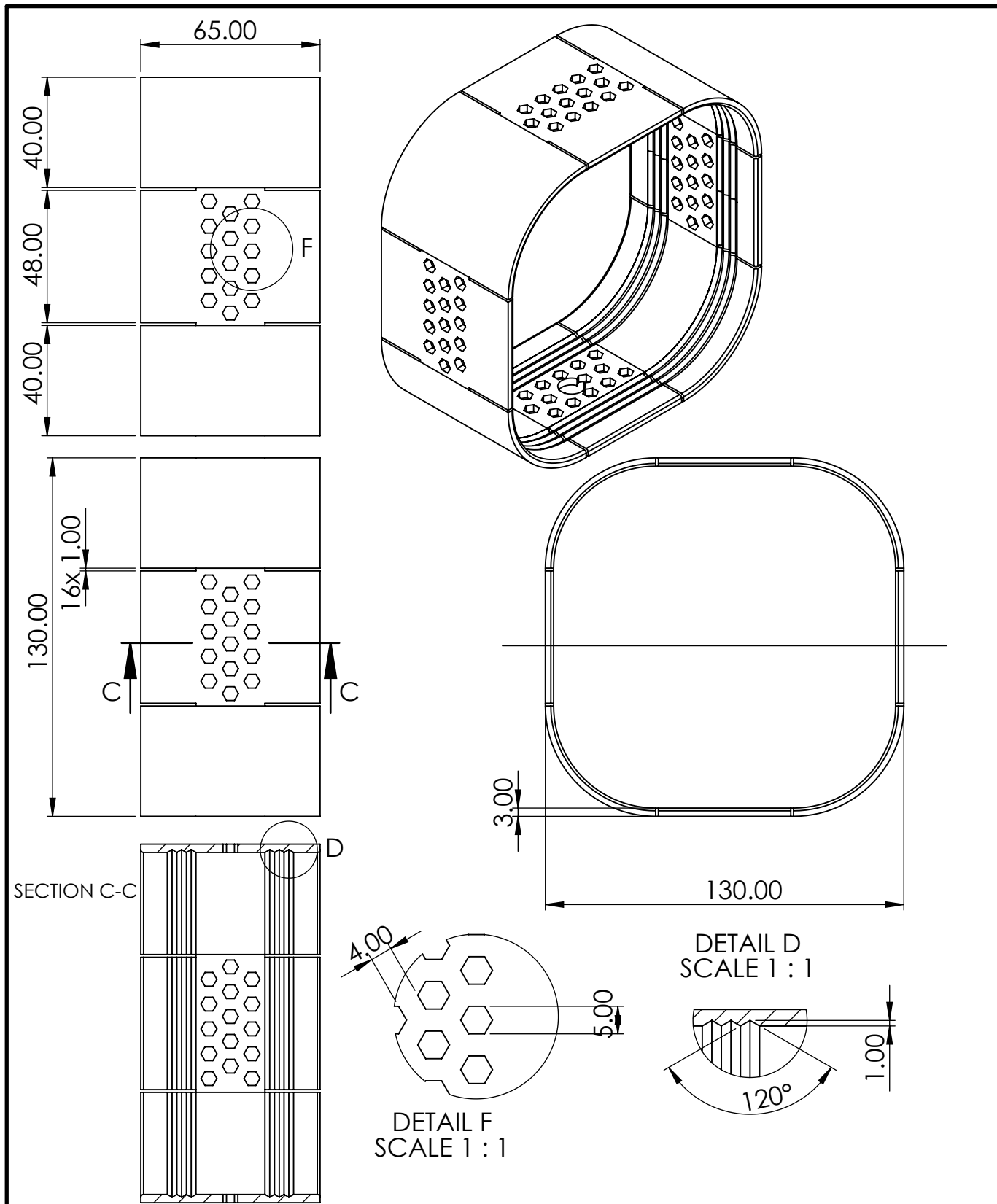


DETAIL A
SCALE 1 : 1



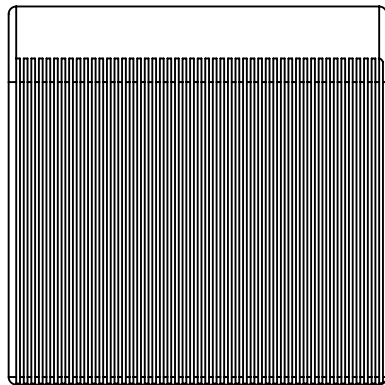
Valmistamistehnoloogia: 3D printimine FFF/FDM tehnoloogiaga

	Materjal: PLA	Näitamata piirhálbed: ISO 2768 - mK	Mass: 75 g	Mõõt: 1:2
	Teostas Hans Eduard Säre	Nimetus: Mootori korpuse ots		
Kontrollis Kaarel Soots, Tormi Lillerand				
Kinnitas				
	Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 A 01 05 D		

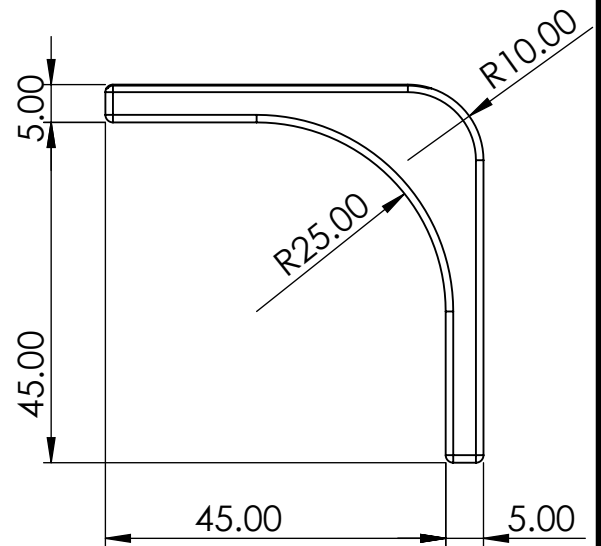
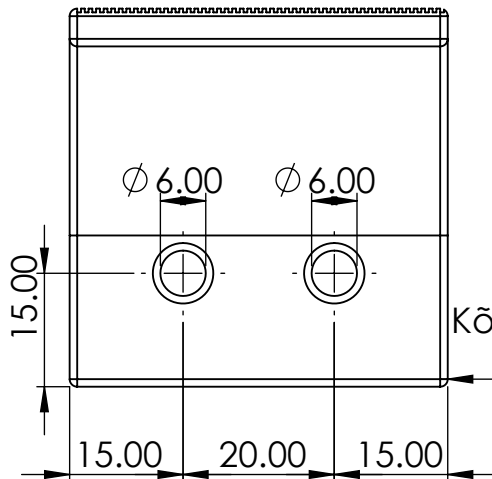


Valmistamistehnoloogia: 3D printimine FFF/FDM tehnoloogiaga

	Materjal:	Näitamata piirhálbed:	Mass:	Mõõt:
	PLA	ISO 2768 - mK	75 g	1:2
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Mootori korpus		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand			
Kinnitas				
		Leht:	Tähis:	
		1 / 1	TN 21/160416 A 01 06 D	



Külg on kaetud 0,5 mm sügavate ja laiade süvistega



Valmistamistehnoloogia: 3D printimine FFF/FDM tehnoloogiaga

	Materjal: PLA	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 30 g	Mõõt: 1:1
	Teostas Hans Eduard Säre	Nimetus: Klaasikambri kinnitus nurk		
Kontrollis Kaarel Soots, Tormi Lillerand				
Kinnitas				
	Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 A 01 18 D		

Kõik faasid

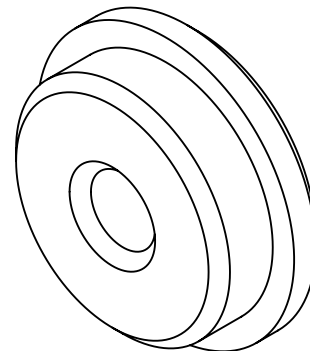
1.00

45°

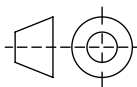
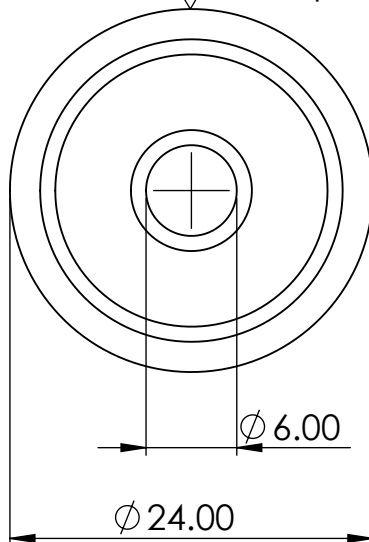
3.00

5.00

Ø 20.00



Ra 1
Kõik pinnad



Materjal:

PTFE

Näitamata piirhälbed:

ISO 2768 - mK

Mass:

6.06 g

Mõõt:

2:1

Teostas

Hans Eduard Säre

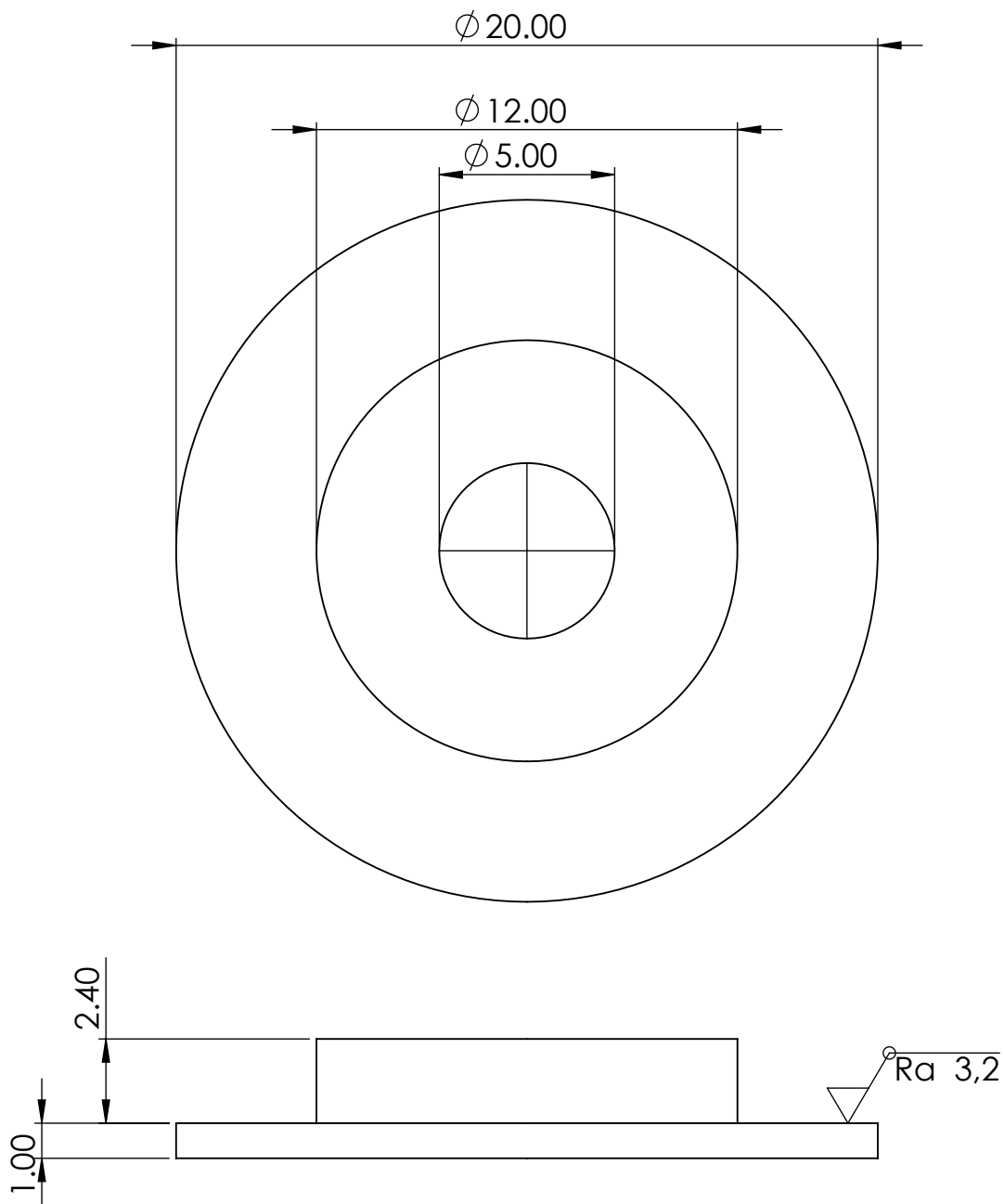
Nimetus:

Kontrollis

Kaarel Soots, Tormi Lillerand

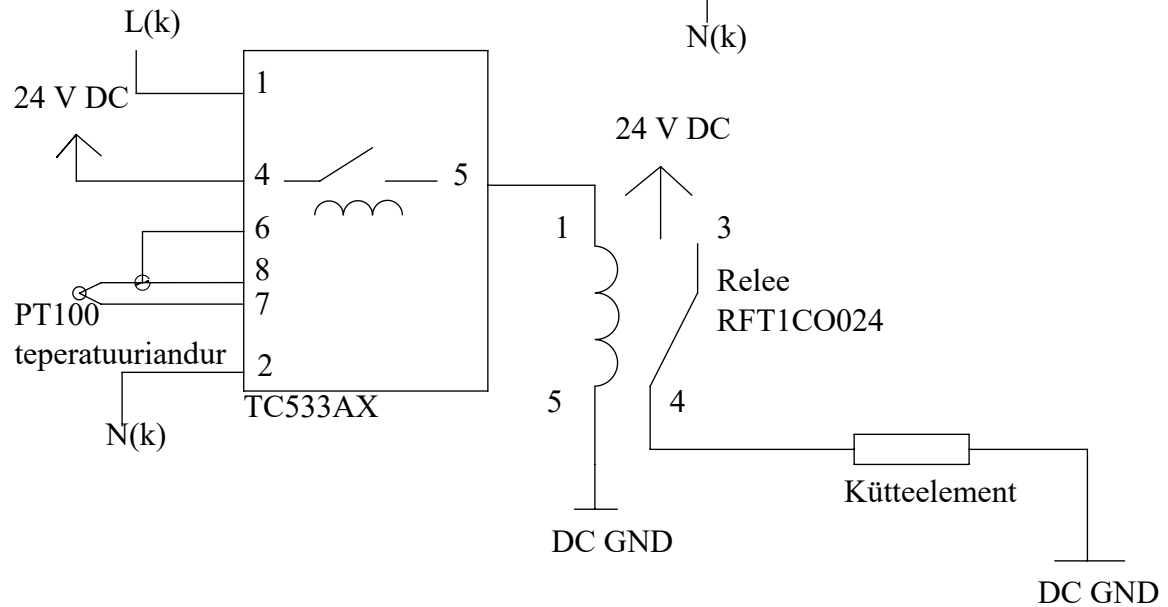
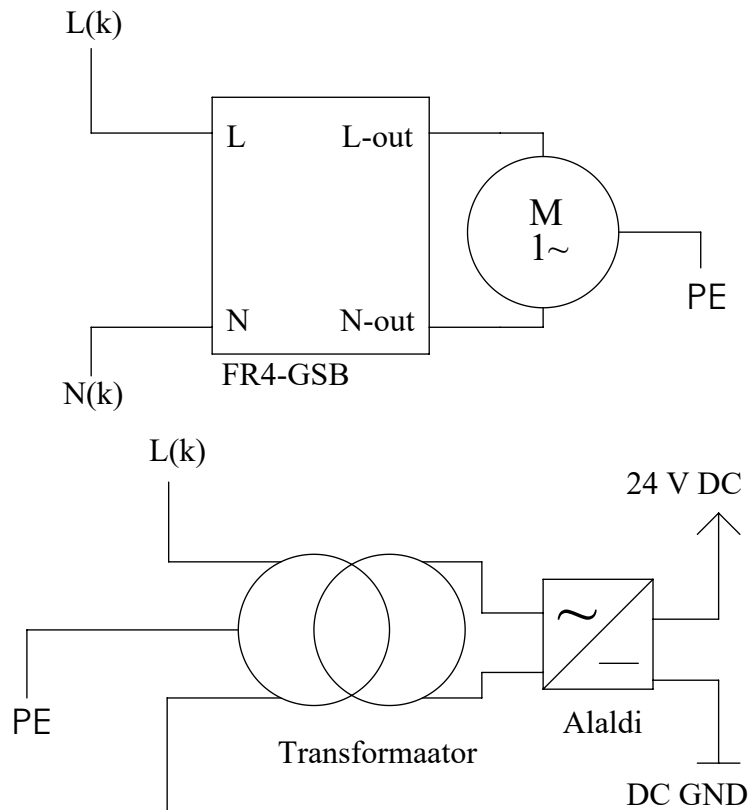
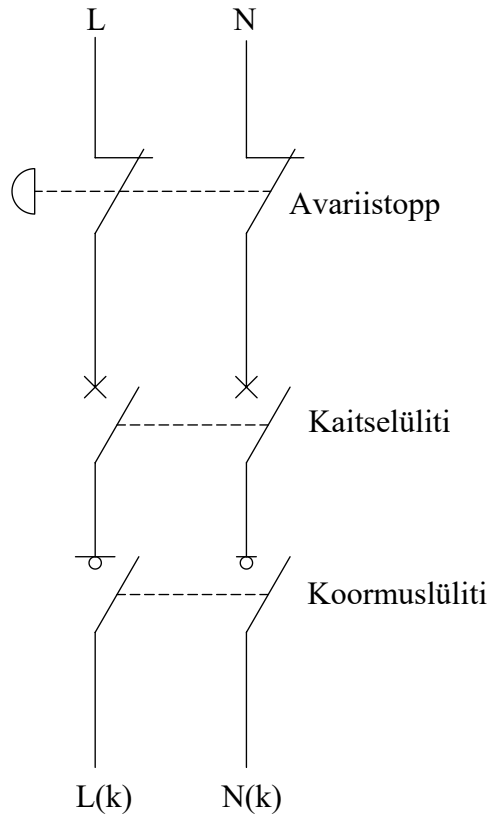
Mootori võlli tihend

Kinnitas



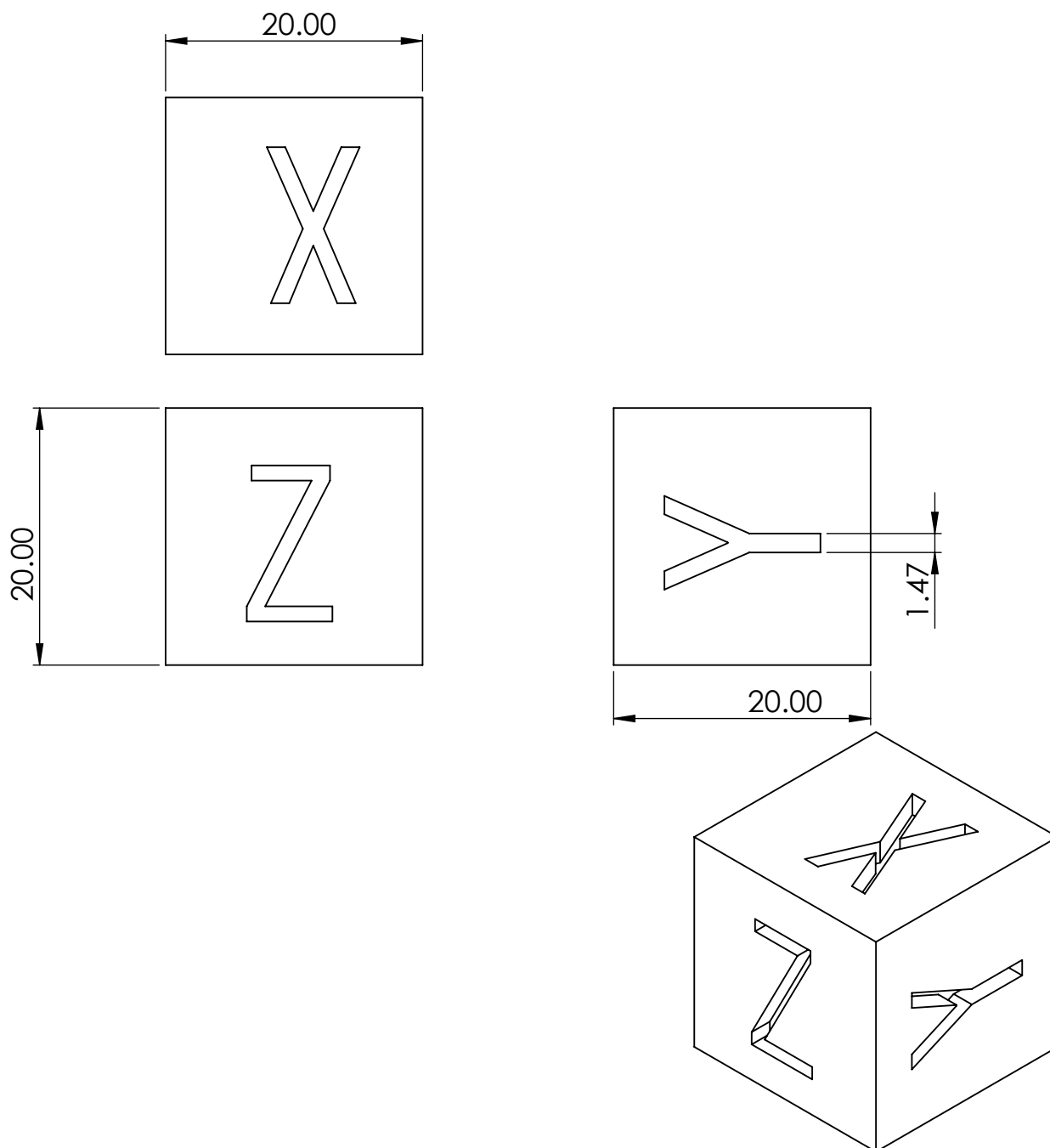
	Materjal: POM-C	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 - mK	Mass: 2 g	Mõõt: 5:1
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus:		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand	Mootori kinnitus puks		
Kinnitas				
		Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 A 01 09 D	

LISA B. Elektriskeem



	Materjal:	Näitamata piirhálbed:	Mass:	Mõõt:
Teostas	Hans Eduard Säre	Nimetus: Järeltöölusseadme elektriskeem		
Kontrollis	Kaarel Soots, Tormi Lillerand			
Kinnitas				
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tartu Tehnikakollecž Tartu Technology College		Leht:	Tähis:	
		1 / 1	TN 21/160416 B 01 01 S	

LISA C. Joonis katsekehast



Detail on valmistatud 3D printimisel FFF tehnoloogiaga

	Materjal: ABS	Näitamata piirhálbed: ISO 2768 - mK	Mass: 3,8 g	Mõõt: 2:1
	Teostas Hans Eduard Säre	Nimetus: Katsekeha XYZ kuubik		
Kontrollis Kaarel Soots, Tormi Lillerand				
Kinnitas				
	Leht: 1 / 1	Tähis: TN 21/160416 C 01 00 D		

LIHTLITSENTS

Mina, Hans Eduard Säre,
sünniaeg 27/02/1997

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
3D prinditud ABS-detailide atsetooniga järeltöötlemise mõju nende pinnaviimistlusele ja
täpsusele,
mille juhendaja on Tormi Lillerand, Kaarel Soots,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks pärast tähtajalise piirangu
lõppemist

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 30.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)