



AURINKOPANEELIEN KUNTOTUTKIMUS LÄMPÖKUVAUKSEN AVULLA

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2022

Teemu Blomberg

Tarkastajat: Professori Jero Ahola

Tutkijaopettaja Antti Kosonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät/LUT Teknis-luonnontieteellinen

Sähkötekniikka

Teemu Blomberg

Aurinkopaneelien kuntotutkimus lämpökuvauksen avulla

Sähkötekniikan koulutusohjelma

56 sivua, 15 kuvaa, 4 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Jero Ahola ja Tutkijaopettaja Antti Kosonen

Avainsanat: Aurinkopaneeli, aurinkovoimala, aurinkosähköjärjestelmä, drone, drooni, lämpökamera, lämpökuvaus

Aurinkosähköjärjestelmien määrä on kasvanut merkittäväksi osatekijäksi Suomen ja maailman energiamarkkinoilla. Aurinkosähköjärjestelmien lisääntyminen ja vanheneminen lisäävät huolto- ja kunnossapitoarvetta. Tässä diplomityössä selvitetään aurinkopaneelien tekniikkaa ja minkälaisista komponenteista aurinkovoimala koostuu. Työssä käsitellään kunnossapitovaatimuksia ja -suosituksia aurinkopaneelien tarkastuksista, huoltotoimenpiteistä ja korjauksista, joita aurinkopaneelien tarkastuksista on määritetty. Työssä käsitellään huoltotoimenpiteitä ja vikoja, joita huoltojen yhteydessä voidaan havaita. Työssä käsitellään sähkölaitteiden ja aurinkovoimaloiden lämpökuvausmenetelmiä ja laitteita, joilla lämpökuvaus voidaan suorittaa. Aurinkopaneelien lämpökuvauksesta käsitellään esimerkkejä vioista ja mitä havaintoja lämpökuvauksella saadaan. Pääasiana tutkimuksessa on aurinkopaneelien huolto- ja kunnossapitovaatimukset sekä lämpökuvaus.

Tutkimuksessa keskitytään aurinkopaneelien lämpökuvaukseen ja kuvauksen avulla saatiin tuloksiin. Tutkimuksessa suoritetaan lämpökuvaukset Luontokeskus Haltian ja Lohjan kaupungin Tytyrin vesilaitoksen katoilla sijaitseville aurinkovoimaloille. Aurinkopaneelit kuvataan lämpökameralla varustetulla dronella. Tutkimustuloksista laadittiin raportit, joista selviää tutkimuksen tulokset ja havaitut poikkeamat. Lämpökuvausten tuloksia analysoidaan havaintojen perusteella. Lämpökuvaus dronella havaitaan merkittäväksi tekniikaksi poikkeavien lämpötilojen havaitsemiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Teemu Blomberg

Troubleshoot solar panels using thermal imaging

Master's thesis

2022

56 pages, 15 figures, tables and 2 appendices

Examiners: Professor Jero Ahola and Associate professor Antti Kosonen

Keywords: Solar panel, thermal imaging

The number of photovoltaic systems has grown and solar power is becoming a significant factor in the Finnish and global energy markets. The proliferation and obsolescence of solar panel systems increases the need to inspect systems for maintenance and operation. In this dissertation, the technology of solar panels and the components of a solar power plant are investigated. The master thesis deals with maintenance requirements and recommendations for solar panel inspections, maintenance measures and repairs that have been determined from solar panel inspections. The work deals with maintenance measures and faults that may occur in the panels. The work deals with thermal imaging methods for electrical equipment and solar power plants and equipment with which thermal imaging can be performed. Examples of faults in the thermal imaging of solar panels and what kind of observations can be obtained by thermal imaging are discussed. The main focus of the study was on the maintenance and upkeep of solar panels and the techniques by which inspections can be performed.

The research focuses on the thermal imaging of solar panels and the results obtained with it. In the study, thermal imaging was performed on the solar power plants located on the roofs of the Tytyri water utility in the city of Lohja and Haltia Nature Center. The solar panels were photographed with a drone equipped with a thermal camera. Reports were prepared on the results of the study, with deviations noted. The results of the thermal imaging were analyzed based on the observations. Heat imaging with a drone was found to be a good technique for detecting anomalous temperatures.

KIITOKSET

Haluan kiittää diplomityötäni ohjanneita Professori Jero Aholaa ja Tutkijaopettaja Antti Kososta. Kiitokset perheelle, sukulaisille ja ystäville kannustuksesta ja uskosta työn loppuun saattamiseen. Haluan kiittää Luontokeskus Haltiaa ja Lohjan kaupunkia mahdollisuudesta suorittaa diplomityöhön liittyneet tutkimukset heidän aurinkovoimaloissaan. Tämä työ on omalta osaltani suurin virstanpylväs pitkän opintojakson päätteeksi. Opiskelu sähkötekniikan parissa ei pääty koskaan, se vain muuttaa muotoaan ja avaa ovia kohti uusia haasteita. Välillä on ollut raskasta ja luovutuskin on käynyt mielessä, mutta päivääkään en vaihtaisi pois.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

d_{\max}	maksimi etäisyys	[m]
px	pikseli	
l_{px}	pikselin pituus	[m]
U	jännite	[V]

Kreikkalaiset

α	kohtauskulma	[°]
λ	lämmönjohtavuus	[W/(mK)]

Alaindeksit

sc	short circuit
oc	open circuit

Yläindeksit

°	aste
---	------

Lyhenteet

FOV	Field Of View
HJT	Heterojunction Cells
IBC	Interdigitated Black Contact Cells
I-V	Current-Voltage

<i>I</i> _{sc}	Short Circuit Current
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
IR	InfraRed
IEA	International Energy Agency
MPP	Maximum Power Point
NETD	Noise equivalent temperature difference
PERC	Passivated Emitter Rear Cells
PID	Potential-Induced Degradation
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
STC	Standard Test Condition
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
V _{oc}	Open Circuit Voltage
W _p	Wattipiikki

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	11
2	Aurinkovoimalan tekniikka.....	13
2.1	Aurinkopaneeli.....	13
2.1.1	Aurinkopaneelityypit.....	15
2.2	Invertteri.....	17
2.2.1	On- ja off-grid invertteri.....	18
2.3	Kaapelointi ja liittimet.....	18
2.4	Aurinkopaneelien telineet ja kiinnikkeet.....	19
3	Aurinkopaneelien kunnossapito	20
3.1	Tarkastukset	20
3.1.1	Vaatimukset ja suositukset tarkastuksista	21
3.1.2	Aurinkopaneelien määräaikaiset tarkastukset	21
3.2	Aurinkopaneelien viat ja vikojen havainnointi	22
3.2.1	Aurinkopaneelien ulkoistentekijöiden aiheuttamia vikoja	23
3.2.2	Aurinkopaneelien sisäisten vikojen havainnointi.....	24
3.3	Korjaukset	26
4	Aurinkopaneelin tutkiminen lämpökuvaamalla	28
4.1	Lämpökuvauslaitteet	28
4.1.1	Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden vaatimukset.....	30
4.2	Sähkölaitteiden lämpökuvaus.....	32
4.3	Aurinkosähköjärjestelmien lämpökuvaaminen	33
4.3.1	Aurinkopaneelin lämpökuvausprosessi.....	34
4.4	Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteet ja -tekniikka.....	36
5	Aurinkopaneelien lämpökuvaus Luontokeskus Haltialla ja Tytyrin vesilaitoksella	39
5.1	Tutkimuksessa käytettävät lämpökuvauslaitteet	39
5.1.1	Kannettava lämpökamera.....	39

5.1.2	Droneen yhdistetty lämpökamera.....	40
5.2	Lämpökuvaussuunnitelma Luontokeskus Haltia	42
5.3	Lämpökuvaussuunnitelma Lohjan kaupungin Tytyrin vesilaitos.	43
6	Aurinkopaneelien lämpökuvauksen tulokset	45
6.1	Luontokeskus Haltia.....	45
6.2	Lohjan kaupungin vesilaitos	48
7	Johtopäätökset.....	51
8	Yhteenveto	53
	Lähteet.....	54

Liitteet

Liite 1. Lämpökuvausraportti Espoo Luontokeskus Haltian aurinkopaneelit

Liite 2. Lämpökuvausraportti Lohjan Kaupungin Tytyrin vesilaitoksen aurinkopaneelit

Kuvaluettelo

Kuva 1: Aurinkosähköjärjestelmä

Kuva 2: Aurinkopaneeli jossa 60 kennoa ja kolme ohitusdiodia

Kuva 3: PN-liitos ja kennon tekniikka

Kuva 4: Paneelimalleja, vasemmalla yksikiteinen paneeli, keskellä monikiteinen- ja ohutkalvopaneeli oikealla.

Kuva5: Aurinkopaneelien vikaproceduuri

Kuva 6: I-V käyrä ja vikojen vaikutus käyrän muotoon

Kuva 7: Monitoimilaite aurinkosähköjärjestelmien käyttöönottotarkistuksiin ja I-V-käyrän mittaukseen

Kuva 8: Android puhelimeen liitetty Seek-merkinen lämpökamera ja sen muodostama kuva kattilasta liedellä ja lattialämmityskaapelista.

Kuva 9: Aurinkosähköjärjestelmän lämpökuvauksen toimintasuunnitelmakaavio

Kuva 10: Kuvan nimi Kameran etäisyys d_{\max} kuvattavasta paneelistä, kun HFOV on 62° ja resoluutio 382x288 pikseliä

Kuva 11: Esimerkkimatriisi vioittuneen paneelin kennon dokumentointia varten

Kuva 12: Lämpökuvausdrone Parrot Anafi Thermal

Kuva 13: Luontokeskus Haltian aurinkopaneelit vasemmalla numeroituna oikealla yksittäinen paneeli

Kuva 14: Luontokeskus Haltian aurinkopaneelien asennuskulma

Kuva 15: Lohjan Tytyrin vesilaitoksen aurinkopaneelit vasemmalla numeroituna oikealla yksittäinen paneeli

Taulukkoluetelo

Taulukko 1: Aurinkokennotyyppien ominaisuudet

Taulukko 2: Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden luokittelu

Taulukko 3: Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden luokittelu lisävaatimuksia

Taulukko 4: Vikataulukko, lämpökuvauksessa havaittavia poikkeamia

1 Johdanto

Aurinkovoimalat lisääntyvät ja niistä on jo tullut merkittävä osa sähköjärjestelmää. Arvioiden mukaan aurinkovoimaloiden hankinnat tulee lisääntymään energiahintojen noustessa ja ekologisen ajattelutavan lisääntyessä. Valtioiden tavoitellessa hiilineutraalia energiapolitiikkaa, aurinkovoimalat ovat tuulivoiman ohella merkittävässä roolissa. Aurinkovoimalat vaativat säännöllistä huoltoa ja järjestelmien vanhetessa huoltotarve tulee lisääntymään. Tässä työssä käsitellään aurinkovoimaloiden tekniikkaa, huolto- ja kunnossapitoa sekä lämpökuvausta aurinkopaneelien kuntotutkimuksen apuvälineenä. Tavoitteena tutkimuksessa on selvittää mitä suosituksia ja vaatimuksia aurinkopaneelien kunnossapidolle on sekä mitä tuloksia ja kuinka nopeasti ne lämpökuvauksella saavutetaan.

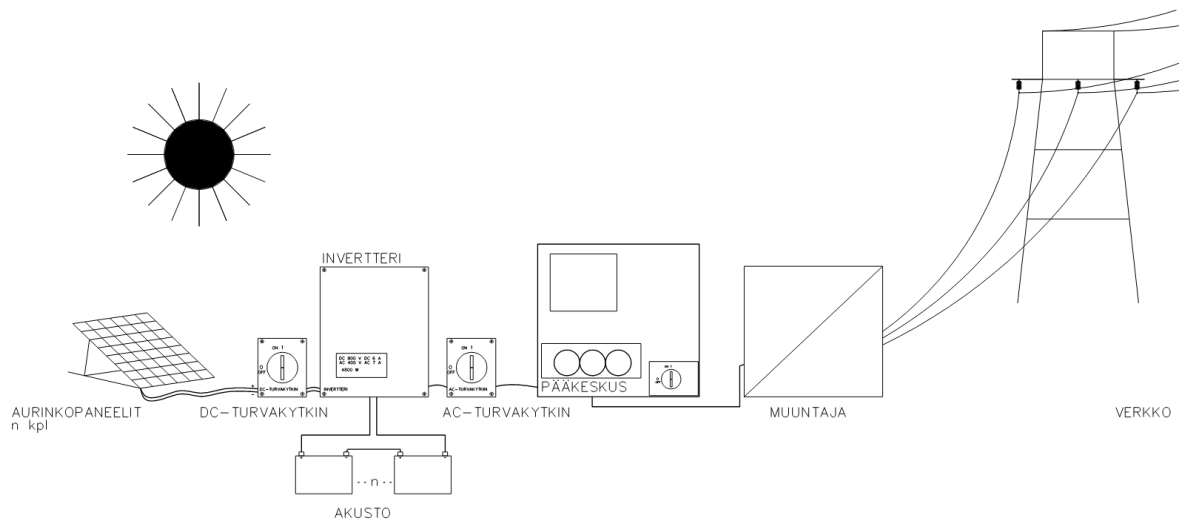
Aurinkovoimaloiden omistajat tai haltijat ovat usein tutustuneet voimalan tekniikkaan ja ovat kiinnostuneita sen toiminnasta ja tuotannon seurannasta. Aurinkovoimaloiden huolto- ja kunnossapitotoimet ovat lähinnä omistajien tai haltijoiden omaehtoisen toiminnan vastuulla ja vikatapauksia, järjestelmän toimintahäiriöitä tai tuotannon alenemia ei pystytä havaitsemaan ilman tutkimuksia joko mittaamalla, lämpökuvaamalla tai visuaalisella tarkastelulla. Standardit ja takuehdot edellyttävät huoltotoimenpiteitä ja aurinkopaneeleille määritetään takuehdoissa valmistajien toimesta hyväksytyt tuotannon alenemat. Muutosten havaitsemiseksi on tärkeää suorittaa käyttöönottomittaukset lähtötilanteessa ja jatkaa säännöllistä tarkastelua, jotta takuehdoista poikkeavat tuotannon alenemat voidaan havaita. Tässä työssä selvitetään tutkimusmenetelmiä ja erityisesti drone-lämpökuvausta apuvälineenä säännöllisessä tarkastelussa.

Työssä käsitellään ensin aurinkovoimalan komponentit ja toimintaperiaate. Työssä esitellään erilaisia aurinkopaneelitekniikoita sekä niiden eroja teknisesti että toiminnallisesti. Seuraavaksi käsitellään aurinkopaneelien kunnossapitoa, aurinkopaneeleissa tutkittuja vikoja, standardeissa suositeltavia huolto- ja korjaustoimenpiteitä sekä vikojen havaitsemiseen käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Tutkimusmenetelmistä esitellään lämpökuvaus, jossa lämpökuvauslaitteet ja niiden tekniset vaatimukset sähkölaitteiden ja aurinkovoimaloiden kuvauksessa käsitellään parametreittain. Työssä esitellään lämpökuvausprosessi sekä kuvauksessa esiin tulevia vikoja ja vikojen analysointia. Lämpökuvaustutkimus suoritetaan Luontokeskus Haltiassa sekä Lohjan kaupungin Tytyrin vesilaitoksen katoilla sijaitseville

aurinkovoimaloille. Lämpökuvaus suoritetaan droneen yhdistetyllä lämpökameralla. Tutkimuksessa analysoidaan lämpökuvausta työmenetelmänä. Tutkimustuloksina käsitellään lämpökuvausprosessi ja kuvauksen tulokset analysoidaan kuvauksessa tallennetuista kuvista ja videoista tehtyjen havaintojen avulla.

2 Aurinkovoimalan tekniikka

Aurinkovoimala kuvassa 1 koostuu aurinkopaneeleista, invertteristä, turvakytkimistä, paneelien kiinnikkeistä, maa-, katto- tai seinätelineistä ja laitteiden välisistä kaapeleista liittimiseen. Aurinkopaneeleilla tuotettu energia voidaan käyttää tuotantopisteessä, varastoida järjestelmään lisättyihin akustoihin tai siirtää ja myydä verkkoon.



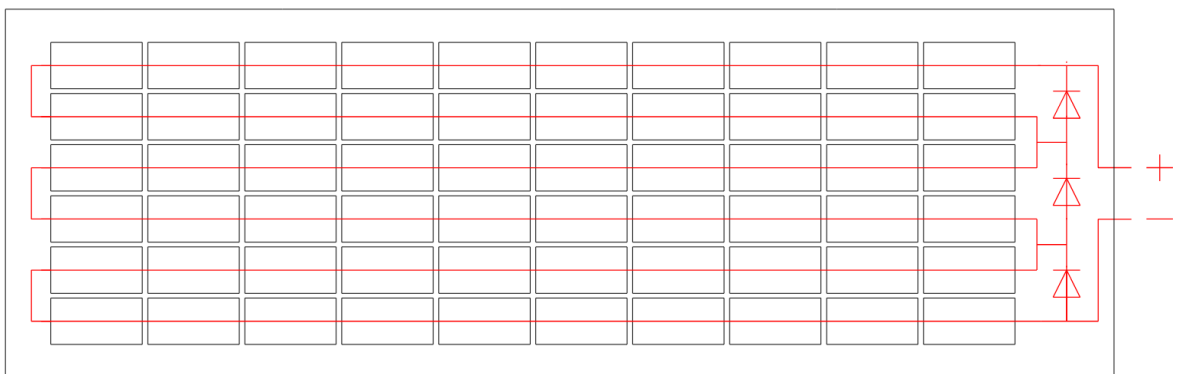
Kuva 1 Aurinkosähköjärjestelmä

2.1 Aurinkopaneeli

Aurinkopaneeleilla tuotetaan auringon säteilyenergiasta tasasähköä. Puhuttaessa alle 2 m korkuisista paneeleista, paneeleilla tuotetaan STC (Standard Test Condition) olosuhteissa jopa 480 W teho, virran ja jännitteen ollessa 13,57 A ja 35,38 V. Aurinkopaneelien kokoa ja kennojen määrää kasvattamalla paneelikohtainen teho voi olla jopa 700 W, jolloin yksittäisten paneelien vertailu on vaikeampaa. Paneelin tehoa tulee vertailla sen pinta-alaan ja hyötysuhteeseen. Ostajan kannalta merkittävää on aurinkovoimalasta saatava teho suhteessa hintaan. (Clean energy reviews, 2022).

Aurinkopaneelit on valmistettu aiemmin 60–72 kennosta, jotka kytketään paneelin sisäisesti sarjaan. Paneelien kasvaessa ja tekniikan kehittyessä ovat myös kennokoot

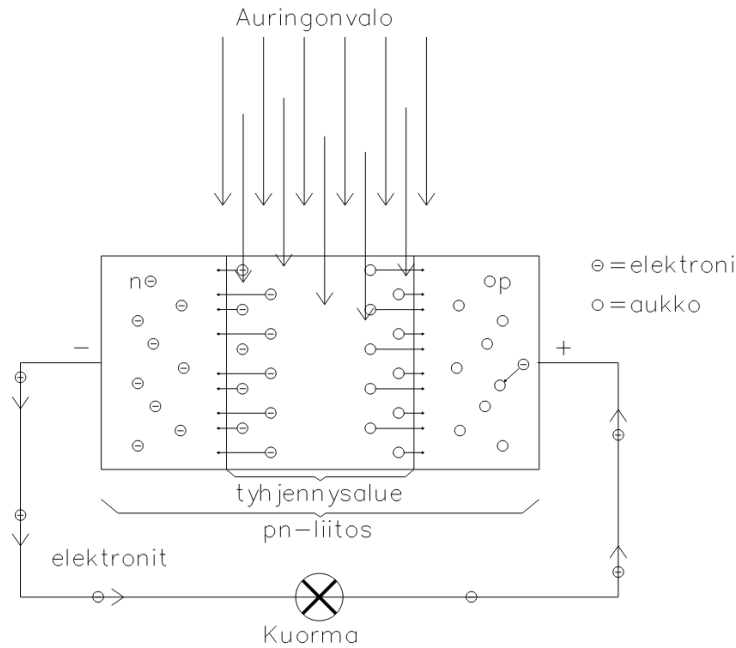
muuttuneet. Kennoja voi olla jopa 156 kun puhutaan HC (Half Cut) kennoista, jotka ovat puolet pienempiä kuin perinteisissä paneeleissa. HC-paneeli jakaantuu kahteen osaan parantaen paneelin hyötysuhdetta. Kun HC-paneelin toinen osa varjostuu tai peittyy esimerkiksi lumella, toinen puoli voi tuottaa vielä 100 % tehoa. Aurinkopaneeleita voidaan kytkeä sarjaan niin monta kuin invertterin ja muiden komponenttien teknisten tietojen mukaan on sallittua. Sarjaan kytkettyjen paneelien virtapiireissä pitää olla samat tekniset arvot, jotta toiminta on mahdollisimman tehokasta. Paneeli on jaettu yleensä kuvan 2 mukaisesti kolmeen osaan ja osat on erotettu toisistaan ohitusdiodeilla. Nämä kolme ohitusdiodia ovat siltä varalta, että paneelin kenno tai osa kennoista varjostuu. Varjostuma voi johtua liasta, lumesta tai jostain muusta esteestä, joka aiheuttaa varjon paneelin pintaan. Ilman ohitusdiodeja tuottamaton paneeli vaikuttaa muiden sarjaan kytkettyjen paneelien toimintaan ja paneelien välinen jännite-ero estää tuottamattoman paneelin tai kennojen haittavaikutuksen koko järjestelmään. Aurinkopaneeleissa voi olla myös sisäänrakennettujen estodiodien sijaan ulkoiset ohitus- ja estodiodit, joiden jälkiasennuksessa pitää olla tarkkana, jotta diodeilla on riittävät virran- ja jännitteen kesto ominaisuudet. (ST-Käsikirja 40, s.65).



Kuva 2 Aurinkopaneeli jossa 60 kennoa ja kolme ohitusdiodia (ST-Käsikirja 40, s.162).

Valosähköisen ilmiön ja aurinkopaneelin kennoihin muodostetun kahden eri tavalla seostetun puolijohdemateriaalin yhdistelmällä muodostuu kuvassa 3 näkyvä pn-liitos. Kennoissa negatiivisesti varautunut n-tyyppin puolijohde muodostetaan yleensä seostamalla piitä fosforilla ja positiivisesti varautunut p-tyyppin puolijohde muodostetaan seostamalla piitä ja alumiinia. Pn-liitoksen rajapintaan syntyy tyhjennysalue, johon muodostuu sisäinen sähkökenttä. Auringonsäteilyn tuoma fotoni imeytyy kennoon ja saa aikaan elektronin irtoamisen aukosta. Mikäli tämä aukko-elektroni pari yhdistyy tyhjennysalueella uudestaan, ei energiaa saada käyttöön, mutta mikäli elektronit saadaan johdettua n-alueelle ja aukot p-

alueelle ja näiden alueiden välille on rakennettu ulkoinen johtava yhteys, elektronit kulkevat sitä kautta takaisin kennon p-alueelle täyttämään aukot. Tämä kiertokulku toistuu aurinkonsäteilyn fotonien avulla, jolloin saadaan aikaiseksi potentiaaliero, sähkövirta ja energiaa. (Luentomoniste, 2021)



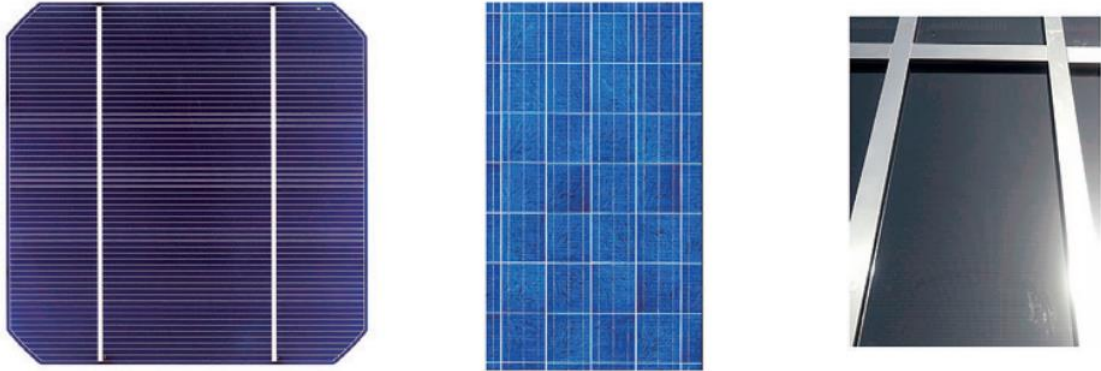
Kuva 3 PN-liitos ja kennon tekniikka

Aurinkopaneelien käyttöikä voi olla yli 30 vuotta ja valmistajat myöntävät jopa 25 vuoden tehontuottotakuita. Takuuehdoissa on eroja, paneelit tuottavat esimerkiksi 90% ilmoitetusta nimellistehosta 10 vuoden ajan ja 80% 25 vuoden ajan. Takuu materiaaleiden ja valmistusvirheiden osalta on yleisesti noin 12 vuotta. Aurinkosähköjärjestelmän invertterin kestoikä ja takuu on noin puolet verrattuna järjestelmän muihin komponentteihin. (Motiva, 2021).

2.1.1 Aurinkopaneelityypit

Aurinkopaneelityyppejä on useita, kuvassa 4. näkyvät yksi- ja monikiteiset kennot ovat yleisimpiä. Harvinaisempia ovat ohutkalvotekniikalla toimivat kennot. Muita kennotyypppejä ovat orgaaninen kenno sekä väriaineherkistetyt kennot. (VTT research, 2021). Perovskitti-pii kennoja kehitetään jatkuvasti ja niillä on jo saavutettu laboratorio-olosuhteissa

29,52% hyötysuhde, kun piikennolla hyötysuhde on maksimissaan ollut 27,6% (Spectrum.ieee, 2021).



Kuva 4 Paneelimalleja, vasemmalla yksikiteinen paneeli, keskellä monikiteinen- ja ohutkalvopaneeli oikealla (ST-Käsikirja 40, s.12).

Yksikiteinen kenno taulukossa 1 on hyötysuhteeltaan 16,5–22,8 %. PERC (Passivated Emitter and Rear Contact) teknologialla valmistetut kennot ovat yleisimpiä. Kennotyyppissä kennon taustarakenne on passiivinen estäen säteilyä pääsemästä kennon läpi hukkaan. HJT (Hetero Junction Technology) kenno perustuu emäs- ja takapintakenttään. IBC (Interdigitated Back Contact) tekniikalla valmistetuissa kennoissa metallielektrodit ovat taustapinnalla. IBC-tekniikka parantaa hyötysuhdetta ja vahvistaa paneelin rakennetta. Nimensä mukaisesti yksikiteinen kenno valmistetaan yhdestä piikiteestä ja monikiteinen valmistetaan yksikiteisen valmistuksen yhteydessä ylimääräiseksi jäävistä kiteen palasista. Nämä kierrätettävät kiteen osat uudelleen sulatetaan ja valmistetaan haluttuun muotoon. Valmistusteknisistä syistä monikiteinen sisältää kidevirheitä, jotka alentavat kennon hyötysuhteen huonommaksi kuin yksikiteisellä. Monikiteisen hyötysuhde on 15–19,5 % (taulukko 1). (Clean energy reviews, 2022)

Edellisten lisäksi valmistetaan aurinkopaneeleja, jotka hyödyntävät kaksipuolista teknologiaa. Kaksipuolisessa paneelissa taustapuolen rakenne on lasia ja kennon taustapinta rakenteeltaan valoa läpäisevä, jolloin voidaan saada etupuolen lisäksi 25% lisää energiaa. Esimerkkinä Znshinesolar ZX8-SPLDD150-sarjassa, jossa paneelikohtainen teho on 515 W. (Scanoffice, 2022)

Taulukko 1 Aurinkokennotyyppien hyötysuhteita. (Clean energy reviews, 2022)

Erialaisten aurinkopaneelikennotyyppien hyötysuhteet							
Kennon ominaisuus	Yksikide					Monikide	
	NORM.	PERC	N-TYPE	N-TYPE HJT	N-TYPE IBC	NORM.	PERC
Hyötysuhde	16,5-19 %	17,5-20 %	19-20,5 %	19-21,7 %	20-22,8 %	15-18 %	17-19,5 %
Lämpötilan vaikutus tehoon, %/1 °C		0,37 %/°C		0,26 %/°C	0,30 %/°C	0,42 %/°C	

Ohutkalvokalvopaneelit valmistetaan muodostamalla kerroksia joko amorfisesta tai mikrokiteisestä piistä sekä CIGS ja CdTe-yhdisteistä. Nämä muodostetut kerrokset tuottavat sähköä eri auringon säteilyn aallonpituuksista. Laboratorio olosuhteissa ohutkalvopaneeleista CIGS- kennolla on saavutettu 22,3 % hyötysuhde ja CdTe-kennolla 22.1 %. Normaaleissa käyttöolosuhteissa ohutkalvopaneelien hyötysuhteet ovat kuitenkin alhaisemmat. Orgaaniset ja väriherkistetyt kennot ovat vielä harvinaisempia. (ST-Käsikirja 40, s.12).

Paras hyötysuhde saadaan moniliitoskennosta, jossa pn-liitoksia on yhdistetty kaksi tai enemmän. Neljällä tai suuremmalla määrällä pn-liitoksia on päästy jopa 46 % hyötysuhteeseen, tekniikka on tosin niin kallista, että sitä käytetään lähinnä kehittyneemmissä kohteissa kuten avaruussovelluksissa. (ST-Käsikirja 40, s.15).

Edellisten lisäksi on tullut aurinkopaneeleja, jotka hyödyntävät kaksipuolista teknologiaa, jolloin paneelin taustapuolelta voidaan saada etupuolen lisäksi 25% lisää energiaa. Esimerkkinä Znshinesolar ZXM8-SPLDD150-sarjassa, jossa paneelikohtainen teho on 515 W. (Scanoffice, 2022)

2.2 Invertteri

Aurinkosähköjärjestelmissä invertteri on yleisnimitys laitteelle, johon aurinkopaneelit liitetään. Invertteri tarkoittaa vaihtosuuntaajaa, mutta voi tässä tapauksessa olla verkkoliityntälaite, varaajavaihtosuuntaaja tai akkusäädin. Teknisesti invertteri on laite, joka muuttaa tasasähkön vaihtosähköksi. Aurinkosähköjärjestelmässä invertteri on laite, joka sisältää järjestelmän kaikki tärkeimmät toiminnot. Invertterissä on tulot joko yhdelle tai useammalle aurinkopaneeliketjulle. Rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi paneeliketjun maksimijännite, MPPT- säätimien määrä ja maksimivirta. Invertteriä ennen paneeleilta tulevan kaapelin ja

invertterin välissä, tai invertteri itsessään sisältää standardin SFS 6000 vaatiman DC-puolen turvakatkimen, jolla pystytään katkaisemaan paneelien tuottama tasavirta. (ST-Käsikirja 40, s.57).

Aurinkovoimalan laitteet ovat herkkiä ylijännitteille ja laitteistolle on lisättävä ylijännitesuojaus, mikäli kohteen liittymässä on SFS 6000-4-44 vaatima ylijännitesuojaus, lisäksi suojaus vaaditaan, jos SFS 6000-7-712 mukaisen riskienarvioinnin lopputulokset näin määrittävät. (ST-Käsikirja 40, s.139).

2.2.1 On- ja off-grid invertteri

Verkkoon liitettävien on-grid järjestelmien invertterien pitää pystyä tuottamaan sähkönlaatuksiteerit ja -standardit täyttävää sähköä. Lupa verkkoon kytkemiseksi pitää saada paikalliselta verkko-operaattorilta, yleistietolomakkeen täyttövaiheessa esitetään laitteiston kokoonpano ja tekniset ominaisuudet.

Off-grid invertteriä ei kytketä verkkoon vaan esimerkiksi mökille tai kohteeseen, jossa ei ole verkkoyhteysmahdollisuutta. Off-grid mallissa ominaisuuksia on yleensä enemmän kuin on-grid järjestelmässä. Järjestelmässä voi olla akustojen lisäksi aggregaatti tai tuulivoimala. Jos järjestelmässä on akusto, pitää invertterin tarkkailla ja säätää akustoon tilaa. Tyypillisesti latauksessa käytetään PWM- tai MPPT-toiminnoilla varustettuja inverttereitä tai erillisiä säätimiä, joilla jännite ja virta optimoidaan ja suojaukset toteutetaan. (ST-Käsikirja 40, s.60).

2.3 Kaapelointi ja liittimet

Aurinkopaneelit, paneelien väliset ja lähtevät kaapelit sekä paneelien väliset liittimet ovat säiden armoilla ja vaikeammassa ympäristöolosuhteissa kuin sähköasennuksissa yleensä. Kaapelit pitää mitoittaa standardin SFS 6000-5-52 mukaisesti ja niiden pitää kestää ympäristön olosuhteet. Kaapeleiden ja liittimien pitää kestää UV-valoa, lämpöä, kosteutta, lunta, jäätä ja toimenpiteitä, joita paneelien asennusympäristössä tehdään. Johtimien tasajännitekestoisuus pitää olla vähintään 1000 V ja jatkuvan kuormitettavuuden pitää olla vähintään 1,25 kertaa suurin oikosulkuvirta, jolloin erillisiä ylivirtasuojia ei tarvitse asentaa. Mikäli

paneeleja kytketään rinnakkain pitää kaapeleiden olla samanmittaisia. Jos rinnankytkettyjä stringejä eli sarjaan kytkettyjä paneelistoja on enemmän kuin kaksi, pitää huomioida myös väärään suuntaan kulkeva virta suojaamalla stringit ylivirtasuojilla. (ST-Käsikirja 40, s.130).

2.4 Aurinkopaneelien telineet ja kiinnikkeet

Kiinteistöihin asennettavat aurinkopaneelit kiinnitetään katolle, seinään tai maahan. Kiinnitysjärjestelmiä valittaessa pitää huomioida valmistajan ohjeet, sijoituspaikalla vallitsevat olosuhteet ja arvioitava järjestelmään kohdistuvat rasitukset. Huomioitavia asioita ovat tuulikuorma ja mahdollinen lumikuorma. Asennusalueella vaikuttavia asioita ovat katolla asennuskohta, katonkaltevuus ja kallistuskulma sekä maa-asennuksissa maaperän tutkimus ja huoltoteiden huomioiminen. (ST-Käsikirja 40, s.148) Standardin IEC (International Electrotechnical Commission) 62548 mukaan kaikki kiinnitystelineet ja jalustat yhdistetään ja liitetään potentiaalintasaukseen, kun tasajännite ylittää 60 V.

3 Aurinkopaneelien kunnossapito

Aurinkopaneelien huollontarve on melko vähäistä. Huolto- ja käyttötoimenpiteet ovat lähinnä tarkastustoimintaa, puhtaanapitoa ja tuotannonseurantaa. Tuotannonseuranta on helppoin tehdä vuosittain samaan aikaan, aurinkoisissa ja tuulettomissa olosuhteissa. Normaali tuotannon alenema on noin 0,5% vuodessa, mutta ensimmäisinä käyttövuosina alenema saattaa olla suurempi. Mikäli alenema on useampana vuotena suurempaa kuin 5% kannattaa teettää laajempia tutkimuksia ja selvittää mistä poikkeukselliset tuotannon alenemat voivat johtua. (ST-Käsikirja 40, s.160).

IEC:n standardisarjan IEC 62446 osassa 2 esitetään vaatimuksia ja suositeltavia kunnossapitotoimia joita verkkoon liitetyle aurinkosähköjärjestelmälle pitää tai suositellaan tehtäväksi. Standardi sisältää perustoimenpiteitä järjestelmän luotettavuuden, paloturvallisuuden sekä yleisen turvallisuuden kannalta vaadittaville ennakoiville huoltotoimenpiteille, joilla korjaavaa kunnossapitoa ja vian hakua voidaan hallita. Työntekijöiden turvallisuuden takaaminen on huomioitava huoltosuunnitelmassa. Standardissa ei oteta kantaa off-grid järjestelmiin eikä aurinkoenergian varastointikeinoihin, vaan toimenpiteisiin, jotka parantavat aurinkopaneelien suorituskykyä ja luotettavuutta. (SFS-EN IEC 62446-2:2020 s. 7)

3.1 Tarkastukset

Tarkastuksia tehdään suositusten perusteella sekä täyttämään takuehtojen vaatimuksia. Ennakoiva kunnossapito ja suunnitellut tarkastukset edesauttavat vikojen löytämistä ajoissa sekä korjauskustannusten ja tuotantokatkosten minimointia. Tarkastuksissa varmistetaan aurinkopaneelien ja muiden sähköasennusten turvallisuus sekä suunnitellaan kunnossapitotoimet, jotka tehdään havaittujen ongelmien ja poikkeamien perusteella. (SFS-EN IEC 62446-2:2020 s. 12).

3.1.1 Vaatimukset ja suositukset tarkastuksista

Laite- ja komponenttivalmistajat määrittelevät takuuehdoissa ja suosituksissa tarkastukset, jotka paneeleille tehdään valmistajan määrittelemien aikajaksojen mukaisesti. Tarkastuksiin saattaa sisältyä ennakoivaa- ja korjaavaa kunnossapitoa, jolloin tarkastuksissa ilmenevien vikojen johdosta vaihdetaan valmistajista riippuen vikakriteerit ylittäviä osia. Tarkastuksia ja huolenpitoa tulisi tehdä koko aurinkosähköjärjestelmän suunnitellun käyttöajan ajan. Lisäksi korjauksia tehdään havaittaessa vikoja joko tarkastusten tai muun vikaindikaation vuoksi. Tarkastusten ajankohta ja sykli riippuu monesta tekijästä:

- Aurinkopaneelien käyttötarkoitus sekä asennus- ja sijoituspaikka (onko paneelit katolla, seinällä vai maassa)
- Valmistajan takuun vaatimuksista
- Komponenttivalmistajan määrittämistä suorituskykyä ylläpitävistä huoltotoimenpiteistä
- Huolto- ja ylläpitokustannusten vaikutus saatavaan hyötyyn (SFS-EN IEC 62446-2:2020 s. 12).
- Ylimääräiset tarkastukset jos on poikkeavia ilmasto-olosuhteita kuten ukkosten ja myrskyjen jälkeen
- Jos laitteistossa on etävalvonta, joka antaa hälytyksen häiriöstä (*ST-Käsikirja 40, s.57*).

3.1.2 Aurinkopaneelien määräaikaiset tarkastukset

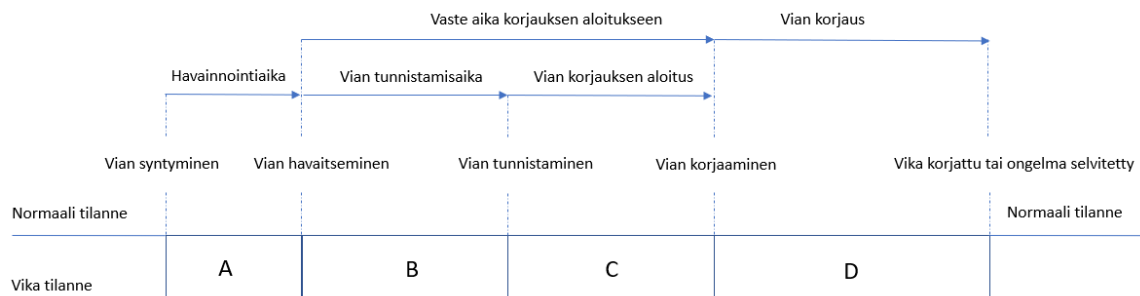
Aurinkopaneelien vikojen etsiminen aloitetaan tekemällä visuaalinen tarkastelu ja tarkastetaan paneelien kunto mekaanisten vaurioiden osalta. Silmin havaittavia vikoja ovat murtumat, halkeamat, laminoinnin irtoaminen, palojäljet ja niin sanotut etanan jäljet. Samalla tarkastetaan ulkoisten tekijöiden vaikutukset eli likaantuminen, mahdolliset lintujen tai muiden eläinten aiheuttamat jätökset paneelien pinnalla sekä kasvillisuuden vaikutus, joka estää valon pääsyn paneelin pintaan. Eläinten oleskelu tai pesiminen paneelien rakenteissa tai niiden

välittömässä läheisyydessä on huomioitava tarkastuksissa. Suoritettaviin tarkastuksiin kuuluvat aurinkovoimalan liittimien ja liitosten kunnan arviointi. Tarkastuksiin kuuluvat vastaavat mittaukset kuin käyttöönottomittauksissa. Paneelien ja maapotentiaalilin välinen eristysresistanssi mitataan huoltosuunnitelman mukaisesti. Paneelien tuottama jännite ja virta mitataan sekä verrataan tuloksia referenssimittauksiin, jotka on tehty ja dokumentoitu käyttöönottovaiheessa. Tarkastustoimenpiteenä tehdään voimalan lämpökuvaus. Suuremmille voimalaitoksille lämpökuvaus tehdään aluekuvauksena ja pienemmät aurinkovoimalat voidaan kuvata kokonaisuutena tai paneeli kerrallaan. Lämpökuvaamalla etsitään poikkeavuuksia paneeleista, paneelien kennoista tai kennon osista. Lämpökuvaamalla kaapeleiden liitokset, saadaan selville mahdolliset löysät liitokset, huonokuntoiset liitinlaitteet tai liian pienet komponenttien välimatkat. (SFS-EN IEC 62446-2:2020 s. 18).

3.2 Aurinkopaneelien viat ja vikojen havainnointi

Aurinkopaneelimuodulin vika joko heikentää paneelin tehoa enemmän kuin normaalitilanteessa on hyväksyttävää tai aiheuttaa ongelman, jolla on turvallisuutta heikentävä vaikutus. Aurinkopaneelissa voi myös olla kosmeettista muutosta, jota ei kuitenkaan lasketa viaksi, jos ei sillä ole vaikutuksia tehon tuottoon tai turvallisuuteen. Vika voidaan havaita visuaalisesti, mittaamalla, lämpökuvaamalla tai muulla kuvantamismenetelmällä. Tehokkain ja nopein keino vikojen havaitsemiseen on silmämääräinen tarkastus, joka ei kuitenkaan sovellu haalistuneille tai kuluneille paneeleille. (Report IEA-PVPS T13-01:2014 s.20)

Vikaproseduuri esitetty kuvassa 5 muodostuu vian syntyhetkestä, vian havaitsemisesta, vian tunnistamisesta, vian korjaajien saapumisesta vikapaikalle ja vian korjaamisesta hetkeen, jolloin vika on korjattu.



Kuva 5 Aurinkopaneelien vikaprocedureuri (Report IEA-PVPS T13-23:2021, s.12)

Tyypillisesti viat jaetaan kolmeen ryhmään vian syntymähetken perusteella:

1. Asennushetkellä, kuljetuksessa tai valmistusvirheestä johtuvat viat
2. Käyttöiän keskivaiheella syntyvät viat
3. Loppuun kulumisesta johtuvat viat

Loppuun kulumisesta aiheutuvat viat ovat aiheuttaneet turvallisuusongelman tai tiputtaneet aurinkopaneelistä saatavan tehon tyypillisesti 70–80 % välille alkuperäisestä. (Report IEA-PVPS T13-01:2014, s.4).

3.2.1 Aurinkopaneelien ulkoistentekijöiden aiheuttamia vikoja

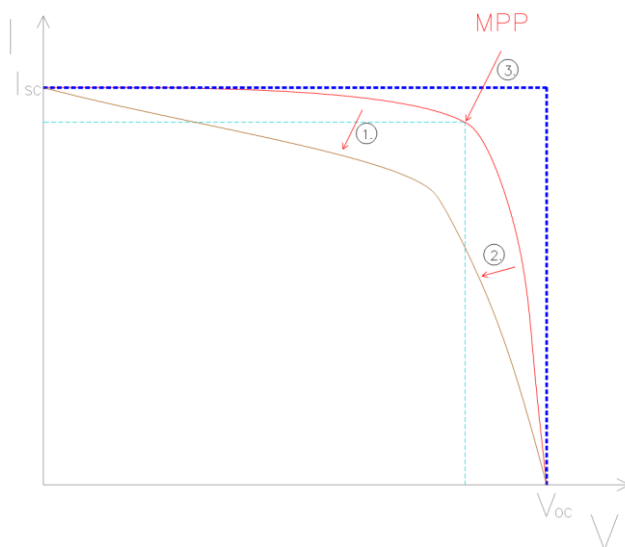
Aurinkopaneeliin syntyvät viat voivat johtua huolimattomasta asennuksesta kuten paneelien liiallisesta kiristämisestä, jonka seurauksena paneelin pinta tai runko vaurioituu. Asennettaessa paneeli voi kaatua tai paneelien päälle voidaan vahingossa astua, jolloin syntyy joko näkyviä- tai mikromurtumia. Lika, varjostavat kasvit, lehdet, lumi tai muut syyt, jotka estävät valon pääsyn paneelin osaan tai yksittäiseen kennoon, saa aikaan ylikuumentuvan kohdan ja saattaa vaurioittaa paneelin.

Aurinkopaneeli kytketään pikaliittimellä kytkentärasiaan, syöttökaapeliin, invertteriin tai sarjakytkenällä toisiin paneeliin. Valmiissa liittimissä saattaa olla huonoja liittoksia johtuen huonosta johtimien ja liittimien välisestä puristusliitoksesta. Huonot liitokset aiheuttavat joko täyden katkoksen tai valokaaren johdinpintojen välille ja mahdollisen tulipalovaarun jos lähellä on syttymisherkkiä materiaaleja. Huono liitos saattaa myös aiheutua käytettäessä eri valmistajien liittimiä, jotka eivät sovi yhteen.

Salaman aiheuttama ylijännite on mahdollinen vian aiheuttaja. Salaman osuma paneeliin tai runkorakenteisiin saattaa aiheuttaa vaurion paneeliin ja ohitusdiodien vioittumisen. Ohitusdiodit saattavat hajota myös salaman epäsuoralla iskulla, jos ne altistuvat ylijännitteelle. Nämä salaman aiheuttamat vauriot saattavat ilmetä vasta myöhemminkin aiheuttaen vikaantumista, joka voidaan havaita lämpökamerakuvauksessa kuumina pisteinä paneelin pinnassa. (Report IEA-PVPS T13-01:2014, s.12).

3.2.2 Aurinkopaneelien sisäisten vikojen havainnointi

Aurinkosähköjärjestelmän käyttöönottotarkastukseen kuuluu oikosulkuvirran I_{sc} ja avoimenpiirinjännitteen V_{oc} mittaukset. Näitä mitattuja arvoja käytetään vertailuarvoina määräämiskäytössä tai vikatarkastusta tehtäessä. Aurinkopaneelista mitataan oikosulkuvirta pihtivirtamittarilla ja avoimen piirin jännite yleismittarilla tai tarkoitukseen sopivalla mittalaitteella. Mittalaite kuvassa 7 näyttää I-V tehokäyrän koordinaatistossa, jossa Y-akselilla on virta ja X-akselilla jännite. Optimaalisilla virran ja jännitteen arvoilla paneelistosta saadaan suurin teho. I-V-käyrän kohtaa, josta saadaan suurin teho, kutsutaan MPP eli maximum power point pisteeksi kuva 6. Käyrän muoto vaihtelee sen mukaan kuinka suuri sarja- tai shunttivastus aurinkopaneelin solujen, liitosten ja kytkennöistä muodostuu. Mittaushetkellä aurinkosäteilyn voimakkuus tulisi varmistaa ja olosuhteiden tulisi olla vähintään 400 W/m^2 ja aiempaan vertailutulokseen eroa saisi olla enintään 5 %. (SFS-EN 62446-1:2016 s.28) Aurinkosäteilyn teho niin sanottu aurinkovakio on maan etäisyydellä noin 1366 W/m^2 (Ilmatieteellinenlaitos, 2022)



Kuva 6 I-V käyrä ja vikojen vaikutus käyrän muotoon

I-V käyrän muodosta voidaan päätellä vian aiheuttajia. Kuvan 6. kohdassa 1.shunttivastus muuttaa virran käyrämuodon lineaarisesta osaa ja suuruutta ja kohdassa 2 sarjavastus muuttaa käyrän epälineaarista lähes pystysuoraa osaa. Jos osa aurinkopaneelinkennoista ei toimi

tai ohitusdiodin toiminnassa on vikaa, käyrän muoto muuttuu. Mikäli on käytössä valmistajan ilmoittavat tekniset tiedot tai aikaisemmin mitatut mittaustulokset ja vertailukelpoinen I-V käyrä, voidaan analysoida paneeleissa tapahtuneita muutoksia. I-V-käyrän mittaus voidaan tehdä esimerkiksi kuvan 7 tähän tarkoitukseen valmistetulla monitoimimittalaitteella.



Kuva 7 Monitoimilaite aurinkosähköjärjestelmien käyttöönotto tarkistuksiin ja I-V-käyrän mittaukseen (HT-instruments, 2022).

Tyypillisiä muita käyrän muodon muutoksen aiheuttavia havaittavia vikoja ovat kennojen väliset oikosulut, oikosulkeutunut-, väärin kytketty- tai toimimaton ohitusdiodi, paneelien hajoaminen, syöpyminen ja kosmeettiset muutokset paneelin pinnassa. Salaman iskun aiheuttamat viat saattavat ilmetä myös myöhemmin ja niitä on tällöin vaikea yhdistää aiemmin tapahtuneeseen vikaantumiseen. (Report IEA-PVPS T13-01:2014, s.30).

Aurinkopaneelien vikojen löytämiseen on useita kuvantamismenetelmiä, joita on esitetty IEA:n raportissa PVPS T13-24:2021 Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment 2021. Vikoja voidaan havaita seuraavilla menetelmillä:

- Dronea ja lämpökameraa käyttäen elektroluminanssi- ja lämpökamerakuvauksilla.
- I-V käyrän mittaus standardin IEC 60904-3 mukaisesti auringonpaisteessa esimerkiksi kuvan 7 mittalaitteella
- Aurinkopaneelien mittaus siirrettävän mittausaseman avulla, jolla saadaan tuotettua haluttu säteily määrä paneelin tutkimusta varten
- I-V käyrän mittaus pimeällä esimerkiksi kuvan 7 mittalaitteella, tällöin tehon syöttö paneeliin tapahtuu käänteisesti DC-teholähteellä
- Ajoneuvossa siirrettävällä testauskalustolla tehtävä aurinkosähköjärjestelmän tutkimus, johon järjestelmä kytketään vähintään 7 päivän ajaksi
- Impedanssi spektroskopian avulla tehtävät mittaukset
- Elektroluminanssi-kuvaus päivän valossa, jossa paneelia syötetään käänteisesti DC-teholähteestä ja kuvataan paneelin muutoksia tarkoitukseen sopivalla kameratekniikalla
- UVF- eli ultraviolettifluoresenssikuvaukset, joka perustuu paneelien materiaalien reaktioiden kuvantamiseen valaistaessa niitä UV-valolla
- Fotoluminesenssikuvaukset, laadunvalvontaan laboratoriossa tai auringon valossa
- Spektroskopiamenetelmät polymeerimateriaaleille. Kuvantaminen perustuu aineen ja säteilyn vuorovaikutuksen erotteluun.

Kaikkien kuvantamismenetelmien esitutkimuksena tulisi suorittaa visuaalinen tarkastelu, jossa havaitaan mahdolliset jatkotutkimuksissa esiin tulevat viat.

3.3 Korjaukset

Vioittuneen aurinkopaneelin korjaaminen voidaan joutua suorittamaan joko vaarallisissa tai vaarattomissa olosuhteissa. Olosuhteet ovat vaaralliset, jos laitteistosta on henkilöturvallisuus- tai palovaaraa ja tällöin on noudatettava hätätilan sammutusmenettelyjä ja suoritettava erottaminen turvallisessa järjestyksessä erottamalla ensin kuormat ja sen jälkeen

tasavirtapiirit. Vaarattomassa laitteistossa olevien vikojen selvitys sisältää vikojen tutkimista ja vikapaikan selvitystä mittaamalla ja havainnoimalla. Vioittuneen paneelin korjaaminen on yleensä niin kallista, että edullisemmaksi tulee hankkia uusi. Uuden paneelin tulisi olla samanlainen tai ainakin samat virta ja jännitearvot tuottava kuin käytöstä poistettu. (SFS-EN IEC 62446-2:2020 s. 30)

4 Aurinkopaneelin tutkiminen lämpökuvaamalla

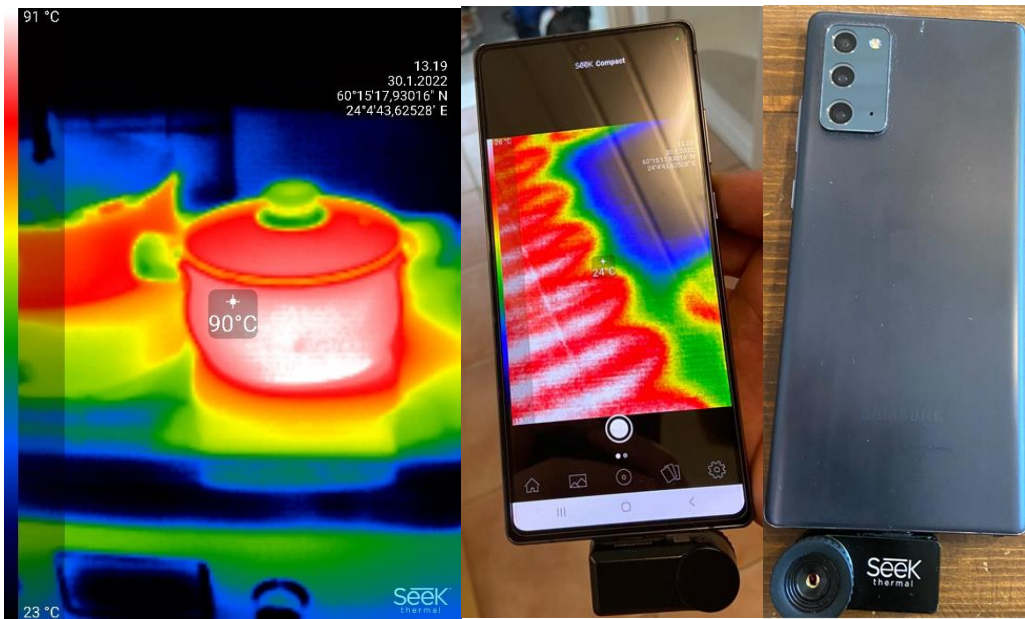
Lämpökuvauksessa tutkitaan ja mitataan kappaleen lähettämää infrapunasäteilyn määrää. Lämpökameran mittausalue on tyypillisesti valon aallonpituusalueella 8–14 μm . (ST 53.62 Sähkölaitteistojen lämpökuvaus s.5).

Infrapunakameran, toiselta nimeltään lämpökamera, näytölle muodostuvan kuvan komponentit erottuvat kappaleiden erilaisten lämpösäteilyominaisuuksien ansiosta eri väreillä, jolloin värien poikkeama ilmaisee lämpötila eroa. Väripaletti, jota käytetään, pitää aina esittää raportissa värikuvan yhteydessä, jotta epäselvyyttä värien merkityksestä ei tule. Kuvassa 8 lämpökameran kuva matkapuhelimen näytöllä. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy värien skaalaus ja kuvassa näkyvä suurin ja pienin lämpötila.

Normaalitilanteessa symmetristen sähkölaitteiden lämpötiloissa ei pitäisi olla merkittäviä eroja eikä laitteen tekniset ominaisuudet ylittäviä lämpötiloja, joten poikkeamat kertovat viasta tai häiriöstä. (SFS-EN 62446-1:2016 s.29)

4.1 Lämpökuvauslaitteet

Lämpökuvauksia voidaan suorittaa kädessä pidettävällä lämpökameralla, mobiililaitteeseen liitettävällä lämpökameralla kuvassa 8 tai kauko-ohjattavalla dronella, johon on integroitu yksi tai useampia digi- ja lämpökameroita. Automaatio- ja valvontakäyttöön sekä ajoneuvoihin turvallisuutta parantamaan löytyy kiinteästi asennettavia lämpökameroita.



Kuva 8 Android puhelimeen liitetty Seek-merkinen lämpökamera ja sen muodostama kuva kattilasta liedellä ja lattialämmityskaapelista.

Lämpökameran hintaan ja laatuun vaikuttaa kameran ominaisuudet kuten erottelukyky, lämpötila-alue ja lukuisiin eri käyttötarkoituksiin luodut erityisominaisuudet. (ST 53.62 Sähkölaitteistojen lämpökuvauus).

Lämpökameroita löytyy talotekniikan puolella niin sähkö-, kuin lämpö-, vesi- ja kaasutekniikoiden kuvaamiseen. Kiinteistötekniikan puolella voidaan tehdä laadunvarmistusta, mitata lämpö- ja kaasuvuotoja sekä paikantaa kosteusvaurioita. Prosessiteollisuudessa lämpökameraa voidaan käyttää laadunvalvontaan, kun on tarve huomata poikkeavat lämpötilaerot. Käynnin valvonnassa voidaan tarkkailla tärkeitä prosessille tai valmistukselle kriittisiä pisteitä. Paloherkissä ja itsesyttymiselle alttiissa paikoissa lämpökameraa voidaan käyttää havaitsemaan ennakoivia paloja ja lämpötilan muutoksia, jotka voivat edetä paloiksi. Palo- ja pelastustehtävissä lämpökameralla voidaan havainnoida palon etenemistä ja etsiä ihmisiä tai eläimiä niin palavista rakennuksista kuin metsistä tai vesistöistä. Näiden lisäksi lämpökuvauusta voidaan käyttää rajavalvontaan, aluevalvontaan ja lukuisiin tiede- ja tutkimustarkoituksiin. Korona-virus, sika- ja lintuinfluenssa sekä SARS- epidemioiden aikaan lämpökameroilla pystytään kartoittamaan ihmismassoista korkeampia kehon lämpötiloja, tarkemmat mittaukset suoritetaan ihminen kerrallaan standardoidun ohjeen mukaan.

Lämpökuvauslaitteen ominaisuudet määräytyvät kuvaustehtävän mukaan. Lämpökameran lämpötilan mittausalue on kameras ominaisuus ja kuvattava kohde määrittelee millä välillä se pitää pystyä mittaamaan. Optiikka eli linssin kuva-alue FOV (Field of view) valitaan kuvausetaisyuden mukaan. Mitä lähempää kuvataan, sitä leveämmällä optiikalla varustettu linssi kameraan valitaan. Resoluutio eli kuvattavan alueen pikselien määrä vaikuttaa lämpökameran tarkkuuteen. Mitä pienempi kuvattava kohde on ja mitä kauempaa sitä kuvataan, sitä enemmän kamerassa pitää olla pikseleitä. Lämpökameran herkkyys NETD (Noise equivalent temperature difference) ilmoitetaan standardin IEC TS 62446-3 mukaan 30 asteen lämpötilassa. Mitä pienempi herkkyyslukema on, sitä pienempiä lämpötilaeroja voidaan havaita. Lämpökamerassa voi olla automaattinen- tai manuaalinen tarkennus ja joissain kameroissa ei säädettävää tarkennusta ole, jolloin on vaikeampia saada teräviä kuvia. Lämpökameran tarkkuus kertoo, kuinka suuri mittausvirhe kameras mittaamalla tuloksilla on. Tyypillisesti mittaus tarkkuus ilmoitetaan $\pm 1-2$ °C asteen tai $1-2$ % tarkkuudella. (Infradex, 2022]

4.1.1 Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden vaatimukset

IEA:n raportti Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications esittelee aurinkopaneelin kuvantamisen neljä luokkaa, joiden vaatimukset on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Taulukoissa on joko vaadittu arvo tai x-merkinnällä osoitettu vaatimus ominaisuudesta. Taulukossa 2 esitetyn lämpötilan mittausalueen arvot on kursivoitu, koska nämä arvot eivät ole vaatimuksena kuvattaessa aurinkopaneeleita, mutta tulevat lämpökameran ominaisuutena, kun vaaditaan taulukon mukaisia tarkkuus- ja herkkyysvaatimuksia. Joissain kameroissa on niin sanottu superresoluutio eli kuvatarkkuus, joka muodostuu kameras yhdistäessä superresoluutioalgoritmien avulla useampia kuvia yhteen kuvaan. (Report IEA-PVPS T13-10:2018 s.23)

Taulukko 2 Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden luokittelu (Report IEA-PVPS T13-10:2018, s.23)

Kamera luokittelu Kameran ominaisuudet	Alempi luokka	Keskiluokka	Ammattilaistaso	Ammattilaistaso Korkeampi luokka
Kalibrointi todistus	X	X	X	X
Lämpötilan mittausalue	-20...+250 °C	-20...+650 °C	-20... +1200 °C	-40...+2000 °C
Resoluutio (Super resoluutio)	160x120 19200 pikseliä	320x240 76800 pikseliä	320x240 (640x480) 76800/(307200) pikseliä	640x480/ (1280x960) 307200/(1228800) pikseliä
Lämpötilan herkkyys	<0,1 °C	<0,05 °C	<0,04 °C	<0,002 °C
Tarkkuus	± 2 °C	± 2 °C	± 2 °C	± 1 °C
Tarkentaminen	Ei tarkennusta	Tarkennus käsin	Tarkennus käsin ja automaattisesti	Tarkennus käsin ja automaattisesti
Digitaalikameran resoluutio	-	2 Megapikseliä	3 Megapikseliä	5 Megapikseliä
Säädettävä emissiivisyys	0.01...1	0.01...1	0.01...1	0.01...1
Äänen tallennus	-	Vaaditaan (lyhyt)	Vaaditaan	Vaaditaan
Vaihdeettava optiikka/ linssi	-	Vaaditaan (Laajakuva- ja pitkän matkan optiikka)	Vaaditaan (Laajakuva-, lähi- ja pitkän matkan optiikka)	Vaaditaan (Laajakuva-, lähi- ja pitkän matkan optiikka)
GPS-sijainnin tallennus	-	-	X	X
Erillinen langaton lämpötila- tai kosteusanturi	-	-	X	X

Taulukko 3 Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteiden luokittelu lisävaatimuksia (Report IEA-PVPS T13-10:2018, s 26)

Kamera luokittelu Kameran ominaisuudet	Alempi luokka	Keskiluokka	Ammattilaistaso	Ammattilaistaso Korkeampi luokka
Etsin	-	-	-	X
Mittaustilat	3	3	4	6
Ohjelmisto tutkimus- tulosten raporttien tutkimukseen ja päivitykseen	X	X	X	X
Väripaletit	4	4	6	6
Näytön koko	3,5"	3,5"	4,3" kosketusnäyttö	4,3" kosketusnäyttö
Toiminta-aika	4 h	4 h	4 h	4 h
Akun lataus	Kameran sisäinen	Kameran sisäinen ja lisäksi ulkoinen latauslaite	Kameran sisäinen ja lisäksi ulkoinen latauslaite	Kameran sisäinen ja lisäksi ulkoinen latauslaite
Lisäakku		X	X	X

Lämpökameran luokan valinnalle ei ole yhtä oikeaa vastausta. Käyttötarkoituksen ja kuvattavan kohteen perusteella valitaan kamerasluokka. Keskiluokan tai ammattilaistason kameralla voidaan kuvata jopa 100 kWp järjestelmiä ja kamerasluokan valintaan vaikuttaa lähinnä kuvaajan vaatimukset kamerasluokan ominaisuuksille. Ammattilaistason lämpökameroilla voidaan nopeuttaa kuvaustapahtumaa ja kuvauksen jälkeen tehtävää raportin laadintaa. Keskiluokan lämpökamera soveltuu lähes kaikkiin tarkastustehtäviin ja harkinta ammattilaistason kamerasluokan hankintaan riippuu käytettävästä budjetista ja asetetuista kuvausvaatimuksista.

Valittaessa drone-mallia lämpökuvaukseen, tulee ottaa huomioon työturvallisuus ja vastuukysymykset. Drone painaa tyypillisesti alle 25 kg, mutta voi aiheuttaa merkittävän turvallisuusrisin ihmisille ja kuvattavalle kohteelle. Tällaisia tilanteita voi esiintyä, jos kontrolli droneen menetetään tai laitteeseen tulee tekninen vika. Suosituksena on käyttää kuusi potkurista dronea, jotta moottorivian yllättäessä laitteen lentokyky säilyy. Viralliset ohjeet tulevat maakohtaisista viranomais määräyksistä. (Report IEA-PVPS T13-24:2021 s.30)

4.2 Sähkölaitteiden lämpökuvaus

Sähkölaitteiden lämpökuvaajalla pitää olla Setin myöntämä LK 1 tutkinto, pätevyys tehdä sähkötöitä, SFS 6002 sähkötyöturvallisuuskoulutus ja vähintään hätäensiapukoulutus. Lämpökuvaajan tulee tuntea lämpökuvauslaitteet sekä sähkö- ja lämpöopinperusteet, jotta ymmärretään ja osataan tulkita lämpötilaeroja ja niiden aiheuttajia. Mittaajalla on oltava käytettävissään standardin määrittelemät mittalaitteet ja lämpökamera sekä muut tarvittavat työvälineet. Aurinkopaneelien kuvaajalla ei tarvita välttämättä pätevyyttä, jos ei tehdä sähkötöitä, mutta pätevyyden vaatimat tai vastaavat tiedot auttavat ymmärtämään myös aurinkosähköjärjestelmissä ilmeneviä vikoja.

Sähkölaitteiden lämpökuvaajan lämpökameralle on seuraavat vaatimukset: (ST 53.62 Sähkölaitteistojen lämpökuvaus, s.3)

- Lämpökameran ruudulta on oltava nähtävissä vähintään yhden pisteen lämpötila
- Tallennetun lämpökamerakuvan lämpötilat on voitava mitata koko kuvan alueelta tietokoneohjelmiston avulla
- Kuvat on voitava tallentaa sähköiseen muotoon

- Lämpötila on voitava mitat ± 2 °C tarkkuudella 100 °C saakka ja siitä ylöspäin 2 % tarkkuudella
- Emissiivisyydestä ja heijastuksesta johtuneen taustasäteilyn aiheuttamia vääristymiä on voitava korjata jälkeenpäin
- Lämpökamerassa on oltava vähintään 160x120 pikselin tarkkuus
- Pikselikoko pitää olla alle $30 \text{ mm}^2 / 1$ pikseli, kuvattaessa yhden metrin päästä
- Lämpötilojen ero pitää pystyä mittaamaan vähintään 0,1 °C välein






Tärkeä osa kuvausta on raportointi ja kuvien analysointi ja lämpötilaerojen mittaaminen kuvista. On tärkeää, että raportti on laadittu selkeästi, jotta laitteiston omistaja tai haltija ymmärtää tarvittavat korjaustoimenpiteet.

4.3 Aurinkosähköjärjestelmien lämpökuvaaminen

Aurinkosähköjärjestelmiä on lämpökuvattu jo 1990-luvun alusta. Aurinkosähköjärjestelmien kuvauksessa on omat vaatimukset lämpökameran teknisille ominaisuuksille. Normaalitilanteessa aurinkosähköjärjestelmän eri osien lämpötiloissa ei pitäisi olla merkittäviä eroja, joten poikkeamat kertovat olemassa olevasta tai alkavasta viasta. Luonnollisia selityksiä lämpötilaeroille voivat olla paneelista erottuvat kytkentärasiat ja rajapinnat paneelien reunoilla. (VTTresearch, 2022) Sää ja sen vaihtelu vaikuttaa mittaustuloksiin ja rajoittaa ajankohtaa, jolloin lämpökuvaus voidaan suorittaa. Tärkeää on suorittaa mittaukset stabiileissa olosuhteissa vuodenaikaan, jolloin saadaan riittävä säteilyteho aurinkopaneelin pintaan. (Report IEA-PVPS T13-01:2014 s.34)

Taulukossa 4 on tyypillisiä lämpökuvauksessa havaittavia vikoja. Taulukoon on koottu mahdollisia lämpenemän aiheuttajia sekä mittaamalla havaittavia poikkeamia viallisissa paneeleissa.

Taulukko 4 Vikataulukko, lämpökuvauksessa havaittavia poikkeamia (Report IEA-PVPS T13-01:2014 s.35)

Rakenne	Vian kuvaus	Vian syy	Sähköiset mittaukset	Tarkastus
	Yksi moduuli on muita lämpimämpi	Avoin piiri. Paneelia ei ole kytketty	Moduuli täysin toimiva	Tarkista kaapelit
	Yksi rivi on muita lämpimämpi	Oikosulku tai avoin osapiirin ohitusdiodi tai sisäinen oikosulku	Tehohäviötä, avoimen piirin jännitteen alenema	Palamisjälki, ohitusdiodi johtaa.
	Yksittäiset kennot ovat lämpimämpiä kuin muut	Oikosulku koko moduulissa, kaikki ohitusdiodit toimii tai kytkentävirhe	Voimakas jännitteen alenema. Äärimmäinen tehon alenema	Tarkista kaapelit
	Yksittäiset kennot ovat lämpimämpiä alaosassa ja kehysten lähellä	Massiiviset ohitusvirrat. Indusoituneen jännitteen purkautuminen	Tehon alenema	Korjataan rungon maadoitukset
	Yksittäinen kenno on lämpimämpi kuin muut	Varjostusta, delaminaatio, viallinen kenno	Hetkellinen tehon alenema. Lehti, sammal	Visuaalinen tutkimus ja puhdistaminen
	Osa kennosta on lämpimämpi kuin muut osat	Viallinen kenno, kytkemätön kenno	Voimakas tehon alenema	Kennojen mikromurtumat, palamisjäljet, kytkennät
	Pistemäinen lämpenemä	Pakkausvirhe, osittain varjostunut, linnun uloste, salamasuojauksen tanko	Tehon alenema riippuu viallisen kohdan muodosta ja koosta	Murtumien selvitys visuaalinen tutkimus
	Alin osa merkittävästi kuumempi kuin muut varjostuksen aikana	Ohitusdiodi puuttuu	Voimakas oikosulkuvirran ja tehon alenema varjostuksen aikana	Vakavan palovaaran riski

4.3.1 Aurinkopaneelin lämpökuvauksen prosessi

Standardi IEC TS 62446-3 määrittelee vaatimukset aurinkosähköjärjestelmien lämpökuvauksilaitteistolle, tutkimuksen suoritustavalle, tulosten analysoinnille ja raportoinnille. Standardin mukaan lämpötiloihin liittyvissä tutkimuksissa noudatetaan kahta tasoa. Kevyemässä versiossa tutkijalta ei vaadita niin paljon ymmärrystä lämpökuvauksen menetelmistä ja itse tutkimus on yksinkertaisempi ja soveltuu käytettäväksi esimerkiksi järjestelmän käyttöönoton yhteydessä. Toinen menetelmä on tarkempi lämpökuvauksen, joka edellyttää tekiältä ammattimaisempaa ymmärrystä lämpötilaerojen synnystä ja niiden merkityksestä laitteistolle. Tarkassa tutkimuksessa asiantuntija pystyy määrittelemään eri vikatyyppejä lämpökuvissa esiintyvien lämpötilaerojen sijainnin ja voimakkuuksien perusteella.

Vakaat sää- ja ympäristöolosuhteet ovat tärkeitä aurinkopaneelin lämpökuvauksen onnistumiselle. Sään vaihtelut kuten tuulen-, säteilytehon- tai lämpötilan muutos, pitää olla hitaampaa kuin aurinkopaneelin terminen aikavakio, jonka aikana paneeli asettuu termisesti tasapainoiseen tilaan. Terminen aikavakio on resistanssin ja kapasitanssin funktio. Tyypillinen aika lämpötilan tasaantumiseen, on olosuhteista riippuen 5–15 minuuttia. (Report IEA-PVPS T13-10:2018 s.28)

Standardin IEC-TS 62446-3 mukaan mittaushetkellä paneeleissa ei saa olla likaa kuten lintujen ulosteita, säteilytehon tulisi olla vähintään 600 W/m² ja toimintavirta vähintään 30 % tyypikilven I_{sc} virrasta. Tuulen nopeus saa olla maksimissaan 28 km/h eli 7,8 m/s. Cumulus pilviä saa olla 2 oktaa, joka tarkoittaa muutamia pilviä taivaalla. (IEC TS 62446-3, 2017 s.12).

SFS-EN standardin 62446-1: 2016 mukaan on merkittävää, että olosuhteet kuvattaessa ovat mahdollisimman vakaat. Joskus paneelista saadaan parempi kuva taustapuolelta, jos rakenne on sellainen, ettei se häiritse kuvausta. Kuvattaessa taustapuolelta, ei ole vastaavia heijastuksesta aiheutuvia häiriötekijöitä, joita saattaa ilmetä etupuolelta kuvattaessa. On tärkeää, ymmärtää normaalit lämpötilojen vaihtelut, jotka johtuvat varjoista, tarroista tai kiinnikkeistä. Mitattua lämpötilaa ei voida ottaa referenssilämpötilaksi koska ulkoilman lämpötila ja olosuhteet vaihtelevat päivittäin, vaan on tärkeää keskittyä havaitsemaan mittaushetkellä havaittuja lämpötilaeroja kuumien kohtien ja normaalisti toimivien osien välillä. Lämpökuvauksessa havaitut poikkeamat kirjataan ylös ja tutkitaan kuvauksen jälkeen visuaalisesti sekä mittaamalla. Joskus tehokas keino on vertailla poikkeavien aurinkopaneelien I-V-käyriä toimiviin laitteisiin tai aiemmin mitattuihin referenssiarvoihin. (SFS 62446-1:2016 s.29).

Aurinkopaneelien lämpökuvauksen toimintasuunnitelmakaavio on esitetty kuvassa 9.

Valmistelu	Tutkimus	Analysointi
Kootaan asiakkaalta aurinkosähköjärjestelmän tekniset tiedot: Järjestelmän tekniset ominaisuudet. Järjestelmän asennuspaikka ja -tekniikka. Paneelistojen sijainti ja -kytkennät.	Tarkastetaan paikan päällä että järjestelmä vastaa etukäteen annettuja tietoja. Valitaan kuvauspaikka tai dronella lennettävä reitti	Yksityiskohtainen analyysi ja kuvausten osoittamien vikaepäilyjen tunnistaminen
Suunnitellaan sopiva tutkimusmenetelmä joka on yhteesopivat teknisten suositusten kanssa	Asetellaan lämpökameraan asetusarvot joilla kuvaus suoritetaan	Jälkikäsitteily ja kuvien prosessointi raporttia varten. Lämpötilaerojen ja erokohtien koon raportointi.
Varmistetaan että kuvaustehtävään lähdettäessä kaikki tarvittavat tutkimusvälineet ovat mukana	Vahvistetaan kuvauksessa esiintulleet viat joko visuaalisesti tai I-V-mittauksilla. Korjataan viat jos mahdollista.	Lämpötilaerojen analysointi ja vertailu visuaalisessa tutkimuksessa ja / tai I-V-mittauksissa esiintulleisiin havaintoihin.

Kuva 9 Aurinkosähköjärjestelmän lämpökuvauksen toimintasuunnitelmakaavio (Report IEA-PVPS T13-10:2018 s.33)

Valmisteluvaiheessa tehdään esitutkimukset aurinkovoimalasta, sekä suunnitellaan menetelmä, jolla voimalaa on tarkoitus kuvata ja tutkia. Lisäksi valmisteluvaiheessa varmistetaan tutkimuksessa tarvittavien työvälineiden kunto ja valmius mittauksiin. Saavuttaessa kuvauspaikalle varmistetaan tutkittavan järjestelmän vastaavuus ennakkotietoihin. Ennen kuvauksen aloitusta varmistetaan lämpökameran asetukset ja mitataan kuvausta edeltävä auringon säteilyteho. Tutkimukseen kuuluu esiin tulleiden vikojen toteaminen joko visuaalisesti tai mittaamalla. Mikäli mahdollista, esiin tulleet viat korjataan lämpökuvauksen jälkeen. Analysointivaiheessa tunnistetaan viat ja laaditaan raportti, johon liitetään lämpökuvat, joista korostetaan poikkeamat. (Report IEA-PVPS T13-10:2018 s.33).

4.4 Aurinkopaneelien lämpökuvauslaitteet ja -tekniikka

Suurien aurinkovoimaloiden kuvaaminen maasta käsin kädessä pidettävillä lämpökameroilla voi olla hankalaa, vie paljon aikaa ja vaatii useita kuvaajia. Kuvaustehtävät voidaan sen sijaan tehdä miehittämättömällä kauko-ohjattavalla pienlentolaitteella, joita ovat RPAS remote piloted aircraft system, UAV unmanned aerial vehicle tai drone, jota kutsutaan myös drooniksi. Ilmasta voidaan kuvata isoja alueita kerralla. Lämpökuvaamalla dronella voidaan havaita vikaantuneet paneelit, mutta vian aiheuttajaa lämpökuva ei yksiselitteisesti kerro. Lämpökuvaus vaatiikin aina lisätutkimuksia, jotka on selvitettävä muilla menetelmillä, kuten visuaalisella tarkastelulla, I-V-mittauksella tai elektroluminanssitutkimuksella. (Report IEA-PVPS T13-24:2021 s.16)

Dronella kuvattaessa lentonopeus tulisi olla niin alhainen, ettei kuvaan tule suttautumiseffektiiä. Lentonopeus pitää aina suhteuttaa lämpökameran aikavakioon, jopa 3 m/s lentonopeus voi aiheuttaa kuvaan häiriöitä. Standardin IEC TS 62446-3:2017 mukaan kuvaus kulman on oltava suurempi kuin 30 astetta, kulma riippuu paneelin pinnan materiaalista ja sen emissiivisyydestä. Optimaalinen kulma olisi kohtisuoraan paneelistä eli 90 astetta, tällöin materiaalista riippumaton emissiivisyys on mahdollisimman korkea, eikä lämpökameran vastaanottama säteily ole virheellistä, kuten heijastumaa toisesta lämmönlähteestä. Kuvausetäisyys lasketaan lämpökuvauslaitteen resoluution ja linssin perusteella. IEA:n raportissa on esimerkki kuvausetäisyyden määrittämiseksi. Raportissa oletetaan kameran linssin FOV eli field of view arvoksi $62^\circ \times 49^\circ$. HFOV horizontal field of view on 62° ja VFOV

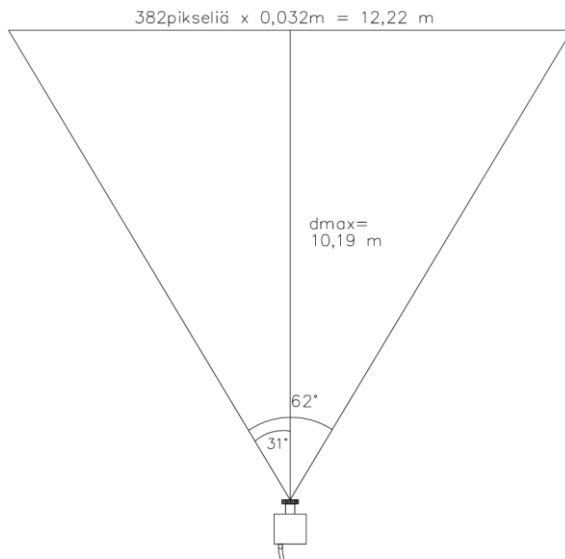
vertical field of view on 49° . Kameran resoluutio 382 x 288 pikseliä. Standardin mukaan yhden kennon tulisi kuvattaessa mahtua 5 x 5 pikselin alueeseen. Kuvaus etäisyys mukautuu kameran linssin mukaan, siten että geometrinen etäisyys on maksimissaan sen suurin, että yhden pikselin sivun pituus on noin 30 mm. Esimerkissä kennon koko on 160 x 160 mm, joten pikselin sivun pituus on $160 \text{ mm} / 5 = 32 \text{ mm}$. Horisontaalinen kuvauskulma on 62° ja pikselien määrä 382. Arvoista saadaan laskettua kuvattavan alueen koko ja maksimi kuvausetäisyys, joka esimerkkitapauksessa on 10,19 m (kaava 1) (Report IEA-PVPS T13-10:2018)

$$d_{\max} = \frac{px \cdot lpx}{2 \cdot \tan(HFOV/2)} \quad (1)$$

jossa px on pikselit horisontaalisessa suunnassa, lpx on pikselin sivun pituus [m], $HFOV$ on kameran objektiivin horisontaalinen kuvauskulma [$^\circ$].

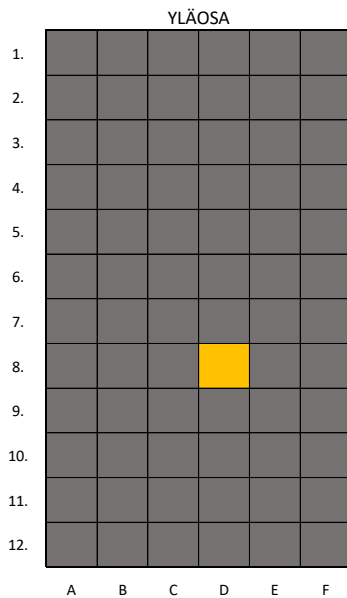
$$\frac{382 \text{ pikseliä} \cdot 0,032 \text{ m}}{2 \cdot \tan(62^\circ/2)} = 10,19 \text{ m}$$

Kuvattaessa kauempaa eli etäisyyden ollessa suurempi kuin d_{\max} , saadaan karkeampia kuvia, mutta voidaan silti havaita poikkeavia lämpötiloja, joiden perusteella voidaan suorittaa tarkempia tutkimuksia.



Kuva 10 Kameran maksimietäisyys d_{\max} kuvattavasta paneelista, kun HFOV on 62° ja resoluutio 382x288 pikseliä

Ennen lämpökuvauksen aloittamista paneeleista tehdään kuvan 11 mukainen matriisi kennojen lukumäärän mukaisesti.



Kuva 11 Esimerkkimatriisi vioittuneen paneelin kennon dokumentointia varten

Kuvan 11 paneelissa on 6 kennoa rinnakkain ja 12 päällekkäin. Yhteensä esimerkin paneelissa on kennoja 72 ja poikkeavaksi merkattu kenno on D/8.

5 Aurinkopaneelien lämpökuvaus Luontokeskus Haltialla ja Tytyrin vesilaitoksella

Tutkimuksessa lämpökuvataan aurinkosähköjärjestelmien paneelit Espoossa Luontokeskus Haltiassa ja Lohjalla kaupungin Tytyrin vesilaitoksella. Tutkimuksen lämpökuvaus suoritetaan maaliskuun huhtikuun aikana, kun lumet ovat sulaneet paneelien pinnalta ja sää on aurinkoinen ja tuuleton. Tutkimuksessa noudatetaan kuvassa 9 esiteltyä toimintasuunnitelmaa. Ensimmäisenä tehdään valmistelu, seuraavaksi tutkimus ja viimeisenä tutkimustulosten analysointi. Lopputuloksena raportoidaan lämpökuvauksessa tehtyjen havaintojen perusteella aurinkopaneelien toimintakunto ja kuvauksessa mahdollisesti havaitut poikkeamat.

5.1 Tutkimuksessa käytettävät lämpökuvauslaitteet

Tutkimuksessa käytetään kahta lämpökameraa. Haltiassa käytetään älypuhelimeen tai tablettiin yhdistettävää Seek-merkkistä lämpökameraa ja droneen integroitua Sony kameran ja Flir-lämpökameran yhdistelmää. Molemmilla saadaan tavallisia digikuvia ja lämpökamerakuvia sekä näiden kuvien yhdistelmiä, joista näkee selkeämmin kuvattavan kohteen kuin pelkästä lämpösäteilyn tuottamasta IR-kuvasta.

5.1.1 Kannettava lämpökamera

Luontokeskus Haltian kuvauksessa käytetään kuvassa 8 näkyvää Seek-merkkistä mobiililaitteen USB-C porttiin kytkettävää lämpökameraa. Kamera käyttää puhelimen tai tabletin akkua eikä tarvitse erillistä latausta. Kameran tekniset ominaisuudet:

- FOV 36°/36°
- Lämpötilan mittausalue -40 – +330 °C
- Resoluutio 206 x 156 pikseliä
- Havaintoetäisyys ihmiset/ajoneuvot 300 m
- Manuaalinen tarkennus

Kameralla voidaan ottaa yksittäisiä kuvia tai videokuvaa. Kuvaan saadaan lämpötilan osoittama väripaletti sekä kuvausajankohta sijaintitietoineen raportointia varten. (data-systems, 2022)

Kuvausetäisyys Seek-lämpökameralla on maksimissaan 9,51 m kun pikselin sivun pituus on 30 mm.

$$d_{\max} = \frac{206 \text{ pikseliä} \cdot 0,03 \text{ m}}{2 \cdot \tan(36^\circ/2)} = 9,51 \text{ m}$$

Horisontaalinen ja vertikaalinen alue, joka voidaan kuvata yhdellä kertaa, on 6,18 m x 4,68 m.

$$\text{Horisontaalinen, } 206 \text{ pikseliä} \cdot 0,03 \text{ m} = 6,18 \text{ m}$$

$$\text{Vertikaalinen } 156 \text{ pikseliä} \cdot 0,03 \text{ m} = 4,68 \text{ m}$$

5.1.2 Droneen yhdistetty lämpökamera

Lohjan kaupungin vesilaitoksella ja Luontokeskus Haltiassa tehdään kuvaus käyttäen kuvan 12 Parrot Anafi Thermal lämpökameralla varustettua dronea. Teknisiä ominaisuuksia:

- Lentoaika 26 min/akku, varustettu kolmella akulla
- Lentoetäisyys 4 km
- Maksiminopeus 55 km/h vaakasuunnassa, 14,4 km/h pystysuunnassa
- Toiminta lämpötila -10–+40 °C
- Tiedonsiirtojärjestelmä Wifi 802.11 a/b/g/n
- Toiminta taajuus 2,4 GHz–5,8 GHz
- Tuulenkesto 50 km/h eli noin 14 m/s

Traficomien määräämä maksimilentokorkeus Suomessa on 120 m.

Parrot Anafi Thermal dronen Sony IMX230 kameralla saadaan valokuvia 21 Mpx tarkkuudella ja videokuvaa 4K-laadulla. Lämpökameran Flir Lepton 3,5 tekniset ominaisuudet:

- HFOV 57°
- Lämpötilan mittausalue -10 – +400 °C
- Resoluutio lämpökuvaa 160 x 120 pikseliä / yhdistetty valokuva 3264 x 2448 pikseliä
- Mittausalue aallonpituuksilla 8–14 μm
- Havaintoetäisyys ihmiset/ajoneuvot 300 m
- Digitaalinen
- Automaattinen tarkennus

Parrot Anafi Thermal dronessa integroitujen Sony-kameran ja Flir-lämpökameran kuvat ovat muokattavissa, jolloin saadaan normaalin kuvan ja lämpökuvan yhdistelmä.

Kuvausetäisyys Parrot Anafi Thermal dronen kameralla on maksimissaan 10,45 m kun pikselin sivun pituus on 30 mm.

$$d_{\max} = \frac{160 \text{ pikseliä} \cdot 0,03 \text{ m}}{2 \cdot \tan(57^\circ/2)} = 10,45 \text{ m}$$

Horisontaalinen ja vertikaalinen alue joka kerralla saadaan kuvattua, on 4,8 m x 3,6 m

Horisontaalinen, 160 pikseliä · 0,03 m = 4,8 m

Vertikaalinen, 120 pikseliä · 0,03 m = 3,6 m



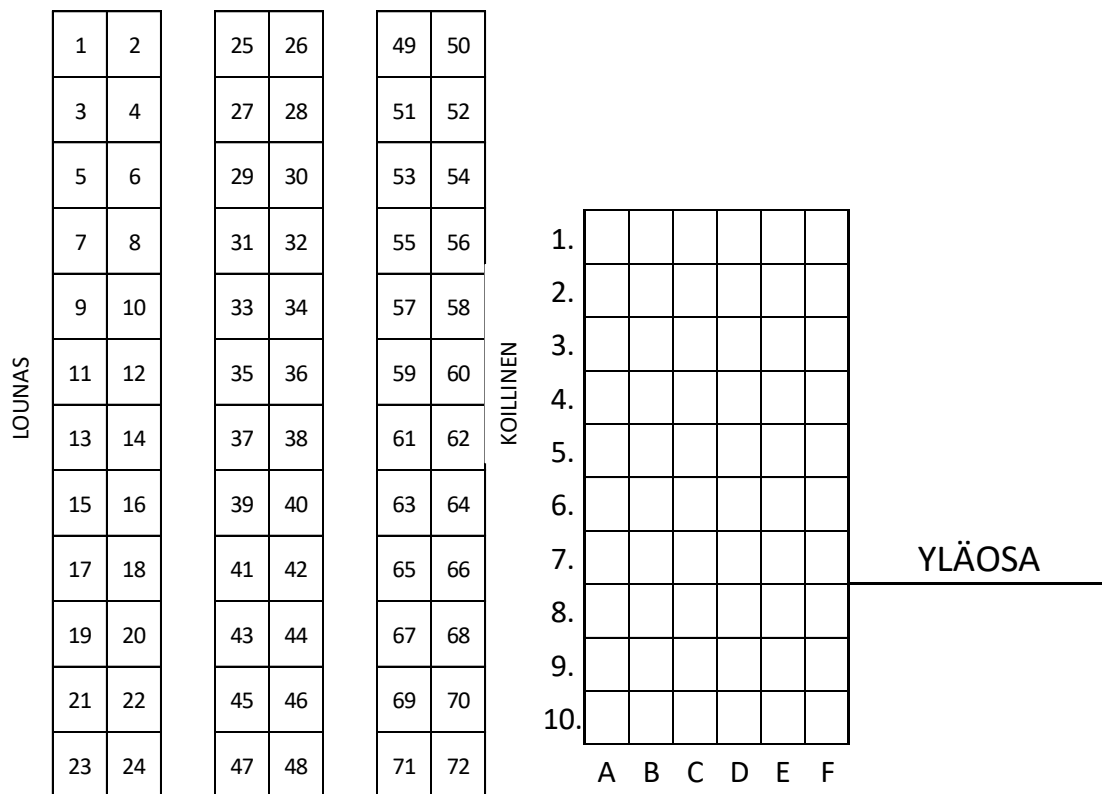
Kuva 12 Lämpökuvadrone Parrot Anafi Thermal

Traficom on Suomen ilmailuviranomainen, joka huolehtii ilmailun turvallisuudesta myöntäen luvat kauko-ohjattaville droneille. Ohjaajan tulee rekisteröityä dronelennättäjäksi ja suorittaa teoriakoe hyväksytyksi. (Traficom, 2021)

5.2 Lämpökuvaussuunnitelma Luontokeskus Haltia

Luontokeskus Haltia sijaitsee Espoossa Nuuksion kansallispuiston vieressä. Haltiassa on useita energiansäästö ratkaisuja. Yksi energian säästöjärjestelmä on rakennuksen katolle vuonna 2016 asennettu 18,7 kWp aurinkosähköjärjestelmä. Haltian järjestelmässä on kuvan 13 mukaisesti 72 kpl 260 kWp paneelia lounaaseen, joissa kussakin on 60 kennoa. Paneelien asennuskulma on noin 22 astetta (kuva 14).

Paneelit kuvataan kuvan 13 osoittamassa numerojärjestyksessä useampi paneeli yhdellä kertaa. Yleiskuvaus tehdään videokuvauksena, jonka jälkeen kuvataan paneeleita erikseen raporttia varten. Kuvauksen jälkeen tehdään visuaalinen tarkastelu paneeleille, kaapeloinnille ja liitoksille.



Kuva 13 Luontokeskus Haltian aurinkopaneelit vasemmalla numeroituna oikealla yksittäinen paneeli vikapaikan merkintää varten

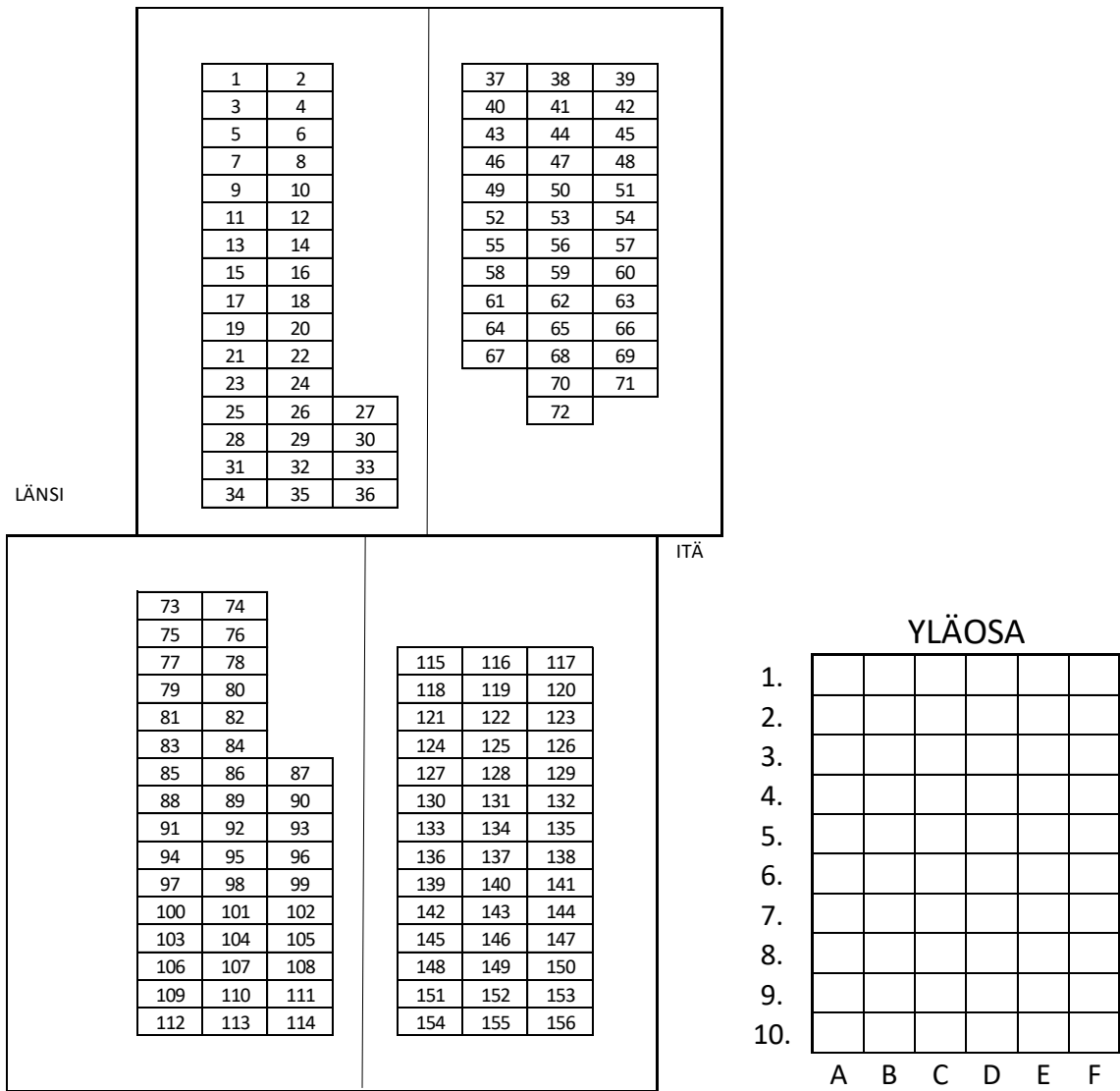


Kuva 14 Haltian aurinkopaneelien asennuskulma

5.3 Lämpökuvaussuunnitelma Lohjan kaupungin Tytyrin vesilaitos.

Lohja on osallistunut HINKU-hankkeeseen, jonka tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalin kunnan kriteerit vähentämällä päästöjä 80 prosenttia vuodesta 2007 vuoteen 2030. Aurinkopaneelit ovat osa tätä hanketta ja Tytyrin vesilaitoksen järjestelmä on yksi kaupungin kuudesta aurinkovoimalasta. Tytyrin vesilaitoksen katolla sijaitseva voimala on noin 4 vuotta vanha ja koostuu 156 aurinkopaneelista, joista yksittäisen paneelin teho on 270 Wp kokonaistehon ollessa 42,12 kWp. (Lohja, 2022)

Aurinkovoimala kuvataan maasta tai katolta. Dronella lennetään maksimissaan 10 m etäisyydellä paneeleista ja lämpökuvaus suoritetaan lentämällä vaakasuunnassa paneelien yli kuvan 15 kaaviossa osoitetussa numerojärjestyksessä. Kuvauskohta paneelin yläpuolelta valitaan siten, ettei drone aiheuta omaa varjostusta kuvattavaan paneeliin. Kuvaus pyritään suorittamaan mahdollisimman pienellä poikkeamalla kohtisuorasta kulmasta, jotta heijastumat eivät aiheuta vääristynyttä lämpötilaa paneelin pinnasta.



Kuva 15 Lohjan Tytyrin vesilaitoksen aurinkopaneelit vasemmalla numeroituna oikealla yksittäinen paneeli

6 Aurinkopaneelien lämpökuvauksen tulokset

Tässä kappaleessa käsitellään Luontokeskus Haltialla ja Lohjan kaupungin Tytyrin vesilaitoksella tehtyjen lämpökuvauksen tuloksia. Tutkitut voimalaitokset kuvattiin maaliskuussa viikon aikana ja olosuhteet olivat kummassakin kohteessa vertailukelpoisia.

6.1 Luontokeskus Haltia

Tutkimus suoritettiin 19.3.2022. Sää oli tutkimushetkellä aurinkoinen, lämpötila oli noin 5 °C ja tuuli oli vaimeaa. Kuvassa 16 aurinkovoimala kuvattuna ilmasta suoraan yläpuolelta.



Kuva 16 Luontokeskus Haltian aurinkovoimala kuvattuna ilmasta

Voimala vastasi koostumukseltaan ennakkotietoja. Kuvasta voidaan havaita voimalan rakenne, yksi paneeli koostuu 60 kennosta ja paneeleita on kolmessa rivissä aina kaksi päällekkäin. Yhdessä rivissä on 24 paneelia ja kolmessa rivissä yhteensä 72. Paneelit on suunnattu lounaaseen. Paneelien asennuskulma on noin 22 astetta. Kuvassa 17 näkyy aurin-
gon säteilyteho tutkimuksen aikana.



Kuva 17 Auringon säteilytehomittari

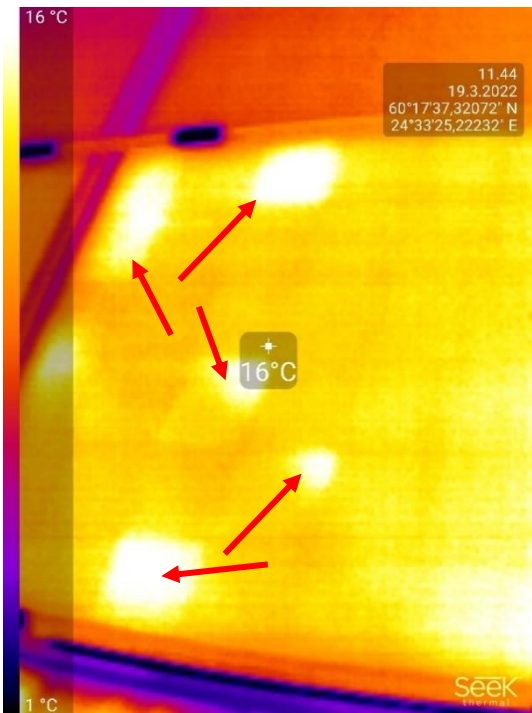
Auringon säteilytehomittari oli suunnattu samaan kulmaan aurinkopaneelien kanssa, jolloin saatiin referenssi arvo, jota voidaan verrata virtoja mitattaessa laskennallisiin arvoihin tai voimalan tuotannon sen hetkiseen arvoon.

Lämpökuvaus tehtiin Seek-lämpökameralla ja Parrot Anafi Dronella. Kuvaus aloitettiin Seek-kameralla. Paneelien sijoituskulman ja katon reunan läheisyyden vuoksi paneeleita ei päästy kuvaamaan riittävän kaukaa ja kuvattaessa ylempiä paneeleita kuvauskulma oli liian suuri. Kuvassa 18 näkyy ylempien paneelien heijastunutta säteilyä ja kuvasta 19 havaitaan että osa paneelistä jää kuvausalueen ulkopuolelle.



Kuva 18 Seek-lämpökameran kuva paneelista, jossa heijastumaa.

Seek-lämpökameran puutteellisuuden vuoksi, tehtyjen kuvauksien perusteella ei voida antaa arviota järjestelmän kunnosta. Ongelman havainnollistamiseksi tehtiin muutama testi kuvaus. Kuvassa 19 Seek-lämpökameralla otettu kuva, jossa korostuu tietyt paneelin kohdat lämpimämpinä kuin muut. Lämpötilaerot ovat pieniä, koko kuvan lämpötilat ovat 1–16 °C välillä.



Kuva 19 Seek-lämpökameran kuva paneelista, jossa pieniä lämpötilaeroja

Dronella tehty kuvaus suoritettiin kuvaamalla paneelit lämpövideokuvauksella, tavallisella lämpökuvauksella sekä normaalilla kuvauksella. Kuvaus suoritettiin etukäteen laaditun paneelikartan numerojärjestyksessä. Kuvauskorkeudeksi valittiin 5 m joka dronella pidettiin kuvauksen ajan. Valitulla kuvauskorkeudella kuvattava alue oli optimaalisen kokoinen suhteessa näkymään. Kuvauksen raportti liitteessä 1.

Kuvauksessa saatujen havaintojen perusteella voimalassa ei ollut merkittäviä poikkeamia. Voimalan kaapeloinnit ja runkorakenteet olivat hyvässä kunnossa. Talven jäljiltä paneelien pinnoilla oli jonkin verran likaa, muttei siinä määrin että vaikutusta lämpökuvassa olisi havaittu.

6.2 Lohjan kaupungin vesilaitos

Tytyrin vesilaitoksen katolla oleva voimala kuvattiin 23.3.2022. Kuvauksen aikaan sää oli aurinkoinen, pilviä oli jonkin verran. Kuvaukseen pilvet eivät vaikuttaneet. Lämpötila oli 3 °C ja tuulta oli 2,3 m/s. Auringon säteilyenergia oli kuvaushetken alussa 561 W/m² voimalan tehon ollessa noin 19 KWp. Vertailun vuoksi, suunnattaessa mittalaite suoraan

auringon suuntaan havaittiin säteilyenergian huippuarvoksi 939 W/m². Arvo oli sen hetkinen maksimiteho joka auringon säteilystä olisi voitu hyödyntää. Kuvaus tehtiin kuvassa 20 näkyvällä dronella.



Kuva 20 Tytyrin vesilaitoksen katolla lämpökuvaus käynnissä

Kuvauksessa poikkeamaa havaittiin kymmenessä eri paneelissa. Kuvauksen raportti liitteessä 2. Paneelien pinnassa oli kuvassa 21 näkyvää hiekkapölyä, mutta sen vaikutuksen määrittämiseksi pitäisi suorittaa uusintamittaus puhtaille paneeleille.



Kuva 21 Tytyrin vesilaitoksen aurinkopaneelien 74–81 pinnalla hiekkaa

Kuvassa 21 näkyviä hiekkakerrostumia oli useampien paneelien pinnoilla. Osa lämpimistä kennoista oli osittain hiekkaisia, joka saattaa selittää lämpötilan nousun. Hiekka on tullut todennäköisesti tuulen mukana viereisellä tontilla sijaitsevan kaivosalueen pihalta. Selkeää syytä kaikille lämpötilaeroille kennojen välillä ei silmämääräisellä tarkastelulla voitu havaita. Paneelien uusintakuvaus puhdistetuille paneeleille antaisi varmuuden johtuuko lämpötilojen muutokset likaantumisesta vai sisäisistä vaurioista.

7 Johtopäätökset

Tutkimustyössä käytiin läpi aurinkovoimalaan ja erityisesti aurinkopaneeleihin tehtävää ennakkoivaa huolto- ja kunnossapitotoimintaa lämpökuvauksen avulla. Monessa tapauksessa käyttäjät eivät huomaa järjestelmään tulevia vaurioita koska niiden silmämääräinen tarkastelu varsinkin jyrkillä katoilla on hankalaa ja monet viat näkyvät ainoastaan lämpökuvissa tai mittauksissa, joita tehdään huoltosuunnitelmien mukaan tai havaittaessa häiriöitä. Standardissa määritellään koska ja miten lämpökuvauksia tulisi suorittaa. Dronella tehty lämpökuvaukset on nopea ja monessa tapauksessa ainoa keino lämpökuvata paneelit luotettavasti.

Luontokeskus Haltiassa suoritettiin lämpökuvauksia kädessä pidettävällä lämpökameralla sekä dronella kuvaten aurinkopaneeleita katon tasalta ja voimalan yläpuolelta. Oletuksena oli löytää paneeleihin käyttövuosien aikana tulleita poikkeamia, joko teknisten tai ulkoisten vaikutusten aikaan saamana. Lämpökuvauksissa ei löydetty yhtään merkittävästi poikkeavaa pistettä paneelien pinnalla. Kuvaukset katon tasolla kädessä pidettävällä lämpökameralla koettiin ongelmalliseksi. Riittävän kuvausvälimatran ja kuvauskulman saavuttaminen ei kohteessa onnistunut. Paneelien asennuskulma suhteessa vaakatasoon on niin pieni, että kuvauskulma on hankala saada riittävän lähelle tason kohtisuoraa. Ongelmaa havainnollistettiin muutamalla kuvalla. Aurinkopaneelien lämpökuvaukset on kannattavaa tehdä ilmasta, jolloin saadaan kuvauskulma optimaaliseksi ja päästään kuvaamaan suurempia alueita kerralla ja melko nopeasti.

Lohjalla Tytyrin vesilaitoksella kuvattiin 156 paneelia, joista kymmenessä havaittiin poikkeama. Yhdessä paneelissa 1/3 paneelista oli kuumempi, muissa oli vaihtelevaa lämpötila-poikkeamaa yksittäisissä kennoissa. Visuaalisessa tarkastelussa havaittiin paneelien pinnalla pientä hiekkakerrostumaa ja osassa poikkeavista kennoista hiekkaa oli selkeästi enemmän, joka aiheuttaa kennossa lämpenemää. Kohteessa tehdyt kuvaukset oli helppo suorittaa ja poikkeamat tulivat selkeästi näkyviin.

Dronella tehdyt lämpökuvaukset ovat hyvin valmisteltuina nopeita suorittaa ja tulokset helposti todettavissa kuvista. Tytyrin kokoisen järjestelmän kuvauksen pystyy suorittamaan nopeasti ja on teettäjälle melko edullinen toimenpide verrattuna valjastyöskentelyä tehtyyn

kuvaukseen kädessä pidettävällä lämpökameralla tai muihin yksityiskohtaisempiin tutkimus ja vertailumittauksiin.

Aurinkopaneeleihin tulevat viat tulevat selkeästi käyttäjille yllätyksenä ja mahdollisia vikaantumisia ja tuotannon alenemia ei yleensä takaisinmaksuajoissa huomioida. Selkeästi aurinkovoimalat ovat helppohoitoisia ja vaativat vain vähän huolenpitoa, kunhan vain muistetaan niiden olemassaolo ja tehdään takuuehtojen vaatimat huolto ja kunnossapitotoimenpiteet. Paneelien vikaantuessa on aina kysymys tuotannon alenemisestä ja takaisinmaksuajan pitenemisestä. Säännöllinen tarkastus visualisesti ja mahdollisuuksien mukaan lämpökuvaa-minen antavat paremmat edellytykset järjestelmän toimintakyvyn ylläpitämiseen mahdollisimman hyvänä ja tutkimukset ovat ainoa keino puuttua takuuajana tullessiin vikaantumisiin ja niiden korjaamiseen toimittajan kustannuksella.

8 Yhteenveto

Tässä diplomityössä käsiteltiin aurinkovoimaloiden tekniikkaa ja komponentteja, joista aurinkovoimalat koostuvat. Työssä esiteltiin erilaisia aurinkopaneelityyppejä ja niiden eroja. Aurinkopaneelien kunnossapitoa ja kunnossapitoon liittyviä tarkastuksia käsiteltiin tutkimusten, standardien ja takuehtojen asettamien vaatimusten pohjalta. Aurinkopaneelien vikoja ja vikojen havaitsemista käsiteltiin lämpökuvauksen näkökulmasta. Tutkimuksessa käsiteltiin toimenpiteitä, joita määräyksissä ja takuehdoissa vaaditaan järjestelmän häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi. Työssä esiteltiin lämpökuvauksen ja -kuvaukseen liittyvät laitteet sähkölaitteiden ja aurinkopaneelien tutkimuksessa. Lämpökuvauksesta käsiteltiin aurinkopaneelien kuvaukseen liittyvänä prosessina, joka eroaa muiden sähkölaitteiden lämpökuvauksesta. Työssä esiteltiin dronella tehtävä lämpökuvauksen ja kuvaukseen vaadittavan laitteiston ominaisuudet ja vaihtoehdot kuvauslaitteiston tasolle.

Tutkimustyössä lämpökuvattiin kaksi aurinkovoimalaa. Espoossa lämpökuvattiin luontokeskus Haltian ja Lohjalla Tytyrin vesilaitoksen katolla sijaitsevat aurinkovoimalat. Haltialla yritettiin kuvata käsikäyttöisellä lämpökameralla, joka koettiin hankalaksi koska riittävää kuvausetaisyttä ja kuvauskulmaa ei saavutettu, vaan kuvauksessa havaittiin heijastumia ja puutteellisia kuvia. Dronella tehty lämpökuvauksen oli helppo, nopea ja turvallinen suorittaa hankalissakin olosuhteissa, koska dronen ohjaus voitiin suorittaa turvallisesta paikasta. Luontokeskus Haltian katolla tehdyissä kuvauksissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia paneelien lämpötiloissa ja paneelit olivat silmämääräisessä tarkastelussa melko puhtaita ja ehjiä. Lohjan Tytyrin vesilaitoksella tehdyissä kuvauksissa havaittiin poikkeamia kymmenessä paneelissa. Silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin paneelien pinnalla jonkin verran hiekkaa, joka saattoi selittää osan lämpötilamuutoksista. Varmuutta lämpötilamuutoksille ei tutkimuksen aikana saatu ja lopullisen syyn selvittämiseksi olisi vaadittu uusintakuvaus ja lisätutkimuksia kun paneelit ovat puhtaammat. Lämpökuvauksen avulla saatiin käsitys aurinkovoimaloiden sen hetkisestä toimintakunnosta. Tutkimuksessa osoitettiin lämpökuvauksella havaittavia poikkeamia tutkituilla paneeleilla. Tutkimuksessa kuvatuista aurinkopaneeleista laadittiin raportit tutkimuksen liitteeksi havainnollistamaan tutkimuksessa saatuja tuloksia.

Lähteet

Test report generated by Mobile PV-Testcenter (6001_Zora) on 9/15/2021 at 9:57 AM. Canadian Solar HiKu CS3L-MS 370W -aurinkopaneeli. Saatavissa myös PDF-muodossa <https://www.scanoffice.fi/wp-content/uploads/sites/11/2020/09/testiraportti-report-solar-salosolar-275-wp.pdf>

Luentomoniste: Tuuli- ja aurinkovoimateknologia ja liiketoiminta, Introduction to solar PV technology Antti Kosonen

Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus, ST-Käsikirja 40, Sähkötieto ry 2021 s.162

[\(https://www.scanoffice.fi/tuote/znshine-solar-zxm8-kaksipuolinen-aurinkopaneeli/](https://www.scanoffice.fi/tuote/znshine-solar-zxm8-kaksipuolinen-aurinkopaneeli/) [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.4.2022]

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2021]

<https://spectrum.ieee.org/oxford-pv-sets-new-record-for-perovskite-solar-cells> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.4.2022]

<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panelsominaisuudet> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2022]

<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/aurinkopaneeleilla-visuaalista-nayttavyytta-rakennusten-julkisivuihin-ja> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.12.2021]

SFS-EN IEC 62446-2:2020 sivu 7

Report IEA-PVPS T13-01:2014, Review of Failures of Photovoltaic Modules s.20

Report IEA-PVPS T13-23:2021, Quantification of Technical Risks in PV Power Systems s.12

SFS-EN 62446-1:2016 s.28

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.1.2022]

<https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v400w/>[Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.1.2022]

IEA:n raportissa PVPS T13-24:2021 Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment 2021

PV Investment Technical Risk Management Best Practice Guidelines for Risk Identification, Assessment and Mitigation Deliverable D5.8 20/02/2017

ST 53.62 Sähkölaitteistojen lämpökuvauus s.5

<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vtt-tuo-lampokuvaukseen-uuden-optiikkaratkaisun> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 29.1.2022]

<https://www.infradex.com/lampokuvaus/> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.2.2022]

Review on infrared and electroluminescence imaging for PV field applications, Report IEA-PVPS T13-10:2018 s.23

Report IEA-PVPS T13-10:2018 ,Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications Table 2.2.1: General camera requirements. s.23

IEC TS 62446-3 Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance – Part 3: Photovoltaic modules and plants – Outdoor infrared thermography:2017

Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment 2021 Report IEA-PVPS T13-24:2021 s.16

62446-3 s.13

<https://www.data-systems.fi/tuote/seek-thermal-compact-usb-c-for-android-compact-thermal-camera-black/> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.2.2022]

<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/kauko-ohjattujen-lennokkien-ja-ilma-alusten-uusrpasdrone-taajuudet-ja-radiolupa> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.4.2022]

anafi-thermal-product-sheet-white-paper-en

<https://www.lohja.fi/asuminen-ja-ymparisto/kohti-hiilineutraalia-kuntaa-hinku-hanke/auringosta-sahkoa/> [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.3.2022]

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2009. Tutki ja kirjoita. 15. p. Helsinki, Tammi.

Stratton, C. R. 1976. Needs assessment for communication system design. *Journal of Technical Writing and Communication*. Vol. 6, nro. 2, s. 135–144.

Virtanen, V. 2011. Esimerkkilähteen otsikko. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Luettu 1.1.2018. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#)

Liite 1: Lämpökuvausraportti Espoon Luontokeskus Haltian aurinkopaneelit

Lämpökamera	Parrot Anafi Thermal drone
Sää	Aurinkoinen, ei pilviä, ei tuulta yli 3 m/s lämpötila 5 C
Aika	19.3.2022 klo 11–13
Mittaaja	Teemu Blomberg
Mittausetäisyys	5 m
Mitattava kohde	Aurinkovoimala, käyttöön otettu vuonna 2016
Paneelimalli	72 kpl Solarwatt blue 60P monikidepaneeli
Paneelin teho	260 kWp
Voimalan teho	18,7 kWp

Lämpökuvaus suoritettiin lentämällä kohtisuoraan paneelien yläpuolella 5 m korkeudella Aloitushetkellä klo 11.20 voimalan teho oli 8975 W auringon säteilytehon ollessa 482 W/m² Kuvauksen päätyttyä voimalan teho oli 9952 W auringon säteilyteho 542 W/m²

Kuvauksessa ei havaittu poikkeavia lämpötiloja.

Visuaalinen tarkastelu tehtiin kuvauksen jälkeen. Pientä likaisuutta paneelien pinnassa, joka lähtee sateella pois. Liitokset silmämääräisesti kunnossa, kaapelit ja liitokset kunnossa. Runkojen maadoitukset näyttivät olevan kunnossa. DC-turvakytkimet päälisin puolin ehjät. Toimintaa ei tarkastettu.

Alla kuvat paneeleista kaavion mukaan kuvattuna. Ei poikkeavia lämpötiloja. Paneelien 31–36 kuvassa käytetty eri väripaletti, jolloin taustapuolella olevat liitännät erottuvat kuvasta.

LOUNAS

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24

25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	38
39	40
41	42
43	44
45	46
47	48

49	50
51	52
53	54
55	56
57	58
59	60
61	62
63	64
65	66
67	68
69	70
71	72

KOILLINEN

1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
	A	B	C	D	E	F

YLÄOSA

Mittaukset (°C)

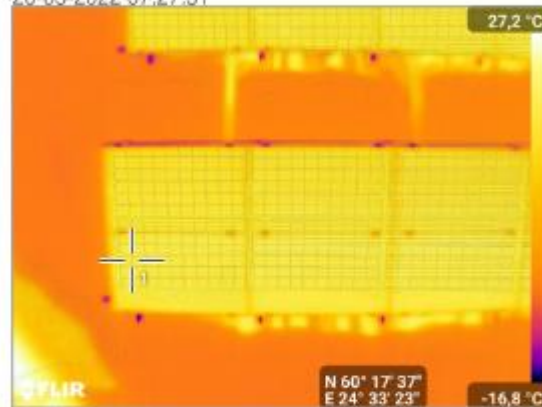
Piste	18,0
-------	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,69 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 23"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 1-6/72

20-03-2022 07:27:31



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"
100001060336.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:27:31



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"

Mittaukset (°C)

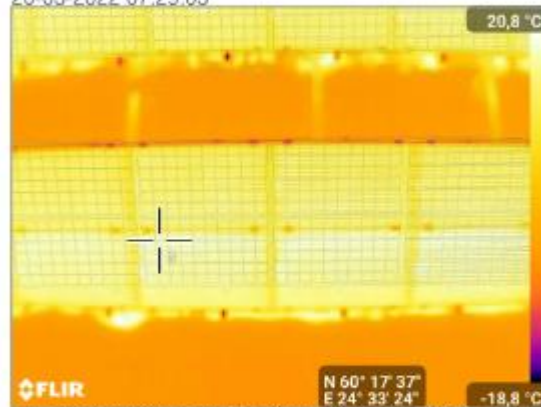
Piste		19,2
-------	--	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,25 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 5-12/72

20-03-2022 07:29:03



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001080338.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:29:03



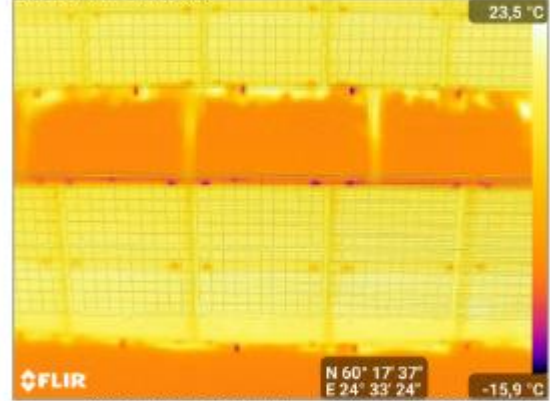
Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	11,99 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 11-16/72

19-03-2022 12:06:05



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001100340.JPG - AnafiThermal 1.8.

19-03-2022 12:06:05



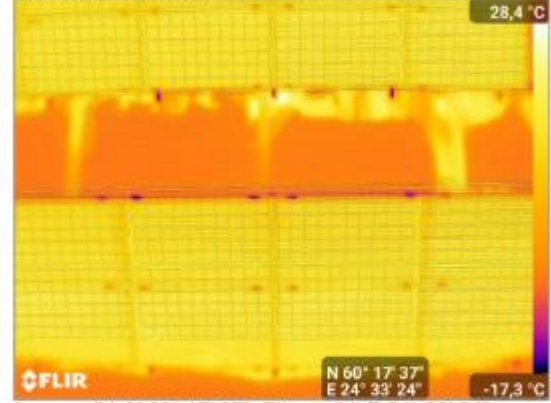
Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	11,93 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 17-22/72

19-03-2022 12:06:18



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001110341.JPG - AnafiThermal 1.8.

19-03-2022 12:06:18



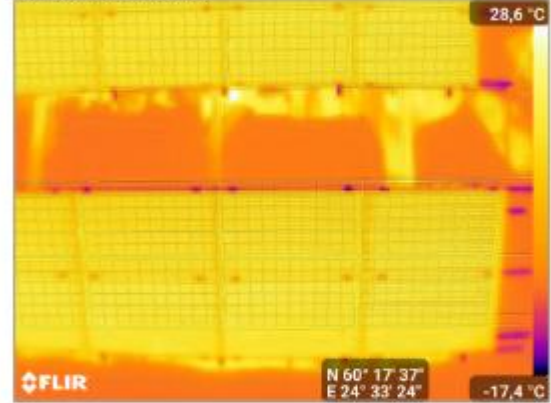
Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	11,83 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 19-24/72

19-03-2022 12:06:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001120342.JPG - AnafiThermal 1.8.

19-03-2022 12:06:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"



FLIR-lämpökuvaraportti

Mittaukset (°C)

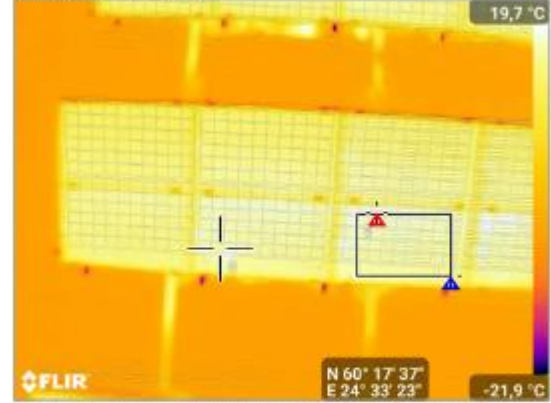
Piste		17,9
Neliö	Maks.	18,8
	Min.	16,2
	Keskiarvo	17,5

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,01 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 23"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 25-30/72

20-03-2022 07:35:42



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"
100001140344.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:35:42



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"

Mittaukset (°C)

Piste		17,9
Neliö	Maks.	18,8
	Min.	16,2
	Keskiarvo	17,5

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,01 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 23"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 25-30/72

20-03-2022 07:35:42



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"
100001140344.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:35:42



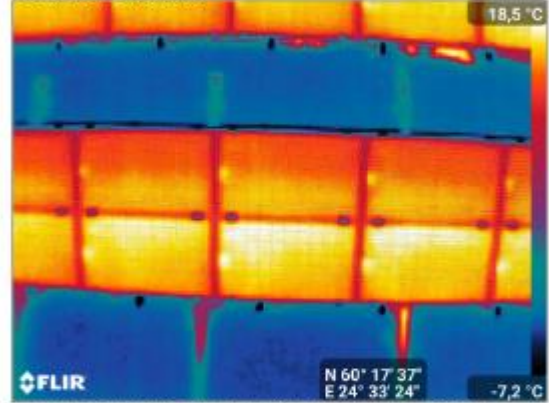
Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 23"

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,10 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 31-36/72

20-03-2022 08:34:21



Leveyspiiri: N 60° 17' 37\", Pituuspiiri: E 24° 33' 24\"
100001160346.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 08:34:21



Leveyspiiri: N 60° 17' 37\", Pituuspiiri: E 24° 33' 24\"

Mittaukset (°C)

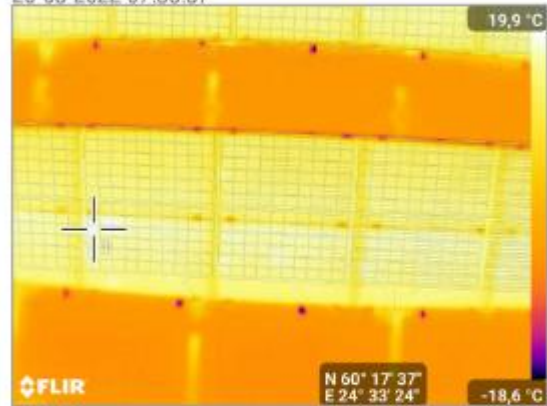
Piste	18,8
-------	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,10 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 37-42/72

20-03-2022 07:36:37



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001150345.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:36:37



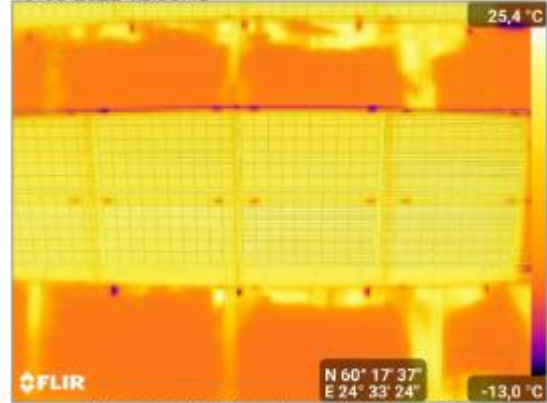
Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,39 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 43-48/72

19-03-2022 12:08:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001170347.JPG - AnafiThermal 1.8.

19-03-2022 12:08:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Mittaukset (°C)

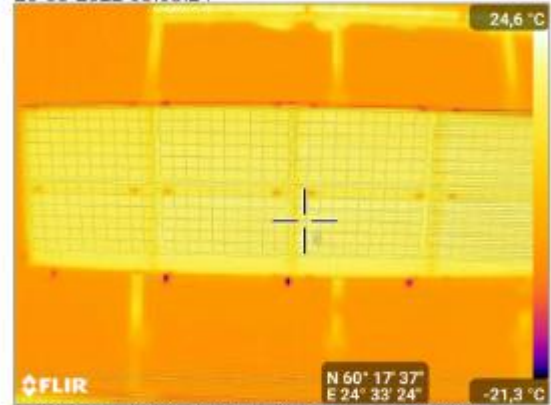
Piste		18,7
-------	--	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,26 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 49-54/72

20-03-2022 05:03:24



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001210351.JPG - AnafIThermal 1.8.

20-03-2022 05:03:24



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Mittaukset (°C)

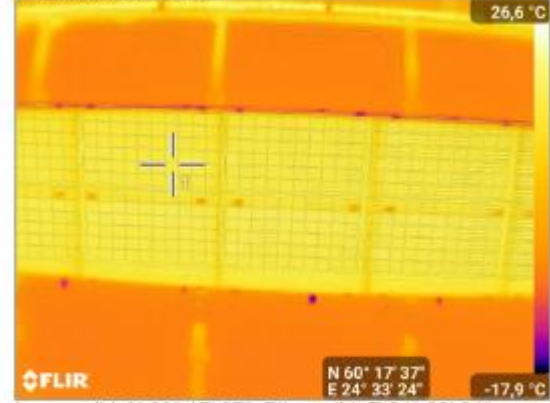
Piste	18,2
-------	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,27 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 55-60/72

20-03-2022 07:46:04



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001220352.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:46:04



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Mittaukset (°C)

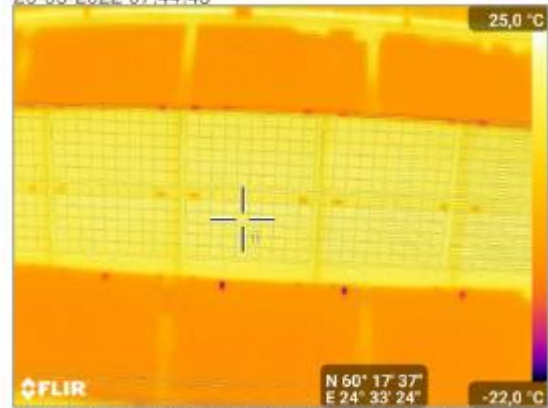
Piste	18,8
-------	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,28 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 61-66/72

20-03-2022 07:44:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001230353.JPG - AnafiThermal 1.8.

20-03-2022 07:44:43



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Mittaukset (°C)

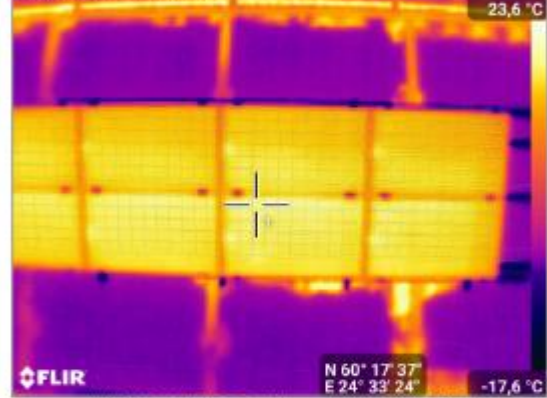
Piste		19,6
-------	--	------

Parametrit

Emissiivisyys	1,00
Heij. näenn.lämp.	22,00 °C
Etäisyys	0,00 m
Suhteellinen ilmankosteus	50,00 %
Ympäristön lämpötila	20,00 °C
Läpäisy	1,00
IR-ikkunan lämpötila	12,32 °C
IR-ikkunan läpäisy	0,80
Leveyspiiri	N 60° 17' 37"
Pituuspiiri	E 24° 33' 24"

Luontokeskus Haltia
Aurinkopaneelit 67-72/72

20-03-2022 07:42:00



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"
100001240354.JPG - AnafIThermal 1.8.

20-03-2022 07:42:00



Leveyspiiri: N 60° 17' 37", Pituuspiiri: E 24° 33' 24"

Liite 2: Lämpökuvausraportti Lohjan Kaupungin Tytyrin vesilaitoksen aurinkopaneelit

Lämpökamera	Parrot Anafi Thermal drone
Sää	Aurinkoinen, pilviä, tuulta 2,3 m/s lämpötila 3 C
Aika	23.3.2022 klo 11–13
Mittaaja	Teemu Blomberg
Mittausetäisyys	4 m
Mitattava kohde	Aurinkovoimala käyttöönotettu 2018
Paneelimalli	156 kpl JASOLAR monikide JAP6(K)-60–270/4BB
Paneelin teho	270 W
Voimalan teho	42 kWp

Lämpökuvaus suoritettiin lentämällä kohtisuoraan paneelien yläpuolella noin 4 m korkeudella. Aloitushetkellä klo 11.40 voimalan invertterien teholumema oli 9778w + 7652 W aurin-
gon säteilytehon ollessa 561 W/m².

Kuvauksen päätyttyä voimalan invertterien teholumema oli 9500 W ja 8797 W. Kuvauksessa havaittiin poikkeavia lämpötiloja, jotka on kirjattu raportin tauluk-
koon paneeli ja kennokohtaisesti. Suositellaan uusintakuvausta, kun paneelien pin-
nat ovat puhtaat.

Yhdeksän paneelin poikkeamat koskivat yksittäisiä kennoja. Yhdessä paneelissa ohitusdiodi oli erottanut 1/3 osan paneelista. Silmämääräisellä tarkastuksella paneeleissa ei havaittu mitään vaurioita. Hiekkaa tai pölyä oli paneeleiden pinnoilla vaihtelevasti ja häiritsevää likaa todennäköisesti poistuu seuraavan rankemman sateen aikana.

1	2	
3	4	
5	6	
7	8	
9	10	
11	12	
13	14	
15	16	
17	18	
19	20	
21	22	
23	24	
25	26	27
28	29	30
31	32	33
34	35	36

YLÄOSA

37	38	39
40	41	42
43	44	45
46	47	48
49	50	51
52	53	54
55	56	57
58	59	60
61	62	63
64	65	66
67	68	69
	70	71
	72	

LÄNSI

73	74	
75	76	
77	78	
79	80	
81	82	
83	84	
85	86	87
88	89	90
91	92	93
94	95	96
97	98	99
100	101	102
103	104	105
106	107	108
109	110	111
112	113	114

YLÄOSA

115	116	117
118	119	120
121	122	123
124	125	126
127	128	129
130	131	132
133	134	135
136	137	138
139	140	141
142	143	144
145	146	147
148	149	150
151	152	153
154	155	156

ITÄ

YLÄOSA

1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
	A	B	C	D	E	F

1		43		85		127	
2		44		86		128	
3		45		87	A1 LIEVÄ LÄMPENEMÄ	129	
4		46		88		130	
5		47		89		131	
6		48		90		132	
7		49		91		133	
8		50		92		134	
9		51		93		135	
10		52		94		136	
11		53		95		137	
12		54		96		138	
13		55		97		139	
14	D1 LÄMPENEMÄÄ	56		98		140	
15		57		99		141	
16		58		100		142	
17		59		101		143	
18		60		102		144	
19		61	F10 LÄMMIN	103		145	
20		62		104		146	
21		63		105		147	
22		64		106		148	
23		65		107		149	
24		66		108	AB1-10 OHITUSDIODI	150	
25		67		109		151	
26		68		110		152	
27		69		111			
28		70		112			
29		71		113			
30		72		114			
31		73		115			
32	F10 LÄMMIN	74	E10 PIENI MUUTOS	116			
33	F10 LÄMMIN	75		117			
34		76		118	A10 LÄMPENEMÄ		
35		77		119			
36		78	F10 PIENI MUUTOS	120			
37		79		121			
38		80	C10 SELKEÄ LÄMPENEMÄ	122			
39		81		123			
40		82		124			
41		83		125			
42		84		126			

Mittaukset

Sp1	19,0 °C
Sp2	6,6 °C

Parametrit

Emissiivisyys	1
Heij. näenn.lämp.	22 °C

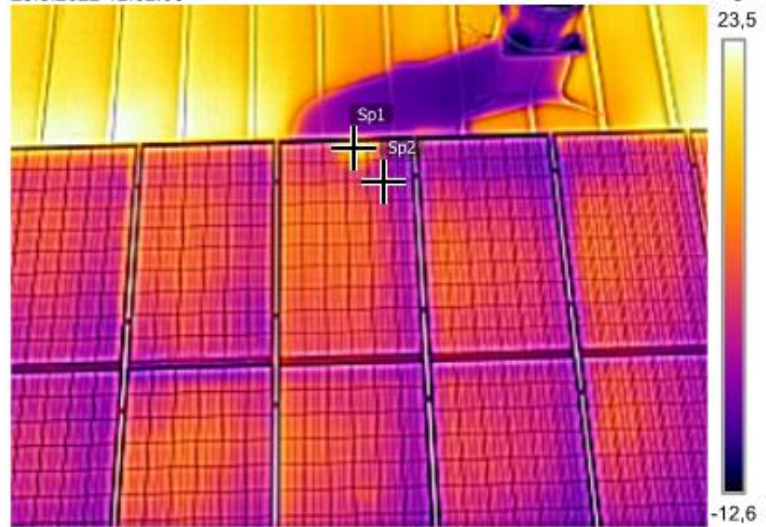
Maantieteellinen sijainti

Kompassi	0° N
----------	------

Kuvaus

AnafThermal 1.8.2

23.3.2022 12.02.06



14.JPG

PARROT ANAFI

23.3.2022 12.02.06



14.JPG

PARROT ANAFI



32F10 33F10

Mittaukset

Sp1	19,9 °C
Sp2	9,5 °C
Sp3	7,2 °C

Parametrit

Emissiivisyys	1
Heij. näenn.lämp.	22 °C

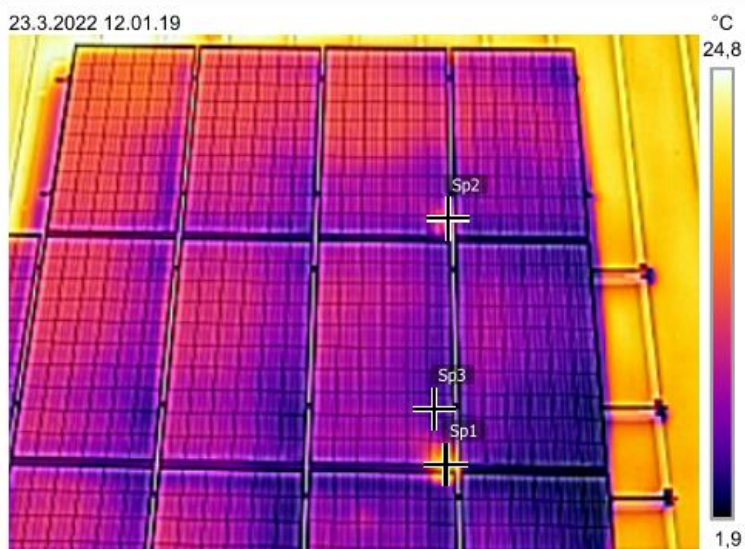
Maantieteellinen sijainti

Kompassi	0° N
----------	------

Kuvaus

AnafiThermal 1.8.2

23.3.2022 12.01.19



32_33.JPG

PARROT ANAFI

23.3.2022 12.01.19



32_33.JPG

PARROT ANAFI



61F10

Mittaukset

Sp1	16,2 °C
Sp2	12,5 °C

Parametrit

Emissiivisyys	1
Heij. näenn.lämp.	22 °C

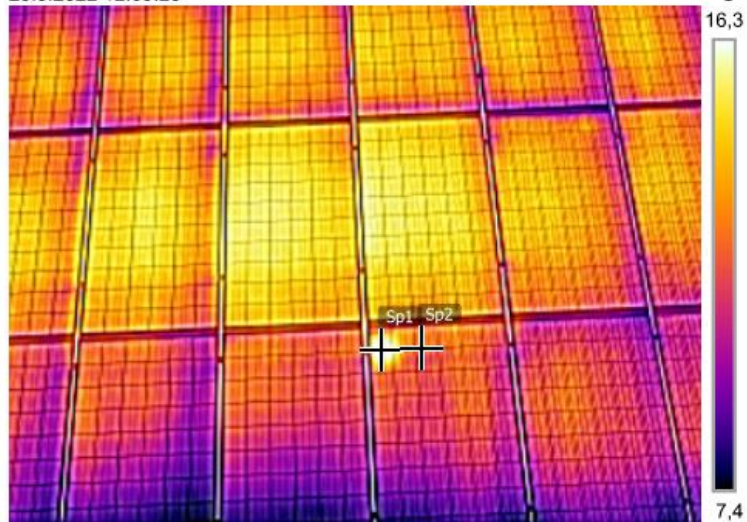
Maantieteellinen sijainti

Kompassi	0° N
----------	------

Kuvaus

AnafiThermal 1.8.2

23.3.2022 12.09.20



61,.JPG

PARROT ANAFI

23.3.2022 12.09.20



61,.JPG

PARROT ANAFI



78F10 80C10

Mittaukset

Sp1	32,1 °C
Sp2	14,2 °C
Sp3	8,2 °C

Parametrit

Emissiivisyys	1
Heij. näenn.lämp.	22 °C

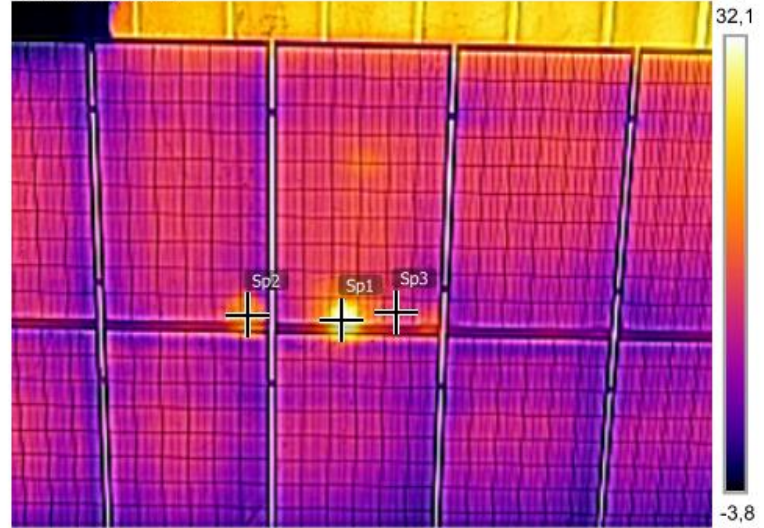
Maantieteellinen sijainti

Kompassi	0° N
----------	------

Kuvaus

AnafiThermal 1.8.2

23.3.2022 11.45.12



78_80.JPG

PARROT ANAFI

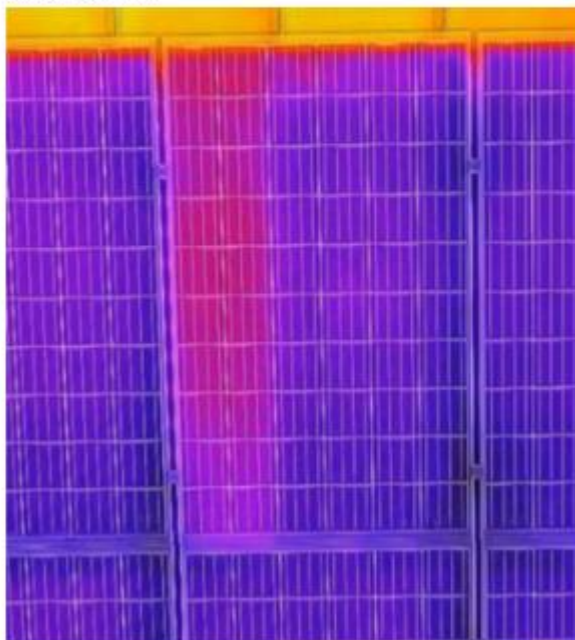
23.3.2022 11.45.12



78_80.JPG

PARROT ANAFI

1.4.2022 21.05.28



Sieppaa.JPG

1.4.2022 21.12.14



400.JPG



118A10

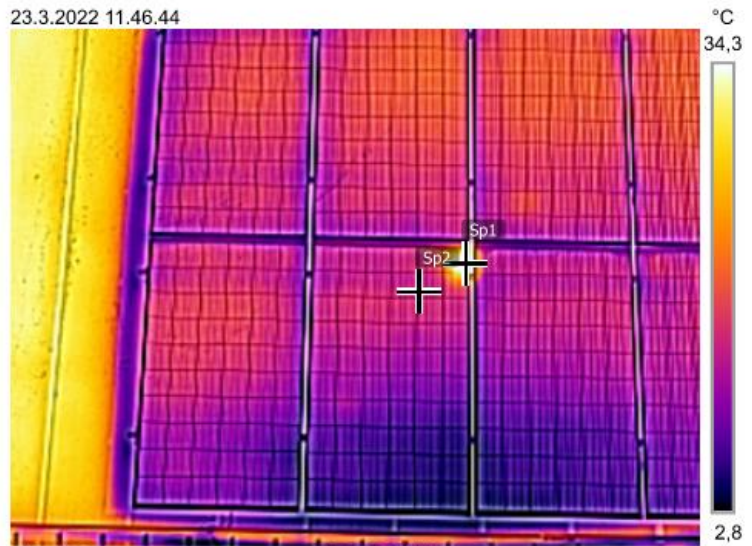
Mittaukset	
Sp1	34,1 °C
Sp2	11,5 °C

Parametrit	
Emissiivisyys	1
Heij. näenn.lämp.	22 °C

Maantieteellinen sijainti	
Kompassi	0° N

Kuvaus	
AnafiThermal 1.8.2	

23.3.2022 11.46.44



118,.JPG

PARROT ANAFI

23.3.2022 11.46.44



118,.JPG

PARROT ANAFI