

# **Lämpökamerakuvausten hyödyntäminen aurinkovoimalan kunnontarkastelussa**

Markus Lyytikäinen

Opinnäytetyö

Joulukuu 2018

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Lyytikäinen, Markus	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2018
	Sivumäärä 37	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Lämpökamerakuvausten hyödyntäminen aurinkovoimalan kunnontarkastelussa</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kirsi Niininen, Matti Siistonen		
Toimeksiantaja(t) Solarigo Systems Oy		
Tiivistelmä <p>Vaikka aurinkovoimaloiden oletetaan olevan huoltovapaita, tämä ei yleensä pidä paikkaansa. Oletus huoltovapaudesta voi johtua siitä, että aurinkovoimalan huoltaminen on usein helpompaa ja halvempaa kuin kilpailevien energiamuotojen, kuten tuulivoiman ja maakaasun. Lisäksi aurinkovoiman suhteessa pieni tuotanto pakottaa kunnossapitokustannukset mahdollisimman pieniksi, jotta toiminta olisi kaupallisesti kannattavaa. Lämpökamerakuvaukset ovat yksi aurinkovoimalan kunnossapitotapa.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko aurinkosähköjärjestelmän lämpökamerakuvaukset tehokas tapa etsiä vikoja aurinkosähköjärjestelmästä. Tehtävänä oli etsiä lämpökartasta viallisia aurinkopaneeleita, verrata näitä viereisiin aurinkopaneelisiin ja selvittää, saadaanko tällä tavalla vikapaikkoja esille järjestelmästä. Opinnäytetyössä vertailtiin myös eri paneelivalmistajien aurinkopaneelien vikaantumismääriä.</p> <p>Lämpökameralla kuvattaviksi kohteiksi valikoitui kaksi kattoasenteista aurinkovoimalaa ja yksi maa-asenteinen aurinkosähköpuisto. Tutkimusmateriaalina toimi lähes 20 000 aurinkopaneelia. Lisäksi aurinkovoimaloista ja aurinkosähköpuistosta oli saatavilla jännite- ja virtatietoja. Tutkimusmenetelmänä käytettiin kvantitatiivista tutkimusmenetelmää.</p> <p>Tuloksista selviää lämpökamerakuvausten olevan tehokas tapa etsiä viallisia aurinkopaneeleita aurinkosähköjärjestelmästä. Lämpökamerakuvaukset eivät kuitenkaan sovellu yhtä hyvin kaikille aurinkovoimaloille. Aurinkovoimalasta on oltava saatavilla vähintään paneeliketjukohtainen virtatieto, että mahdollista tuotannonalennamaa päästään tutkimaan tarkemmin. Myös aurinkovoimalan dokumentaation tärkeyden huomaa tuotannonalennamaa selvittäessä. Ilman dokumentaatiota aurinkovoimalan paneeliketjuista, on mahdotonta löytää oikeaa paneeliketjua järjestelmästä.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Aurinkosähkö, kunnonvalvonta, lämpökamera		
Muut tiedot ( <a href="#">salassa pidettävät liitteet</a> )		

Author(s) Lyttikäinen, Markus	Type of publication Bachelor's thesis	Date December 2018 Language of publication: Finnish
	Number of pages 37	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Inspecting solar power plant with thermal imaging</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Niininen, Kirsi Siistonen, Matti		
Assigned by Solarigo Systems Oy		
Description <p>It is often thought that solar power is maintenance free, but this is not strictly the case. Maintaining solar power plant operations may typically be considered simpler and cheaper than competing energy sources, such as wind power and natural gas. The relatively small profit margins associated with solar energy makes it necessary to keep operations and maintenance costs to a minimum to keep projects commercially viable. One scheduled maintenance task is to inspect solar panels with thermal imaging.</p> <p>The thesis studied if thermal imaging of a solar power plant is a good way to find faults in the photovoltaic system. The task was to find damaged solar panels in the thermal images, compare them to the adjacent solar panels, and determine if this is a good way to find fault spots on the system. The study also compared the failure rates in solar panels from different solar panel manufacturers.</p> <p>Two rooftop solar power plants and one ground-based solar power plant were selected for the thermal imaging. The study material consisted of nearly 20 000 solar panels. In addition, the voltage and current data of the solar power plants were available. The research method used was quantitative.</p> <p>The results show that thermal imaging is an effective way to find faulty solar cells in the solar photovoltaic system. However, thermal imaging is not equally suitable for all solar power plants. There must be at least a panel string specific current data available, so that a possible production decline can be explored more closely. The importance of the documentation of the solar power plant is also very important. Without documentation of the solar power plant, it is impossible to find the right panel string in the system.</p>		
Keywords ( <a href="#">subjects</a> ) Photovoltaics, condition monitoring, thermal imaging		
Miscellaneous ( <a href="#">Confidential information</a> )		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Tavoite ja tutkimusmenetelmät .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Aurinkosähkö .....</b>	<b>7</b>
	3.1 Aurinkopaneelit .....	8
	3.1.1 Aurinkopaneelin ohitus- ja estodiodit .....	9
	3.1.2 Lämpötilan vaikutus aurinkopaneelin toimintaan .....	10
	3.2 Aurinkosähkövoimalat.....	11
<b>4</b>	<b>Kunnossapito.....</b>	<b>12</b>
	4.1 Aurinkovoimalan kunnossapito.....	13
	4.2 Korjaava kunnossapito .....	14
	4.3 Ehkäisevä kunnossapito .....	15
	4.4 Kunnonvalvonta .....	15
	4.5 Lämpökamerakuvaukset .....	16
	4.5.1 Dronekuvaukset.....	17
	4.5.2 Lämpökamerakuvan tarkastelu .....	18
	4.6 Syitä vikaantumiselle .....	20
<b>5</b>	<b>Aurinkovoimaloiden lämpökamerakuvaukset .....</b>	<b>21</b>
	5.1 Kattovoimala 1 ja kattovoimala 2.....	22
	5.2 Maa-asenteinen voimala.....	24
<b>6</b>	<b>Tuotannon analyysi .....</b>	<b>27</b>
	6.1 Kattovoimala 1 ja Kattovoimala 2 .....	27
	6.2 Maa-asenteinen voimala.....	27

<b>7</b>	<b>Johtopäätökset.....</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Luotettavuus .....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>33</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>35</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>37</b>

## Kuviot

Kuvio 1 Eri energiantuotantomuotojen asennettu teho vuonna 2017 .....	7
Kuvio 2 Maailman 10 suurinta aurinkosähkön tuottajaa vuonna 2017.....	8
Kuvio 3 Ohitus- ja estodiodit paneeliketjussa .....	10
Kuvio 4 Lämpötilanvaikutus aurinkopaneelin tehoon .....	11
Kuvio 5 Aurinkosähkövoimalan rakenne.....	12
Kuvio 6 Kunnossapitolajit PSK7501 mukaan .....	13
Kuvio 7 P-F-käyrä.....	16
Kuvio 8 Dronen lentosuunta .....	18
Kuvio 9 Aurinkopaneelien kytkentäkoteloiden aiheuttamat lämpimät pisteet .....	19
Kuvio 10 Lämpökamerakuvauksissa ilmenevien ongelmakohtien mahdolliset syyt ...	20
Kuvio 11 Aurinkopaneelien vikaluokitus .....	22
Kuvio 12 Kattovoimala 1 viallisia paneeleita.....	23
Kuvio 13 Kattovoimala 2 lämpökamerakuvatut aurinkopaneelit .....	23
Kuvio 14 Viallisten aurinkopaneelien prosentuaalinen osuus aurinkopaneelien kokonaismäärästä .....	24
Kuvio 15 Lämpökamerakuvasta on havaittavissa aurinkopaneelin kytkentärasia .....	25
Kuvio 16 Suuren säteilyn aiheuttamaa heijastusta .....	25
Kuvio 17 Maa-asenteisen voimalan viallisten paneelien prosentuaalinen osuus .....	26
Kuvio 18 Eri paneelivalmistajien aurinkopaneelien lämpökamerakuvan vertailu...	27
Kuvio 19 Viallisten aurinkopaneelien vaikutus paneeliketjun virtaan .....	28
Kuvio 20 Maa-asenteisen voimalan heikoimmat paneeliketjut jakoboksin keskiarvoon verrattuna.....	29
Kuvio 21 Maa-asenteisen voimalan suurimmat tuotannon menetykset .....	31

# 1 Johdanto

Aurinkosähkö on nopeinten kasvava sähköntuotantomuoto maailmassa. Uutta aurinkosähköä asennettiin maailmanlaajuisesti enemmän kuin fossiilisia polttoaineita ja ydinvoimaa käyttäviä voimalaitoksia yhteensä. Aurinkosähkö kasvoi myös melkein kaksi kertaa enemmän kuin toiseksi suurin uusiutuva energianmuoto, tuulivoima. Vaikka aurinkosähkövoimaloiden oletetaan olevan huoltovapaita, tämä ei yleensä pidä paikkaansa. Oletus huoltovapaudesta voi johtua siitä, että aurinkovoimalan huoltaminen on usein helpompaa ja halvempaa kuin kilpailevien energiamuotojen, kuten tuulivoiman ja maakaasun. Lisäksi aurinkovoiman suhteessa pieni tuotanto pakottaa kunnossapitokustannukset mahdollisimman pieniksi, jotta toiminta olisi kaupallisesti kannattavaa. Lämpökamerakuvaukset ovat yksi aurinkovoimalan kunnossapitotapa.

Lämpökamerakuvaus on ainetta rikkomaton menetelmä, jolla voidaan arvioida rakennusten, rakenteiden ja rakennusmateriaalin kuntoa, laatua ja toimivuutta. Sitä käytetäänkin jo yleisesti sähkölaitteiden ja rakennusten kunnonvalvonnassa. Myös aikeisempia opinnäytetöitä on tehty esimerkiksi sähkökeskusten lämpökuvauksista. Vaikka aurinkosähköjärjestelmien lämpökamerakuvausten hyödyt ovat tiedossa, aihe vaatii lisäselvitystä siitä, mitä asioita täytyy ottaa huomioon lämpökuvauksia tehdessä ja minkälaisille aurinkosähköjärjestelmille tällaisia lämpökuvauksia kannattaa tehdä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko aurinkosähköjärjestelmän lämpökamerakuvaukset tehokas tapa etsiä vikoja aurinkosähköjärjestelmästä. Tehtävänä oli etsiä lämpökartasta viallisia aurinkopaneeleita, verrata näitä viereisiin aurinkopaneelisiin ja selvittää, saadaanko tällä tavalla vikapaikkoja esille järjestelmästä. Opinnäytetyössä vertailtiin myös eri paneelivalmistajien aurinkopaneelien vikaantumismääriä. Lämpökuvaus kohteiksi valikoitui kolme aurinkovoimalaa, joihin oli asennettu saman valmistajan aurinkopaneeleita, joita haluttiin testata. Opinnäytetyössä keskitytään aurinkosähkövoimaloihin, aurinkosähköpaneelisiin ja näiden lämpökamerakuvauksiin. Työssä ei tutkita aurinkokeräinten lämpökamerakuvauksia.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Solarigo Systems Oy. Toimeksiantaja myy valmiita aurinkovoimaloita tai voimaloiden tuottamaa sähköä. Toimeksiantajan liiketoiminta perustuu valmiiden aurinkosähköjärjestelmien myymisen lisäksi, pitkäaikaisiin

aurinkosähkö sopimukseen Solarigon ja asiakkaan välillä. Solarigo omistaa aurinkosähkö sopimuskohteiden voimalat ja on vastuussa voimaloiden tuotannosta ja kunnossapidosta. Järjestelmän kunnossapito on erittäin tärkeää, kun halutaan maksimoida tuotanto koko pitkäaikaisen aurinkosähkö sopimuksen ajaksi.

## 2 Tavoite ja tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko aurinkosähköjärjestelmän lämpökamerakuvaukset tehokas menetelmä etsiä vikoja aurinkosähköjärjestelmästä. Tehtävänä oli etsiä lämpökartasta viallisia aurinkopaneeleita, verrata näitä viereisiin aurinkopaneeleihin ja selvittää saadaanko tällä tavalla vikapaikkoja irti järjestelmästä. Lämpökamerakuvaukset suoritettiin kesän ja syksyn 2018 aikana.

Opinnäytetyössä käytettiin kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus vaatii tuntemista siitä, mitkä tekijät vaikuttavat ilmiöön. Määrällinen tutkimus edellyttää tekijöiden tuntemisen, koska jos ei tiedetä mittausta kohdetta, on mittaaminen mahdotonta. Yleensä määrällinen tutkimus on muuttujien mittaamista. Lisäksi määrällinen tutkimus voi olla muuttujien välisten vuorovaikutusten ja tekijöiden esiintymien määrällistä laskemista. Määrällinen tutkimus on mahdollista tehdä vaiheittain. Tämä tarkoittaa sitä, että jos joku vaihe ei onnistu, voidaan aina palata edeltävään vaiheeseen tutkimusprosessissa. Määrällistä tutkimusta voidaan pitää helppona, koska siinä vaiheessa, kun kerättävä aineisto on valmis, on suurin osa työstä yleensä tehty. Aineisto kuitenkin täytyy käsitellä tilastotieteen analyysimenetelmien mukaisesti. Eli mitään ei saa jättää kirjoittajan oman tulkinnan varaan. (Kananen, J. Kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. 20-25.) Määrällisen tutkimuksen kerätyt aineistot esitetään yleensä taulukkomuodossa ja-kaumina tai tilastollisina tunnuslukuina. (Kananen, J. Opinnäytetyön kirjoittajan opas. 75.)

Opinnäytetyössä täytyy aina arvioida tehtävän työn luotettavuutta. Yleensä luotettavuustarkastelu on erillinen luku työn lopussa. Mikäli luotettavuuden arviointi jää pois opinnäytetyöstä, jää myös työn luotettavuus usein heikoksi. Tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa käytetään reliabiliteetti- ja validiteettikäsitteitä. Kummatkin näistä tarkoittavat luotettavuutta, mutta vähän eri tavalla. Reliabiliteetti tarkoittaa



tutkimustulosten pysyvyyttä ja validiteettiä sitä, että tutkitaan ja mitataan oikeita asioita tutkimusongelman kannalta. Määrällisessä tutkimuksessa reliabiliteetin todentaminen on helppoa. Tutkimuksen vaiheet voidaan toistaa, jos tutkimuksen kaikki vaiheet on dokumentoitu riittävän tarkasti. Opinnäytetyössä ei kuitenkaan ole kannattavaa lähteä toistamaan jo tehtyjä mittauksia pysyvyyden todistamiseksi. Opinnäytetyössä riittää, että opinnäytetyön arvioija voi todeta prosessin aukottomuuden. Tähän päästään erivaiheiden riittävällä dokumentoinnilla ja perusteluilla ratkaisulla. (Kananen, J. Kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. 118-123.)

Tutkimusongelma on tutkimuksen lähtökohta, johon haetaan vastausta tai ratkaisua. Kun tutkimusongelma on tiedossa, täytyy selvittää mitä tietoa ongelman ratkaiseminen vaatii, sekä mistä tietoa etsitään ja kuinka se kerätään. (Kananen, J. Kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. 20-25.)

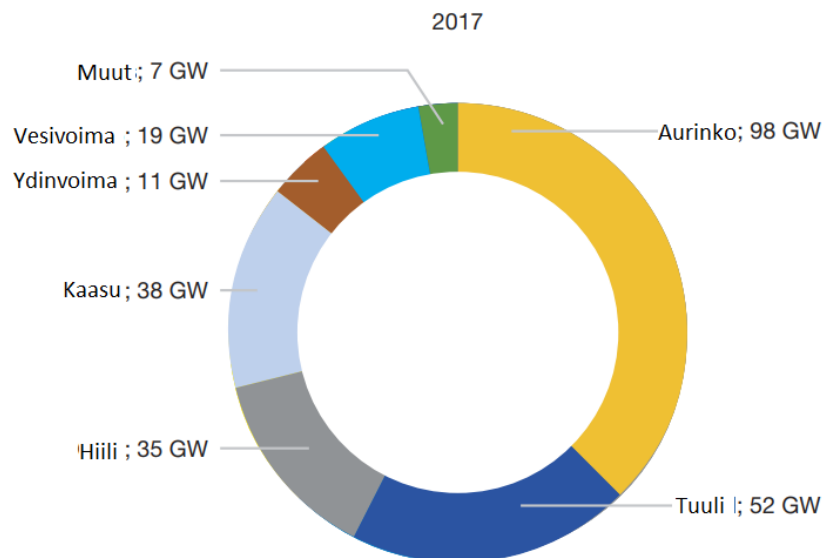
Opinnäytetyön tutkimusongelma oli, onko aurinkopaneelien lämpökamerakuvaukset tehokas tapa etsiä vikoja aurinkosähköjärjestelmästä. Tutkimuskysymyksiksi muodostuivat:

- Löytyykö lämpökamerakuvasta normaalia lämpimämpiä aurinkopaneeleita?
- Saadaanko kuvausten perusteella paikannettua huonommin tuottavat aurinkopaneelit?
- Onko tämän tyyppiset lämpökamerakuvaukset kannattavia tulevaisuudessa?

Opinnäytetyössä käytettävänä tutkimusmateriaalina toimi lämpökamerakuvaukset kahdesta kattoasenteisesta aurinkovoimalasta ja yhdestä maa-asenteisesta aurinkosähköpuistosta. Lisäksi aurinkovoimaloista ja puistosta oli saatavilla jännite- ja virtatietoja.

### 3 Aurinkosähkö

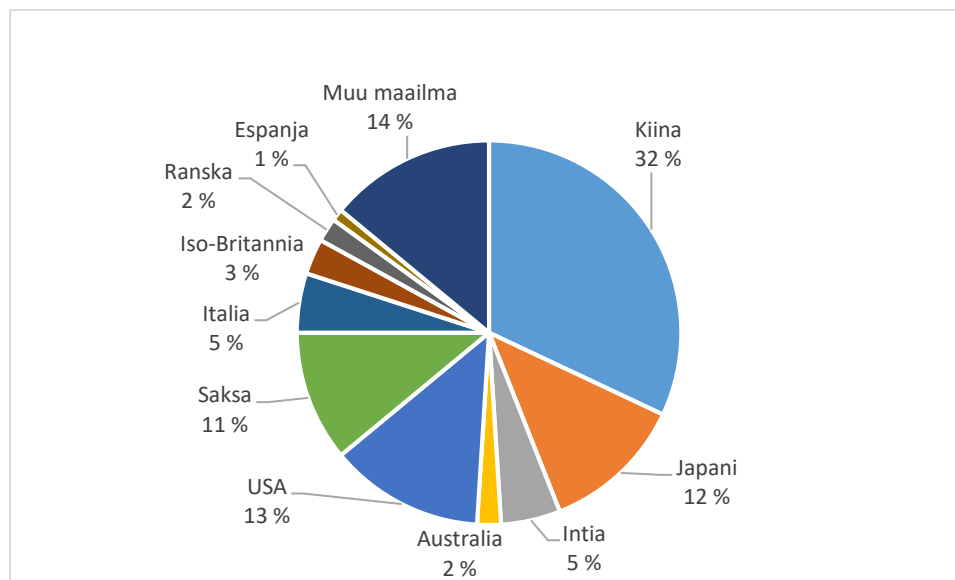
Aurinkosähkö on nopeinten kasvava sähköntuotantomuoto maailmassa. Uutta aurinkosähköä asennettiin maailmanlaajuisesti enemmän kuin fossiilisia polttoaineita ja ydinvoimaa käyttäviä voimalaitoksia yhteensä. Aurinkosähkö kasvoi myös melkein kaksi kertaa enemmän kuin toiseksi suurin uusiutuva energianmuoto, tuulivoima. Kuviossa 1 vuonna 2017 asennettujen eri energiantuotantomuotojen teho. (Global Market Outlook For Solar Power, 7-12.)



Kuvio 1 Eri energiantuotantomuotojen asennettu teho vuonna 2017 (Global Market Outlook For Solar Power, 7. Muokattu.)

Tällaista vertailua tehdessä täytyy kuitenkin ottaa huomioon aurinkovoiman pienempi huipunkäyttöaika verrattuna kilpaileviin energiantuotantomuotoihin. Suomessa fossiilisten energiantuotantomuotojen ja ydinvoiman huipunkäyttöaika on noin 8000 h/a ja tuulivoiman noin 2800 h/a. Aurinkosähköllä huipunkäyttöaika Suomessa jää alle 1000 h/a jo asennusvaiheessa. Lisäksi teho laskee noin 1 % vuodessa paneelin ikääntyessä. (Vakkilainen, E. Kivistö, A. Sähkön tuotannonvertailu. 9)

Kasvun suurimpia syitä on aurinkovoiman nopea kustannuskehitys. Kun teknologia kehittyy, aurinkovoiman hinta laskee nopeasti. Vaikka kasvu onkin nopeaa, on vielä pitkä matka täysin uusiutuvaan energiantuotantoon. Uusiutuvien energiamuotojen osuus koko tuotannosta vuonna 2017 oli 12,1 %. Vuonna 2017 aurinkosähköä verkkoon kytkettiin 99,1 GW, joka on yli 30 % kasvu vuoden 2016 verkkoon kytketyn aurinkosähkön määrään. Kasvu on suurinta Kiinassa, missä verkkoon kytkettiin 52,8 GW aurinkosähköä. Tämä on yli puolet koko maailmassa verkkoon kytketystä aurinkosähköstä. Euroopassa kasvu on huomattavasti pienempää. Vaikka vuonna 2017 asennettiin 30 % enemmän aurinkovoimaloita kuin vuonna 2016, asennettujen aurinkovoimaloiden määrä oli vain 9,2 GW. Kuviossa 2 maailman 10 suurinta aurinkosähkön tuottajaa vuonna 2017. (Global Market Outlook For Solar Power, 7-12.)



Kuvio 2 Maailman 10 suurinta aurinkosähkön tuottajaa vuonna 2017 (Global Market Outlook For Solar Power, 13. Muokattu)

### 3.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneeli muuttaa auringonsäteilyn sähköenergiaksi. Aurinkopaneelien toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön ja puolijohdemateriaalin ominaisuuksiin. Kaupallisissa aurinkopaneeleissa käytetään useasti yksi- tai monikiteisiä piikenoja. Näistä kahdesta, yksikiteisestä kennosta tehty aurinkopaneeli on tehokkaampi, mutta

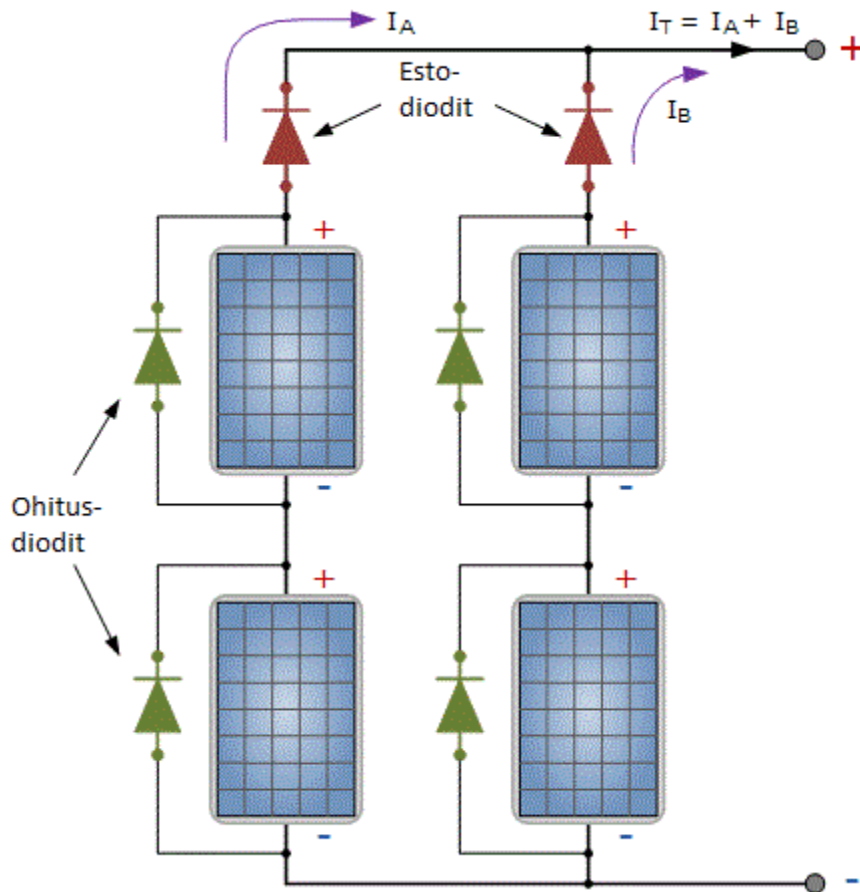
myös kalliimpi. Yksikiteisten aurinkopaneelien hyötysuhde on noin 15-20% ja käyttöikä yli 30 vuotta. Jokaisella kennotyypillä on omat etunsa ja ominaisuutensa, joiden mukaan niitä sovelletaan erilaisiin käyttötarkoituksiin. (Lehto, Liuksiala, Lähde, Olenius, Orrberg & Ylinen 2017, 9–13.)

Eniten aurinkopaneelivalmistajia löytyy Aasiasta. Eurooppalaiset ja Pohjois-Amerikkalaiset paneelivalmistajat ovat menettäneet suuren osan markkinaosuudesta viime vuosina. Arvioidessa aurinkopaneelin laatua täytyy selvittää paneelin tekniset erittelyt, laadunvarmistusstandardit, tuotanto testien tulokset sekä asianmukaiset kansainväliset tekniset- ja turvallisuusnormit. Aurinkopaneeleilla tulisi olla takuu vikaantumista varten ja takuehtoja tulisi verrata muiden valmistajien ehtoihin. (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 29.)

### 3.1.1 Aurinkopaneelin ohitus- ja estodiodit

Ohitusdiodin tehtävä aurinkopaneelissa on ohittaa solu tai soluketju, mikäli solut joutuvat varjoon, vioittuvat tai sisältävät oikosulun. Ohitusdiodeja käytetään myös kokonaisten paneelien ohittamiseen, mikäli niiden jännite laskee tarpeeksi alhaiseksi. Ohitusdiodit muodostavat toisen reitin sähkövirralle, joko yhdessä tai useammassa aurinkopaneelissa tai aurinkopaneelin solussa siten, että sähkövirta kulkee auringonvalolle alttiina olevien ehjiin solujen tai paneelien kautta. Tämä estää viallisten kohtien ylikuumentumisen ja parantaa tuotantoa.

Estodiodeja käytetään eri tavalla kuin ohitusdiodeja. Ohitusdiodit ovat kytketty aurinkopaneelissa rinnakkain, kun taas estodiodit ovat kytketty sarjaan, estämään virran kulkua väärään suuntaan. Sähkövirtaa voi kulkea väärään suuntaan, kun muut rinnakkaiset paneelit syöttävät sähkövirtaansa heikompiin varjossa oleviin paneeleihin tai soluihin. Estodiodit estävät myös mahdollisen akustonvarauksen purkautumista yöllä paneeleihin. Estodiodit ovat siis erilaisia kuin ohitusdiodit, vaikka useimmissa tapauksissa diodi on fyysiseltä rakenteeltaan samanlaisia, mutta ne asennetaan eri tavoin ja palvelevat eri tarkoitusta. Kuviossa 3 esto- ja ohitusdiodien paikat aurinkopaneeliketjussa. (Electronics Tutorials. Bypass Diodes in Solar Panels.)



Kuvio 3 Ohitus- ja estodiodit paneeliketjussa (Electronics Tutorials. Bypass Diodes in Solar Panels. Muokattu.)

### 3.1.2 Lämpötilan vaikutus aurinkopaneelin toimintaan

Aurinkopaneelin tuottama teho pienenee lämpötilan noustessa. Tämä johtuu aurinkopaneelin avoimenpiirin jännitteen alenemisestä. Vaikka lämpötilan noustessa aurinkopaneelin oikosulkuvirta nousee, jännitteen aleneman aiheuttama tehon alenema on suurempi kuin oikosulkuvirran nousu. Tämä johtaa aurinkopaneelin energiantuotannon pienenemiseen aurinkopaneelin lämmitessä. Koska lämpötila aurinkosähkövoimaloissa voi kohota helposti jopa 60 celsius asteeseen, aurinkosähköpaneelin sähköntuotanto teho voi laskea jopa 20% verrattuna 20 celsius asteen lämpötilaan. Vastaavasti talvella, alhaisilla lämpötiloilla teho voi nousta jopa 15% verrattuna 20 celsius asteen lämpötilaan. (Fricke, J. Essentials of Energy Technology. 223-

224.) Kuviossa 4 yhden paneelivalmistajan aurinkopaneelin prosentuaalinen tehon muutos lämpötilan mukaan. (Amerisolar Datasheet.)

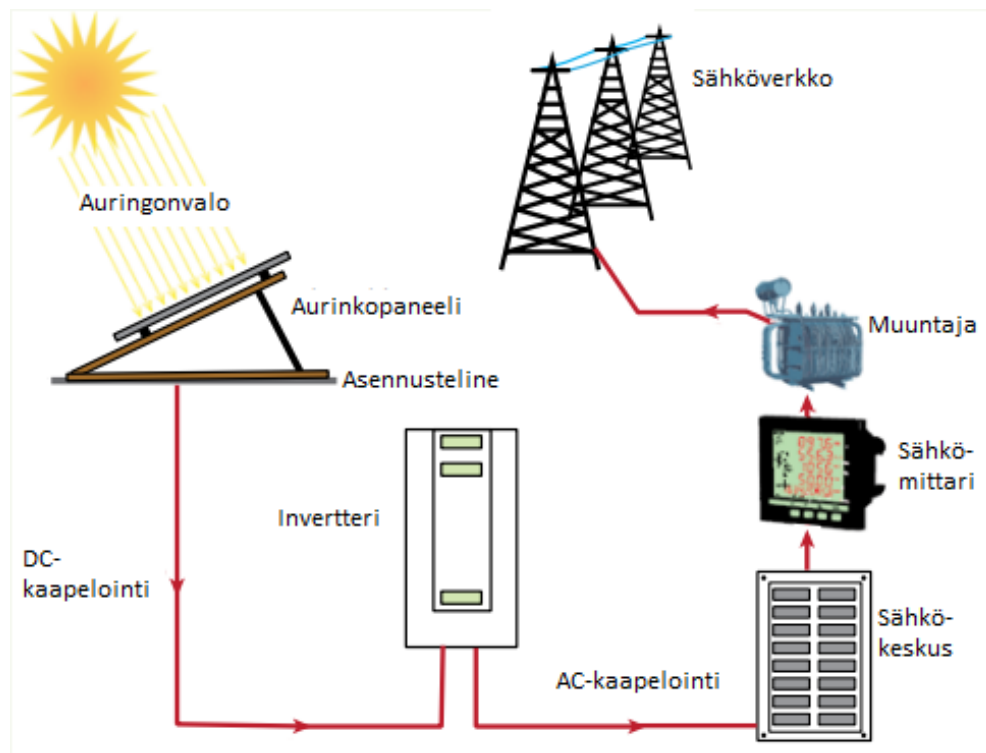
Tehon lämpötilakerroin $P_{max}$	-0,43 %/°C
Jännitteen lämpötilakerroin $V_{oc}$	-0,33 %/°C
Virran lämpötilakerroin $I_{sc}$	+0,056 %/°C

Kuvio 4 Lämpötilanvaikutus aurinkopaneelin tehoon (Amerisolar Datasheet.)

### 3.2 Aurinkosähkövoimalat

Aurinkosähkövoimalan tärkeimpiä komponentteja ovat aurinkopaneelit, vaihtosuuntaajat (invertterit) ja käyttöverkko. Pienempiä osia ovat jakoboksit, kaapelit, telineet sekä valvonta ja tiedonhankina järjestelmät. Kuviossa 5 aurinkosähkövoimalan rakenne. Aurinkosähkövoimalaa suunnitellessa tavoitteena on minimoida hinta ja pyrkiä mahdollisimman korkeaan tuotantoon. Mahdollisimman suureen tuotantoon päästään, kun aurinkopaneelikenttä suunnitellaan siten, että paneelien välit toisistaan ovat riittävän suuret, etteivät ne varjosta toisiaan.

On myös tärkeää jättää paneelikenttien väliin riittävästi tilaa mahdollisia huoltotoimenpiteitä varten. Paneelien suuntauksellakin on suuri merkitys aurinkovoimalan tuotantoon. Paneelit suunnataan aurinkosähkövoimalan sijainnin mukaisesti osoittamaan joko etelään tai pohjoiseen, siten että paneelit olisivat kohdistettuna mahdollisimman pitkään aurinkoa kohden. Asennuskulmalla on kuitenkin rajansa, sillä suurempi asennuskulma vaatii pidemmän rivivälin. Rivivälin kasvaessa kasvaa myös kaapeleiden pituudet, joka johtaa kaapeleiden tehohäviön kasvuun. (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 67-77.)



Kuvio 5 Aurinkosähkövoimalan rakenne (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 24.)

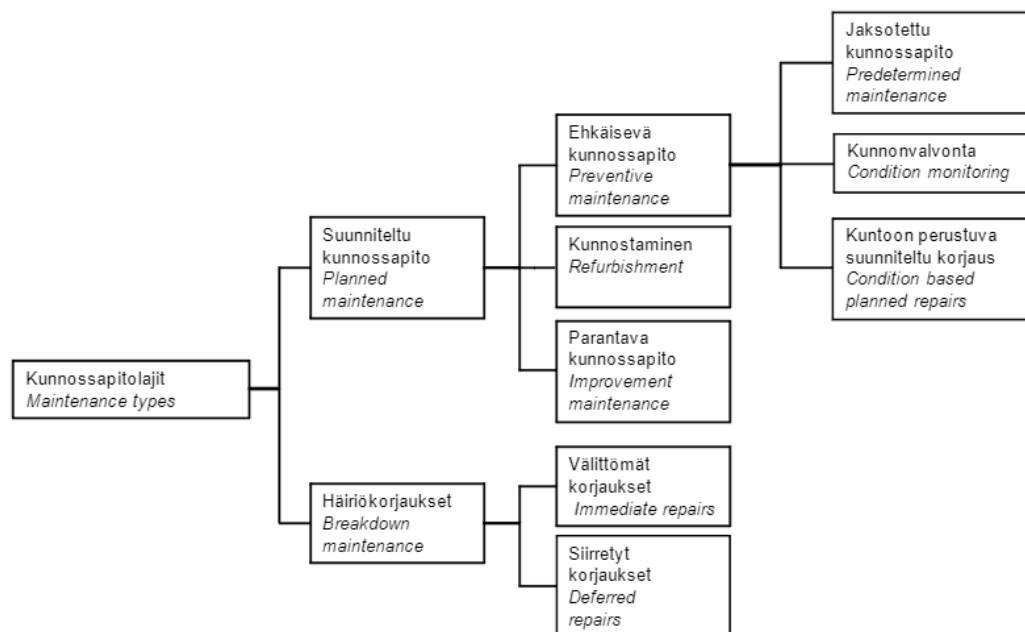
Paneeliketjujen pituus aurinkosähkövoimalassa on mitoitettava siten, että ketjun jännite ei nouse suuremmaksi kuin järjestelmän maksimijännite. Tätä maksimijännitteen rajaa ei saa missään nimessä ylittää. Paneeliketjun jännitettä ei myöskään saa laskea liian alhaiseksi, koska alhaisella jännitteellä tehohäviöt ovat suurempia. Jos paneeliketjunjännite laskee liian alhaiseksi, invertteri ei pysty tuottamaan sähköä sen maksimi hyötysuhteella. Huonoimmassa tapauksessa invertteri voi sammua. (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 67-77.)

## 4 Kunnossapito

Kunnossapidon päätarkoitus on pitää laitteet jatkuvasti käyttökunnossa. Kunnossapitoon kuuluu vikaantuneiden laitteiden ja komponenttien korjaaminen. Korjaaminen ei kuitenkaan ole kunnossapidon päätarkoitus. Kunnossapitoon ei kuulu ne toimenpiteet, joilla yritetään parantaa laitteen suorituskykyä. Kun puhutaan kunnonvalvonnasta, on tärkeää huomata, että yksi tärkeimmistä kunnonvalvonnan tehtävistä on osoittaa niitä toimenpiteitä, joilla prosessin tai laitteen suorituskykyä parannetaan yli

suunnitellun. Tämä toiminta on kunnossapidon tärkeä osa, vaikka varsinaisia toimenpiteitä ei kunnossapidon alueelle välttämättä lasketakaan. (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 25-26.)

Kunnossapito voidaan jakaa karkeasti kahteen kunnossapitolajiin. Kunnossapitolajit esitetty kuviossa 6 (PSK Standardisointi. PSK 7501. 32). Toinen kunnossapitolajeista on suunniteltu kunnossapito mikä sisältää ehkäisevän- ja parantavan kunnossapidon ja kunnostamisen. Toinen kunnossapitolaji on suunnittelematon kunnossapito ja se sisältää välittömät korjaukset sekä siirretyt korjaukset. (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 95-98.)



Kuvio 6 Kunnossapitolajit PSK7501 mukaan (PSK Standardisointi.32)

#### 4.1 Aurinkovoimalan kunnossapito

Vaikka monesti aurinkovoimaloiden oletetaan olevan huoltovapaita, tämä ei yleensä pidä paikkaansa. Aurinkovoimalan huoltaminen on usein helpompaa ja halvempaa kuin kilpailevien energiamuotojen, kuten esimerkiksi tuulivoiman ja maakaasun. Au-



rinkovoiman suhteessa pieni tuotanto pakottaa kunnossapitokustannukset mahdollisimman pieniksi, pitääkseen toiminnan kaupallisesti kannattavana. Pienet kunnossapitokustannukset siis laskevat rahoitusriskiä ja näin lisäävät paljon haluttua sijoittajien kiinnostusta. Paneelin elinaikana on useita ongelmia, jotka voivat johtaa paneelin toimintahäiriöön tai optimaalisen tehokkuuden menettämiseen. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi paneelin halkeilu, värinhäviäminen ja paneelin likaantuminen. (Vella, H. Solar array maintenance: why are costs falling?.)

Tuotannon seuranta on hyvä työkalu järjestelmän ongelmien löytämiseksi. Säännöllinen tarkkailu on kannattava, jotta poikkeuksellisia trendimuutoksia voi havaita järjestelmästä. Mikäli tuotantoa seuraamalla löytyy poikkeuksia järjestelmästä ja tulee tarve tutkia paneelistoa perusteellisemmin, voidaan paneelistoa tarkastella aistinvaraisesti, mittauksilla ja lämpökamerakuvauksin. Aistinvaraisesti on havaittavissa poikkeukselliset väritykset paneelissa, minkä jälkeen paneeli voidaan mitata ja todeta sen toimivuus. Lämpökamerakuvasta tällaiset vikakohdat ovat löydettävissä helposti. Mittaamalla avoimen piirin jännite, oikosulkuvirta ja eristysresistanssi voidaan etsiä mahdollista vikaa tarkemmin. Suurimmat huoltotoimenpiteet joudutaan tekemään noin 15 vuoden päästä asennuksesta, jolloin invertteri joudutaan vaihtamaan tehoelektroniikan vanhenemisen syystä. Akustolliset järjestelmät vaativat myös omia huomioitansa. (Lehto, Liuksiala, Lähde, Olenius, Orrberg & Ylinen 2017, 114–115.)

## 4.2 Korjaava kunnossapito

Korjaavaa kunnossapitoa joudutaan tekemään silloin, kun jokin tärkeistä komponenteista vikaantuu. Korjaavan kunnossapidon tärkeimpiä asioita on siis vian löytäminen, nopea reagointi ja korjaus aika. Vaikka nopea reagointiaika olisi suositeltavaa tuotannon kannalta, nopean reagointiajan aiheuttamia kustannuksia pitäisi verrata vikatilanteen todennäköisyyteen. Suuri osa hyvin suunnitellun ja rakennetun aurinkovoimalan korjaavan kunnossapidon tehtävistä liittyy invertterin vikoihin. Riippuen invertterivian tyypistä, vian saattaa pystyä korjaamaan etänä. Tämä korjaustapa on ehdottomasti suositeltavin, mutta ei aina mahdollinen. Muita vikoja voi olla esimerkiksi kireät kaapelit, joiden liittimet ovat irronneet toisistaan, palaneet sulakkeet, salamasta tai muista luonnonilmiöistä aiheutuneiden vikojen korjaus tai telineen korjaus. Jotta nopeaan reagointiaikaan päästään, on tärkeää, että varastosta löytyy varaosia

korjausta varten. Koska varaosat ja niiden säilytys maksaa, niiden osto täytyy olla perusteltua niiden tuomalla hyödyllä aurinkovoimalan tuotannon maksimoinnissa. Varastossa olisi hyvä olla telineen jalvoja, jakobokseja, sulakkeita, aurinkopaneeleita ja inverttereitä. (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 129.)

### 4.3 Ehkäisevä kunnossapito

Aurinkovoimalan ehkäisevän kunnossapidon huoltomäärä määräytyy siitä, minkälaista tekniikkaa aurinkovoimalassa käytetään, aurinkovoimalan ympäristöstä, järjestelmän takuu-ehdoista ja vuodenaikojen vaihtelusta. Ajoitettu huolto suoritetaan yleensä valmistajan suositusten mukaisesti ja komponenttien takuu-ehdojen mukaisesti. Aurinkovoimalan ennakoivaan kunnossapitoon kuuluu paneelien puhdistus, paneelien liittimien tarkistus, jakoboksien tarkistus, paneelien lämpökamerakuvaus, inverttereiden tarkistus ja telineen kunnontarkistus. Vaikka ennakoivan kunnossapidon tarkoitus on maksimoida aurinkovoimalan tuotanto ja käyttöikä, ei sen kustannukset saa nousta liian suuriksi. Tarkoitus on siis löytää oikea suhde ennakoivan kunnossapidon aiheuttamat lisäkustannusten ja kunnossapidosta saatavan tuotannon maksimoinnin välillä. (International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. 126-128.)

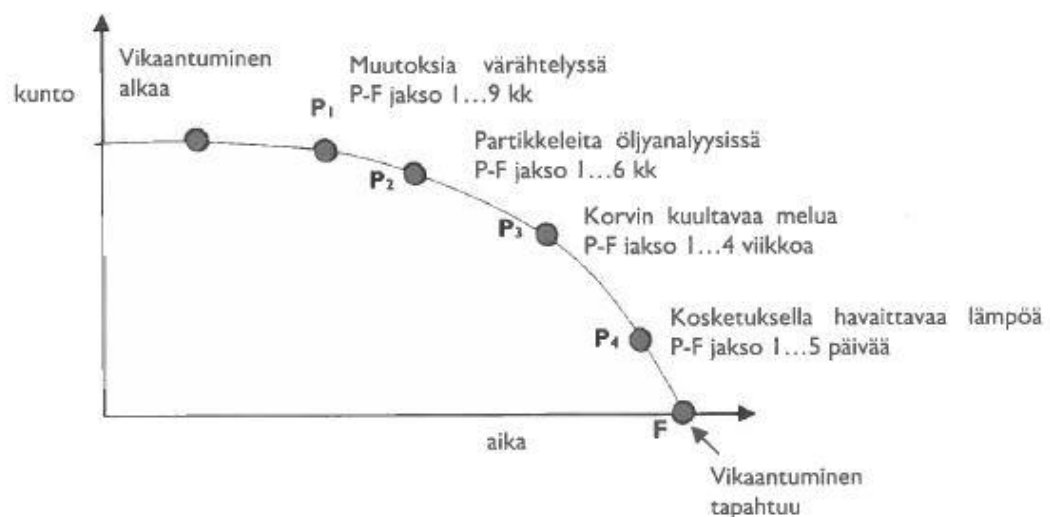
### 4.4 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnalla selvitetään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan kohteen vikojen kehittyminen huolto- ja korjausajankohdan päättämiseksi. Kunnonvalvonnalla saadaan aikaan lähtötiedot ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon suunnitteluun. Kunnonvalvonnan tavoitteena on se, että havaintojen perusteella ryhdytään toimenpiteisiin ja sitä kautta parannetaan koko kunnossapidon toimintaa. (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 99-101.)

Laitteiden vikaantuvat komponentit ja vikaantumismekanismit määrittävät kunnonvalvontatekniikan, menetelmät ja valvottavat suureet mitä kunnonvalvonnassa hyödynnetään. Vikaantumisnopeudet määrittävät millä aikavälillä valvontaa tulee to-

teuttaa. Kokonaisvaltainen kunnonvalvonta vaatii sen, että laitteita valvotaan monella eri tavalla. Merkittäviä valvontatekniikoita ovat esimerkiksi visuaaliset tarkastukset ja lämpökamerakuvaukset. (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 162.)

Kuviossa 7 P-F-käyrä, jota käytetään kunnossapidon suunnittelussa. Siitä voidaan havaita missä vikaantuminen alkaa ja milloin sen voi havaita erilaisilla menetelmillä. P-F-jakson pituus vaihtelee erilaisilla kunnonvalvonnan menetelmillä ja tekniikoilla. Optimaalisessa tilanteessa käyrän muoto tunnetaan kaikkien laitteiden ja vikamuotojen osalta ja sopiva valvontamenetelmä valitaan sen pohjalta. Tämä antaa riittävästi aikaa huollon tai korjauksen suunnitteluun havainnon ja vikaantumisen välillä. (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 140-141.)



Kuvio 7 P-F-käyrä (Mikkonen, H. Kuntoon perustuva kunnossapito. 141.)

#### 4.5 Lämpökamerakuvaukset

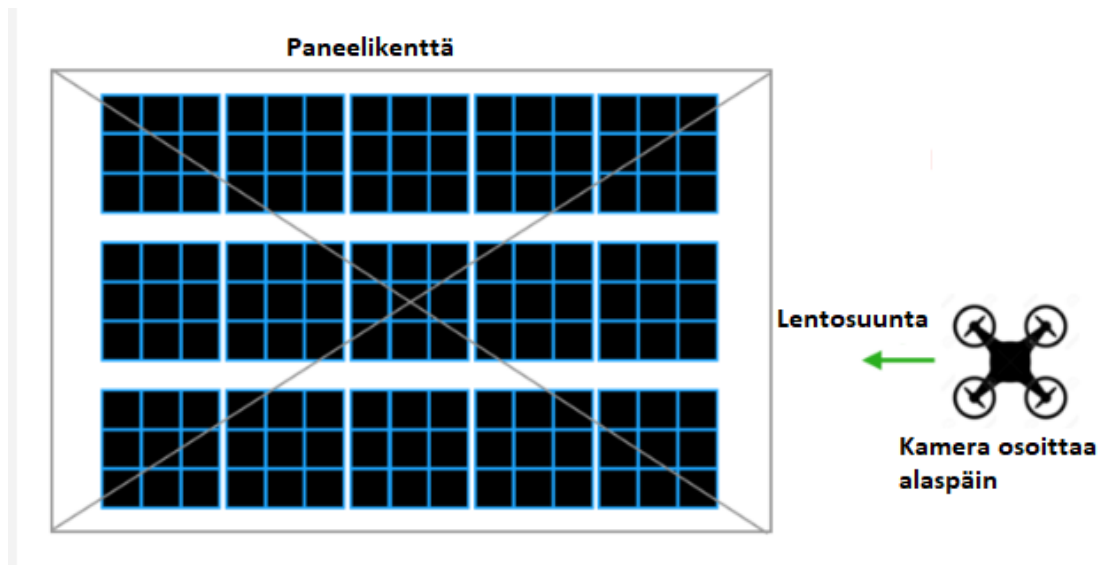
Lämpökamerakuvausten tavoitteena on tutkia aurinkopaneeleissa esiintyviä lämpötilanvaihteluita rakennetusta aurinkosähkövoimalasta. Esiintyvät lämpötilanvaihtelut voivat merkitä paneelissa tai paneelistossa ongelmia. Ongelmia voivat olla esimerkiksi ohitusdiodin viat, joustoliitosten vauriot, estosuuntaiset kennot, huonot liitokset tai muut paikallisesti korkeampaa lämpöä aiheuttavat olosuhteet. Lämpökuvaustarkastuksia voidaan suorittaa käyttöönottoaiheessa tai kunnossapitotarkastuksissa.

Myös yksittäisiä paneeleja ja paneeliketjuja voidaan lämpökamerakuvata. (SFS-EN 62446-12016 Paneeliston tutkiminen lämpökameralla. 29-30.)

Lämpökuvauksen aikana aurinkovoimalan paneeliston tulisi olla vaihtosuuntaajan maksimitehopisteen toimintatilassa. Säteilyvoimakkuus paneeliston pinnassa kuvauksen aikana tulisi olla korkeampi kuin  $400 \text{ W/m}^2$ . Myös sääolosuhteet tulisi olla vakaat. Ihanneolosuhteissa kuvauksen aikana säteily on suhteellisen vakio ja voimakkuudeltaan suurempi kuin  $600 \text{ W/m}^2$ . Tällä varmistetaan riittävän suuri virta paneelistossa, mikä aiheuttaa havaittavan lämpötilaeron. Paneelin rakenteesta ja kiinnitysmenetelmästä voi päätellä, kummalta puolen paneelia saadaan selkeä lämpökuvaukseen. Jos paneelistoa tarkastellaan sen takaosasta, vähennetään paneelin lasipinnasta heijastuvan valon aiheuttamaa häiriötä. Tarkastellessa paneelia sen etuosasta, saadaan paneelin lasin lämmönjohtavuuden ansiosta parempi lämpökuvaukseen. Lämpökamerakuvausta tehtäessä suoraan paneeliston edessä, kamera tai sen käyttäjä eivät saa varjostaa tutkittavaa paneelia. Lämpökamerakuvausta tehtäessä täytyy huomioida estodiodit, liitäntäkotelot, sähköiset kytkennät tai muut paneelin kohdat, missä selkeä lämpötilaero voi aiheuttaa ongelmia ympäristössä tai paneelissa. (SFS-EN 62446-12016 Paneeliston tutkiminen lämpökameralla. 29-30.)

#### 4.5.1 Dronekuvaukset

Minikopteri eli drone on hyödyllinen väline aurinkosähkövoimalan kunnonvalvonnassa. Droneen liitetyllä lämpökameralla voi löytää aurinkovoimalan yleisimpiä vikoja kuten, viallisia paneeleita, irronneita johtimia ja vikoja asennustelineessä. Dronella voi myös paikantaa lisääntyvää kasvustoa paneelien välissä ja eroosiota telineiden alla. Dronen lentokorkeuden määrittää mitä se, mitä drone-kuvauksella halutaan saavuttaa. Jos halutaan luoda lämpökartta koko voimalasta lentokorkeus voi olla jopa 100-120 metriä kuvattavasta kohteesta. Tällainen kuvaus tehdään yleensä markkinointitarkoitukseen tai päältä pois olevien aurinkopaneelien tarkasteluun. Mikäli kuvauksella halutaan löytää paneeliketjujen tai yksittäisten paneelien vikoja, lentokorkeus voi vaihdella 60-70 metrin korkeudella kuvattavasta kohteesta. Yksittäisten paneelien solujen ja diodien vikoja tarkastellessa lentokorkeus täytyy olla vähemmän kuin 35 metriä kuvattavasta kohteesta. Dronen lentosuunta tulisi olla paneeliketjujen mukainen kuvion 8 mukaan.

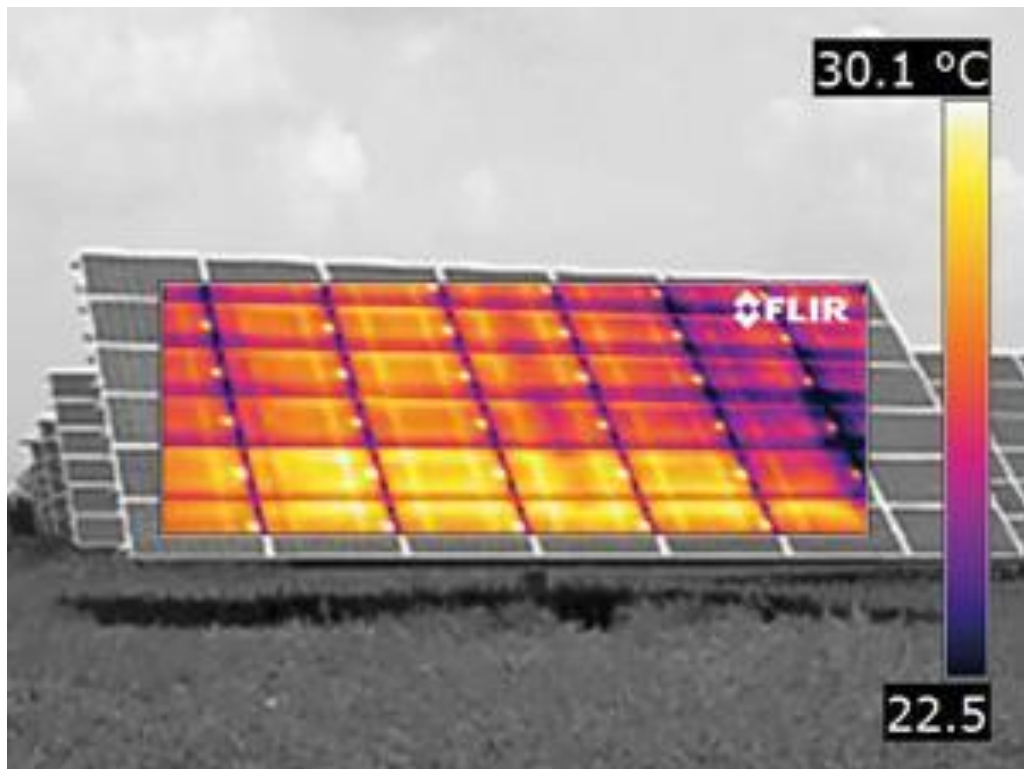


Kuvio 8 Dronen lentosuunta (Nikhil. How to Inspect Solar Farms with Drones. Muokattu)

Korkea säteilyn määrä kuvauksen aikana korostaa viallisten ja normaalien komponenttien väliset erot. Vaikka korkea säteilyn määrä onkin tärkeää kuvauksen aikana, se saattaa aiheuttaa häikäisyä paneelissa. Tämän takia paras kuvaus aika on aamulla ja iltapäivällä. Jos kuvataan järjestelmää missä on kiinteäkulma telineessä, tätä kulmaa ei saa täsmätä kameran jalustan kulman kanssa. (Nikhil. How to Inspect Solar Farms with Drones)

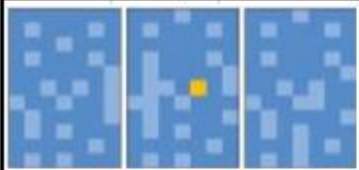





#### 4.5.2 Lämpökamerakuvan tarkastelu

Yksittäisen aurinkopaneelin lämpötilan tulisi olla melko yhtenäinen ilman suuria alueellisia lämpötilaeroja. Odotettavaa kuitenkin on, että paneelin muihin kohtiin verrattuna, lämpimin kohta löytyy kytkentäkotelon läheltä kuvion 9 mukaisesti. Tämä johtuu kytkentäkotelon ympäristön huonommasta lämmönjohtavuudesta. Lisäksi aurinkosähköpaneeleissa normaalisti on havaittavissa lämpömuutoksia paneelin reunoilla, merkintä- ja kiinnityskohdissa. (SFS-EN 62446-12016 Paneeliston tutkiminen lämpökameralla. 30.)



Kuvio 9 Aurinkopaneelien kytkentäkoteloiden aiheuttamat lämpimät pisteet (Ruud Heijnsman. Inspecting solar panels with thermal imaging.)

Kuumat kohdat paneelin muissa osissa voivat olla merkki sähköteknisistä ongelmista, joita voidaan arvioida kuvion 10 mukaan. Jos ohitusdiodit ovat muuta paneelia kuumempia, täytyy ensin tarkistaa mahdollisia syitä lämpenemiselle esimerkiksi varjot tai jätteet. Mikäli syy ei selviä, paneeli saattaa olla viallinen. Paneelin johtimien liitännäkohdat eivät normaalisti ole kuumempia kuin itse johdin. Jos liitännät ovat kuumempia kuin johdin, täytyy tarkastaa, näkyykö löysiä liitoksia tai merkkejä korroosiosta. (SFS-EN 62446-12016 Paneeliston tutkiminen lämpökameralla. 30.)

Aurinkopaneelit	Kuvaus	Mahdollinen syy
	Yhden solun ylikuumentuminen	Ei tiedossa
	Epätasainen lämpökuvio tai ylikuumentuminen tietyssä kohtaa	Rikkinäinen solu tai muu vika
	Selkeästi kuumempi kohta paneelin yhdessä solussa	Rikkinäinen solu
	Ylikuumentumiskuvio soluketjulle	Oikosulku soluketjussa
	Sekalainen kuvio, missä yksittäiset solut ovat satunnaisesti muita kuumempia	Paneeli ei toimi
	Paneeli ylikuumentuu verrattuna muihin paneeleihin	Paneeli ei toimi

Kuvio 10 Lämpökamerakuvauksissa ilmenevien ongelmakohtien mahdolliset syyt (Testo. Practical guide Solar Panel Thermography)

#### 4.6 Syitä vikaantumiselle

Aurinkovoimalat ovat ulos asennettavia sähköasennuksia ja tästä syystä altistuvat tuulelle, sateelle, lumikuormalle, jäätymiselle ja UV säteilylle. Nämä olosuhteet voivat johtaa vikaantumiseen ja nopeuttaa korroosiota. Myös ylikuumentuvat kohdat paneelissa voivat aiheuttaa vikaantumista. Erisävyinen tai viallinen solu voi johtaa siihen, että solu ei tuota energiaa vaan käyttää sitä. Tämä johtaa kyseisen solun lämpenemiseen. Vaikka ohitusdiodien tehtävä onkin ohittaa viallisia soluja, voivat nekin vikaantuessaan aiheuttaa paneelin lämpenemistä. Viallinen solu voi lämmitessään vai-

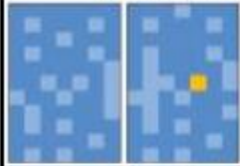

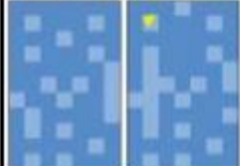



kuttaa negatiivisesti myös viereisten solujen energian tuotantoon. On myös mahdollista, että paneeli kytkeytyy oikosulkuun. Tämä saattaa johtua väärin liitetyistä paneelin johtimista tai johtimen kulumisesta. Lämmitessään viallinen paneeli voi aiheuttaa jopa palovaaran. (Testo. Practical guide Solar Panel Thermography)

## 5 Aurinkovoimaloiden lämpökamerakuvaukset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kuvata kolmen aurinkosähkövoimalan aurinkopaneelit ja selvittää löytyykö lämpökamerakuvasta mahdollisesti viallisia paneeleja. Lämpökamerakuvaus suoritettiin kohteille, missä oli asennettuna tietyn paneelivalmistajan paneelia, jota haluttiin testata. Kuvattavat kohteet olivat kattovoimala 1, kattovoimala 2 ja maa-asenteinen voimala. Kattovoimala 1 ja kattovoimala 2 ovat kauppojen katoille asennettuja kelluvia aurinkosähköjärjestelmiä. Näitä järjestelmiä ei siis kiinnitetä kattoon muuten kuin kivipainoilla.

Näin suurien aurinkovoimaloiden lämpökamerakuvaaminen käsikäyttöisellä lämpökameralla olisi vienyt paljon aikaa, joten kuvaukset suoritettiin droneen liitetyllä lämpökameralla, jota pystyi ohjaamaan lennon aikana kauko-ohjaimella. Dronella lennettiin aurinkovoimaloiden ylitse muodostaen aurinkopaneeleista lämpökartta. Lämpökartasta etsittiin normaalia lämpimämpiä aurinkopaneeleita, jotka saattoivat olla viallisia. Normaalia lämpimämmät aurinkopaneelit merkattiin aurinkovoimalan layoutkuvaan kuvion 11 vikaluokittelun mukaan. Teston practical guide solar ranel thermographyn vikaluokitteluun lisättiin tutkimusta varten vikaluokittelu. Näiden eri vikaluokkien perusteella myöhemmin etsittiin aurinkovoimaloiden tuotantotiedoista, kuinka paljon tuotanto muuttuu lämpimämmän ja mahdollisesti rikkinäisen paneelin johdosta.



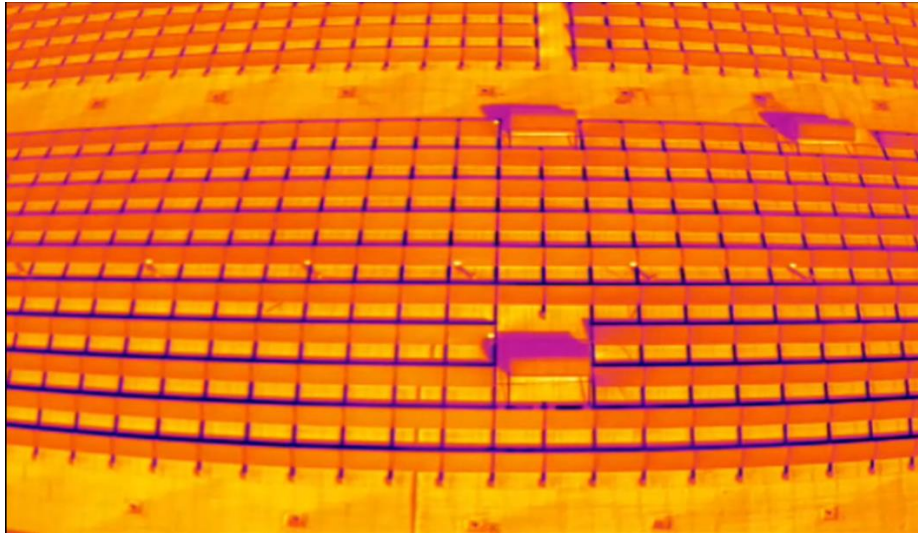
Aurinkopaneelit	Kuvaus	Mahdollinen syy	Luokka
	Yhden solun ylikuumeneminen	Ei tiedossa	1
	Epätasainen lämpökuvio tai ylikuumeneminen tietyssä kohtaa	Rikkinäinen solu tai muu vika	2
	Selkeästi kuumempi kohta paneelin yhdessä solussa	Rikkinäinen solu	3
	Ylikuumenemiskuvio soluketjulle	Oikosulku soluketjussa	4
	Sekalainen kuvio, missä yksittäiset solut ovat satunnaisesti muita kuumempia	Paneeli ei toimi	5
	Paneeli ylikuumenee verrattuna muihin paneeleihin	Paneeli ei toimi	6

Kuvio 11 Aurinkopaneelien vikaluokitus

## 5.1 Kattovoimala 1 ja kattovoimala 2

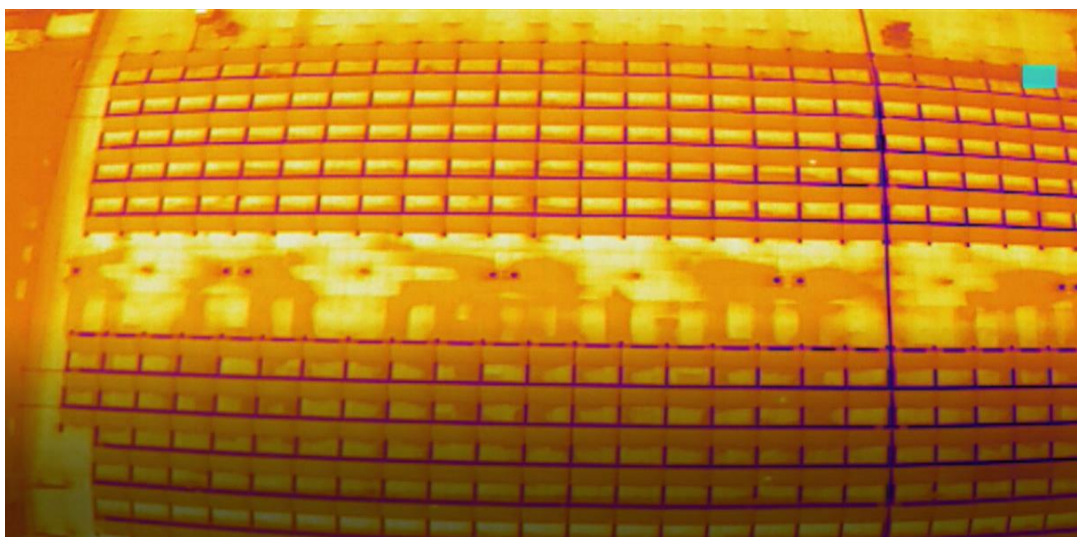
Kattovoimala 1 lämpökamerakuvaus tehtiin 13.9.2018 kello 13:00 jolloin ilman lämpötila oli 13,4 °C. Kokonaissäteilynvoimakkuus kattovoimala 1 lähellä sijaitsevan havaintoaseman mukaan kello 13:00 oli 364 W/m<sup>2</sup> (Ilmatieteen laitos). Tuulen nopeus vaihteli siten, että dronella lentäminen oli osittain haastavaa. Aurinkopaneelit saatiin kuitenkin kuvattua ja lämpökartta muodostettua. Kattovoimala 1 aurinkopaneeleissa oli havaittavissa enimmäkseen vikaluokan 1 vikaantumisia. Näiden paneelien yksittäinen solu kuumenee tuntemattomasta syystä. Kuviossa 12 lämpökameran ottama

kuva viallista aurinkopaneeleista. Paneelin viallisen solun lämpötilaero muihin paneelin soluihin verrattuna oli niin suuri, että se oli tunnettavissa myös kädellä.



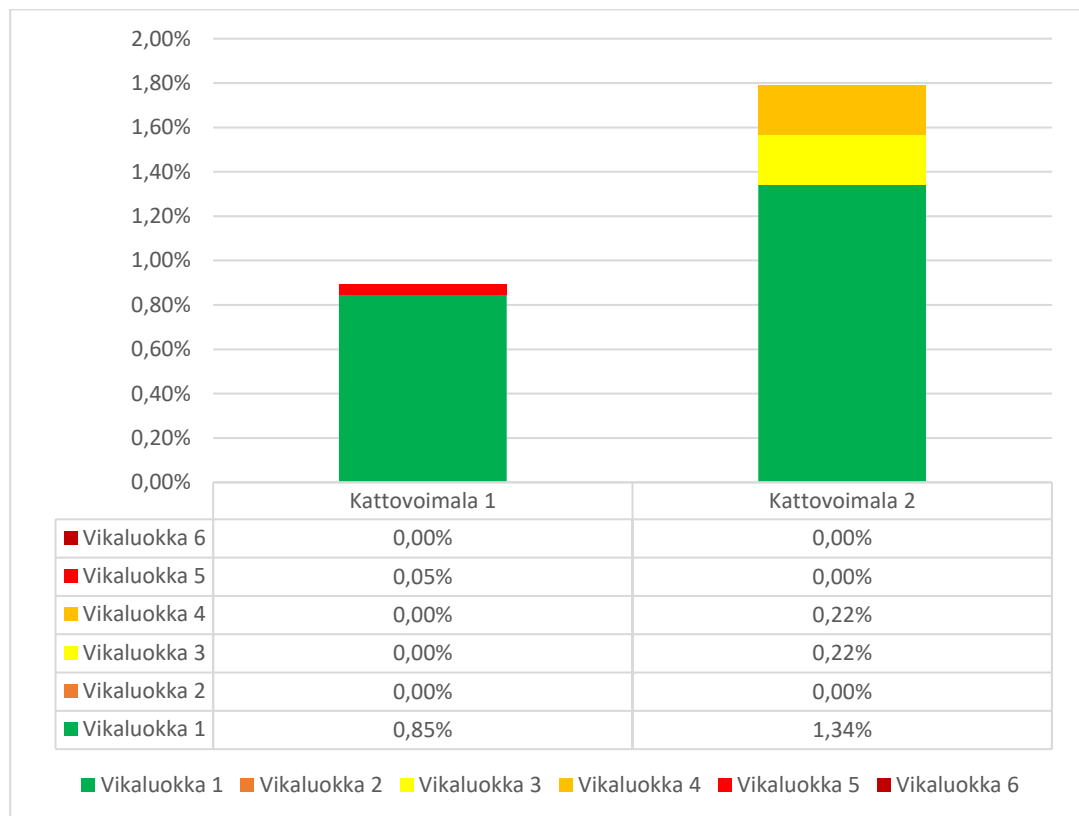
Kuvio 12 Kattovoimala 1 viallisia paneeleita

Kattovoimala 2 paneelit kuvattiin 2.10.2018 noin kello 13:00. Silloin ilman lämpötila oli 5,5°C ja auringon kokonaissäteily 180 W/m<sup>2</sup>. (Ilmatieteen laitos). Vaikka kokonaissäteilynvoimakkuus lokakuussa onkin lämpökamerakuvauksien suorituksen aikaista suositussäteilyä alhaisempi, löytyi myös näistäkin paneeleista lämpötilaeroja. Myös kattovoimala 2 paneelien yleisin vialuokitus paneeleilla oli 1. Kuviossa 13 kattovoimala 2 aurinkopaneeleista otettu lämpökamerakuva. Osissa paneeleista havaittavissa lämpimämpiä soluja. On myös mahdollista, että pieni säteily ei tuo kaikkia mahdollisia viallisia paneeleita esiin.



Kuvio 13 Kattovoimala 2 lämpökamerakuvatut aurinkopaneelit

Kuviossa 14 Kattovoimala 1 ja kattovoimala 2 viallisten aurinkopaneelien prosentuaalinen osuus aurinkopaneelien kokonaismäärästä. Kattovoimala 1 asennetuista aurinkopaneeleista yhteensä 0,89 % esiintyi erilaisia vikoja. Kattovoimala 2 asennetuista paneeleista yhteensä 1,79 % esiintyi vikoja. Vaikka kattovoimala 2 viallisia paneeleita olikin vähemmän kuin kattovoimala 1, kattovoimala 2 vikaantuneiden paneelien prosentuaalinen osuus on suurempi pienemmän paneelien kokonaismäärän johdosta.

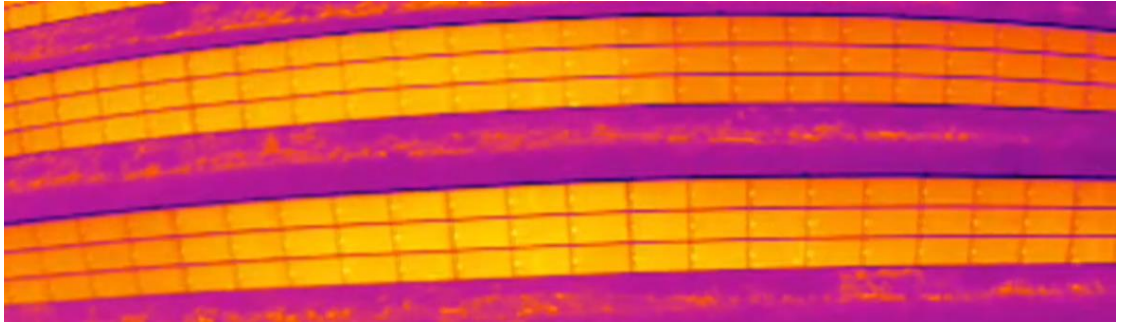


Kuvio 14 Viallisten aurinkopaneelien prosentuaalinen osuus aurinkopaneelien kokonaismäärästä

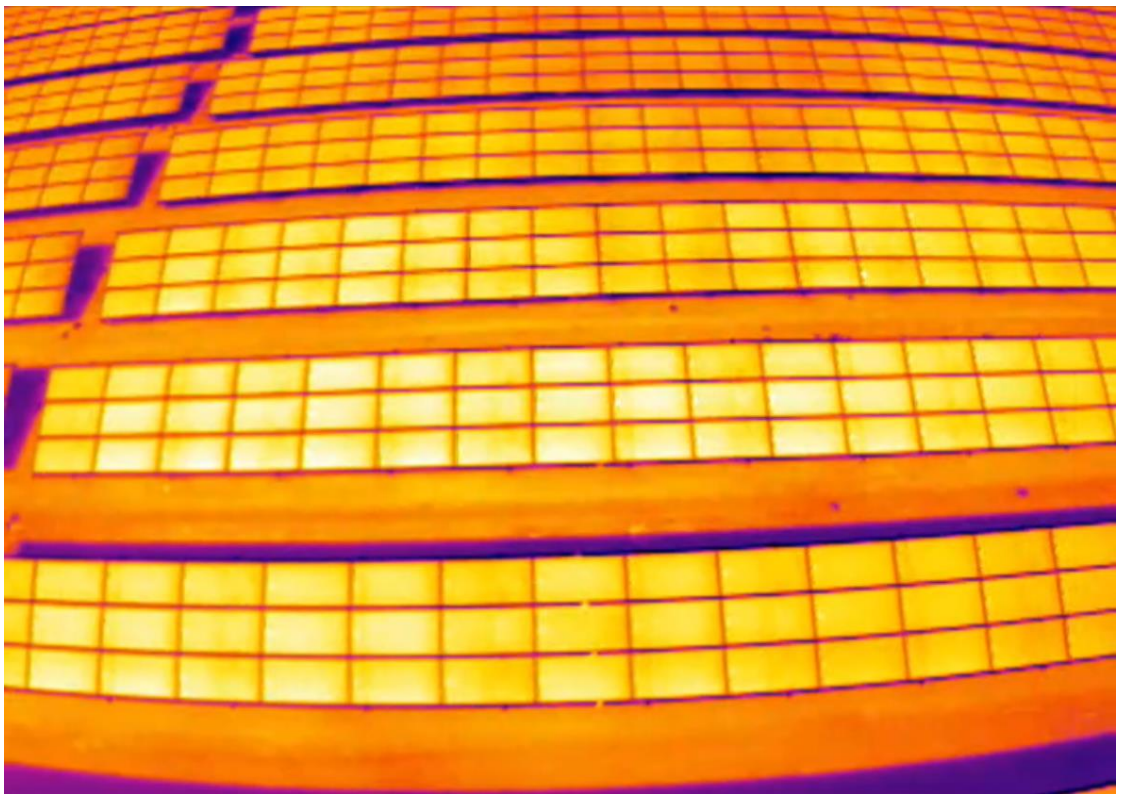
## 5.2 Maa-asenteinen voimala

Maa-asenteise sijaitsevat aurinkopaneelit kuvattiin 6.7.2018 kello 13:00. Silloin säteilyn voimakkuuden keskiarvo oli 864,3 W/m<sup>2</sup> ja paneelinlämpötilan keskiarvo 42,43 °C Kentällä on neljän eri paneelivalmistajan paneeleita, joita täytyi arvioida erikseen ja verrata toisiinsa. Suuren säteilyn ansiosta paneeleista erottui hyvin vikakohtat. Suuri

säteily aiheutti myös haasteita vianetsinnässä. Kuviossa 15 havaittavat lämpimät pisteet eivät ole vikakohtia vain aurinkopaneelien kytkentärasioita. Suuri säteily aiheutti paljon heijastusta, joka johti erittäin huonoon lämpökamerakuvaan, josta ei vikakohtia voitu paikantaa. Kuviossa 16 heijastuksesta kärsinyt lämpökamerakuva.



Kuvio 15 Lämpökamerakuvasta on havaittavissa aurinkopaneelin kytkentärasia

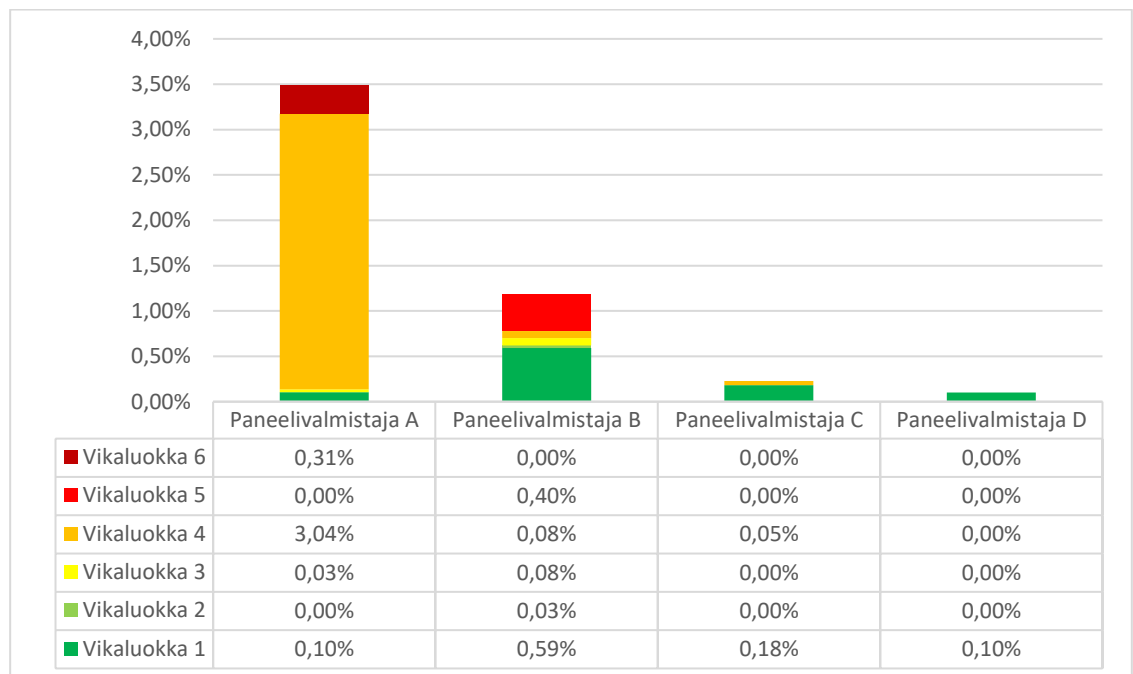


Kuvio 16 Suuren säteilyn aiheuttamaa heijastusta

Kun suuren säteilyn aiheuttaman haasteet lämpökamerakuvauksessa tiedostettiin, päästiin etsimään oikeita vikakohtia järjestelmästä. Paneelivalmistaja A osoittautui valmistajaksi, jonka paneeleista löytyi eniten vikakohtia. Eniten näistä paneeleista

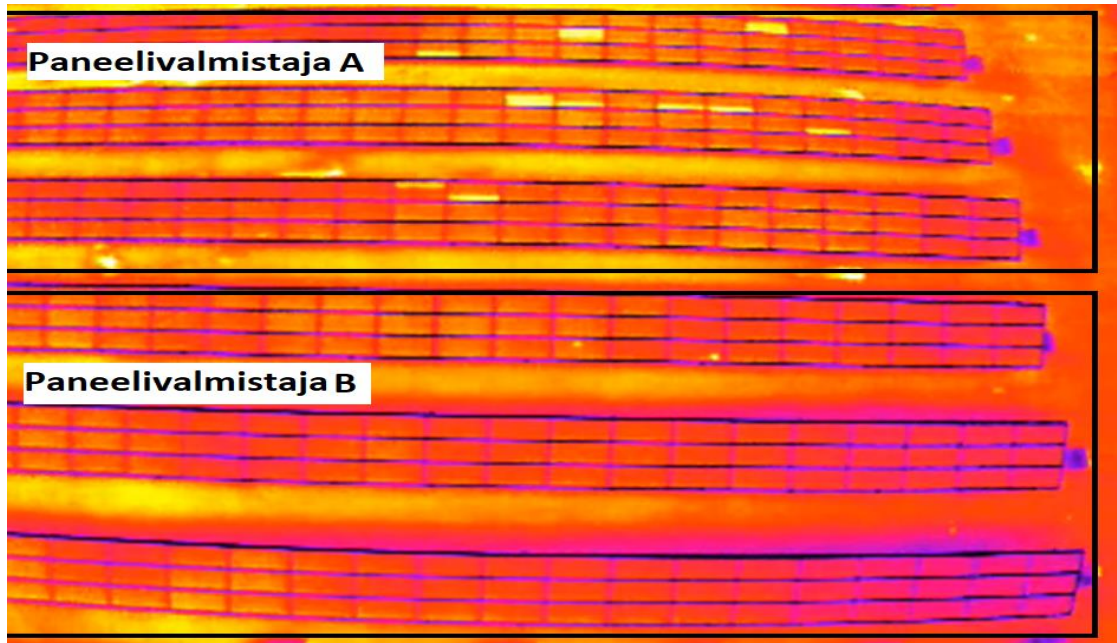


löytyi vikaluokkaa 4, jossa aurinkopaneelin soluketjussa on oikosulku ja soluketju ylikuumene. Myös vikaluokkaa 6, jossa koko paneeli on kuumempi kuin muut paneelit, löytyi yhdeksästä paneelista. Kuviossa 17 eri paneelivalmistajien viallisten paneelien prosentuaalinen osuus paneelien kokonaismäärään verrattuna.



Kuvio 17 Maa-asenteisen voimalan viallisten paneelien prosentuaalinen osuus

Kuviosta 18 on havaittavissa, kun paneelivalmistajan B aurinkopaneelit vaihtuvat paneelivalmistajan A paneeleihin, viallisten paneelien määrä kasvaa. Paneelivalmistaja A:lla on huomattavasti enemmän viallisia paneeleita, kun paneelivalmistaja B:llä. Molemmat aurinkopaneelit ovat asennettu samalla tavalla betonipainojen päällä olevaan telineeseen, eli asennustavan ei pitäisi vaikuttaa paneelien vikaantumiseen. Koska paneelivalmistajan C:n ja D:n aurinkopaneeleissa ei ollut havaittavissa suuria lämpötilaeroja, niin tuotannon alenemaa lähdettiin tarkastelemaan vain paneelivalmistajien A:n ja B:n paneeleista.



Kuvio 18 Eri paneelivalmistajien aurinkopaneelien lämpökamerakuvan vertailu

## 6 Tuotannon analyysi

### 6.1 Kattovoimala 1 ja Kattovoimala 2

Kattovoimala 1 ja Kattovoimala 2 aurinkovoimaloiden tuotannon alenemaa ei pysty laskemaan, koska näiden voimaloiden inverttereistä ei ole saatavilla paneeliketjukohtaista virtatietoa. Lisäksi kohteissa paneeliketjujen pituus vaihtelee. Tämä johtaa paneeliketjujen tehoeroihin niin viallista paneeliketjua ei voi verrata toiseen paneeliketjuun. Mikäli kohteiden viallisia paneeleita halutaan tutkia tarkemmin, täytyy se tehdä paikan päällä jännite- ja virtamittauksin. Kuvauksien perusteella tähän ei ole kuitenkaan tarvetta sillä mitään hälyttävää ei kuvauksista löytynyt. Yksittäisten solujen lämpeneminen ei välttämättä johda suureen tuotannon alenemaan. Jos tulevaisuudessa voimalat alkavat tuottamaan huomattavasti toivottua vähemmän, kannattaa vianetsintä aloittaa nyt tehtyjen lämpökamerakuvauksien perusteella löytyneistä viallisista paneeleista.

### 6.2 Maa-asenteinen voimala

Maa-asenteisella voimalalla on 4 invertteriä, joihin kaikki kentän aurinkopaneelit ovat kytketty jakoboksin kautta. Aurinkopaneelien ja invertterin välissä on jakoboksi,

minne yksittäiset aurinkopaneeliketjut kytketään. Tuotannon alenemaa lähdettiin tutkimaan paneeliketjukohtaisesti, koska paneelikohtaista virtatietoa ei järjestelmästä pysty lukemaan. Lämpökartasta valittiin paneeliketjut, missä oli havaittavissa vikaluokkia 4-6. Näiden paneeliketjujen virta ja jännitetiedot haettiin tuotannon seuranta portaalista. Paneeliketjun virtaa verrattiin muihin samassa jakoboksissa olevien paneeliketjujen virtaan. Joissain jakobokseissa oli kahta eri paneelivalmistajaa. Näiden virtatietoja täytyi myös tarkastella erikseen.

Esimerkkinä paneeliketju JB27ST9, jossa on maa-asenteisenvoimalan suurin virta-alenema. Lyhenne JB27ST9 tarkoittaa 27. jakoboksin 9. paneeliketju. Jakoboksin 27 paneeliketjujen virtojen keskiarvo oli 8,77 ampeeria. Paneeliketjun 9 virta oli 6,9 ampeeria, eli 1,9 ampeeria vähemmän kuin paneeliketjujen keskiarvo. Tämä tarkoittaa 27% virta-alenemaa kyseisessä paneeliketjussa. Kyseisessä paneeliketjussa oli yksi vikaluokan 6 paneeli ja kolme vikaluokan 4 paneelia. Kaikki paneeliketjun paneelit ovat paneelivalmistajan A:n paneeleita. Kuviossa 19 paneeliketjujen hetkelliset virrat paneelivalmistajien ja vikaluokkien mukaan. Myös paneelivalmistajan B paneeleissa oli havaittavissa virta-alenemaa. Esimerkiksi paneeliketjussa JB20ST16 havaittavissa 14% alhaisempi virta kuin muiden saman jakoboksin virtojen keskiarvo.

Maa-asenteinen voimala									
Paneelivalmistaja A					Paneelivalmistaja B				
Vikaluokka	Paneeliketju	Virta	Ero		Vikaluokka	Paneeliketju	Virta	Ero	
6	JB22ST11	7.49	0.244	3 %	5	JB19ST17	8.58	0.322	4 %
	JB22ST21	7.71	0.464	6 %		JB20ST15	8.01	0.063	1 %
	JB22ST24	6.67	-0.58	-9 %		JB20ST16	6.97	-0.977	-14 %
	JB23ST22	8.29	0.511	6 %		JB21ST2	8.59	0.001	0 %
	JB27ST9	6.9	-1.87	-27 %		JB21ST3	8.71	0.121	1 %
	JB27ST12	7.95	-0.82	-10 %		JB21ST5	8.34	-0.249	-3 %
	JB28ST8	9.04	0.113	1 %		JB21ST15	8.77	0.181	2 %
	JB30ST10	9.2	0.564	6 %		JB21ST17	8.19	-0.399	-5 %
	JB30ST22	7.97	-0.67	-8 %		JB22ST5	8.89	0.143	2 %
4	JB22ST6	8.33	0.551	7 %		JB23ST2	8.55	-0.027	0 %
	JB22ST12	6.92	-0.86	-12 %		JB23ST3	8.64	0.063	1 %
	JB27ST8	8.28	-0.49	-6 %		JB23ST15	8.74	0.163	2 %
	JB27ST9	6.9	-1.87	-27 %		JB24ST4	8.83	-0.001	0 %
	JB28ST20	9.03	0.103	1 %					
	JB30ST6	8.02	-0.62	-8 %					
	JB30ST9	9.23	0.594	6 %					
	JB30ST18	7.98	-0.66	-8 %					

Kuvio 19 Viallisten aurinkopaneelien vaikutus paneeliketjun virtaan

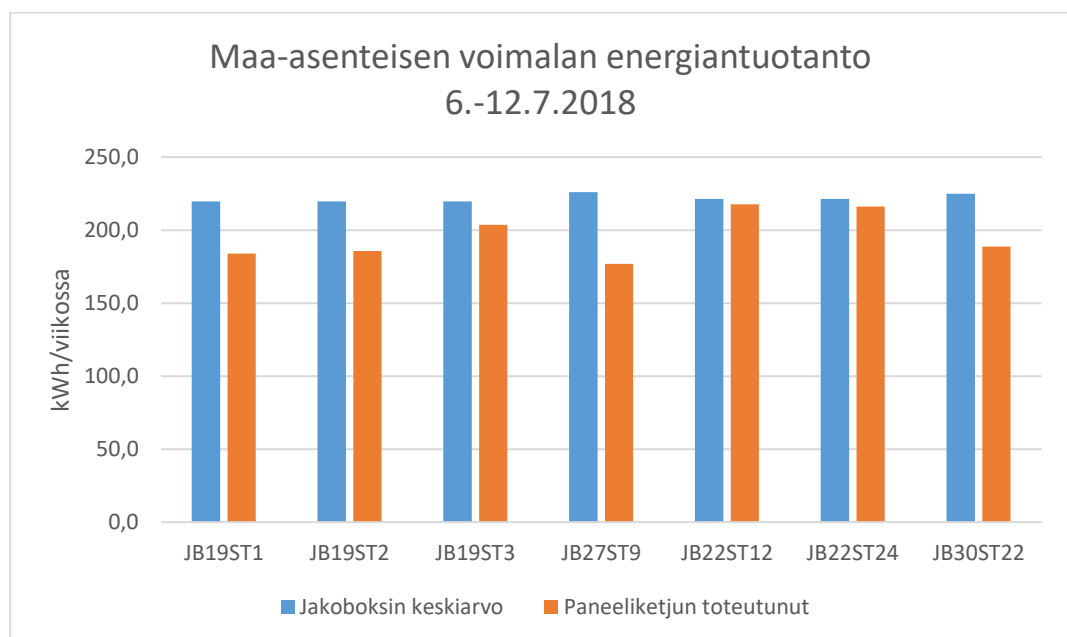
Hetkellisten virtatietojen perusteella valittiin paneeliketjut, joita tutkittiin tarkemmin. Paneeliketjujen virtaa seurattiin viikon ajan. Näiden virtatietojen perusteella voitiin laskea keskiarvo jakoboksin paneeliketjujen sähköenergiämäärästä ja verrata tätä viallisen paneeliketjun sähköenergiämäärään. Laskenta tehtiin lämpökamerakuvausten suorituspäivästä viikko eteenpäin 6.-12.7.2018. Virta tietoja oli saatavilla tunnin tarkkuudella. Kun tarkastelu aika oli pidempi, huomattiin ettei kaikissa aikaisemmin vialliseksi todetuissa paneeliketjuissa ollut suurta sähköenergian alenemaa muihin paneeliketjuihin verrattuna. Suurin sähköenergian alenema löytyi JB27ST9, missä oli myös suurin virran alenema kuvausten aikana. Paneeliketjun tuotannon aleneman laskelmat avattuna alla. Kuviossa 20 heikoimpien paneeliketjujen energiamäärä verrattuna jakoboksin keskiarvoon.

$$\text{Jakoboksin 27 keskiarvo tuotanto} = I_{Ka} * V * h = 226 \text{ kWh/viikko}$$

$$\text{Tuotanto (JB27ST9)} = I_{ST9} * V * h = 177 \text{ kWh/viikko}$$

$$\begin{aligned} \text{Tuotannon alenema (JB27ST9)} &= 226 \text{ kWh/viikko} - 177 \text{ kWh/viikko} \\ &= 49 \text{ kWh/viikko} \end{aligned}$$

$$\text{Tuotannon alenema \% (JB27ST9)} = \frac{49 \text{ kWh/viikko}}{226 \text{ kWh/viikko}} = 22\%$$



Kuvio 20 Maa-asenteisen voimalan heikoimmat paneeliketjut jakoboksin keskiarvoon verrattuna



## 7 Johtopäätökset

Vaikka kattovoimala 1 ja kattovoimala 2 aurinkovoimaloita ei tässä tutkimuksessa päästy tutkimaan tarkemmin, ei niiden lämpökamarakuvaus ollut täysin turha. Kuvausten perusteella saatiin hyvä kuva paneeliston nykytilasta ja sitä voidaan verrata tulevaisuudessa, mikäli tähän tulee tarve. Lisäksi jos aurinkovoimaloista olisi löytynyt kokonaisia paneeleita tai paneeliketjuja pimeänä, niin toimenpiteitä olisi voitu tehdä ilman tarkempaa analyysia tuotannosta. Tosiasia kuitenkin on, ettei ilman paneeliketjukohtaista tuotannon seuranta voida tehdä tarkkoja analyyskejä yksittäisten paneelien vaikutuksesta paneeliketjujen tuotantoon. Tarkastelussa olisi myös tärkeä olla selkeät kuvat paneelien kytkennöistä ja paneeliketjujen numeroinneista. Ilman tarkkaa tietoa mihin paneeliketjuun viallinen aurinkopaneeli kuuluu, on mahdotonta tarkastella sen jännitettä ja virtaa portaalin kautta. Tällaisissa kohteissa olisi tarpeellista käydä paikan päällä mittamassa paneelin jännite ja virta.

Maa-asenteisen voimalan lämpökamarakuvaus osoittautui hyödylliseksi. Huomattavan tuotannon aleneman aiheuttavien paneelien löytämisen lisäksi, kuvauksilla selvisi eri paneelivalmistajien heikkouksia. Paneelivalmistaja A ja B osoittautui selvästi heikommaksi kuin paneelivalmistajat C ja D. Myös paneelivalmistajien A ja B paneelien viat olivat erilaisia. Näitä havaintoja voidaan käyttää hyväksi seuraavia aurinkovoimaloita rakentaessa ja niihin paneeleita tilatessa.

Tärkein havainto kuitenkin oli tuotannon menetys viallisissa paneeliketjuissa. Paneeliketjujen ollessa 21 paneelin pituisia ja yhden paneelin teho on 270W, vuotuinen energian tuotanto ehjällä paneeliketjulla olisi 4619,5kWh. Tässä oletuksena 850 tunnin huipunkäyttöaika. Tällä tuotannolla ja sähkön hinnalla 0,05 €/kWh, paneeliketju JB27ST9 sähköntuotannosta saatavat tuotot vähenevät 52,3€/vuodessa.

$$Tuotanto = 21 * 0,27kW * 850h = 4619,5 kWh/a$$

$$Tuotton menetys (JB27ST9) = 4619,5kWh/a * 22\% * 0,05 \text{ €/kWh} = 52,3 \text{ €/a}$$

Kuviossa 21 Maa-asenteisen voimalan viallisista aurinkopaneeleista johtuvat suurimmat tuotannon menetykset. Mikäli viallisen paneelin tuotanto heikkenee muita paneeleita nopeammin, tuotannon menetys kasvaa vielä suuremmaksi vuosien aikana.

Maa-asenteisen voimalan tuotannon menetys			
Paneeliketju	Energia vuodessa	Menetys kWh	€ jos 0,05€/kWh
JB19ST1	4819.5	785.2	39.26
JB19ST2	4819.5	744.4	37.22
JB19ST3	4819.5	349.0	17.45
JB27ST9	4819.5	1046.9	52.35
JB22ST12	4819.5	85.3	4.27
JB22ST24	4819.5	114.8	5.74
JB30ST22	4819.5	774.5	38.72

Kuvio 21 Maa-asenteisen voimalan suurimmat tuotannon menetykset

Paneelivalmistajan A:n paneeleissa vikaluokka 4 oli yleisin vikaluokka. Vaikka lämpökamerakuvassa kokonaisen soluketjun lämpeneminen voi vaikuttaa merkityksellisesti, ei vikaluokan 4 paneeleissa ollut havaittavissa suurta tuotannon menetystä. Tämä luultavasti johtuu paneelien sisäisistä ohitusdiodeista, jotka ohittavat oikosulussa olevan soluketjun. Seuraavassa lämpökamerakuvauksessa kannattaa seurata vian kehittymistä vikaluokan 4 paneeleissa. Jos ylikuumenevat solut vioittavat viereisiä soluja, on mahdollista, että vikaluokan 4 paneelit muuttuvat ajan myötä vikaluokan 6 paneeleiksi. Tällöin tarvitaan huoltotoimenpiteet, sillä suurimman tuotannon aleneman aiheutti juuri nämä vikaluokan 6 aurinkopaneelit.

Tällä hetkellä vikaluokan 6 paneelit kannattaisi vaihtaa, mikäli takuu on vielä voimassa. Näin uudessa järjestelmässä nämä paneelit tulevat aiheuttamaan vaihtokustannuksia suuremmat tuotannon aleneman kustannukset.

Tulevaisuudessa samanlaisia lämpökamerakuvauksia kannattaa tehdä, jos tuotannon seurannasta löytyy huomattavasti keskiarvoa huonompia paneeliketjuja. Voimaloiden määrän kasvaessa myös kunnossapidon ulkoistamista kannattaa harkita, jotta resurssit riittävät maksimaalisen tuotannon ylläpitämiseen.

## 8 Luotettavuus

Tutkimuksen luotettavuutta arvioidessa täytyy ottaa huomioon tuotannonalenemaan vaikuttavat muut tekijät, suuri säteilyn vaikutus vianetsintään ja inhimillisen virheen mahdollisuus. Tuotannon alenemaan voi vaikuttaa muutkin tekijät kuin vialliset paneelit. Esimerkiksi paneeliketjujen sijainti. Joillakin paneeliketjuilla on pidempi matka jakoboksille, joka tarkoittaa pidempää kaapelinpituutta ja suurempaa resistanssia kaapelissa. Näiden paneeliketjujen kohdalla, jotka ovat kauimmaisista jakoboksista täytyi siis laskea pitkästä kaapeloinnista johtuva virta-alenema erikseen. Esimerkiksi JB19ST1-ST3 tuotantojen alenemat pienenevät paneeliketjun ollessa lähempänä jakoboksia.

Suuresta auringonsäteilystä johtuva heijastus peitti osan paneeleista, eikä niistä saatu muodostettua hyvää lämpökarttaa. Näiden paneelien mahdolliset viat jäivät siis merkaamatta. Tämä laskee paneelivalmistajan B viallisten aurinkopaneelien määrää, koska suurin heijastus sattui juuri näiden paneelien kohdalle. Tuotannon seurantaan tehdessä ei kuitenkaan ollut havaittavissa suuria eroja paneeliketjujen tuotannossa tällä alueella, niin uudelle kuvaukselle ei ollut tarvetta.

Myös inhimillisen virheen mahdollisuus näin suuren datan käsittelyssä on mahdollista. Yksittäisiä viallisia paneeleita saattaa jäädä huomaamatta, kun kuvauksia tehdään suurelle paneeli määrälle kerrallaan. Pienemmissä kohteissa samaa ongelmaa ei ole. Suurimmat tuotannon alenemat osuivat kuitenkin juuri niihin paneeliketjuihin, minne viallisia paneeleita oli merkattu. Yksittäisten viallisten aurinkopaneelien merkaamattomuus voi siis vaikuttaa eri paneelivalmistajien vertailuun, mutta ei tuotannonaleneman laskemiseen.

Tuotannonmenetys laskelmat ovat laskettu osittain mahdollista tuotanto arvioiden, joten niiden tulokset eivät ole täysin luotettavia. Laskelmissa käytetty huipunkäyttöaika 850h ja sähkönhinta 0,05€/kWh ovat tutkimuksen kannalta tarpeeksi tarkkoja. Opinnäytetyön tavoitteena ei kuitenkaan ollut laskea tarkkaan, kuinka paljon tuotantoa menetetään, vaan tutkia löytyykö vikapaikka tämän tyyppisellä vianetsinnällä. Tuotannon menetys laskelmat ovat lähinnä osoitus siitä, että tämän tyyppisellä vianetsinnällä on mahdollista löytää vikakohta ja saada selville tuotannonmenetyksen

aiheuttamat kustannukset. Tarkemmat laskelmat tuotannonmenetyksestä vaatisi paneelikohtaisia mittauksia ja pidemmän tuotannon seurannan.

Nämä asiat huomioon ottaen tutkimuksessa käytettävät mittalaitteet ja tutkimusmenetelmät olivat riittävän tarkkoja. Tästä syystä kokonaisuutena opinnäytetyön tulosta voi pitää luotettavana.

## 9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, saadaanko lämpökamerakuvauksella aurinkosähkövoimalasta paikannettua vikaantuneita aurinkopaneeleita. Tavoitteeseen pääsemisen kannalta täytyi lämpökamerakuvauksista muodostaa lämpökartta. Lämpökartasta löytyvien lämpimämpien aurinkopaneelien tuotantoa verrattiin viereisiin paneelisiin ja laskettiin tuotannonalenema.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan käyttää aurinkovoimalan kunnossapitosuunnitelmaa laatiessa ja uuden voimalan suunnittelussa. Aurinkovoimalan kunnossapitoa suunniteltaessa täytyy muistaa, ettei aurinkovoimalat ole täysin kunnossapitovapaita, vaikka ne vaativatkin muita energiatuotantomuotoja vähemmän kunnossapitoa. Vaikka tutkimuksen aurinkovoimalat eivät ole yksikään yli viittä vuotta vanhoja, niin niissä alkaa olla jo huollettavia asioita. Ottaen huomioon, että aurinkovoimalan elinikä tulisi olla lähemmäs 30 vuotta. Tähän päästään vain hyvällä suunnittelulla, asennuksilla ja kunnossapidolla. Opinnäytetyö on tehty teollisuuskokoluokan aurinkovoimaloihin, mutta sen tuloksia voidaan käyttää myös pienempiä aurinkosähköjärjestelmiä suunniteltaessa tai huoltaessa.

Lämpökamerakuvauksia tehtäessä huomattiin, että dronella tehtävien lämpökamerakuvauksien lisäksi, dronea voisi hyödyntää muissakin aurinkovoimalaan liittyvissä tehtävissä. Dronekuvauksia voisi hyödyntää jo suunnitteluvaiheessa aurinkovoimalan layoutia suunnitellessa, mikäli kohteesta ei ole muuta ilmakuvaa saatavilla. Tällöin dronessa täytyisi olla normaali kamera.

Seuraava tutkimus samasta aiheesta kannattaa tehdä pidemmällä aikavälillä, jolloin aurinkopaneelien vikaantumisen etenemistä voidaan seurata. Jos viallisten paneelien tuotanto laskee ehjiä paneeleita nopeammin, on niiden vaihtaminen

kannattavaa jo vian alkuvaiheissa. Tämän hetken tiedon mukaan ei viallista paneelia, jonka tuotanto pysy aurinkovoimalan keskiarvon lähellä, kannata vaihtaa uuteen. Seuraavassa tutkimuksessa voitaisiin myös perehtyä tarkemmin siihen, mistä syystä aurinkopaneelit vikaantuu ja miksi maahan asennetuissa paneeleissa on enemmän vikaantumisia kuin kattoasennuksissa.

## Lähteet

Amerisolar. AS-6P Amerisolar paneelin datalehti. Viitattu 19.10.2018.

[https://www.acosolar.com/amfilerating/file/download/file\\_id/448/?\\_\\_store=solar\\_all](https://www.acosolar.com/amfilerating/file/download/file_id/448/?__store=solar_all)

Electronics Tutorials. Bypass Diodes in Solar Panels. Viitattu 17.10.2018

<https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>

Fricke, J. Borst, W. 2013. Essentials of Energy Technology. Weinheim, Saksa: Wiley-VCH

Kananen, J. 2011. Kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Lehto, I., Orrberg, M., Liuksiala, L., Lähde, P., Olenius, M. & Ylinen, M. 2017. Aurinkosähköjärjestelmiensuunnittelu ja toteutus. Espoo: Sähköinfo Oy.

Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. Vaala Pelso. 13.09.2018. Viitattu 25.10.2018

<https://cdn.fmi.fi/fmiodata-convert-api/preview/702a7a6a-c5cb-4603-a326-3408f992de48/?locale=fi>

Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. Vaala Pelso. 02.10.2018. Viitattu 25.10.2018

<https://cdn.fmi.fi/fmiodata-convert-api/preview/7da876a8-7dbe-4847-8641-6938887a5161/?locale=fi>

International Finance Corporation. 2015. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. Viitattu 11.10.2018.

[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f05d3e00498e0841bb6fbbe54d141794/IFC+Solar+Report\\_Web+\\_08+05.pdf?MOD=AJPERES](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f05d3e00498e0841bb6fbbe54d141794/IFC+Solar+Report_Web+_08+05.pdf?MOD=AJPERES)

Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Kerava: KP-Media Oy

Nikhil. 2017. How to Inspect Solar Farms with Drones. Viitattu 06.10.2016

<https://raptormaps.com/how-to-inspect-solar-farms-with-drones/>

PSK Standardisointi. PSK 7501. Kunnossapitolajit. PSK Standardisointiyhdistys ry.

16.09.2010. Viitattu 19.10.2018

Ruud Heijnsman. Inspecting solar panels with thermal imaging. maint world.

7.10.2014. Viitattu 19.10.2018.

<https://www.maintworld.com/Asset-Management/Inspecting-solar-panels-with-thermal-imaging>

Schmela, M. 2018. Global Market Outlook For Solar Power / 2018 – 2022. Solar Power Europe

SFS-EN 62446-12016. Aurinkosähköjärjestelmät. Vaatimukset dokumentaatiolle, kunnossapidolle ja testaamiselle. Osa 1: Sähköverkkoon kytketyt järjestelmät. dokumentaatio, käyttöönotto testit ja tarkastus. Helsinki: Suomen standardisointiliitto SFS. Vahvistettu 22.04.2016. Viitattu 06.10.2018.

Testo. Practical guide Solar Panel Thermography. Viitattu 06.10.2018  
[https://www.buhl-bonsoe.dk/media/89733/testo\\_solcelleanlaeg\\_praktisk\\_guide\\_en.pdf](https://www.buhl-bonsoe.dk/media/89733/testo_solcelleanlaeg_praktisk_guide_en.pdf)

Vakkilainen, E. Kivistö, A. 2017. Sähkön tuotannon vertailu TIIVISTELMÄ. Tutkimusraportti, LUT. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Energiatekniikka. Viitattu 11.10.2018

Vella.H 2016. Solar array maintenance: why are costs falling?. Power Technology. 31.05.2016. Viitattu 06.10.2018.  
<https://www.power-technology.com/features/featuresolar-array-maintenance-why-are-costs-falling-4872202/>

## Liitteet