



www.emu.ee  
**Eesti Maaülikool**  
Estonian University of Life Sciences

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# PÄIKESEPANEELIDE TOOTLIKKUSE ANALÜÜS PRAKTILISTES TINGIMUSTES

EXPECTED PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN  
PRACTICAL CONDITIONS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Madis Löper

Üliõpilaskood: 163341 AAHM

Juhendaja: Professor Lauri Kütt

Tallinn, 2020

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Madis Löper

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes

*Kuupäev:* 20.05.2020

81 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* Professor Lauri Kütt

*Töö konsultant:* Arnold Järvala, ABB AS tarkvara arendaja

## *Sisu kirjeldus:*

Lõputöö eesmärgiks on arendada Tallinna Tehnikaülikoolile katseseadmed päikesepaneeli elementide testimiseks ja analüüsimiseks ning uurida elementide tootlikkust ja mõjutegureid efektiivsusele. Töös antakse ülevaade päikesepaneelide tööpõhimõttest ja nende ehitusest. Kirjeldatakse erinevaid päikesepaneelide elementide tehnoloogiad ning arengusuundi. Lisaks selgitatakse päikesepaneelide iseloomustamiseks kasutatavaid karakteristikuid ja parameetreid ning lühidalt kirjeldatakse erinevaid päikesepaneelidele tehtavaid standardseid katsetingimusi.

Peale teoreetiliste osa on käesolevas töös selgitatud päikesepaneelide testimiseks mõeldud katseseadmete arendamist. Täpsemalt antakse ülevaade mobiilse katseseadmete projekteerimisest, elektriskeemi kokku panemisest ja juhtimisalgoritmide koostamisest.

Lõputöö viimases osas hinnatakse katsestendide käitumist praktilistes tingimustes. Analüüsitakse kahe erineva päikesepaneeli mooduli tüübi tootlikkust. Kirjeldatakse katseskeemi, testitavaid mooduleid, testmetoodikat ja tulemuste analüüsi. Vaadeldakse erinevaid mõjutegureid moodulite tootlikkusele ja hinnatakse kasutegurit praktilistes tingimustes tootja poolsete andmete vastu.

Lõputöö tulemusel valmisid katseseadmed ja raamistik katsestendi ehitamiseks. Lisaks peatuti erinevate paneelide tootlikkuse näitajatel ning paigaldustingimuste mõjul paneelide efektiivsusele.

*Märksõnad:* Arduino, päikesepaneelid, päikesepaneelide karakteristikud, päikesepaneelide tootlikkus, päikesepaneelide testimine.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Madis Lõper	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Expected performance analysis of photovoltaic panels in practical conditions	
<i>Date:</i> 20.05.2020	<i>81 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Professor Lauri Kütt	
<i>Consultant:</i> Arnold Järvala, ABB AS Software developer	
<p>The aim of the thesis is to develop test equipment for testing and analyzing PV panel elements for Tallinn University of Technology and to study the productivity of the elements and the factors influencing the efficiency of the panels. The thesis gives an overview of the working principle of solar panels and their construction. Different technologies and development trends of solar panel elements are described. In addition, the characteristics and parameters used to characterize the solar panels are explained and various standard test conditions for the solar panels are briefly described.</p> <p>In addition to the theoretical part, the development of test equipment for testing solar panels is explained in this thesis. In particular, an overview of the design of mobile test equipment, assembly of the electrical circuit and development of control algorithms is given.</p> <p>As a final part of the thesis, the use of the prepared test equipment is evaluated under practical conditions. The testing includes the analyze of the productivity of two different solar panel modules. The test scheme, test modules, test methodology and analysis of results are described in the last paragraph. Various influences on the productivity of the modules are analyzed and the effectiveness of the modules under practical conditions against the manufacturer's data is evaluated.</p> <p>As a result of the thesis, the test equipment and framework for the construction of the test equipment were developed using affordable materials. In addition, the effect of various panel productivity factors and installation conditions on the efficiency of the panels was analyzed and therefore the efficiency of the panels in practical conditions was evaluated.</p>	
<i>Keywords:</i> Arduino, PV panels, PV panel characteristics, PV panel productivity, PV panel testing.	



# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Expected performance analysis of photovoltaic panels in practical conditions</b>
Üliõpilane:	<b>Madis Löper, 163341AAHM</b>
Eriala:	<b>Hajaenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>Magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Prof. Lauri Kütt</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>12.2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>20.05.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Kogu maailmas diskuteeritakse üha enam kliimamuutuste üle eesmärgiga sõlmida kokkuleppeid kujunenud olukorra leevendamiseks. Üheks võtmesõnaks lahenduse leidmisel on energeetika. Sellest tulenevalt mõjutavad lähitulevikus energia tootmist Eestis Euroopa Liidu seatud ambitsioonikad kliimaeesmärgid, mis nõuavad üleminekut säästvamale energiatootmisele. Aasta-aastalt kasvavad päikesepaneelide installeeritud võimsused ning seejuures uuritakse, kuidas toota päikeseenergiast maksimaalselt elektrienergiat. Eesti oludes on päikesepaneelide tootlikkusega seotuid aspekte uuritud erinevates töödes. Samas ei ole lõpetajale teadaolevalt tööd, kus need aspektid, mida antud töös käsitleme, oleks uuritud komplekselt ja süsteemselt.

## 2. Töö eesmärk

Antud töö eesmärkideks on:

- Projekteerida ja ehitada päikesepaneelide analüüsimiseks testseadmed;
- Kajastada testseadmete tööd praktilistes tingimustes, analüüsides päikesepaneelide tootlikkust lähtuvalt järg kriteeriumitest:

- Paneelide tehnoloogia;
- Ilmastikuolud.

### 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Erinevate tehnoloogiatega valmistatud päikesepaneelide tootlikkuse näitajad;
- Erinevad mõjutegurid tootlikkusele;

### 4. Lähteandmed

- Mõõtmiste tulemusel saadud andmed;
- Kirjandusest saadud andmed.

### 5. Uurimismeetodid

Püstitatud ülesannete lahendamiseks analüüsitakse mõõtmiste tulemusena saadud andmeid. Andmete analüüsiks kasutatakse tabelarvutus- ja tabeltöötlusprogrammi Microsoft Excel ja andmetöötlusprogrammi MatLab, mille abil koostatakse ka tabelid, graafikud ja tulemuste analüüs. Samuti analüüsitakse raamatutes, teadusartiklites ning internetis kajastatud andmeid ja võrreldakse neid mõõtmistulemustega.

### 6. Graafiline osa

Lõputöö põhiosas kasutatakse jooniseid, skeeme, tabelleid ja graafikuid. Suurem osa graafilisest osast läheb lisadesse.

### 7. Kasutatud kirjanduse allikad

#### Raamatud

- The performance of photovoltaic (PV) systems : modelling, measurement and assessment / edited by Nicola Pearsall, Elsevier/Woodhead Publishing, c2017
- Solar energy conversion systems / Jeffrey R.S. Brownson, Oxford : Academic Press, 2014
- Effects of partial shading conditions on maximum power points and mismatch losses in silicon-based photovoltaic power generators / Anssi Mäki, Tampere : Tampere University of Technology, 2013
- Solar energy : an introduction / Michael E. Mackay, Oxford : Oxford University Press, 2015

#### Teadusartiklid

- Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends, Mahmood H. Shubbaka, 2019
- NREL, "National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Research: Best Research-Cell Efficiency Chart," 16 04 2019. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

#### Internet

- Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic plants, ABB
- PHOTOVOLTAICS REPORT, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Freiburg, 14 March 2019

Juhendajalt saadud materjalid

### **9. Lõputöö konsultandid**

Arnold Järvala, ABB AS tarkvara arendaja

### **10. Töö etapid ja ajakava**

Kirjanduse ja lähteandmete kogumine: 12.03.2020

Päikest järgiva paneeli valmimine: 12.03.2020

Materjalide läbitöötamine: 21.03.2020

Punkti 1 lõpetamine: 17.04.2020

Punkti 2 lõpetamine: 24.04.2020

Punkti 3 lõpetamine: 08.05.2020

Punkti 4 lõpetamine: 14.05.2020

Töö esimene versioon: 18.05.2020

Parandused ja töö esitamine: 20.05.2020

## SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	11
SISSEJUHATUS .....	12
1. PÄIKESEPANEELID – NENDE EHITUS, EFEKTIIVSUS JA KARAKTERISTIKUD .....	14
1.1 Päikesepaneelide tööpõhimõte .....	15
1.2 Päikeseelementide tehnoloogiad .....	18
1.3 Päikeseelementi ja -paneeli iseloomustavad karakteristikud.....	21
1.3.1 Parameetrid päikeseelemendi ja –paneeli iseloomustamiseks .....	23
1.4 Päikeseelementide efektiivsus ja seda mõjutavad tegurid.....	24
1.4.1 Päikeseelementide efektiivsuse sõltuvus temperatuurist .....	26
1.4.2 Erinevate päikeseelementide tehnoloogiate efektiivsused .....	27
1.5 Standardid ja päikesepaneelide testimine.....	28
2. KATSESEADMETE EHITUS .....	30
2.1 Katseseadme prototüüp .....	30
2.2 Katseseadme elektri- ja automaatikaskeem.....	32
2.2.1 Päikeseelementide ühendamine katseseadmel.....	35
2.3 Katseseadme juhtimine .....	35
2.4 Katsestend.....	38
3. TESTIMINE .....	40
3.1 Testskeem, kasutatavad päikeseelemendid ja nende ühendamine.....	40
3.2 Testimise põhimõtted.....	42
3.3 Tulemused – päikeseelementide karakteristikud ja võrdlus tootja andmetega .....	44
3.4 Tulemused - paigaldustingimuste mõju.....	47

3.5 Hinnang testseadmetele .....	49
KOKKUVÕTE .....	51
SUMMARY .....	53
Bibliography .....	55
LISAD .....	59
Lisa L1. Prototüübi joonised.....	60
Lisa L1.1. Päikese jälgimisseade .....	61
Lisa L1.2. Elementide raam .....	62
Lisa L1.3. Elementide kinnitus.....	63
Lisa L1.4. Horisontaaltelje suur hammasratas .....	64
Lisa L1.5. Horisontaaltelje väike hammasratas.....	65
Lisa L1.6. Vertikaaltelje suur hammasratas .....	66
Lisa L1.7. Vertikaaltelje väike hammasratas .....	67
Lisa L1.8. Külje detail mootori kinnitusega .....	68
Lisa L1.9. Ülemine toetusplaat .....	69
Lisa L1.10. Alusplaat mootori kinnitusega .....	70
Lisa L1.11. Laagri kinnitus 1 .....	71
Lisa L1.12. Laagri kinnitus 2 .....	72
Lisa L1.13. Laagri kinnitus 3 .....	73
Lisa L1.14. Laagripesa.....	74
Lisa L1.15. Alumine külje detail.....	75
Lisa L1.16. Alumine toetusplaat .....	76
Lisa L1.17. Alusplaat.....	77
Lisa L1.18. Lõpulüliti kinnitus .....	78
Lisa L1.19. Tasakaalustus detail .....	79
Lisa L2.1. Katseseadme mikrokontrolleri skeem.....	80

Lisa L2.2. Katsestendi juhtimise ja testskeemi struktuurskeem ..... 81

## EESSÕNA

Lõputöö teema „Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes“ jõudis autorini Tallinna Tehnikaülikooli professori Lauri Kütt kaudu. Lõputöö autorit huvitas väga teema püstitus ning selle praktiline väljund.

Autor soovib tänada lõputöö juhendajat Lauri Kütti teema püstitamise ning abi eest, ABB AS tarkvara arendajat ja lõputöö konsultanti Arnold Järvalat juhtimisalgoritmide koostamisel antud juhtnööride ja abi eest ning samuti Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi doktorant-nooremteadurit Mari Löperit heade nõuannete ja innustuse eest lõputöö koostamisel.

## SISSEJUHATUS

Maailmas on selge suund taastuenergiaallikates toodetud elektrienergia osakaalu suurendamise ning fossiilkütuste baasil toodetud elektrienergia osakaalu vähendamise poole. CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamise eesmärkide vaates tänane olukord, kus elektrienergiat toodetakse suuresti fossiilsetest kütustest, ei ole enam eelistatud. Aina rohkem võetakse vastu meetmeid ning koostatakse arengukavasid kliimaeesmärkide täitmiseks ning oluline roll selles on päikese-energeetikal.

Päikeseenergia ning päikesepaneelidel on taastuenergia osakaalu tõstmisel elektrienergia lõpptarbimises ja hoonete energiatõhususe suurendamisel kasvav roll, näiteks päikeseenergia kasutus väikelahendustes kasvab ENMAK prognooside järgi kuni 100 MW võrra aastaks 2050, kattes riigi elektritarbimise vajadusest ligi 1% [1]. Iga aastaga ehitatakse päikeseelektrijaamu juurde ning päikesepaneelide installeeritud võimsused kasvavad. Seetõttu on väga oluline mõista päikesepaneelide tööpõhimõtet ning uurida, kuidas Eesti kliimatingimustes ning oludes saavutada päikesepaneelide maksimaalne kasutegur.

Päikesepaneeli valides on üheks olulisimaks kriteeriumiks päikesepaneeli väljundvõimsus. Üldjuhul läbivad kõik päikesepaneelid tootja tehases testimised laboris standardtingimustel, mis aga ei peegelda tegelikke olusid- ega ilmastikutingimusi. See tähendab aga lõpuks seda, et kogu päikesepargi väljundvõimsus ei pruugi vastata ootustele ning lõpuks võivad vajalikud olla lisainvesteeringud soovitud võimsuse saavutamiseks. Seetõttu on oluline, et paneele testitaks reaalses ilmastikutingimustes oludes, et juba päikesepargi planeerimise järgus oleks võimalik arvestada võimalikult täpsete efektiivsusväärtustega.

Arvestades aga päikesepaneelide tootjate arvu ning valikut turul, siis puuduvad hetkel piisavalt kulu- ja ajaefektiivsed võimalused erinevate päikesepaneelide samaaegselt katsetamiseks. Katsetamise puhul on oluline, et päikesepaneeli oleks võimalik katsestendil kiirelt ja efektiivselt vahetada. Sellest tulenevalt on lõputöö eesmärgiks arendada Tallinna Tehnikaülikoolile lihtne, kuid samas efektiivne ja teisaldatav katsestend erinevate päikeseelementide testimiseks reaalses ilmastikutingimustes. Katsestendis on võimalik läbi viia testid läbi erinevast materjalist päikeseelementidega, ning annab võimaluse võrrelda päikeseelementide efektiivsust tegelikes Eesti ilmastikutingimustes tehaseandmetega. See omakorda võimaldab hinnata elementide koguenergiatoodangut, sh nende kogu elutsükli jooksul oodatava energiatoodangut.



Antud lõputöö on jaotatud kolmeks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade päikesepaneelidest, nende efektiivsusest, ehitusest ja karakteristikutest. Ühtlasi kirjeldatakse päikesepaneelide tööpõhimõtet, erinevate päikesepaneelide tehnoloogiaid ning tegureid, mõjutavad päikesepaneelide efektiivsust (temperatuur, erinevad kaod). Muuhulgas tuuakse välja päikesepaneelide testimiseks tarvilikud tingimused ning viimaste olulisus.

Teine peatükk hõlmab katseseadme ehitust ning testimise tööpõhimõtteid. Täpsemalt kirjeldatakse välja seadme prototüübi disain, sealhulgas ka elektri- ja juhtimisskeemid ning algoritm. Selgitatakse testseadmete ehitust, testseadmete ühendamist ühisesse katsesendi ja selle juhtimispõhimõtteid.

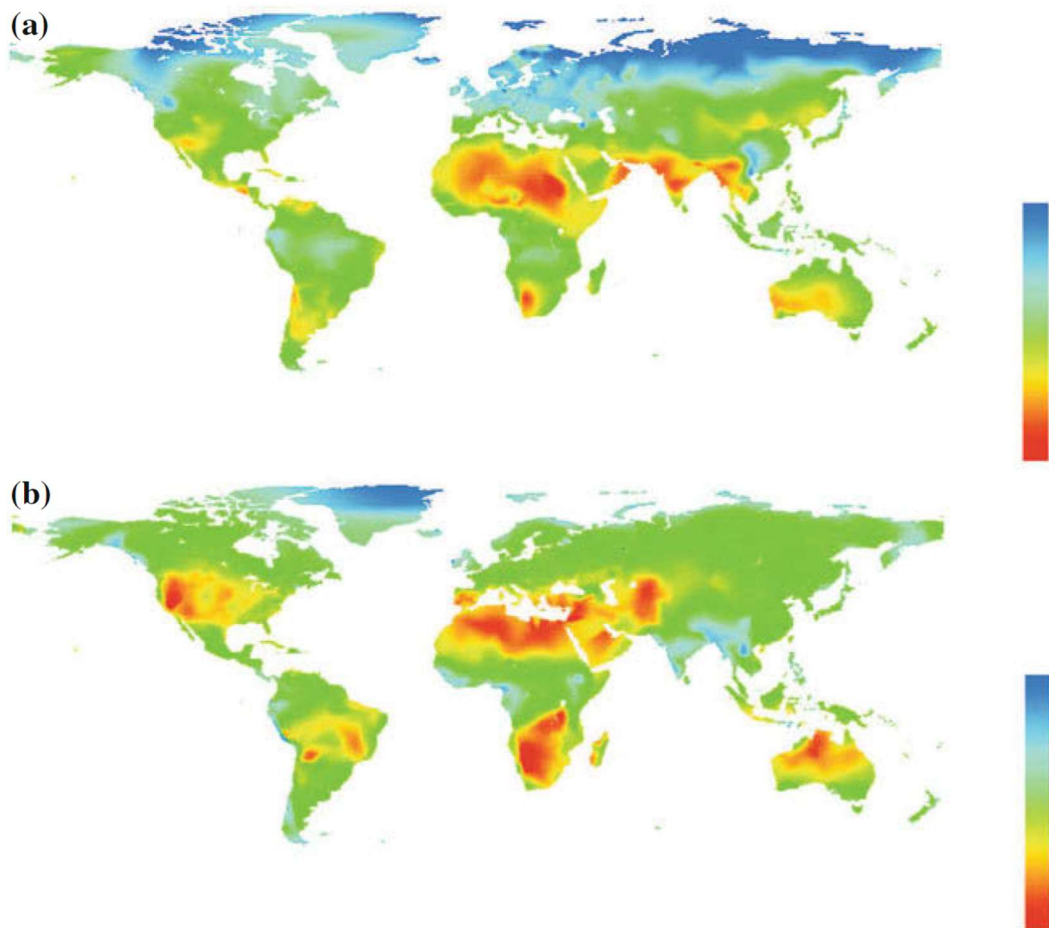
Kolmandas peatükis kirjeldatakse kahe erineva mooduli testimist. Analüüsitakse katsetulemuste põhjal päikeseelementide tootlikkust erinevate mõjutegurite korral. Uuritakse täpsemalt testitud elementide efektiivsust ja selle erinevust tootja poolsetest andmetest. Lisaks hinnatakse katsesendide tööd.

Eesti oludes on päikesepaneelide tootlikkusega seoses tehtud mitmeid lõputöid, kuid paljud neist on seotud konkreetse asukohaga ning põhinevad tootja poolt väljastatud informatsiooni põhjal. Samas ei ole lõpetajale teadaolevalt tööd, kus need aspektid, mida antud töös käsitletakse, oleks uuritud komplekselt ja süsteemselt. Lisaks ei sisalda varasemad tööd testseadmete ehitust sellisel kujul ja sellises mahus.

Lõputöö tulemused on eelkõige vajalikud Tallinna Tehnikaülikoolile, kuid samuti ka ettevõtetele, kes tegelevad päikeseenergia rajamisega, kuna katseseadme abil on võimalik testida erinevate tegurite mõju päikeseelementide tootlikkusele. Lõputöös kirjeldatud meetodil on võimalik edasise arendamisel on üles ehitada näiteks Tallinna Tehnikaülikooli juurde testala erinevate päikesepaneelide katsetamiseks eesmärgiga leida kõige sobivamad päikeseelementid- ja tehnoloogiad Eesti kliimasse ning arendada päikeseelementidega seotud teadustööd.

# 1. PÄIKESEPANEELID – NENDE EHITUS, EFEKTIIVSUS JA KARAKTERISTIKUD

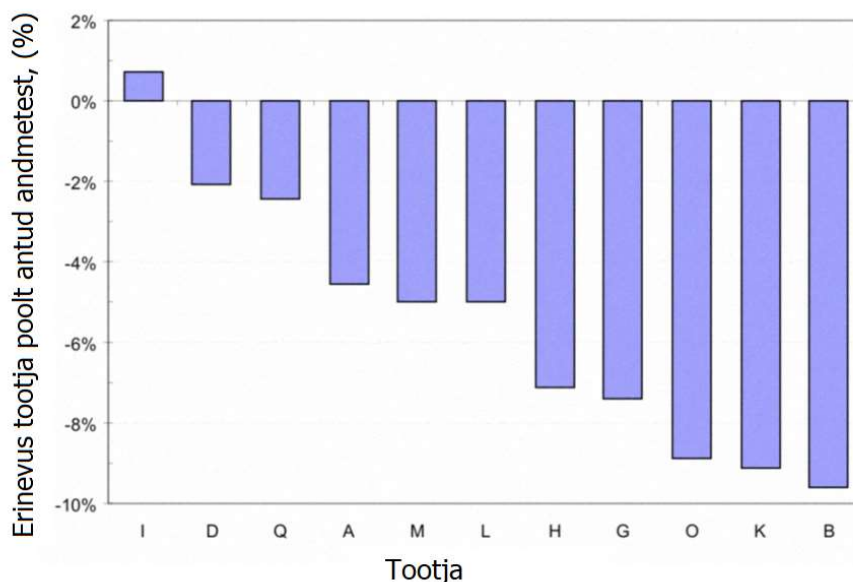
Maale jõuab Päikeselt aastas energiahulk suurusega  $1,8 \times 10^{17}$  W/aastas, mis ületab ligi tuhande kordselt globaalse primaarenergia vajaduse [2]. Sellest tulenevalt loetakse päikeseenergiat üheks parima saadavusega taastuenergia allikaks ning päikeseenergiat põhinevaid tehnoloogiaid arendatakse pidevalt üha tõhusamateks. Kuigi Päikeselt saadav energiahulk on mahukas, ei jaotu see Maakeral ühtlaselt. Selle kohta on toodud illustreeriv joonis allpool (Joonis 1.1), kus on kirjeldatud globaalne päikesekiirguse jaotumine jaanuaris ja juulis. Päikesekiirgus, mis jõuab päikeseelemendini koosneb kolmest osast: otsesest kiirgusest, hajuskiirgusest ja peegeldunud kiirgusest. Nende komponentide spekter ja suurus olenevad asukohast, kliimast (nt. õhuniiskusest) ja keskkonnast [2].



Joonis 1.1. Globaalne päikesekiirguse jaotumise diagramm päikesepaisteliste tundide järgi a) jaanuaris ja b) juulis. Värvidiagramm näitab protsendilist osakaalu, kus punane - 100% ja sinine - 0%. [2]

Peale keskkonna on päikesepaneelide efektiivsus seotud nende seadmete ehituslike omadustega nagu päikeseelemendi materjal, armatuuri ehitus jms. Efektiivsuse määramine on oluline aspekt

päikesepaneelide analüüsimisel, arendamisel ja ka turustamisel. Enamasti teostatakse päikesepaneelide efektiivsuse uurimisel katseid, mis viiakse läbi laboritingimustes (tootjate poolt). Päikesepaneelide andmete spetsifikatsioonides toodud näitajad, eriti võimsusnäitajad, ei ole tihtipeale vastavuses reaalse väljundvõimsusega, mida need seadmed praktilistes kasutustingimustes väljastavad. Näitena võib siinkohal tuua Ameerika Ühendriikides tehtud uuringu tulemused, mille graafikul (Joonis 1.2) on kujutatud erinevate päikesepaneelide tootjate tegelike väljundvõimsuste erinevused tootespetsifikatsioonides toodust. Siit järeldub, et päikesepaneelide tegeliku efektiivsuse hindamiseks vaja läbi viia täiendavaid testimisi praktilistes tingimustes. Käesolevas töös arendataksegi välja päikesepaneelide uurimiseks katseseadmete komplekt ning uuritakse erinevat tüüpi päikesepaneelide efektiivsust praktilistes tingimustes Eestis.



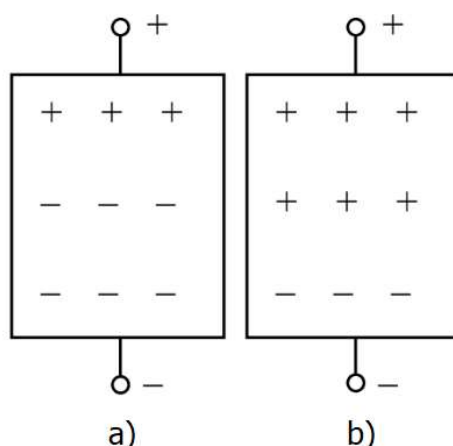
Joonis 1.2. Erinevate päikesepaneelide tootjate võrdlus: tegeliku maksimaalvõimsuse erinevus spetsifikatsioonidest. [3]

## 1.1 Päikesepaneelide tööpõhimõte

Energia muundamise tehnoloogiaid, mis põhinevad päikeseenergial, on mitmeid (sh päikesel põhinevad soojuselektrijaamad, päikese basseinid, päikesekollektorid jm). Käesoleva töö raames vaadeldakse fotogalvaanika tehnoloogial (ik *PhotoVoltaic – PV*) põhinevat lahendust, mille puhul päikeseenergia muundatakse elektrienergiaks vahetult materjalis sees. See on võimalik, kasutades pooljuhtmaterjale ehk materjale, mis võivad erinevatel tingimustel olla nii dielektrikud kui ka elektrijuhid. Nende materjalide elektrilised parameetrid, sh fotogalvaanilise efekti tugevus sõltuvad suures osas erinevatest keskkonningimustest, nagu temperatuur, elektrivälja tugevus,

mehaaniline surve, valgustatus jms [4]. Enimkasutatavad pooljuhtmaterjalid on germaanium, räni, seleen, tellur, arseen ja fosfor [5].

Pooljuhte jaotatakse n-tüüpi ja p-tüüpi pooljuhtideks. N-tüüpi pooljuhtide elektrijuhtivus tuleneb liigsetest elektronidest, mis on seda tüüpi materjalis voolukandjad (Joonis 1.3 a). P-tüüpi pooljuhtidel on voolukandjad augud ehk nendes materjalides on liiga vähe elektrone – materjali loetakse positiivseks (Joonis 1.3 b). Kokkuvõtte p- ja n-tüüpi pooljuhtide omadustest on toodud allpool olevas tabelis (Tabel 1.1).



Joonis 1.3. N-tüüpi ja p-tüüpi pooljuhtmaterjalide laengute jagunemine. [6]

Tabel 1.1. P- ja n-tüüpi pooljuhtmaterjalide omadused. [7]

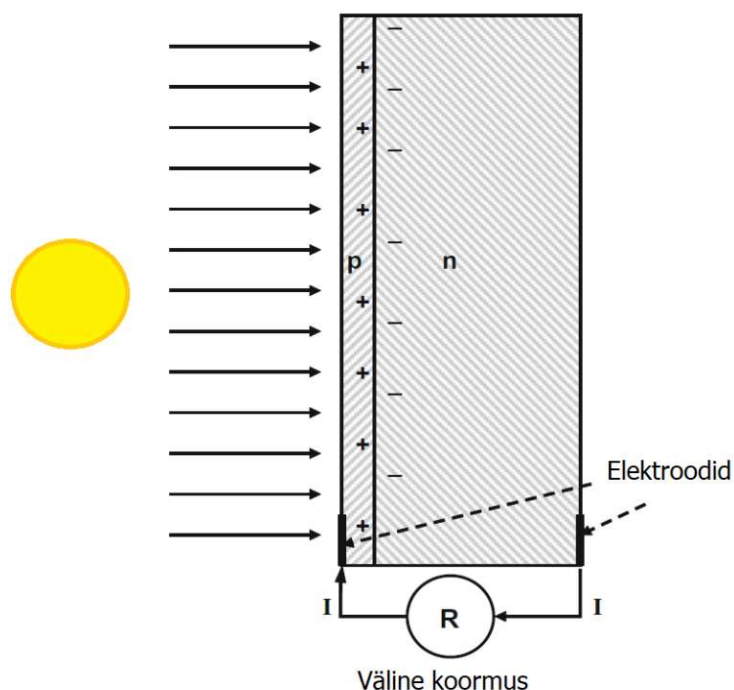
P-tüüpi pooljuhid	N-tüüpi pooljuhid
Suurema osa voolukandjatest moodustavad augud	Suurema osa voolukandjatest moodustavad elektronid
Väiksema osa voolukandjatest moodustavad elektronid	Väiksema osa voolukandjatest moodustavad augud
Nendele pooljuhtidele on lisatud juurde aktseptoreid	Nendele pooljuhtidele on lisatud juurde doonoreid
Fermi nivoo <sup>1</sup> paikneb valentstsooni lähedal	Fermi nivoo paikneb juhtivusstsooni lähedal

PV-paneelides kasutatakse energia muundamiseks selliseid materjale, milles n-tüüpi ja p-tüüpi pooljuhid on kihtidena ühendatud pn-siirdeks. Kihtide vahel tekib paratamatu sisemiste potentsiaalide erinevus, mis tuleneb nende eri juhtivusega kihtide ühenduskohas toimuvatest

<sup>1</sup> Fermi nivoo näitab energiataset kõrgeima ja madalaima hõivatud osakese oleku vahel. Seda terminit kasutatakse elektronide energiataseme kogumise kirjeldamiseks absoluutse nulltemperatuuri korral. [39]

füüsikalistest protsessidest. Sellise pn-siirde moodustavate materjalidega seotud vooluringis tekib elektrivool kuni materjalis tekib tasakaal ehk kuni vabad elektronid on seotud. Kui sellisesse süsteemi lisada energiat, mis põhjustab vabade elektronide tekkimise, jääb pinge erinevate kihtide vahel püsima ning vooluring säilib. PV-paneelide puhul saadakse selline elektrone stimuleeriv energia päikesekiirgusest, so footonite voost.

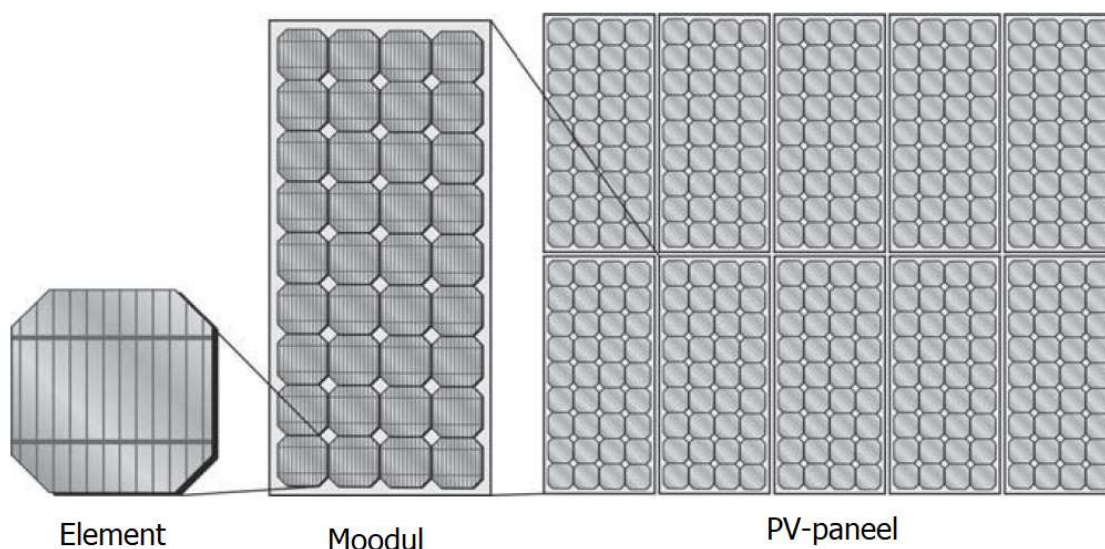
Joonis päikesepaneeli tööpõhimõttest on esitatud allolevalt (Joonis 1.4). PV-paneeli element koosneb väga õhukesest kihist p-tüüpi pooljuhist, mis on ühendatud märkimisväärselt paksema n-tüüpi pooljuhi kihiga. Tüüpiliselt on p-tüüpi-kihi paksus suurusjärgus  $1\ \mu\text{m}$  ja n-tüüpi-kihi paksus  $1000\ \mu\text{m}$ . Sellele langev päikesekiirgus läbib täielikult p-tüüpi-kihi (osaliselt ka n-tüüpi-kihi). Päikesekiirguses olevate footonite mõjul toimub elektronide ergastumine mõlemas kihis. [8]



Joonis 1.4. PV-paneeli elemendi p-n kihid ja elektrivoolu tekkimine. [8]

Praktiliseks kasutamiseks on vajalik teatud suurusega pinge ja voolu väljundvõimsuse saavutamine. Selleks ühendatakse PV-paneeli elemendid mooduliteks, mis omakorda on ühendatud PV-paneeliks selliselt, et oleks saavutatud vajalik väljundvõimsus (Joonis 1.5).

- Kui moodulis on elemendid ühendatud paralleelselt, on võimalik tõsta väljundvoolu.
- Jadamisi ühendamisel tõuseb PV-mooduli väljundpinge.



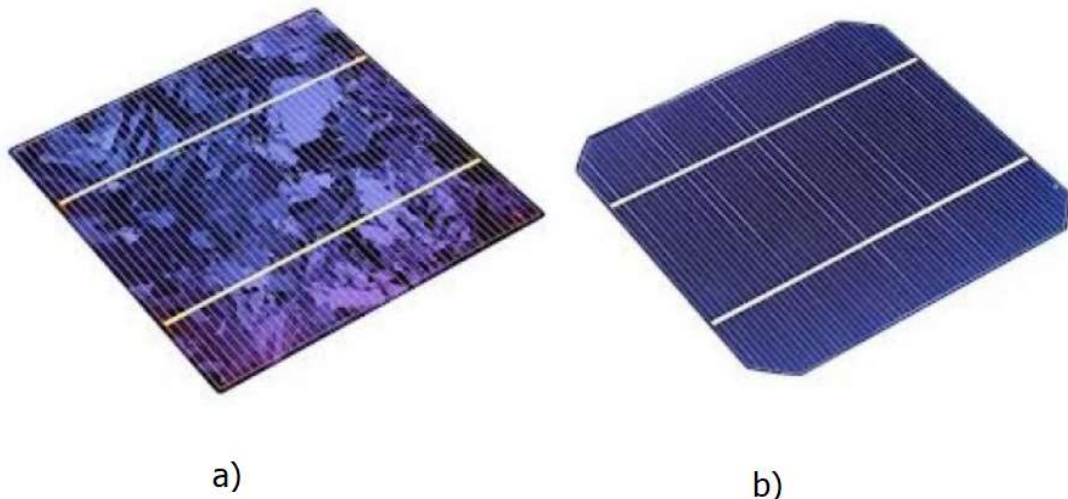
Joonis 1.5. PV-paneeli elementide ühendamise. [2]

## 1.2 Päikeseelementide tehnoloogiad

PV-paneeli elemente klassifitseeritakse kolme generatsiooni.

- Esimese generatsiooni päikeseelementid on suhteliselt kallid ja need on väga madala efektiivsusega.
- Teise generatsiooni omadel on efektiivsus veelgi madalam aga need on palju odavamad, mis tähendab et nende hind toodetud elektrienergia (W) kohta on väiksem. Kolmanda generatsiooni päikesepaneelid on kõrgema efektiivsusega, aga paljud nendest ei ole veel kommertskasutuseks saadaval.
- Kolmanda generatsiooni päikeseelementidega tehakse suurel määral arendus- ja uurimistööd, et nende võimalikku hinda langetada.

Esimese generatsiooni päikeseelementideks loetakse kõige tavapärasemalt kasutusel olevaid räniplaate (Si). Need on populaarsed nende suhteliselt hea efektiivsuse tõttu. Räniplaate jagatakse kahte kategooriasse: monokristallilisteks ja polükristallilisteks räniplaatideks (Joonis 1.6). Monokristallilisi elemente toodetakse ühest suurest räni kristallist Szochralski protsessi abil, mille käigus lõigutakse suur kristall kõrge täpsusega väiksemateks plokkideks. Selliste elementide efektiivsus on ca. 17-18%. Polükristallilised päikeseelementide plaadid koosnevad erinevatest kristallidest, mis on ühendatud üheks suureks plaadiks. Selline tehnoloogia on tunduvalt odavam ja selle tõttu ka hetkel kõige populaarsem, kuid paneelide efektiivsus on madalam (ca. 12-14%). [9] , [10]



Joonis 1.6. Näide polü- (a) ja mono- (b) kristallilistest päikeseelementidest. [11]

Teise generatsiooni päikeseelemendid (Joonis 1.7) on õhukese kilega kaetud elemendid nagu: [10]

- Amorfsed õhukese ränikihiga elemendid (a-Si);
- Õhukese kaadmium-telluur kihiga elemendid (CdTe);
- Õhukese vask-indium-gallium-seleen kihiga elemendid (CIGS).

Amorfsed ränikihiga elemendid on suhteliselt primitiivsed. Nende tootmiseks kasutatakse vähem energiat (tootmisprotsess kasutab väiksemaid temperatuure), mille tõttu on need võrdlemisi odavad ja laialt saadavad. Amorfseks loetakse neid selle pärast, et neil puudub korrapärane kristallstruktuur. Nende efektiivsus jääb vahemikku 4-8%. CdTe kihiga elemendid on ka suhteliselt odavad ja nende efektiivsus on tunduvalt kõrgem (9-11%). Siiski on selliste elementide tootmisel suurem oht keskkonnale (Kaadium on raskemetall) ning lisaks on nende elementide tootmisprotsessist tekkiva räbu taaskasutamine kallid. SIGS elementide efektiivsus on ca 10-12%. [7], [10]

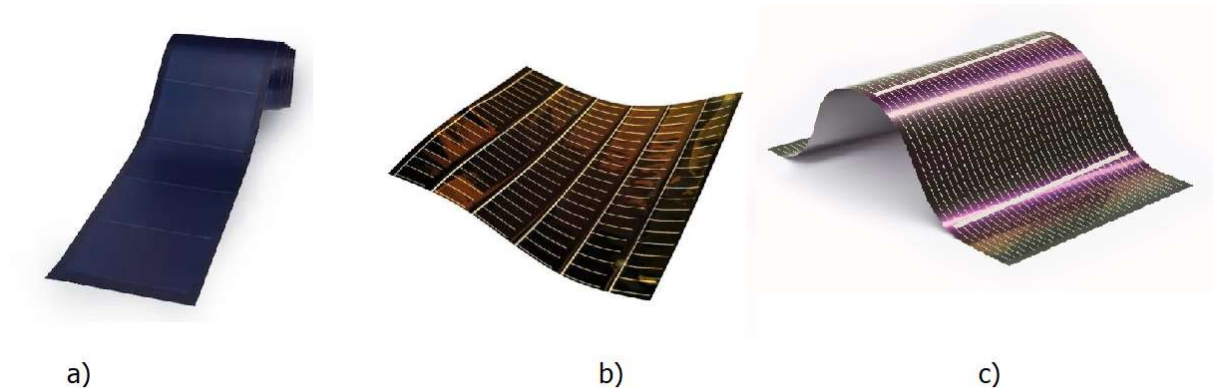
Kolmanda generatsiooni päikeseelemendid jaotatakse [10]:

- nanokristallidel põhinevad elemendid;
- polümeeridel põhinevad elemendid;
- orgaaniliste värvidega sensibiliseeritud elemendid;
- kontsentreeritud tehnoloogiaga elemendid.

Kolmanda generatsiooni tüüpidega välja pakutud päikeseelemendid on praegusel ajal valdavalt arendusjärgus. Kuigi kõrgema efektiivsusega ei ole need tavakasutusel laialdaselt saadaval. [10] Kokkuvõttev diagramm erinevate päikeseelementide tootmiseks kasutatavatest tehnoloogiatest on



toodud allpool (Joonis 1.8). Lisaks on välja toodud ka tabel (Tabel 1.2) erinevate tehnoloogiate võrdlusest.

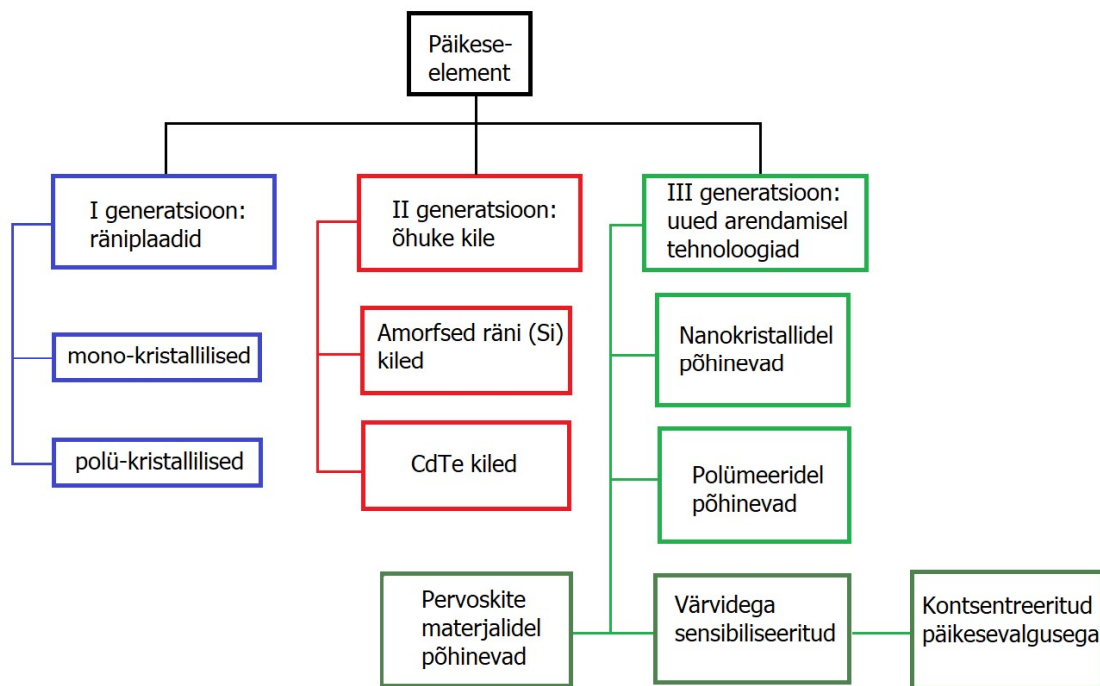


Joonis 1.7. Näide II generatsiooni õhukese kile päikeseelementidest. a - amorfne räni; b - CdTe; c) CIGS. [12], [13], [14]

Tabel 1.2. Erinevate päikeseelementide tehnoloogiate võrdlus. [10]

Tüüp	Energia-muundamise efektiivsus, %	Töö kõrgematel temperatuuridel	Kommentaar
Monokristall	14-17,5	Kehv	Vanim PV-tehnoloogia
Polükristall	12-14	Kehv	Ökonoomiline
CdTe	9-11	Hea	Mürgine
CIGS	10-12	Hea	Saavutatud ka efektiivsus 20%
a-Si	4-8	Hea	Pika paigaldusajaga, vajab suurt ala
Nano-kristall	7-8	Suurepärane	Lühikese paigaldusajaga, vajab suurt ala
Värviga sens.	10	Kehv	Lühikese paigaldusajaga, vajab suurt ala
Polümeer	3-10	Kehv	Lühikese paigaldusajaga, vajab väikest ala
Kontsentreeritud	40	Suurepärane	Pika paigaldusajaga, vajab suurt ala
Pervoskite	31	Suurepärane	Uusim tehnoloogia. Lühikese paigaldusajaga, vajab väikest ala





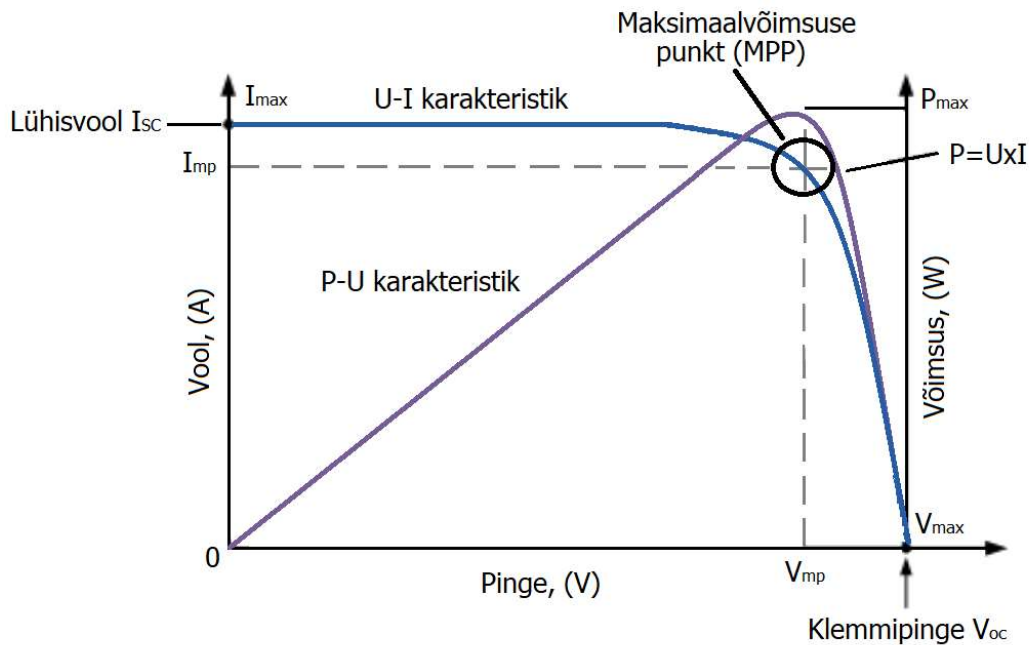
Joonis 1.8. Erinevat tüüpi päikeseelementide tehnoloogiad. [10]

### 1.3 Päikeselementi ja -paneeli iseloomustavad karakteristikud

Päikeseelemendi, -mooduli või -paneeli töö iseloomustamiseks vaadeldakse selle voolu-pinge (I-U) (ja pinge-võimsuse, U-P) karakteristikuid, mis kirjeldavad detailselt selle päikeseenergia muundamise võimekust ja efektiivsust. Selliste karakteristikute teadmine ja uurimine (täpsemalt maksimumvõimsuse leidmine elemendile) on olulise tähtsusega seadme väljundvõimsuse hindamiseks ja üldise efektiivsuse määramiseks. Üldiselt iseloomustavad päikeseelemendivoolu-pinge karakteristikud graafiliselt päikeseelemendi tööd, arvestades selle elemendi väljundvoolu ja –pinge suhet seadme ehitusest ja paigalduskeskkonnast lähtuvalt – elemendile langeva päikesekiirguse intensiivsus mõjutab selle väljundvoolu, temperatuuri muutused aga selle väljundpinget. Praktikas kasutatakse pinge-voolu karakteristikuid PV-paneelide seadistamiseks selliselt, et nende töötamine toimuks kõige optimaalsemal tasemel maksimaalvõimsuse lähedal.

Näide päikeseelemendi pinge-voolu karakteristikutest on toodud allpool (Joonis 1.9). Joonisel on toodud kõige tavalisema ränil põhineva elemendi tööpiirkonnad normaaltingimustel. Elemendi väljundvõimsus on selle väljundpinge ja –voolu korrutis. Kui elemendi klemmid ei ole koormuse külge ühendatud, on selle vool minimaalne (nulli lähedane) ja pinge klemmidel maksimaalne (joonisel  $V_{oc}$ ). Vastupidi, kui elemendi klemmid on lühistatud, on pinge minimaalne aga vool, mis elemendis liigub, maksimaalne (joonisel  $I_{sc}$ ). Need punktid on küll elemendi võimalikud suurimad pinge ja voolu tööpunktid, kuid realselt nendes punktides võimsuse väljastamist ei toimu. Nende

punktide vahele jääv ala on aga elemendi tööpiirkonnad, kus on võimalik võimsuse edastamine süsteemist välja. Elemendil on aga üks tööpunkt, mille puhul elemendi väljundvõimsus on maksimaalne (MPP – *Maximum Power Point*). Selles tööpunktis on elemendi ideaalne tööpiirkond, mis on kõige efektiivsem.

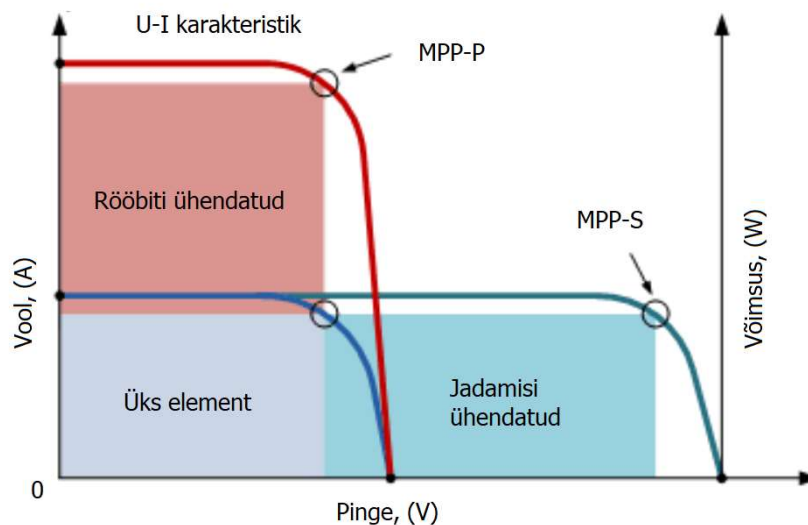


Joonis 1.9. Päikeseelemendi pingevoolu ja pingevõimsuse karakteristikute illustatsioon. [15]

Päikeseelemendid võib moodulisse ühendada erinevat viisi: jadamisi ja/või rööbiti. Ühendusviisist sõltub mooduli väljundvoolu ja –pinge väärtus. Elementide ühendamisel jadamisi suureneb mooduli väljundpinge, rööbiti ühendamisel aga väljundvool. Mooduli maksimaalne väljundvõimsus sõltub elementide karakteristikute kumuleerivatest kurvidest. Selle illustreerimiseks on toodud joonis allpool (Joonis 1.10). Joonisel on näha ühendusviisist sõltuvalt maksimaalse võimsuspunkti asukoht nii jada- kui rööpühenduse korral (vastavalt MPP-S ja MPP-P).

Elementide karakteristikute määramine katseliselt aitab hinnata erinevate tegurite mõju selle efektiivsusele. Praktikas kasutatakse neid päikeselektriijaamade seadistamiseks maksimaalse võimsuspunkti jälgimiseks<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Nt. kasutatakse seadmetel, mis võimaldavad moodulite liikumist armatuuril päikese järgimiseks, mille eesmärk on päikese kiirguse osakaalu suurendamine mooduli pinnal.



Joonis 1.10. Päikeseelementide pingevoolu karakteristikud erinevate ühenduste korral. MPP-P - Maksimaalne võimsus rööbiti ühendatud elementide korral; MPP-S - Maksimaalne võimsus jadamisi ühendatud elementide korral. [15]

### 1.3.1 Parameetrid päikeseelemendi ja –paneeli iseloomustamiseks

Päikeseelementide ja –paneelide iseloomustamiseks on kasutusel erinevad parameetrid, mis kirjeldavad selliste seadmete elektrilist tööd ja energia muundamise efektiivsust. Päikesepaneeli klemmipinge tühijooksul  $U_{OC}$  (*Open Circuit Voltage*) on elemendi (paneeli) võimalik maksimaalne pinge klemmidel kui seade ei ole ühendatud koormusega (tühijooksu talitus). Paneeli klemmipinge sõltub paneelis jadamisi ühendatud moodulite/elementide arvust. Lühisvool  $I_{SC}$  (*Short-Circuit Current*) on elementi (paneeli) läbiv maksimaalne vool kui seadme klemmid on lühistatud. Maksimaalvõimsuse punkt MPP (*Maximum Power Point*) on elemendi (paneeli) tööpunkt, mille puhul koormusega ühendatud süsteemis on elemendi väljundvõimsus kõige suurem.

Täitetegur FF (*Fill Factor*) näitab päikeseelemendi või paneeli maksimumvõimsuse suhet selle tühijooksu klemmipinge ja lühisvoolu korrutisse kindlal ionisatsioonitasemel ja päikeseelemendi temperatuuril. FF avaldub [16], [17]:

$$FF = \frac{I_{mp} * U_{mp}}{I_{SC} * U_{OC}} = \frac{P_{max}}{U_{OC} * I_{SC}} \quad (1.1)$$

- kus  $P_{max}$  – päikesepaneeli või –elemendi maksimaalne võimsus, [W];  
 $U_{OC}$  – päikesepaneeli või –elemendi tühijooksu klemmipinge, [V];  
 $I_{SC}$  – päikesepaneeli või –elemendi lühisvool, [A];  
 $I_{mp}$  – päikesepaneeli või –elemendi maksimaalne kasulik vool, [A];

$U_{mp}$  – päikesepaneeli või –elemendi maksimaalne kasulik pinge, [V].

Täitetegur sõltub elemendi pinge-voolu karakteristikust. See parameeter näitab ära elemendi maksimaalse võimsuspunkti ja avaldab suurt mõju elemendi teoreetilisele energia muundamise efektiivsusele. Kõrge FF korral on võimalik elemendist eraldada elektrone kõrgemal pingel lühisvoolu näitajale lähedasel tasemel [18]. Praktikas on FF alla ühe, tavaliselt 0,7-0,8 s.ü vahel [15]. Päikesepaneeli või –elemendi fotogalvaaniline efektiivsus on selle maksimumvõimsuse suhe paneeli (või elemendi) pinnale langeva päikesekiirguse suhtes. Päikesepaneeli efektiivsus langeb päikesekiirguse alanemisega (nt õhtutundidel) ja temperatuuri kasvamisel. See avaldub [17]:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_Z} \quad (1.2)$$

Kus  $P_{max}$  – Päikesepaneeli või –elemendi maksimaalne võimsus, [W];

$G$  – Päikesepaneelile või –elemendile langev kiirgustihedus, [W/m<sup>2</sup>];

$A_Z$  – päikeseelemendi pindala, [m<sup>2</sup>].

Energia muundamise efektiivsus päikeseelemendil avaldub [16], [7]:

$$\eta_P = \frac{\text{väljundvõimsus}}{\text{sisendvõimsus}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_0} = \frac{I_{sc} \cdot U_{OC} \cdot FF}{P_0} \quad (1.3)$$

Kus  $FF$  – Päikesepaneeli või –elemendi täitetegur, [s.ü];

$P_0$  – Päikesepaneeli või –elemendi kasulik võimsus elemendi pindala pealt, [W].

Temperatuuri mõju arvestatakse valemi abil [19]:

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \alpha_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (1.4)$$

kus  $\eta_c$  – efektiivsus, [s.ü];

$\eta_{ref}$  – referents efektiivsus standardsete testimise tingimuste (STC) alusel, [s.ü];

$\alpha_{ref}$  – temperatuuritegur, tootja poolt ette antud, [s.ü];

$T_c$  – päikesepaneeli või –elemendi töötemperatuur, [°];

$T_{ref}$  – päikesepaneeli või –elemendi referents temperatuur standardsete testimise tingimuste (STC) alusel, [°].

## 1.4 Päikeseelementide efektiivsus ja seda mõjutavad tegurid

Päikesepaneelide tööd mõjutavaid tegureid saab suuremas perspektiivis jagada kaheks. Esimene neist on seotud päikesepaneelile langeva valguskiirgusega, teine aga päikesepaneelide

konstruktsiooniliste omadustega, näiteks päikeseelemendis kasutatavad materjalid, päikeseelementide omavaheline ühendamine, päikeseelemendi tootmisprotsess jpm.

Päikesepaneelide kasutuseesmärgist lähtuvalt arendatakse erinevaid PV-paneele Maakeral ja kosmoses kasutamiseks. Nende töökeskkond on päikesekiirguse suhtes oluliselt erinev. Maakerale jõudev päikesekiirgus on väga harva üle 1000 W/m<sup>2</sup> kohta, sest seda mõjutavad mitmed erinevad tegurid [20]:

- Atmosfäärist tingitud mõjud:
  - Osa kiirgusest imendub atmosfääris olevates gaasides;
  - Osa kiirgusest imendub ja peegeldub atmosfääris olevatelt (tolmu-) osakestelt;
  - Osa kiirgusest hajub atmosfääris olevate molekulide tõttu.
- Keskkonna mõjud:
  - PV-paneeli orientatsioon ja kalle päikesekiirguse suhtes;
  - PV-paneeli asukoha laiuskraad ja keskkonna saastatus;
  - Aastaaeg ja kellaaeg;
  - Pilvisus ja pilvisuse tüüp.

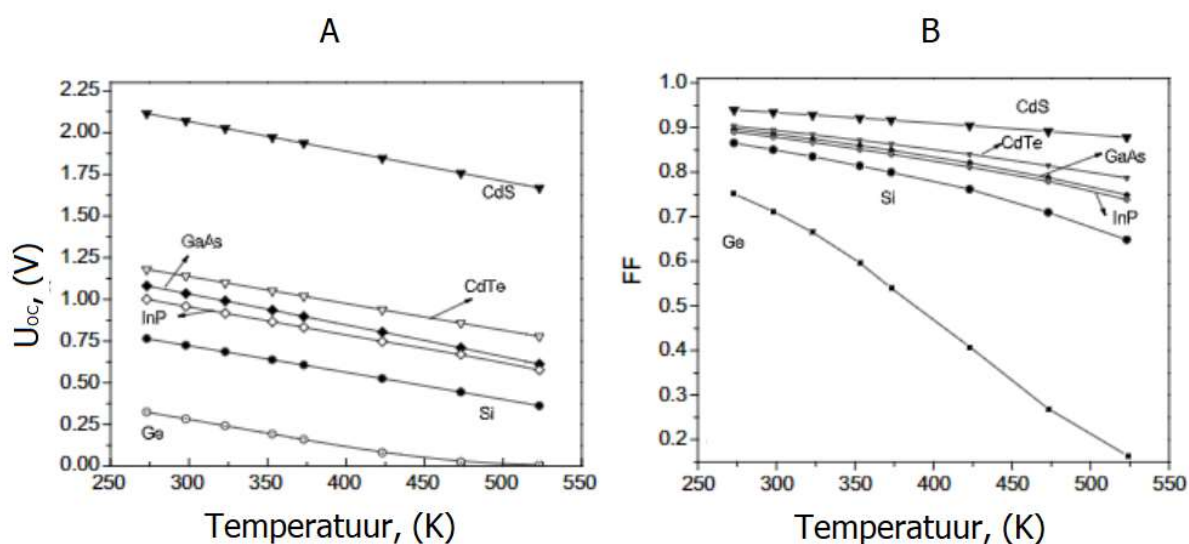
Eelnimetatud mõjutegureid ei saa olulisel hulgal praktiliselt muuta, sest need on ennekõike seotud keskkonna tingimuste ja installeeritud PV-paneeli asukohaga. Küll aga saab arvestada ja muuta tegureid, mis on seotud PV-paneelide ehituslike omapäradega. Arvestades nende seadmete ehitust, saab öelda, et efektiivseks PV energia konverteerimiseks peab PV-paneelis toimuma neli protsessi samaaegselt [7]:

- Footonite imendumine sobivas pooljuhtmaterjalis;
- Voolukandjate (elektron-aukude paaride) tekkimine aatomite vaheliste sidemete lõhestamise teel;
- Vastupidiste märkidega voolukandjate eraldamine enne nende rekombinatsiooni;
- Voolukandjate kogumine ja juhtimine läbi elektriliste ühenduste välise koormuseni kasuliku elektrivoolu tekkimiseks.

Kasvõi ühe protsessi puudumisel või selle takistamisel langeb PV-paneeli efektiivsus. Selle tõttu saab jagada PV-paneelide alase arendustöö suures pildis kaheks: päikesekiirgust imendavate ja vabade laengukandjate tekkimist hõlbustavate materjalide arendamine ja uurimine; seadmete arendamine, mis võimaldab laengukandjate kogumist ja liigutamist süsteemist välja ehk välisesse vooluringi.

### 1.4.1 Päikeseelementide efektiivsuse sõltuvus temperatuurist

Päikeseelementide võimekust toota elektrienergiat on kõige rohkem seotud päikesekiirguse ja temperatuuriga. Kõige parem tootlikkus saavutatakse temperatuuri madaldamise ja päikesekiirguse tõstmisega [21]. Päikeseelemendi talitluse temperatuur mängib olulist rolli fotogalvaanilise energia muundamise protsessi tõhususes, mis on peamiselt seotud materjali sees toimuvate osakeste rekombinatsiooniga. Kirjanduse [19] kohaselt on päikesepaneeli elektriline efektiivsus ja väljundvõimsus lineaarses sõltuvuses elemendi töötemperatuuriga. Temperatuuri tõustes vähenevad elemendi täitetegur FF ja efektiivsus, mille tunnuseks on elemendi tühijooksu klemmpinge  $V_{oc}$  langemine. Seda illustreerib joonis (Joonis 1.11), kus on näha kirjanduses [22] toodud testide tulemused erineva tehnoloogia elementide sõltuvuse uurimiseks temperatuurist.



Joonis 1.11. Temperatuuri mõju erinevat tüüpi päikeseelementide tühijooksu klemmpingele (A) ja täitetegurile (B). [22]

Päikesepaneeli moodulite töötemperatuuri alandamiseks lisatakse neile juurde spetsiaalsed jahutussüsteemid [23]. Praktikas kasutatakse neid ainult kontsentreeritud valguskiirgusega päikesepaneelidel, sest jahutussüsteemi lisamine teeb päikesepaneeli hinna oluliselt kõrgemaks. Teiste tehnoloogiate puhul arvestatakse keskkonnast tuleneva loomuliku jahutusega (tuul).

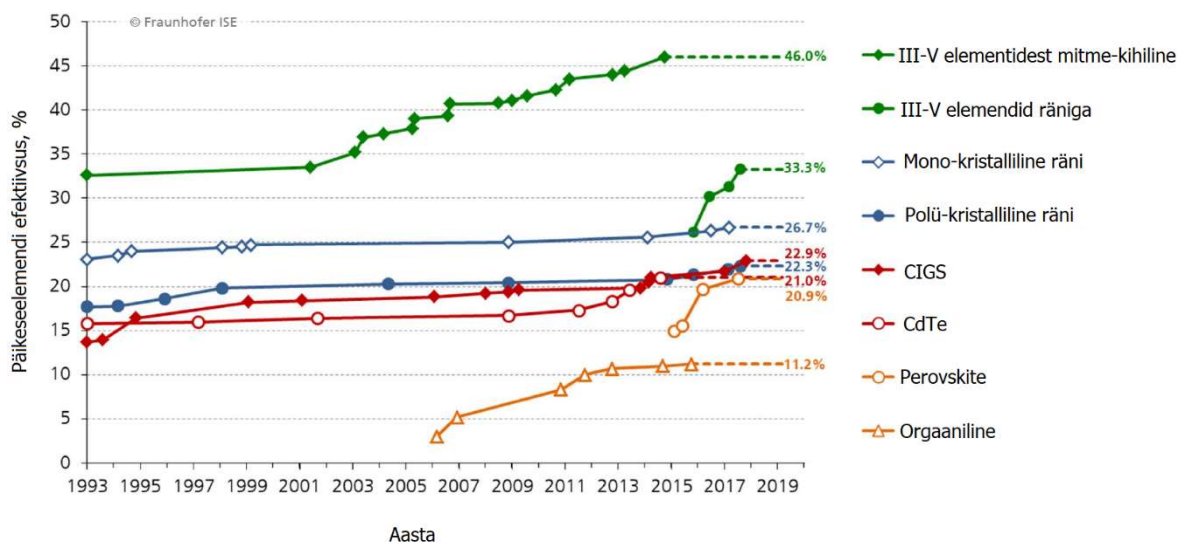
## 1.4.2 Erinevate päikeseelementide tehnoloogiate efektiivsused

Erinevate materjalidega päikeseelementide efektiivsus on toodud allpool (Tabel 1.3), kus on näha labori tingimustes teostatud testimiste tulemusi (AM1,5<sup>1</sup>; valguskiirgus 1000 W/m<sup>2</sup>, õhutemperatuur 25°C). Need andmed pärinevad kirjandusest [2] 2016. aasta andmete põhjal. Erinevate tehnoloogiate efektiivsuse arengut illustreerib kirjandusest [24] toodud joonis (Joonis 1.12), kus on näha laboritingimustes saavutatud päikeseelementide efektiivsus aastatel 1993-2019. Jooniselt on näha, et viimaste aastate teadustöö põhjal on suudetud leida uusi materjale, mille energia muundamise efektiivsus ulatub isegi 46%-ni (III generatsiooni elemendid kihtidena paigutatud erinevatest materjalidest). Samas on traditsioonilistel (kõige enam kasutusel olevatel) ränil põhinevate elementide areng olnud suhteliselt stabiilne, efektiivsust on suudetud tõsta ca 5% (polükristallilise räni puhul 17%-lt 22,3%-i).

Tabel 1.3. Erinevate päikeseelementide efektiivsus laboritingimustes. [2]

Materjal/Tüüp	Efektiivsus, (%)	Voc, (V)	j <sub>sc</sub> , (mA/cm <sup>2</sup> )	FF, (%)
Si (kristall)	25,6±0,5	0,740	41,8	82,7
Si (polükristall)	20,8±0,6	0,6626	39,03	80,3
Si (amorfne)	10,2±0,3	0,896	16,36	69,8
GaAs (kristall)	25,9±0,8	1,038	29,4	84,7
GaAs (õhukese kilena)	28,8±0,9	1,122	29,68	86,5
GaAs (polükristall)	18,4±0,5	0,994	23,2	79,7
2J (GaInP/GaAs)	30,3	2,488	14,22	85,6
3J (GaInP/GaAs/Ge)	32,0±1,5	2,622	14,4	85,0
3J (GaInP/GaAs/InGaAs)	37,9±1,2	3,065	14,27	86,7
3J (kontsentreeritud)	40,7±2,4	2,911	3832	87,5
4J (kontsentreeritud)	46,0±2,2	4,227	6498	85,1
CIGS	20,5±0,6	0,752	35,3	77,2
CdTe	21,0±0,4	0,876	30,25	79,4
Värvidega sensibiliseeritud	11,9±0,4	0,793	19,4	71,4
Orgaaniline (õhukese kilena)	11,0±0,3	0,793	19,4	71,4

<sup>1</sup> AM – “Air Mass” ehk õhumass, millega arvestatakse atmosfääri läbinud päikesevalgusega seonduvat valgusspektrit. AM0 tähendab päikesevalguse spektraalset kiirgusintensiivsust väljaspool Maa atmosfääri, kui Maa ja päikese vaheline kaugus on üks astronoomiline ühik. [38]



Joonis 1.12. Erinevate tehnoloogiate areng aastatel 1993-2019. [24]

## 1.5 Standardid ja päikesepaneelide testimine

Päikesepaneelide testimiseks on laialdaselt kasutusel kahte tüüpi testid. Esimene neist kontrollib päikesepaneelide vastavust miinimumnõuetele nende tavakasutamisel. Selliste testide eesmärgiks on analüüsida päikesepaneelide komponentide sobivust, paneelide funktsionaalsust ja ohutust standardite ja normide nõuetest lähtuvalt. Teist tüüpi testid võimaldavad hinnata päikesepaneelide kvaliteeti kõrgemal tasemel ning koostada erinevate päikesepaneeli tehnoloogiate detailsem võrdlus.

Üks olulisemaid päikesepaneeli testprotseduure on IEC sertifikaadile vastavuse kontroll. See näitab seadmete vastavust ohutusele, võimaldab hinnata kvaliteeti ja vastupidavust. Selle meetodi puhul rakendatakse päikesepaneelile erineva tasemega koormusi, mis on defineeritud IEC standardites ja on aluseks nende seadmete lubamisele turule. Peale selle analüüsitakse nimetatud testprotseduuridega välistegurite mõju, näiteks uuritakse erinevate keskkonnatingimuste (niiskus, temperatuur, päikesekiirguse intensiivsus) mõju päikesepaneeli väljundile. Testide eduka läbimise eelduseks on, et seadmete töötamisel ei esine olulisi muutusi, ei teki mehhaanilisi vigastusi ning ei täheldata märkimisväärset efektiivsuse langust erinevates keskkonnatingimustes.

Kuigi IEC standardeid erinevate aspektide määramiseks on palju, saab päikesepaneelide tootlikkuse hindamiseks kasutada IEC 61853 seeria standardeid. Eelnimetatud seeria on jagatud nelja ossa. Esimene nendest (IEC 61853-1:2011 [25]) kirjeldab nõudeid päikesepaneelide jõudluse hindamiseks võimsuse järgi erineva kiirguse ja temperatuuri vahemikus. Teine (IEC 61853-2:2016 [26]) defineerib mõõtmiste meetodika kiirgusintensiivsuse kaldenurga mõju mõõtmiseks seadme väljundvõimsusele, määrab mooduli töötemperatuuri kindlates keskkonna- ja paigaldustingimustes



ning mõõdab mooduli spektraalset tundlikkust. Kolmas standard (IEC61853-3:2018 [27]) kirjeldab päikesepaneeli mooduli energiaväärtuse arvutamist. Sellega määratletakse meetodika väljundvõimsuse (Wh) ja kliimaspetsiifiliste energiaväärtuse määramiseks kogu aastaks maksimaalse võimsuse töö korral võrdlusprofiili korral. Neljas standard (IEC 61853-4:2018 [28]) kirjeldab standardset kliimaprofiili, mida kasutatakse energiareitingute arvutamiseks.

Üheks testimise tüübiks päikesepaneelides on testid standardtingimustel (*Standard Test Conditions* – *STC* testid) [25], [29]. Need võimaldavad erinevate päikesepaneeli tehnoloogiate võrdlust ja hindamist väljundvõimsuse, -voolu ja –pinge suhtes samadel tingimustel. Testimise standardtingimused näevad ette päikesekiirguseks  $1000 \text{ W/m}^2$  ning mooduli temperatuuriks  $25^\circ\text{C}$  õhumassi koefitsiendiga (AM) 1,5 [25]. Enamasti teostatakse nendel tingimustel teste laboritingimustes.

Peale STC kasutatakse päikesepaneelide hindamiseks protseduuri nende normaaltalitluse temperatuuri määramiseks (*Normal Operating Cell Temperature* – NOCT test) [25]. See on kasutusel päikesepaneeli mooduli materjali ning soojuse eraldumise hindamiseks väliskeskkonda. NOCT testi tingimusteks loetakse:

- Tuulekiirus  $1 \text{ m/s}$ ;
- Päikesekiirgus  $800 \text{ W/m}^2$ ;
- Õhumass (AM) 1,5;
- Õhutemperatuur  $20^\circ\text{C}$ ;
- Pinget mõõdetakse tühijooksu talitluses ilma koormuseta.

## 2. KATSESEADMETE EHITUS

Käesolev peatükk annab ülevaate testimiseks vajalike katseseadmete arendamisest. Kirjeldatakse prototüübi disaini, elektrilisi ühendusi ning juhtimisloogikat. Lõputöö raames koostati neli identset katseseadet, mis võimaldab eri tüüpi päikesepaneeli mooduleid testida võrdsetel tingimustel samaaegselt, mis on oluline analüüsi tulemuste usaldusväärsuse suurendamiseks. Lisaks kirjeldatakse testskeemi kokkupanekut ja juhtimisloogikat.

Lõputöö eesmärgiks on arendada Tallinna Tehnikaülikoolile lihtne aga efektiivne teisaldatav katsestend erinevate päikeseelementide testimiseks. Katseseadmete ühendamisel ja juhtimisel on kasutatud mikrokontrolleritel põhinevat loogikat, mis sai inspiratsiooni kirjanduses [30] toodud süsteemist, kus kiireks PV-paneeli karakteristikute määramiseks kasutatakse Arduino kontrollerit. Käesoleva lõputöö raames on seda edasi arendatud ning tulemusena töötati välja kompleksne nelja katseseadmega süsteem selliselt, et seadmed:

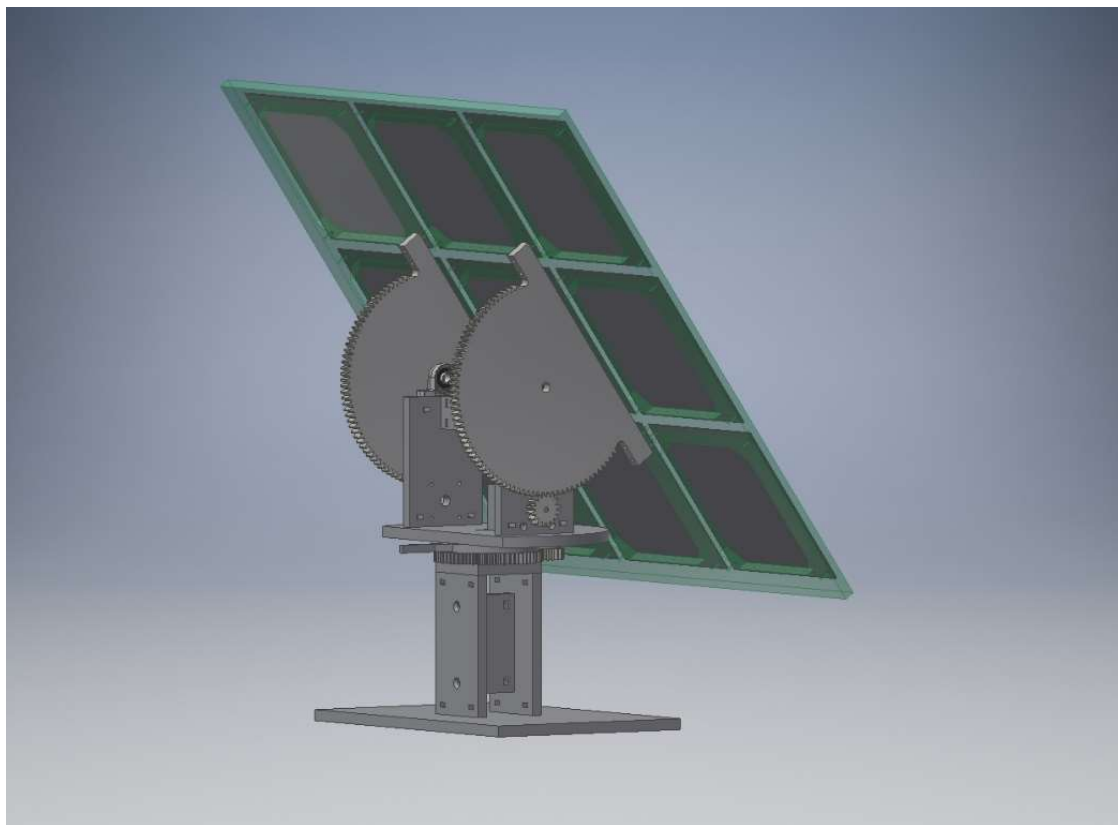
- on praktilistes mõõtudes ja kerged ning kiiresti teisaldatavad;
- on lihtsasti lahtivõetavad ja kokku pandavad;
- armatuuri materjal on odav samas aga vastupidav ja tugev;
- nende elektrilised elemendid on kiiresti ja lihtsalt vahetatavad;
- võimalik on testitavate päikeseelementide vahetus;
- seadmete juhtimisloogikast lähtuvalt on neid võimalik kasutada eraldiseisvana või samaaegselt sünkroniseeritud liikumistega;
- kuluvad elemendid on võimalik kiiresti välja vahetada uute 3D-prinditud osade vastu.

### 2.1 Katseseadme prototüüp

Lõputöö raames projekteeriti polümetüülmetakrülaadist (PMMA, tuntud ka kui pleksiklaas) katsestend. Akrüülklaas on suurepärase optiliste ja mehaaniliste omadustega ning hea vastupanuga UV-kiirgusele ning ilmastikule. Eelisteks on veel on materjali väike erikaal, hea läbipaistvus ja töötlemise lihtsus. PMMA-le on iseloomulik kõrge mehaaniline vastupidavus ja tõmbetugevus, suur mehaaniline jäikus, väga hea läbipaistvus, hea termiline stabiilsus, head isoleerimise omadused ning väga hea vastupidavus väliskeskkonnas (nii ilmastikutingimustele kui ka UV-kiirgusele) [31]. Materjal valiti eelkõige arvestades selle hinda, kaalu ja tugevust.

Katsestend võimaldab liigutada päikeseelementidest koosnevat moodulit nii vertikaal- kui horisontaaltelje suhtes. Projekteerimisel arvestati vajadusega katsestendi lihtsaks liigutamiseks, kokkupanemiseks ja lahtivõtmiseks. Seega projekteeriti raami elementidesse vajalikud mutrite ja poltide sisselõiked, mis teostati laserlõikusega projekti jooniste alusel. Mooduli liikumine lahendati

kahe samm-mootoriga, mis liigutavad hammasrataste abil vajalikke osi neljas suunas. Prototüübi raami disain on näha alloleval joonisel (Joonis 2.1). Prototüübi osade joonised on toodud täis mahus käesoleva töö lisades (Lisa L1. Prototüübi joonised). Projekteerimiseks ning jooniste vormistamiseks kasutati Autodesk Inventor 3D-joonestustarkvara.

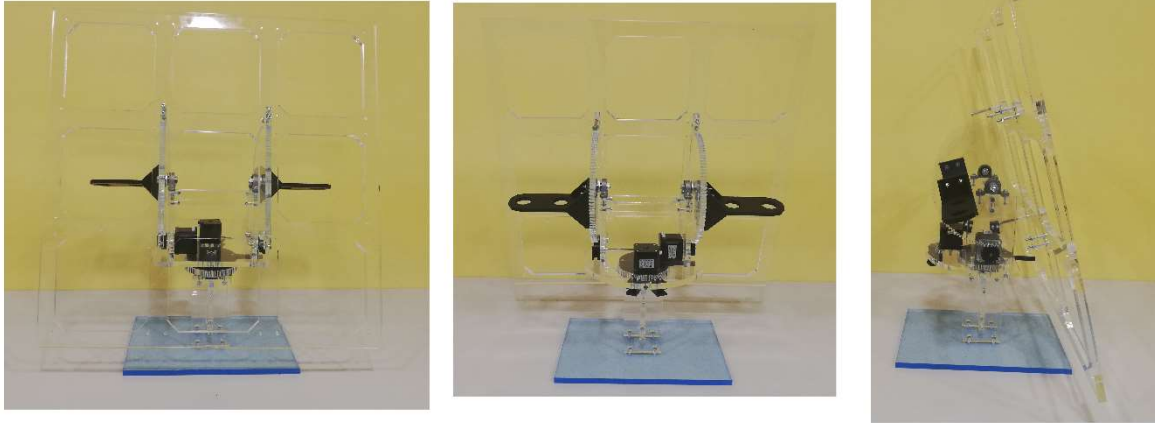


Joonis 2.1. Prototüübi disain

Prototüübi arendamisel arvestati vajaliku funktsionaalsusega päikese nõ järgimiseks, mis samuti võimaldaks automaatselt leida kõige parema tööpunkti (MPP järgimine). Kirjanduse [32] põhjal on kõige efektiivsemaks päikesekiirguse järgimiseks kahe-teljeline järgimissüsteem, mille korral on võimalik moodulit liigutada nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt. Seega arendati prototüübile kahe-teljeline mootoriga mehhanism, mis suudab pöörata  $320^\circ$  horisontaalteljes ja  $160^\circ$  vertikaaltelje suhtes. Mootorite turvaliseks juhtimiseks lisati prototüübile spetsiaalsed lõpulülitid pöördumisasendite lõppkohtade saavutamise tuvastamiseks.

Prototüübi arendamisel kerkis esile probleem päikeseelementidest koosneva mooduli pööramise ümber horisontaaltelje, mis tulenes kasutatud samm-mootorite võimekuse puudujäägist. Teatud asenditest ei suutnud prototüüp vajalikke liigutusi teostada. Selle lahendamiseks projekteeriti mootoritele rakenduvasse jõu-õlga nõ tasakaalustuselement (Lisa L1.19. Tasakaalustus detail). Eelnimetatud detaili eesmärk on kompenseerida mooduli raskust horisontaalse pöörlemistelje suhtes. See on projekteeritud selliselt, et vastavalt vajadusele on võimalik tasakaalustuseks

kasutatavat vasturaskust muuta ja valida. Detaili valmistamiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli 3D-printerit. Käesoleva töö raames kasutati tasakaalustavaks vasturaskuseks suure diameetriga polte. Prototüübi reaalne kuju on toodud alloleval joonisel (Joonis 2.2).



Joonis 2.2. Pilt prototüübi eest-, tagumisest ja külgvaatest.

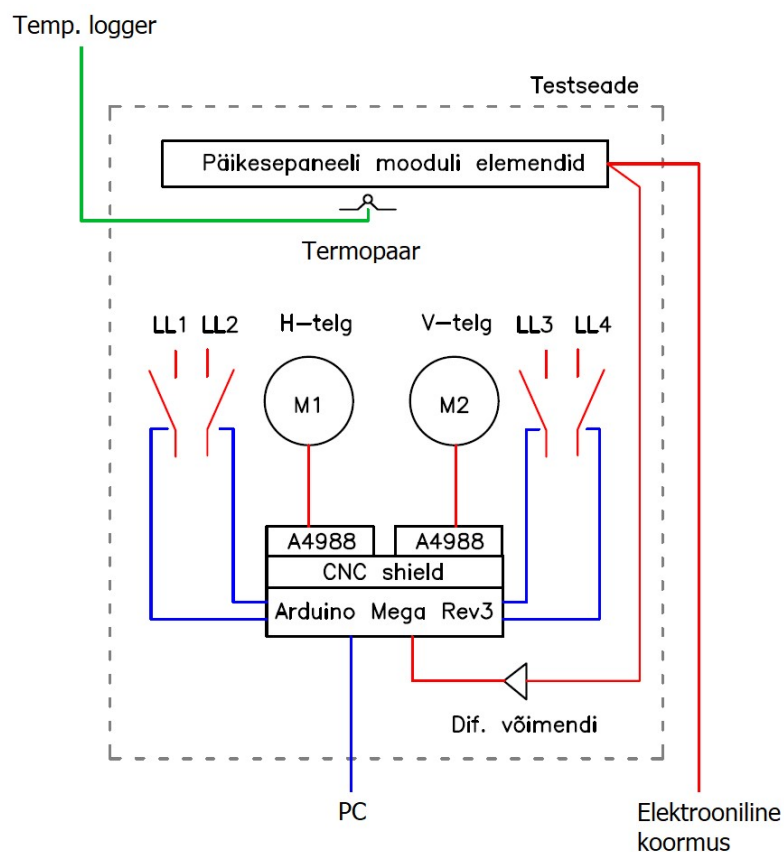
## 2.2 Katseseadme elektri- ja automaatikaskeem

Ühe katseseadme elektriskeem koosneb

- kahest samm-mootorist (vastavalt horisontaal- ja vertikaaltelgede jaoks)
- nimetatud mootorite draiveritest,
- Arduino arendusplatvormile kohaldatud mootori draiverite aluseks olevast nn. CNC-juhtimisplaadist (Joonis 2.3).
- lõpulülititest,
- diferentsiaalvõimendist pinge mõõtmiseks,
- Arduino mikrokontrolleri arendusplatvormist ja

Kokkuvõtte kõikide kasutatud komponentide kohta on toodud allpool tabelis 2.1,

kus on kirjeldatud lühidalt ka nende seadmete eesmärgid. Täielik mikrokontrolleri ühendusskeem on toodud käesoleva töö lisa (Lisa L2.1. Katseseadme mikrokontroller).



Joonis 2.3. Katseseadme elektri- ja automaatikühenduste struktuurskeem.

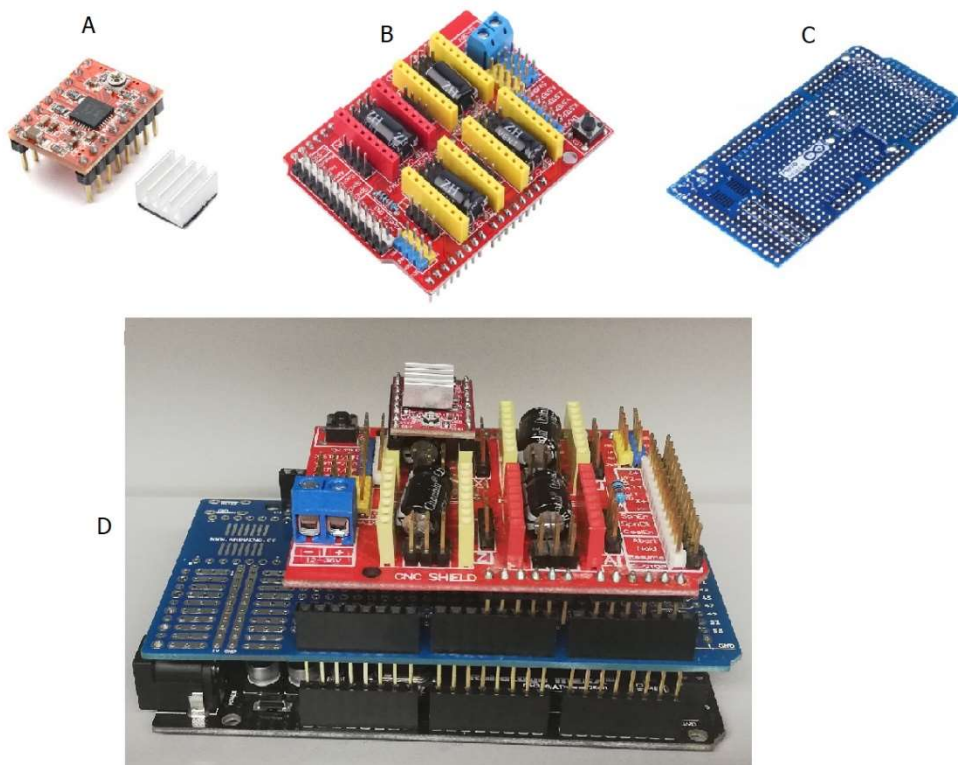
Katseseadmete liikumist horisontaal- ja vertikaalteljes teostatakse kahe NEMA17 suurusega samm-mootoriga (2,5...3 V), mida juhitakse draiverite A4988 (Joonis 2.4 A) abil. Draiverite ja mootorite valik tehti nende kättesaadavuse ja kasutuslihtsuse põhjal. Mootorid on väikesed, aga suudavad projekteeritud katseseadmeid liigutada sujuvalt. A4988 draiverid on ehitatud kiireks ja lihtsaks tööks, vajades ainult kahte signaali, mille abil juhitakse mootori liikumissuunda ja liikumissammu pikkust. Lisaks on nendele seadmetele juba lisatud potentsiomeeter (võimaldab muuta draiveri väljundvoolu piirangut), temperatuuri põhine väljalülitumine (ülekuumenemise korral) ja liigvoolu kaitse. Draiverite kasutamiseks on need ühendatud spetsiaalse CNC GRBL laiendusplaadile (Joonis 2.4 B), mis on spetsiaalselt väljatöötatud samm-mootorite juhtimiseks Arduino baasil. Lõpulülite mugavaks lisamiseks ja kasutamiseks Arduino sisenditena ning eelnevate komponentide ruumisäästvaks ühendamiseks on kasutati spetsiaalset Arduino vaheplaati (Joonis 2.4 C), mis kujutab endast tühja trükkplaati, mida saab vastavalt soovidele modifitseerida. Terve katseseadme juhtimiskomplekti väljanägemine on toodud allpool oleval joonisel (Joonis 2.4 D).

Samm-mootorid on lihtsad mootorid, mis suudavad liigutada oma võlli kahtepidi vastavalt juhtimisele. Katseseadmete ja ka inimeste ohutuseks on paigaldatud skeemile nō lõpulülid. Valitud lõpulülid on tavalised rullikuga mikrolülid, mida on iga katseseadme skeemi paigaldatud

neli tükki. Nende eesmärk on katseseadme mooduli pööramisele anda signaal, et katseseade on jõudnud vastaval teljel oma lõppasendisse, misjärel peatatakse mootorite töö vastavas suunas platvormi liigutamiseks.

Tabel 2.1. Katseseadme osad.

Seade	Kogus	Eesmärk
Samm-mootor Hanpose 2,5-3,0 V	2 tk	Mooduli liigutamine
Lõpulüliti	4 tk	Mooduli liikumise ohutuse tagamine
Draiver A4988 5 V	2 tk	Samm-mootorite töö juhtimine
CNC Shield	1 tk	Samm-mootorite juhtimissignaali kontrollimine ja signaali võimendamine Arduino kontrolleri
Arduino vaheplaat	1 tk	Elektronikaskeemi ühendamine
Arduino Mega Rev3	1 tk	Juhtimine ja mõõtmine - kontrolleri
Termopaar	1 tk	Temperatuuri mõõtmine
INA2019DC Monitor	1 tk	Pinge mõõtmine mooduli klemmidelt

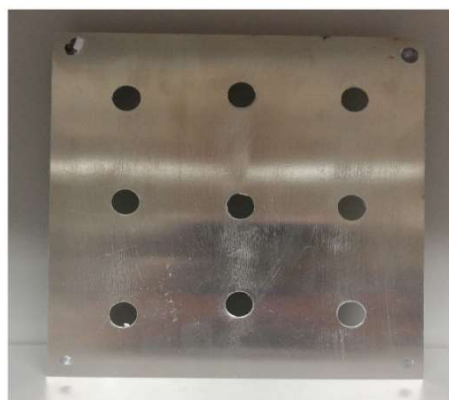


Joonis 2.4. Katseseadme juhtimisskeemi põhikomponendid. A - Draiver A4988; B - CNC laiendusplaat; C - Arduino laiendusplaat; D - komplekti kasutuse näide.

## 2.2.1 Päikeseelementide ühendamine katseseadmel

Peatükis 1.3 kirjeldati päikeseelementide efektiivsust ja elementide ühendusviisi mõju väljundile. Vastavalt soovile võib olla vajadus testida erinevate ühendusviisidega päikeseelemente, mille tõttu arvestati katseseadmetel võimalusega vahetada ja ühendada elemente vastavalt soovile jadamisi ja/või rööbiti. Selle eesmärgi täitmiseks projekteeriti moodulile üheksa elemendi jaoks kinnituskohad. Elementide kinnitus raamile toimub alumiiniumplaadi abil (Joonis 2.5).

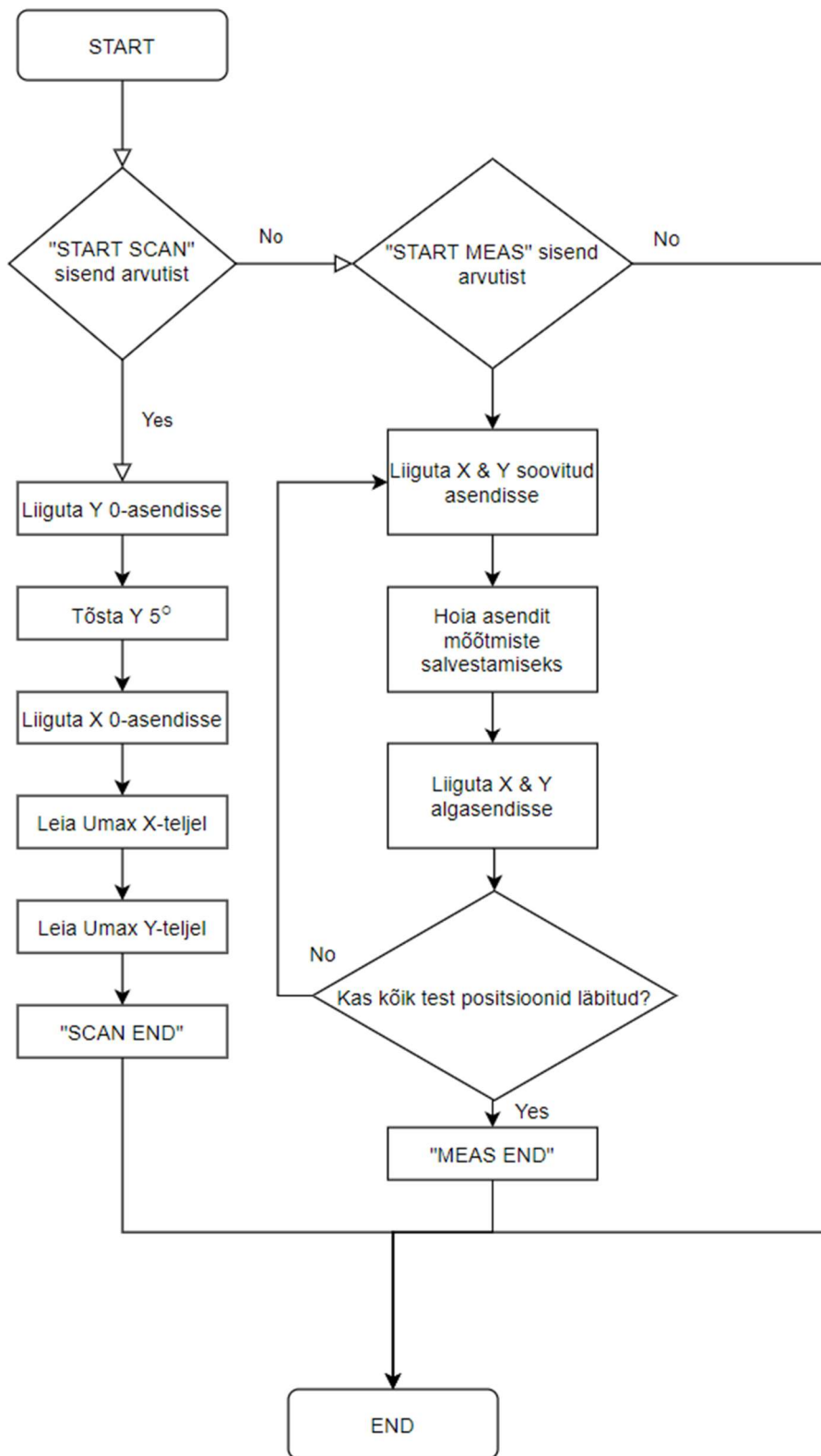
Sellise valiku eeliseks on lisaks elementide lihtsale vahetusele veel ka jahutustingimuste parandamine. Nimelt juhib alumiiniumplaat hästi soojust, mis tähendab elemendi soojenemisel selle parema eraldumise keskkonda. Peale selle võimaldab selline lahendus lihtsalt paigaldada elementidele ka temperatuuriandurid. Käesoleva töö raames on ette nähtud elementide temperatuuri mõõtmiseks termopaaride kinnitamine alumiiniumplaadi tagaküljele.



Joonis 2.5. Alumiiniumplaadid päikeseelementide kinnitamiseks katseseadme raamile.

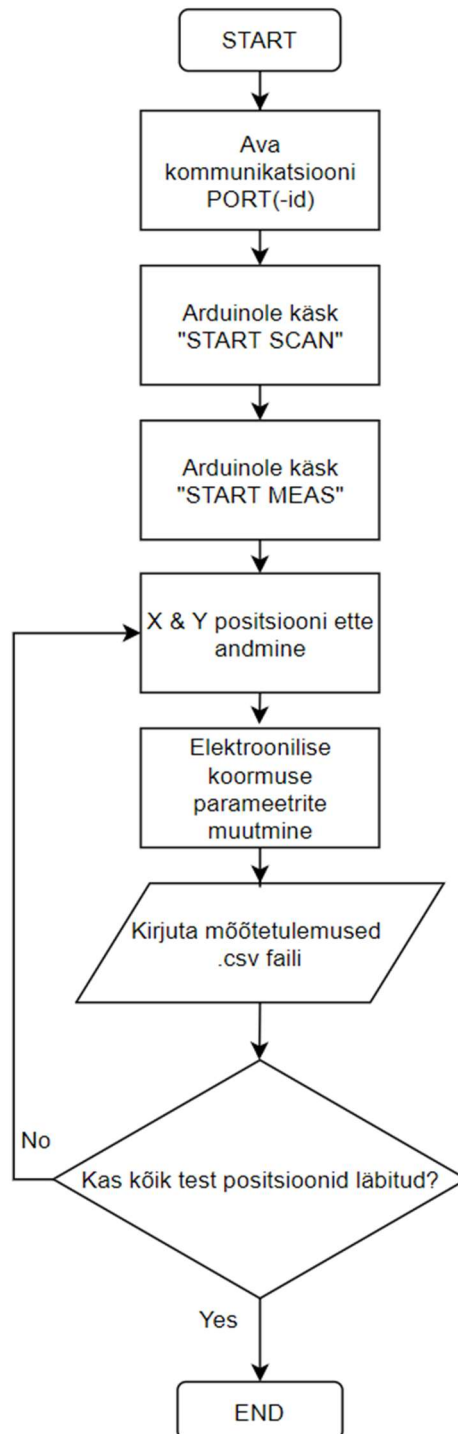
## 2.3 Katseseadme juhtimine

Katseseade kujutab endast päikesepaneeli moodulit, mille kaldenurka ja vaatesuunda saab mootorite abil liigutada. Arvestades, et sellise süsteemi projekteerimise eesmärgiks on võimalik maksimaalse võimsuspunkti leidmine, on katseseadme juhtimine ka selle peale üles ehitatud. Kuigi sellist funktsionaalsust saab muuseas ära kasutada pikema perioodi mõõtmistel (päev, nädal, kuu jne.), on käesoleva töö raames kokkupandud juhtimisalgoritm lühemate testide tegemiseks. Selle alusel on katseseadme juhtimiseks programmeeritud kaks põhilist protsessi (Joonis 2.6) – skaneerimine (plokk skeemil „SCAN“) ja testimine (plokk skeemil „MEAS“).



Joonis 2.6. Arduino programmi lihtsustatud plokk skeem.





Joonis 2.7. Python programmi lihtsustatud plokkskeem.

Skaneerimisprotsessi eesmärk on üles otsida kõige parem valguskiirguse langemispunkt moodulile, s.t leida positsioon, mille puhul valguskiirgus langeb risti katseseadme mooduli pinnaga. Selleks liigutakse mooduliga seadme Y-telje (vertikaaltelje) 0 asendisse ehk nõ „püsti“. Positsioon leitakse lõpulüliti signaali abil. Seejärel muudetakse mooduli kallet 5°, sest 0 positsioonile langeb testimise hetkel päike väga harva. Peale seda liigutakse mooduliga X-telje (horisontaaltelje) 0 asendisse, mis

leitakse lõpulüliti signaali abil. Nüüd algab reaalne skaneerimise protsess, mille jooksul leitakse päikesekiirguse kõige efektiivsem langemisnurk moodulile X-teljel ja Y-teljel. Liikudes mööda telge tuvastatakse mooduli kõige suurema pinge väljund  $U_{max}$ . Selleks loetakse peale igat sammu kolm väljundpinge väärtust, leitakse nende keskmine ja võrreldakse neid omavahel.

$$U_{POS\ N} = \frac{\sum_{i=1}^n U_m}{n}, \quad n = 3 \quad (2.1)$$

Positsiooni leidmisel peab olema rahuldatud tingimus:

$$U_{max} = U_{POS\ N}, \quad \begin{cases} U_{POS\ N} > U_{POS\ N-1} \\ U_{POS\ N} > U_{POS\ N+1} \end{cases} \quad (2.2)$$

Skaneerimisprotsessi lõppedes on seadmele leitud algpositsioon testimise läbiviimiseks. Testimiseks muudetakse mooduli X- ja Y-telje asendit vastavalt ette antud testpositsioonidele. Seade hoitakse liikumatult ühes positsioonis senikaua, kuni on toimunud elementide stabiliseerumine (temperatuuri mõistes) ja tehakse mõõtmised. Mõõtmiste tegemiseks kasutatakse väliseid seadmeid moodulile koormusahela tekitamiseks. Sellest tulenevalt koosneb katseseadme juhtimine mitmest erinevast osast, hõlmates ka erinevate seadmete vahelist kommunikatsiooni. Käesolevas töös kasutatakse koormusena elektroonilist koormust, mis ühendub sülearvutiga läbi RS232 või USB liidese. Katseseadme testimise protsessi ja koormuse juhtimise ajastamiseks on vaja juhtarkvara, mis korraldaks mõlemaid protsesse. Selleks kasutati Python programmeerimiskeelt, mille abil loodi programm Arduino protsesside ja koormuse juhtimiseks, mille põhimõtteline plokkskeem on toodud eespool (Joonis 2.7).

## 2.4 Katsesend

Katsesendi on võimalik liita kuni neli katseseadet. Nende katseseadmete sünkroniseeritud kasutamiseks tuleb süsteemi juurde lisada eraldi Arduino platvorm ja releemoodul. Täpne seadmete loetelu (Tabel 2.2) elektriskeemi koostamiseks on toodud allpool. Katsesendi elektriskeemi ja juhtimise põhimõtteskeem on toodud täies mahus käesoleva töö lisas (Lisa L2.2. Katsesendi juhtimise ja testskeemi struktuurskeem).

Releeplaadi lisamine süsteemi on vajalik koormuse suunamiseks katseseadmete vahel, sest täpsete karakteristikute saamiseks peab terve koormus olema täielikult rakendatud ühele seadmele korraga. Selle süsteemi toimimiseks peab olema ajastatud kõigi nelja katseseadme liikumine, releepaadi ühenduste muutmine ja koormusandmete lugemine, mida koordineeritakse ühest arvutist.

Käesoleva töö raames ehitati katsestend võimaliku kasutamise perspektiiviga. Küll aga ei kajastu järgmises peatükis terve katsestendi kasutamine päikeseelementide testimisel seoses nende ehituslike probleemidega, mis katse skeemi kokkupanekul ilmnisid.

Tabel 2.2. Katsestendi täiendavad osad.

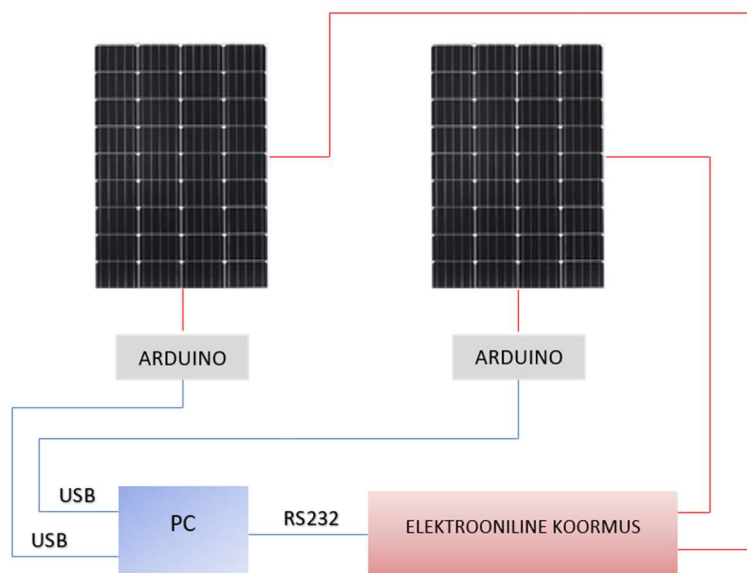
Seade	Kogus	Eesmärk
Arduino releeplaat 4xNO NC	1 tk	Katseseadmete signaalide koondamine elektroonilisse koormusesse
Arduino Uno	1 tk	Signaalide juhtimine
34972A LXI Data Acquisition/Switch	1tk	Temperatuuri andmete logimine
TENMA Programmable DC Electronic Load	1 tk	Elektrooniline koormus

### 3. TESTIMINE

Testimisel on käesoleva töö raames kaks eesmärki. Esimene neist seisneb katseseadmete töö hindamises ja teine erinevate päikeseelementide testimises. Sellest tulenevalt kirjeldab käesolev peatükk päikesepaneeli katseseadmete võimekuse valideerimist, erinevate päikeseelementidest koosnevate moodulite testimist kahel katseseadmel ja tulemuste analüüsi.

#### 3.1 Testskeem, kasutatavad päikeseelemendid ja nende ühendamine

Päikesepaneelide moodulite testimiseks võrdsetel tingimustel koostati testskeem, mille põhimõtteline struktuur on toodud allpool (Joonis 3.1). Testseadmed ühendatakse elektroonilise koormusega ning nende juhtimist viiakse läbi arvutist (vastavalt peatükis 2.3 kirjeldatud protsessile). Testskeemi on ühendatud termopaar-tüüpi andurid temperatuuri andmete registreerimiseks süsteemivälise eraldiseisva osana. Lisaks kasutatakse moodulite analüüsimisel päikesekiirguse intensiivsuse (ühikutes  $W/m^2$ ) andmeid Tallinna Tehnikaülikooli NRG õppehoone katusele paigaldatud süsteemist, mis salvestab vastavaid mõõtetulemusi serverisse üks kord sekundis.



Joonis 3.1. Testimis-seadistuses katseseadme põhimõtteskeem.

Lõputöö raames testitakse sama tootja poolt pakutavaid päikeseelemente, mida on võimalik tellida kõikidel soovijatel [33]; [34]. Mõlemad analüüsitavad päikeseelementide komplektid on toodetud polükristallilisest ränist. Testitavate päikeseelementide parameetrid vastavalt tootja andmetele on

toodud allpool olevas tabelis 3.1, kus on kirjeldatud parameetreid ühe elemendi kohta, seejuures arvestades nende ühendusviisi testseadmel (jadamisi) kogu mooduli kohta. Temperatuuriteguri ja teiste elektriliste parameetrite määramiseks analüüsiti sama tootja poolt teiste samalaadsete polükristallilisest ränist valmistatud päikeseelementide andmeid [35].

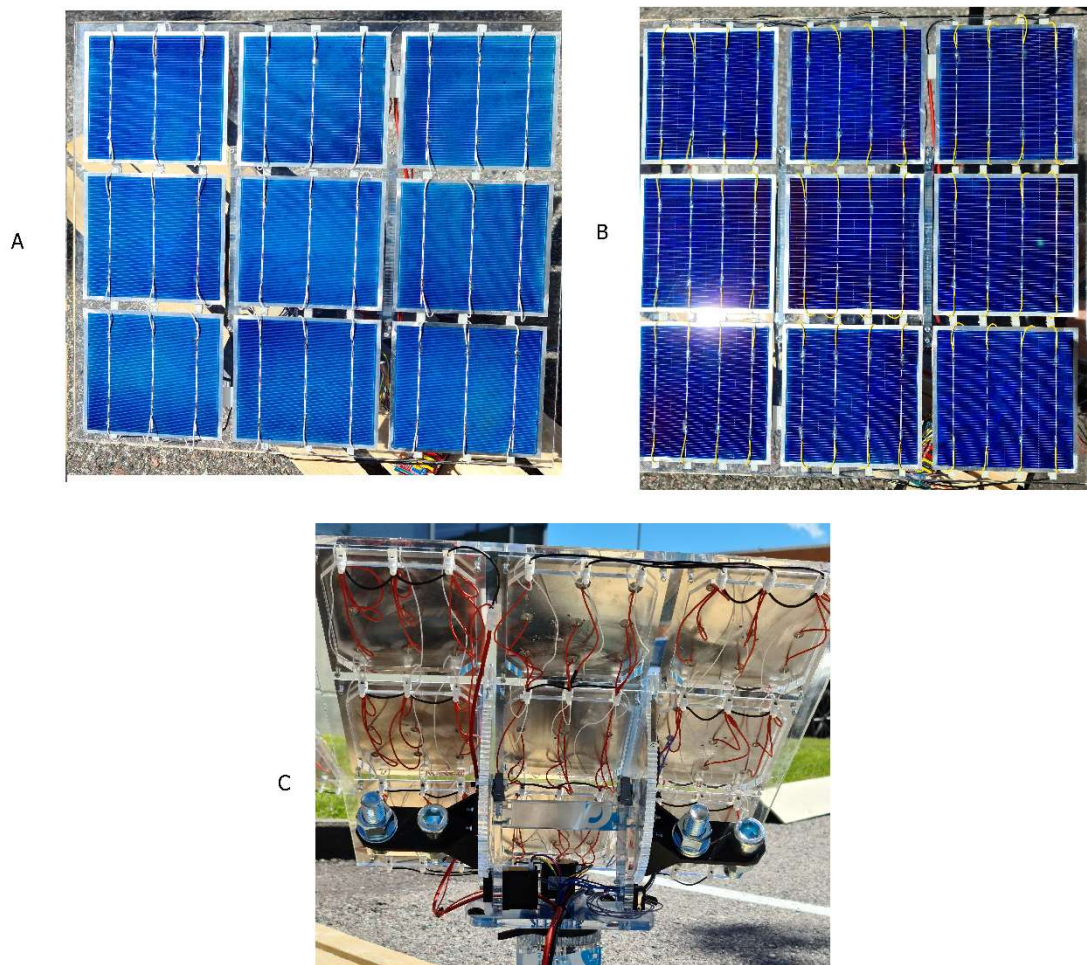
Tabel 3.1. Testitavate päikeseelementide parameetrid tootjapoolsete andmete põhjal.

Päikesepaneelid	1	2
Elemendi tehnoloogia	Polükristall räni	Polükristall räni
Elemendi pindala $S_{el}$ , (m <sup>2</sup> )	0,0243	0,0243
Mooduli pindala $S$ , (m <sup>2</sup> )	0,219	0,219
Elemendi maksimaalne võimsus $P_{max\_el}$ (W)	4,28	4,23
Mooduli maksimaalne võimsus $P_{max}$ , (W)	38,52	38,07
Effektiivsus $\eta_{ref}$ , (%) <sup>1</sup>	16,6	17,4
Temperatuuritegur $\alpha_{ref}$ <sup>2</sup>	0,004	0,004
Elemendi tühijooksu klemmipinge $U_{oc\_el}$ , (V)	0,625 <sup>3</sup>	0,632
Mooduli tühijooksu klemmipinge $U_{oc}$ , (V)	5,625 <sup>3</sup>	8,485
Elemendi (mooduli) lühisvool $I_{sc}$ , (A)	8,319 <sup>3</sup>	8,485
Elemendi MPP pinge $V_{mp\_el}$ , (V)	0,519 <sup>3</sup>	0,527
Mooduli MPP pinge $V_{mp}$ , (V)	4,671 <sup>3</sup>	4,743
Elemendi (mooduli) MPP vool $I_{mp}$ , (A)	7,7895 <sup>3</sup>	8,035

<sup>1</sup> Tootjapoolsed väärtused on esitatud STC tingimustes: 1000 W/m<sup>2</sup>; AM1.5; 25°C.

<sup>2</sup> Tootja pakub oma kõikidele päikeseelementidele ühtset temperatuurisõltuvust iseloomustades elemendi käitumist pinge, voolu ja võimsuse muutumise suhtes arvestades temperatuuri muutumist 1° võrra. Need andmed on vastavalt -2,08 mV/K; +4,58 mA/K; -0,40 %/K.

<sup>3</sup> Tootja esitab oma andmelehtedel parameetrid elementidele, mille efektiivsus jääb vahemikku 17,2...18,4 %. Nende andmete alusel on leitud näitajad elemendile nimieffektiivsusega 16,6 % arvestades parameetrite muutumise suurust efektiivsuse muutumisest lähtuvalt.



Joonis 3.2. Fotod testseadmetel kasutatavatest elementidest. A - seade 1; B - seade 2; C - näide elementide ühendamisest tagantpoolt.

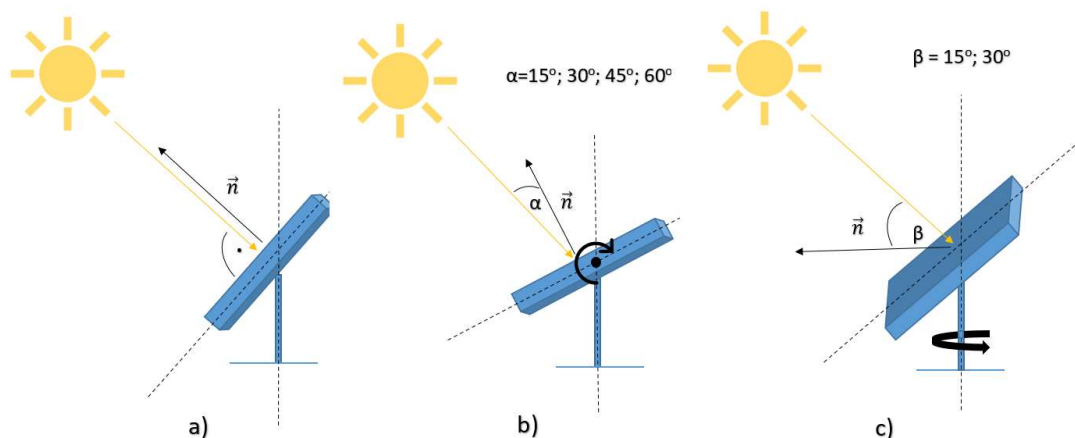
### 3.2 Testimise põhimõtted

Elementide testimisel uuritakse erinevate tegurite mõju nende efektiivsusele, muuhulgas leitakse testitavate elementide voolu-pinge ja võimsuse-pinge karakteristikud. Eesmärgiks on uurida, kuidas elementide temperatuur ja päikesekiirguse kaldenurk mõjutavad nende tööd ning kas või kui palju erinevad praktilistes tingimustes saadud tulemused tootja poolt esitatud andmetest.

Eelnimetatud eesmärkide saavutamiseks on testimisel kasutatud mooduli asendi muutmist. Selleks määrati testimise programmis erinevad testpositsioonid (Tabel 3.2), mis on X- ja Y- telje suhtes valitud selliselt, et saada kõige optimaalsemad mõõteandmed nende mahu ja käsitletavuse poolest. Järgnevas tabelis (Tabel 3.2) on toodud testpositsioonide väärtused ning neid illustreerib allolev joonis (Joonis 3.3), millel on esitatud erinevaid mooduli asendeid päikesekiirguse ristpositsiooni suhtes mooduli pinnanormaalist.

Tabel 3.2. Mooduli kaldenurga mõju uurimiseks valitud testpositsioonid.

Test nr.	Pos. Y - vertikaaltelg	Pos. X - horisontaaltelg
1	0°	0°
2	15°	0°
3	30°	0°
4	45°	0°
5	60°	0°
6	0°	15°
7	0°	30°
8	30°	30°



Joonis 3.3 Illustratsioon mooduli pinnanormaali positsioonide kirjeldamiseks päikesekiirguse ristkomponendi suhtes.

Iga testpositsiooni kohta leitakse elementide karakteristikud. Selleks muudetakse skeemi ühendatud elektroonilise koormuse suurust selliselt, et:

- mõõteandmetest joonistuksid välja sujuvad I-U ja P-U karakteristikud;
- mõõteandmetest on võimalik eristada maksimaalset võimsuspunkti (MPP).

Elektroonilisel koormusel muudetakse selle koormusahelas voolu reguleerimisväärtust. Karakteristikute n.ö alguspunkti leidmiseks, mille puhul pinge on võimalikult lähedal moodulite tühijooksu pingele  $U_{oc}$  seatakse koormusahelasse võimalikult väike vool ehk  $I_0 = 1 \text{ mA} \rightarrow U_0 \approx U_{oc}$ .

Edasi tõstetakse koormusahela voolu kindlaks määratud vahemikes ligikaudu eksponentsiaalselt:

- 20 mA → 40 mA → 70 mA;
- 100 mA → 200 mA → 400 mA → 700 mA;
- 1 A → 2 A → 4 A → 7 A → 11 A.

Voolu tõstmisel otsitakse koormuse taset, mille korral pinge väheneb märgatavalt alla maksimaalse pinge ehk  $I_n = X \text{ mA} \rightarrow U_n < 20\% U_0$ . Sellise koormustaseme leidmisel eeloleva rea põhjal tehakse selgeks elementide karakteristikute muutumiskurvi asukoht. Kurvi selgemaks väljajoonistumiseks muudetakse koormuse taset selliselt, et leitakse vahemik, mille jooksul toimus pinge drastiline vähenemine. Eelnimetatud vahemik jagatakse 20-ks võrdseks osaks ning muudetakse koormusvoolu väärtust vastavalt nendele kuni leitakse maksimaalne vool, mille korral moodulite väljundpinge on minimaalne ja selle langemist enam ei toimu. Moodulite testimisel mõõdetud pinge ja voolu väärtused varustatakse ajalise märgisega, et oleks võimalik nende andmete ühildamine temperatuuri- ja päikesekiirguse andmetega.

### 3.3 Tulemused – päikeseelementide karakteristikud ja võrdlus tootja andmetega

Esialgsete mõõtmised viidi läbi tingimustel, mis on toodud allolevas tabelis (Tabel 3.3), kus on toodud päikesekiirguse ja mooduli elementide temperatuuride vahemik (min. ja max.) terve mõõteperioodi jooksul vastavalt kogutud mõõteandmetele. Mõõtetulemuste analüüsimisel on arvestatud nende parameetrite korral nende hetkväärtusega, mis vastavad ajaliselt mõõdetud pingete ja voolude väärtustele.

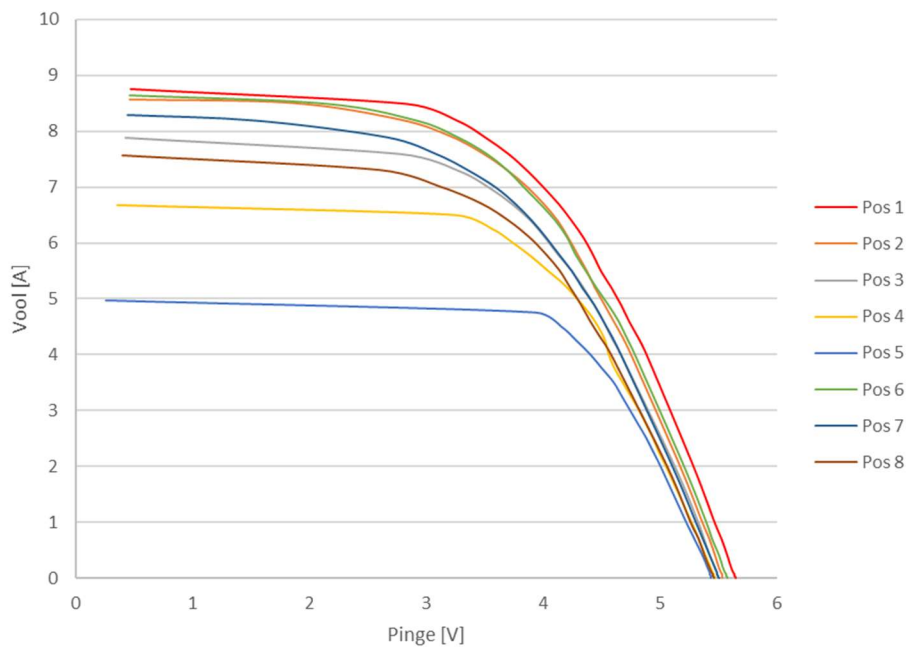
Tabel 3.3. Testimise perioodil mõõdetud päikesekiirguse ja mooduli temperatuuride vahemikud testseadmetele.

Seade	Testseade 1	Testseade 2
Päikesekiirguse vahemik mõõteperioodil, (W/m <sup>2</sup> )	921...931	931...943
Moodulite temperatuuride vahemik mõõteperioodil, (°C)	21...31	24...31

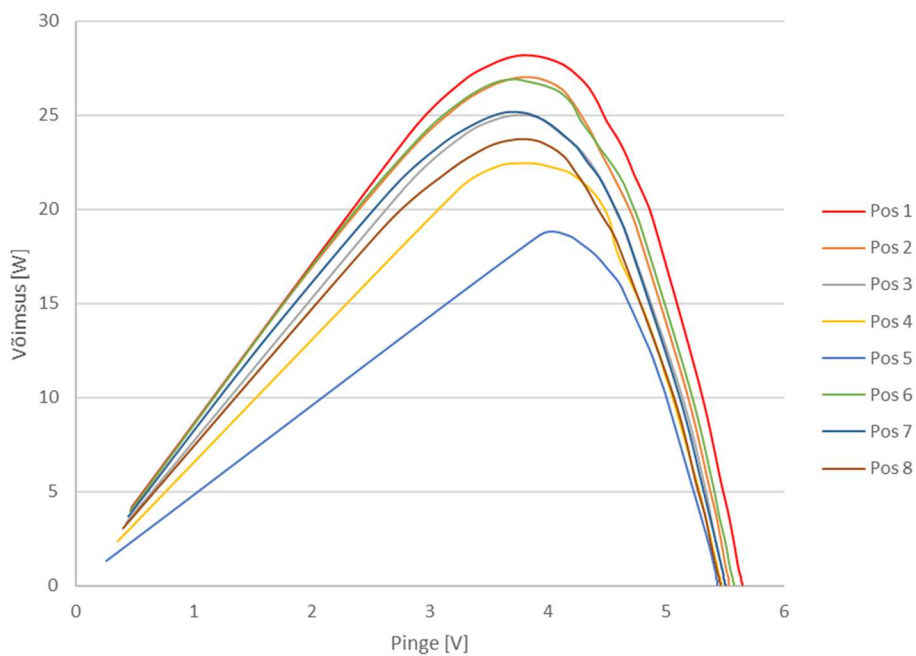
Esialgsetel mõõtmistel saadud tulemused pinge-voolu ja pinge-võimsuse karakteristikute kohta on toodud allpool. Joonisel 3.4 ja joonisel 3.5 on toodud testseadme 1 mõõtetulemuste alusel pinge-voolu ja pinge-võimsuse karakteristikud. Testseadmele 2 on toodud pinge-voolu karakteristikud joonisel 3.6 ja pinge-võimsuse karakteristikud joonisel 3.7. Joonistel on rõhutatud punase joonega



positsioonil 1 mõõdetud karakteristikuid, mis teooria ja ka tulemuste põhjal kirjeldavad päikesepaneeli mooduli kõige efektiivsemat asendit päikesekiirguse langemise suhtes. Sellel positsioonil saavutavad mõlemad testmoodulid antud tingimustel kõige suurema väljundvõimsuse.



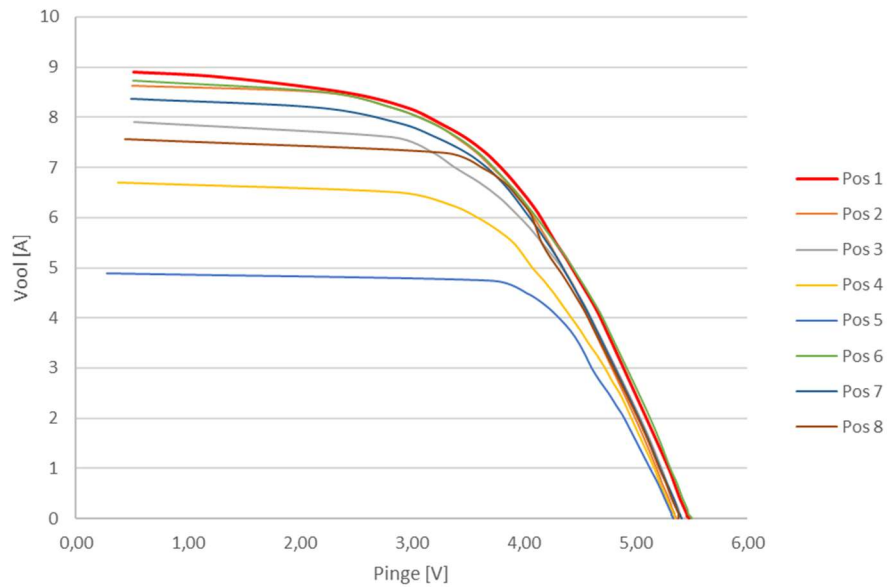
Joonis 3.4. Pinge-voolu karakteristikud mõõtetulemuste alusel testseadmele 1.



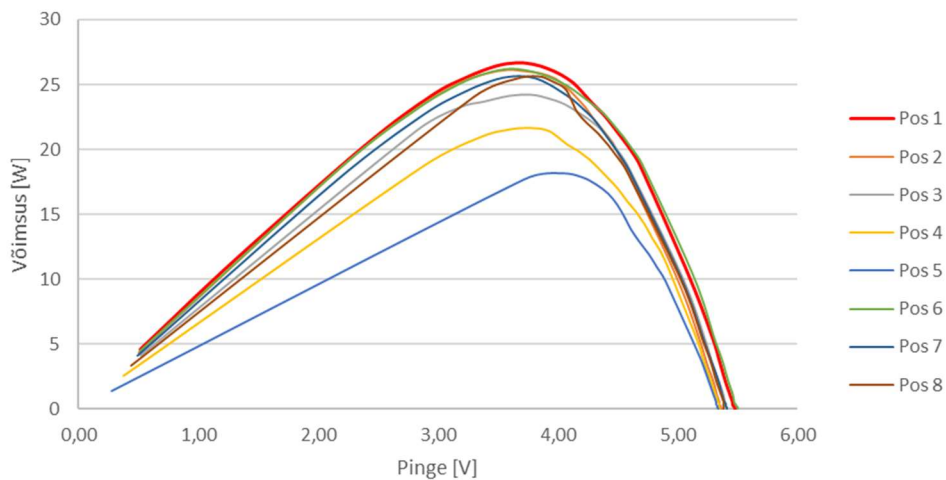
Joonis 3.5. Pinge-võimsuse karakteristikud mõõtetulemuste alusel testseadmele 1.

Kõikidelt karakteristikute graafikutelt on näha, kuidas testseadme mooduli positsioon mõjutab nende tootlikkust. Suurimat mõju on näha positsioonis, kus mooduli nurk on 60° vertikaaltelje

suhtes, mis vastab ka teoreetilistele tingimustele. Graafikutelt on ka näha, et mooduli liigutamine nii vertikaal- kui horisontaaltelje suhtes  $30^\circ$  (positsioon 5) ei avalda nii suurt mõju kui ühte telge pidi  $45^\circ$  või  $60^\circ$  asendid (vastavalt positsioonid 4 ja 5).



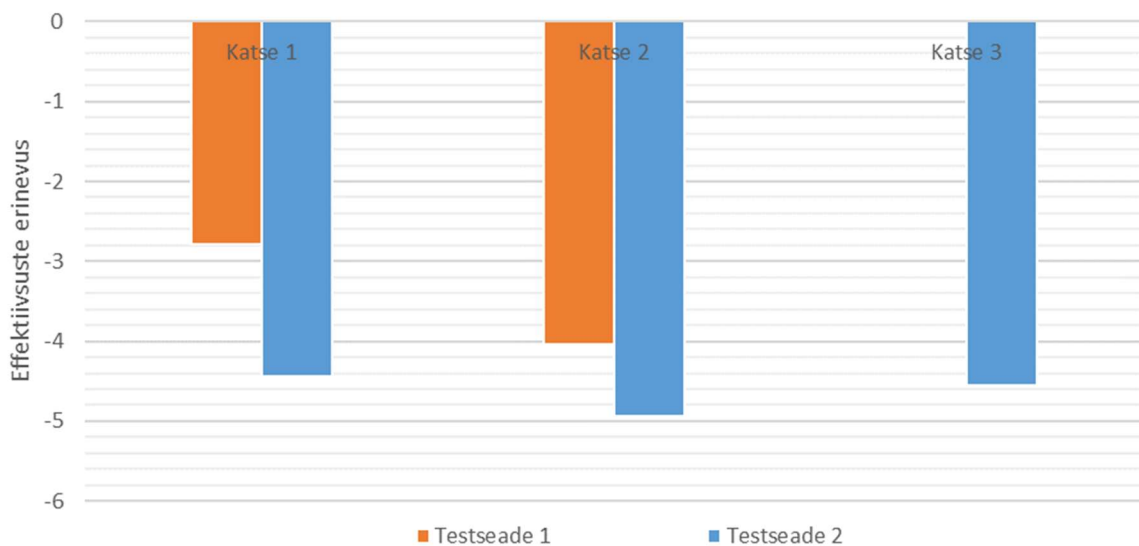
Joonis 3.6. Pinge-voolu karakteristikud mõõtetulemuste alusel testseadmele 2.



Joonis 3.7. Pinge-võimsuse karakteristikud mõõtetulemuste alusel testseadmele 2.

Lisaks esialgsetele mõõtmistele viidi läbi täiendavad mõõtmised moodulite efektiivsuse hindamiseks praktilises kasutuses ja paigaldustingimuste mõju uurimiseks. Selleks teostati mõlema katseseadmega lisakatsed eesmärgiga saada kolme mõõtmise kohta katsetulemused analüüsi parandamiseks. Ühe katseseadmega oli võimalik läbi viia mõlemad lisatestid aga teisega mõõdeti ainult üks lisakatse ilmast tingitud probleemide tõttu (vihm, raske pilvisus).

Täiendatavate mõõtetulemuste põhjal leiti moodulitele suurima tootlikkusega tööpunktid ja selle alusel nende efektiivsus praktilistes tingimustes. Seejärel avaldati saadud mõõtetulemuste alusel elementide tegelik efektiivsus 25°C juures ning hinnati nende tulemuste mõju tootja poolsete andmete põhjal. Saadud tulemused on toodud allpool (Joonis 3.8), kus on näha mõõtetulemustel saadud efektiivsuse erinevused tootja poolt esitatud andmetest. Jooniselt on näha, et erinevus suhteliselt suur. Testseade 1 puhul on kahe katsetulemuste keskmine erinevus -3,41%, testseadme 2 puhul on sama näitaja -4,64%. Siinkohal tuleb aga täheldada, et erinevus võib olla tingitud ka keskkonningimuste erisusest, sest katsed viidi läbi välitingimustes, mille puhul ei ole võimalik kontrollida õhumassi indeksit. Lisaks võib mõju olla tingitud ka elementide elektriliste ühenduste kvaliteedist, katseprotsessis esinenud määramatusest jms. Olenemata sellest, on efektiivsuste erinevus suhteliselt suur.

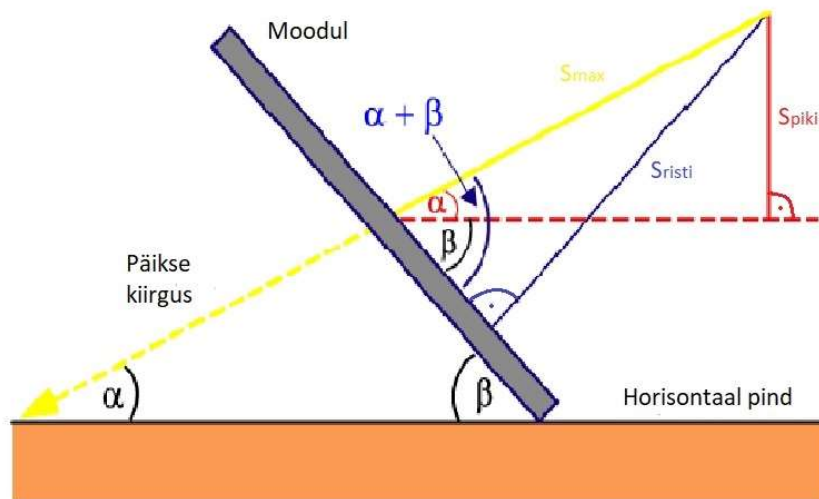


Joonis 3.8. Moodulite efektiivsuste erinevus tootja poolsetest andmetest.

### 3.4 Tulemused - paigaldustingimuste mõju

Päikesepaneeli tootlikkus oleneb selle pinnale jõudva päikesekiirguse energiast, mis tähendab et oluline osa päikesepaneelide tootlikkuses on ka päikesepaneeli paigaldustingimustel, mille all mõeldakse nurka päikesekiirguse langemise ja mooduli pinna vahel. Mooduli pinnanormaali asetsemisel risti langeva päikesekiirguse suhtes võib lugeda mooduli pinnale langeva päikesekiirguse energia maksimaalseks. Selle nurga suurenemisel väheneb aga valguskiirguse hulk, mis moodulile langeb. Päikesepaneelile (moodulile) nurga all langeva päikesekiirguse saab jagada

kaheks komponendiks: risti- ja pikikomponendiks, mida illustreerib allpool toodud joonis (Joonis 3.9) ja valemid (3.1 ja 3.2).



Joonis 3.9. Päikesekiirguse langemisnurga mõju mooduli paigaldustingimuste suhtes. [36]

$$S_{piki} = S_{max} * \sin \alpha \quad (3.1)$$

$$S_{risti} = S_{max} * \sin (\alpha + \beta) \quad (3.2)$$

Paigaldustingimuste mõju uurimiseks on igal testpositsioonil leitud moodulite maksimumvõimsuse väärtus karakteristikute järgi. Selle võimsuse juures on arvestatud elemendi temperatuuri ja päikesekiirguse hetk andmed.

Päikesekiirguse langemisnurga suhtes on arvestatud, et päikesekiirgus koosneb elemendile langevas osas kahest komponendist: risti- ja pikikomponendist. Positsioonis 1, kus mooduli pinnanormaal on risti langeva päikesekiirgusega saab lugeda päikesekiirguse ristikomponendi maksimaalseks. Teiste testpositsioonide korral on arvesse võetud mooduli kaldenurka järgnevalt:

$$S_{risti} = K_{ristkomponent} * S_{moodul} \quad (3.3)$$

$$K_{ristkomponent} = \cos \left( \frac{\pi}{180^\circ * \alpha} \right) * \cos \left( \frac{\pi}{180^\circ * \beta} \right) \quad (3.4)$$

kus  $\alpha$  – testitava mooduli nurk vertikaaltelje suhtes (Tabel 3.2), [°];

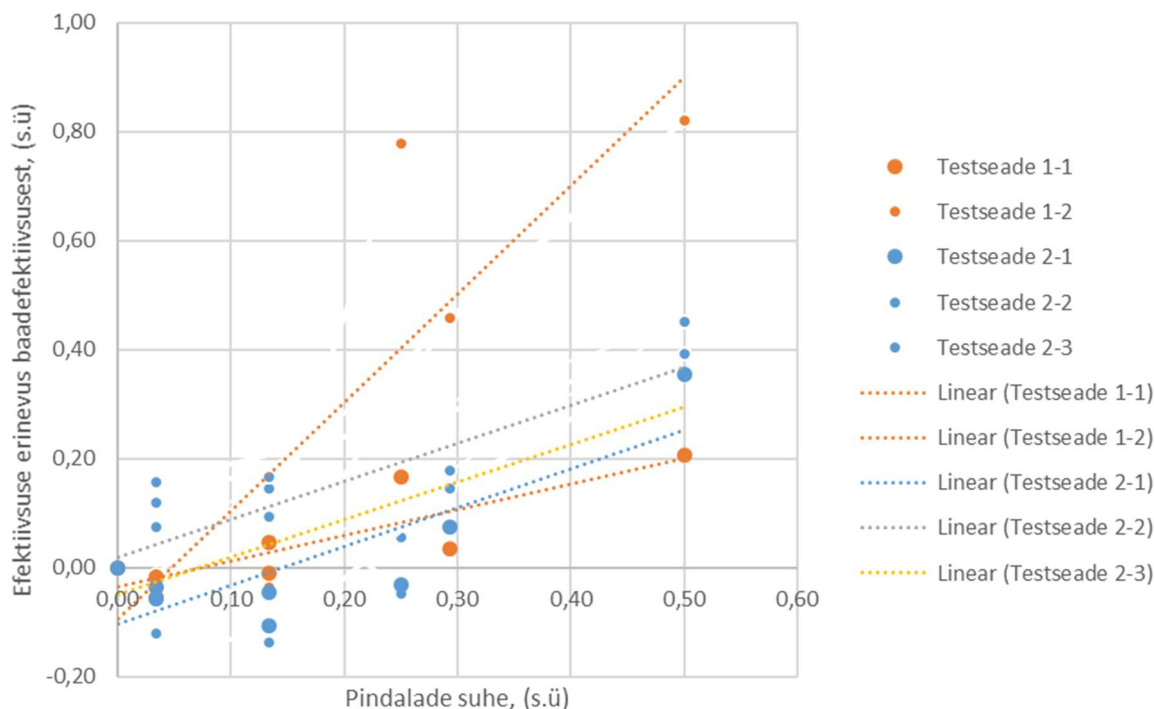
$\beta$  – testitava mooduli nurk horisontaaltelje suhtes (Tabel 3.2), [°];

Valmite 3.3 ja 3.4 abil määratakse mooduli kasulik pindala, ehk pindala, millele selles asendis jõuab päikesekiirguses sisalduv energia.

Teades moodulite kasulikku pindala erinevates positsioonides saab, päikesekiirguse energia ja mooduli efektiivsust arvestades, välja arvutada nende eeldatava tootlikkuse erinevate

kaldenurkade korral. Käesolevas töös arvestati mooduli (baas)efektiivsuseks selle tootlikkus positsioonis 1, kui sellele langev päikesekiirgus on täielikult ristasendis. Võrreldi teiste positsioonide korral nende tegelikku efektiivsust baasefektiivsusega, arvestades kaldenurga mõju paneeli kasulikule pindalale.

Tehtud analüüsi tulemused on toodud alloleval joonisel (Joonis 3.10), kus on x-teljel kujutatud kasuliku pindala vähenemist positsiooni 1 suhtes ning y-teljel on toodud mõõtetulemuste põhjal saadud testmoodulite efektiivsuste erinevused oodatavast baasefektiivsusest. Tulemused näitavad, et kaldenurga all olevate moodulite efektiivsus on kõrgem kui nende oodatav tootlikkus. See võib olla põhjustatud elementide materjali omadustest valguskiirguse neeldumisel, valguskiirgus peegeldumisest läheduses olevatelt objektidelt.



Joonis 3.10. Efektiivsuste erinevused erinevates testpositsioonides oodatavast efektiivsusest.

### 3.5 Hinnang testseadmetele

Testimise jooksul täheldati testseadmete töös puudusi, mille parandamine annaks oluliselt juurde testimise protseduuri parendamiseks:

- Mootorid asendada suurema nimivõimsusega mootoritega – välistingimustes testseadme kasutamisel võib tuul mõjuda mooduli liigutamisele selliselt, et mootorite töö on takistatud, mis võib tähendada katsete ajal positsioonide muutumist.

- Tugevam testseadme alus – välistingimustes kasutamiseks võiks konstruktsiooni parandada kõikumise vähendamiseks.
- Mooduli koormusahela juhtmete vedamine tuleb paremini läbi mõelda.
- 3D-prinditud hammasrattad tuleb välja töötada juba kokku monteeritud seadme raami mõõtmeid ja eripärasid arvestades, et vähendada nende loksumist.
- Seadmete juhtimise lihtsustamiseks ja keerukamate testprogrammide loomiseks tuleks seadmele lisada positsiooniandurid tagasiside saamiseks.
- Elementide ühendamisel kasutada spetsiaalseid jooteribasid elektriliste ühenduste parandamiseks ja juhtmestiku vähendamiseks.

Üldiselt töötavad testseadmed püstitatud eesmärkidele vastavalt. Nende kasutamine on aga sellise konstruktsiooniga soovitatav ennekõike sisetingimustes, kus välised keskkonnamõjud (tuul, vihm, tolm/sodi) tugevalt ei avaldu.

## KOKKUVÕTE

Päikeseenergia ja -paneelidel on oluline roll taastuvenergia osakaalu tõstmisel elektrienergia lõpptarbimises ja hoonete energiatõhususe suurendamisel. Energia muundamise tehnoloogiaid, mis põhinevad päikeseenergia, on mitmeid.

Käesoleva töö raames vaadeldakse fotogalvaanika tehnoloogial (*PhotoVoltaic – PV*) põhinevat lahendust, mille puhul päikeseenergia muundatakse otse elektrienergiaks. Päikesepaneelide efektiivsust mõjutavad nii sellele langev päikesekiirgus kui ka päikesepaneelide konstruktsioonilised omadused, näiteks päikeseelementide kasutatavad materjalid, päikeseelementide omavaheline ühendamine, päikeseelementide tootmisprotsess jpm. Efektiivsuse teoreetiline näitaja ei pruugi peegeldada tegelikkust, mistõttu viiakse läbi katseid selle hindamiseks. Katsetamise puhul on oluline, et päikesepaneeli oleks võimalik katsestendil kiirelt ja efektiivselt vahetada.

Käesoleva magistr töö eesmärkideks oli välja arendada teisaldatav katsestend erinevate päikesepaneelide tegeliku efektiivsuse hindamiseks reaalsetes ilmastikutingimustes, uurida, kuidas elementide temperatuur ja päikesekiirguse kaldenurk mõjutavad nende tööd ning kas või kui palju erinevad praktilistes tingimustes saadud tulemused tootja poolt esitatud andmetest.

Töö tulemusena arendati katseseadmed, mis on vastupidava konstruktsiooniga, praktiliste mõõtmistega, kerge, teisaldatav, lihtsasti lahtivõetav ja kokkupandav. Selle elektrilised elemendid on kiiresti ja lihtsasti vahetatavad. Testitavaid päikeseelemente on võimalik vahetada ning ühendada jadamisi ja/või rööbiti. Stendi kuluavad osad on võimalik kiiresti välja vahetada uute 3D-pringitud osade vastu. Katseseade kujutab endast päikesepaneeli moodulit, mille kaldenurka ja positsiooni saab mootorite abil liigutada nii vertikaal- kui ka horisontaaltelje suhtes.

Loodud katseseadmetega testiti erinevate päikeseelementide tootlikust praktilistes tingimustes Tallinna Tehnikaülikooli territooriumil. Töös katsetati esimese generatsiooni ehk kõige tavapärasemalt kasutusel olevaid ning suhteliselt hea efektiivsusega (12-14%) polükristallisi räniplaate. Elementide testimisel uuriti erinevate tegurite mõju nende efektiivsusele, muuhulgas leiti testitavate elementide voolu-pinge ja võimsuse-pinge karakteristikud. Testimiseks muudeti mooduli X- ja Y-telje asendit vastavalt ette antud testpositsioonidele ning hoiti seadet liikumatult ühes positsioonis senikaua, kuni on toimus elementide stabiliseerumine (temperatuuri mõistes) ja registreeriti mõõtmised.

Testimise põhjal leiti moodulitele pingevoolu ja pingevõimsuse karakteristikud erinevates mooduli asendites. Lisaks leiti moodulitele suurima tootlikkusega tööpunktid ja nende alusel

moodulite efektiivsus praktilistes tingimustes, mida võrreldi tootja poolt esitatud andmetega. Saadud tulemuste põhjal hinnati moodulite efektiivsusnäitajat oluliselt madalamaks ette antud andmetest (-3,41 % ja -4,64 %). Selline vahe võib olla tingitud keskkonnatingimuste erisusest, sest katsed viidi läbi välitingimustes, mille puhul ei ole võimalik kontrollida õhumassi indeksit. Lisaks võib mõju olla tingitud ka elementide elektriliste ühenduste kvaliteedist, katseprotsessis esinenud määramatusest jms. Olenemata sellest, on efektiivsuste erinevus suhteliselt suur ning teostada tuleks täiendavad mõõtmised selle seisukoha kinnitamiseks/ümberlükkamiseks.

Lisaks hinnati testimisel paigaldustingimuste mõju moodulite tootlikkusele võrreldes nende oodatavat tootlikust tegelikuga. Tulemused näitasid, et kaldenurga all olevate moodulite efektiivsus on kõrgem kui nende oodatav tootlikkus. See võib olla põhjustatud elementide materjali omadustest valguskiirguse neeldumisel, valguskiirgus peegeldumisest läheduses olevatelt objektidelt.

Testimise jooksul täheldati testseadmete töös välitingimustes puudusi, mille parandamine annaks oluliselt juurde testimise protseduuri parendamiseks ja mõõtetulemuste usaldusväärsusele. Tuule mõju vähendamiseks tuleks testseadmetel kasutatud mootorid asendada võimsamatega. Olulise eelise annaks ka testseadme aluse muutmise stabiilsemaks ja juhtmestiku, sh elementide elektriliste ühenduste, läbi mõtlemises. Lisaks võiks tulevikus paigaldada testseadmetele positsiooni määramiseks andurid ja arendada edaspidi arendada juhtimisalgoritmi sujuvamaks, kiiremaks ja efektiivsemaks.

Lõputöö täitis oma eesmärged. Lisaks erinevate mõjutegurite uurimisele päikesepaneeli moodulite tootlikkusele, valmisid ka testseadmed Tallinna Tehnikaülikoolile erinevate päikesepaneeli elementide testimiseks nii sise- kui välitingimustes. Töö jätkamiseks võib arendada testseadmeid veelgi efektiivsemaks või jätkata juba olemasolevate seadmetega erinevatel tehnoloogiatel põhinevaid elemente, nende tootlikkust erinevatel tingimustel ning vastavust nimiandmetega.



## SUMMARY

Solar energy and panels play an important role in increasing the share of renewable energy in final electricity consumption and in increasing the energy efficiency of buildings. There are many energy conversion technologies based on solar energy.

This thesis examines solar panels, their productivity and their testing to evaluate various indicators. The efficiency of solar panels is affected by the solar radiation falling on the panels and the structural properties of the solar panels, such as the materials used in the solar cell, the interconnection of the solar cells, the manufacturing process of the solar cells and so on. The effectiveness of the solar panels given in their data sheets may not reflect reality, so experiments are being carried out to assess this. For testing the solar panels it is important that the solar panels can be replaced quickly and efficiently on the testing equipment.

The aim of this master's thesis was to develop a portable test bench to evaluate the actual efficiency of different solar panels in real weather conditions and to study how the temperature and angle of solar modules affect their operation and whether or how much the results obtained under practical conditions differ from the data given by the manufacturer.

As a result of the thesis, a test equipment was developed that is durable in construction, practical in dimensions, light, portable, easy to disassemble and assemble. Its electrical components are quick and easy to replace. The solar cells, that are to be tested, can be replaced and connected in series and/or in parallel. Wearing parts of the stand can be quickly replaced with new 3D-printed parts. The testing equipment consists of a solar panel module, the angle and position of which can be moved by the motors in relation to both the vertical and horizontal axes.

The developed test equipment was used to test the productivity of various solar cells under practical conditions on the territory of Tallinn University of Technology. The work tested the first generation and the most commonly used polycrystalline silicon wafers with relatively good efficiency (12-14%). When testing the elements, the influence of various factors on their efficiency was analyzed. Among other things, the current-voltage and power-voltage characteristics of the tested elements were also found. For testing, the X- and Y-axis positions of the module were changed according to the given test positions, and the device was held stationary in one position until the elements stabilized (in terms of temperature) and the measurements were recorded.

Based on the testing, the voltage-current and voltage-power characteristics of the modules in different module positions were found. In addition, the highest productivity operating points for

the modules and the efficiency of the modules under practical conditions were found and compared with the data provided by the manufacturer. Based on the results, the efficiency indicator of the modules was estimated to be significantly lower than the given data (-3.41% and -4.64%). This difference may be due to differences in environmental conditions, as the tests were performed in outdoor conditions where it is not possible to verify the air mass index. In addition, the effect may also be due to the quality of the electrical connections of the elements and other unknown factors in the test process, etc. Nevertheless, the difference in efficiencies is relatively large and additional measurements should be made to confirm/refute the results.

In addition, the testing assessed the impact of the installation conditions on the performance of the modules compared to their expected actual performance. The results showed that the efficiency of the modules at an angle of inclination is higher than their expected productivity. This may be due to the material properties of the elements in the absorption of light radiation, the reflection of light radiation from nearby objects.

During the testing, shortcomings in the operation of the test equipment in outdoor conditions were observed, the improvement of which would significantly add to the improvement of the testing procedure and the reliability of the measurement results. To reduce the effects of wind, engines used on the test equipment should be replaced with more powerful ones. It would also have a significant advantage in making the base of the test equipment more stable and improving the wiring, incl of electrical connections of the cells. In addition, in the future, sensors could be installed to determine the position of test equipment and further develop a control algorithm that is smoother, faster and more efficient.

The thesis fulfilled its goals. In addition to the study of various influencing factors on the productivity of solar panel modules, test equipment was also constructed for Tallinn University of Technology to test various solar panel elements, both in indoor and outdoor. In order to continue the work, the test equipment can be developed even more efficiently or the testing of elements based on different technologies, their productivity under different conditions and compliance with the nominal data given by the manufacturer, can be continued with the already existing equipment.

## Bibliography

- [1] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030),“ 2017. [WWW]. Available: [https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak\\_2030.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf).
- [2] M. Grundmann, *The Physics of Semiconductors. An Introduction Including Nanophysics and Applications*. Third Edition, Leipzig: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [3] G. H. Atmaram, G. Tamizhmani ja G. G. Ventre, „Need for uniform photovoltaic module performance testing and ratings,“ *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, 2008.
- [4] E. Heiki, „Elektroonika õppeaine materjalid,“ [WWW]. Available: [http://materjalid.tmk.edu.ee/heikki\\_eljas/Elektroonika/](http://materjalid.tmk.edu.ee/heikki_eljas/Elektroonika/). [Kasutatud 20. 04. 2020].
- [5] I. Palu, *Pooljuhtmaterjalid - Elektrimaterjalide õppeaine loengukonspekt*, Tallinn, 2012.
- [6] V. Vodovozov, *Elektroonika ja pooljuhttehnika õppeaine loengukonspekt*, Tallinn, 2008.
- [7] I. M. Dharmadasa, *Advances in Thin-Film Solar Cells*, New York: Jenny Stanford Publishing, 2018.
- [8] E. E. S. Michaelides, *Alternative Energy Sources*, Springer, 2012.
- [9] M. T. Kibria, A. Ahammed, S. M. Sony, F. Hossain ja Shams-Ul-Islam, „A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology,“ *5th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh*, Bangladesh, 2014.
- [10] S. Sharma, K. K. Jain ja A. Sharma, „Solar Cells: In Research and Applications - A Review,“ *Materials Sciences and Applications*, vol. 6, pp. 1145-1155, 2015.
- [11] Tindo Solar, „Sindo Solar koduleht,“ [WWW]. Available: <https://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>. [Kasutatud 16. 04. 2020].
- [12] PMR Press Release, [WWW]. Available: <https://pmpressrelease.com/cigs-thin-film-solar-cells-market-latest-trend-growth-size/>. [Kasutatud 17. 04. 2020].

- [13] Trade India, [WWW]. Available: <https://www.tradeindia.com/fp882650/144W-Thin-Film-Amorphous-Silicon-Flexible-Solar-Panels.html>. [Kasutatud 17. 04. 2020].
- [14] Medium, [WWW]. Available: <https://medium.com/@tejashrikhade380/cdte-thin-film-solar-cell-market-insights-by-size-standing-and-forecast-2025-e19bab3a369>. [Kasutatud 17. 04. 2020].
- [15] „Solar Cell I-V Characteristic,“ Alternative Energy Tutorials, [WWW]. Available: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>. [Kasutatud 25. 04. 2020].
- [16] B. P. Rand ja H. Richter, *Organic Solar Cells. Fundamentals, Devices, and Upscaling.*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [17] H. Häberlin, *Photovoltaics: System Design and Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [18] J. Bisquert, *The Physics of Solar Cells. Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals.*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.
- [19] S. Dubey, J. N. Sarvaiya ja B. Seshadri, „Temperature Dependent Photovoltaic (OV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review,“ *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311-321, 2013.
- [20] N. Moubayes, A. El-Ali ja R. Outbib, „Comparison between different control methods of a solar energy conversion system,“ *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, 2008.
- [21] N. Gökmen, W. Hu, P. Hou, Z. Chen, D. Sera ja S. Spataru, „Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations,“ *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 283-290, 2016.
- [22] P. Singh ja N. M. Ravindra, „Temperature dependence of solar cell performance - an analysis,“ *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 101, pp. 36-45, 2012.
- [23] A. Jakhar, M. S. Soni ja N. Gakkhar, „Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 41-59, 2016.
- [24] Fraunhofer ISE, „Photovoltaics report,“ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2019.

- [25] IEC 61853-1:2011 *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*, 2011.
- [26] IEC 61853-2:2016 *"Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 2: Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements"*, 2016.
- [27] IEC 61853-3:2018 *"Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 3: Energy rating of PV modules"*, 2018.
- [28] IEC 61853-4:2018 *"Photovoltaic (PV) module performance and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles"*, 2018.
- [29] Power From Sunlight, „Power from Sunlight: Solar panel testing,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.powerfromsunlight.com/solar-panel-testing-important-tests-required-get-approval-solar-pv-panels/>. [Kasutatud 10. 05. 2020].
- [30] E. Hammoumi, A. Motahir, S. Chalh ja e. al, „Low-cost virtual instrumentation of PV panel characteristics using Excel and Arduino in comparison with traditional instrumentation,“ *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2018.
- [31] P. Christjanson, Polümeeriteadus, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2008.
- [32] N. Bizon, N. M. Tabatabaei, F. Blaabjerg ja E. Kurt, *Energy Harvesting and Energy Efficiency. Technology, Methods, and Applications*, Springer, 2017.
- [33] „Aliexpress veebileht,“ [WWW]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/2030311403.html>. [Kasutatud 15. 01. 2020].
- [34] „Aliexpress veebileht,“ [WWW]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/32460086197.html>. [Kasutatud 15. 01. 2020].
- [35] „Aliexpress veebileht,“ [WWW]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/32626393408.html>. [Kasutatud 17. 05. 2020].
- [36] PVEDucation, „Solar Radiation on a Tilted Surface,“ [WWW]. Available: [https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface?fbclid=IwAR0IQNv0K8TD420z5w\\_77Z2CcNCP7zn25nEkveVOnVS9LZ-Td6K3M38IQG8](https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface?fbclid=IwAR0IQNv0K8TD420z5w_77Z2CcNCP7zn25nEkveVOnVS9LZ-Td6K3M38IQG8). [Kasutatud 17. 05. 2020].

- [37] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.
- [38] E. Ü. Komisjon, „Komisjoni teatis nõukogule ja Euroopa parlamendile: Rohelise raamatu järelmeetmed - Taastuvatest energiaallikatest elektri tootmisel saavutatud edu aruanne,“ Euroopa Komisjon, 2007.
- [39] [WWW]. Available: <https://et.bccrwp.org/compare/difference-between-fermi-energy-and-fermi-level/>. [Kasutatud 15. 04. 2020].

## **LISAD**

**Lisa L1. Prototüübi joonised**

**Lisa L1.1. Pääkese jälgimisseade**

**Lisa L1.2. Elementide raam**

**Lisa L1.3. Elementide kinnitus**

**Lisa L1.4. Horisontaaltelje suur hammasratas**

**Lisa L1.5. Horisontaaltelje väike hammasratas**

**Lisa L1.6. Vertikaaltelje suur hammasratas**

**Lisa L1.7. Vertikaaltelje väike hammasratas**

**Lisa L1.8. Külje detail mootori kinnitusega**

**Lisa L1.9. Ülemine toetusplaat**

**Lisa L1.10. Alusplaat mootorikinnitusega**

**Lisa L1.11. Laagri kinnitus 1**

**Lisa L1.12. Laagri kinnitus 2**

**Lisa L1.13. Laagri kinnitus 3**

**Lisa L1.14. Laagripesa**

**Lisa L1.15. Alumine küljedetail**

**Lisa L1.16. Alumine toetusplaat**

**Lisa L1.17. Alusplaat**

**Lisa L1.18. Lõpulüliti kinnitus**

**Lisa L1.19. Tasakaalustus detail**

**Lisa L2.1. Katseseadme mikrokontroller skeem**

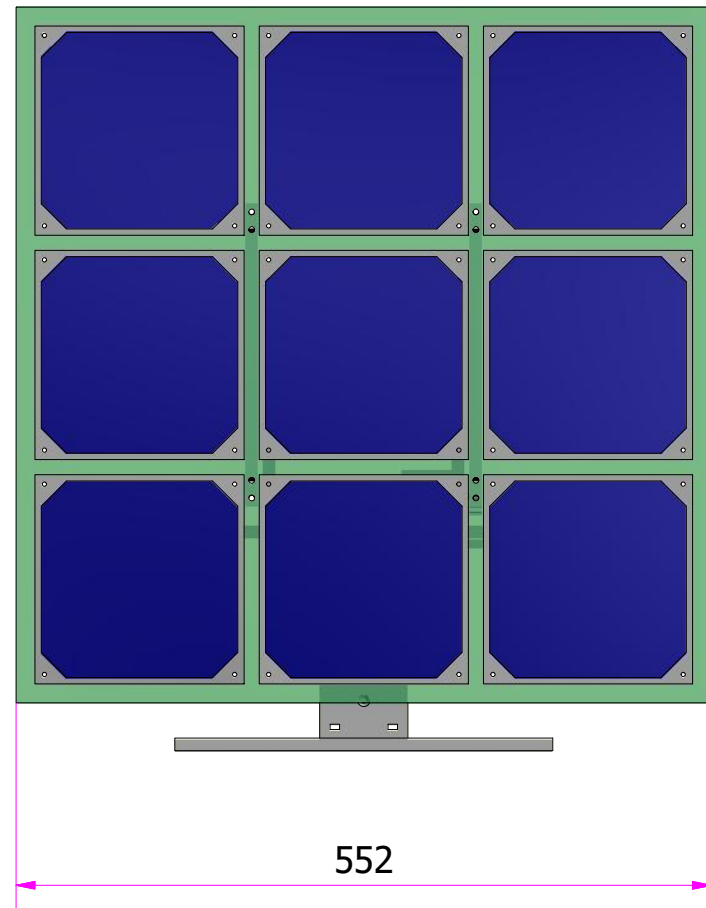
**Lisa L2.2. Katsestendi juhtimise ja testskeemi struktuurskeem**

## Lisa L1. Prototüübi joonised

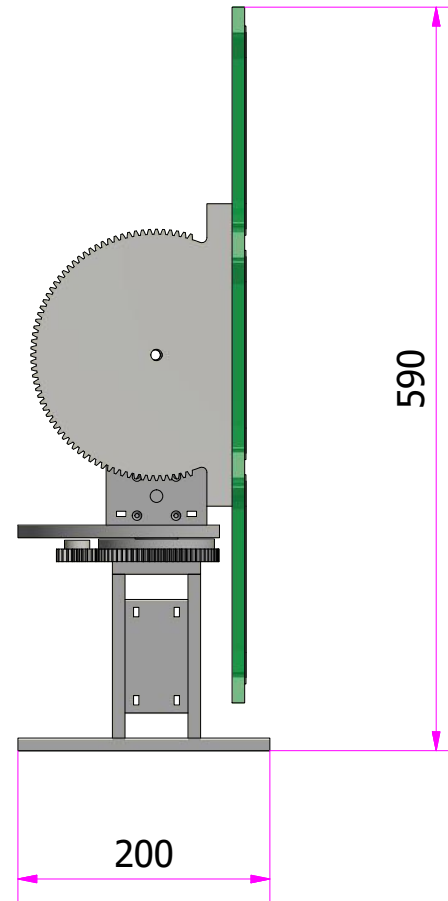


## Lisa L1.1. Päikese jälgimisseade

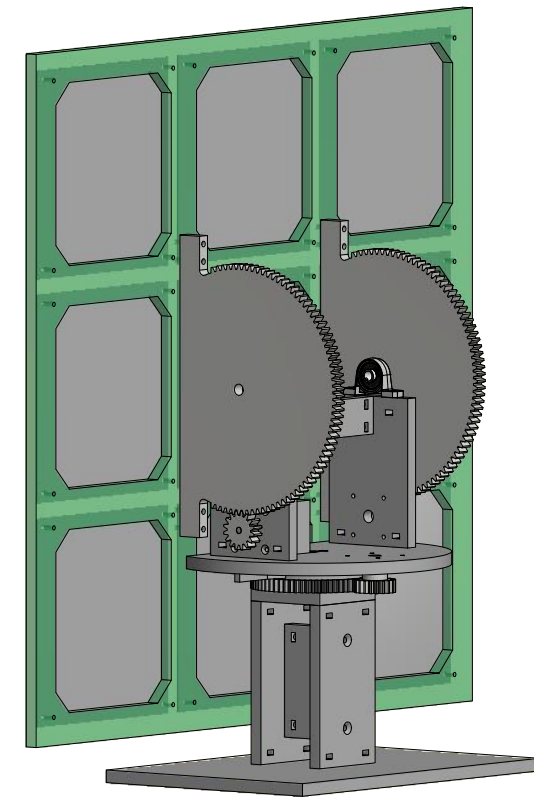
Eestvaade ( 1:6 )



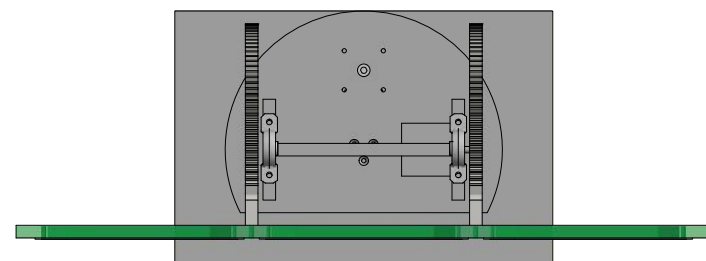
Vasakultvaade ( 1:6 )



3D-vaade ( 1:6 )



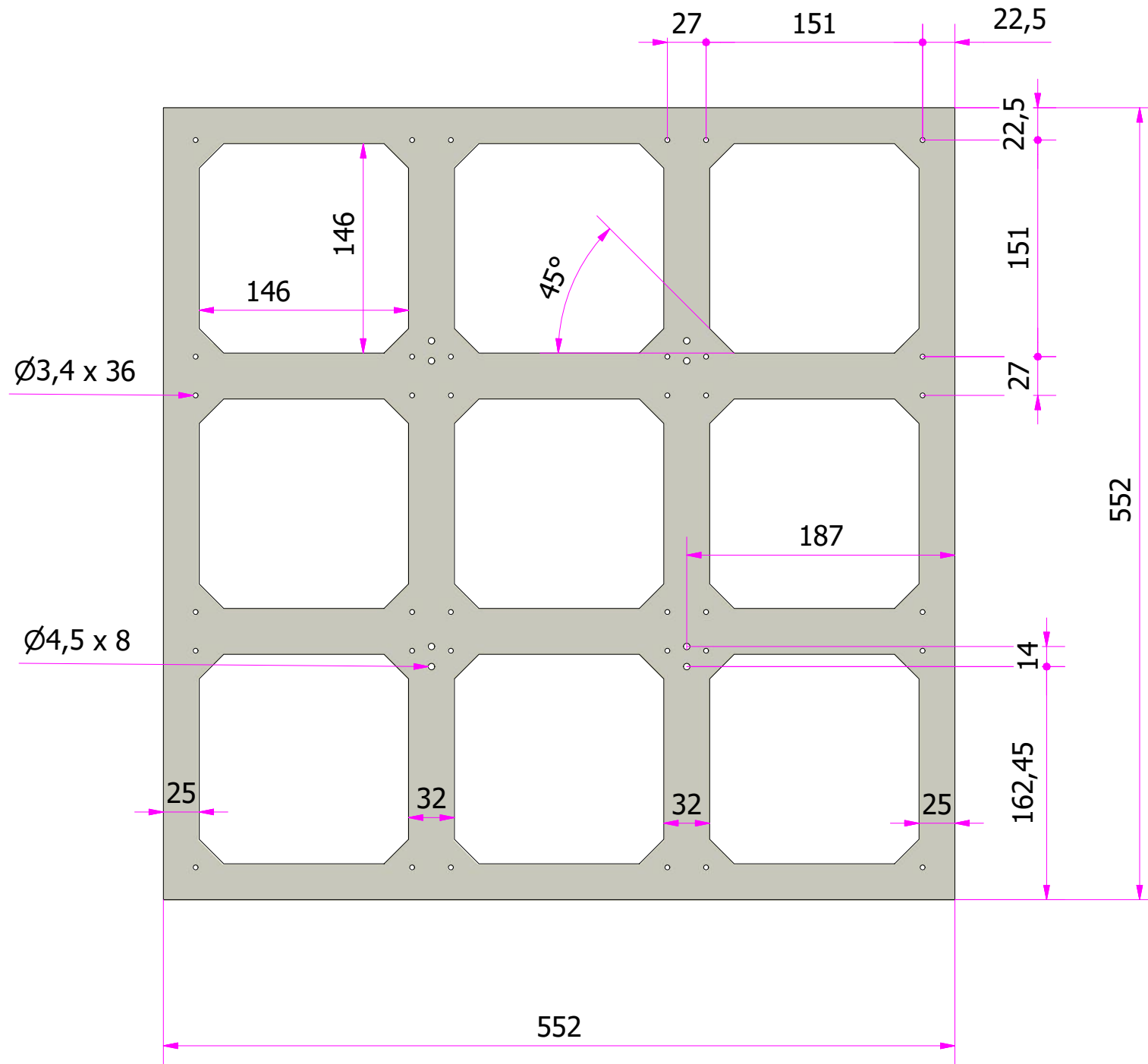
Pealtvaade ( 1:6 )



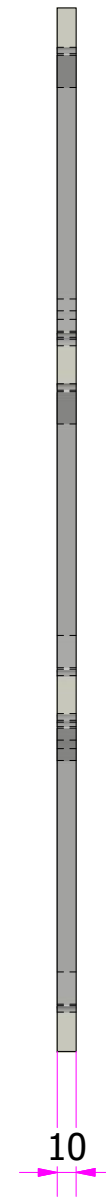
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 1 / 19
Koostaja: <b>Madis Löper</b>	Allkirjastatud digitaalselt <b>04.05.19</b>	Päikese jägimisseade	
Juhendaja: <b>Prof. Lauri Kütt</b>	Allkirjastatud digitaalselt <b>04.05.19</b>		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	



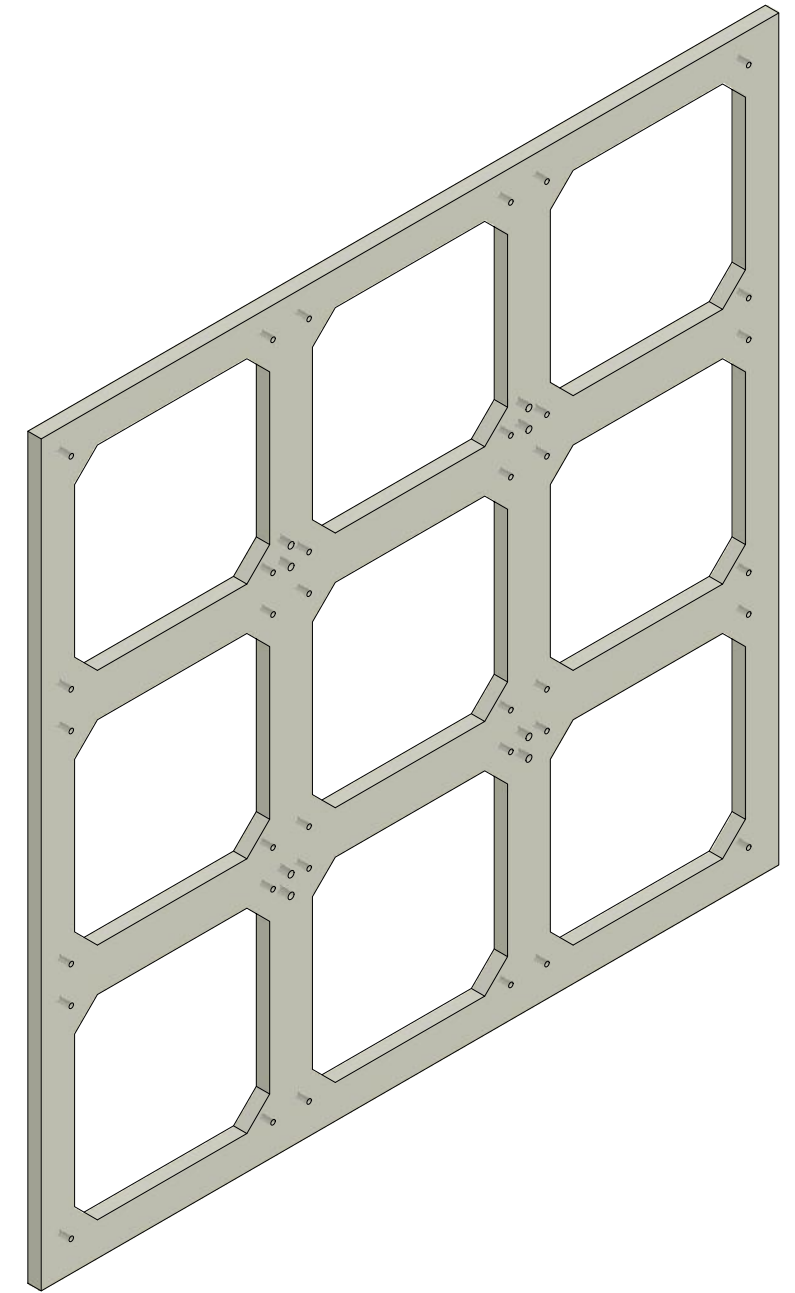
Eestvaade ( 1:4 )



Vasakultvaade ( 1:4 )



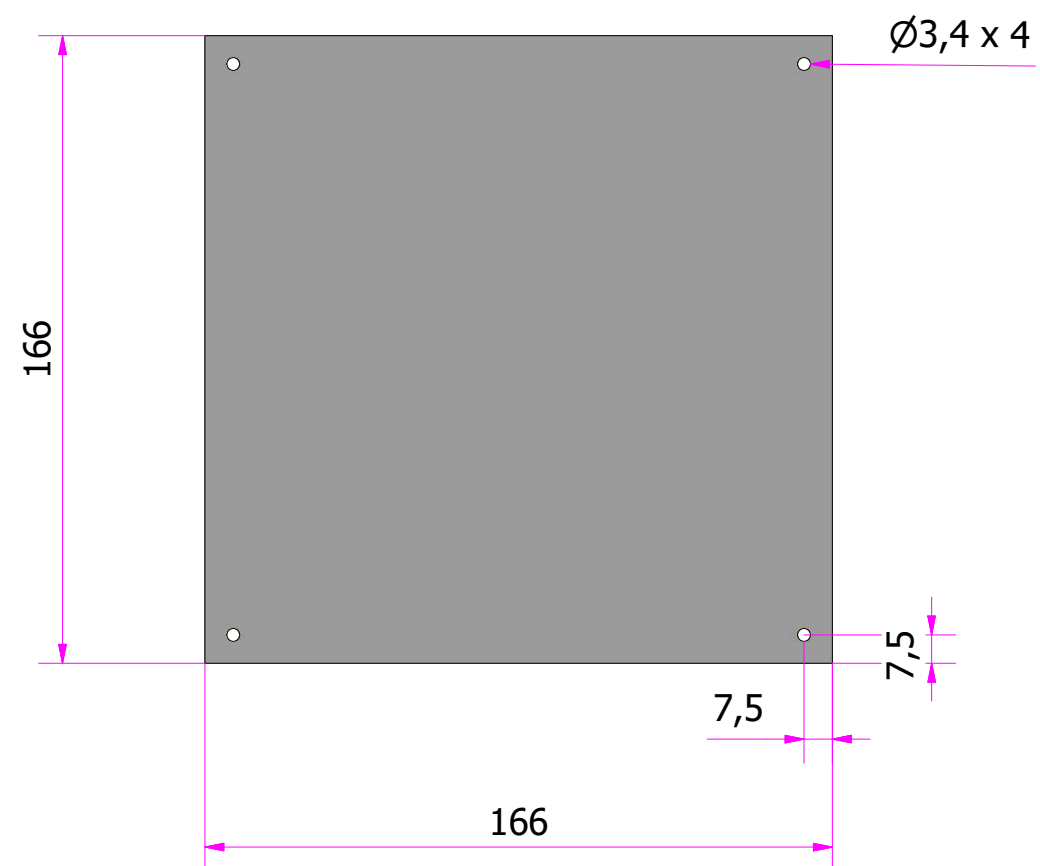
3D-vaade ( 1:4 )



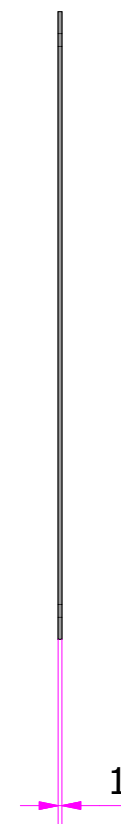
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 2 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Elementide raam	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

### **Lisa L1.3. Elementide kinnitus**

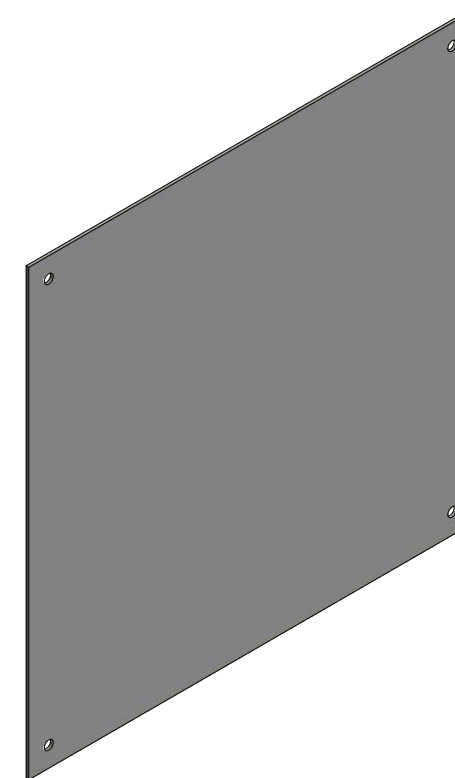
Eestvaade ( 1:2 )



Vasakultvaade ( 1:2 )



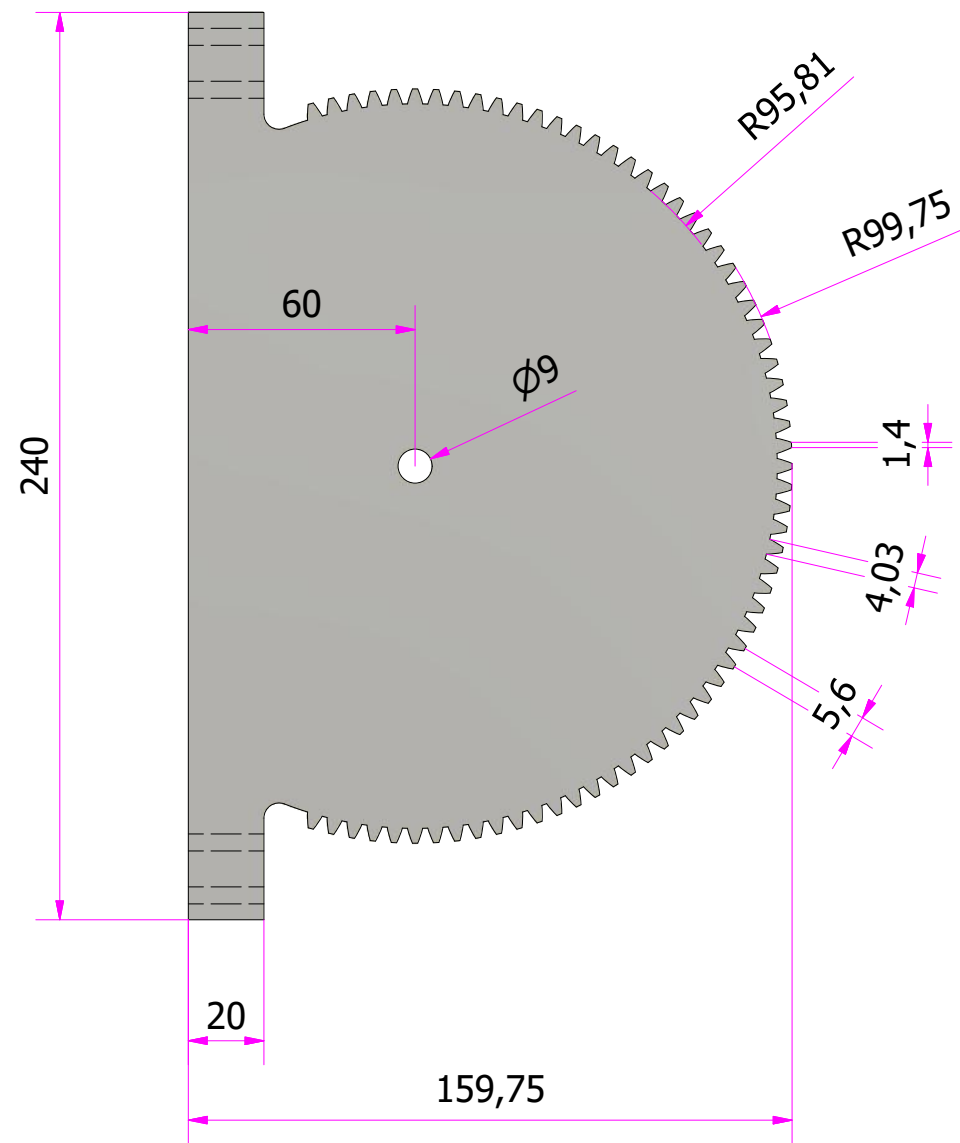
3D-vaade ( 1:2 )



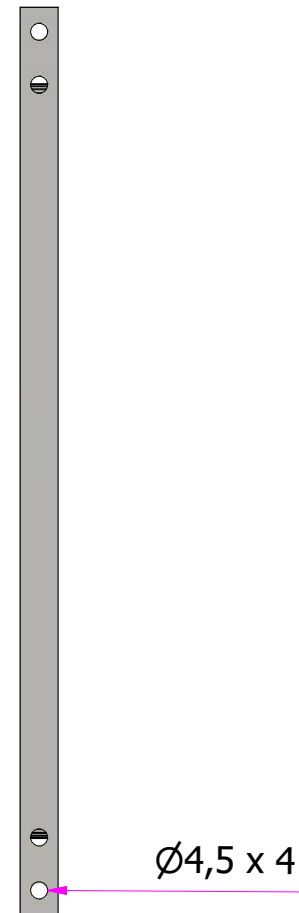
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 3 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Elementide kinnitus	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

#### **Lisa L1.4. Horisontaalteije suur hammasratas**

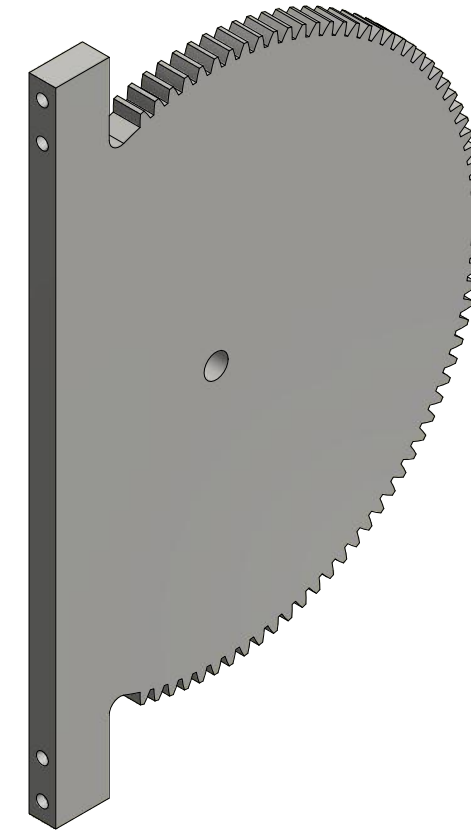
Eestvaade ( 1:2 )



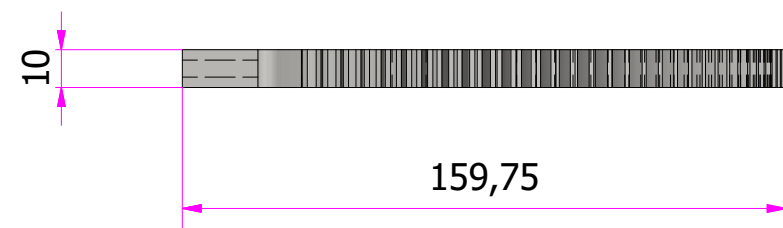
Vasakultvaade ( 1:2 )



3D-vaade ( 1:2 )



Pealtvaade ( 1:2 )

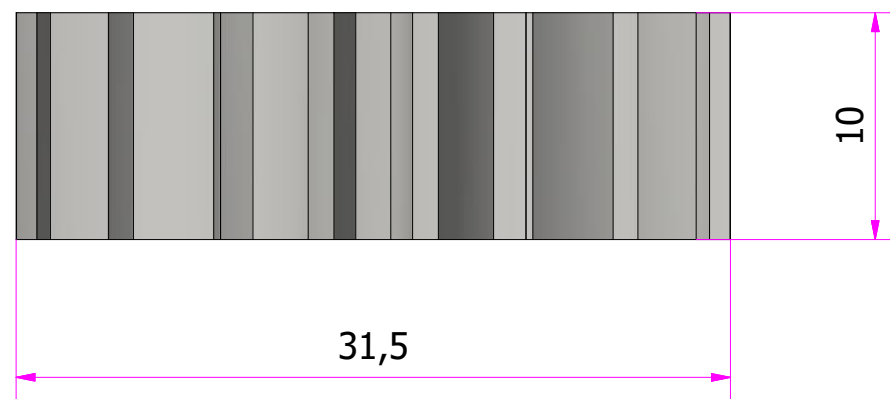


TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 4 / 19
Koostaja: <b>Madis Löper</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Horisontaaltelje suur hammasratas	
Juhendaja: <b>Prof. Lauri Kütt</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

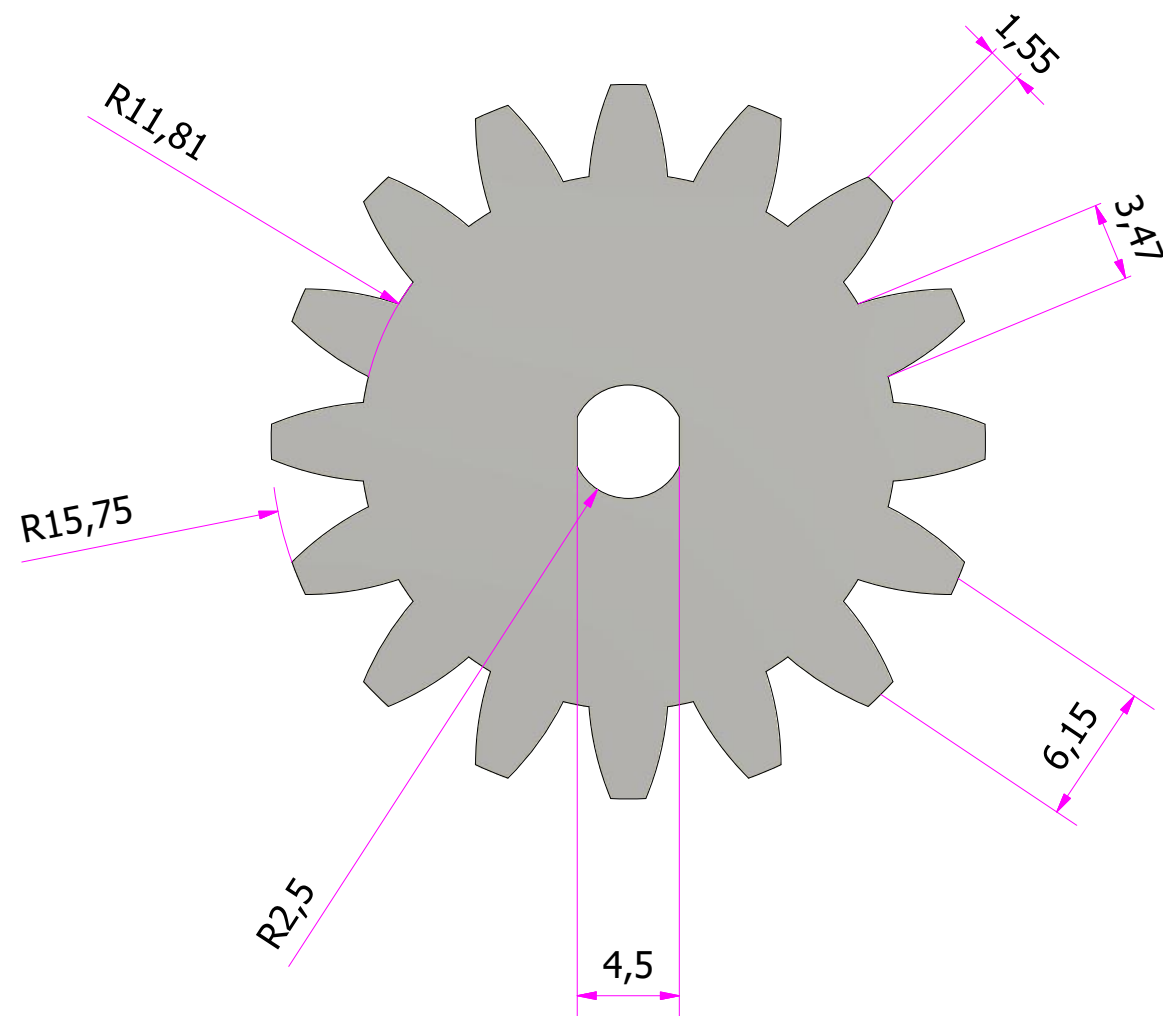


## Lisa L1.5. Horisontaaltelje väike hammasratas

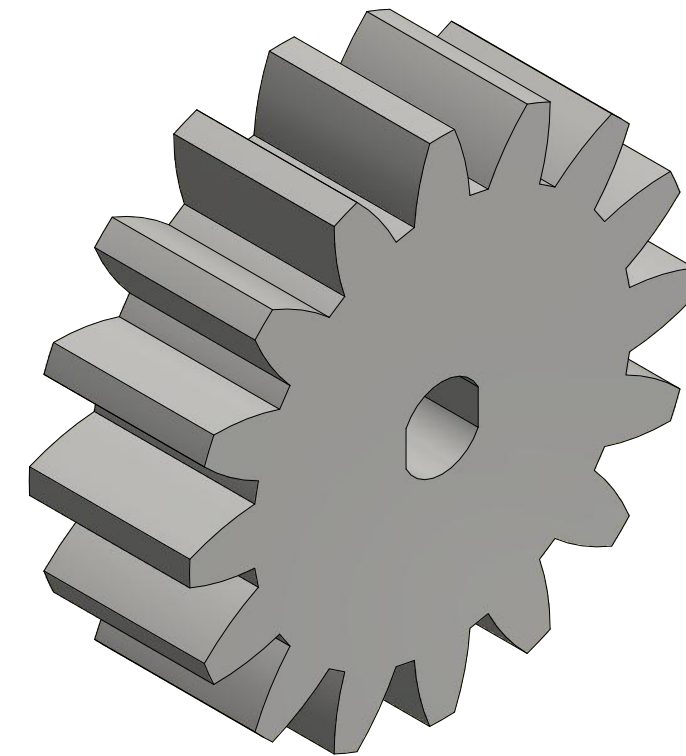
Eestvaade ( 3:1 )



Pealtvaade ( 3:1 )



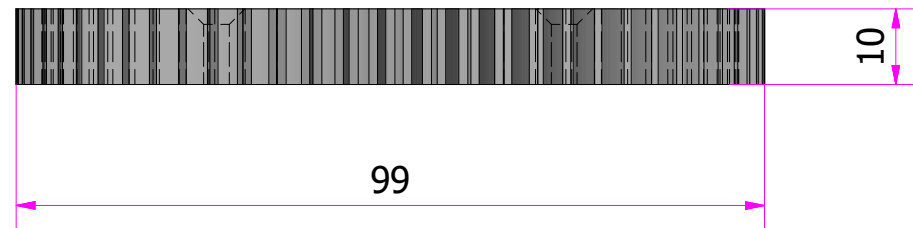
3D-vaade ( 3:1 )



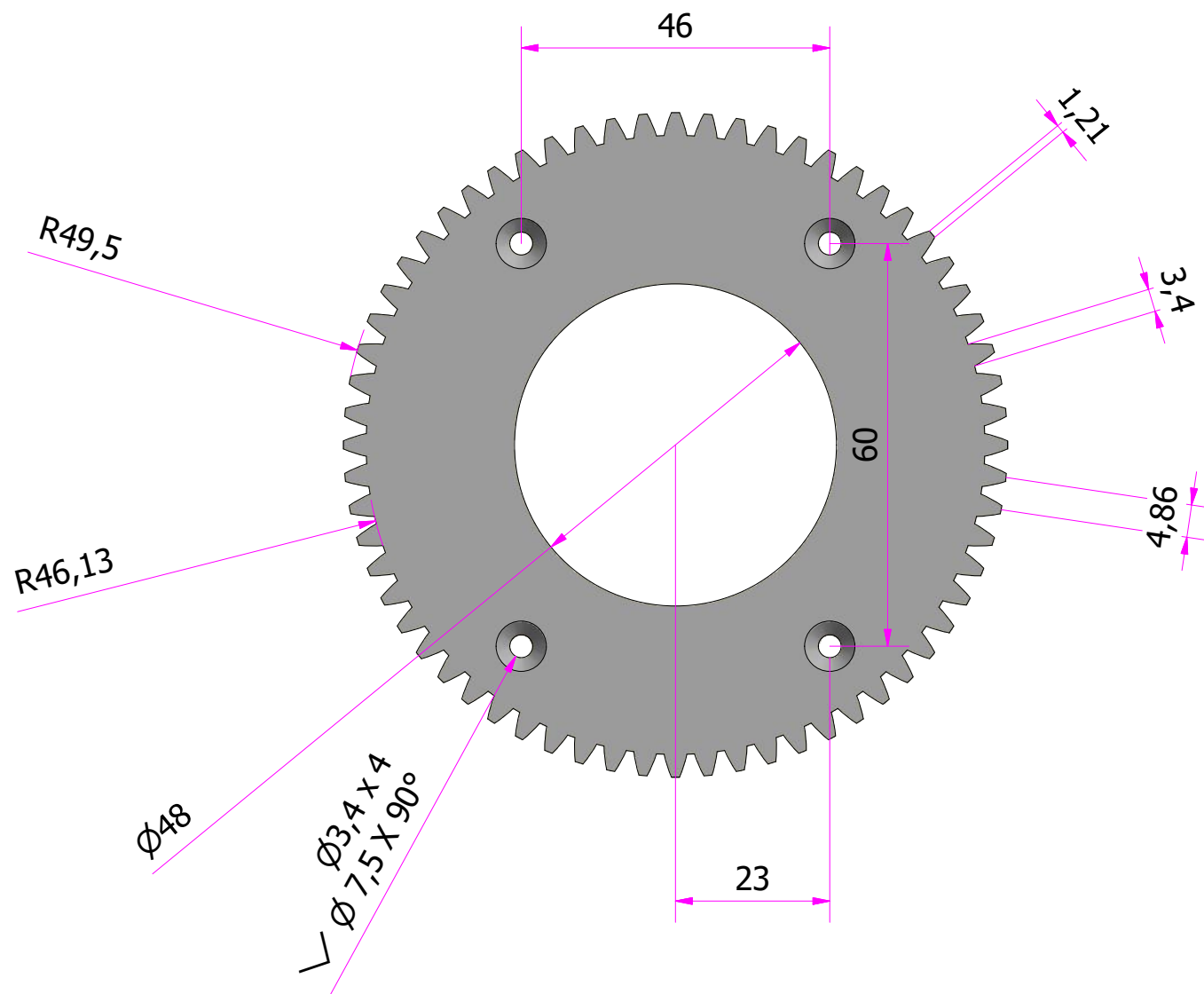
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 5 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Horisontaaltelje väike hammasratas	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

## Lisa L1.6. Vertikaaltehje suur hammasratas

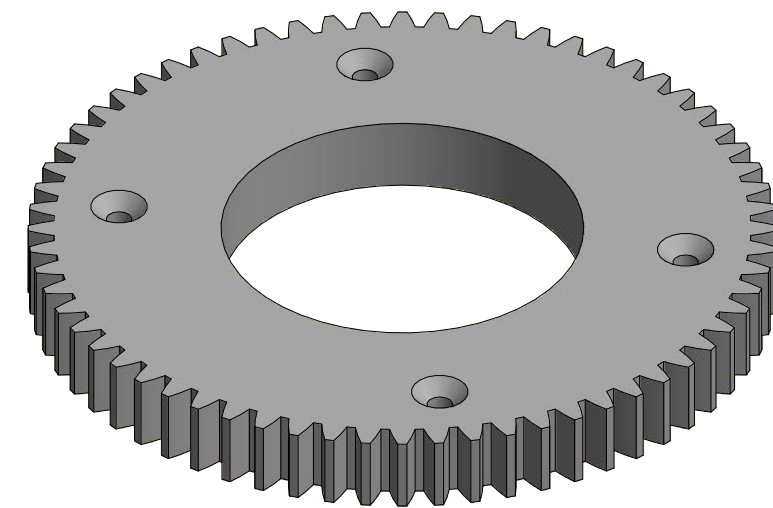
Eestvaade ( 1 : 1 )



Pealtvaade ( 1 : 1 )



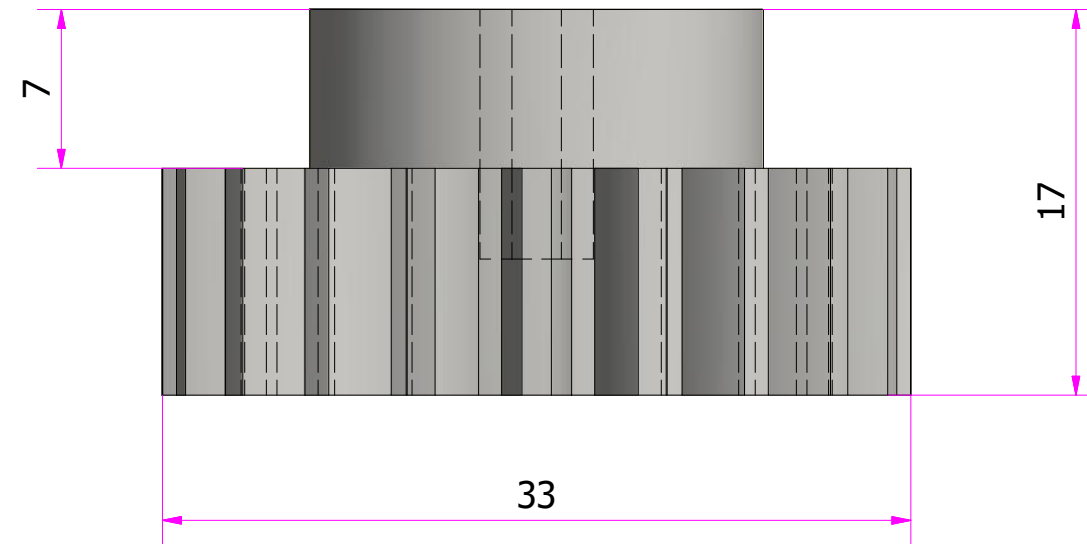
3D-vaade ( 1 : 1 )



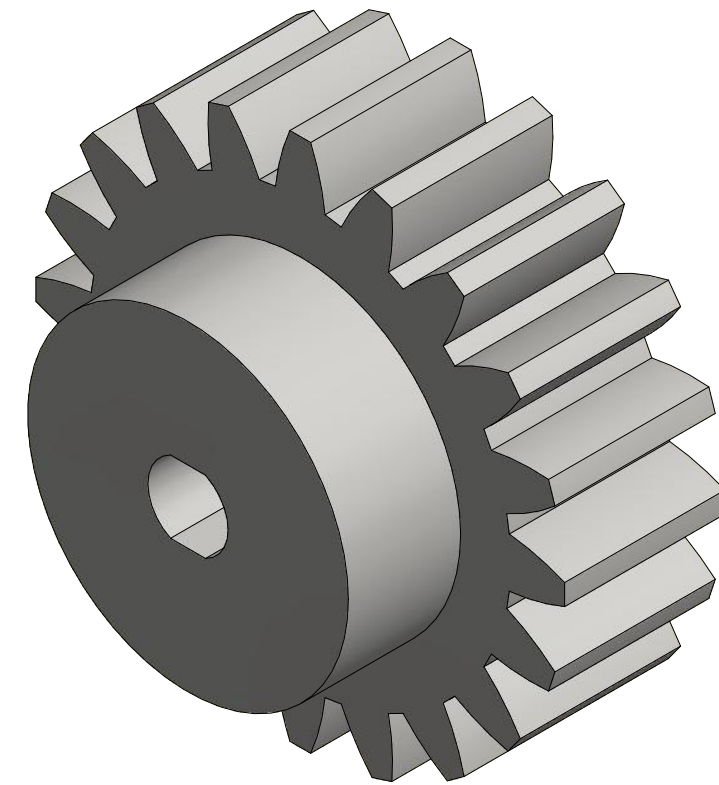
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 6 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Vertikaaltelje suur hammasratas	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

## Lisa L1.7. Vertikaaltelje väike hammasratas

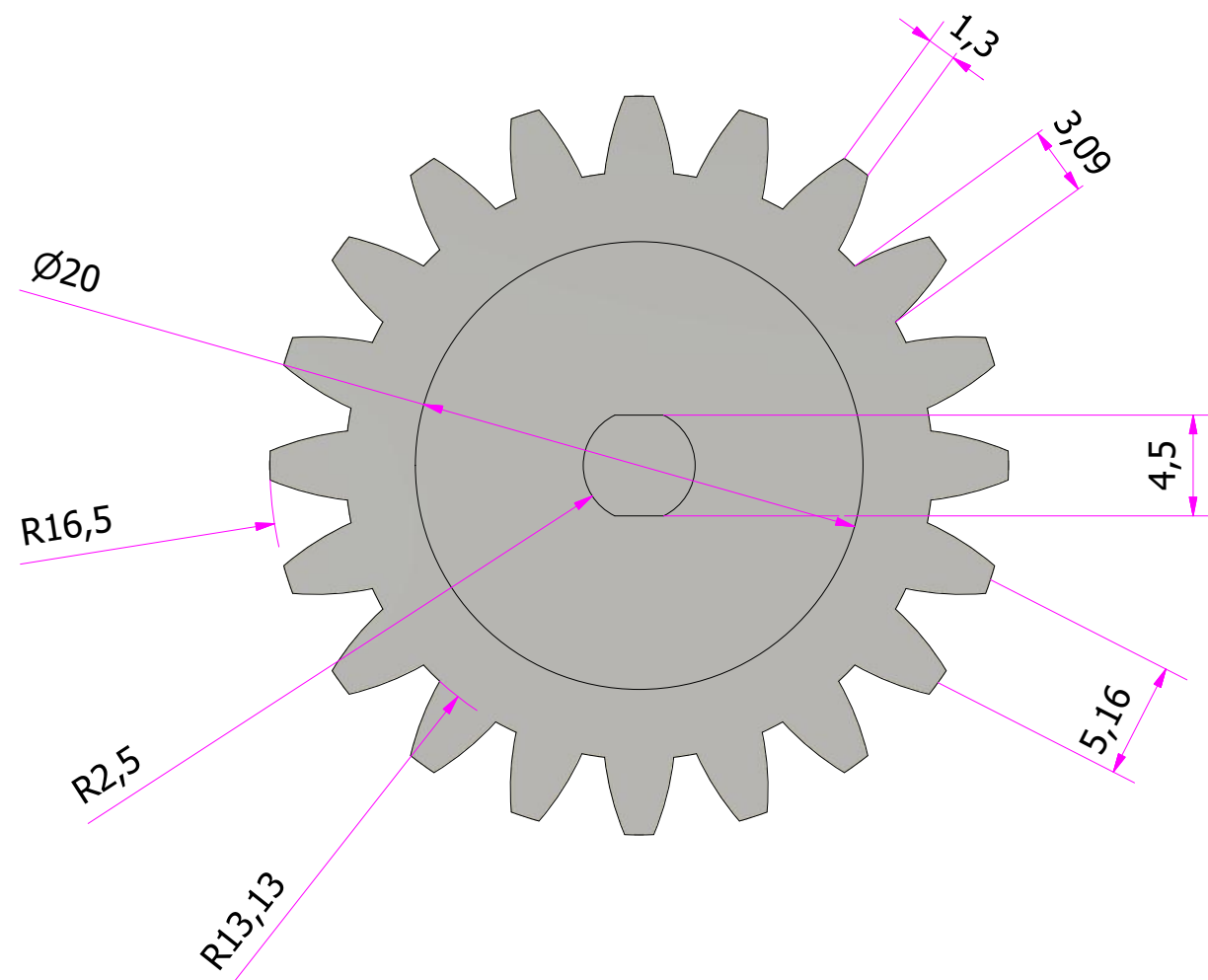
Eestvaade ( 3:1 )



3D-vaade ( 3:1 )



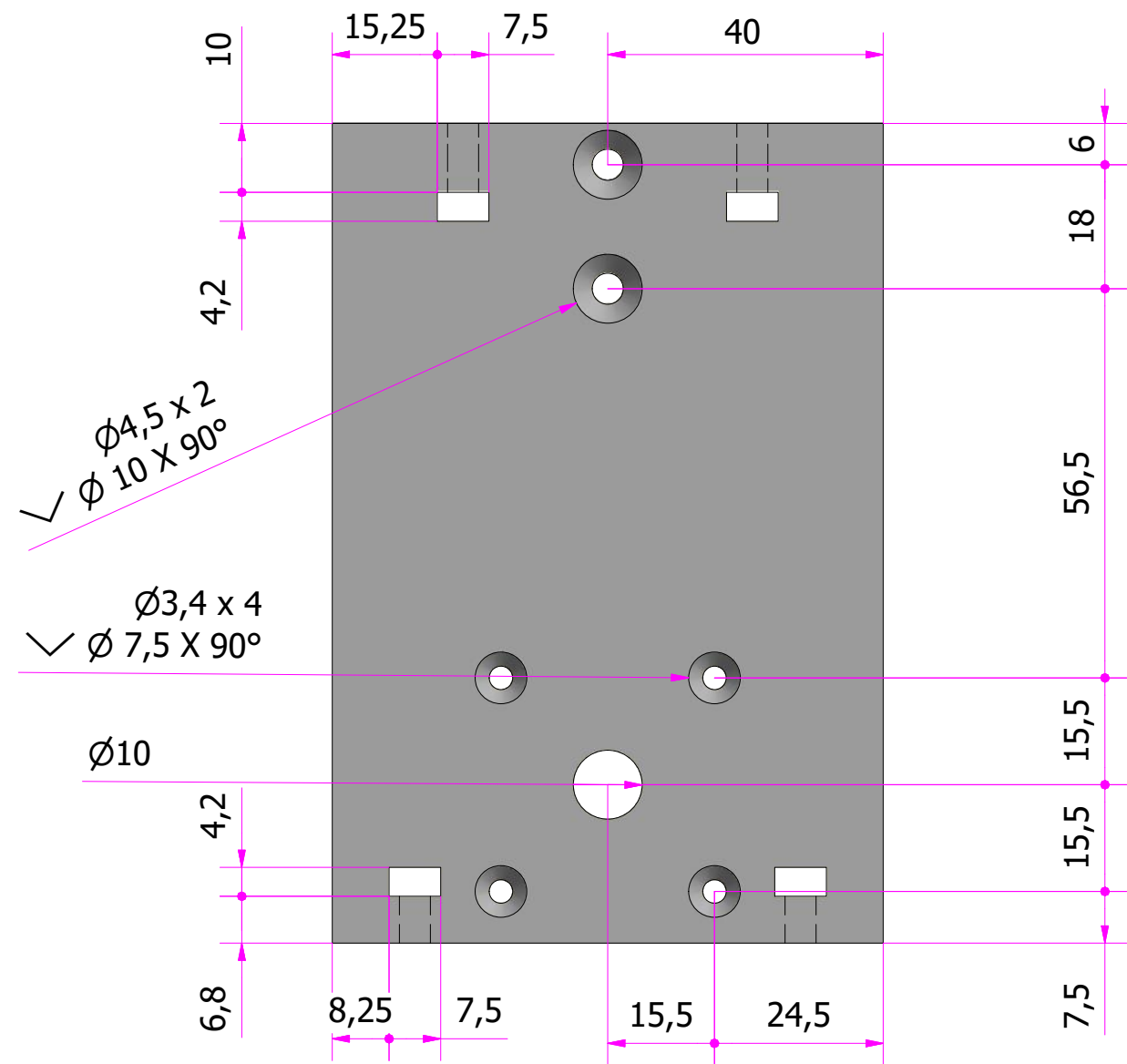
Pealtvaade ( 3:1 )



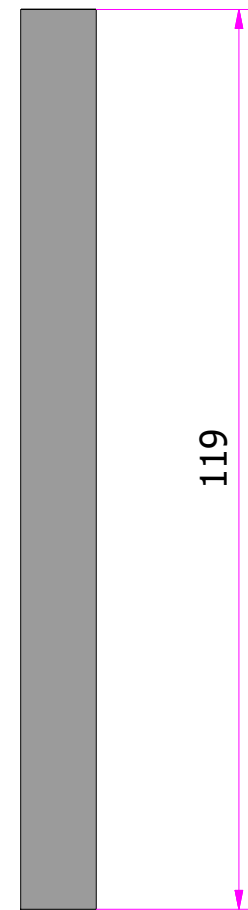
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 7 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt	04.05.19	Vertikaaltelje väike hammasratas
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt	04.05.19	
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut			Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes

**Lisa L1.8. Külje detail mootori kinnitusega**

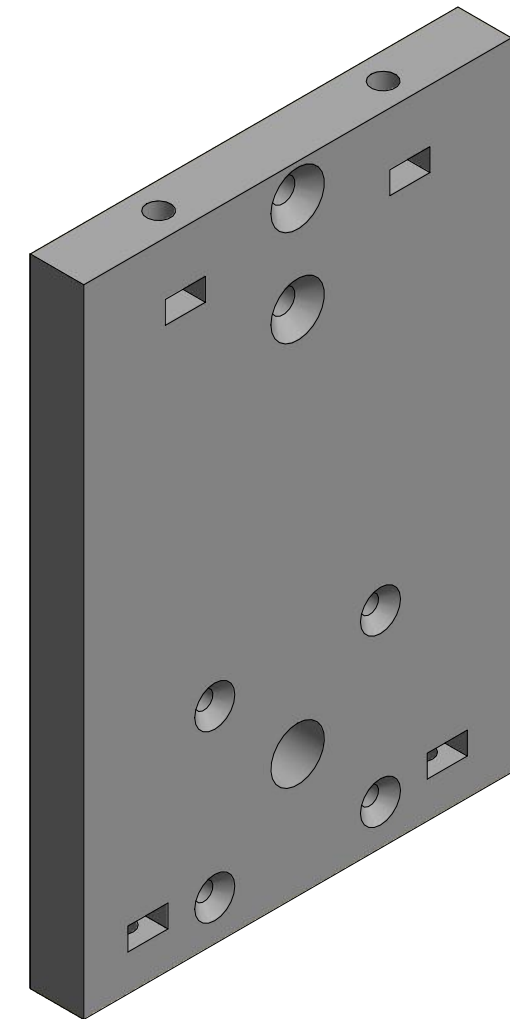
Eestvaade ( 1 : 1 )



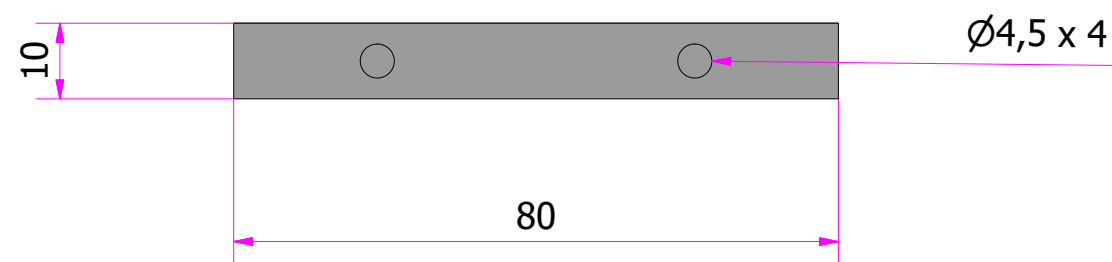
Vasakultvaade ( 1 : 1 )



3D-vaade ( 1 : 1 )



Pealtvaade ( 1 : 1 )

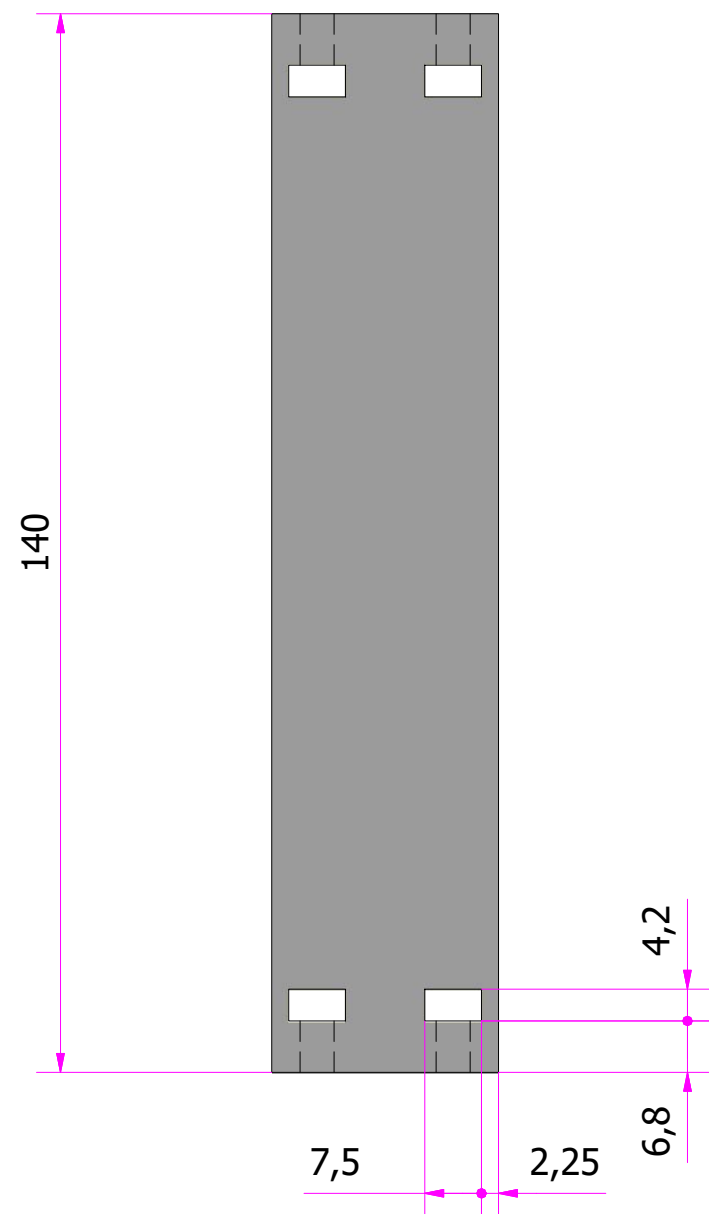


TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 8 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Külje detail mootorikinnitusega	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

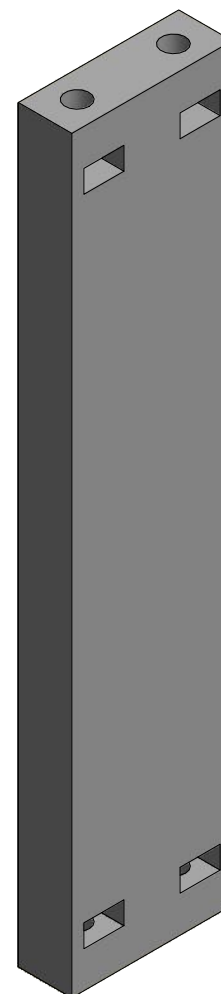


## Lisa L1.9. Ülemine toetusplaat

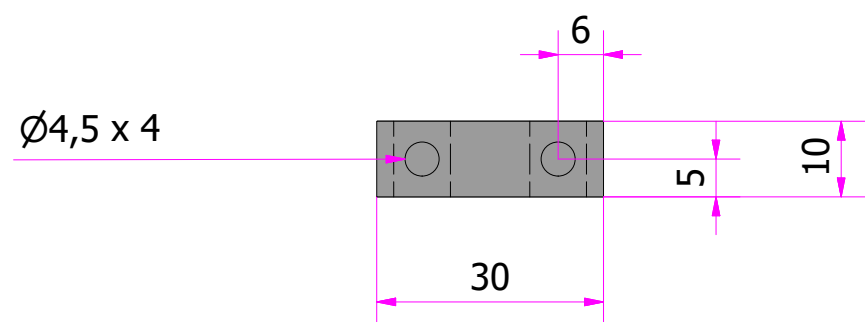
Eestvaade ( 1 : 1 )



3D-vaade ( 1 : 1 )



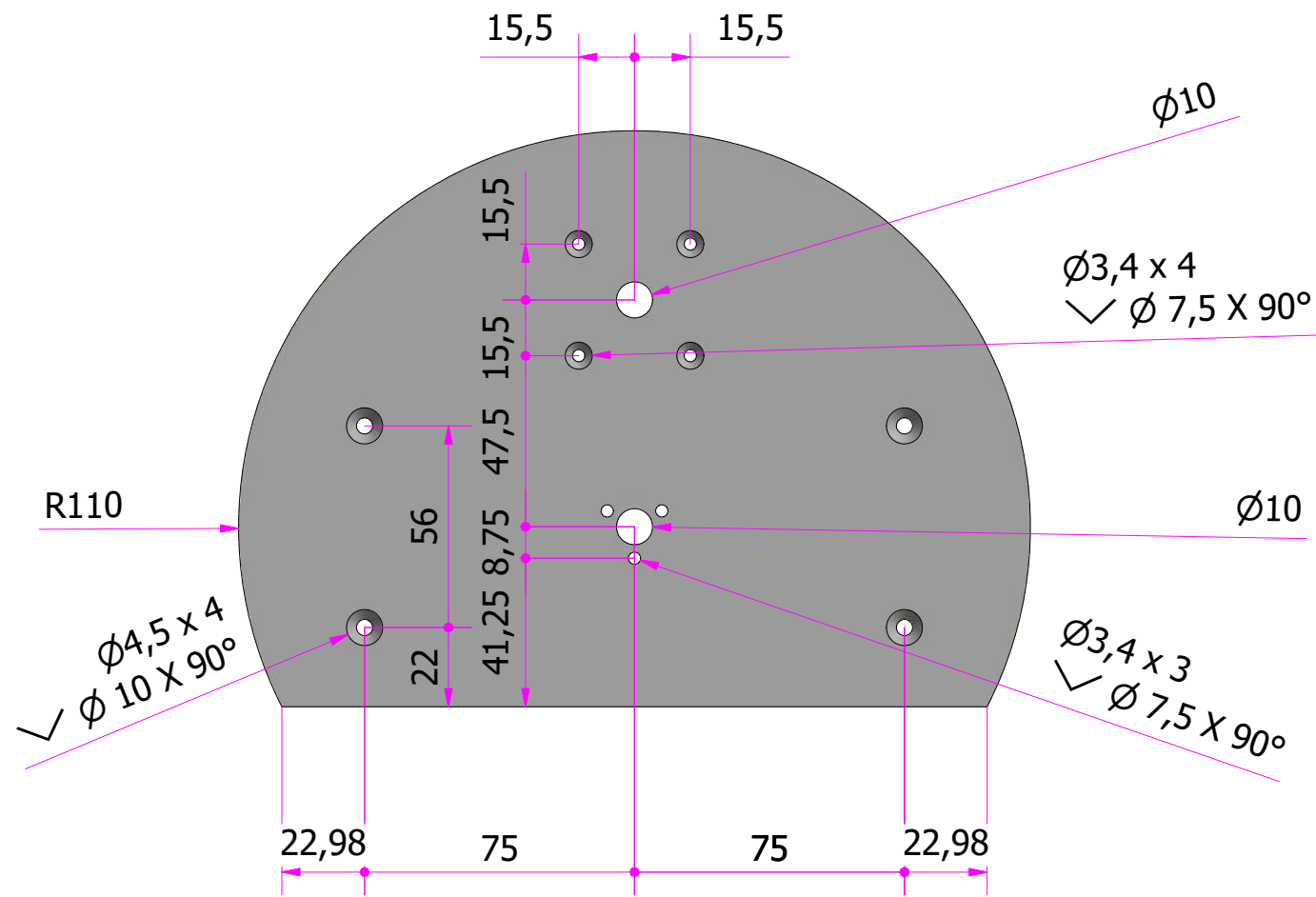
Pealtvaade ( 1 : 1 )



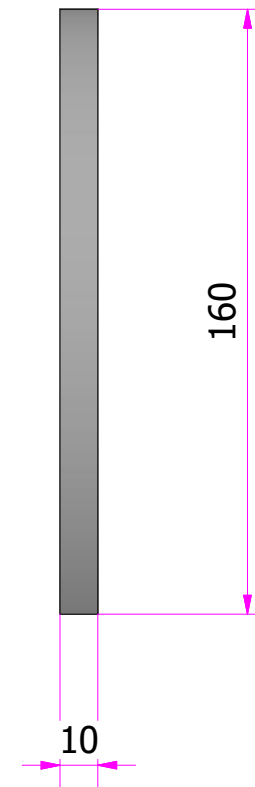
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 9 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Ülemine toetusplaat	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

**Lisa L1.10. Alusplaat mootori kinnitusega**

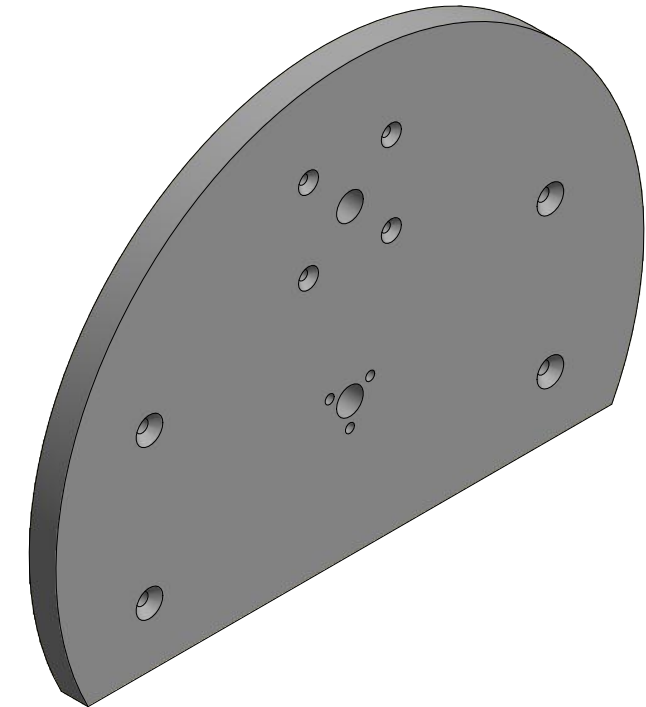
Eestvaade ( 1:2 )



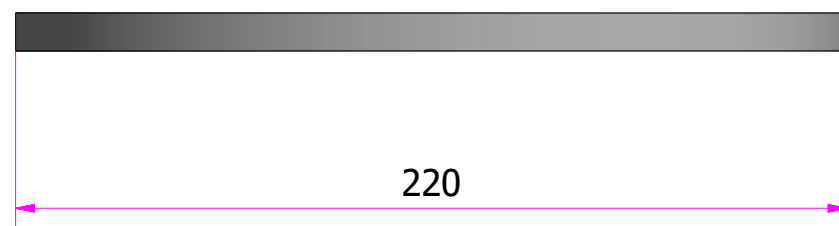
Vasakultvaade ( 1:2 )



3D-vaade ( 1:2 )



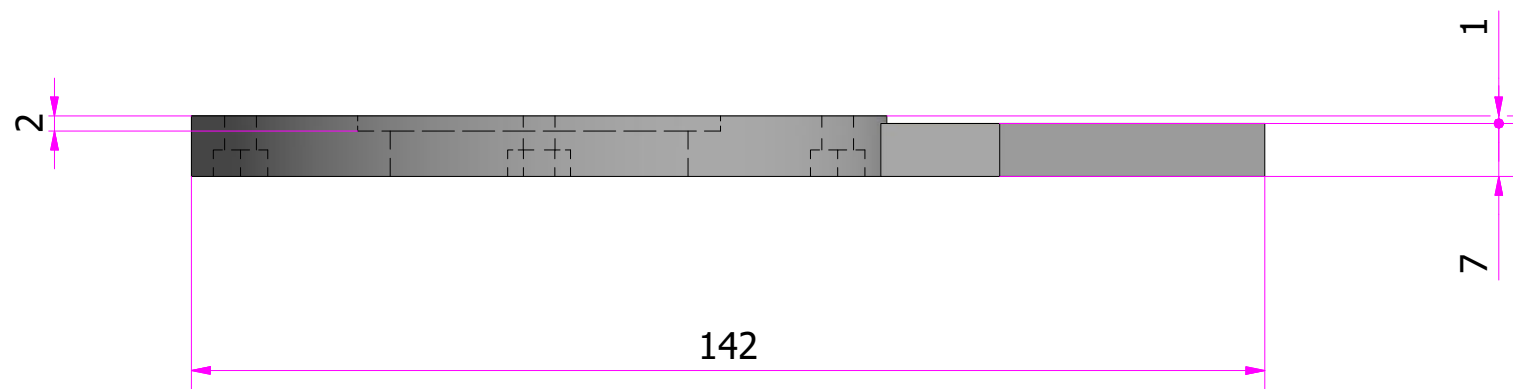
Pealtvaade ( 1:2 )



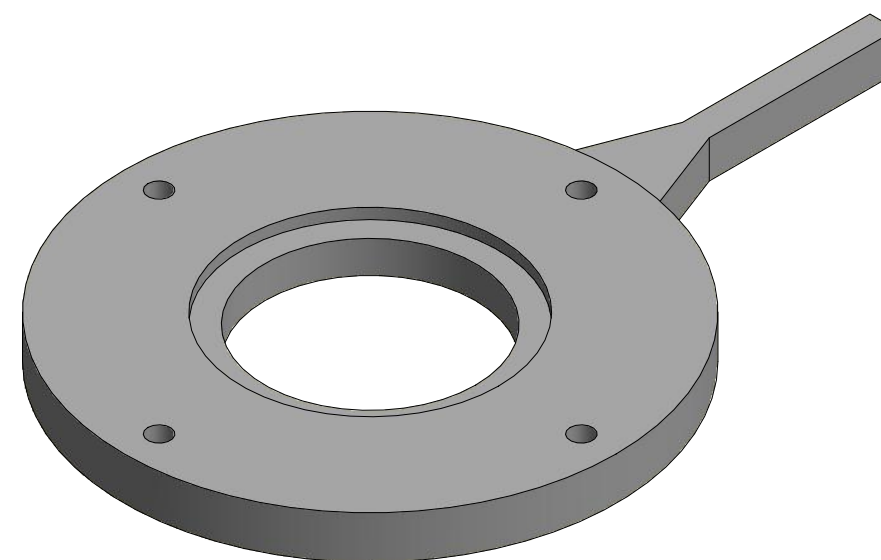
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 10 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Alusplaat mootorikinnitusega	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

## Lisa L1.11. Laagri kinnitus 1

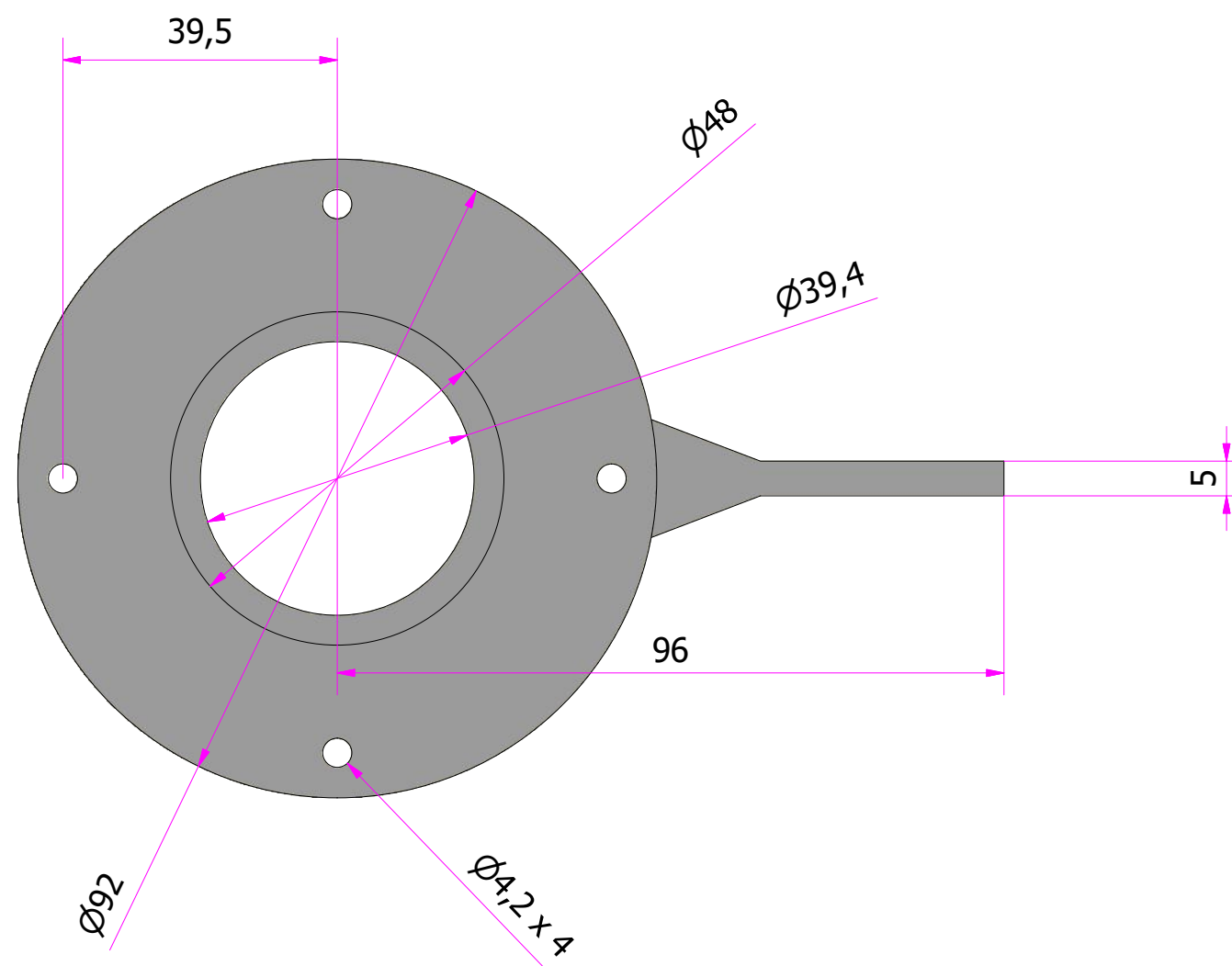
Eestvaade ( 1:1 )



3D-vaade ( 1:1 )



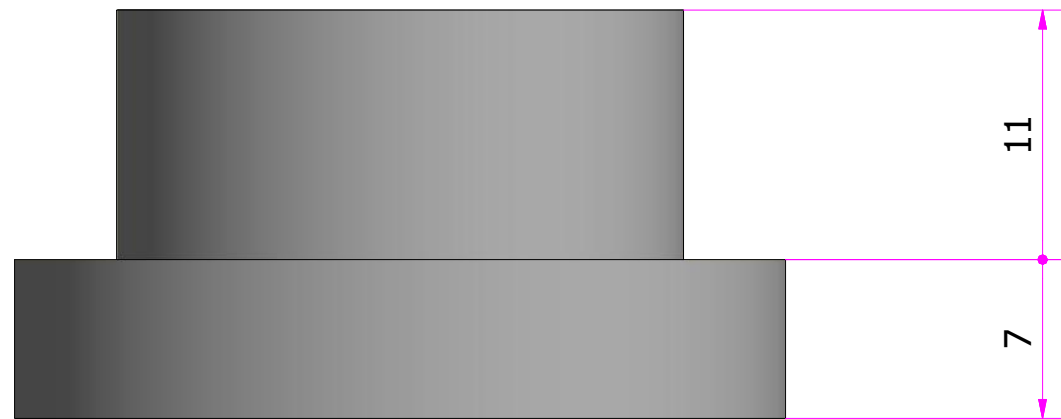
Pealtvaade ( 1:1 )



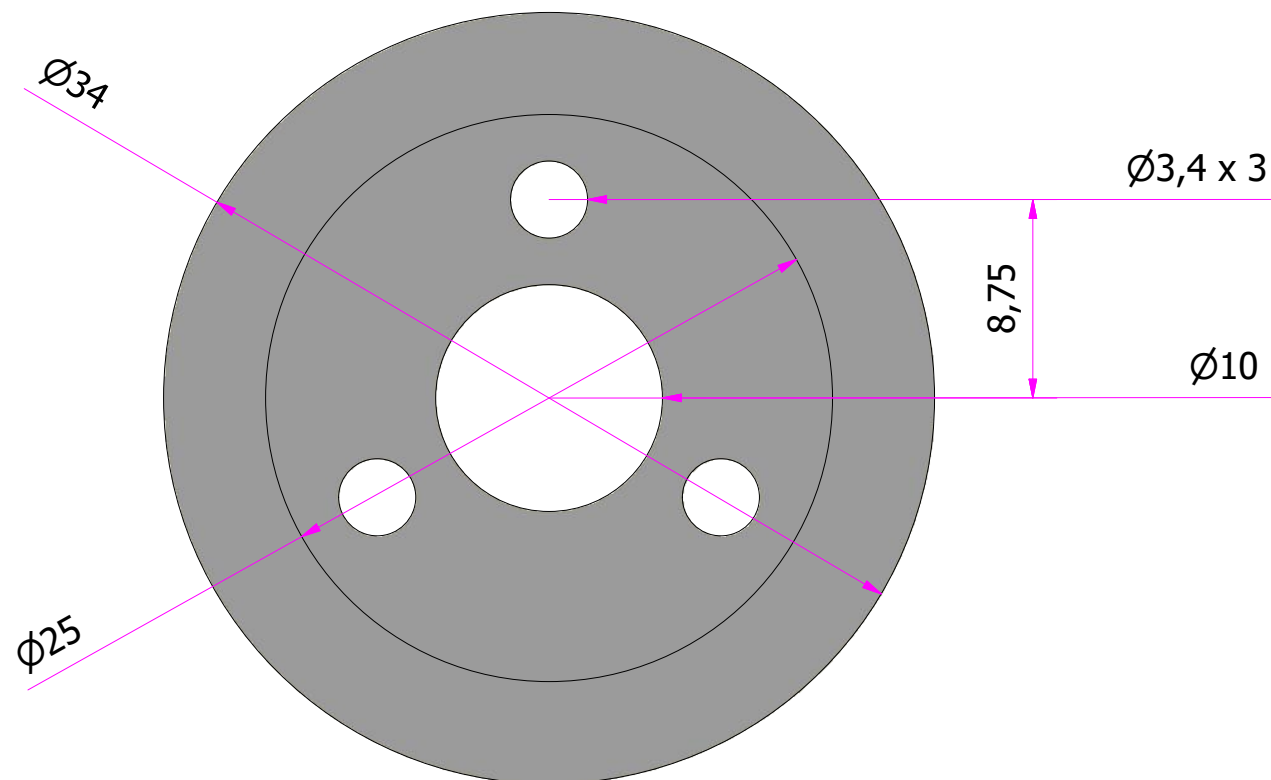
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 11 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Laagrikinnitus 1	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

## Lisa L1.12. Laagri kinnitus 2

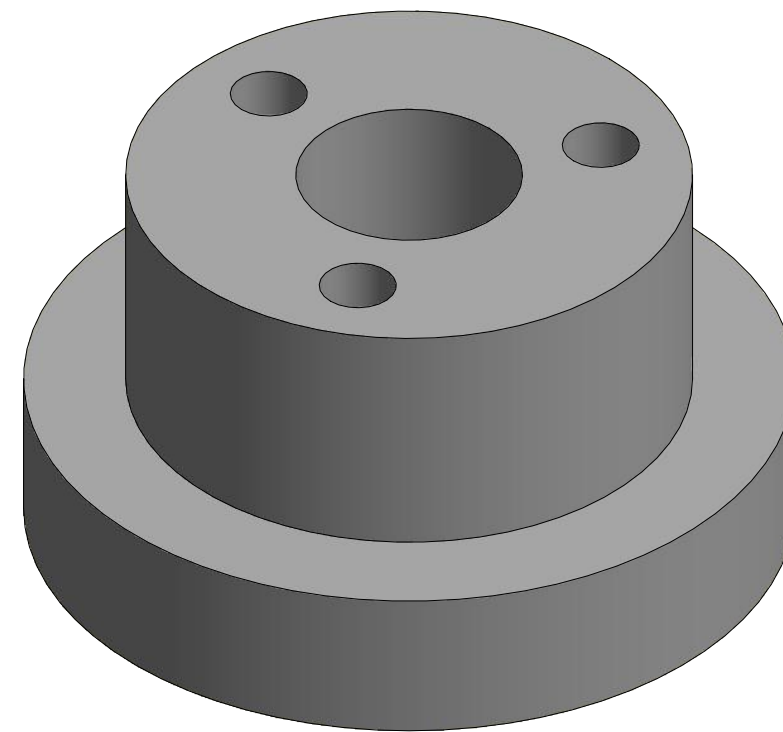
Eestvaade ( 3:1 )



Pealtvaade ( 3:1 )



3D-vaade ( 3:1 )



TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 12 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Laagrikinnitus 2	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

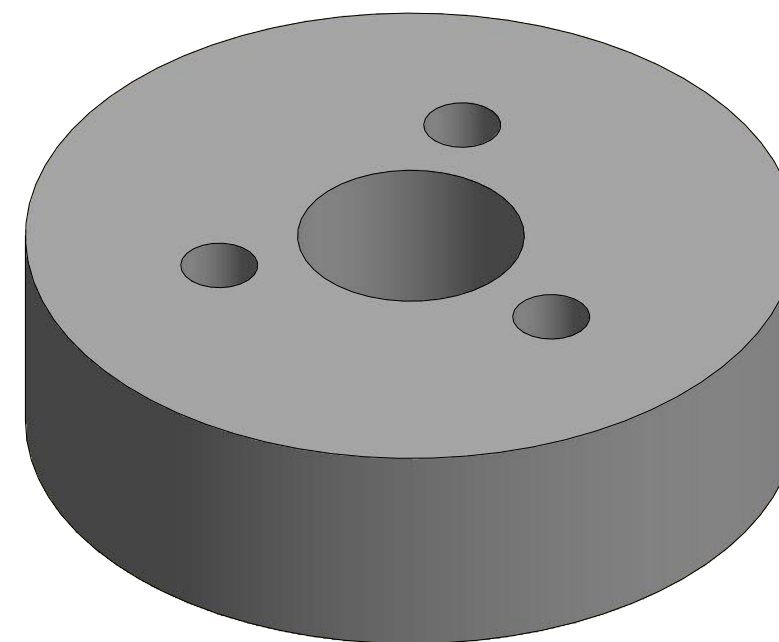


### **Lisa L1.13. Laagri kinnitus 3**

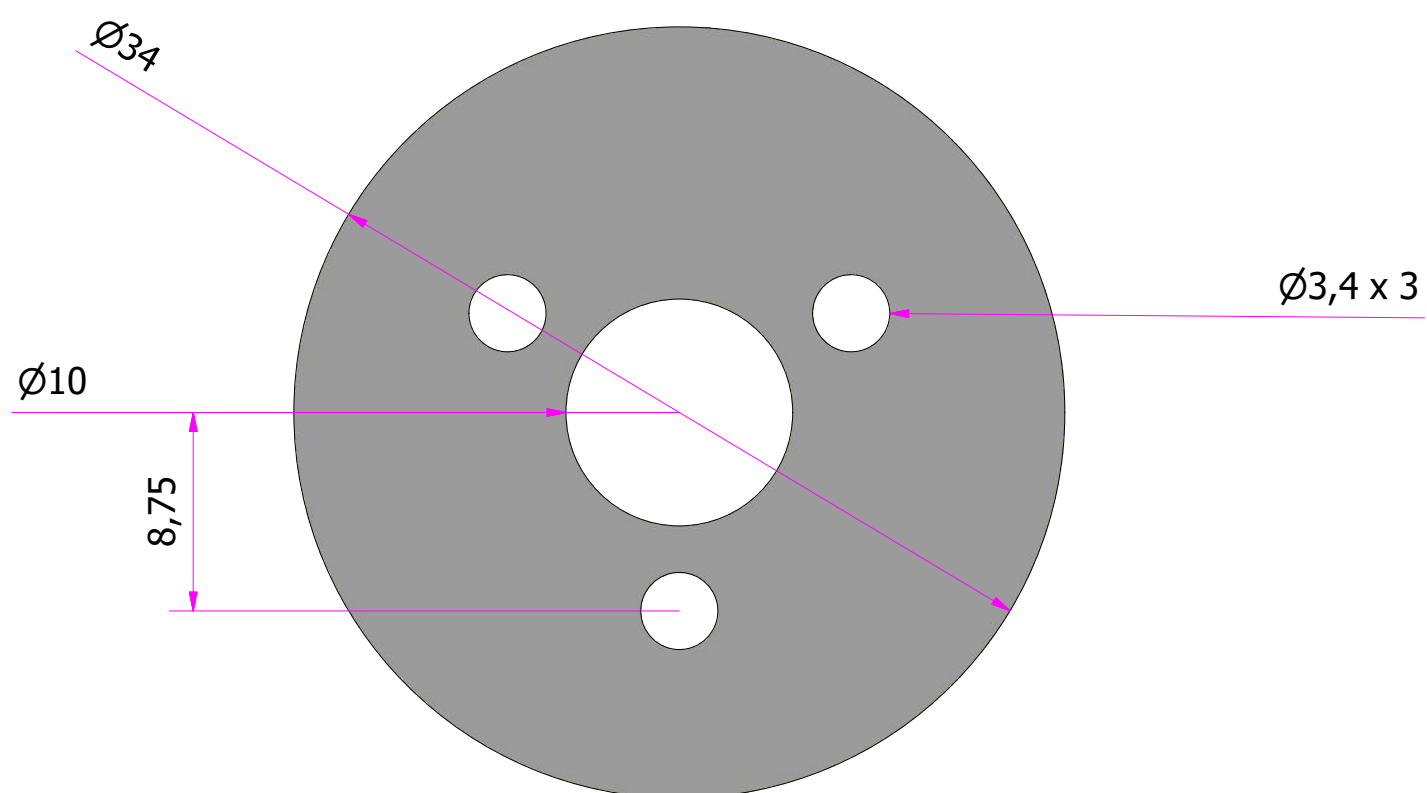
Eestvaade ( 3:1 )



3D-vaade ( 3:1 )



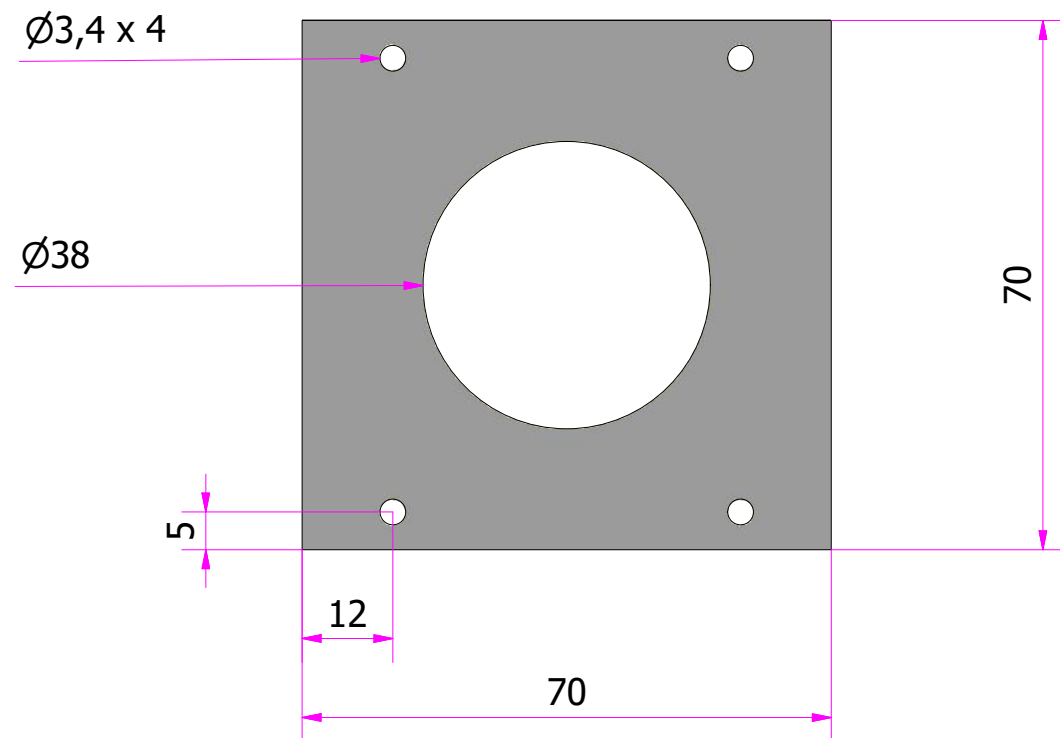
Pealtvaade ( 3:1 )



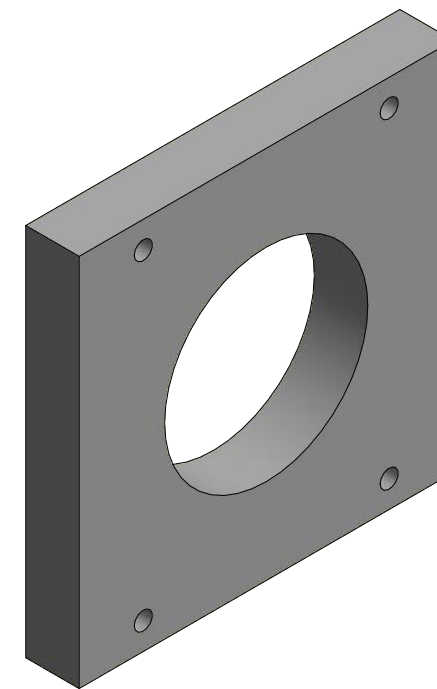
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 13 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Laagrikinnitus 3	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	



Pealtvaade ( 1 : 1 )



3D-vaade ( 1 : 1 )



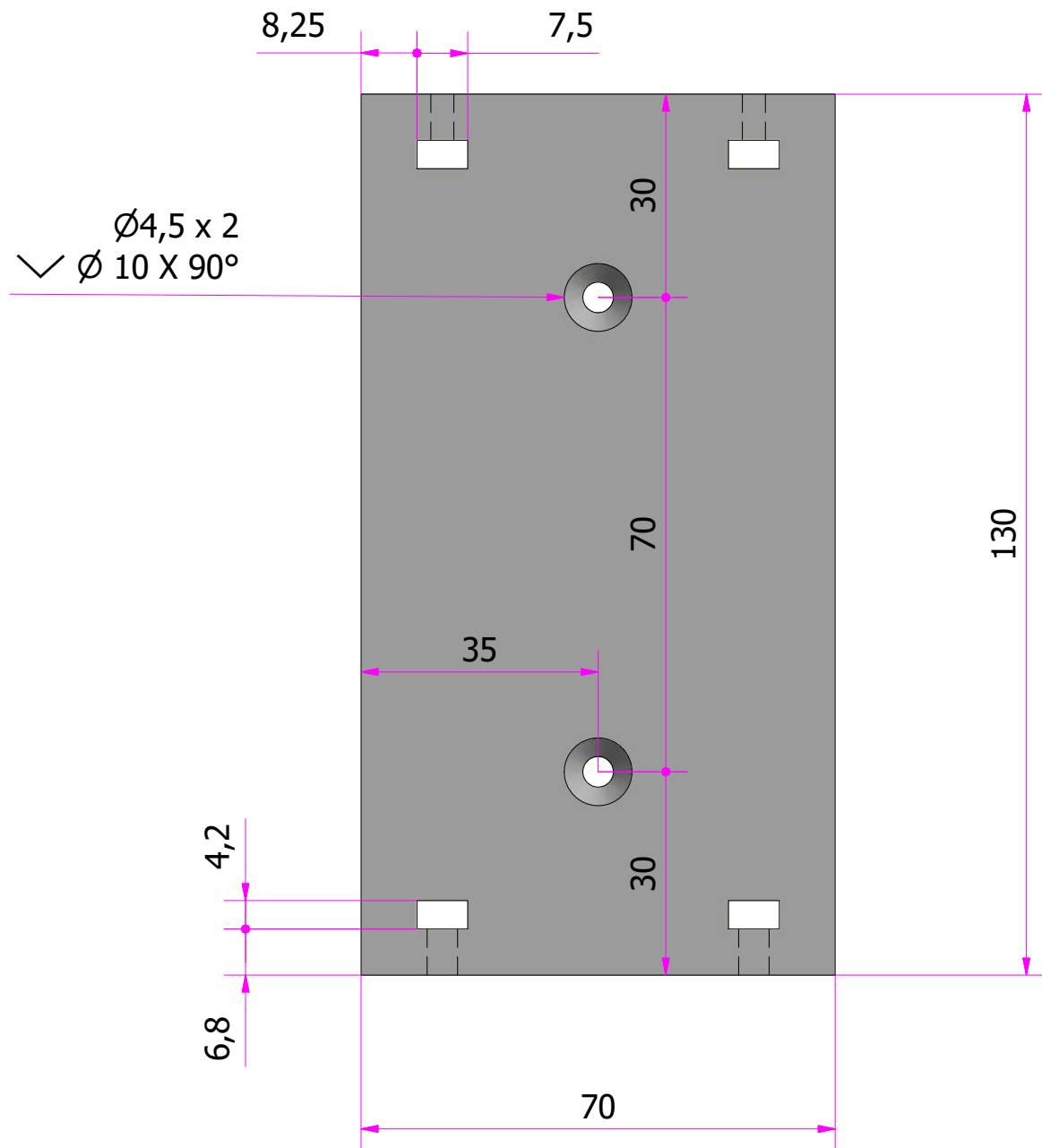
Eestvaade ( 1 : 1 )



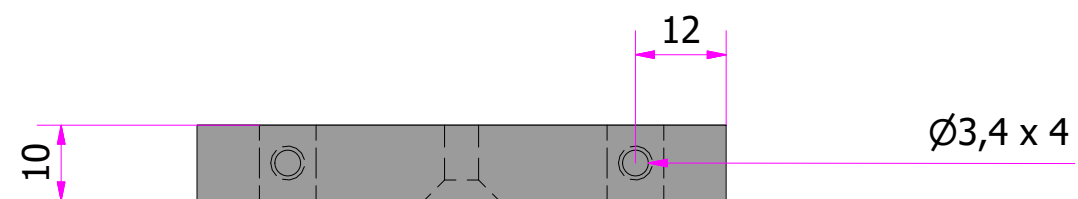
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 14 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Laagripesa	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

**Lisa L1.15. Alumine külje detail**

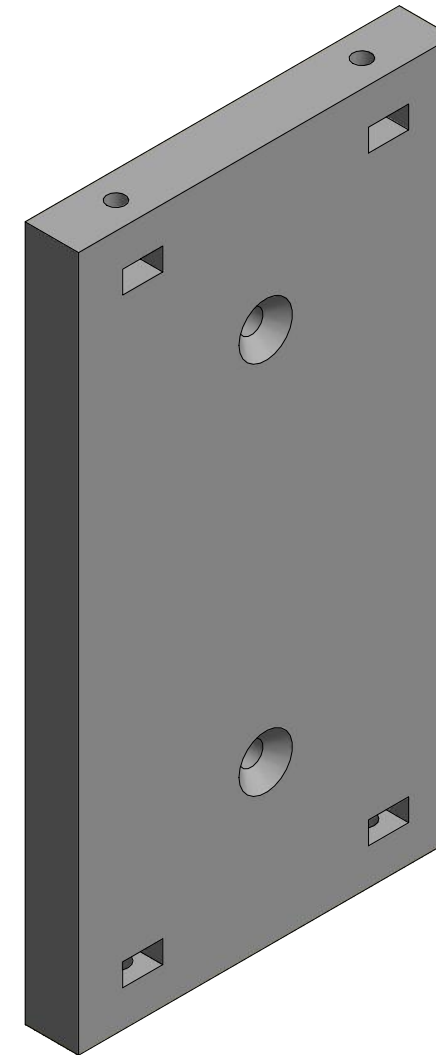
Eestvaade ( 1 : 1 )



Pealtvaade ( 1 : 1 )



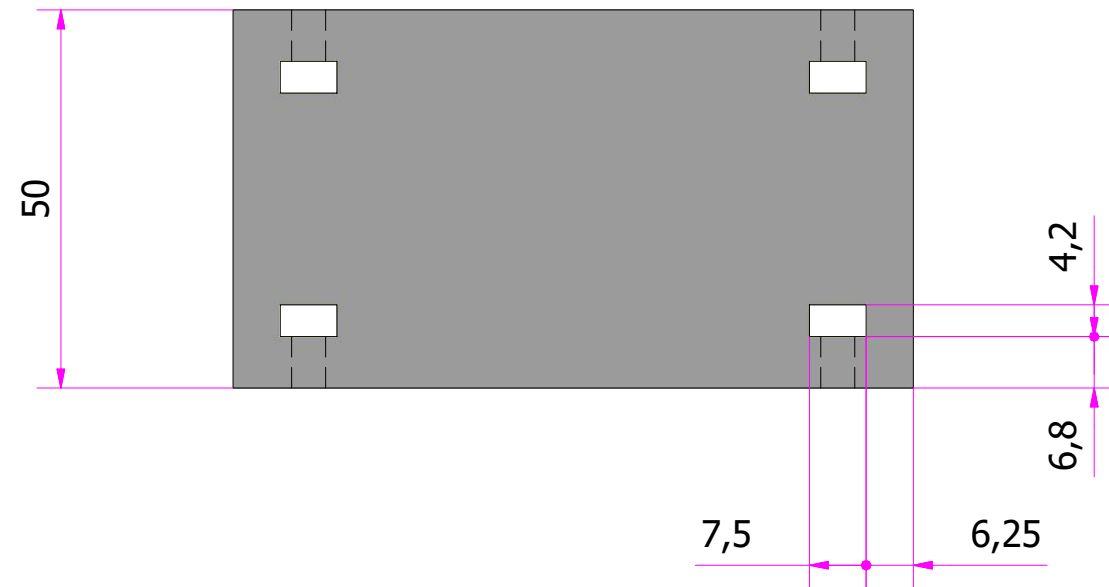
3D-vaade ( 1 : 1 )



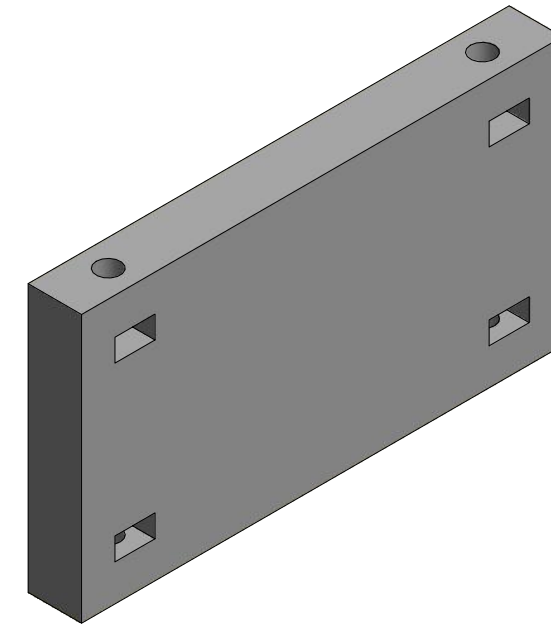
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 15 / 19
Koostaja: <b>Madis Löper</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Alumine külje detail	
Juhendaja: <b>Prof. Lauri Kütt</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

**Lisa L1.16. Alumine toetusplaat**

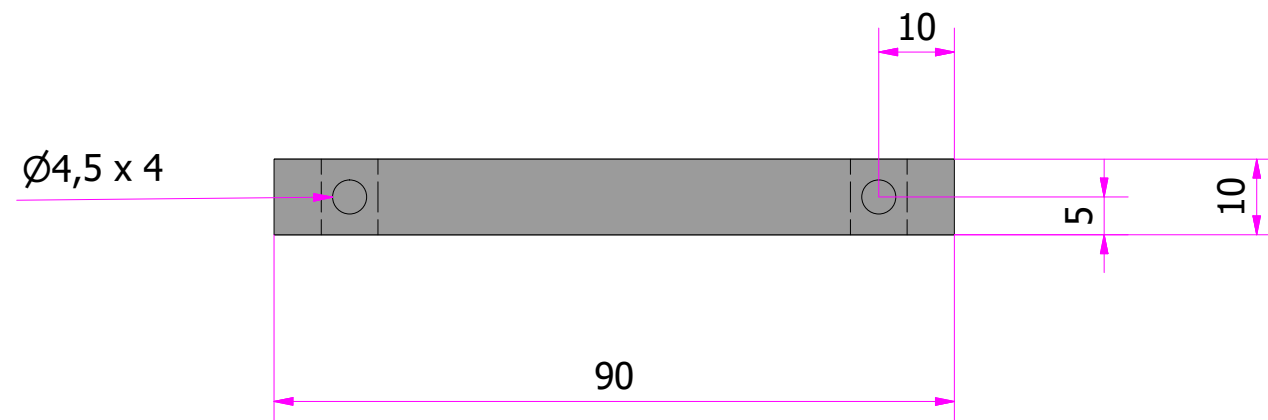
Eestvaade ( 1 : 1 )



3D\_vaade ( 1 : 1 )



Pealtvaade ( 1 : 1 )

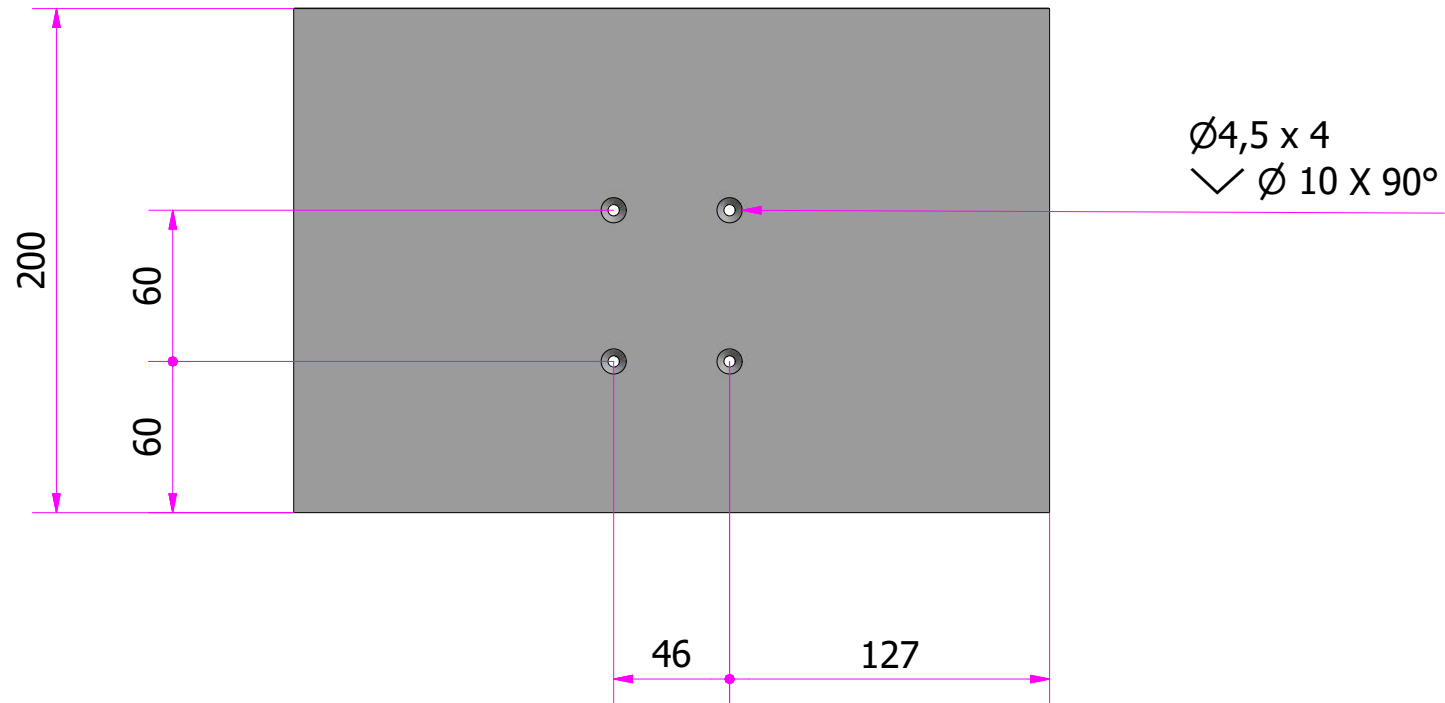


TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 16 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Alumine toetusplaat	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

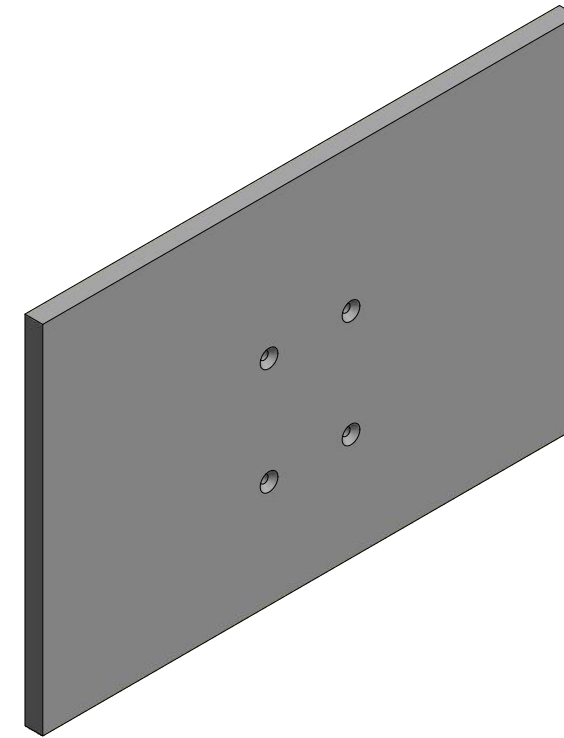


**Lisa L1.17. Alusplaat**

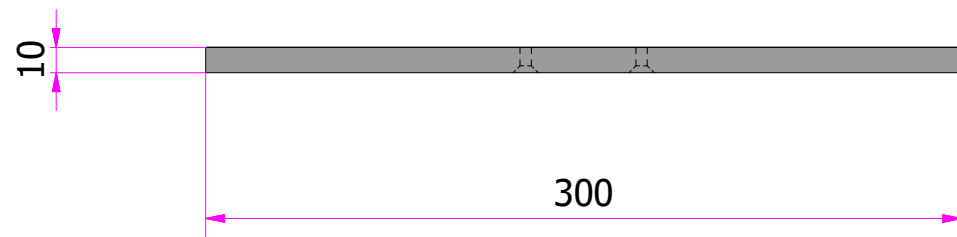
Eestvaade ( 1 : 3 )



3D-vaade ( 1 : 3 )



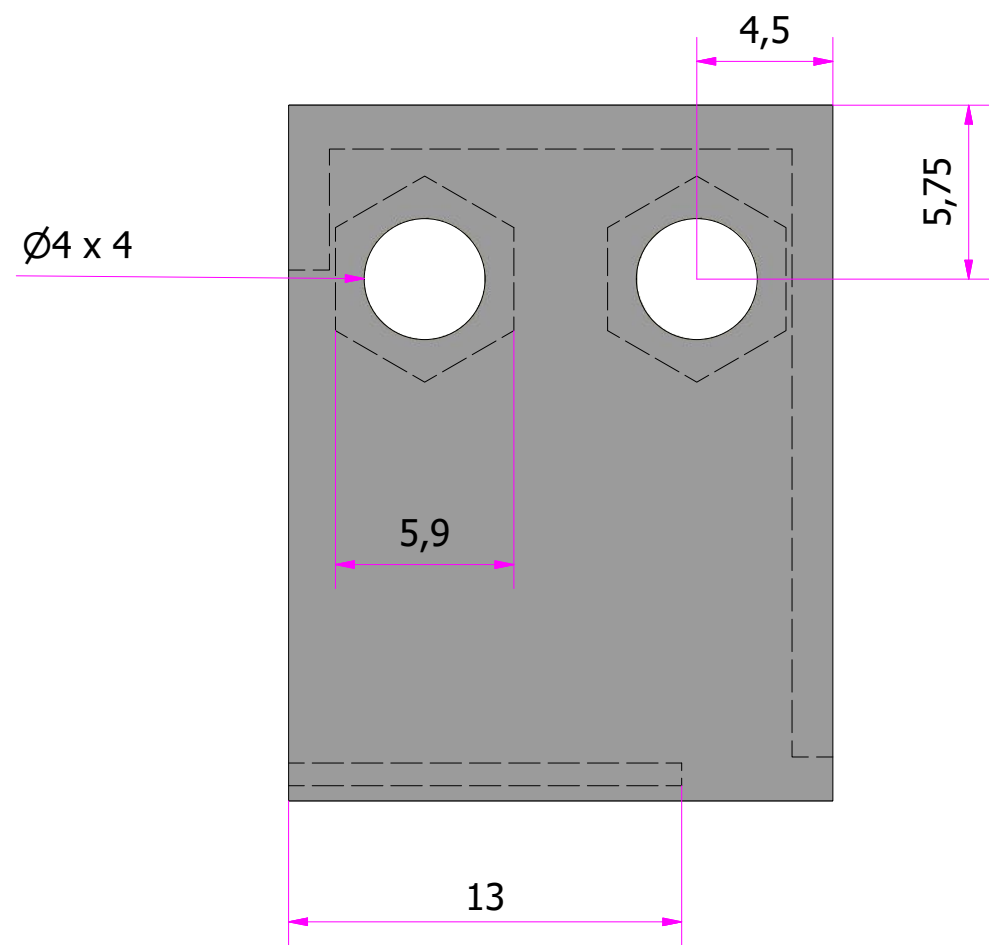
Pealtvaade ( 1 : 3 )



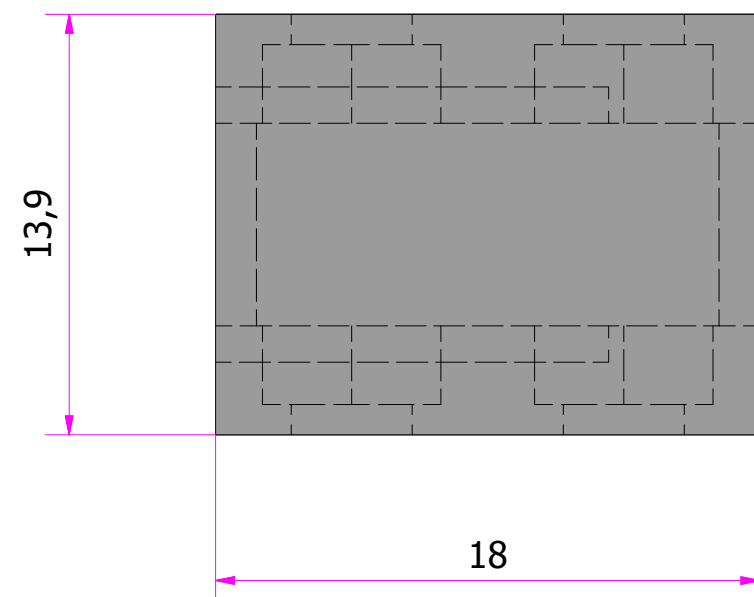
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 17 / 19
Koostaja: <b>Madis Löper</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Alusplaat	
Juhendaja: <b>Prof. Lauri Kütt</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

**Lisa L1.18. Lõpulüliti kinnitus**

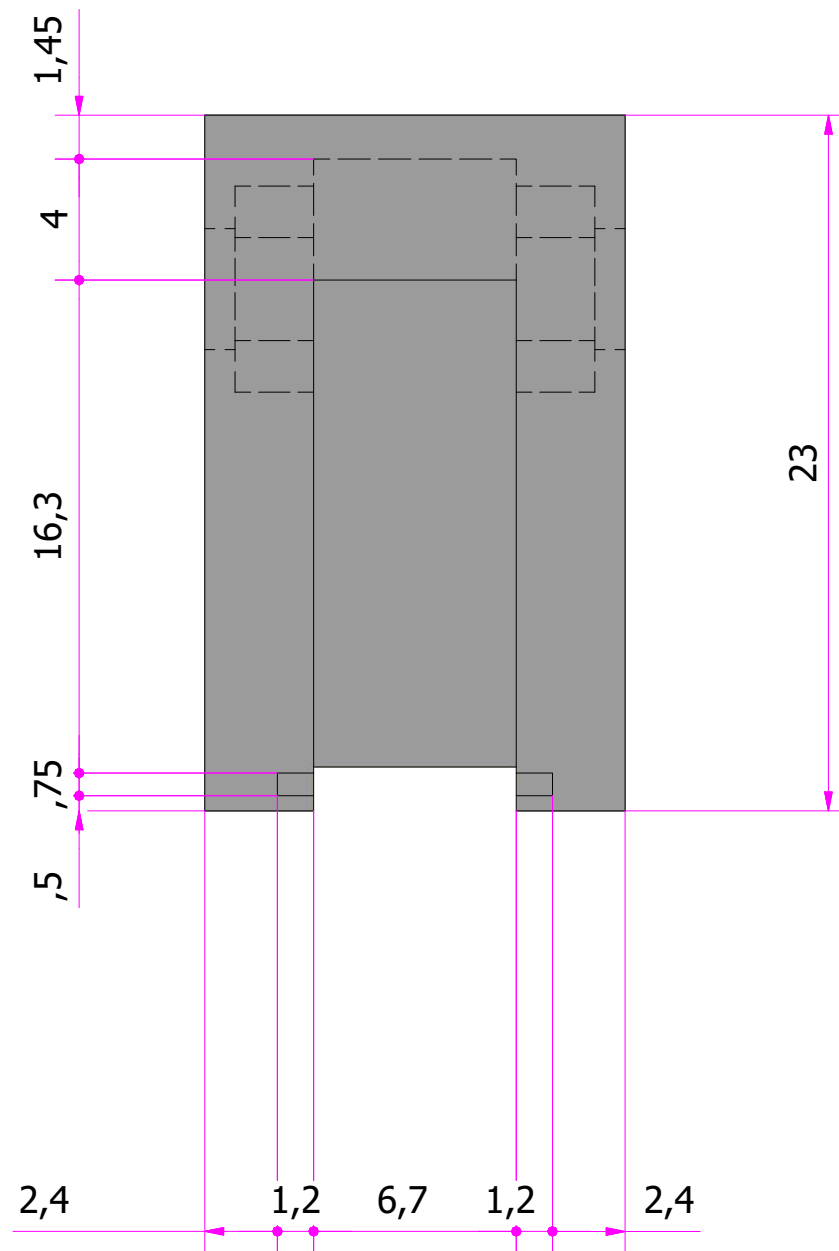
Eestvaade ( 4:1 )



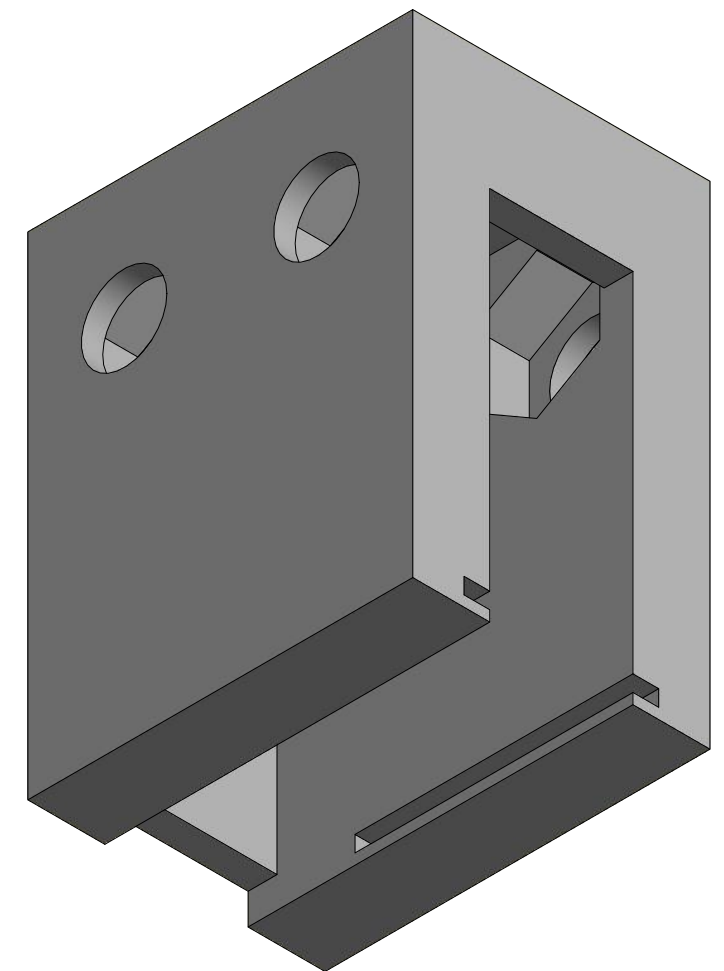
Pealtvaade ( 4:1 )



Vasakultvaade ( 4:1 )



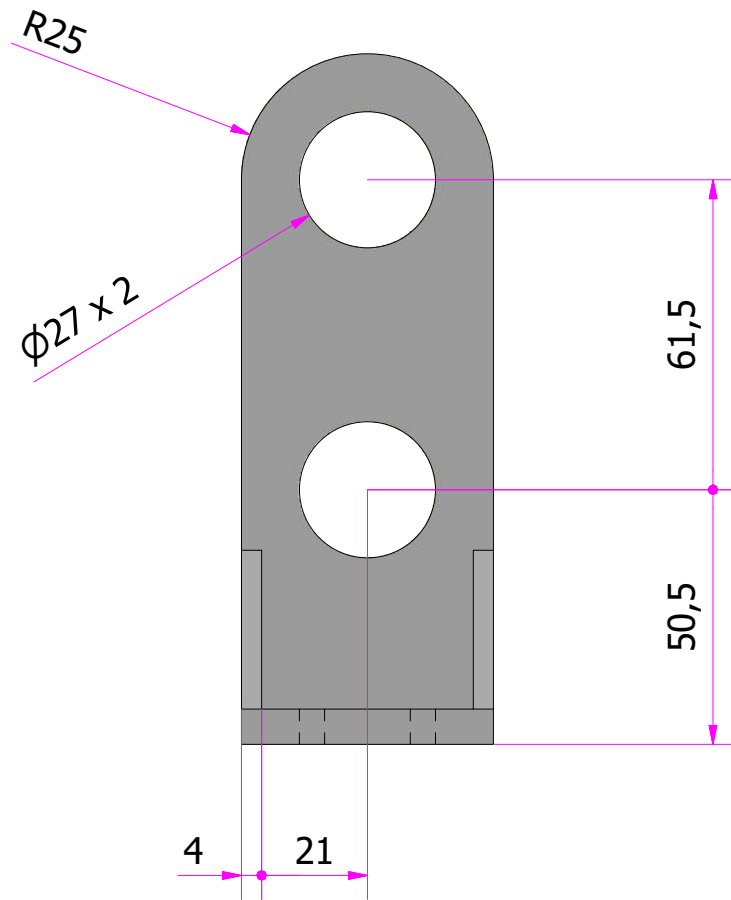
3D-vaade ( 4:1 )



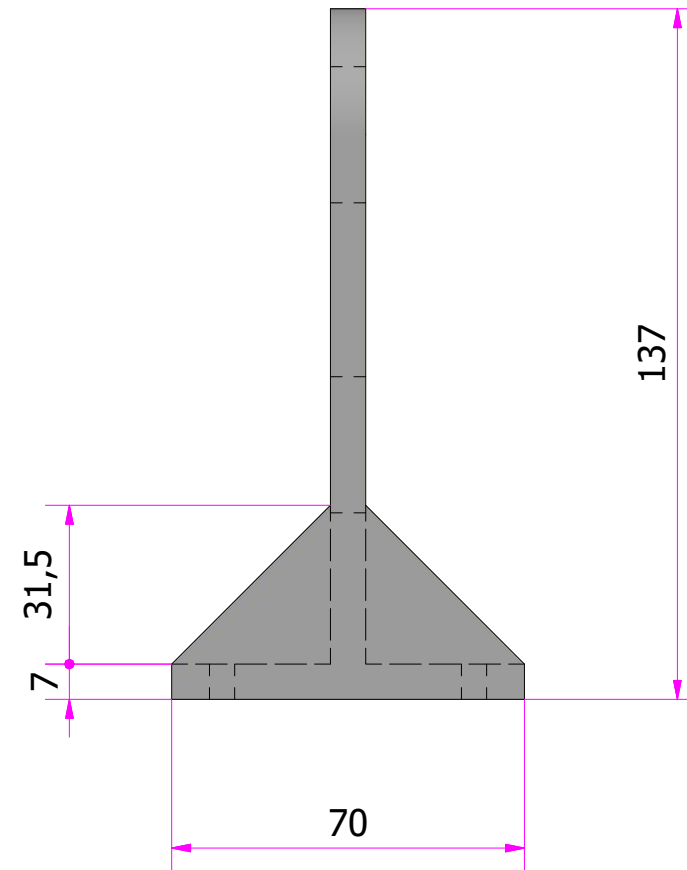
TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 18 / 19
Koostaja: <b>Madis Löper</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Lõpulüliti kinnitus	
Juhendaja: <b>Prof. Lauri Kütt</b>	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

**Lisa L1.19. Tasakaalustus detail**

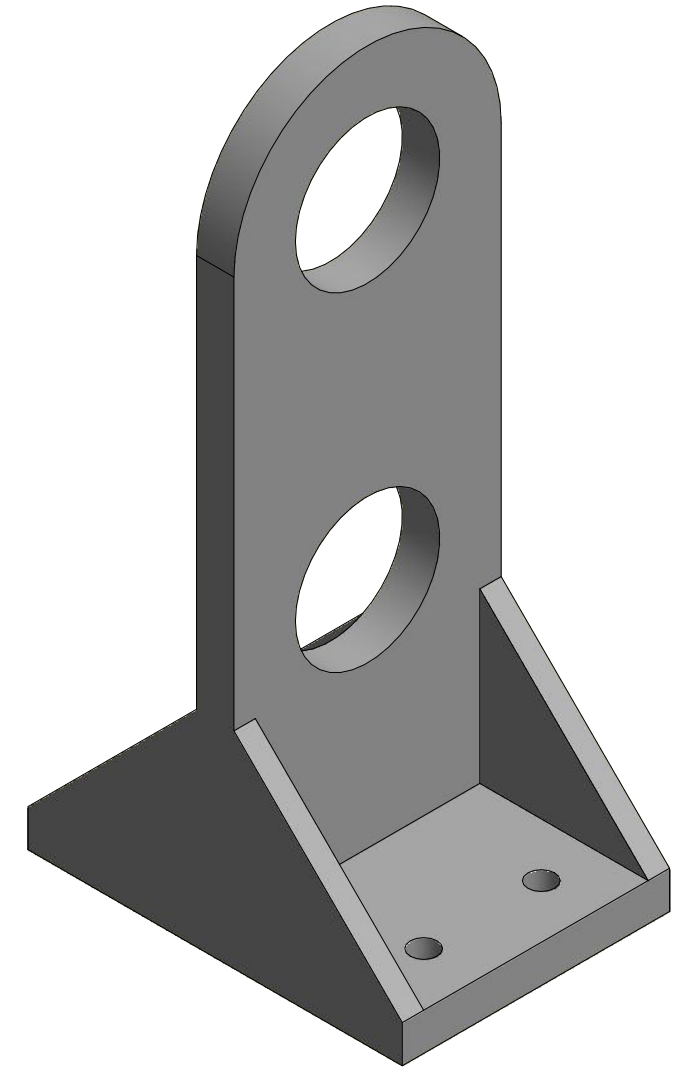
Eestvaade ( 2:3 )



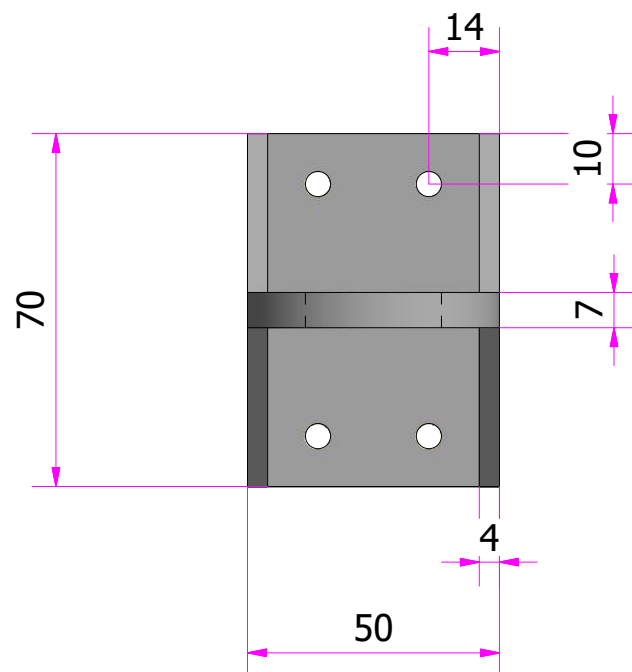
Vasakultvaade ( 2:3 )



3D-vaade ( 1 : 1 )

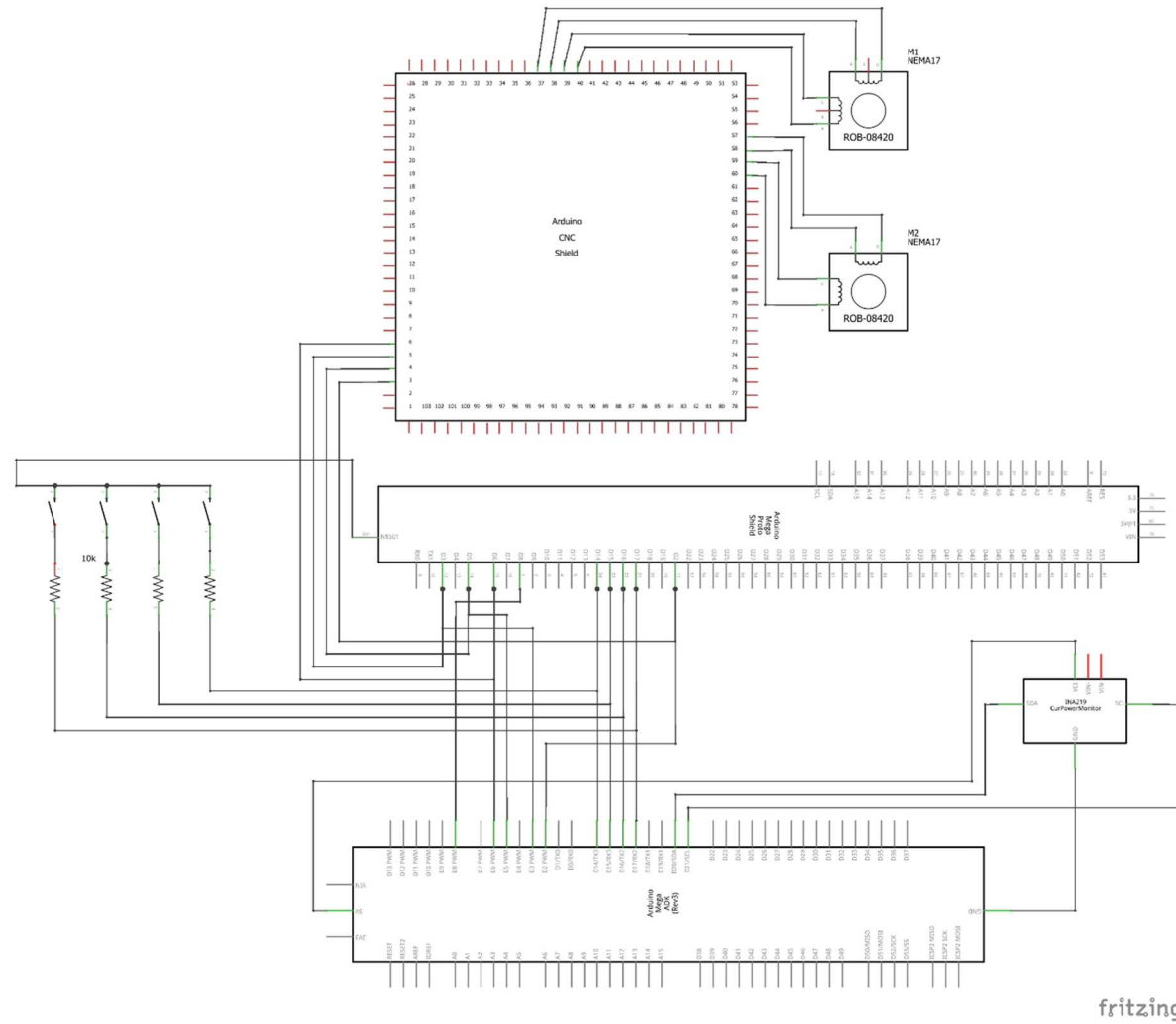


Pealtvaade ( 2:3 )



TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 19 / 19
Koostaja: Madis Löper	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19	Tasakaalustus detail	
Juhendaja: Prof. Lauri Kütt	Allkirjastatud digitaalselt 04.05.19		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	

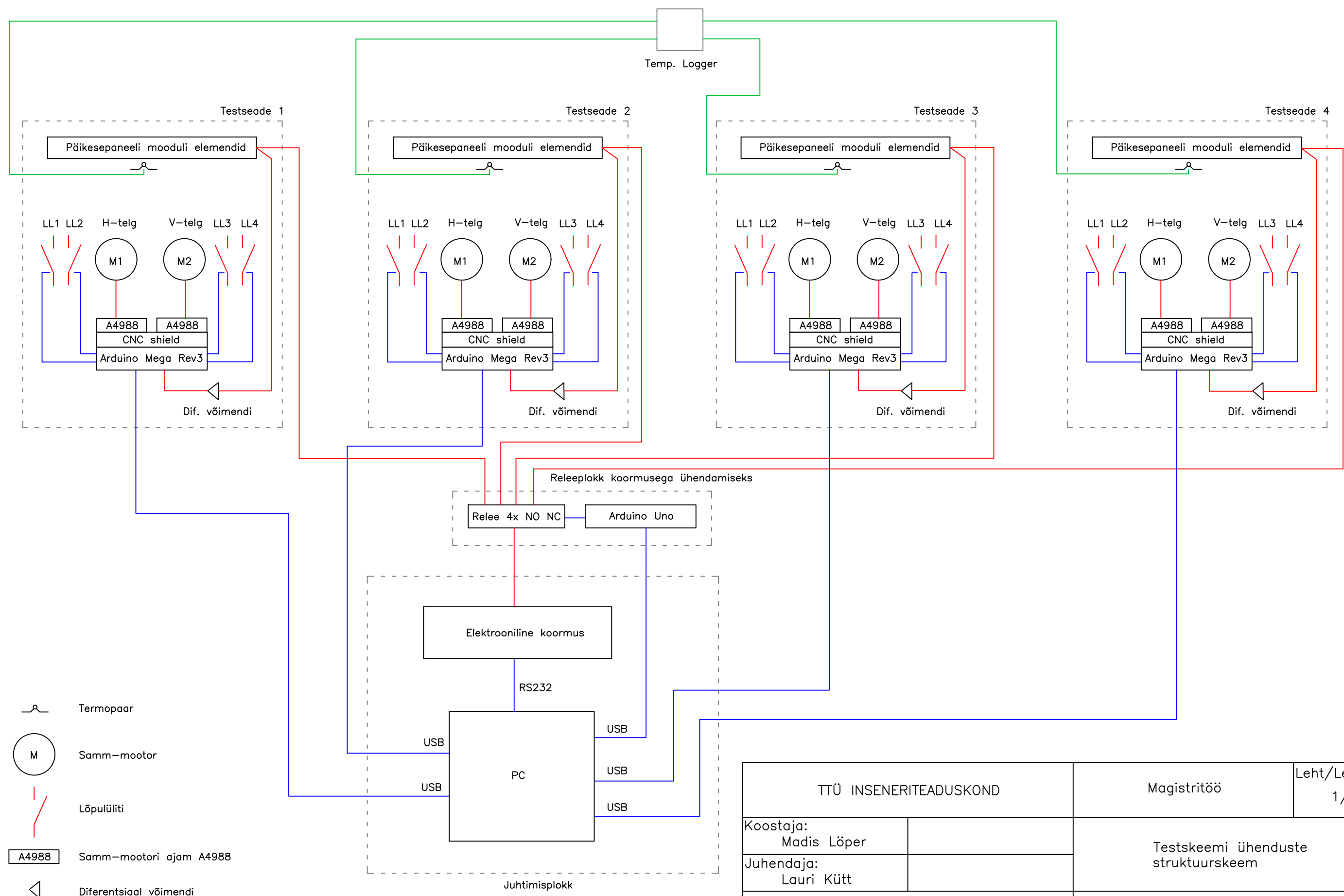
Lisa L2.1. Katseseadme mikrokontrolleri skeem








Joonis L2.1. Katseseadme mikrokontrolleri ja komponentide ühendusskeem.

## Lisa L2.2. Katsetendi juhtimise ja testskeemi struktuurskeem





-  Termopaar
-  Samm-mootor
-  Lõpulüüti
-  Samm-mootori ajam A4988
-  Diferentsiaal võimendi

TTÜ INSENERITEADUSKOND		Magistritöö	Leht/Lehti 1/1
Koostaja: Madis Löper		Testseemi ühenduste struktuurskeem	
Juhendaja: Lauri Kütt			
Elektroenegeetika ja mehhatroonika instituut		Päikesepaneelide tootlikkuse analüüs praktilistes tingimustes	