



Olli Mantikka

Laboratoriokalibrointilaitteisto aurin- gonsäteilyn mittalaitteille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

25.3.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Olli Mantikka
Otsikko:	Laboratoriokalibrointilaitteisto auringonsäteilyn mittalaitteille
Sivumäärä:	21 sivua
Aika:	25.3.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Automaatiotekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Kari Salmi Tutkija Henna-Reetta Hannula

Tässä opinnäytetyössä laadittiin Ilmatieteen laitoksen auringonsäteilyn havaintolaitteille optisessa laboratorioissa käytettäväksi tarkoitettu kalibrointijärjestelmä, joka sisälsi kansainvälisen standardin ISO 9847:2023 mukaisen referenssikalibroinnin.

Opinnäytetyö koostui teoriaosuudesta, järjestelmävaatimusten asettamisesta ja laboratorion kalustamisesta sekä koemittauksista. Järjestelmän kehittämisessä käytettiin hyväksi kansainvälisiä standardeja, tutkimuskirjallisuutta sekä kansainvälisen meteorologian kattojärjestö WMO:n ohjeita ja edelleen sen alijärjestöjen laatimia tarkempia ohjeita.

Opinnäytetyö vastasi tarpeeseen automatisoida auringonsäteilylaitteiden laboratoriokalibrointia ja loi standardiin perustuvan prosessin työlle. Opinnäytetyössä valmistettiin anturiteline, varjostinlaite ja valaisinpylväs sekä koodattiin telineen ja varjostimen askelmoottoriohjaus. Valmiilla järjestelmällä tehtiin sen jälkeen koemittauksia, joilla viimeisteltiin järjestelmä valmiiksi operatiivista käyttöä varten. Lisäksi laskettiin erään pyranometrin uusi herkkyys koemittausten perusteella käyttäen standardin laskukaavoja, jotta varmistettiin järjestelmän soveltuvuus operatiiviseen pyranometrikalibrointiin.

Lopputuloksena oli puoliautomaattinen kalibrointijärjestelmä, joka täytti standardin vaatimukset.

Avainsanat: pyranometri, kalibrointi, auringonsäteily, laboratorio

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Olli Mantikka
Title: Laboratory Calibration System for Solar Instruments
Number of Pages: 22 pages
Date: 25 March 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Automation Engineering
Supervisors: Kari Salmi, Senior Lecturer
Henna-Reetta Hannula, Researcher

This thesis concerns development of an indoor calibration process for the Finnish Meteorological Institute's solar radiation sensors according to the standard ISO 9847:2023.

This thesis contains information on solar radiation measurement theory, requirements of the calibration facilities and a description of the test measurements. The developed calibration process was based on international standards, scientific literature and the requirements of the World Meteorological Organization and guidelines thereof.

This thesis project aimed to automate and standardize the process of calibrating solar instruments. A sensor plate, shadowing device and a light column were manufactured. Based on a series of test measurements, the system was made ready for operative use. In addition, a new sensitivity for a pyranometer was calculated based on the formulae of the standard. This ensures the system's suitability for operational pyranometer calibration.

The result is a semi-automatic calibration system fulfilling the requirements of the standard.

Keywords: pyranometer, calibration, solar radiation, laboratory

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Auringon säteilyn mittaaminen	2
2.1	Säteilyn ominaisuudet	2
2.2	Säteilysuureet	2
2.3	Mittalaitteet	4
2.4	Mittausten käyttökohteet	6
3	Pyranometri	8
3.1	Ominaisuudet	8
3.2	Kalibrointi	10
4	Laboratorio	12
4.1	Kalusteet	12
4.2	Tilaturvallisuus	16
5	Mittaukset	17
6	Johtopäätökset	18
7	Yhteenveto	19
	Lähteet	20

Lyhenteet

- AU: *Astronomical Unit*. Maan ja Auringon välinen vakioetäisyys, jota käytetään yleisesti kaikkien taivaankappaleiden välisten etäisyyksien määrittämiseen.
- CDM: *Ceramic Discharge Metal-Halide*. Lyhenne, jolla tarkoitetaan yleisesti keraamisia monimetallilamppuja.
- ISO: *International Organization for Standardization*. Kansainvälinen standardointialan kattojärjestö.
- PAR: *Parabolic Aluminum Reflector*. Teatterivalaistuksessa yleisesti käytetty alumiininen, puoliympyrän muotoinen heijastinkupu.
- PVGIS: *Photovoltaic Geographical Information System*. Euroopan komission tarjoama internetselainpohjainen aurinkovoimalan tuottoennustetyökalu.
- WCRP: *World Climate Research Programme*. Maailman ilmatieteellisen keskusjärjestön (WMO) ja kansainvälisen tiedeneuvoston (ISC) ylläpitämä ilmastotutkimusohjelma.
- WMO: *World Meteorological Organization*. Maailman ilmatieteellinen keskusjärjestö.

1 Johdanto

Ilmatieteen laitos on liikenne- ja viestintäministeriön alainen tutkimuslaitos, jonka tehtävänä on muun muassa havainnoida ilmakehän ja meren fysikaalista tilaa sekä tuottaa sääpalveluita kansalaisten ja elinkeinoelämän käyttöön [1]. Havainto- ja tietojärjestelmäkeskus -toimialaan kuuluva Havaintopalvelut-yksikkö vastaa säähavaintojen tuottamisesta, mukaan lukien auringonsäteilyhavainnot, havaintoverkkojen ylläpidosta ja käyttämiensä meteorologisten mittalaitteiden kalibroinnista ja huolloista [2].

Tässä opinnäytetyössä kehitetään auringon säteilyn mittalaitteelle, pyranometrillemme, soveltuva laboriokalibroitijärjestelmä Ilmatieteen laitoksen Havaintopalvelut-yksikölle. Järjestelmä perustuu ISO-standardin 9847:2023 vaatimukseen. Opinnäytetyö käsittelee auringonsäteilyn mittaamisen perusteita ja optisen laboratorion kalustamista säteilymittalaitteiden kalibroitua varten. Siinä esitellään myös lopullinen järjestelmä ja sen ominaisuuksia sekä mahdollisia kehityskohteita. Optisessa laboratoriossa on tehty kalibrointeja standardin vaatimalla tavalla käsin yksittäisillä laitteilla tarpeen mukaan. Opinnäytetyön tarkoituksena on vastata kalibroitimien kehittämällä vähintään puoliautomaattisella järjestelmällä ja selkeällä kalibroitamisprosessilla pyranometreille. Prosessia voidaan opinnäytetyön pohjalta käyttää niin tutkimustyön tueksi kuin operatiivisten mittausten ylläpitoon ja kehittää järjestelmän automaatioastetta edelleen.

Auringon säteilyä mitataan, jotta sen vaikutuksista maapallon ilmastoon ja luonnollisiin prosesseihin saadaan tietoa. Vaihtelut maapallolle saapuvan säteilyenergian määrässä voivat vuosikymmenenkin aikana olla pienimmillään vain prosenttien suuruisia [3, s. 22]. Säteilyn mittalaitteiden säännöllinen kalibroitaminen on siksi erittäin tärkeää.

Kalibroitaminen on yleensä tapahtuma, jossa mittalaitteen lukemaa verrataan vertailulaitteen, mittanormaanin, lukemaan [4]. Pyranometrin kalibroinnissa selvitetään vertailupyranometrin avulla kalibroitavana olevan pyranometrin herkkyyden

muutos. Pyranometrin ominaisuudet, herkkyyden käsite ja yhteys kalibrointita-
pahtumaan käsitellään tarkemmin luvussa 3.

2 Auringon säteilyn mittaaminen

2.1 Säteilyn ominaisuudet

Aurinko on suuri energianlähde. Se säteilee ympärilleen 63 MW/m^2 sähkömag-
neettista säteilyä vaihtelevilla voimakkuuksilla ja eri aallonpituuksilla. Maan ja Au-
ringon keskimääräisellä etäisyydellä (1 AU) Auringosta kohtisuoraan saapuvan
säteilyn määrä ilmakehän uloimpaan osaan on NASAn vuonna 2008 tekemien
mittausten mukaan noin 1360 W/m^2 . Tätä lukua kutsutaan aurinkovakioksi, ja
sen tunnus on E_{θ} . [5, s. 11.]

Yhden vuoden aikana ilmakehän läpi maanpinnalle asti saapuu Auringon säteilyä
keskimäärin noin 342 W neliömetrille. Tämä tarkoittaa maapallon pinta-ala huo-
mioon ottaen yhteensä 44×10^{24} watin tehoa vuodessa. Tavallinen fossiilivoima-
laitos tuottaa samassa ajassa noin miljardin watin tehoa. Tarvittaisiin siis hieman
yli 40 miljoonaa tällaista voimalaitosta, jotta ne tuottaisivat saman verran ener-
giaa. [6.]

Säteily jaotellaan aallonpituuksien mukaan lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn.
Lyhytaaltoisella säteilyllä tarkoitetaan $280 - 3\,000 \text{ nm}$ aallonpituuden säteilyä.
Pitkäaaltoisen säteilyn aallonpituudet vuorostaan ovat $3\,000 - 50\,000 \text{ nm}$.
[5, s. 22.]

2.2 Säteilysuureet

Auringosta maahan saapuvaa säteilyä on tarpeen erotella aallonpituuksien li-
säksi myös muilta ominaisuuksiltaan. Mittaustekniikassa yleisesti puhutaan kä-
sitteestä mittaussuure. Säteilysuureiden SI-perusyksikkö on W/m^2 . Taulukossa
1 esitellään lyhytaaltoisen säteilyn suureet. Lisäksi esitellään suureiden kuvauk-
set ja WMO:n mukaiset suurennukset [7, s. 2]. Mittalaitteiden ominaisuuksia ja
asennustapoja esitellään kunkin suureen esittelytekstissä taulukoiden jälkeen.

Taulukko 1. Lyhytaaltoisen säteilyn tärkeimmät suureet [7].

Suure	Tunnus	Suurekuvaus	Mittalaite	Spektrialue
Suora säteily	E	Kohtisuoraan Aurinkosta saapuva säteily	Pyrheliometri kohdistettuna suoraan Aurinkoon	200–4000 nm
Kokonais-säteily	$E_g \downarrow$	Koko taivaankannen käsittävä säteily	Pyranometri vaakatasossa	300–3000 nm
Hajasäteily	E_d	Pilvistä ja ilmakehän partikkeleista heijastunut säteily, ei sisällä suoraa säteilyä	Pyranometri vaakatasossa varjostettuna	300–3000 nm
Heijastunut säteily	$E_r \uparrow$	Maanpinnalta takaisin heijastuva säteily	Pyranometri, osoitettu maata kohti	300–3000 nm

Taulukossa 2 esitetään edellistä taulukkoa vastaavasti pitkäaaltoisen säteilyn ominaisuuksia. Pitkäaaltosäteilyä käsitellään lisäksi tarkemmin luvussa 2.3.

Taulukko 2. Pitkäaaltoisen säteilyn tärkeimmät suureet [7].

Suure	Tunnus	Suurekuvaus	Mittalaite	Spektrialue
Ilmakehän pitkäaaltosäteily	$\Phi_l \uparrow$	Maanpinnalle saapuva pitkäaaltosäteily	Pyrgeometri vaakasuorassa	5–50 μm
Maanpinnan pitkäaaltosäteily	$\Phi_l \downarrow$	Maanpinnalta lähtevä pitkäaaltosäteily	Pyrgeometri osoitettuna maata kohti	5–50 μm

2.3 Mittalaitteet

Suoraa säteilyä mitataan aurinkoa seuraavaan moottoroituun jalustaan asennetulla pyrheliometrillä, josta esimerkki on kuvassa 1. Se on kaukoputkea muistuttava kvartsilasi-ikkunallinen, usein alumiinista valmistettu sylinteri, jonka sisällä on musta pinta ja termoelementti. Termoelementti sisältää useita termopareja, jotka perustuvat Seebeckin ilmiöön eli lämpösähköiseen ilmiöön. Parit reagoivat auringonsäteilyn aiheuttaman lämmön johtumiseen mustalta pinnalta termoparien läpi pyrheliometrin runkoon. Auringon säteilyn määrä on suoraan verrannollinen termoelementin ulostulojännitteeseen. [8, s. 5.]



Kuva 1. Tyypillinen pyrheliometri [9].

Kokonaissäteilyä mitataan pyranometrillä, josta on esimerkki kuvassa 2. Se perustuu edellä kuvatun pyrheliometrin tavoin lämpösähköiseen ilmiöön. Kokonaissäteily mitataan puolipallon muotoiselta alueelta; 2π steradiaania eli 180 astetta. Insinööritieteissä sanalla ”kokonaissäteily” tarkoitetaan usein juuri puolipallon muotoiselta alueelta mitattavaa säteilyä, englanniksi ”hemispherical radiation”.



Kuva 2. Tyypillinen pyranometri [10].

Hajasäteilyä mitataan myös yllä olevan esimerkkikuvan mukaisella pyranometrillä. Tällöin auringosta tuleva suora säteily estetään varjostuslaitteella. Kokonaissäteilyn määrä voidaan laskea haja- ja suoran säteilyn avulla:

$$E_g = E \times \cos \theta + E_d \quad (1)$$

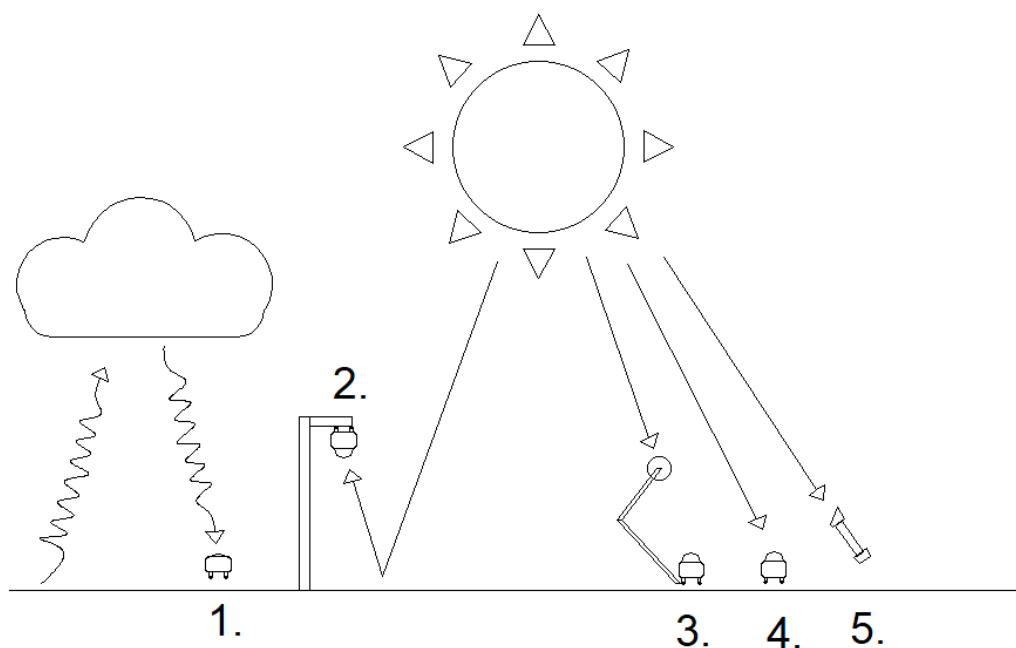
Kaavassa 1 suoran säteilyn määrä E suhteutetaan Auringon korkeuskulmaan $\cos \theta$ ja hajasäteily E_d lisätään lopputulokseen.

Myös heijastunutta säteilyä voidaan mitata pyranometrillä. Tällöin pyranometri käännetään ylösalaisin osoittamaan maanpintaa kohti ja varustetaan heijastussuojalla, jotta alhaisen suuntakulman kokonaissäteily ei häiritse mittausta [5, s. 30]. Kokonaissäteilyn ja heijastuneen säteilyn suhdetta kutsutaan heijastussuhteeksi eli albedoksi, jonka tunnus on A [5, s. 29]. Esimerkiksi lumisessa ympäristössä albedo on hyvin lähellä yhtä eli lähes kaikki kokonaissäteily heijastuu maanpinnasta takaisin ilmakehään.

Pitkäaaltosäteilyä mitataan pyrgeometrillä. Pitkäaaltosäteily on käytännössä Maahan saapunutta lyhytaaltosäteilyä, jonka aallonpituus on pidentynyt sen imeytyessä sekä ilmakehään että maanpintaan ja meriin. Suuri osa tästä

absorboituneesta säteilystä säteilee takaisin avaruuteen. Maahan jäävä osuus ylläpitää elämälle tärkeitä biologisia prosesseja. [5, s. 25.]

Kuvassa 3 esitetään esimerkinomaisesti yllä käsiteltyjen mittalaitteiden tyypilliset asennustavat. Ensimmäisenä vasemmalla on pitkäaaltosäteilyn pyrgeometri, sitten heijastuneen säteilyn pyranometri ja oikealla varjostettu pyranometri hajasäteilyä varten sekä kokonaissäteilyn pyranometri ja suoran säteilyn pyrheeliometri.



Kuva 3. Mittalaitteiden sijoittuminen. 1. Pyrgeometri. 2. Heijastuneen säteilyn pyranometri. 3. Hajasäteilyn pyranometri. 4. Kokonaissäteilyn pyranometri. 5. Suoran säteilyn pyrheeliometri. Kuva: Olli Mantikka.

2.4 Mittausten käyttökohteet

Auringon säteilyn suureiden tarkka mittaaminen on tärkeää hydrologian, agrolgian ja meteorologian aloilla. Säteilyhavaintoja käytetään myös kaikkien muiden luonnonalojen perustutkimuksessa. Esimerkiksi Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitoksen eli nykyisen Luonnonvarakeskuksen tutkija Sirkka Heinimaan [11, s. 2] raportissa kuvataan, kuinka luonnolliset valaistusolosuhteet vaikuttavat kalojen

vuorokausirytmiiin ja edelleen kalanviljelyn tuottavuuteen. Aurinkovoimaloiden kannattavuuslaskennassa käytetään avuksi ennustepalveluita, jotka pohjautuvat auringonsäteilyhavaintotilastoihin eri puolilta maailmaa. Esimerkiksi Ilmatieteen laitos tarjoaa ilmaisen aurinkovoimalan tuotantoennusteen verkkosivuillaan [12]. Edellistä vielä tarkempi tuotantoennustetyökalu on esimerkiksi Euroopan komission tarjoama PVGIS [13].

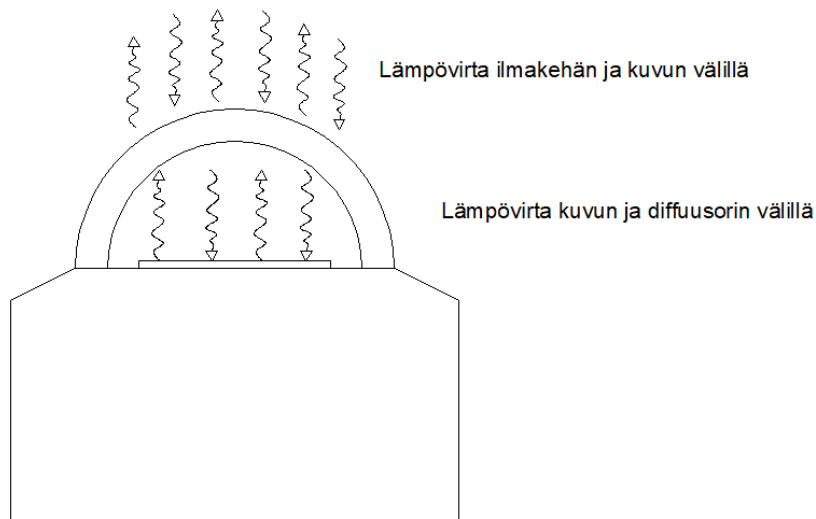
3 Pyranometri

3.1 Ominaisuudet

Opinnäytetyön kohteena oleva laboratorikalibrointijärjestelmä rakennetaan luvussa 2.3 esitetyjä pyranometrejä varten. Pyranometri on siis alumiinirunkoinen, kaksilasikupuinen mustapintaisen termoelementin sisältävä mittalaite, jossa on vesivaaka ja säätöjalat vaakasuoraan asettamista varten. Pyranometrin lasikuvut ovat ensisijaisesti termoelementin suoja säätä ja tuulta vastaan. Ne myös varmistavat, että suoran säteilyn komponentti mitataan riippumatta auringon paikasta taivaankannella, sillä kuvut taittavat valonsäteitä termoparin pinnalle. Mittalaitteen termoelementissä on useita termopareja, joista ulostulosignaali muodostuu. Auringon säteily absorboituu termoelementtiin ja johtuu edelleen pyranometrin runkoon elementin reunojen kautta. Elementin resistanssin vaihtelut muutetaan jännitteeksi. [14, s. 6.]

Kuten kaikilla mittalaitteilla, myös pyranometrillä esiintyy luontaisia *virhelähteitä*. Suurimpia mittavirheiden lähteitä ovat pyranometrin ominaisuuksista johtuvat A- ja B-tyyppin virhe sekä kulmavirhe. A- ja B-tyyppin virheet ovat käytännössä lämpötilasta johtuvia virheitä mittalaitteen ulostulojännitteessä. Kulmavirhe johtuu mittalaitteen valmistustekniikasta.

Pyranometrin niin kutsuttu A-tyyppin virhe, nollapoikkeama, syntyy lämpöjohtumisesta. Termodynamiikan nollannen pääsäännön, tasapainon, mukaisesti ilma-kehän ja lasikuvun välillä olevat lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Kuva 4 havainnollistaa lämpövirtaa eri osien välillä.



Kuva 4. Lämpövirrat pyranometrissä. Kuva: Olli Mantikka.

Esimerkiksi yöllä pyranometrin ulostulojännite on negatiivinen, sillä ilmakehä on kylmempi kuin termoelementti. Yöllä auringonsäteilyäkään ei ole, joten pyranometrin ulostulojännite koostuu täsmälleen A-tyyppin virheen suuruisesta jännitteestä. [14, s. 8.] Virhe on yleensä noin muutaman W/m^2 :n suuruinen.

A-tyyppin virhettä voidaan pienentää kaksoislasikuvun ja pyranometrin ympärille asennettavan tuulettimen käytöllä [14, s. 9]. Tuuletin lämmittää ja liikuttaa pyranometriä ympäröivää ilmaa ja pitää lämpötilaerot näin laitteen osien välillä pienempinä.

B-tyyppin nollapoikkeamaa taas syntyy aina, kun pyranometrin rungon lämpötila muuttuu. Tästä seuraa lämpötilaeroja termoelementin termoparien välille. B-tyyppin virhe on ehkäisty esimerkiksi Kipp & Zonenin CM11 -pyranometrissä käyttämällä erillistä kompensointitermoparia, jota ei altisteta ollenkaan auringonvalolle. Erillisen termoparin käytöllä poistetaan B-tyyppin virheen vaikutus miltei kokonaan, sillä sen ulostulojännite on aina vastakkainen auringonvalolle altistettavan termoparin kanssa. [14, s. 7.]

Pyranometrillä on myös yksilöllinen *kulmavaste*. Lambertin lain (kaava 2) mukaan pistemäisestä valonlähteestä tulevan valonsäteen intensiteetti vaakasuoralla pinnalla riippuu valonsäteen tulokulmasta [15, s. 260].

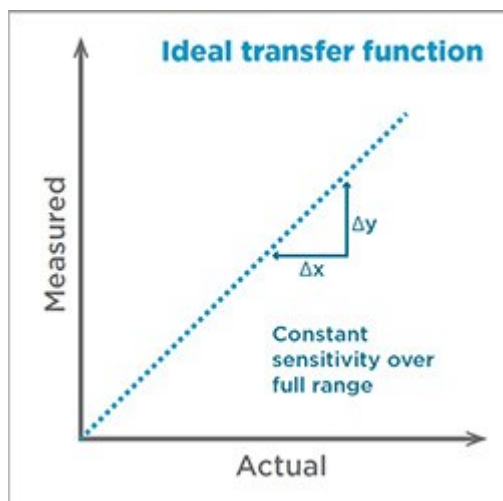
$$I_{\theta} = I_0 \cdot \cos \theta , \quad (2)$$

jossa I_{θ} on tässä tapauksessa valonlähteen irradianssi pinnan normaalin suunnassa ja I_0 on vaakasuoralle pinnalle saapuva irradianssi, joka riippuu tulokulman kosinista.

Ideaalitulanteessa pyranometrin ulostulojännite on suoraan verrannollinen säteilytehon tulokulman kosiniin. Valmistustekniikasta ja termoelementin pinnan rosoisuudesta johtuen näin ei aina ole ja jokaisella pyranometrillä on siten yksilöllinen kulma- eli kosinivaste.

3.2 Kalibrointi

Pyranometrin näyttämä eli ulostulojännite riippuu mittalaitteen *herkkyydestä*. Herkkyys on luku, joka kuvaa mittalaitteen näyttämän muutoksen ja mitattavan suureen välistä suhdetta [16]. Kuva 5 havainnollistaa herkkyyden käsitettä: se on mitattavan suureen ja mittalaitteen näyttämän välinen kulmakerroin. Siirtofunktiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa mitatun arvon ja todellisen arvon välistä yhteyttä eli sitä, kuinka tarkasti todelliset arvot vastaavat mitattua arvoa ja niin sanotusti siirtyvät siihen.



Kuva 5. Ideaalinen siirtofunktio [16].

Ideaalitulanteessa herkkyys on täysin lineaarinen ja suuruudeltaan yksi eli mitatavan suureen arvot vastaavat täysin mittalaitteen antamia arvoja koko mittausalueella. Lämpösähköiseen ilmiöön perustuvat termoparit ovat luontaisesti hyvin vakaita, ja pyranometrin herkkyys onkin miltei lineaarinen koko alueella. Laitteen ulostulolukemassa on kuitenkin virhettä edellä mainituista lämpövirroista ja säteilytehon tulokulmasta johtuen. Herkkyys ilmaistaan pyranometrille yksikössä $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ja on tyypillisesti noin 4–7 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$.

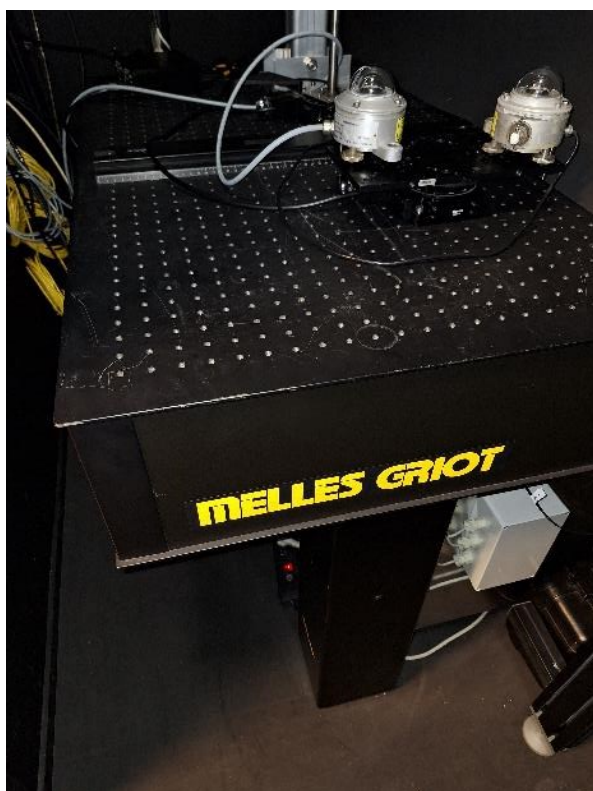
ISO on julkaissut vuonna 2023 uudistetun standardin 9847 [17], joka käsittelee pyranometriä kalibrointia eli herkkyyden selvittämistä vertailupyranometrin avulla. Standardi esittelee kaksi kalibrointitapaa: ulkoilmakalibroinnin (tyyppi B) ja laboratoriokalibroinnin (tyyppi A) [17, s. 3]. Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää tyyppin A1 vaatimukseen pohjautuva menetelmä.

Standardin aiemmin julkaistussa versiossa vuodelta 1992 asetetaan tarkkoja vaatimuksia laboratorion kalusteille ja kalibrointimittauslaitteille [18]. Näitä vaatimuksia käsitellään seuraavissa luvuissa. Peruseriaatteena tyyppin A1 laboratoriokalibroinnille kuitenkin on, että valonlähde sijaitsee täsmälleen pyranometriä yläpuolella ja että vertailu- sekä kalibroitava pyranometri ovat samaa tyyppiä.

4 Laboratorio

4.1 Kalusteet

Sisätiloissa tapahtuva optisten mittalaitteiden kalibrointi vaatii yleisesti optisen tarkkuuspöydän, jossa on korkeussäädettävät jalat, lämpötilavaihteluiden suhteen vakaa materiaali ja vakiomittainen reikälevytys mittalaitteille ja kiinnikkeille. Ilmatieteen laitos on hankkinut optiseen laboratorioon kuvassa 6 esitetyn Melles Griot -merkkisen optisen tarkkuuspöydän, joka sisältää pyranometritelineen.



Kuva 6. Optisen laboratorion tarkkuuspöytä.

Standardin vuoden 1992 version vaatimusten mukaan tarkkuuskalibrointipöydän tulee olla vaakasuorassa 0 asteen kulmassa ja kallistuskulmien arvojen suurin sallittu epävarmuus on alle 0,3 astetta. Vertailu- ja kalibroitavan pyranometrin vaakasuoruuden välinen poikkeama saa olla korkeintaan 0,1 astetta. Jos pöytä on sekä mekaanisesti että lämpötilavaihtelujen suhteen vakaa, riittää että vaakasuoruus tarkistetaan harvemmin kuin kerran viikossa. [18, s. 2.]

Standardin 2023 julkaistussa versiossa kalibrointipöydälle ei enää aseteta tarkkoja vaatimuksia, vaan todetaan, että kalibroitavan pyranometrin ja vertailupyranometrin vaakasuoruuden välinen poikkeama voi olla korkeintaan 0,2 astetta [17, s. 2]. Tämä tarkoittaa, että molempien pyranometrien mittapintojen on oltava 89,8-90,2 asteen kulmassa valonlähteestä. Vaatimukseen päästään helpoimmin tarkkuuspöydällä.

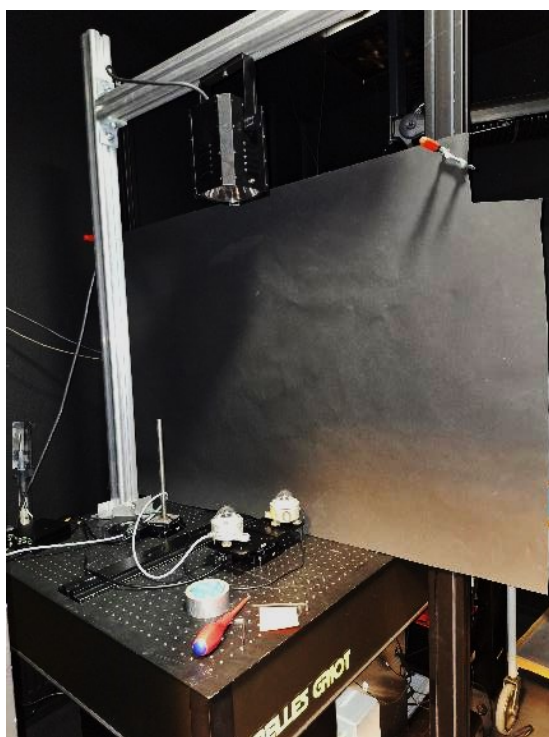
Pyranometreille osuvan valokeilan säteilyn intensiteetin vaihteluväli standardin liitteenä olevissa esimerkkitoeteutuksissa on 500 – 1 000 W/m² [17, s. 18-21]. Olemassa oleva valaisin tuottaa noin 500 W:n valokeilan neliömetrille 150 watin CDM-polttimolla ja PAR-valaisinkuvun käytöllä. Opinnäytetyössä viimeisteltiin valaistusolosuhteet rakentamalla varjostinlaite ja valaisinpylväs. Valaisinpylväs rakennettiin alumiiniprofiilipalkeista ja kiinnitettiin kuusiokoloruuveilla optiseen tarkkuuspöytään. Valaisinlaite liu'utettiin profiilipalkin T-uraa pitkin anturitelineen päälle ja valaisimen vaakasuoruus tarkistettiin lopuksi vatupassilla. Valaisinpylvään rakenne näkyy kuvassa 7.



Kuva 7. Valaisinpylväs rakentumassa.

CDM-polttimot toimivat verkkovirralla. Vaihtojännitteen taajuus ja jännite vaihtelevat hieman, joten polttimon tuottama luminanssi vaihtelee. Kalibroittavat pyranometrit ovat herkkiä pienillekin luminanssin vaihteluille, joten valaisimen stabiilisuus tarkistetaan matemaattisesti kalibroinnin aikana [17, s. 10].

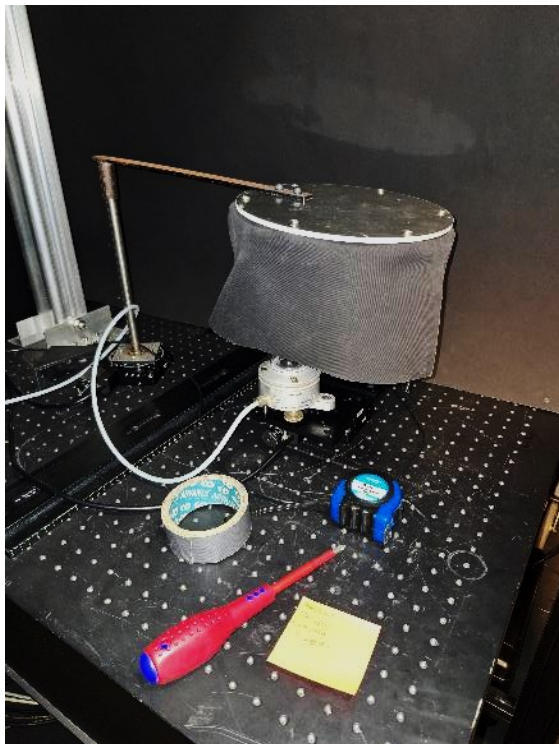
Optisen laboratorion yhtenä peruseriaatteena on, että tila on heijastamaton. Tämä saavutetaan usein mattamustilla pinnoilla. Laboratoriovalonlähteistä ja sitä kautta tilan seinistä kuitenkin heijastuu aina jonkin verran valoa. Kalibroinnissa olevat pyranometrit aistivat heijastuvankin valon ja tästä syystä pyranometriä välittömään läheisyyteen asennettiin musta erotusverho, jonka ensimmäinen prototyyppi näkyy kuvassa 8. Kangas on kevyttä ja hyvin pimentävää sekä paloturvallista. Laboratoriotilan ja -kalusteiden aiheuttama heijastusvaikutus väheni kankaan avulla tasolle, joka ei vaikuta kalibrointitulokseen.



Kuva 8. Erotusverhon asennusta.

Kalibrointimenetelmän olennaisin osa on luoda mittalaitteille jaksottainen varjo. Varjotuksen avulla tarkistetaan pyranometrin ulostulojännite silloin, kun valoa ei ole. Jos ulostulojännite on korkea, on syytä epäillä pyranometrin viallisuutta tai

ongelmaa kalibrointiolosuhteissa. Jaksottaista varjoa varten rakennettiin anturit peittävä varjostin. Se koostuu askelmoottorista, pysty- ja vaakapalkeista sekä varjostinrenkaasta kankaineen. Kuvassa 9 näkyy varjostimen ensimmäinen prototyyppi, josta selviää varjostimen perusrakenne.



Kuva 9. Anturivarjostimen rakennusta.

Menetelmän toinen olennainen osa on antureiden paikkojen keskinäinen vaihto. Tällä kompensoidaan valaisimen aiheuttamaa valotehon epätasaisuutta kalibrointialueen sisällä. Anturialustaa piti pystyä kääntämään 180 astetta.

Askelmoottoriksi sekä varjostimelle että anturialustalle valittiin liettualaisen laboriotarvikevalmistaja Standan 8MR191-28. Se sisältää valmiin astelevytason ja 360 asteen liikeradan [19]. Moottoreita ohjattiin Standan XiLab -ohjelmistolla ja niille tehtiin yhteinen ohjelmakoodi. Koodiin kirjoitettiin standardin vaatimat vaiheet ja odotusajat askelmoottorien asennoille. Antureiden signaalit mitattiin erillisellä dataloggerilla.

Dataloggerina käytettiin Keysight DAQ970A:ta [20]. Sen analogiamittauskortilta tehtiin kaapelointi kalibrointitilaan. Kalibroitavat anturit kytkettiin kalibrointipöydällä sijaitsevaan kytkentärasiaan. Dataloggerin ohjelmisto keräsi sekunnin välein mittausdataa ja tallensi sitä CSV-tiedostoon. Tiedoston avulla laskettiin kalibroitavan anturin uusi herkkyysarvo käyttämällä molempien antureiden irradianssiarvoja varjostus- ja valotussarjoista sekä tilanteista, joissa antureiden paikat oli vaihdettu keskenään. Irradianssiarvojen keskinäisistä suhteista voitiin standardin kaavoilla laskea, kuinka herkkä kalibroitava anturi on verrattuna referenssianturiin.

Standardin mukaisella kaavalla laskettiin myös valaisimen stabiilisuus. Valaisinta jouduttiin testimittausten aikana sammuttamaan ja sytyttämään järjestelmän säätämistä varten, ja tästä syystä valaisimen epävakaas oli suurempaa kuin standardin viitearvo. Epävakaas asettui sallittuun arvoon seuraavissa mitauksissa, kun valaisimen annettiin vakautua odottamalla puoli tuntia ennen mittausten aloittamista.

4.2 Tilaturvallisuus

Valtioneuvoston asetuksen 146/2010 mukaan työnantajan on selvitettävä työntekijöiden altistumisen taso optiselle säteilylle. Työstä on tehtävä riskiarviointi ja jos arvion perusteella raja-arvot ovat ylittyneet tai ylittymässä, on tehtävä myös torjuntaohjelma. [21, § 6-14.] Työterveyslaitoksen tekemässä riskiarvioinnissa [22] ei todettu raja-arvojen olevan ylittymässä. Arviointi perustui kalibrointilampun datalehdellä [23, s. 3] oleviin tietoihin sekä tietoihin yleisistä työturvallisista toimintatavoista laboratoriossa.

Ilmatieteen laitos on laatinut kalibrointitilaan turvallisuusohjeen. Ohjeen mukaan optisen laboratorion niin sanotun pimeähuoneen ovi pidetään aina kalibroinnin aikana kiinni ja kalibroinnin aikana oven ulkopuolella palaa punainen valo. Kalibrointihenkilökunta käyttää tilassa aina suojalaseja mittalaitteiden kohdistuksen ja valonlähteen säädön aikana. Operointihuoneen seinässä on pääkytkin, josta voidaan katkaista kaikkien tilassa olevien mittalaitteiden sähkönsyöttö

hätätilanteessa. Kalibrointilampun rikkoutuessa on varottava lasinsiruja ja odotettava laitteiden jäähtymistä. [24, s. 1.]

5 Mittaukset

Standardissa ISO 9847 määritellään kalibroitavan pyranometrin uuden herkkyyden laskemiseksi tarvittavat mittaukset [17]. Mittaukset koostuvat peräkkäisistä valotus- ja varjostussarjoista pyranometrin vasteen mukaisilla aikaintervalleilla. Pyranometrin vasteaika 95 %:ssa asettumisajasta on alle 15 sekuntia, ja standardin mukaan kalibrointituloksen laskennassa käytetään mittauksia, jotka on tehty kolme kertaa 95 %:n asettumisajan kuluttua [14, s. 2; 17, s. 18]. Asettumisaika tarkoittaa aikaa, jossa mittalaitteen näyttämä suureen muutoksen jälkeen on asettunut tiettyyn prosentiosuuteen lopullisesta arvostaan.

Ensimmäiset mittaukset tehtiin, kun antureiden kääntämiseen ja varjostamiseen tarkoitetut askelmoottorit olivat saapuneet ja valaisinpylväs oli rakennettu. Mittauksissa selvitettiin kalibrointitapahtumaan vaadittava valaisimen korkeus ja laskettiin standardin kaavoilla alustava herkkyys kalibroitavalle pyranometrille. Uusi herkkyysarvo poikkesi vain 0,02 yksikköä vanhasta herkkyysarvosta, joka on laskettu anturille ulkoilmakalibroinnissa vuonna 2016. Alustavan tuloksen perusteella järjestelmällä voitaisiin tehdä operatiivisia kalibrointeja, kun sen komponentit viimeisteltäisiin ja mittauksia jatkettaisiin järjestelmää iteroiden.

Jokaisessa seuraavassa mittauksessa löydettiin kalibrointiin vaikuttavia seikkoja, jotka korjattiin seuraavaan mittaukseen. Esimerkiksi antureiden keskinäisen vaakasuoruuden virheet, lämpötilan nousu varjostimen sisällä ja lämpötilan nousu kalibrointitilassa valaisimen käyttöajan pidentyessä vaikuttivat kalibrointitulokseen. Myös valaisinpylvään rakennetta parannettiin. Varjostinkangas ei aluksi liikkunut antureiden yli peittäen niitä kokonaan. Tämä ratkaistiin ohjaamalla varjostintankoa reilusti ohi anturitason ja hieman takaisin, jotta kangas laskostui antureiden päälle.

Monen mittauksen jälkeen lopputuloksena kalibroitavan anturin herkkyydeksi saatiin luku, joka poikkeaa vain 0,5 % ulkoilmakalibroinnissa määritetystä

herkkydestä. Tämä tulos oli osoitus järjestelmän toimivuudesta ja siitä, että järjestelmällä voitaisiin tehdä operatiivisia kalibrointeja. Kalibrointimenetelmän epävarmuusprosentti voidaan kuitenkin määrittää kunnolla vasta, kun kalibrointeja tehdään useampia.

6 Johtopäätökset

Kalibrointijärjestelmän rakentaminen oli suoraviivaista ja helppoa, sillä standardin vaatimukset olivat vuoden 2023 revisiossa huomattavasti selkeämpiä kuin vuoden 1992 versiossa. Kalibrointimenetelmäkehitys oli lisäksi prototyyppikehitykselle ominaista nopeaa ideointia ja kevyitä ratkaisuja kokeilevaa toimintaa. Menetelmä saatiin toimivaksi ja alkuperäisessä aikatauluarviossa pysyttiin. Järjestelmäkehityksen kustannukset ylittyivät hieman suunnitellusta mutta pysyivät kuitenkin kohtuullisina saavutettuun hyötyyn nähden ja mahdollistivat työn valmistumisen.

Ensisijaiseksi kehityskohteeksi tulee ottaa järjestelmän mittausepävarmuuden määrittäminen. Muiden optisten laboratorioden, mukaan lukien laitevalmistajat, tekemien mittausten perusteella kokonaisepävarmuus on kuitenkin standardin mukaisella menetelmällä todennäköisesti alle 2 % [17]. Tämä epävarmuus sisältää vertailupyranometrin kalibrointiepävarmuuden, menetelmäepävarmuuden sekä sen mittausepävarmuuden, joka johtuu laboratorio-olosuhteiden ja kenttäolosuhteiden eroista. Menetelmää ei kuitenkaan voida ottaa käyttöön ensisijaiseksi menetelmäksi pyranometriin kalibrointiin ennen kuin epävarmuus on riittävällä tavalla laskettu ja selvitetty. Tästä syystä tyyppin B ulkoilmakalibrointia tulee jatkaa sisätilakalibrointimenetelmän valmistuttuakin.

Toinen kehityskohde on kalibrointitapahtuman automaatioasteen lisääminen yhdistämällä datankeruu, herkkyyslaskenta ja askelmoottorit. Tämä vaatisi ohjelmointiosaamista sekä laboratoriotilojen ja laitteistojen modernisointia edelleen. Laboratoriokalibrointi olisi tärkeää esimerkiksi BSRN-asemaa perustettaessa. Tällä hetkellä Suomessa ei ole verkostoon kuuluvia mittausasemia. Baseline Surface Radiation Network on WCRP:n koordinoima

auringonsäteilyhavaintoasemien verkosto, jonka asemat ovat erittäin huolellisesti ylläpidettyjä ja jokaisen mittalaitteen kalibrointihierarkia on tunnettu [25].

Kolmas kehityskohde on kalibrointilaboratorion sertifiointi. Tämä mahdollistaisi kalibrointien tekemisen ostopalveluna esimerkiksi muille suomalaisille virastoille ja yhteisöille. Tämä vaatisi kuitenkin huomattavia lisäpanostuksia esimerkiksi laboratorion varusteisiin ja henkilöresursseihin.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyö vastasi Ilmatieteen laitoksen tarpeeseen luoda standardin mukainen kalibrointijärjestelmä pyranometreille sisätiloissa. Järjestelmä parantaa auringonsäteilyhavaintojen laatua, kun kehitetyn menetelmän epävarmuusprosentti on määritetty. Standardin mukainen kalibrointijärjestelmä on myös yksi BSRN:iin kelpaavan havaintoaseman vaatimuksista: opinnäytetyö mahdollistaa laitoksen osallistumisen kyseisen havaintoverkoston toimintaan tulevaisuudessa. Kehitetty järjestelmä lisäsi myös opinnäytetyön tekijän ammatillista osaamista auringonsäteilyn havaintolaitteista ja kalibrointitoiminnasta.

Lähteet

- 1 Laki Ilmatieteen laitoksesta. 2018. 212/6.4.2018.
- 2 Havainto- ja tietojärjestelmäkeskus. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havainto-ja-tietojarjestelmakeskus>>. Luettu 22.9.2023.
- 3 Jylhä, Kirsti. 2014. Climate variability and trends in the Valkea-Kotinen region, southern Finland: comparisons between the past, current and projected climates. Boreal Environmental Research 2014:19. Helsinki: Boreal Environmental Research.
- 4 Usein kysyttyä mittalaitteista. Verkkoaineisto. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. <<https://tukes.fi/tietoa-tukesista/usein-kysytyt-kysymykset/usein-kysyttya-mittauslaitteista>>. Luettu 2.10.2023.
- 5 Rösemann, Reinhold. 2017. A Guide To Solar Radiation Measurement. E-kirja. Gengenbach Messtechnik.
- 6 The Balance of Power in the Earth-Sun System. Verkkoaineisto. NASA. <<https://eosps.nasa.gov/publications/balance-power-earth-sun-system>>. Luettu 26.9.2023.
- 7 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2008. Verkkoaineisto. World Meteorological Organization. <<https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>>. 2008. Luettu 16.8.2023.
- 8 What is a pyrhelimeter?. 2006. Verkkoaineisto. Hukseflux. <https://www.hukseflux.com/uploads/inline/note-what_is_a_pyrhelimeter_v2006.pdf>. 2006. Luettu 2.10.2023.
- 9 Pyrhelimeters. Verkkoaineisto. Hukseflux. <<https://www.hukseflux.com/products/pyranometers-solar-radiation-sensors/pyrhelimeters>>. Luettu 3.10.2023.
- 10 CMP10 Pyranometer. Verkkoaineisto. Kipp & Zonen. <https://www.kippzonen.com/data/uploads/product/01_Pyranometers_06_CMP10_02_CMP10_without_sunscreen.jpg>. Luettu 3.10.2023.
- 11 Heinimaa, Sirkka. 2002. Valo ja sen vaikutukset kalanviljelyssä. Kala- ja riistaraportteja 245. Helsinki: Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.
- 12 Aurinkovoiman tuotantoennuste. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/aurinko-ja-tuulivoimaennuste>>. Luettu 11.9.2023.
- 13 PVGIS. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/>. Luettu 11.9.2023.

- 14 CM 11 Pyranometer / CM 14 Albedometer user manual. 2000. Kipp & Zonnen. <<https://www.kippzonen.com/Download/48/CM-11-Pyranometer-CM-14-Albedometer-Manual>>. 2000. Luettu 2.10.2023.
- 15 Peltonen, Hannu; Perkkiö, Juha & Vierinen, Kari. 2004. Insinöörin (amk) fysiikka osa II. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.
- 16 Ruonala, Jarkko. Miten tulkita oikein mittalaitteiden suorituskykyä ja teknisiä tietoja. Verkkoaineisto. Vaisala Oyj. <<https://www.vaisala.com/fi/expert-article/understanding-measurement-performance-and-specifications>>. Luettu 3.10.2023.
- 17 ISO 9847:1992. Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer. International Standardization Organization.
- 18 ISO 9847:2023. Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer. International Standardization Organization.
- 19 Standa 8MR191 Motorized Rotary Stage. Verkkoaineisto. Standa Ltd. <https://www.standa.it/products/catalog/motorised_positioners?item=245>. Luettu 6.3.2024.
- 20 Keysight DAQ970A Data Acquisition System. Verkkoaineisto. Keysight Technologies. <<https://www.keysight.com/us/en/product/DAQ970A/data-acquisition-system-usb-lan.html>>. Luettu 6.3.2024.
- 21 Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemiseksi optiselle säteilylle altistumisesta aiheutuville vaaroilta. 2010. 146/25.2.2010.
- 22 Altistumisselvitys optisessa laboratoriossa. 2024. Yrityksen sisäinen aineisto. Ilmatieteen laitos.
- 23 ConstantColor CMH Single Ended. Verkkoaineisto. General Electric. <<https://www.e-mile.hu/files/Adatlap%20GE%20Lighting%2020012.pdf>>. Luettu 6.3.2024.
- 24 Turvallisuusohje optisen laboratorion käyttöön. 2023. Yrityksen sisäinen aineisto. Ilmatieteen laitos.
- 25 Baseline Surface Radiation Network. Verkkoaineisto. Alfred-Wegener Institute. <<https://bsrn.awi.de/>>. Luettu 6.3.2024.