



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ERINEVATE PÄIKESEPANEELIDE LAHENDUSTE  
VÕRDLUSKATSED JA PANEELIDE  
VÄLJUNDSUURUSTE ANALÜÜS**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF DIFFERENT SOLAR  
PANELS AND ANALYZATION OF THEIR OUTPUT  
CHARACTERISTICS  
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Karl Lember

Üliõpilaskood: 193319

Juhendaja: Aleksander Kilk, vanemlektor

Tallinn 2022



# 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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ ,

(lõputöö pealkiri)

mille \_\_\_\_\_ juhendaja \_\_\_\_\_ on

\_\_\_\_\_ ,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Karl Lember

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Erinevate päikesepaneelide lahenduste võrdluskatsed ja paneelide väljundsuuruste analüüs

*Kuupäev:*  
12.03.2022

*52 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* vanemlektor Aleksander Kilk

*Töö konsultant (konsultandid):* Lauri Kütt, Martin Parker

*Sisu kirjeldus:*

Käesoleva töö eesmärgiks oli valmistada erinevad päikesepaneelid ning uurida erinevatel tehnoloogiatel rajatud päikeseelementidega paneele kui ka nende toodangu sõltuvust kaldenurgast maapinna suhtes. Ülesandeks oli autoril aru saada, kuidas erinevatel tehnoloogiatel toodetud paneelide toodangud samadel tingimustel erinevad. Katsetamine aitas autoril mõista erinevate tegurite mõju päikesepaneelide tootlikkusele Eesti tingimustes.

Töö käigus selgub, et monokristalsed paneelid on paremad kui polükristalsed oma väljundvõimsuste poolest. Teistest paneelidest silmnähtavalt parimate väljundvõimsustega oli kahepoolne monokristalne paneel, kuid selle kõrge hind ei pruugi end ära tasuda.

Edaspidisel uurimisel oleks võimalik täpsemalt hinnata näiteks temperatuuri mõju paneelide tootlikkusele, paigaldades paneeli pinnale temperatuuri anduri. Mõõtmisi saaks teha veel mitmeid, näiteks asimuudi mõju paneelide tootlikkusele standardtingimustel, päikesepaneelide kaitseklaasi mõju paneelide toodangule ja nii edasi.

*Märksõnad:* päikesepaneel, päikeseenergeetika, taastuvenergeetika, toodang, analüüs,

mõõtmine, katsetamine.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Karl Lember	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Experimental studies of different solar panels and analyzation of their output characteristics	
<i>Date:</i> 12.03.2022	<i>53 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(s) of the thesis:</i> senior lecturer Aleksander Kilk	
<i>Consultant(s):</i> Lauri Kütt, Martin Parker	
<i>Abstract:</i> <p>Purpose of the following thesis is to evaluate different solar panels and their production when changing their angle of inclination with respect to the ground and the panel type. It was authors assignment to figure out how solar panel output values at the same conditions change depending on technology of the solar cell.</p> <p>Katsetamine aitab autoril mõista erinevate tegurite mõju päikesepaneelide toodangule Eesti tingimustes.</p> <p>After the analyzation, monocrystalline solar panels prove themselves to have the best output values. Double-sided monocrystalline panels have outstanding characteristics, although regarding its high price it might not be economically the best one.</p> <p>For further research, there could be evaluation of temperature impact on production of the solar panels, using a thermometer that is attached to the solar panel. Also, there could be additional measurments, for example to evaluate azimuth impact on production of the solar panels on standard test conditions; evaluating solar panel cover glass impact on production of the solar panels et cetera.</p>	
<i>Keywords:</i> solar panel, solar energy, renewable energy, production, analyzation, measurement, testing.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Erinevate päikesepaneelide lahenduste võrdluskatsed ja paneelide väljundsuuruste analüüs**

Lõputöö teema inglise keeles: **Experimental studies of different solar panels and analyzation of their output characteristics**

Üliõpilane: **Karl Lember, 193310**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Aleksander Kilk**

Lõputöö kaasjuhendaja:  
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande **2021/2022 Kevad**

kehtivusaeg:

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Päikeseenergeetika on kiiresti kasvav taastuvenergia valdkond. Populaarsemad paneelide tüübid on polükristalsed ja monokristalsed paneelid. Päikesepaneelide elektrienergia toodang on sõltuv nii päikese intensiivsusest, päikese asendist paneeli suhtes kui ka ümbritsevast temperatuurist. Kaubanduslike paneelidega on kaasas nimiandmed, mis on taandatud standardtingimustele. Raske on hinnata erinevate tegurite, nagu näiteks päikesepaneelide kaldenurk ja temperatuur, mõju paneelide toodangule.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on õppida põhjalikult tundma päikeseenergeetika kasutamisevõimlusi päikesepaneeli ehitamist ning sooritada erinevaid katsetusi ja võrrelda erinevaid



paneele omavahel. Ühtlasi on eesmärgiks võrrelda erinevate tegurite mõju paneelide toodangule, ning leida, millistel tingimustel on päikesepaneelide toodang parim.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- 1) Mis tingimustel on päikesepaneelide toodang suurim?
- 2) Millised paneelid on parima toodanguga?
- 3) Kui hea on kahepoolne paneel võrreldes tavaliste paneelidega?
- 4) Kui täpsed on mudelanalüüsi tulemused võrreldes tegelike tootlikkusandmetega?

### **4. Lähteandmed**

Lähteandmeteks on päikesepaneelide müüjapoolsed parameetrite deklaratsioonid, komponentide andmelehed. Päikese intensiivsuse ja asendi andmed on leitavad vastavast kirjandusest.

### **5. Uurimismeetodid**

Lähteandmete alusel (kirjandusele tuginevad) luuakse analüütilised mudelid ja aseskeemid, mille alusel oleks võimalik hinnata oodatavaid tootlikkusnäitajaid. Töö mudelanalüüs toimub Exceli keskkonnas. Töö käigus ehitatakse katsetamiseks valmis paneelikomplekt, tulemuse võrdlus toimub mudeli katsetustulemuste põhjal, kus väljundsuurused on taandatud kõik ühele elementide hulgale.

### **6. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus
2. Päikesepaneelide ülesehitus ja toodangunäitajad
3. Päikesepaneelide ehitamine ja ühenduse elektriskeem
4. Päikesepaneelide katsetamiseks ülesseadmine ja katsete läbiviimine
5. Toodangu analüüs ja kokkuvõte
  - a. Paneelide kaldenurk
  - b. Erinevatel tehnoloogiatel põhinevad päikesepaneelid
  - c. Päikesepaneeli perioodi keskmiste näitajate hinnang
6. Katsetulemuste analüüs ja hinnang mudeli kasutatavusele
7. Kokkuvõte ja järeldused

### **7. Kasutatud kirjanduse allikad**

Allikateks enamasti erinevad raamatud ja teadusartiklid.

- Progress in Photovoltaics  
<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/1099159x>
- Päikeseelekter, Rae Perälä

- Sissejuhatus energiatehnikasse, Endel Risthein
- Lisaks veel erinevad erialased raamatud ja teadusartiklid

## **9. Lõputöö konsultandid**

Lauri Kütt, Martin Parker

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Lõputöö ülesande defineerimine 01.11.2021

Katsete komponendite tarne 01.01.2022

Valmis mudel 01.03.2022

Valmis lõputöö esialgsel kujul 15.04.2022

Vormistatud lõputöö 01.05.2022

Lõputöö esitamine 18.05.2022.

Valmis esitlus lõputöö kaitsmiseks 23.05.2022

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöörd*

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	5
ABSTRACT .....	7
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	8
EESSÕNA .....	13
SISSEJUHATUS .....	14
1.1 Lõputöö eesmärk .....	14
1.2 Kliima soojenemine ning selle inimtekkelised põhjused .....	14
1.3 Maa energiavarud .....	16
2 PÄIKESEKIIRGUSE KASUTAMINE ENERGIAALLIKANA .....	17
2.1 Päikeseenergeetika .....	17
2.1.1 Päike kui energiaallikas .....	17
2.1.2 Päikesekiirgus .....	17
2.1.3 Päikeseelektrijaamad .....	19
2.1.4 Päikeseenergeetika areng .....	20
2.2 Päikeseelemendid .....	22
2.2.1 Päikeseelemendi materjalid .....	22
2.2.2 N- ja P-tüüpi pooljuhid .....	23
2.2.3 P-N-siire .....	24
2.2.4 Fotoelektriline ja -galvaaniline efekt .....	24
2.2.5 Päikeseelemendi komponendid .....	24
2.2.6 Päikeseelemendi aseskeem ühe diodiga .....	25
2.2.7 Päikeseelemend aseskeem kahe diodiga .....	26
2.3 Päikesepaneel .....	27
2.3.1 Päikesepaneeli komponendid .....	27
2.3.2 Päikesepaneelide liigitus .....	29
2.3.3 Toodang .....	29
2.3.4 Tasuvus .....	30
3 ESIMENE KATSESEADE NING KATSED .....	31
3.1 Katsete tulemused .....	34
3.1.1 Esimene katse .....	34
3.1.2 Teine katse .....	35
3.1.3 Kolmas katse .....	36
3.1.4 Neljas katse .....	37
3.1.5 Viies katse .....	38
3.1.6 Esimese mõõteseadmega tehtud katsete kokkuvõte .....	39

3.2 Teine katseseade ning läbiviidud katsed .....	40
3.2.1 Paneelide tulemused kaldenurga 35° korral .....	42
3.2.2 Monokristalse päikesepaneeliga saadud tulemused erinevate kaldenurkade korral .....	43
LISAD .....	48
KOKKUVÕTE .....	49
4 Kasutatud kirjandus .....	51
LISAD .....	53

## EESSÕNA

Lõputöö idee käis välja Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonika ja elektroenergeetika eriala endine programmijuht Lauri Kütt, hiljem autor ja juhendaja täiendasid seda. Päikesepaneelide mudelid ning mõõteseadmed on ehitatud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi NRG-322B õppelaboris ning katsetatud ülikooli siseõuel. Paneelid seati üles ülikooli sisehoovi, kust koguti toodangu andmeid. Päikesepaneeli ehitas lõputöö autor, mõõteseadme ja selle töökindluse tagas insener Martin Parker ning katseandmete töötlemisel ning teooria kirjutamisel andsid nõu lõputöö juhendaja, vanemlektor Aleksander Kilk, ning vanemlektor Lauri Kütt.

# SISSEJUHATUS

## 1.1 Lõputöö eesmärk

Päikesepaneelide toodang on sõltuv erinevatest parameetritest: päikesekiirguse intensiivsus, päikeseelementide temperatuur ning seda mõjutavad tegurid, päikeseelementide ja/või paneelide ühendusviisid, päikesepaneelide asend Päikese suhtes ja veel muud. Kaubanduslikul päikesepaneelil on kaasas kindel märgis, mis defineerib selle tähtsamad nimiaandmed. Nendeks on enamasti maksimaalne väljaantav võimsus ning sellele vastavad voolu ja pinge väärtused, lühisvool, tühijooksu pinge ja efektiivsustegur. Need näitajad on vastavad standardtingimustele (ingl. *STC, standard test conditions*), mis tähendab päikesekiirguse intensiivsust  $1000 \text{ W/m}^2$  kohta ning välistemperatuuri  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Reaalses olukorras selliseid tingimusi esineb harva, seetõttu ei ole täpne ega korrektne hinnata päikesepaneelide toodangut vastavalt tootja poolt väljaantud niminäitajatele.

Käesolevas lõputöös uurib autor populaarsematel tehnoloogial ja põhimõtetel rajatud paneelide toodangut Eestis soodsatel tingimustel. Ülesanne on defineerida viis katsete teostamiseks, mille analüüsil on võimalik täpsemalt ennustada päikesepaneelide elektrienergia toodangut. Ühtlasi aitab töö tulemus mõista erinevate tegurite osakaalu ja tähtsust päikesepaneelide toodangus ning mis on parimad võimalused väljundvõimsuse maksimaliseerimiseks Eesti tingimustes. See aitab samuti kaasa võrgu planeerimisele, kui on teada täpsemad andmed elektrijaama väljundvõimsuste kohta, mis on kriitilise tähtsusega, sest päikeseelektrijaam on mitte-reguleeritav elektrijaam.

## 1.2 Kliima soojenemine ning selle inimtekkelised põhjused

Kliimamuutused kujutavad endas suurt ohtu Maale ning kogu meie ökosüsteemile. Maailma riigid on hakanud järjest sõlmima mitmeid kokkuleppeid ning organisatsioone, et neid muutusi pidurdada, veel parem peatada. Üheks põhiliseks viisiks erinevate kliimaneutraalsete eesmärkide täitmiseks on fossiilsete kütuste ning

energiressursside asendamine taastuvate energiaallikatega. Seda saab teha näiteks kivisüsil põhinevate elektrijaamade asendamine päikese- ja tuuleparkidega.

Alates 19. sajandi lõpust on planeedil Maa aset leidmas kliimamuutused. Maa keskmine pinnatemperatuur on tõusnud umbes 0,8 °C ning kaks kolmandikku sellest tõusust on toimunud alates 1980. aastast. Globaalne temperatuuri tõus toob endaga kaasa meretaseme tõusu ning sademete hulga ning esinemismustri muutumist, kuid ka subtroopiliste kõrbete tõenäolist laienemist. Eeldatavasti on soojenemine tugevam Artikas ning seda seostatakse liustike, igikeltsa ja merejää jätkuva sulamisega. Kliimasoojenemise muud tõenäolised mõjud kujutavad endast äärmuslike ilmastikunähtuste, nagu kuumalainete, pöudade ja tugevate vihmasadude, sagedasemat esinemist. Ühtlasi toob see kaasa ookeanide hapestumise ning liikide väljasuremise temperatuurirežiimide muutumise tõttu. Väga oluliseks mõjuks inimestele võib kujuneda oht toidu kättesaadavusele, mis tuleneb põllukultuuride saagikuse vähenemisest ja üleujutustest tingitud elupaikade kadumisest. [1] [2]

Kliimamuutuste põhjused võib jagada kaheks, inimtekkelised ning looduslikud. Inimkond ei ole võimeline looduslikele kliimamuutustele, mida põhjustavad mitmed tegurid, nagu näiteks elusorganismide toime atmosfäärile, Päikese aktiivsuse muutlikkus jne, mõju avaldama. Seetõttu keskendub autor just inimtekkeliste muutustele kliimas. [3]

Kui suur osa globaalsest kliimasoojenemisest on inimtekkelised, seda on raske öelda. Kuid peamised inimese põhjustatud muutused kliimas on fossiilkütuste põletamine energia tootmises, transport, põllumajandus, metsade maharaiumine, turbamaade kuivendamine. Kuna lõputöö teema läheb just kokku energia tootmisega, analüüsib töö koostaja edaspidi kliimasoojenemist just energeetika valdkonna vaatenurgast. [4]

Fossiilsete kütuste kasutuselevõtt ning nende põletamine energia saamise eesmärgil oli alus tööstusrevolutsioonile. Need süsinikupõhised kütused, nagu näiteks nafta, maagaas ja kivisüsi, andsid maailma majanduse arengule tugeva panuse. Selliste kütuste põletamisel tekib aga palju erinevaid heitgaase, millest kõige olulisemaks peetakse süsinikdioksiidi ehk CO<sub>2</sub>. [5]

Viimaste aastate jooksul on CO<sub>2</sub> kontsentratsioon jõuliselt kasvanud ning ühtlasi ka Maa keskmine temperatuur. Erinevate uuringute kohaselt on need kaks näitajat omavahel seotud. Seisukohaga, et kliimamuutustes on inimesel märkimisväärselt suurem roll kui looduslikel põhjustel, nõustuvad enamik teadlasi. [5]

## 1.3 Maa energiavarud

Inimkond kasutab oma energiavajaduste täitmiseks Maa energiavarusid. Alates 20. sajandist on inimkond oma tegevustega hakanud mõjutama Maa energeetilist tasakaalu ja kliimat. [5]

Maakera saab pidevalt energiat kolmest looduslikust ja kahest tehisallikast: Päikeselt tulenev kiirgus; geotermaalenergia; loodete energia, mis põhineb Kuu gravitatsioonilisel toimel; maapõuest salvestunud kütuste põletamisel tekkiv soojus ning maapõuest kaevandatava uraani ning tuumareaktoris tehislagundamise teel tekkiv soojus. Käesolev lõputöö käsitleb just päikeseenergeetikaga seonduvaid aspekte ja uurimisi, ning siinkohal jäetakse teised energiaallikad kõrvale. [5]

Fossiilsete kütuste põletamine on üks kahest Maakera energia tehisallikatest. Teine on maapõuest kaevandatava uraani tehislagundamine tuumareaktories, mille aastane energiakogus on 0,04 ZJ. Maapõues salvestunud fossiilsete kütuste põletamisel tekkiva soojuse aastane energiakogus on 0,5 ZJ. Need andmed vastavad 2000. aasta seisule ega ole oluliselt enam suurenenud. Maakera saab pidevalt energiat ka kolmest looduslikust energiaallikast, milledeks on Päikeselt tulenev kiirgus, 5600 ZJ; geotermaalenergia ehk Maa sisemuses uraani, tooriumi ja vähesel määral ka kaaliumi radioaktiivsel lagunemisel tekkiv soojus, 1,1 ZJ; Kuu gravitatsioonilisel toimel tekkivate loodete energia, 0,1 ZJ. Kõik numbrilised suurused tähistavad aastaseid energiakoguseid. Maa saab energiat ka tähtede kiirgusena ning Maale sattuvate meteoriitide kineetilise energia muundumisel soojuseks, kuid see on võrreldes eelmiste allikatega väga väike kogus. [5]



## **2 PÄIKESEKIIRGUSE KASUTAMINE ENERGIAALLIKANA**

### **2.1 Päikeseenergeetika**

#### **2.1.1 Päike kui energiaallikas**

Maa saab pea kogu oma lisanduva energia Päikeselt päikesekiirguse näol. Aastas on see energiahulk ligikaudu 5600 ZJ, ning energiavoo tihedus Maa atmosfääri ülapiiril päikesekiirte risttasandil on 1,37 kW/m<sup>2</sup>. Maapinnal on see tihedus ligikaudu 1 kW/m<sup>2</sup>, sest osa sellest peegeldub maailmaruumi, osa aga neeldub atmosfääris. [5]

Päikese põhiline element on vesinik, mida moodustab 71 % Päikesest. Ülejäänud osa täidab valdavalt ära heelium, mis moodustab 27 % Päikesest, järele jääva, ehk 2 %, moodustavad muud keemilised elemendid. Päikese tuumas ühinevad vesinikutuumad pidevalt heeliumituumadeks. Sellise protsessi käigus eraldub soojusvõimsus ligikaudu  $3,86 \cdot 10^{30}$  W. See võimsus kiirgub peamiselt optilise ehk ultravioletse, nähtava ning infrapunase kiirgusena Päikese pinnalt maailmaruumi. Maale satub sellest kõigest 0,45 miljardikku ehk  $1,75 \cdot 10^{17}$  W. Päikese vanuseks ennustatakse 4,5 miljardit aastat, selle aja jooksul on Päike ära kulutanud umbes poole oma algupärasest vesinikukogusest. Tulenevalt erinevatest arvutustest, on oodata 1,6 miljardi aasta pärast Maapealse elu peaaegu täielikku kadu, kuna Päike muutub 15 % heledamaks ning Maa keskmine temperatuur tõuseb väärtuseni 60 °C kuni 70 °C . [5]

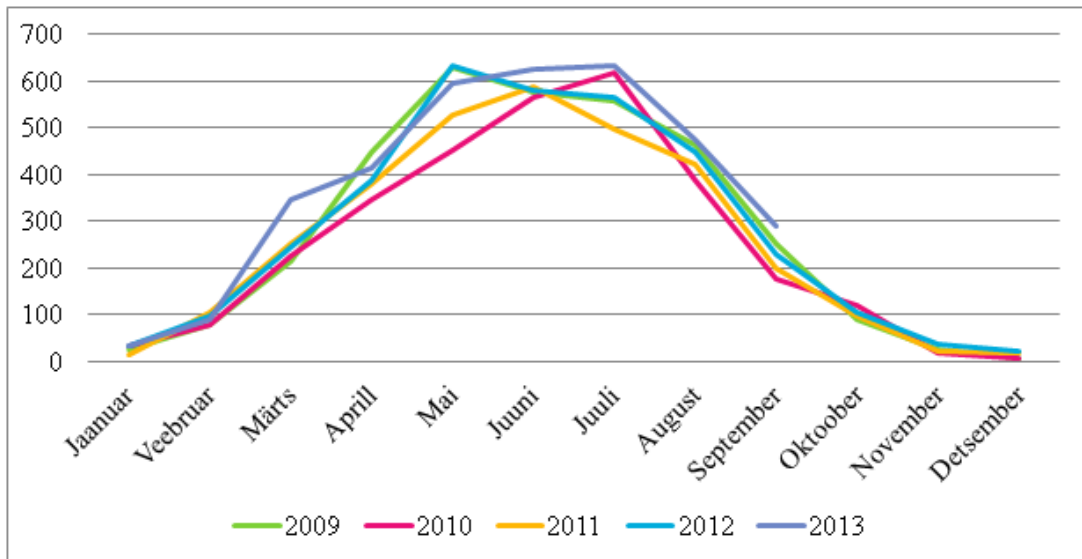
#### **2.1.2 Päikesekiirgus**

Päikeselt tulenev kiirgus moodustab 99,9% Maakera energiavarudest. Seda iseloomustab päikesekiirte risttasandi kiiritustihedus Maa atmosfääri ülapiiril (*solaarkonstant*) 1367 W/m<sup>2</sup>. Sellest kogusest peegeldub atmosfäärist 31,0 % ja maapinnalt 4,2 % lühilainelise optilise kiirgusena tagasi maailmaruumi. Ülejäänud kogus neeldub soojusena atmosfääris 17,4 %, meredes 33,0 % ja mandritel 14,4 %. Meredes neeldunud 33,0 protsendist Maale tulevast päikesekiirgusest tagastub atmosfääri vee aurumise kaudu 17,8 %, pikalainelise soojuskiirgusena 12,5 % ning konvektsiooni teel 2,7 %. Mandritel tagastub samal viisil vastavalt 2,9 %, 5,4 % ja 6,1 % Maale tulevast päikesekiirgusest. Ligikaudu 5 ZJ jagu energiat läheb maa- ja

veetaimedele fotosünteesiks. Osa sellest tagastatakse atmosfääri, osa salvestatakse aga biomassina. Maapõues ning merede põhjas võib biomass muunduda fossiilkütusteks. Puiduna, turbana ja orgaaniliste meresetetena salvestub aastas ligikaudu 0,4 ZJ energiat. [5]

Atmosfääris eelnevalt mainitud viisil neeldunud kiirgus kiirgab Maa mõlemal poolel pikalainelise infrapunase kiirgusena tagasi maailmaruumi, põhjustades maapinna ja õhutemperatuuri ööpäevast vaheldumist. Sellest 1,7 ZJ muundub enne seda tuuleenergiaks ning ligikaudu 0,2 ZJ pinnavoolu hüdroenergiaks. [5]

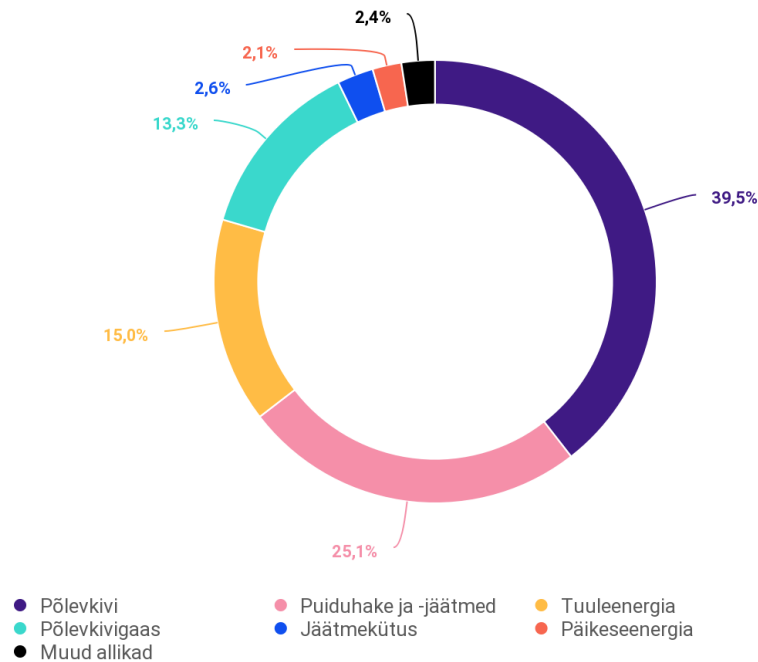
Eestis oli aastane summaarne horisontaalne päikese radiatsioon 938 kWh/m<sup>2</sup> ning see mõõdeti 2012. aastal Harku mõõtejaamas.



Joonis 2.1 Tallinn-Harku aeroloogiajaamas mõõdetud ja arvatatud summaarse kiirguse  $Q$  (MJ/m<sup>2</sup>) tunnisummade põhjal (1 kWh = 3,6 MJ) perioodil 2009 kuni 2013 september [6]

### 2.1.3 Päikeseelektrijaamad

Päikeseelektrijaamade osatähtsus maailma elektrienergia toomises oli aastal 2020 3,1%, kuid see number suureneb käesoleval ajal väga kiiresti [7]. 2020. aasta Eestis toodetud elektrienergiast moodustas päikeseenergia 2,1%.



Joonis 2.2 Elektri tootmine energiaallika järgi 2020. aastal [8]

Päikeseelektrijaamad ning teised päikesekiirgust kasutavad paigaldised võib jagada kahte rühma: kiirguse kontsentreerimine peegel- või läätssüsteemidega ning kiirguse mitte kontsentreerimine. Päikeseelektrijaamad, mis kasutavad päikesekiirguse kontsentreerimisel põhinevat energiatootmist, on torn-päikeseelektrijaamad, rennpeeglitega päikeseelektrijaamad ja pöördparaboloidpeeglitega päikeseelektrijaamad. Päikeseelektrijaamad, mis ei põhine päikesekiirguse kontsentreerimisel, on fotoelementidel põhinevad jaamad, päikesetiigil põhinevad jaamad ja päikesekiirguse toimel kuumenenud õhu ülesvoolul põhinevad jaamad. Käesolevas tööd käsitletakse just fotoelement- ehk fotogalvaanikal põhinevat elektrienergia tootmisviisi, seega keskendub autor edaspidi ainult sellele. [5]

Fotogalvaanilistes elektrijaamades muundatakse päikesekiirgus otseselt alalisvoolu elektrienergiaks ventiilfotoelementide abil. Selleks moodustatakse fotoelementidest lamedad, tavaliselt mõne ruutmeetri suurused moodulid ehk paneelid, mis

ühendatakse jadamisi sobiva pinge saamiseks. Moodulijadadest moodustatakse rööpühendamise teel sektsioonid, mis omakorda ühendatakse vastavalt soovitavale võimsusele rööbiti. Sektsioonid või nende rühmad varustatakse vahelditega, mis muundavad alalisvoolu elektrienergia vahelduvvoolu elektrienergiaks, mis on ühendatud toidetava elektrivõrguga. [5]

Ühe fotoelektrilise mooduli ehk päikesepaneeli võimsus on tavaliselt 50 W kuni 1000 W. Suurtes päikeseelektrijaamades võib selliseid mooduleid olla kuni mõni miljon. Sellistes jaamades on mitu erinevat paigaldamisviisi. Päikesepaneelid võivad olla paigaldatud mingis kindlas asendis, mis vastab päikese keskmisele kõrgusele ja suunale. Tänapäeval on kasutusel ka automaatset, päikest järgivat kallutamist ja pööramist rakendavad päikeseelektrijaamad. Sõltuvalt fotoelementide liigist on päikeseelektrijaamade efektiivsustegur ligikaudu 15% kuni 22% [9]. Kaubanduslikult kasutatavate päikesepaneelide ühe vati hinnaks tuleks umbes 0,97 € kuni 1,68 € ning päikesepaneelid elamu jaoks läheksid vati kohta maksma umbes 2,29 € kuni 2,85 € [10] Neid hindu mõjutab päikeseelektrijaama suurus, mida rohkem on võimsust, seda väiksem on maksumus ühe vati kohta. Samuti mõjutab hinda ka paigaldise asukoht. Katusele rajatavad päikesepaneelid on odavamad, sest suurim tugikonstruktsioon on juba olemas. Ühtlasi sõltub hind ka katuse materjalist. [11]

#### **2.1.4 Päikeseenergeetika areng**

Teoreetiliselt kasutasid inimesed esimest korda Päikese energiat umbes 7.sajandil eKr. Päikesevalguse ning suurendusklaasi abil kasutati seda tule süütamiseks. Veel üks varajane päikeseenergia kasutus oli nn päikesetoad hoonetes. Nendel hoonetel olid massiivsed aknad, et suunata päikesevalgus ühte kindlasse kontsentreeritud piirkonda. Hiljem, 1200. aastatel e.m.a., kasutasid seda meetodit põlisameeriklaste esivanemad, kelle elupaigad olid kaljudel ning talvekuudel sai niimoodi päikese-soojust püüda. [12]

Päikesepaneelide tehnoloogia areng oli üsnagi iteratiivne, kuhu panustasid paljud teadlased. Palju vaieldakse selle üle, millal täpsemalt esimesed paneelid loodi ning keda tuleks selle eest tunnustada. Osad arvavad, et selleks on prantsuse teadlane Edmond Becquerel, kes leidis, et valgus võib suurendada elektritootmist, kui juhtivasse lahusesse asetatakse kaks metallelektroodi. See läbimurre, mille kohta hakati ütleva „fotogalvaaniline efekt“, mõjutas hilisemaid arenguid fotogalvaanikas koos elemendiga seleen. 1873. aastal avastas Willoughby Smith, et seleenil on

fotojuhtivus, mis viis William Grylls Adamsi ja Richard Evans Day aastal 1876 avastuseni, et seleen tekitab päikesevalguse käes elektrit. Kuus aastat hiljem valmistas Charles Fritts esimesed seleeniplaadidest päikeseelemendid. See on põhjus, miks osa inimesi tunnustavad teda päikeseelementide leiutamise eest. [12]

Tänapäeval tuntud päikeseelemendid on valmistatud ränist, mitte seleenist. Seetõttu arvavad mõnedki, et tõeline päikesepaneelide leiutamine on seotud Daryl Chapini, Calvin Fulleri ja Gerald Pearsoni fotogalvaanilise ränimelendi loomisega aastal 1954. Paljud väidavad, et see tähistab fotogalvaanika tõelist leiutamist, sest see oli esimene päikeseenergia toitel töötav seade, mis suutis toita spetsiifilist elektriseadet mitu tundi päevas. Esimene sellisel tehnoloogial põhinev element suutis päikesevalgust muundada elektrienergiaks 4 %-lise kasuteguriga, mis on vähem kui veerand tänapäeva elementide võimekusest. Räni on maakoos esinevatest elementidest teisel kohal, seega toormaterjali probleemi ei ole. [12]

Fotogalvaanilised elemendid ehk päikeseelemendid toodavad energiat, neelates päikesekiirgusest tulevat energiat ning muundades selle pooljuhtmaterjalide abil elektrienergiaks. Päikeseelemendid ühendatakse kokku suuremaks elektritootmisüksuseks, mida nimetatakse mooduliteks või paneelideks. Nagu eelnevalt mainitud, on need üksikud elemendid valmistatud pooljuhtmaterjalidest ning nende paksus on sageli väiksem nelja juuksekarva paksusest. Selleks, et nad välistingimustes vastu peaksid ning aastaid töökorras püsiksid, on need plasti ja klaasi kombinatsioonide abil kaitstud. [13]

Selleks, et elementide väljundvõimsust suurendada, on need ühendatud kokku suuremateks ahelateks, mis moodustavad moodulid või paneelid. Paneelid võivad töödada eraldi seisvalt, kuid tavaliselt ühendatakse need kokku üheks reaks. Seejärel ühendatakse üks või mitu rida tervikliku tootmisüksusena elektrivõrku. Selline ehitussüsteem võimaldab ehitada päikeseparke nii, et need rahuldaksid peaaegu kõiki elektrienergia vajadusi, olgu need suured või väikesed. [13]

Päikesepaneelid on kogu süsteemist vaid üks osa. Süsteemid hõlmavad ka kinnituskonstruktsioone, mille abil on paneelid suunatud ühte ja samasse suunda, osade juhtumite korral ka võimelised end pöörama vastavalt Päikese kaldenurgale. Ühtlasi hõlmab süsteem endas erinevaid seadmeid, mille abil muundatakse päikesepaneelidelt tulev alalisvool vahelduvvooluks, mis võimaldab müüa päikesepaneelidelt tulev elektrienergia elektrivõrku.

Kui valgus paistab päikeseelemendile, võib valguskiir peegelduda, neelduda või minna otse elemendist läbi. Päikeseelement koosneb pooljuhtmaterjalist. Pooljuht tähendab, et selle omadus elektrit juhtida on parem kui dielektrikul nagu näiteks klaas, ning halvem kui elektrijuhil nagu näiteks metall. Kui pooljuht puutub kokku valgusega, siis see neelab valguse energia ning kannab selle üle negatiivselt laetud materjali osakestele ehk elektronidele. Selline lisaenergia elektronil annab talle omaduse voolata läbi materjali elektrivooluna. [13]

Looduses muundub päikesekiirgus teisteks erinevateks energialiikides, nagu näiteks soojus-, tuule-, hüdro- ja biomassi keemiliseks energiaks. Esimesed katsed muundada päikesekiirgusest tulenevat energiat kõrgetemperatuuriliseks soojuseks tehti 18. sajandil. Järgmisel sajandil leiutati juba esimesed päikesekiirgusel põhinevad aurujõuseadmed. 1950ndatel aastatel sai võimalikuks päikesekiirguse otsemuundamine elektrienergiaks, kuna enne seda ei osatud valmistada piisavalt kõrge kasuteguriga fotoelemente. [5]

## **2.2 Päikeseelemendid**

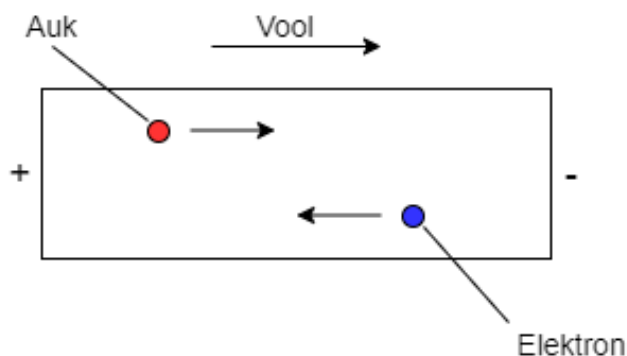
### **2.2.1 Päikeseelemendi materjalid**

Päikesepaneelid koosnevad päikeseelementidest, mis muundavad päikesekiirguse energiat elektrienergiaks. Need elemendid on ränist. Looduses esineb see ainult keemiliste ühendite koosseisus. Neist levinuim on ränidioksiid  $\text{SiO}_2$ . See aga päikeseelementi ei sobi, sest ränidioksiid on hea elektrijuht, kuid elementi on just vaja pooljuhti, milleks on puhas räni. [14]

Ränipooljuhis moodustavad räniaatomid kindla süsteemi järgi kristallvõre, mida nimetatakse ka teemandi tüüpi kristallvõreks. Iga räniaatomi välises kihis on neli elektroni ning igaüks neist moodustab sideme ühe naabruses paikneva räniaatomiga. Samamoodi pakub naaberaatom samuti ühte elektroni sidemesse, seega ongi ühes sidemes kokku kaks elektroni, üks mõlemast aatomist. Sellist naaberaatomite sidet nimetatakse kovalentseks sidemeks. Madalatel temperatuuridel on räni aatomid üksteisega tihedalt seotud ning vabu laengukandjaid pole, mis tähendab, et materjal on omadustelt dielektrik. Kristalli soojendamine või Päikese kiirguse pääsemine pooljuhtmaterjali ergastab elektronid, mistõttu nende liikumine intensiivistub ning

mõned sidemed võivad katkeda ja materjal muutub elektrijuhiks. Sidemest vabastatud elektron jätab sidemesse elektroni puudujäägi ehk augu. Kokkuvõtvalt, tekib elektroni vabanemisel pooljuhi kristallis alati vaba elektron ja auk, mida nimetatakse ka elektron-auk paariks. Sellist nähtust nimetatakse genereerimiseks. See olukord võib juhtuda ka vastupidiselt. Vaba elektron jõuab tühja augu lähedusse, mistõttu võib elektron auku paigutada ning selle seeläbi täita. Sellist protsessi kutsutakse rekombinatsiooniks. Genereerimine ja rekombinatsioon toimuvad pooljuhis igal hetkel. Need protsessid tasakaalustavad teineteist nii, et uusi elektron-auk paare tekib sama kiiresti nagu neid ka ära kaob. Seetõttu on pooljuhis alati vabu auke ning vabu elektrone vähe. [14]

Ränikristallis vabastatud elektronide liikumine tähendab, et nendega liigub ka negatiivne laeng ehk pooljuhis liigub ka elektrivool. Elektrivool pooljuhis erineb mõnevõrra elektrivoolust metallides. Metallis tekitavad voolu ainult liikuvad elektronid, kuid pooljuhis lisanduvad ka augud. Sellist olukorda kirjeldab joonis 1.3. [14]



*Joonis 2.3 Patarei pooljuhi küljes sunnib positiivne potentsiaal positiivse laenguga auke liikuma patarei negatiivse klemmi suunas ning negatiivse laenguga elektron liigub patarei positiivse klemmi suunas*

Aukudest tekitatud vool liigub plusspoolelt miinusele ning vabade elektronide poolt tekitatav aukude vool liigub samas suunas, kuigi elektronid ise liiguvad teisele poole. [14]

### 2.2.2 N- ja P-tüüpi pooljuhid

N- tüüpi pooljuhiks kutsutakse pooljuhti, milles valdav osa laengukandjaid on negatiivse laenguga. P- tüüpi pooljuhiga on vastupidi, et enamus osa laengukandjaid

on positiivse laenguga. N- tüüpi pooljuhtidele lisatakse teisi aatomeid, millel on vabu elektrone üle. Laengukandjad on just elektronid, aukjuhtivust esineb vähem. [15]

### **2.2.3 P-N-siire**

Pn-siire eraldab elektron- ja augukandjad, mille abil on võimalik luua pinge, ning see läbi ka elektrivool. Laengukandjate eraldamiseks päikese elemendiks on palju erinevaid variante, nagu näiteks metall-isolaator-pooljuhid (ingl. Metal-insulator-semiconductor) jne. Peamiseks on siiski kujunenud just pn- siire. Selline olukord on saavutatud, kui pooljuhtkristalli viiakse erinevaid lisandeid, nagu näiter boor jne.

Kuna n-tüüpi pooljuhis on palju elektrone ja p-tüüpi pooljuhis palju auke, toimub n- ja p- piirkonna vahel elektronide difusioon. Selle tulemusena tekkinud elektriväli on laengukandjate liikumise suhtes vastupidine. Laengukandjate liikumine ühelt poolt teise säilib, kuni nende enda elektriväli selle katkestab. [16]

### **2.2.4 Fotoelektriline ja -galvaaniline efekt**

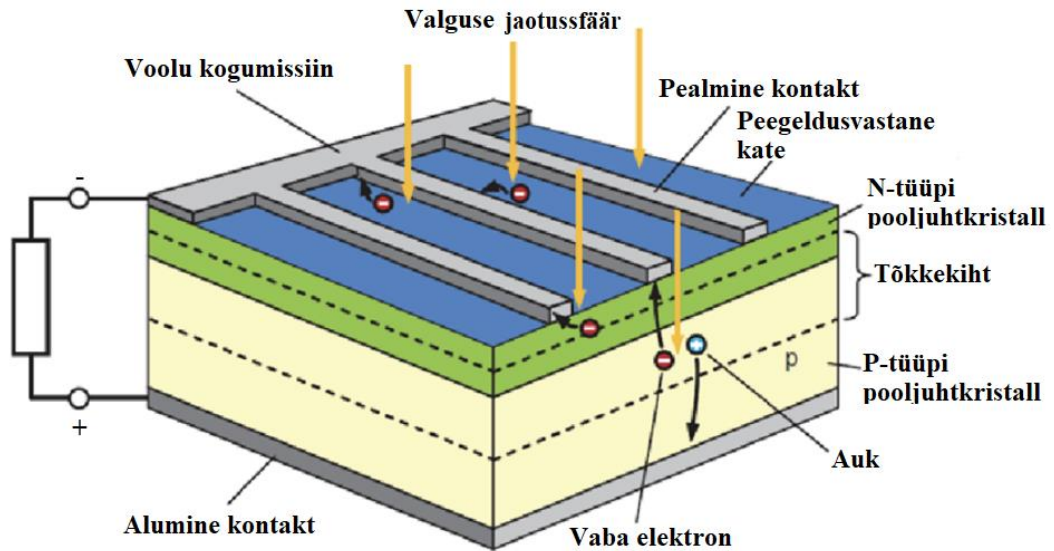
Fotoelektriline efekt, lühidalt ka fotoefekt, kujutab endas elektronide välja paiskumist tänu lühilainelisele valgusvihule puhtale metallpinnale. Valguse energia neeldub elektronis ning elektronid tänu sellele saavutavad ergastatud oleku, mistõttu nad eralduvad materjalist. Sellisel juhul peaks valguse energia olema võrdne energiaga, mida on elektronil vaja, et emiteeruda aimest. [17]

Fotogalvaaniline efekt on olukord, kus kahe materjali vahel tekib pinge tänu valguse mõjule. Seetõttu võib tekkida ka elektroovool, ning seda võib nimetada fotovooluks. Sellises protsessis ei toimu elektronide emissiooni, vaid elektronid jäävad ainesse. [17]

### **2.2.5 Päikeseelemendi komponendid**

Päikeseelemendid muundavad päikesevalgust alalisvoolu elektrienergiaks. Päikesepaneeli toodang on sõltuv elemendi tüübist ning kasutatava räni omadustest. Populaarsemad elemenditüübid on monokristalliline ja polükristalliline räni. [18]

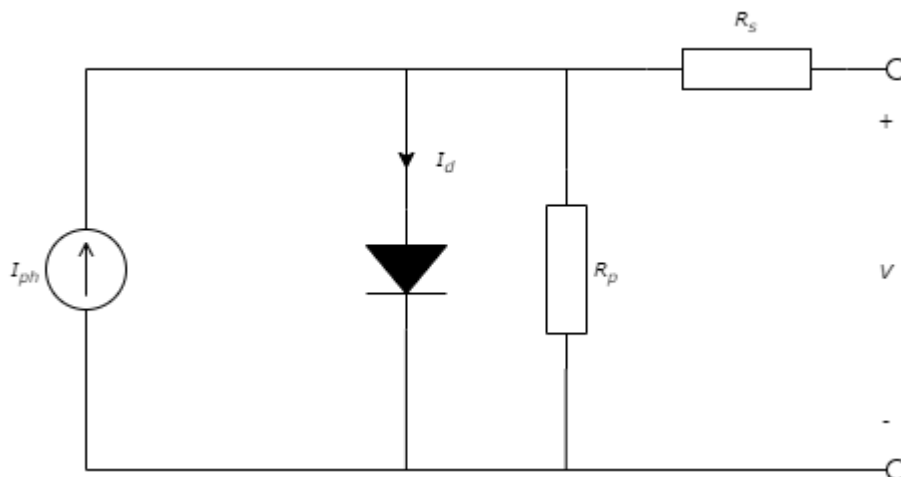




Joonis 2.4 Päikeselemendi ehitus [19]

## 2.2.6 Päikeselemendi askeem ühe diodiga

Aseskeemi mudelid aitavad määratleda päikeselemendi või -paneeli kogu pingevoolu tunnusjoone pideva funktsioonina teatud töötingimustel. Üks põhilisemaid üldkasutatavaid ekvivalentseid aseskeeme on ühe diodi mudel, mida on näha joonisel 2.5.



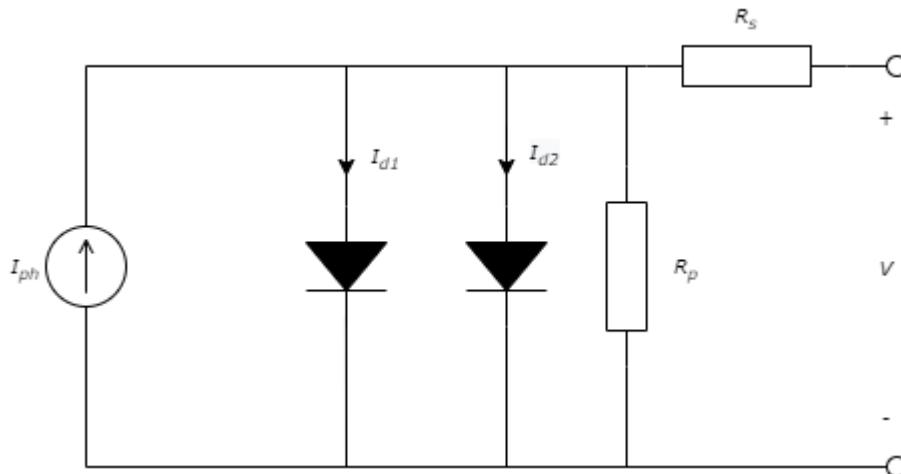
Joonis 2.5 Ühe diodi aseskeemi mudel

Ühe diodiga aseskeem on kõige lihtsam aseskeemidest ning sellises skeemis on voolu allikas ühendatud diodiga rööbiti. Mudel on täiustatud jadatakistuse lisamisega.

Olenemata selle mudeli lihtsusest, ilmnevad sellel erinevad probleemid kui temperatuur hakkab kõikumama.

Joonisel 2.5 tähistab  $I_{ph}$  tänu valgusele tekitatud voolu elemendis,  $I_d$  on rekombinatsiooniks vaja minev pingest sõltuv vool,  $R_p$  ja  $R_s$  on vastavalt rööp- ning jadatakistus. [20]

### 2.2.7 Päikeseelemend aseskeem kahe diodiga

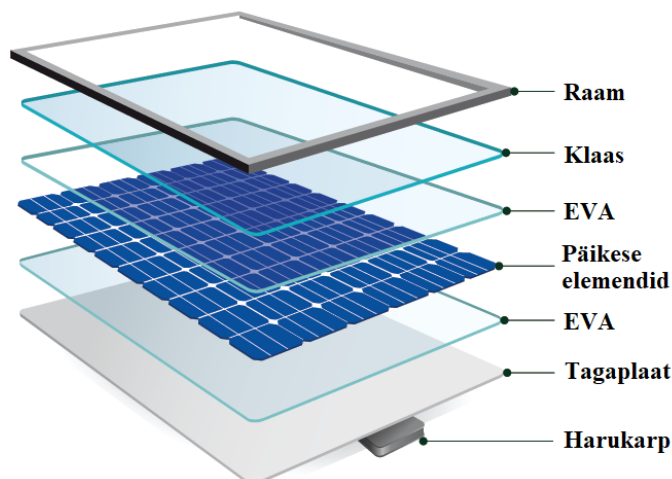


Joonis 2.6 Kahe diodi aseskeemi mudel

Nagu ka aseskeemi nimi ütleb, on selle aseskeemi puhul kaks diodi, mis on ühendatud omavahel kui ka voolu allikaga rööbiti. Lisa diodi lisamine skeemi täpsustab aseskeemi parameetreid. Soovitud jõudluse tagamiseks on peamiseks raskuseks kõigi mudeli elementide väärtuste arvutamine. [21]

## 2.3 Päikesepaneel

### 2.3.1 Päikesepaneeli komponendid



Joonis 2.7 Päikesepaneeli komponendid

Traditsiooniline päikesepaneel koosneb reeglina kuuest komponendist, mis on näidatud ka joonisel 2. Päikesepaneeli tähtsaim osa on päikeseelement, mis võimaldab muundada päikesekiirguse energia elektrienergiaks. Päikeseelementide näol on tegemist äärmiselt nõrga ning hapra materjaliga, seetõttu on elemendid pealt kaitstud klaasiga ning alt toetab neid tagaplaat. Pealne klaas on päikesepaneeli juures väga oluline, kuna see on esimene pind, kuhu langeb päikesekiirgus. Seetõttu on päikesepaneeli efektiivsus sõltuv mitte ainult päikeseelementidest, vaid ka kaitseklaasi parameetritest. Pealne klaas ning tagaplaat kinnitatakse elementide külge etüleen-vinüülatsetaadi ehk lühidalt EVA-ga. Seda kuumutades hakkab EVA sulama ning selle abil liimitakse kõik kihid omavahel kokku. [22]

Päikesepaneeli pealne klaas kaitseb päikeseelementi erinevate keskkonnamõjude eest. Kasutatavaks klaasiks on üldiselt tavapärasest tugevam karastatud klaas, mis on umbes 3,0 kuni 4,0 mm paks ning disainitud vastu pidama mitmetele mehaanilistele jõududele ja temperatuuride kõikumisele. IEC miinimumstandardi löögitesti kohaselt peavad päikesepaneelid vastu pidama 25 mm läbimõõduga raheteradele, mis liiguvad kuni 27 m/s. Karastatud klaasi eelis tavalise klaasi ees seisneb veel selles, et purunemise korral karastatud klaas ei tekita suuri sakilisi osi, vaid puruneb pigem väikesteks kildudeks. Tänu EVA-le püsib katkine klaas paneeli küljes, mis aitab vältida kildudest tulenevaid vigastusi. [22]

Efektiivsuse ning toodangu parandamiseks kasutavad paljud tootjad madala rauasisaldusega klaasi ning peegeldusvastast katet, mis vähendab kadusid ning parandab päikesekiirguse läbilaskvust. [22]

Raami ülesanne on paneeli kaitsta ning ühtlasi tagab see paneeli tugeva ja kindla struktuuri, tänu millele on paneeli võimalik installeerida soovitud kohtadesse. Raam on disainitud olema jäik, kuid kerge ning samal ajal olema võimeline vastu panema tugevatele jõududele, mille põhjustavad tugevad tuuled ning muud välised jõud. [22]

EVA on lühend materjalist nimega etüleenvinüül atsetaat, mis on spetsiaalselt disainitud läbipaistev polümeeri kiht, mida kasutatakse elementide kinnitamiseks klaasi ning tagaplaadi külge. EVA peab olema väga vastupidav ning vastu pidama erinevatele temperatuuri muutustele ning niiskusele. Seoses paneeli vajaliku elueaga, omavad need faktorid kriitilist tähtsust ning defineerivad paneeli kestvuskindluse.

EVA kile paigaldamine mõlemal pool elemente (peal ja all) käitub kui omamoodi amortisaator, mis kaitseb päikeselemente ja ühendusi vibratsioonide, rahe ja muu säärase eest. [22]

Tagaplaat moodustab päikesepaneeli kõige alumise kihi. See kaitseb paneeli mehaaniliste jõudude eest, kuid samuti ka niiskuse eest. Tagaplaat on isolaatormaterjalist, mistõttu omab see ka nn elektrilist kaitset. Tagaplaadi materjalideks võivad olla erinevad polümeerid, nagu näiteks polüpropüleen, polüetüleentereftalaat ja polüvinüülfluoriid, mis kõik omavad erinevaid kaitse, termilisi ning UV- kiirguse vastupidavusomadusi. [22]

Kasutusel on ka kahekordse klaasiga paneele, kus tagaplaadi asemel kasutatakse samuti klaasi. Sellised on kasutusel paneelidel, millel on kahepoolsed elemendid või siis puudub raam. Klaas on polümeerkattest vastupidavam ning seda saab kauem kasutada. [22]

Harukarp on ilmastikukindel väike karp päikesepaneeli tagaküljel, kuhu jooksevad kokku kõikide elementide ühendused. Karp peab olema hästi disainitud, et sinna ei pääseks vett, mulda ja muud sellist, mis võib tekitada lühist. [22]

### 2.3.2 Päikesepaneelide liigitus

Päikesepaneelid võib jämedalt jagada kaheks: kristalsed ning amorfsed paneelid. Kristalsed paneelid on reeglina kallimad ning efektiivsemad. Need paneelid jagunevad omakorda monokristalseteks ning polükristalseteks paneelideks. Need kaks on ühtlasi ka enim kasutatavad päikesepaneeli tehnoloogiad. Amorfsed paneelid aga kujutavad endast amorfset kilet, mis töötab kui päikesepaneel. Need on odavad ja vähemefetiivsed, küll aga on nad paindlikumad ja vastupidavamad, kuna neil on head painde omadused. [23]

### 2.3.3 Toodang

Päikesepaneelid toodangu hindamist võimaldab Eesti tingimustes väga hästi arvutada PVGIS andmebaas. Seal on võimalik ise sisestada vajalikud lähteandmed, mis tõttu on võimalik anda väljundnäitajatele väga täpne hinnang. [23]

Päikesepaneel toodab enim elektrienergiat, kui see on suunatud otse vastu päikest. Kuna enamuse päikesepargid omavad staatilisi ehk paigal seisvaid paneele, siis mõjutab see toodangut märkimisväärselt. Riikides, kus ilmastiku tingimused kuigi palju aasta jooksul ei muutu, nagu näiteks osades Austraalia paikades, ehitatakse paneele, mis jälitavad päikest hommikust õhtuni. Selline süsteem võib päikesepargi toodangut ligi 30% tõsta. [23]

Päikesepaneeli toodangut mõjutavaks teguriks on ka paneeli asimuut ehk nurk paneeli ja põhjakaare suuna vahel. [23]

Autor toob välja osad toodangut mõjutavad olukorrad [23]:

- 1.) Päikesepaneelid, mis on paigaldatud kaldenurgaga  $30^\circ$ , kujutavad endast ligi 2% kuni 10% rohkem kadusid, mis on tingitud mustusest. Kui kaldenurk väheneb veelgi, tõusevad kaod märkimisväärselt.
- 2.) Päikesekiirguse hulk ühele pinnaühikule ei muutu, kui pöörata paneele  $15^\circ$  kas ida või lääne suunda.
- 3.) Pöörates päikesepaneele lõuna suunas  $15^\circ$  kuni  $25^\circ$ , langeb päikesekiirguse hulk ühe pinnaühiku kohta umbes 1%.

## 2.3.4 Tasuvus

Päikesepaneelide tasuvusaega mõjutavad põhiliselt kolm tegurit: rajamise maksumus, päikesepaneelide aastane toodang ning elektri hind. Nende kolme teguri põhjal on ülimalt keeruline defineerida üks kindel aastate arv, mis võiks olla päikeseelektrijaama tasuvusaeg. [11]

Siinkohal toob autor näite, milline oleks tasuvusaeg kindlal päikeseelektrijaamal kindlatel tingimustel. 11 kW päikeseelektrijaama, mille rajamise maksumuse hind on 14 400 €, tasuvusaeg on 10 aastat. See number tuleb sellest, et iga-aastane säästu hind oleks 1440 €, kui [11]:

- 1.) Elektrienergia lõpphinnaks on 0,14 €/kWh ning see ei muutu,
- 2.) Inflatsioon ja elektri hinna tõus on võrdsed,
- 3.) Päikeseelektrijaam toodab elektrienergiat 11 000 kWh aastas,
- 4.) Toodetud energia tarbitakse tervenisti kohapeal,
- 5.) Ei arvestata paneelide iga-aastast degradeerumist,
- 6.) Hoolduskulud on ligikaudu 100 €/aasta,
- 7.) Päikeseelektrijaam on välja ostetud.

Iga-aastase säästu hind on arvutatud järgmiselt:

$$(11\,000 \cdot 0,14) - 100 = 1440 \text{ €}$$

Tasuvusaeg on arvutatud järgmiselt:

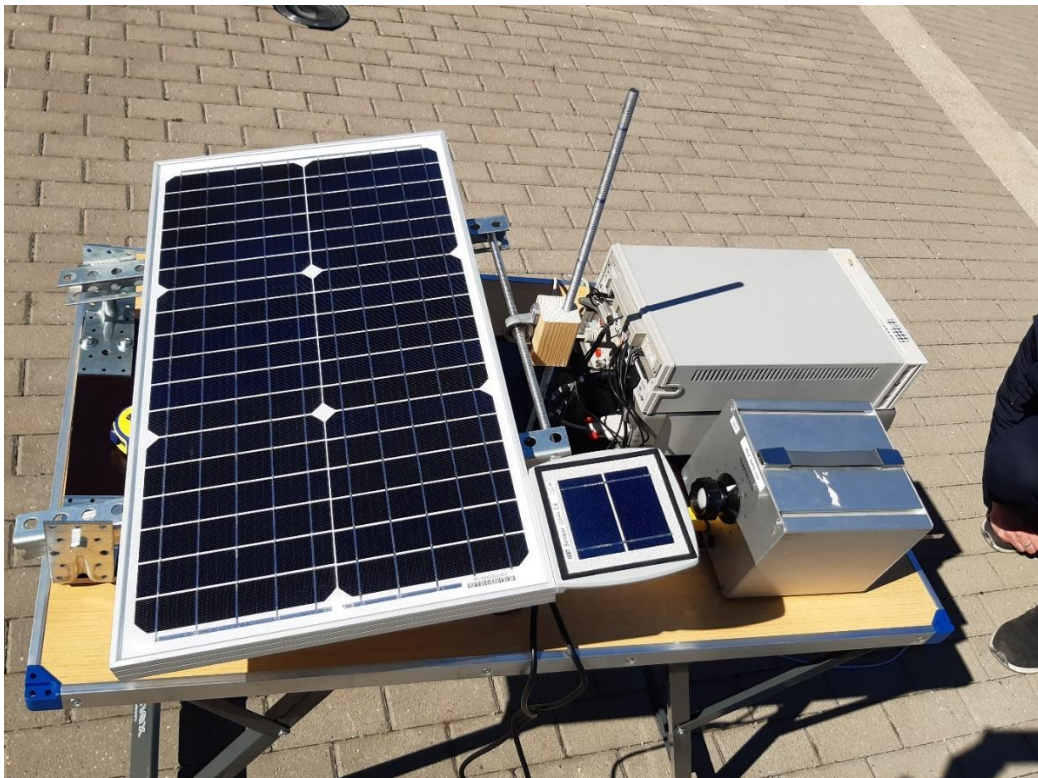
$$\frac{14\,000}{1440} = 10 \text{ aastat}$$

### 3 ESIMENE KATSESEADE NING KATSED

Autor sooritas esimesed katsed päiksepaistelisel päeval, kus neljal katsel viiest oli tegu selge ilmaga, seega katsetingimused olid üldiselt ühesugused. Muutus vaid päikeseasend paneeli suhtes ning samuti ka päikesepaneeli temperatuur, mida mõjutasid tuulepuhangud.




Katseseade koosnes päikesepaneelist, ISET sensorist, Multipleksorist, mõõteseadmest ning 100 ning 10 Ohmisest reostaadist. Mõõteseadme oli programmeeritud mõõtma päikesepaneeli pinget ja voolu ning ISIK sensori pinget ja takistust. Programmi alusel mõõtis seade igat väärtust kolm korda, ning siis salvestas nende aritmeetilise keskmise csv failitüübina arvutisse koos katse läbiviimise kellaajaga.

Autor ühildas katseseadme komponendid nii, et see moodustas ühtse terviku, mida sai mugavalt transportida. Autor ehitas alumiiniumraamide, laagri, keermelati ning puitklotsi abil ka võimaluse muuta päikesepaneeli kaldenurka maapinna suhtes. Nurga väljas selgitamiseks kasutati täisnurkse kolmnurga trigonomeetrilisi seoseid.



*Joonis 3.1 Katseseade ning selle rakendamine mõõtmistel*

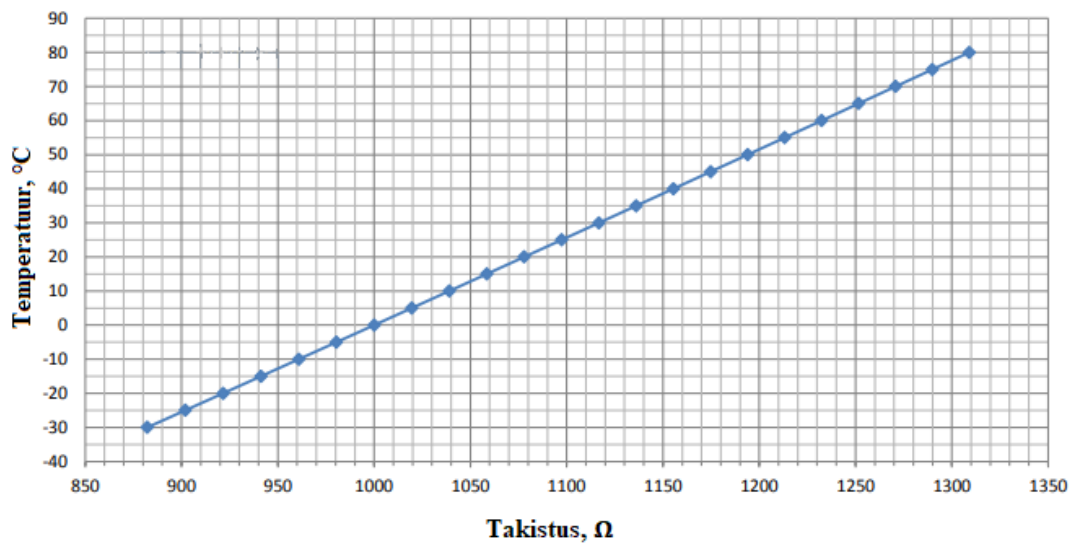
Päikesepaneeliks kasutati Cellevia Power'i monokristalset päikesepaneeli võimsusega 30 W mõõtmetega 650x350x25 mm. Joonis 3.1 iseloomustab paneeli nimiandmeid standardtingimustel.

 <b>MODEL: CL-SM30M</b>	
<b>PV Module Electricity Performance Parameter</b>	
<b>Cell type:</b>	Monocrystalline silicon solar cell
<b>Maximum power ( Pmax )</b>	30W
<b>Voltage at Pmax ( Vmp )</b>	18.6V
<b>Current at Pmax( Imp )</b>	1.62A
<b>Open-circuit voltage ( Voc )</b>	22.9V
<b>Short circuit current ( Isc )</b>	1.77A
<b>Max System Voltage :</b>	600V
<b>Temperature Range :</b>	-40°C ~ +85°C
<b>NOTE: POWER MEASURED UNDER STANDARD TEST CONDITIONS: 1000W/M<sup>2</sup> AM 1.5 GLOBAL, 25°C CELL TEMPERATURE</b>	
<b>WARNING!</b> This solar module produces electricity when exposed to light. Cover all modules in the PV array with opaque material before making any wrong connections or opening the terminal box.	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">  </div> <div style="margin-right: 20px;">  </div> <div> <b>Transfer Multisort Elektronik Sp. z o.o.</b>            Ustronna 41, 93-350 Lodz, Poland            Tel: +48 42 645 55 55, fax: +48 42 645 55 00            info@tme.pl. www.tme.eu         </div> </div>	

Joonis 3.2 Päikesepaneeli andmeleht

Temperatuuri mõõtmiseks kasutati ISET sensorit, mille tootjaks on Saksamaa ettevõtte IKS Photovoltaik. Sensor koosneb väiksesest monokristalsest päikesepaneelist, mis on ühendatud termotakistiga Pt1000. Autor mõõtis ISET sensori takistust ning pinget. Takistuse abil oli võimalik kindlaks määrata paneeli temperatuur. ISET sensorit kasutati töös sel eesmärgil, et mõõta päikese kiirguse intensiivust W/m<sup>2</sup> kohta. Selleks kasutati ISET sensori andmelehest saadud valemist 3.1. [24]





Joonis 3.3 ISET sensori temperatuuri-takistuse karakteristik

Teades paneeli temperatuuri, on võimalik välja arvutada päikesekiirguse intensiivsuse:

$$G = \left( \frac{1000 \cdot U_{Mess}}{U_{STC}} \right) \cdot (1 - T_k \cdot (T_{Mess} - 25)) \quad (3.1)$$

- Kus  $G$  – Päikesekiirguse intensiivsus,  $W/m^2$ ,  
 $U_{STC}$  – Sensori pinge standardtingimustel, V,  
 $U_{Mess}$  – Mõõdetud sensori pinge, V,  
 $T_k$  – temperatuuri tegur vastavalt paneelis kasutatud tehnoloogiale,  
 $T_{Mess}$  – sensori temperatuur, °C.

Katsete käigus kasutati mõõtmisel digitaalset multimeetrit 34401A. Multipleksoriks oli mudel 3499B Agilent Technologies'i poolt. Multipleksor ehk kommutaator on seade, millel on mitu sisendit kuid ainult üks väljund. Multipleksor aitab võimaldada erinevaid ühendusi ning siis lihtsate ümberlülitustega saada erinevaid väljundeid, nagu näiteks selle töö puhul saada ISET sensori pinge ja takistus ning päikesepaneeli vool ja pinge. Kõik mõõtmiseks vajalike seadmeid ja muud tehnikat võimaldas Tallinna Tehnikaülikool.

Programmi käivitamisel mõõdeti automaatselt nelja suurust: päikesepaneeli pinget ja voolu ning lisaks ka ISET sensori pinget ja takistust. Programmi algoritm oli loodud nii, et igat väljundsuurust mõõdeti kolm korda, ning nende aritmeetiline keskmine

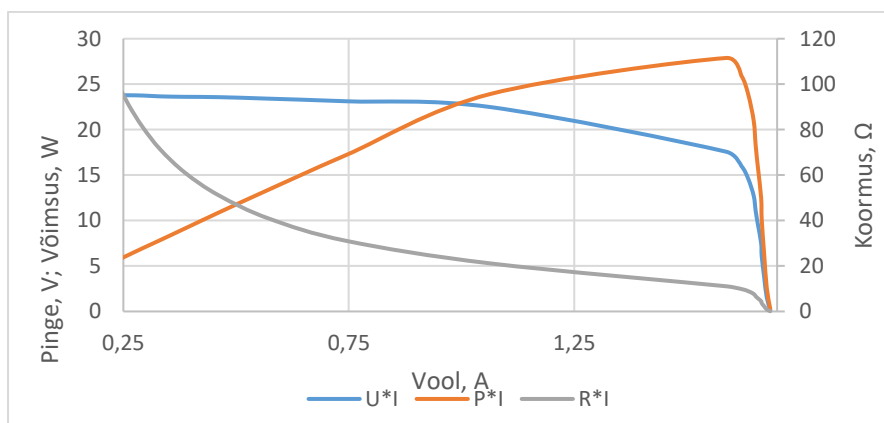
salvestati csv tüüpi exceli faili. Eelnimetatud mõõtmised viidi läbi nii, et sama kaldenurga ning koormustakistuse juures tehti kolm mõõtmist. Koormustakistuse vahemikud erinesid pea igal katsel, kuna autor tuvastas järk-järgult parimaid takistusvahemikke, mõeldes erinevatele karakteristikute kujunemisele.

Autor sooritas katseid viiel erineval kaldenurgal maapinna suhtes: 15°, 25°, 35°, 45° ja 55°. Selline vahemik valiti põhimõttel, et päikesepeakide rajamisel on paneelide kaldenurk just 35° ning autor valis sellest kaldenurgast veel kaks kõrgemat asendit ja kaks madalamat asendit. Päikeseenergeetika teooriast on teada, et toodang aasta lõikes on parim just 45° nurga all, kuid paneelide püstisema asendi tõttu on tuuletakistus suurem, mistõttu on majanduslikult otstarbekam paigaldada paneelid 35° nurga all.

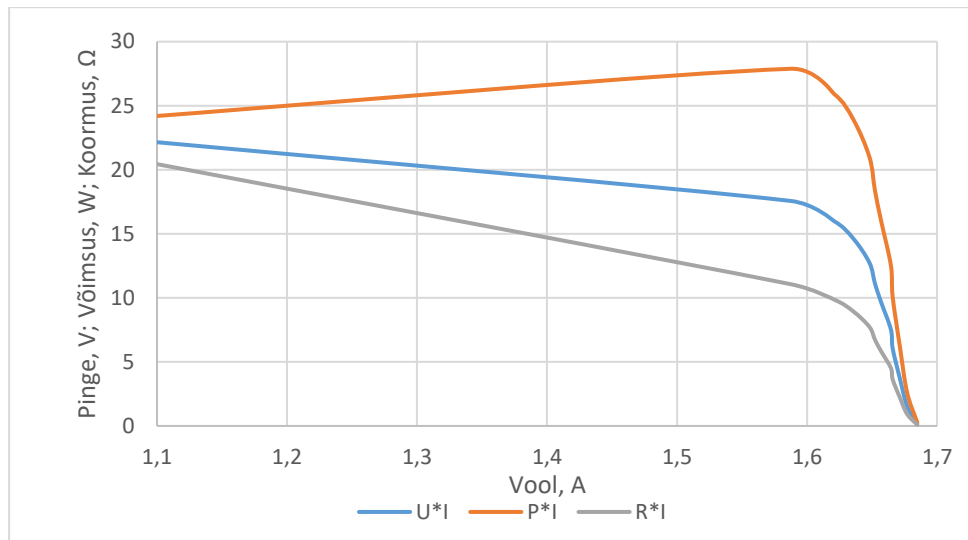
### 3.1 Katsete tulemused

#### 3.1.1 Esimene katse

Esimene katse sooritati päiksepaneeliga, kui selle kaldenurk maapinna suhtes oli 15°, ühtlasi oli paneel suunatud lõuna suunas.



Joonis 3.4 Võimsuse, pinge ja voolu muutumine takistuse vähendamisel katsel kaldenurgaga 15°



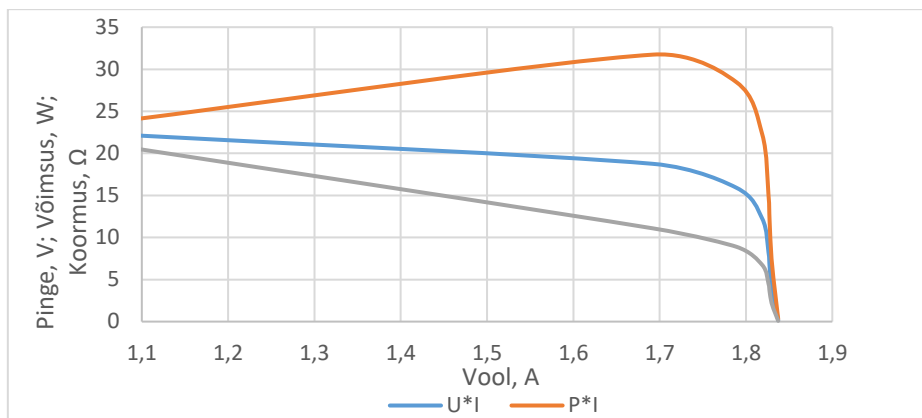
Joonis 3.5 Esimese katse tulemused vooluvahemikus 1,1 A kuni 1,7 A

Joonis 3.4 iseloomustab katsetulemusi esimesel katsel. Jooniselt on võimalik välja lugeda, et päikesepaneeli suurim väljundvõimsus saavutati 11,1  $\Omega$  takistuse juures. Seda takistust võib nimetada päikesepaneeli sobitatud koormuseks, sest just selle takistuse juures on päikesepaneeli toodang suurim. Päikesepaneeli pinge sel takistusel oli 17,57 V ning vool oli 1,59 A. Esimesel katsel olid suurimaks vooluks 1,68 A, mis saavutati takistuse 0,09  $\Omega$  juures. Juhtmete takistuste tõttu ei õnnestunud saavutada lühise olukorda takistusega 0  $\Omega$ .

Joonia 3.5 aitab töö lugejal paremini aru saada, kuidas päikesepaneeli pinge, vool, ja võimsus käituvad kui koormustakistust vähendada.

### 3.1.2 Teine katse

Teisel katsetusel oli päikesepaneeli ja maa vaheliseks kaldenurgaks 25° ning paneel oli suunatud lõunasse. Kuna katse tehti ajavahemikus 13:05 kuni 13:38, mis oli põhimõtteliselt Päikese kulminatsiooni ajal (13:18), eeldab autor, et sellisel katsel on päikesepaneeli toodang parem. Ühtlasi on paneel võrreldes maaga suurema nurga all, mis samuti peaks toodangut suurendama.

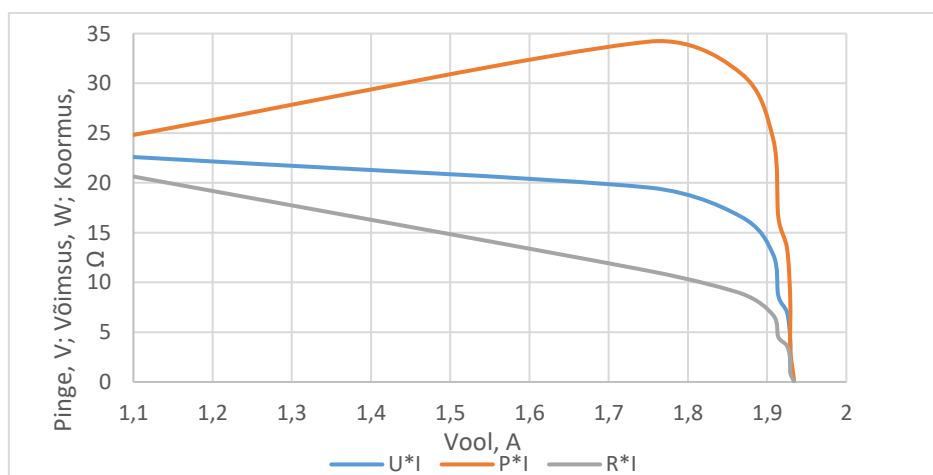


Joonis 3.7 Võimsuse, pinge ja voolu muutumine takistuse vähendamisel katsel kaldenurgaga 25°

Joonis 2.3 iseloomustab võimsuse, pinge ja voolu muutumist, kui vähendada paneelile rakendatud koormustakistust. Ühtlasi on graafikult võimalik välja lugeda, millal võimsuse kasv lõpeb ning hakkab langema. Niimoodi saab leida maksimaalse väljundvõimsuse väärtuse, ning mis olid sellisel juhul pinge, vool ja takistus. Teise katse puhul oli maksimaalseks võimsuseks 31,74 W ning pinge ja vool olid vastavalt 22,93 V ning 0,74 A. Takistuse 0,1 Ω juures oli paneelilt väljuv vool 1,84 A.

### 3.1.3 Kolmas katse

Kolmanda katsena mõõtis töö autor päikesepaneeli pinge, voolu ja seejuures ka võimuväärtuseid, vähendades seejuures koormustakistust 100 Ohmist kuni ligikaudu 0,1 Ohmini. Päikesepaneeli kaldenurk maa suhtes oli 35°.



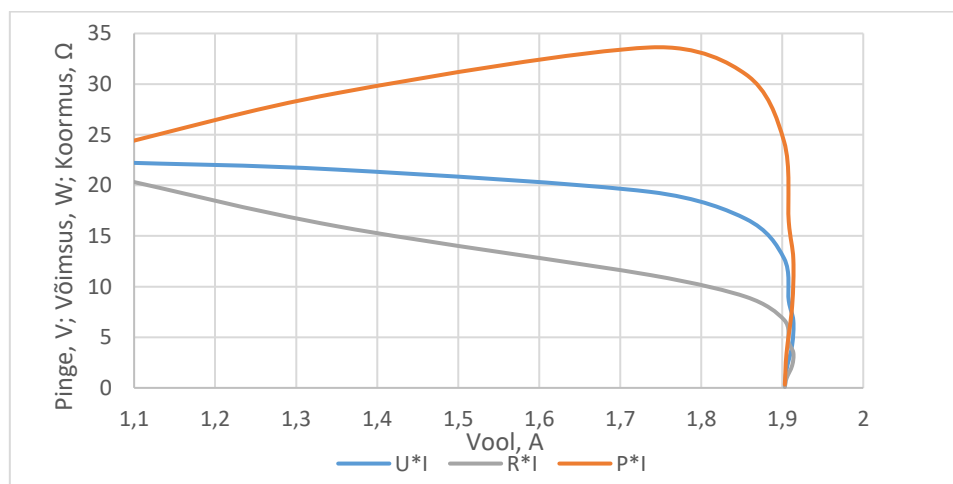
Joonis 2.4 Võimsuse, pinge ja voolu muutumine takistuse vähendamisel katsel kaldenurgaga 35°

Autor, nagu ka kõikide teiste katsete korral, tegi iga koormustakistuse korral kolm mõõtmist ning seejärel leidis nende aritmeetilise keskmise. Sama koormustakistusega katseid läbi viies märkas autor, et pinge iga katsega langes. Pinge langes iga kord erineval hulgal, kuid enamasti oli selleks ligikaudu 0,2 V. Pingelang esines ka siis, kui taevas oli täiesti selge kõikide katsete korral. Päikesepaneeli pingelang sellisel moel võib olla seletatav kahte moodi. Esimene variant on see, et katsete tegemise ajal oli tuul väga pagiline ja tugev, pagide ajal kujutab see paneelile väga head jahutamise võimalust, mistõttu pinge tõuseb. Samuti, kui on tuulevaiksem olukord, pinge langeb, sest paneeli temperatuur tõuseb. Teine variant pingelangu selgitamisel seisneb selles, et katsed sooritati pärast kulminatsiooni, mistõttu päikesekiirte langemisnurk pidevalt väheneb. Pingelang sama koormustakistuste korral esines ka katsetel peale kolmandat katset ning pingelang omas lineaarseid omadusi, mistõttu saab seda selgitada teise variandiga.

Ühtlasi on joonisel 3.7 näha tunnusjoonte kergelt lainetamist katse lõpul. See on seletatav sellega, et ilm peale kolmandat katset muutus, tekkisid väiksed pilved, mis häiris paneelide tootlikkust. Suuremate pilvede korral katsed peatati ning jätkati, kui taevas oli jälle selge. Sellega käib kaasas ka asjaolu, et päikesekiirte langemisnurk on selle ootamisega vähenenud ning katsetulemused tulevad mõnevõrra erinevaid, kuid erinevused ei ole nii suured, nagu need oleksid pilvise ilmaga tehtud katsete korral.

### 3.1.4 Neljas katse

Neljandal katsel liigutati päikesepaneel asendisse, kus kaldenurk maa suhtes oli 45°.



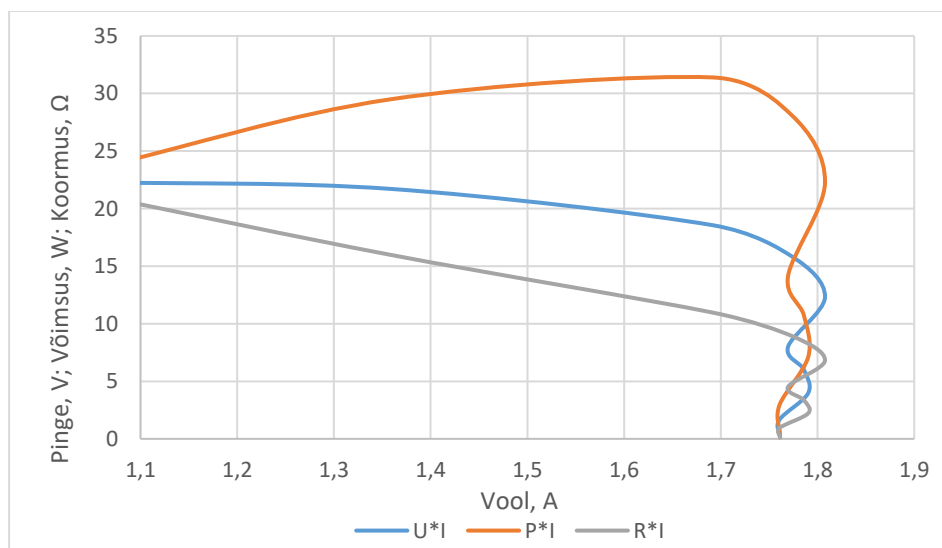
Joonis 3.8 Võimsuse, pinge ja voolu muutumine takistuse vähendamisel katsel kaldenurgaga 45°

Jooniselt 3.8 on näha, et väikseima takistuse, umbes  $0,09 \Omega$ , juures on vool väiksem, kui näiteks  $4,5 \Omega$  takistuse juures. Teoreetiliselt on selline olukord võimatu. Mida väiksemaks läheb koormustakistus ehk mida rohkem läheneb elektriabel lühiseolukorrale, läheneb pinge nullile ning vool kasvab. Katsete tulemusest koostatud graafiku omapära saab seletada sellega, et viimastel katsetel mõjutas katsetulemusi pilvede olemasolu, mis tõttu päikesekiirguse intensiivsus oli madalam kui katse alguses.

Neljandal katsel tuli maksimaalseks võimsuseks  $31,4 \text{ W}$ , takistus oli sel hetkel ligikaudu  $11 \Omega$ .

### 3.1.5 Viies katse

Viimandal ja ühtlasi ka viimasel katsel oli päikesepaneeli kaldenurgaks maa suhtes  $55^\circ$ . Selle katse lõpus saadud tulemusi hakkas tugevalt mõjutama pilvede ilmumine taevasse, mis häiris paneeli tootlikkust tugevalt, mida iseloomustab ka järgnev Joonis 2.6.

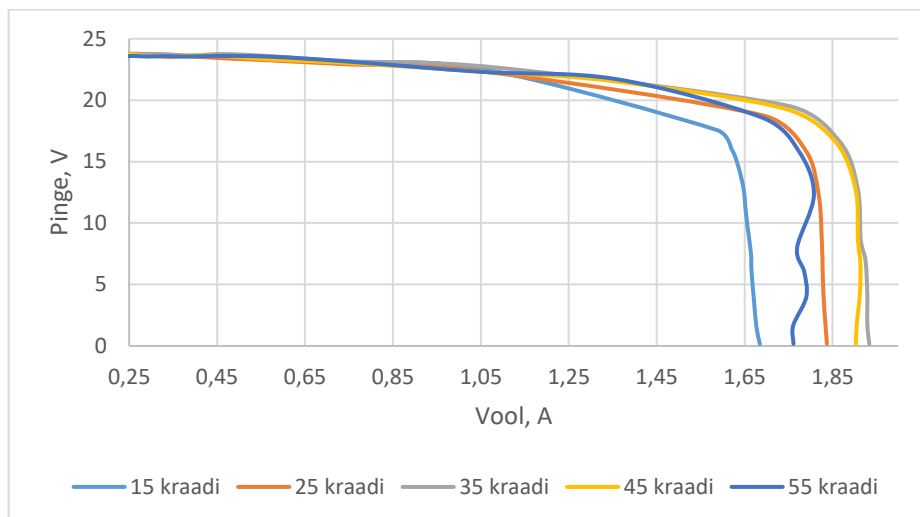


Joonis 3.9 Võimsuse, pinge ja voolu muutumine takistuse vähendamisel katsel kaldenurgaga  $55^\circ$

Joonis 3.9 iseloomustab ilmekalt pilvede mõju päikesepaneeli toodangule. Katse lõpus on tulemused üsna kaootilised ning muutus toodangus märkimisväärne. Maksimaalne võimsus selle katse puhul oli  $31,4 \text{ W}$ .

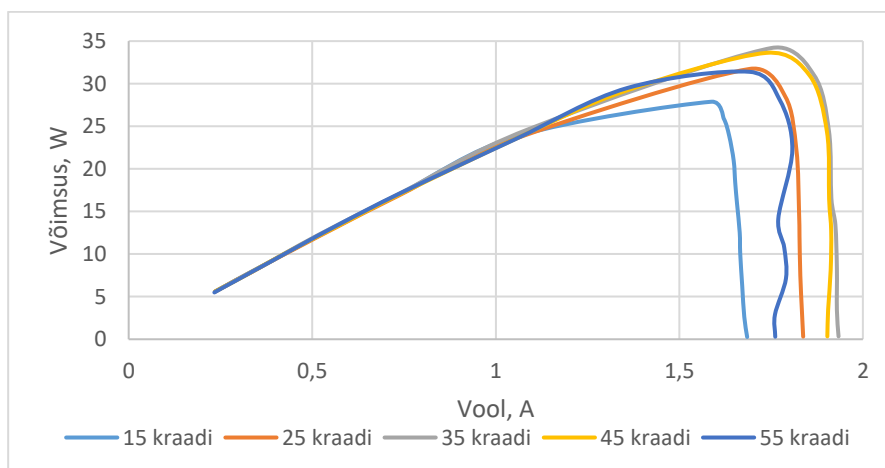
### 3.1.6 Esimese mõõteseadmega tehtud katsete kokkuvõte

Tehtud katsed ei olnud tehtud kindlasti ideaaltingimustel ning lisaks sellele muutusid ka tingimused iga katse järel veidi, mis mõjutasid saadud tulemusi.



Joonis 3.10 Voolu- pingetunnusjoon erinevate päikesepaneelide nurkade korral

Graafikult on näha, et väiksemad voolud esinesid just 15 kraadise nurgaga ning 55 kraadise nurgaga mõõdetud päikesepaneeli korral. (kuid neil on siiski märkimisväärne vahe, pean veel täpsustama miks see nii on). Suurimad voolud ilmusid katsetel 35 kraadi ning 45° korral, mis sobib päikeseenergeetika teooriaga, sest nendel kaldenurkadel on päikesekiirte langemisnurk kõige ristnurga lähedasem. Siiski, kaldenurgal 35° on toodang veidi parem, kui paneelide kaldenurk oli 45°. Peaks olema vastupidi, aga neid numbreid võis mõjutada asjaolu, et katse kaldenurgaga 35° tehti, kui Päikese kulminatsioonist oli möödunud vähem aega, kui katse kaldenurgaga 45° korral. See jällegi näitab, kuidas mõjutab kellaeg toodangut.



Joonis 3.11 Võimsuse-voolu tunnustjoon erinevate päikesepaneeli kaldenurkade korral

Võimsus, nagu oli ka arvata, on suurim kaldenurga  $35^\circ$  ja  $45^\circ$  korral. Teooria kohaselt peaks olema suurim võimsus kaldenurga  $45^\circ$  korral, kuid jääb veidi alla võimsusel, mis mõõdeti, kui kaldenurk oli  $35^\circ$ . Kuna katsed kaldenurgaga  $45^\circ$  said tehtud hiljem kui katsed kaldenurgaga  $35^\circ$ , siis sellest tulenev võimsuse lang tundub olevat sama nagu kaldenurkade  $45^\circ$  ja  $55^\circ$  korral, seetõttu on nende toodang ligikaudselt võrdne.

### 3.2 Teine katseseade ning läbiviidud katsed

Teiseks katseseadmeks ehitas autor suure paneeli, mis omakorda koosneb viiel erineval tehnoloogial rajatud päikesepaneelidest.



Joonis 3.12 Autor sooritamas katseid teise katseseadmega.

Katsetatava päikesepaneeli ehitamisel oli kasutusel viis erinevat elemendi tüüpi, kolm neist on monokristalsed ning kaks on polükristalsed. Üks kolmest monokristalsetest paneelidest on ka kahepoolne. Hoolimata sellest, et elementide tehnoloogiaid on ainult kaks, pärinevad kõik paneelid erinevatelt tootjatelt ning nende karakteristikud on erinevad.

Monokristalsed elemendid on ühendatud jadamisi ning neid on kõigis kolmes paneelis kaheksa. Polükristalseid elemente on kümme ning need on samuti ühendatud jadamisi. Põhjus, miks on paneelides kasutusel eri arv elemente, seisneb selles, et sellise loogikaga mahub ühele katsepaneelile võimalikult palju elemente ja ruum on hästi kasutatud. Mõõtetulemused on võimalik taandada ka elemendile, mistõttu on saadud tulemused omavahel võrreldavad.



Mõõteseadme ehitamisel kasutati alumiiniumraami detaile, kahte karastatud klaasi mõõtmetega 1050x750 mm, kahte pleksiklaasi mõõtmetega 1047x747 mm, alumiiniumist koostatud kolmnurkse kujuga tugisammast, puitprussi, keermelatti, 10 meetri jagu 4 mm<sup>2</sup> ristlõikega kaablit, 10 meetri jagu 0,4 mm<sup>2</sup> kaablit, kahte 10 Ohmist reostaati, lisaks vajalikud kruvid, mutrid, poldid.

Arvestades elementide tootjapoolseid andmelehti, oli kõige võimsam element üks monokristalsetest, mille võimsuseks referentstingimustel on kuni 5,4 W. Ning kuna pinge on ligikaudu 0,5 V, siis järelikult võib vool olla 10,8 A. Voolu suure väärtuse tõttu oligi töö autor sunnitud kasutama kahte reostaati rööbiti, sest ühe reostaadi voolu taluvus oli 5,7 A.

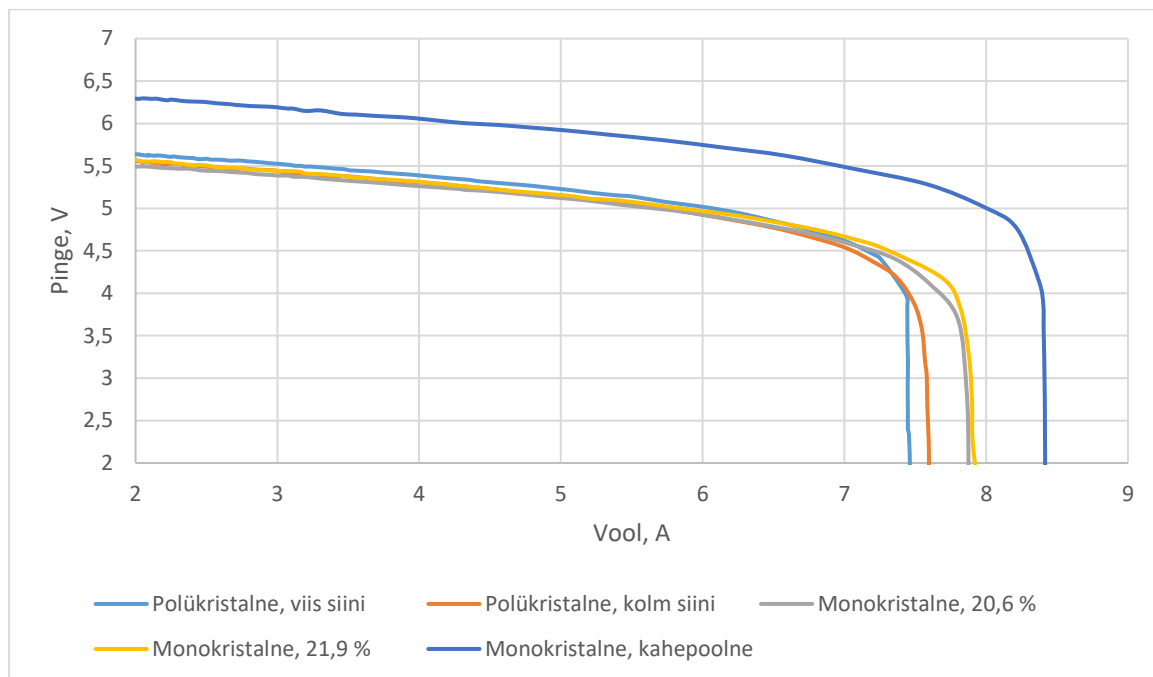
Erinevalt esimestest katsetest esimese mõõteseadmega on teise mõõteseadme katsed tunduvat lühemad. Seda seetõttu, et mõõtmisel kasutati ostsilloskoopi, mille abil sai teha palju mõõtmisi ühe ajaühiku kohta. Katse käigus liigutas autor kahte rööbiti olevat 10 Ω reostaati (ehk kokkuvõttes 5 Ω-st koormustakistus) nulli ning tagasi maksimum väärtuseni. See võttis autoril aega ligikaudu 10-12 sekundit, kuid ostsilloskoop oli võimeline tegema selle aja vältel ligikaudu 125 000 mõõtmist! Autor kasutas andmete töötlemisel Exceli funktsioone ning leidis maksimaalse voolu väärtuse. Kõik edasised andmed kustutati (ehk andmed, mis tekkisid reostaadi tagasi maksimum väärtusele liigutamisel). Sedasi oli võimalik vähendada andmete hulka ja ühtlasi kätte saada vajaminev pinge-voolu tunnusjoon. Kuna andmeid jäi siiski alles üpris palju, vahemikus 40 000 – 60 000, siis leidis autor, kasutades teisi Excel funktsioone, keskmise väärtuse iga paarisaja väärtuse tagant. Nii jäi lõppandmeridu saja ringi, mis andis juba väga ilusa tunnusjoone.

Kuna paneele oli viis ning kaldenurga vahemike, millel katseid läbi viidi, samuti viis, tuli kõiki katseid kokku 25. Autor ei hakka kõikide katsete kohta graafikuid töös esitama, kuid toob ära kõikide paneelide graafikud 35 kraadi juures, kuna siis on toodetavad võimsused kõige suuremad. Ühtlasi, toob autor välja kõige võimsama paneeli pinge-voolu tunnusjoone kõikidel erinevatel kaldenurkadel, et hinnata selle mõju päikesepaneeli toodangule.

Viiest paneelist kaks oli ehitatud nii, et elemente oli kasutusel kümme, ning ülejäänud kolm paneeli koosnesid kaheksast jadas elementidest. Katse käigus saadud andmed muutis autor töödeldavaks, teisendades kolm paneeli, kus oli kaheksa elementi, arvutuslikult kümne elemendiliseks paneeliks.

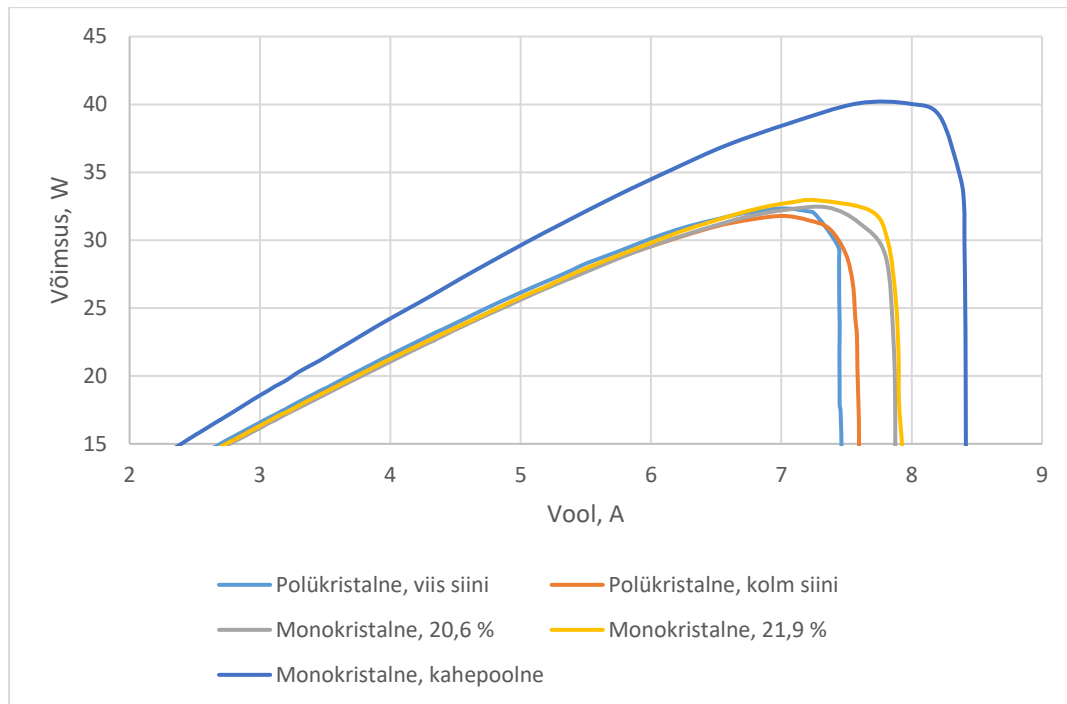
### 3.2.1 Paneelide tulemused kaldenurga 35° korral

Autor sooritas mõõtmised viie erineva paneeliga, kusjuures kõikide paneelide kaldenurk maapinna suhtes oli 35°. Nurga 35° valis autor lähtudes sellest, et just sellel nurgal rajatakse suuri päikeseparke. Teooria küll ütleb, et parim nurk selleks on 45°, kuid sellise nurga korral suureneks tuuletakistus ning päikesepargi konstruktsiooni tuleks oluliselt tugevdada, mis ei oleks majanduslikult otstarbekas.



Joonis 3.13 Viie erineva päikesepaneeli pinge- voolu tunnusjooned 35° kaldenurga juures

Jooniselt 3.13 on näha osadel tunnusjoontel kerget säbrulisust, see on seletatav äkiliste tuulepuhangutega, mis jahutasid paneeli ning tõstsid paneeli toodangut.



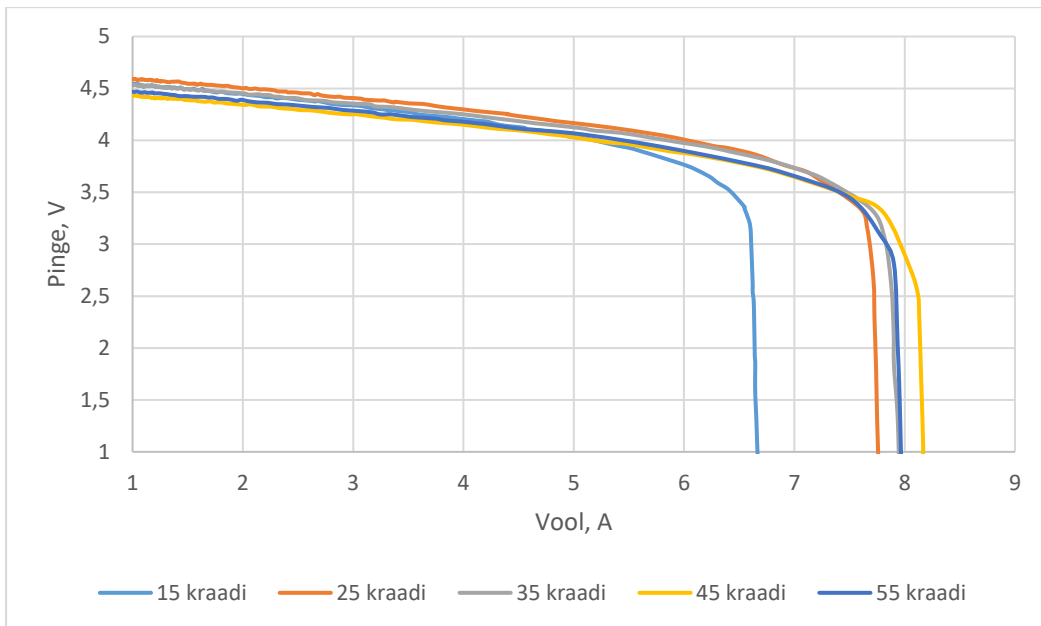
Joonis 3.14 Viie paneeli võimsuse-voolu tunnusjooned kaldenurga 35° juures

Joonistelt 3.13 ja 3.14 on näha, et suurima toodanguga päikesepaneel on kahepoolne monokristalne paneel, mille esikülje efektiivsustegur tootja andmetel on 20,6% ning tagakülje oma on 20%. Selle paneeli maksimaalne mõõtmiste keskmine võimsus tuli ligikaudu 40 W.

Madalaima toodanguga paneel oli kolmesiiniline polükristalne päikesepaneel, mille efektiivsustegur on 4,74% ning keskmine maksimaalne võimsus 31,78 W. Kuid tuleb märkida, et viiesiinilise polükristalse paneeli maksimaalne keskmine võimsus ei olnud väga palju suurem, 32,32 W.

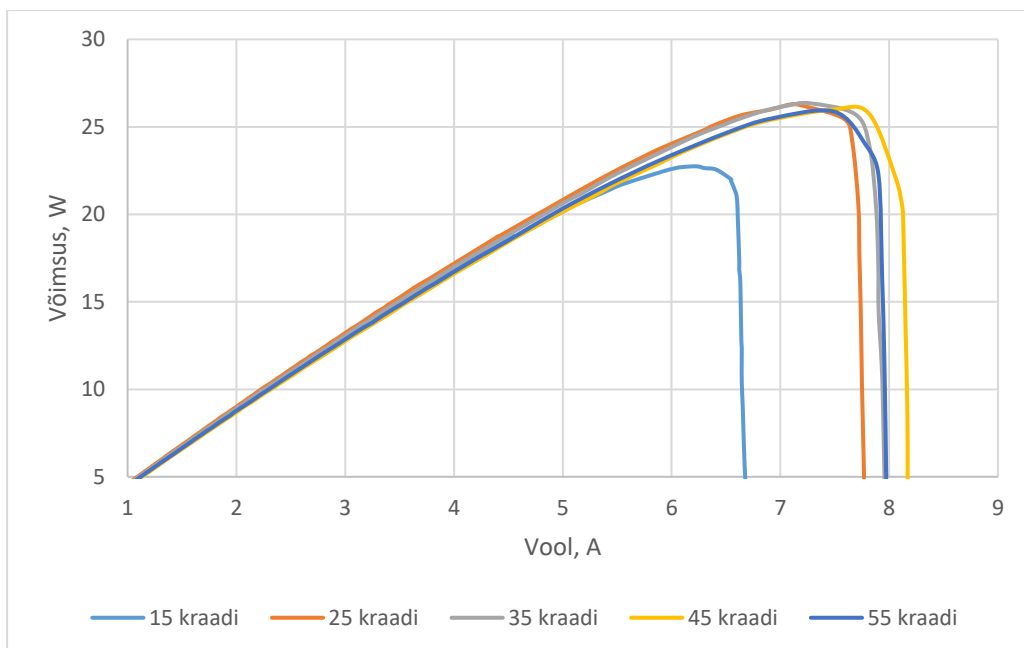
### 3.2.2 Monokristalse päikesepaneeliga saadud tulemused erinevate kaldenurkade korral

Siin analüüsib autor monokristalse päikesepaneeliga, mille efektiivsustegur oli 21,9%, tehtud katsete tulemusi erinevate kaldenurkade korral. Autor valis selleks analüüsiks just sellise paneeli, kuna see on suurima oodatava efektiivsusteguriga.



Joonis 3.15 Pinge-voolu tunnusjoon monokristalsel paneelil erinevate kaldenurkade korral

Jooniselt 3.15 on näha, et ping-voolu tunnusjoon on väga sarnane kaldenurkade 55° kui ka 35° korral, mis on igati loogiline. Teoriast on teada, et parim kaldenurk päikesepaneelile on 45°, ning kaldenurgad 35° ja 55° asuvad mõlemad parimast nurgast kümne kraadi kaugusel. Graafikult on näha, et kaldenurga 35° puhul on toodang mõnevõrra parem, seda seletab parem päikesekiirguse intensiivsus, kuna katse kaldenurgaga 35° tehti sisuliselt mõni hetk pärast Päikese kulminatsiooni.

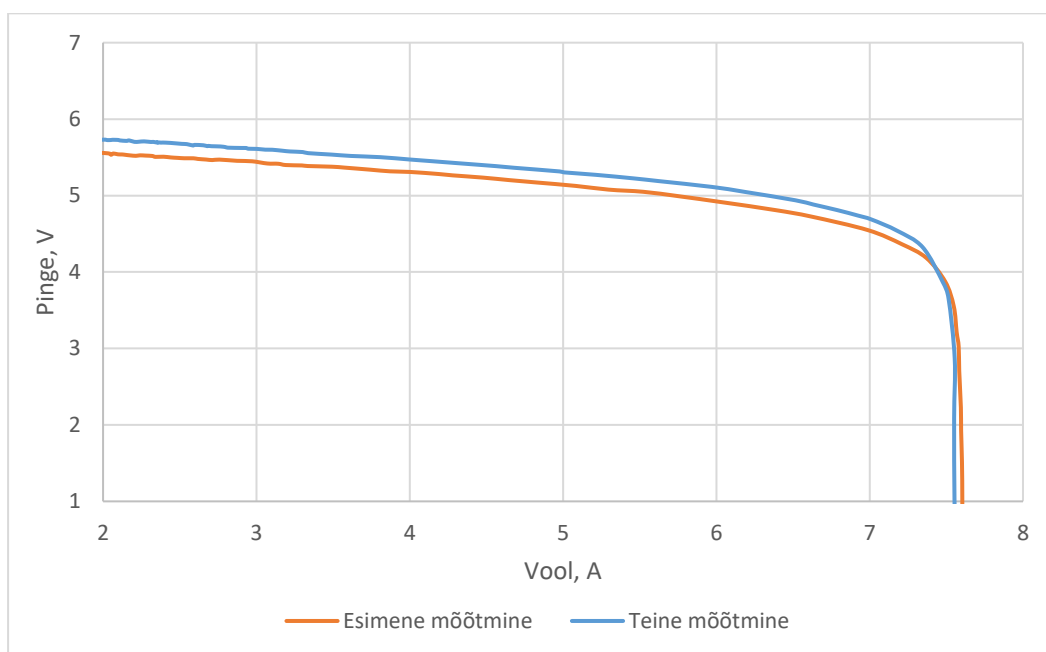


Joonis 3.16 Võimsuse-voolu tunnusjoon monokristalsel paneelil erinevate kaldenurkade korral

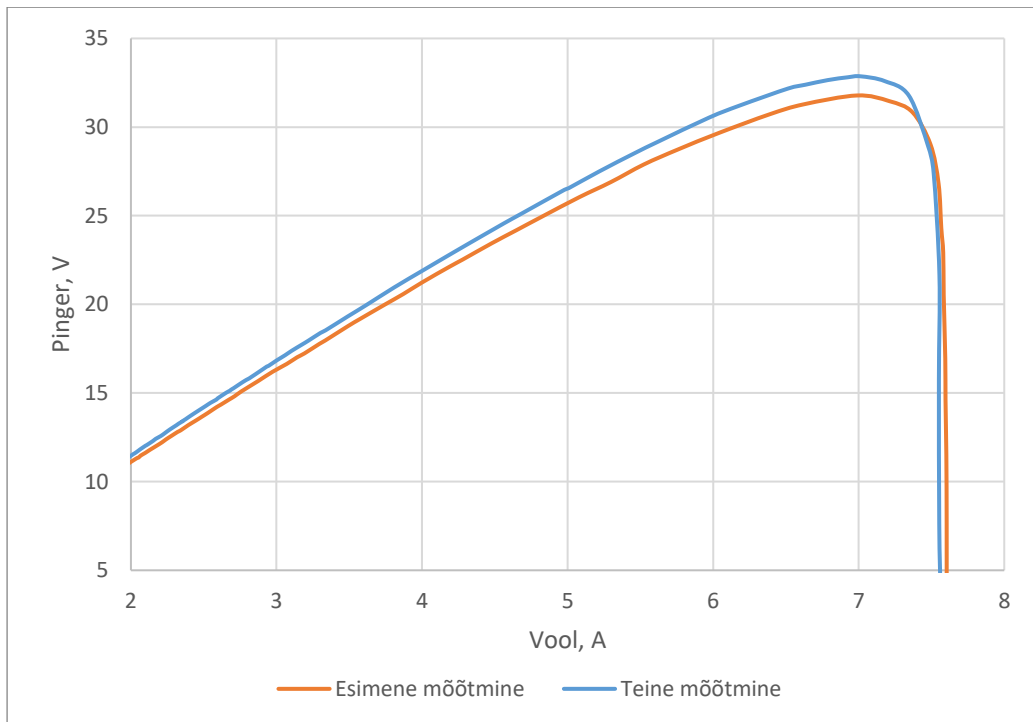
Katseandmeid oli kokku 125 000 rida Exceli programmis. Katse hõlmas endast reostaadi liigutamist 5 ohmilt ligikaudu nullini ning siis tagasi maksimumi. Autor võttis andmed esimesest vahemikust ehk kui reostaati lükati nullini. Nii jäi järele ligikaudu 45 000 rida andmeid. Nendest omakorda leidis autor keskmise väärtuse iga 300 rea tagant, mis andis 150 rida pinget ja voolu väärtuseid. Võimsuse väärtused leiti just nende 150 pinget ja voolu väärtuste korral. Nii tuli maksimaalseks võimsuseks 26,35 W ning seda 35° kaldenurga juures. Ligikaudu sama tulemus ehk 26,29 W tuli 25° kaldenurga juures. Nende võimsuste vahe on väga väike, seda seletab fakt, et 25° kaldenurgaga katse sooritati külmemal päeval, mistõttu on paneeli toodang parem. Mõlemal päeval oli katse sooritamise ajal selge taevas.

Järgmise suurima võimsusega katse kaldenurk oli 45°, kus toodang oli ligikaudu 26,0 W. See on väiksem kui 35° kaldenurga korral, kuigi katsed tehti samal päeval. Põhjuseks toob autor välja päikese kiirguse intensiivsuse langemise 45° kaldenurga ajal, kuna võimsus 26,0 W saadi kellaajal 13:48 ning 35° kaldenurgaga katse sooritati 13:24. Sellel päeval, 10. mail, oli päikese kulminatsioon 13:18. Päikese, Kuu ja planeetide efemeriidid, tõus ja loojumine « Astronoomia.ee

Tõestus, et teisel päeval tehtud mõõtmise toodang on parem tänu külmemale temperatuurile, seisneb kahe katse tulemustes, mis viidi läbi kahel erineval päeval. Katseks valis autor kolme siinilise polükristalse paneeli 35° juures.



Joonis 3.17 Kolmesiinilise polükristalse paneeli pinget-voolu tunnusjoon kaldenurga 35° korral erinevatel päevadel



Joonis 3.18 Kolmesiinilise polükristalse paneeli võimsuse-voolu tunnusjoon kaldenurga 35° korral erinevatel päevadel

Sama katse korral tuli teisel mõõtmisel saadud maksimaalseks võimsuseks 32,86 W ning esimesel mõõtmisel saadud maksimaalseks võimsuseks 31,78 W. Ühtlasi, tuleb ka ära märkida, et esimene katse viidi läbi 10. mail ning teine katse 16. mail. Kellaajad olid vastavalt 13:15 ja 14:27. Teine katse on tehtud hilisemal kellaajal, seega päikese kiirguse intensiivsus oli madalam. Ometi on toodang teisel mõõtmisel parem. See iseloomustab ilmekalt temperatuuri mõju päikese paneeli toodangule.

Temperatuuri erinevust sai võrrelda ka ISET Sensori termotakisti väärtuste abil. Esimene katse ehk 10. mail sooritatud katse vältel oli ISET Sensori pinna temperatuur keskmiselt 41,51 °C. Teisel katsel, mille autor viis läbi 16. mail, oli keskmine temperatuur katsete vältel 37,88°C. Kusjuures, esimese katse keskmine päikese kiirgusvoo tihedus oli 860,62 W/m<sup>2</sup> ning teisel katsel oli see 859,5 W/m<sup>2</sup>. Sellest võib järeldada, et nende teisel mõõtmisel saadud suuremad tulemused on tingitud just nimelt madala temperatuuri tõttu. Siit on võimalik välja arvutada temperatuuri mõju päikese paneeli toodangule.

Järgnevate arvutuste tegemisel loeb autor mõlema katse puhul olevat päikese kiirguse tihedused võrdseteks. Katseandmetest on selgunud, et katsete keskmiste võimsuste vahe oli 1,08 W ehk 3,29%. Ühtlasi selgus, et ISET Sensori kahe katse keskmiste

temperatuuride vahe oli 3,63 °C. Seega võib väita, et kolmesiinilise polükristalse paneeli võimsuse kadu 1 °C tõustes on ligikaudu:

$$\Delta P = \frac{1,08}{3,63} = 0,3 \text{ W},$$

mis on 0,91 protsendiline langus võimsuses. Kahjuks puuduvad selle elemendi andmelehe erinevad näitajad temperatuuri kohta, seega ei ole võimalik neid andmeid omavahel võrrelda.

**LISAD**



## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös valmistas autor kaks mõõteseadet, mille abil testiti erinevate päikesepaneelide toodangut vastavalt erinevatele katse tingimustele. Lisaks õpiti põhjalikult tundma päikeseenergeetikat ning sellega seonduvat teooriat, nagu näiteks erinevate pooljuhtmaterjalide kasutamine päikesepaneelis ja fotoelektrilised protsessid, millel põhineb päikesepaneelide põhimõte

Esimene katseseade koosnes multipleksorist, multimeetrist, päikesepaneelidest, ning muudest erinevatest komponentidest, tänu millele oli võimalik komplekt viia välitingimustesse ning sooritada erinevaid mõõtmisi. Paneeli tootjaks oli Cellavia Power ning paneeli maksimaalseks võimsuseks standardtingimustel firma andmelähe järgi oli 30 W. Paneeli oli võimalik liigutada staatilisse asendisse, nurgad määrati laboris täisnurkse kolmnurga trigonomeetriliste seoste abil ning joonistati vastavad märgendid keermelatile, mille abil paneeli asend fikseeriti.

Paneeliga sooritati mõõtmisi viiel kaldenurgal: 15°, 25°, 35°, 45° ja 55°. Katseid sai tehtud takistuse vahemikus 100 ohmi kuni ligikaudu 0,3 ohmi, osade katsete korral oli võimalik saada kätte ka lühisvool. Parim võimsus saavutati, kui sooritatud katse viidi läbi kaldenurgaga 35°. Selle katse korral oli maksimaalseks võimsuseks 34,19 W näiteks 45° korral oli see 33,62 W. Kõige madalam oli võimsus kaldenurgaga 15°, milleks oli 27,88 W. Teoreetiliselt peaks 45° olema parim kaldenurk päikesepaneeli jaoks. Kaldenurga 45° ajal arvutati ISET Sensori abil päikesekiirguse intensiivsuseks 876,17 W/m<sup>2</sup> ning 35° korral oli see 868,8 W/m<sup>2</sup>, kuid ISET Sensori temperatuurid oldi vastavalt 36,11 °C ja 32,93 °C. Nendest tulemustest on ilmekalt näha temperatuuri mõju toodangule, mis on protsentuaalselt suurem kui päikesekiirguse mõju.

Teise katseseadme jaoks valmistas autor kahest karastatud klaasist ja pleksiklaasist paneelid, mis installeeriti kokku üheks suureks paneeliks alumiiniumraamide abil. Ühel paneelil oli karastatud klaasi ja pleksiklaasi vahel kolm paneeli. Nendeks olid 21,9 protsendiline monokristalne, 20,6 protsendiline monokristalne ning kahepoolne monokristalne paneel efektiivsusteguriga 20,6 % pealt ning 20,0 % tagant. Kõik kolm paneeli koosnesid kaheksast jadas elemendist. Teisel karastatud klaasi ja pleksiklaasi vahel oli kaks paneeli. Nendeks olid viiesiiniline polükristalne paneel ning kolmesiiniline polükristalne paneel. Paneelid joodeti kokku spetsiaalse tinaga kaetud vasklindid. See järel joodeti kokku ühendatud paneeli mõlemale klemmile neli juhet: kaks neist olid voolu mõõtmiseks ning need olid ristlõike pindalaga 4 mm<sup>2</sup>, et kannatada suurt voolu,

ning ülejäänud kaks olid 0,75 mm<sup>2</sup>, millega mõõdeti pinget. Paneeli kaldenurga muutmise süsteemi mõtles autor välja analoogselt esimese katsega.

Autor tegi nende paneelidega kokku 25 katset. Iga paneeliga vastavalt viis katset, mis tulid kaldenurkadest 15°, 25°, 35°, 45° ja 55°. Graafikute komplekti moodustati kolm tükki, iga komplekt hõlmas endast pinge-voolu ja võimsuse-voolu tunnusjoont. Üks graafikute komplekt moodusati kõigide paneelide kohta kaldenurgal 35°. Sealt selgus, et suurima toodanguga, ligi 20 % parem, oli kahepoolne monokristalne paneel, mille maksimaalseks keskmistatud võimsuseks tuli 40,07 W. Teised toodangu järgi parimal paneelil, 21,9 protsendilisel monokristalsel, oli 32,94 W. Kahepoolne paneel on küll hea, kuid tema hind on ka kuni kaks korda kallim. Neid tasub kaaluda, kui on vaja suurt toodangut aga pole piisavalt palju ruumi paneelide rajamiseks pakkuda. Ühtlasi pole kahepoolsetel paneelide kuigi palju mõtet kui need on näiteks eramaja katusel ja päikesevalgus sinna ei jõua. Küll aga tasub nendele mõelda näiteks plekk-katuse korral, mis on väiksema nurga all kui sinna rajatavad paneelid, et valgus pääseks ka paneeli taha.

Ühtlasi, võrdles autor 21,9 protsendilise efektiivsusteguriga monokristalse paneeli toodangut erinevatel nurkadel. Parim keskmine maksimaalne võimsus esines kaldenurgaga 35° juures, kus selleks oli 26,35 W. Väga lähedal oli võimsuse väärtus 26,29 W, mis saavutati kaldenurgaga 25°. Seda seletab see, et see katse tehti teisel päeval, kus ilus pilvitu ilm, kuid oli väga jahe väljas.

Et täpsemini kontrollida eelmises paragrahvis väidetut, tegi autor kolmanda uurimise kolmesiinilise polükristalli korral ning kaldenurgaga 35°. Päikeseikiirguse intensiivsuse erinevus tuli läbi ISET Sensori arvutades kõigest 1 W/m<sup>2</sup>. Seega võib oletada, et see kuig palju mõju toodangule ei avalda. Küll oli aga 3,6 kraadiline temperatuuri erinevus. Võimsus soojema ilma puhul tuli 31,78 W ning külmema ilma korral 32,86 W. Katsed olid mõlemad koostatud ligikaudselt sama päikese kaldenurga korral. Selle suhte järgi leidis autor, et võimsuse kadu 1 °C tõustes on ligikaudu 0,3 W, mis on ligikaudu 0,91 protsenti. See katse samuti iseloomustab, et temperatuuril on olemas märkimisväärne mõju päikesepaneelide toodangule.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Euroopa Keskkonnaagentuur, „Kliimamuutused,“ 03 06 2016.
- [2] L. Bernstein, P. Bosch, O. Canziani, Z. Chen, R. Christ ja O. Davidson, „Climate Change 2007: Synthesis Report,“ 12 11 2007.
- [3] Keskkonnaministeerium, „Kliimamuutuste olemus,“ 25 08 2021.
- [4] C. X. Zhong, „Causes of Global Climate Change,“ *international Journal of Global Warming*, 2016.
- [5] E. Risthein, Sissejuhatus Energiatehnikasse, Tallinn: Kirjastus Elektriajam, 2007.
- [6] AS Tera, „Päikesekiirgus Eestis,“ 18 07 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tera.ee/paikesekiirgus-eestis/>.
- [7] IEA, „Solar PV,“ 2020. [Võrgumaterjal].
- [8] Statistikaamet, „Taastuvenergeetikast elektri tootmine kasvab jõudsalt,“ 2021.
- [9] EnergySage, Inc, „Most Efficient Solar Panels: Solar Panel Cell Efficiency Explained,“ 05 04 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>.
- [10] Liaison Ventures, inc, „How Much Do Solar Panels Cost?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://homeguide.com/costs/solar-panel-cost#:~:text=Residential%20solar%20energy%20costs%20%240.08,type%20of%20solar%20panels%20installed..>
- [11] AS Tera, „Maksumus,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tera.ee/maksumus/>.
- [12] EnergySage, Inc, „What is the History of Solar Energy and When Were Solar Panels Invented?,“ 03 05 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://news.energysage.com/the-history-and-invention-of-solar-panel-technology/#:~:text=In%20theory%2C%20solar%20energy%20was,light%20to%20rches%20for%20religious%20ceremonies..>
- [13] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Solar Photovoltaic Cell Basics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>.
- [14] R. Perälä, Päikeseelekter, Ehitame, 2018.
- [15] Informatorium OÜ, „N-pooljuhid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/ainete-elektrijuhtivus/n-pooljuhid/>.
- [16] C. Honsberg ja S. Bowden, „Formation of a PN- junction,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/formation-of-a-pn-junction>.
- [17] Strephonsays, „Erinevus fotoelektrilise efekti ja fotogalvaanilise efekti vahel,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.strephonsays.com/difference-between-photoelectric-effect-and-photovoltaic-effect>.
- [18] Clean Energy Reviews, „Solar Panel Construction,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. [Kasutatud 20 03 2020].
- [19] N. Guerra, M. Guevara, C. P. Arias ja F. Crupi, „Operation and Physics of Photovoltaic Solar Cells: An Overview,“ 2018.
- [20] PVPerformance, „Single Diode Equivalent Circuit Models,“ 29 08 2013. [Võrgumaterjal]. Available: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=914582](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=914582).
- [21] PVEDucation, „Double Diode Model,“ [Võrgumaterjal]. Available:

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/double-diode-model>.

- [22] Clean Energy Reviews, „Solar Panel Construction,“ 20 03 2020. [Võrgumaterjal].
- [23] Energiatalgud, „Päikesepaneel,“ 08 02 2021. [Võrgumaterjal]. Available:  
<https://energiatalgud.ee/P%C3%A4ikesepaneel><https://energiatalgud.ee/P%C3%A4ikesepaneel>
- [24] IKS Photovoltaik, „ISET Sensor,“ [Võrgumaterjal].

# LISA

## Lisa 1 Kuvatõmmis 21,9 % monokristalse päikesepaneeli arvutuslikest andmetest

KESKMISTATUD															
15 kraadi			25 kraadi			35 kraadi			45 kraadi			55 kraadi			
Pinge	Vool	Võimsus	Pinge	Vool	Võimsus	Pinge	Vool	Võimsus	Pinge	Vool	Võimsus	Pinge	Vool	Võimsus	
4.557756	0.901962	4.11092	4.600313	0.897882	4.130541	4.546622	0.84915	3.860765	4.437181	0.877909	3.895439	4.487169	0.854484	3.834212	
4.551324	0.908916	4.13677	4.601986	0.897673	4.13108	4.551376	0.839529	3.821014	4.440532	0.873098	3.87702	4.480788	0.850301	3.810017	
4.552213	0.907138	4.129487	4.605856	0.899556	4.143223	4.558748	0.842458	3.840551	4.438487	0.863686	3.833461	4.484448	0.857203	3.844081	
4.552999	0.91838	4.181382	4.600835	0.915869	4.213763	4.544998	0.84298	3.831344	4.438804	0.858353	3.810061	4.489779	0.856157	3.843956	
4.544211	0.927373	4.214178	4.598845	0.926745	4.261956	4.546881	0.849778	3.863838	4.434935	0.859399	3.811378	4.485753	0.855425	3.837224	
4.54991	0.927634	4.22065	4.595711	0.930719	4.277316	4.551111	0.847373	3.856486	4.439069	0.861909	3.826072	4.478434	0.859922	3.851102	
4.546878	0.926641	4.213322	4.598696	0.935738	4.303176	4.55101	0.846013	3.850214	4.439852	0.860758	3.821639	4.48659	0.860235	3.859523	
4.548918	0.921412	4.191428	4.59482	0.931869	4.281771	4.547769	0.845804	3.846521	4.436607	0.859608	3.813742	4.488629	0.851869	3.823725	
4.551585	0.925491	4.212449	4.601777	0.936993	4.311834	4.552318	0.844967	3.84656	4.439852	0.85783	3.808638	4.484605	0.856157	3.839525	
4.545257	0.927267	4.214669	4.596078	0.947555	4.355038	4.55101	0.847163	3.855449	4.442306	0.850196	3.776831	4.475713	0.853124	3.818339	
4.549701	0.938353	4.269225	4.598589	0.944627	4.343952	4.549126	0.846954	3.852901	4.441992	0.856575	3.8049	4.485703	0.849778	3.81185	
4.556186	0.939555	4.280785	4.600783	0.949542	4.368637	4.548763	0.84915	3.862584	4.435249	0.864627	3.834838	4.483925	0.850614	3.814091	
4.543901	0.94868	4.311526	4.593568	0.948496	4.356982	4.547246	0.860654	3.913604	4.441785	0.866824	3.850244	4.479532	0.848732	3.801922	
4.541702	0.953775	4.331763	4.587293	0.959581	4.40188	4.54777	0.865882	3.937834	4.439534	0.884392	3.92629	4.482724	0.853229	3.824789	
4.545102	0.957591	4.35235	4.595189	0.958326	4.40369	4.549755	0.857621	3.901965	4.436764	0.892235	3.958638	4.484084	0.858144	3.847989	
4.546512	0.959578	4.362734	4.602667	0.965542	4.444067	4.54871	0.870693	3.960529	4.439956	0.889412	3.948949	4.484814	0.85668	3.842049	
4.547926	0.964649	4.387152	4.587922	0.970666	4.45334	4.546148	0.879163	3.996807	4.439693	0.892235	3.961251	4.489677	0.856261	3.844337	
4.548082	0.971341	4.417738	4.591894	0.975058	4.477363	4.550017	0.880105	4.004491	4.434254	0.911163	4.04033	4.485493	0.846536	3.797131	
4.550279	0.975835	4.440323	4.58902	0.982797	4.510073	4.551166	0.892445	4.061663	4.433836	0.909909	4.034385	4.482671	0.85919	3.851464	
4.535168	0.987232	4.477262	4.596445	0.986456	4.534192	4.545102	0.886797	4.030585	4.433314	0.915033	4.056627	4.486171	0.843817	3.785507	
4.539144	0.994234	4.512972	4.586301	0.999006	4.58174	4.547143	0.888366	4.039528	4.434253	0.909595	4.033374	4.477913	0.850301	3.807572	
4.540398	1.006049	4.567862	4.585463	1.000783	4.589054	4.540188	0.891608	4.048067	4.432947	0.919111	4.074371	4.476971	0.84685	3.791322	
4.544479	1.01499	4.6126	4.590224	1.002561	4.601978	4.550802	0.889412	4.047537	4.434204	0.927163	4.111231	4.484136	0.848	3.802548	
4.53872	1.024037	4.647819	4.59153	1.011554	4.644582	4.544421	0.892654	4.056594	4.432632	0.933228	4.136658	4.47791	0.848209	3.798204	
4.533445	1.031513	4.676307	4.587243	1.014587	4.654158	4.546097	0.900915	4.095648	4.433419	0.934797	4.144347	4.481102	0.850091	3.809347	
4.538151	1.034235	4.693515	4.592417	1.022535	4.695905	4.546145	0.910222	4.138003	4.441264	0.930823	4.134032	4.487273	0.838693	3.763443	
4.541702	1.047679	4.758247	4.590066	1.027763	4.717502	4.542278	0.904889	4.110257	4.434986	0.934274	4.143494	4.479374	0.833359	3.732928	
4.539614	1.058611	4.805684	4.585516	1.035398	4.747834	4.542332	0.924967	4.201507	4.431429	0.937307	4.15361	4.483506	0.83566	3.746687	
4.528109	1.06724	4.83258	4.577465	1.042404	4.771568	4.546619	0.929046	4.224016	4.436346	0.938039	4.161466	4.481782	0.840784	3.768212	
4.531564	1.079216	4.890535	4.584782	1.047424	4.802209	4.543794	0.937934	4.261781	4.432111	0.94013	4.166763	4.481415	0.843189	3.778682	
4.53355	1.085804	4.922546	4.584832	1.063842	4.877536	4.545103	0.942849	4.285347	4.428552	0.949542	4.205097	4.480316	0.837647	3.752924	
4.515037	1.100339	4.968071	4.589492	1.080783	4.960247	4.539771	0.947346	4.300734	4.433887	0.946928	4.198571	4.478173	0.849255	3.803111	
4.523769	1.104518	4.996582	4.584573	1.081724	4.959244	4.538568	0.953307	4.326647	4.432373	0.956235	4.23839	4.480162	0.841621	3.770598	
4.528373	1.114084	5.044987	4.586092	1.094587	5.019877	4.541966	0.958954	4.355536	4.427772	0.963241	4.265012	4.484132	0.83702	3.753306	
4.528633	1.120254	5.07322	4.586354	1.099502	5.042706	4.540764	0.95728	4.346785	4.431904	0.967424	4.28753	4.487429	0.840993	3.773898	
4.527537	1.12794	5.10679	4.580865	1.112051	5.094157	4.538618	0.974744	4.423993	4.432061	0.975895	4.325224	4.486905	0.844235	3.788003	
4.527745	1.131181	5.121697	4.582222	1.116757	5.117229	4.539772	0.976626	4.433661	4.422385	0.992417	4.388852	4.480212	0.842248	3.773451	
4.528058	1.145663	5.18763	4.581647	1.132339	5.187978	4.541182	0.987502	4.484426	4.432111	1.008208	4.468489	4.479112	0.84685	3.793134	
4.526546	1.154241	5.224725	4.578354	1.139032	5.214891	4.531193	0.998273	4.52337	4.430179	1.022849	4.531402	4.481782	0.848732	3.803832	
4.527067	1.154817	5.227934	4.580604	1.145411	5.246675	4.530041	1.009359	4.572436	4.426674	1.044809	4.625031	4.47514	0.842039	3.768243	