

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinööri (AMK)

2025

Tero Mäkilä

# Aurinkosähköjärjestelmät kiinteistöissä – tekniset vaatimukset, ylläpito ja laadunhallinta

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2025 | 39 sivua

Tero Mäkilä

## Aurinkosähköjärjestelmät kiinteistöissä – tekniset vaatimukset, ylläpito ja laadunhallinta

Opinnäytetyö tuottaa kattavan selvityksen Senaatti-kiinteistöjen Varsinais-Suomen alueen kiinteistöihin asennetuista aurinkovoimaloista, keskittyen niiden nykytilaan, asennuksen laatuun ja komponenttien kestävyysasteeseen. Tutkimus lähestyy aihetta erityisesti toimeksiantajan, Senaatti-Kiinteistöjen, näkökulmasta ja pyrkii ymmärtämään hankittujen aurinkovoimaloiden ylläpitoon liittyviä näkökohtia. Tutkimuksessa tarkastellaan kiinteistöhoitajan ja sähköasentajan suorittamia tarkkailu- ja huoltotehtäviä sekä tunnistetaan mahdollisia riskitekijöitä, kuten laitteiston rikkoutumista, suunnittelu- ja asennusvirheitä sekä palovaaroja.

Päätavoitteena on kehittää toimeksiantajalle räätälöity ohjeistus, joka tukee korkeatasoisen aurinkovoimaloiden asennuksen varmistamista ja minimoi mahdolliset riskit, ottaen huomioon Senaatti-Kiinteistöjen erityiset tarpeet ja toimintaympäristön. Tämä tutkimus linkittyy laajempaan kontekstiin aurinkosähköjärjestelmien optimoinnista ja standardoinnista, tavoitellen parannuksia turvallisuudessa ja tehokkuudessa.

Asiasanat:

aurinkosähkö, kiinteistöjen ylläpito, aliurakointi, tekninen huolto, asennusvirheet

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Engineering

2025 | 39 pages

Tero Mäkilä

## Photovoltaic Systems in Properties – Technical Requirements, Maintenance and Quality Management

This thesis provides a comprehensive analysis of the solar power plants installed in the properties of Senaatti-kiinteistöt in the Southwest Finland region, focusing on their current state, installation quality, and component durability. The research approaches the topic particularly from the perspective of the client, Senaatti-kiinteistöt, and aims to understand the maintenance aspects of the acquired solar power plants. The study examines the monitoring and maintenance tasks performed by property managers and electricians, and identifies potential risk factors such as equipment failures, design and installation errors, and fire hazards.

The primary objective is to develop a tailored guideline for the client to ensure high-quality solar power plant installations and minimize potential risks, considering the specific needs and operational environment of Senaatti-kiinteistöt. This research is linked to the broader context of optimizing and standardizing photovoltaic systems, aiming for improvements in safety and efficiency.

Keywords:

photovoltaic power generation, facility management, subcontracting, technical maintenance, installation defects

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto.</b>	<b>6</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Aurinkovoimalaitokset</b>	<b>8</b>
2.1 Aurinkosähkölaitoksen toimintaperiaatteet	8
2.1.1 Aurinkopaneelit	8
2.1.2 Invertterit	9
2.1.3 Asennus	11
2.2 Voimaloiden suorituskyky ja kestävyys	14
2.2.1 Tulosten mittaus	15
2.2.2 Suorituskyvyn mittaaminen ja seuranta	17
2.3 Voimaloiden huoltotoimenpiteet	17
2.3.1 Varjostus ja likaantuminen	18
2.3.2 Korjaavat huoltotoimenpiteet	20
<b>3 Yleiset ongelmat</b>	<b>21</b>
3.1 Juurisyyt aurinkovoimaloiden ongelmiin	21
3.2 <b>Asennuksen yleiset ongelmat</b>	22
3.3 Ilmaston aiheuttamat ongelmat	24
<b>4 Ohjeet ylläpitoon</b>	<b>26</b>
4.1 Ylläpidon yleiset toimenpiteet ja parhaat käytännöt	26
4.2 Ylläpidon tarkistuslista ja huolto-ohjeet	27
4.3 Alihankinta ja sen hallinta aurinkovoimalahankkeissa	30
4.4 Hankintastrategia ja laadunhallinta alihankinnassa	32
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>33</b>
5.1 Tutkimukset tavoitteet ja tausta	33
5.2 Keskeiset havainnot	33
5.3 Asennuksen merkittävimmät huomiot	34
<b>6 Pohdinta</b>	<b>35</b>

<b>Lähteet</b>	<b>36</b>
----------------	-----------

## **Kuvat**

Kuva 1. Esimerkkejä erilaisista PV-järjestelmien likaantumistyypeistä. Lintujen jätöksiin liittyen, vasemmanpuoleinen kuva esittää lämpökuvan lintujen jätöksestä, joka saattaa johtaa hotspotilmiöön ja mahdollisesti vahingoittaa PV-moduulia (Ilse et al., 2019). 19

Kuva 2. Yhteen liitetyt aurinkopaneelit, joissa käytetyt kiinnikkeet ovat peräisin samalta valmistajalta. Vasemmanpuoleinen vedonpoisto ei ole täysin kiristetty, mikä saattaa vaikuttaa rakenteen kestävyYTEEN ja turvallisuuteen. 23

Kuva 3. Välinpitämättömästi toteutettu lumenpoisto (Andenæs et al. 2018). 25

## **Taulukot**

Taulukko 1. Aurinkovoimalan tarkistusvastuu	29
Taulukko 2. Alihankintaprosessin vaiheet aurinkovoimalahankkeessa	29

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto.

String	Sarjaan kytkentä, jossa useita aurinkopaneeleita yhdistetään sähköiseksi kokonaisuudeksi.
DC	Direct Current, tasavirta.
BOS	Balance of System, järjestelmän muut kuin paneeleihin liittyvät osat, kuten kaapelit, kytkimet ja kiinnitysrakenteet.
CdTe	Cadmium Telluride, ohutkalvoteknologiassa käytettävä puolijohdemateriaali.
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide, ohutkalvopaneeleissa käytettävä puolijohde.
MPPT	Maximum Power Point Tracking, maksimitehopisteen seuranta.
BIPV	Building Integrated Photovoltaics, rakennukseen integroidut aurinkopaneelit.
AC	Alternating Current, vaihtovirta.
GPR	Guaranteed Performance Ratio, takuuperusteinen suorituskysyysuhde.
TMY	Typical Meteorological Year, tyypillinen meteorologinen vuosi, jota käytetään simuloinneissa.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, valvonta- ja tiedonkeruujärjestelmä.
KPI	Key Performance Indicator, keskeinen suorituskysyindikaattori.
OEM	Original Equipment Manufacturer, alkuperäislaitevalmistaja.
S-lupa	Suomessa käytettävä sähköpätevyysluokitus.

# 1 Johdanto

Aurinkoenergiajärjestelmien merkitys osana kiinteistöjen energiantuotantoa ja -hallintaa on kasvanut viime vuosina. Ympäristötietoisuuden lisääntyminen, vihreään siirtymän edistäminen sekä sähkön hinnan vaihtelut ovat lisänneet kiinnostusta aurinkosähköjärjestelmiin erityisesti kiinteistökäytössä. Samalla järjestelmien yleistyminen on lisännyt tarvetta tarkastella niiden teknistä toimivuutta, turvallisuutta ja elinkaaren aikaista ylläpitoa.

Aurinkosähkölaitokset koostuvat useista toisiinsa kytkeytyvistä komponenteista, kuten aurinkopaneeleista, inverttereistä ja kiinnitysrakenteista, jotka asennetaan paikan päällä toimivaksi kokonaisuudeksi. Järjestelmien suunniteltu käyttöikä on tyypillisesti 25–30 vuotta, mikä korostaa asennuslaadun ja järjestelmällisen kunnossapidon merkitystä (IEA-PVPS, 2022).

Aurinkosähköjärjestelmien yleistyessä huomiota on kiinnitetty myös asennusten laatuun ja turvallisuuteen. Tukes on raportoinut aurinkosähköjärjestelmiin liittyvistä asennusvirheistä (Tukes, 2022), mikä korostaa huolellisen suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon organisoinnin merkitystä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella aurinkosähköjärjestelmiä osana kiinteistöjen teknistä ylläpitoa Senaatti-kiinteistöjen näkökulmasta. Työ keskittyy Senaatti-kiinteistöjen Varsinais-Suomen alueen kiinteistöihin asennettuihin aurinkovoimaloihin ja niiden nykytilaan, asennuslaatuun sekä komponenttien kestävyys. Tarkastelussa huomioidaan kiinteistöhoitajan ja sähköasentajan roolit järjestelmien kunnossapidossa sekä tunnistetaan keskeisiä riskejä, kuten suunnittelu- ja asennusvirheitä, laiterikkoja ja paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä.

Työn tavoitteena on tuottaa kokonaiskuva aurinkosähköjärjestelmien elinkaaren aikaisista haasteista ja kehityskohteista sekä tarjota toimeksiantajalle käytännönläheistä tietoa järjestelmien ylläpidon ja laadunhallinnan tueksi. Työssä yhdistetään kirjallisuuteen perustuva teoreettinen tarkastelu ja käytännön havaintoihin perustuva empiirinen aineisto.

## 2 Aurinkovoimalaitokset

Aurinkosähköjärjestelmät koostuvat useista toisiaan täydentävistä osista. Järjestelmän peruskomponentteja ovat aurinkosähkömoduulit eli paneelit, erilaiset tehonmuunnoslaitteet kuten invertterit, muuntajat ja yhdistäjälaitteet sekä moduulien kiinnittämiseen tarvittavat rakenteet. Nämä osat asennetaan kohteessa valmiiksi kokonaisuudeksi, jonka toiminta varmistetaan käyttöönoton yhteydessä. (IEA-PVPS T13-25:2022)

### 2.1 Aurinkosähkölaitoksen toimintaperiaatteet

#### 2.1.1 Aurinkopaneelit

Aurinkosähköpaneeli muodostuu useista aurinkokennoista, jotka toimivat puolijohderakenteisina diodikomponentteina ja muuntavat auringon säteilyä tasavirraksi (Köntges et al., 2014). Kennoteknologioita ja -materiaaleja on useita, mutta piipohjaiset ratkaisut ovat selvästi yleisimmät.

Kaupallisista aurinkosähkömoduuleista suurin osa perustuu kiteiseen piihin. Paneelit koostuvat sarjaan kytketyistä yksikiteisistä tai monikiteisistä piikennoista, joista yksikiteiset tarjoavat paremman hyötysuhteen mutta ovat kalliimpia valmistaa. Kiteiseen piihin perustuvien moduulien osuus markkinoista on viime vuosina ollut yli 90 prosenttia (Rakennustieto RT 103756, 2025).

Piikennot ovat ohuita ja mekaanisesti herkkiä, joten ne laminoidaan tyhjiöprosessissa lasilevyn ja taustakalvon väliin. Valmistus voi perustua kehäksettömään lasi-lasi-rakenteeseen tai alumiinikehyksellä vahvistettuun perinteiseen moduuliin, riippuen käyttökohteen vaatimuksista (Rakennustieto RT 103756, 2025)

Paneeli voi olla myös kaksipuoleinen, jolloin toinen puoli ottaa vastaan vaaleasta alustasta heijastuvaa valoa, tai se voidaan asentaa

vertikaaliasentoon itä-länsi-asennuksena, jolloin paneelin huipputuotto kohdistuu aamun ja illan tunteihin. (Rakennustieto RT 103756, 2025)

Ohutkalvotekniikka sisältää lukuisia alatyyppejä. Yleisimpiä ovat amorfinen pii, CdTe (Cadmium-telluride) ja CIGS (Copper-iridium-gallium-diselenide). Niistä voidaan valmistaa lasipaneelien lisäksi joustavia aurinkopaneeleja, jolloin ne eivät ole yhtä herkkiä kuljetus- tai asennusvaurioille kuin kiteisestä piistä valmistetut paneelit. Ohutkalvopaneelit eivät varjossa menetä tuottoa niin paljon kuin kiteisestä piistä valmistetut paneelit. (Rakennustieto RT 103756, 2025)

### 2.1.2 Invertterit

Aurinkosähköjärjestelmissä paneelit tuottavat tyypillisesti 30–40 voltin tasajännitettä, mikä ei sellaisenaan ole tehokasta muuntaa sähköverkossa käytettäväksi 230 voltin vaihtojännitteeksi. Tämän vuoksi paneelit kytketään sarjaan, jolloin muodostuu paneeliketju (string), jonka jännite nostetaan invertterien kannalta optimaaliselle tasolle. On kuitenkin keskeistä varmistaa, ettei yksittäisen ketjun jännite ylitä verkkoinvertterin sallimaa enimmäisjännitettä, jotta järjestelmä toimii turvallisesti ja tehokkaasti (Rakennustieto RT 103756, 2025).

Verkkoinverttereiden valinta kiinteistökohteissa perustuu teknisiin vaatimuksiin ja sähkönjakelun rakenteeseen. Kolmivaiheiset invertterit soveltuvat erityisesti keskikokoisiin ja suuriin kiinteistöihin, joissa kuormat jakautuvat useille vaiheille. Ne mahdollistavat tasaisemman tehonsyötön ja vähentävät vaihekohtaista epätasapainoa. Yksivaiheiset invertterit ovat käyttökelpoisia rajatummissa kokonaisuuksissa, joissa sähkökuorma voidaan keskittää yhteen vaiheeseen. Ratkaisun valintaan vaikuttavat lisäksi invertterin Maximum Power Point Tracking -seurantojen (MPPT-seurantojen) määrä ja järjestelmän topologia. Esimerkiksi kahdella MPPT-syötöllä varustetut invertterit soveltuvat järjestelmiin, joissa paneelientät poikkeavat suunnaltaan tai kallistukseltaan (Bhuiyan, 2024; Shawky et al., 2020; Kabalci, 2020).

Mikroinvertterit mahdollistavat paneelikohtaisen maksimitehopisteen seurannan (MPPT), mikä tekee niistä erityisen hyödyllisiä tilanteissa, joissa paneelit altistuvat varjostukselle tai niiden kallistuskulmat ja suunta vaihtelevat, kuten rakennuksiin integroiduissa aurinkosähköjärjestelmissä (BIPV).

Paneelikohtaisen optimoinnin ansiosta mikroinvertterit parantavat energiatehokkuutta erityisesti epätasaisissa valaistusolosuhteissa ja lisäävät järjestelmän joustavuutta. Haittapuolina ovat kuitenkin korkeammat yksikkökustannukset ja kasvava huollon monimutkaisuus, sillä jokainen invertteri toimii omana erillisenä komponenttinaan (Ikkurti & Saha, 2015; Bhuiyan, 2024).

Mikroinverttereiden tulee täyttää EN50438-standardin vaatimukset, jotka määrittelevät tekniset kriteerit turvalliselle verkkoon liittämiseksi (Rakennustieto RT 103756, 2025). Vaikka standardien noudattaminen varmistaa invertterien luotettavan toiminnan ja turvallisuuden, se voi myös lisätä järjestelmän kokonaiskustannuksia, sillä laitteiden on oltava sertifioituja ja niiden on täytettävä tiukat laatuvaatimukset (Ikkurti & Saha, 2015).

Suurten aurinkovoimaloiden invertteriratkaisuksi voidaan valita joko useita string-inverttereitä tai yksi keskusinvertteri. String-invertterien etuna on yksinkertaisempi kaapelointi, hajautettu valvonta ja optimointi sekä parempi vikasietoisuus verrattuna keskusinverttereihin. Keskusinvertterijärjestelmissä useat paneeliketjut yhdistetään yhteen keskusinvertteriin DC-rinnankytkentäkeskusten avulla, mikä mahdollistaa pienemmät sähköhäviöt, alhaisemmat kaapeli- ja laitekustannukset sekä keskitetyn huollon. Tämä järjestelmä on tyypillisesti käytössä suurissa aurinkopuistoissa, joissa paneelien sijoittelu ja yhtenäiset valaistusolosuhteet mahdollistavat keskitetyn energiantuotannon ilman tarvetta paneelikohtaiselle optimoinnille (Hasan, 2024).

Invertterityypin valinta perustuu tapauskohtaiseen kustannus-, huoltovarmuus- ja tuottoanalyysiin. Mikroinvertterit ovat optimaalisia pienikokoisissa ja monimutkaisissa järjestelmissä, joissa jokaisen paneelin tuotannon maksimointi on keskeistä. Sen sijaan string- ja keskusinvertterit ovat parempi vaihtoehto

laajemmille aurinkovoimaloille, joissa järjestelmän tehokkuus ja pitkäaikainen toiminnan varmuus ovat ensisijaisia prioriteetteja (Ikkurti & Saha, 2015; Hasan, 2024).

### 2.1.3 Asennus

Aurinkoenergiajärjestelmien asennuksessa rakennuksen tai muun sijoituspaikan olosuhteet määrittävät paneelien suuntauskulman ja kiinnitysratkaisun valinnan. Optimaalisen energiantuotannon varmistamiseksi paneelit tulisi sijoittaa etelään noin 45° kaltevuuteen, mutta yli 90 % maksimituotosta voidaan saavuttaa myös, jos paneelit asennetaan kaakon ja lounaan välille ja niiden kaltevuuskulma on 20–60° (Rakennustieto RT 103756, 2025). Tran ja Le (2024) korostavat, että katon rakenteellinen kantavuus ja paikalliset ilmasto-olosuhteet ovat keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat asennustavan valintaan. Lisäksi varjostusta aiheuttavat kattorakenteet, kuten ilmanvaihtoputket ja savupiiput, tulisi sijoittaa rakennuksen pohjoispuolelle tai muualle, missä ne eivät vaikuta merkittävästi paneelien tuotantotehokkuuteen.

Aurinkopaneelien kiinnitysjärjestelmien materiaalien tulee kestää mekaanista rasitusta sekä pitkäaikaista altistumista sääolosuhteille, kuten UV-säteilylle, kosteudelle ja lämpötilanvaihteluille. Yleisesti käytetyt alumiini- ja teräsrakenteet ovat kestäviä vaihtoehtoja, mutta niiden kohdalla on otettava huomioon galvaaninen yhteensopivuus ja korroosionkestävyys. Tietyissä tapauksissa voidaan hyödyntää myös kevyitä ja säänkestäviä komposiittimateriaaleja, jotka parantavat järjestelmän kestävyyttä erityisesti haastavissa sääolosuhteissa (Belloni, Ferrucci & Fioriti, 2024). Rakenteellisesti kestävät kiinnitysratkaisut ovat olennaisia aurinkopaneelien pitkäikäisyyden ja tehokkuuden varmistamiseksi (Bhandari, Panjawani ja Jain (2020).

Bitumikermillä, PVC-katteella ja huopakatolla varustetuilla katoilla kiinnitysratkaisut edellyttävät erityistä huomiota katon vesitiivyyden säilyttämiseksi. Kaltevilla huopakatoilla käytetään kantavaan rakenteeseen kiinnitettäviä kiinnikkeitä, joissa kumitiivisteet varmistavat vesitiiveyden. Loivilla

bitumikermi- ja PVC-katteilla, joita tyypillisesti käytetään teollisuusrakennuksissa, kiinnitysjärjestelmän on kestävä sekä rakennuksen omat että ympäristöstä aiheutuvat kuormitukset ilman, että se vaarantaa rakenteen eheyden (De Beer, 2025).

Käännetyn katon tapauksessa paneelit voidaan joko ankkuroida kantavaan rakenteeseen tai asentaa painolastilla tasapainotettuna. Tällöin on varmistettava, että järjestelmä kestää sekä tuuli- että lumikuormat ilman ylimääräistä rasitusta rakenteille (Belloni et al., 2024). Kiinteän ja kelluvan asennuksen välimuotona voidaan käyttää järjestelmiä, joissa kiinnikkeet liimataan suoraan katteeseen. Tämä asennustapa edellyttää kuitenkin pitkäaikaisen kestävyuden arviointia, sillä liimauksen on säilyttävä luotettavana koko järjestelmän elinkaaren ajan (Bhandari et al., 2020).

Paneelikenttien suunnittelussa on myös otettava huomioon järjestelmän aiheuttama lisäpaino kattorakenteille sekä tuuli- ja lumikuormien vaikutukset. Erityisesti katon reuna-alueilla kuormitus voi olla huomattavasti suurempi kuin keskiosissa, minkä vuoksi paneelikentän reuna-alueille tarvitaan tyypillisesti enemmän painolastia järjestelmän vakauden varmistamiseksi (Tran & Le, 2024). Bhandari et al. (2020) huomauttavat, että tuuli- ja lumikuormien huomioiminen suunnitteluvaiheessa on ratkaisevaa, jotta järjestelmä ei ainoastaan toimi tehokkaasti vaan myös säilyttää rakenteellisen lujuutensa koko käyttöikänsä ajan.

Näin ollen aurinkopaneelien kattoasennuksissa on otettava huomioon rakenteellinen kantavuus, ilmasto-olosuhteet ja materiaalivalinnat. Oikein suunniteltu ja toteutettu asennus varmistaa järjestelmän turvallisuuden, energiatehokkuuden ja kestävyuden, mikä edistää aurinkoenergiajärjestelmien pitkäaikaista käyttöä ja minimoi huoltotarpeet (Belloni et al., 2024; Bhandari et al., 2020).

#### Tuuli- ja Lumikuormat

Aurinkopaneelisiin ja niiden asennustelineisiin kohdistuvat tuuli- ja lumikuormat vaikuttavat merkittävästi rakenteiden suunnitteluun. Suunnittelussa tulee aina

ottaa huomioon paikalliset olosuhteet ja todelliset rakenteisiin vaikuttavat kuormat. Ohjeet tuuli- ja lumikuormien laskemiseen löytyvät standardista SFS-EN 1991-1-6, jossa käsitellään eri kuormitustekijöiden, kuten tuulen noste- ja painevoimien, vaikutuksia rakenteisiin (SFS-EN 1991-1-6, 2005).

Aurinkopaneeleihin kohdistuvat tuulikuormat ovat voimakkaasti sidoksissa paikallisiin olosuhteisiin, kuten tuulen nopeuteen ja suuntaan, sekä asennustapaan. Katon lappeen suuntaisesti asennettuun aurinkopaneeliin kohdistuu yleensä pienempi tuulikuorma kuin erilliseen telineeseen asennettuun, sillä kattoon integroidut paneelit hyötyvät rakennuksen aerodynaamisesta suojasta (Kopp et al., 2012).

Vapaasti seisoviin telineisiin kiinnitetyt paneelit puolestaan kohtaavat suoraan tuulen noste- ja painevoimat, mikä voi johtaa suurempiin dynaamisiin rasituksiin ja edellyttää tukevampia kiinnitysratkaisuja (Wacklin, 2024). Katon reuna-alueilla tuulikuormat voivat olla moninkertaisia verrattuna katon keskialueisiin johtuen pyörteilyilmiöistä ja alipaineen muodostumisesta (Tammelin et al., 2013). Tämä ilmiö voi johtaa siihen, että paneelit ja kiinnitysratkaisut joutuvat kestäämään suurempia dynaamisia voimia kuin keskialueella sijaitsevat paneelit (Rakennustieto RT 103756, 2025). Näiden vaikutusten hallitsemiseksi suositellaan aerodynaamisesti optimoituja kiinnitysjärjestelmiä, jotka vähentävät tuulikuormia ja parantavat rakenteellista kestävyyttä (Wacklin, 2024).

Lumikuormien kannalta kriittisiä tekijöitä ovat lumen paino, kattokulma sekä paneelien asennuskulma. Suomessa lumikuormat vaihtelevat alueittain välillä 1,4–2,6 kN/m<sup>2</sup>, ja ne ilmoitetaan vaakasuoralle pinnalle mitoitettuna (Rakennustieto RT 103756, 2025). Todellinen lumikuorma aurinkopaneeleille riippuu kuitenkin niiden asennuskulmasta: jyrkemmin asennetut paneelit puhdistuvat lumesta nopeammin, mutta voivat menettää optimiasennon energiantuotannon näkökulmasta (Thevenard & Pelland, 2013).

Pohjois-Euroopan kylmissä ilmasto-olosuhteissa aurinkopaneelien ja niiden tukirakenteiden tulee kestää huomattavasti suurempia lumikuormia kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa. Rakenteellisesti heikot tai väärin mitoitettut

telineet voivat altistua taipumiselle tai jopa murtumiselle erityisesti alueilla, joilla vuosittainen lumipeite on poikkeuksellisen raskas. Näiden tekijöiden huomioiminen vaatii aluekohtaista suunnittelua, jossa käytetään paikallisia lumikuormamalleja ja mitoitusstandardeja (Croce, Formichi & Landi, 2021). Erityisesti harjakattojen tietyillä alueilla lumikuormat voivat kasaantua epäsymmetrisesti, mikä voi aiheuttaa epätasaisia rasituksia rakenteisiin (Thevenard & Pelland, 2013). Tämän vuoksi lumiesteiden käyttö paneelientien yhteydessä voi olla tarpeellista, mikäli katemateriaali ja kaltevuus mahdollistavat lumimassojen äkillisen putoamisen (Rakennustieto RT 103756, 2025).

Aurinkopaneelien ja kiinnitysjärjestelmien suunnittelussa tulee noudattaa valmistajan ohjeita, jotta yksittäisten komponenttien kuormitettavuus ei ylitä ja jotta rakenteiden eheyden säilyminen voidaan varmistaa. Erityisesti paneelivalmistajilla on saatavilla tyyppihyväksyntään perustuvat kuormitustestit, jotka kattavat vain tietyt ennalta määritellyt kiinnitystavat. Jos näistä poiketaan esimerkiksi asentamalla paneelit erilaiseen kiinnitysjärjestelmään tai kulmaan kuin testissä on käytetty, paneelien kuormituskestävyys voi heikentyä merkittävästi, ja takuehdot voivat raueta (Wacklin, 2024).

Lisäksi kiinnitysjärjestelmää tulee tarkastella kokonaisuutena, eikä pelkästään yksittäisinä komponentteina. Paneelientien tulee kestää niin staattisia kuin dynaamisia rasituksia ilman, että yksittäiset kiinnityskohdat pettävät, mikä voisi johtaa järjestelmän osittaiseen tai täydelliseen irtoamiseen (Rakennustieto RT 103756, 2025). Oikein suunniteltu ja asennettu kiinnitysjärjestelmä ehkäisee myös rakenteellisten heikkouksien muodostumista ja varmistaa paneelien pitkän käyttöiän.

## 2.2 Voimaloiden suorituskyky ja kestävyys

Aurinkosähköjärjestelmien suorituskyky ja pitkäikäisyys ovat ratkaisevia tekijöitä järjestelmän kokonaistaloudellisuuden ja teknisen luotettavuuden kannalta. Käyttöiän aikana järjestelmän suorituskykyyn vaikuttavat useat ympäristötekijät, kuten lämpötilavaihtelut, UV-säteily, kosteus ja mekaaninen kuormitus. Näiden

tekijöiden vaikutus ilmenee erityisesti materiaalien ikääntymisen ja rakenteellisen rasituksen kautta, mikä voi heikentää moduulien toimintaa.

Vaikka tutkimuksissa ei ole löydetty täysin suoraa korrelaatiota ilmastovyöhykkeiden ja moduulivikojen välillä, tietyt ilmasto-olosuhteet, kuten kuuma ja kuiva sää, näyttävät lisäävän erityisesti likaantumisen ja mikrohalkeamien riskiä (Köntges et al., 2014).

Suomen sääolosuhteet muodostavat poikkeuksellisen ympäristön aurinkosähköjärjestelmille. Erityisesti talvella esiintyvät ankarat pakkaset voivat vaikuttaa aurinkopaneelien materiaalikestävyyteen, kuten silikonin mekaaniseen iskunkestävyyteen. Tutkimusten mukaan alle  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilat voivat merkittävästi heikentää materiaalin rakennetta ja lisätä vaurioriskiä (Rowell et al., 2018).

GPR-mittari ilmoitetaan prosentteina ja se määritetään hankkeen suunnitteluvaiheessa hyödyntäen esimerkiksi tyypillisen meteorologisen vuoden (TMY) säteilydataa. Tämän perusteella voidaan määritellä sopimuksellinen tavoitetaso, jota ylläpidon ja käytön tulee tukea. IEA-PVPS:n mukaan GPR on olennainen osa käyttö- ja kunnossapitosopimuksia, ja sen avulla voidaan myös seurata järjestelmän pitkän aikavälin suorituskykyä (IEA-PVPS, 2022).

### 2.2.1 Tulosten mittaus

Aurinkosähköjärjestelmän suorituskykyä kuvataan yleisesti Performance Ratio (PR) -arvolla, joka ilmaisee järjestelmän todellisen tuotannon suhteessa sen teoreettiseen tuotantopotentiaaliin.  $PR = 0.80$  tarkoittaa esimerkiksi, että järjestelmä toimii 80 %:n tehokkuudella optimaalisiin olosuhteisiin nähden. Hyvin suunnitelluissa ja huolletuissa järjestelmissä PR-arvo sijoittuu tyypillisesti 0.75–0.90 välille (IEA-PVPS T13-25:2022).

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{E/P}{H/G}, \quad (1)$$

jossa

*Y<sub>f</sub>* on spesifinen tuotto (specific yield)

*Y<sub>r</sub>* on viitetuotto (reference yield).

*E* on AC-energiantuotanto

*P* on DC-tehon ulostulo

*H* on aurinkopaneelipinnan säteilytaso

*G* on viitesäteilyn taso tai standarditestin olosuhteet

PR soveltuu hyvin sekä käyttöönottestaukseen että järjestelmän jatkuvaan suorituskyvyn seurantaan. Sen avulla voidaan tunnistaa poikkeamat, jotka voivat johtua esimerkiksi komponenttivaurioista, huollon puutteista tai ympäristöolosuhteiden muutoksista. Aurinkovoimaloiden kunnossapitoon liittyvissä sopimuksissa hyödynnetään lisäksi suorituskysuuhdetta, niin kutsuttua Guaranteed Performance Ratioa (GPR), jolla määritetään vähimmäistaso järjestelmän tuottamalle energialle ja varmistetaan sopimuskauden aikainen suorituskyyky.

Luotettava PR- ja GPR-laskenta perustuu kalibroituun mittausdataan, jossa aurinkosäteily mitataan pyranometrien avulla ja energiantuotanto invertterien tai SCADA-järjestelmien kautta. Tämä mahdollistaa sekä reaaliaikaisen seurannan että historiatietojen analysoinnin.

PVEL:n (2020) vuosittainen luotettavuusraportti korostaa, että PR on edelleen yksi keskeisimmistä mittareista aurinkosähköjärjestelmien toimintakunnon ja komponenttien suorituskyyvyn arvioinnissa. Erityisesti pitkän aikavälin PR-seuranta auttaa havaitsemaan paneelien ennenaikaisen degradaation ja muut tuotantoa heikentävät ilmiöt.

## 2.2.2 Suorituskyvyn mittaaminen ja seuranta

Järjestelmällinen mittaus- ja analysointikäytäntö on keskeinen osa aurinkovoimalan operatiivista hallintaa. Tehokkaan toiminnan edellytyksenä on tunnistaa suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ja seurata niitä määriteltyjen mittarien, kuten keskeisten suorituskykyindikaattorien (KPI), avulla. Näiden mittarien avulla voidaan erottaa järjestelmän sisäiset tekniset tekijät ulkoisista ympäristövaikutuksista ja näin kohdentaa huoltotoimenpiteet oikein (IEA-PVPS T13-25:2022).

Erityisesti pitkän aikavälin järjestelmävalvonnassa KPI-mittareita täydennetään analysoimalla tuotantoon liittyviä korjaustekijöitä, kuten tuotannon lämpötilakorjauksia tai tuotannon rajoituksia (curtailment). Näiden tekijöiden ymmärtäminen on keskeistä, kun halutaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä järjestelmän kokonaissuorituskyvystä. Kansainvälisesti hyväksytyn standardin mukaisesti IEC 61724-1 suosittelee suorituskyky-suhteen seuranta osana laadunvarmistusjärjestelmää.

Vaikka suorituskyvyn suhdeluku (PR) on jo käsitelty aiemmin edellisessä luvussa, on tärkeää korostaa sen merkitystä osana laajempaa kokonaisuutta. PR ei ole pelkästään yksittäinen luku, vaan osa jatkuvaa laadunhallinnan prosessia, jonka avulla voidaan varmentaa tuotannon vakaus ja paneelien kunto koko käyttöiän ajan (IEA-PVPS T13-25:2022; PVEL, 2020).

## 2.3 Voimaloiden huoltotoimenpiteet

Aurinkovoimaloiden huoltotoimenpiteet muodostavat olennaisen osan kiinteistön ylläpitoa, ja ne sisällytetään yleensä rakennuksen huoltosuunnitelmaan. Huoltokokonaisuus jaetaan ennakoiviin ja korjaaviin toimenpiteisiin, joiden tavoitteena on varmistaa järjestelmän turvallinen ja häiriötön toiminta koko sen elinkaaren ajan (IEA-PVPS T13-25:2022).

Ennakoiva huolto on erityisen tärkeä osa aurinkosähköjärjestelmän käyttö- ja kunnossapitoa. Se sisältää aikataulutetut tarkastukset, testaukset ja

komponenttikohtaiset huoltotoimet, joita suoritetaan joko paikan päällä tai etävalvonnan avulla. Huoltovälit määräytyvät järjestelmän koon, valmistajien (OEM) suositusten, ympäristöolosuhteiden ja takuuehtojen perusteella (IEA-PVPS, 2022). Säännöllinen ennakoiva huolto ehkäisee vikoja, pidentää järjestelmän käyttöikää ja varmistaa tuotto-odotusten toteutumisen. Tutkimusten mukaan keskitetyn ylläpidon järjestelmissä ennakoivat toimenpiteet voivat vähentää suunnittelemattomia käyttökatkoja merkittävästi verrattuna reaktiiviseen huoltomalliin (IEA-PVPS T13-25:2022).

Keskeisiä ennakoivan huollon tehtäviä ovat järjestelmän visuaaliset tarkastukset, paneelien puhdistus, kiinnitysjärjestelmien kunnon arviointi, invertterien toiminnan seuranta sekä lämpökuvaukset silloin, kun halutaan tunnistaa mahdollisia piileviä vikoja tai kuumapisteitä.

### 2.3.1 Varjostus ja likaantuminen

Eryteisesti katolle asennetuissa järjestelmissä varjostus on merkittävä tuotantohäviöiden aiheuttaja. Varjot voivat olla sekä kovia (rakenteet, hormit) että pehmeitä (puuston aiheuttama varjo), ja ne aiheuttavat paneelikohtaisia lämpötilaeroja ja sähköisen tuotannon epätasaisuutta. PVEL:n (2020) mukaan osittain varjostetut paneelit kärsivät muita useammin ennenaikaisista vaurioista, kuten kuumapisteistä, jotka voivat johtaa pysyviin vaurioihin tai jopa paloturvallisuusriskeihin.

Likaantuminen on toinen merkittävä suorituskykyyn vaikuttava tekijä, joka vähentää paneelien valonläpäisyä ja aiheuttaa tuottotappioita. IEA-PVPS T13-25:2022 raportoi, että säännöllinen puhdistus voi parantaa järjestelmän tuottoa keskimäärin 2–6 % vuositasolla – alueesta ja saastepitoisuudesta riippuen.

Tyypillisiä varjostuksen ja likaantumisen aiheuttajia katolla ovat:

- Rakennuksen omat rakenteet: savupiiput, ilmanvaihtokanavat, kattojiirit ja -lyhdyt
- Ulkoiset esteet: puut, naapurirakennukset, antennit

- Eloperäiset kertymät: lintujen jätökset, siitepöly, lehtijätteet.

Näiden ilmiöiden hallintaan suositellaan tarkkaa suunnitteluvaiheen analyysiä, optimoitua asettelua sekä säännöllistä huoltokäytäntöä, mukaan lukien varjoseurantaa ja lämpökuvaa tarkastuksia, esimerkiksi dronella suoritettuna (IEA-PVPS T13-25:2022; RT 103756, 2025).



Kuva 1. Esimerkkejä erilaisista PV-järjestelmien likaantumistyypeistä. Lintujen jätöksiin liittyen, vasemmanpuoleinen kuva esittää lämpökuvan lintujen jätöksestä, joka saattaa johtaa hotspotilmiöön ja mahdollisesti vahingoittaa PV-moduulia (Ilse et al., 2019).

Likaantuminen vaikuttaa aurinkopaneelin sähköntuotantoon samankaltaisesti kuin varjostus – se estää valon pääsyn kennon pinnalle ja heikentää näin paneelin energiantuottoa. Paikallinen peittävyys, kuten lintujen ulosteet, siitepölyn kertyminen tai muu epäpuhtaus, voi kerätä lämpöenergiaa tiettyyn kohtaan paneelin pinnalla. Tämä voi aiheuttaa lämpötilaeroja, jotka johtavat niin sanottuun hotspotilmiöön, jossa paneelin yksittäinen kenno lämpenee muita osia enemmän, lisäksi rakenteellisten vaurioiden ja sähköhäiriöiden riskiä (Guingane et al., 2024).

Varjostuksen ja likaantumisen ehkäisy tulisi huomioida jo aurinkovoimalan suunnitteluvaiheessa. Paneelien sijoittelu tulisi tehdä siten, että pysyviä varjostuksia ei pääse syntymään, ja tarvittaessa voidaan toteuttaa ympäristöön

liittyviä muutoksia, jotka vähentävät varjokuormaa ja parantavat paneelien tuotanto-olosuhteita. Tällaisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi esteiden poistaminen ja asennuspaikan optimointi, mikäli ne ovat teknisesti ja rakenteellisesti mahdollisia (IEA-PVPS, 2022; Rakennustieto RT 103756, 2025).

### 2.3.2 Korjaavat huoltotoimenpiteet

Korjaavat huoltotoimenpiteet eroavat ennakoivista siten, että ne toteutetaan voimalan käyttövuosien aikana ilmenevien odottamattomien ja suunnittelelmattomien vikojen yhteydessä. Tällaisia tilanteita aiheuttavat sekä ulkoiset että sisäiset tekijät, kuten vahingot, mekaaniset rikkoutumiset ja muut toimintahäiriöt. Tyypillisiä korjaavia toimenpiteitä ovat muun muassa paneelilasiin rikkoutuminen, tiivisteiden hapertuminen, korroosio sekä delaminaatio (PVEL, 2020 PV Module Reliability Scorecard, 22.07.2024). Sähköisiin komponentteihin liittyvät huollot ja vaihdot, kuten invertterien kulumisen aiheuttamat toimet, tulee sisällyttää osaksi aurinkovoimalan huoltosuunnitelmaa.

## 3 Yleiset ongelmat

### 3.1 Juurisyyt aurinkovoimaloiden ongelmiin

Aurinkovoimaloiden tekniset ongelmat johtuvat yleisimmin joko valmistusvaiheen laatupoikkeamista tai asennuksen aikana tehdyistä virheistä. Vaikka paneelien tuotantoprosessit ovat viime vuosina kehittyneet merkittävästi ja valmistajien laadunvalvontaa on tehostettu, yksittäisiä komponenttivrheitä ilmenee edelleen. Tuotantopohjaisista virheistä aiheutuvat ongelmat voivat ilmetä vasta vuosien käytön jälkeen, tyypillisesti heikentyneenä energiatehona tai paneelin fyysisenä vaurioitumisena. Kansainvälisen PVEL:n (2020) vuosittainen luotettavuusraportti osoittaa, että valmistajien panostukset testaukseen ja tuotannon laadunhallintaan ovat vähentäneet merkittävästi paneelisiin liittyvien reklamaatioiden määrää. (PVEL, 2020 PV Module Reliability Scorecard, 22.07.2024)

Käytännön kenttäkokemusten ja laajojen kansainvälisten vikakartoitusten perusteella suurin osa järjestelmävikojen juurisyyistä liittyy asennuksen tai huollon toteutukseen. Puutteellisesti kiinnitetyt paneelit, epäyhtenäinen johdotus tai dokumentoimattomat muutokset voivat johtaa käyttökatkoksiin, tehonmenetyksiin tai laiterikkoihin. Näiden virheiden vaikutukset eivät aina ilmene välittömästi, vaan ne voivat heikentää järjestelmän suorituskykyä pitkällä aikavälillä sekä lisätä huoltokustannuksia. Huolellinen laadunvarmistus on siten keskeinen edellytys järjestelmän luotettavalle ja kustannustehokkaalle toiminnalle (Köntges et al., 2014; PVEL, 2020).

Aurinkopaneelien valmistuslaatu on pääosin korkea. Asiantuntijahaastattelujen perusteella arvioidaan, että keskimäärin noin yksi paneeli neljästäsadasta vaatii reklamaatiokäsittelyä (Pacheco, 2024). Vaikka tämä luku on kansainvälisesti vertaillen pieni, suurin osa teknisistä ongelmista kohdistuu kuitenkin järjestelmän muihin osiin – erityisesti inverttereihin. Invertterin luotettavuus vaikuttaa ratkaisevasti koko järjestelmän suorituskykyyn. Tutkimusten mukaan korkealaatuiset, niin sanotut Tier 1 -valmistajat tarjoavat keskimääräistä

kestävämpiä tuotteita, jotka sisältävät parempaa suojaustekniikkaa ja vianhallintaa. Tämä vähentää merkittävästi järjestelmäkatkosten ja laitevikaantumisten riskiä pitkällä aikavälillä. (Pacheco, 2024)

### 3.2 Asennuksen yleiset ongelmat

Aurinkopaneelien asennuksen yhteydessä laadulliset ongelmat voivat ilmetä muun muassa paneelien kiinnityksessä, sähköjohtojen riittämättömässä suojauksessa sekä invertterien epäoptimaalisessa sijoittelussa. Invertterin sijainti vaikuttaa merkittävästi sen pitkäaikaiseen suorituskykyyn ja käyttöikänsä. Ulkoasennukset altistavat laitteen suoraan ympäristötekijöille, kuten kosteudelle, lämpötilavaihteluille ja UV-säteilylle, mikä voi nopeuttaa komponenteissa tapahtuvaa vanhenemista ja vähentää laitteen luotettavuutta. Sisäasennus tarjoaa paremmat olosuhteet, mutta edellyttää hyvää ilmanvaihtoa ylikuumenemisen estämiseksi. (Bucher, Wandel & Joss, 2022).

Paneeleiden kiinnitys katolle luo itsessään mahdollisia ongelmakohtia jollei asennusta tehdä oikein ja määrättyllä tavalla. Näitä kohtia ovat paneelien kiinnikkeet ja kehyköt. Kehikon ja paneeleita yhdistävät kiinnikkeet voidaan ruuvata liian kiireelle tai vinoon, jolloin paneelien kehyksiin, että lasiin muodostuu ei suunniteltu painekohta, joka aiheuttaa mahdollisia halkeamia aurinkopaneelin rungossa tai lasissa. (PVPS IEA-PVPS T13-01:2014).

Lasin rikkoutuminen aiheuttaa ajan myötä suorituskyvyn heikkenemistä, sillä hapen ja vesihöyryn tunkeutuminen aurinkopaneelien (PV-moduulien) sisäosiin edistää kennojen ja sähköpiirien korroosiota. Lasin rikkoutumisen merkittävimpiin ongelmiin lukeutuvat sähköiset turvallisuusongelmat. Ensinnäkin rikkoutunut lasi heikentää moduulien eristystä, mikä on erityisen vaarallista kosteissa olosuhteissa. Toiseksi lasin rikkoutuminen aiheuttaa kuumapisteiden muodostumista, mikä johtaa moduulien ylikuumenemiseen. (PVPS IEA-PVPS T13-01:2014).

Asennusvaiheessa on kiinnitettävä huomiota aurinkopaneelien sähköiseen kytkentään, kuten johtojen asianmukaiseen kiinnittämiseen ja suojaukseen

sääolosuhteita vastaan. Paneelit liitetään sarjaan niin kutsutuiksi stringeiksi jännitteen nostamiseksi, ja suojadiodit (esim. bypass-diodit) sisältyvät paneeleihin komponenttina, eivät liitäntäkohtina. Nämä diodit auttavat ehkäisemään yksittäisten kennojen ylikuumenemista varjostustilanteissa. Diodien osalta on suositeltavaa käyttää valmistajien sertifoimia komponentteja, jotta yhteensopivuus ja luotettavuus säilyvät korkealla tasolla (Bhuiyan, 2024; Köntges et al., 2014)



Kuva 2. Yhteen liitetyt aurinkopaneelit, joissa käytetyt kiinnikkeet ovat peräisin samalta valmistajalta. Vasemmanpuoleinen vedonpoisto ei ole täysin kiristetty, mikä saattaa vaikuttaa rakenteen kestävyuteen ja turvallisuuteen.

Pikaliitin yhdistää aurinkomoduulit sähköisesti toisiinsa, sulakerasioihin, jatkojohtoihin, yhdistelyrasioihin ja invertteriin. Tämä komponentti on olennainen järjestelmän turvallisuuden ja luotettavan energiantuotannon kannalta. PV-alan tutkimuksessa on kuitenkin vain vähän kirjallisuutta pikaliittimien luotettavuudesta.

Useimmissa tapauksissa pikaliittimen aiheuttamia ongelmia ei pidetä PV-moduulien vikoina. Tyypillisiä vikoja syntyy, kun käytetään epätäsmällisesti

yhteensopivia pikaliittimiä eri tyyppien välillä tai kun pikaliittimet on liitetty jatkojohtoihin, sulakerasioihin, yhdistelyrasioihin tai invertteriin epätarkasti puristamalla asennuskohteessa. (Haque et al., 2019)

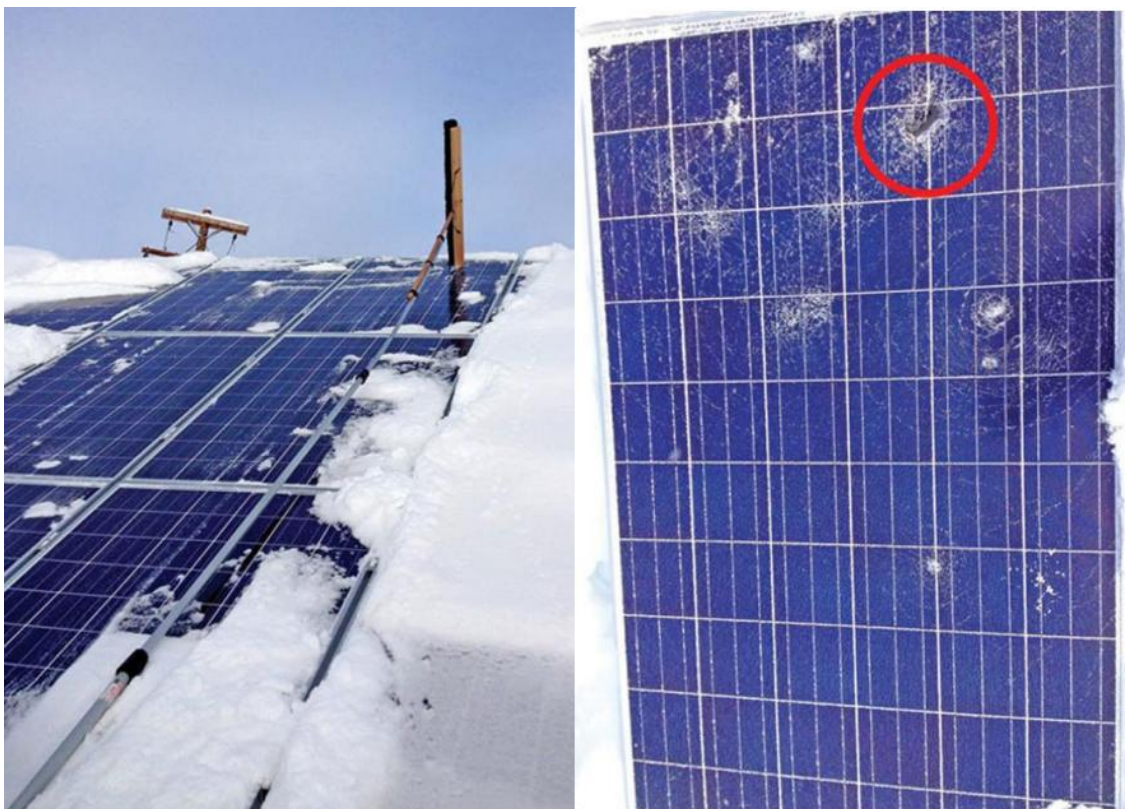
Työturvallisuus asennuksessa

Muita asennukseen luokiteltavia ongelmia kuuluu myös voimalan suunnittelussa tai asennuksen jälkeen tehdyn dokumentoinnin virheellisessä täyttämässä, siten ettei voimala vastaa tiedoiltaan samaa, kun se on luokiteltu paperilla, aiheuttaen yleistä hämmennystä asennus ja huolto henkilökunnassa.

### 3.3 Ilmaston aiheuttamat ongelmat

Aurinkopaneelien yleistyessä Suomessa on tärkeää huomioida ilmaston aiheuttamat haasteet, erityisesti lumen kertymisen vaikutus paneelien suorituskykyyn. Tämä korostaa järjestelmien tarkan mitoituksen, tuottoennusteiden ja käyttöiän arvioinnin merkitystä (PVPS IEA-PVPS T13-01:2014).

Talviolosuhteet, kuten vesihöyryn tiivistyminen lumihutaleiksi ja rakeiksi, vaikuttavat merkittävästi paneelien tuottoon, ja lumipeite heikentää niiden tehokkuutta entisestään. Paneelien lumesta ja jäädästä poistaminen voi aiheuttaa hankaumavaurioita, lasin halkeaminen tai pahimmassa tapauksessa paneelin rikkoutuminen (Andenæs et al. 2018).



Kuva 3. Välinpitämättömästi toteutettu lumenpoisto (Andenæs et al. 2018).

Muita haasteita ovat esimerkiksi siitepölykausi, referenssi kuva.1, joka alkaa helmikuussa ja jatkuu syyskuuhun asti, puiden, pensaiden ja kasvien siitepölyt kulkevat tuulivirran mukana ja peittää puiden ja pensaiden vieressä olevia paneeleita. Kaupunkiolosuhteissa, jossa on paljon polttomoottoriautoja autojen päästöistä ja katupölystä syntyy pölyä, joka voi peittää paneeleita. Sekä linnunjätteet, jotka majailevat katoilla tuottavat jätöstä (PVPS IEA-PVPS T13-01:2014)

## 4 Ohjeet ylläpitoon

### 4.1 Ylläpidon yleiset toimenpiteet ja parhaat käytännöt

Aurinkosähköjärjestelmän pitkäaikainen toimivuus ja energiantuotto eivät perustu yksinomaan huolelliseen suunnitteluun ja asennukseen, vaan keskeisessä asemassa on järjestelmällinen ja asianmukaisesti toteutettu ylläpito. Useissa tutkimuksissa on korostettu, että kunnossapidon laiminlyönti voi johtaa tuotannon tehon laskuun, laitevikojen yleistymiseen ja jopa turvallisuusriskeihin. Toisaalta hyvin suunnitellut ja vakioidut ylläpitokäytännöt voivat merkittävästi pidentää järjestelmän käyttöikää ja vähentää elinkaarikustannuksia. Tässä luvussa tarkastellaan aurinkovoimalan ylläpitoon liittyviä keskeisiä tehtäviä, vastuunjakoja ja käytännön menettelyitä, jotka yhdessä muodostavat järjestelmän tehokkaan kunnossapitomallin.

Ylläpitoa koskevat ohjeistukset ovat pääsääntöisesti hyvin kattavia, mutta niiden käytännön toteutus riippuu ylläpidosta vastaavan henkilön osaamisesta sekä käytettävissä olevista resursseista. Sähkötekniisiä valmiuksia edellyttävät tehtävät, kuten aurinkovoimalan kytkentöihin liittyvät työvaiheet ja sähköisten komponenttien huoltotoimenpiteet, tulee suorittaa asianmukaisen pätevyyden omaavan henkilön toimesta. Suomessa tämä tarkoittaa S-pätevyyttä edellyttäviä sähköitä, jotka kuuluvat vain valtuutetulle sähköalan ammattilaiselle (Rakennustieto RT 103756, 2025).

Parhaat käytännöt muodostuvat yleispätevistä ohjeistuksista ja standardoiduista toimintamalleista, jotka varmistavat huollon tehokkuuden ja turvallisuuden. Organisaatiotasolla tämä tarkoittaa selkeää vastuunjakoja, jossa nimetty henkilö vastaa voimalan ylläpidosta sekä huoltotöiden koordinoinnista ja seurannasta. Tämä vastuuhenkilö voi olla esimerkiksi rakennuksen huollosta vastaava asiantuntija. Keskeistä on varmistaa, että voimalan kunto ja toiminnallinen tila tunnetaan ja niitä seurataan järjestelmällisesti.

Aurinkopaneelien puhdistus ja huolto toteutetaan pääsääntöisesti passiivisesti, hyödyntäen luonnollisia sääolosuhteita, kuten sadetta, lian ja siitepölyn poistamiseen.

#### 4.2 Ylläpidon tarkistuslista ja huolto-ohjeet

Ylläpidon tarkistuslista tulee laatia voimalan koon sekä asennuksessa käytettyjen menetelmien mukaisesti. Tarkistuslistan sisältöä suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon esimerkiksi aurinkopaneelien kiinnitystapa, kuten ovatko paneelit kiinnitetty reunoistaan vai perinteisesti runkoon.

Erityisesti reunakiinnitteiset paneelit edellyttävät huollossa talviaikaan erityistä huomiota, sillä niiden päälle kertyvän lumen paino voi aiheuttaa merkittävää kuormitusta. Jos kuormitus ylittää paneelin suunnitellun kantokyvyn, tämä voi johtaa kantavan rakenteen stressaantumiseen ja edelleen paneelin vaurioitumiseen, kuten vääntymiseen tai lasin rikkoutumiseen. Näiden riskien minimoimiseksi on huolto-ohjelmassa huomioitava lumen poisto ja kuormituksen hallinta asianmukaisilla menetelmillä.

Huollon yhteydessä on myös tärkeää huomioida muut ympäristön aiheuttamat haasteet, kuten siitepölyn, lehtien ja muiden ilman epäpuhtauksien kertyminen paneelien pinnalle. Näiden lisäksi huoltotoimenpiteisiin tulisi sisällyttää paneelien rakenteellisen kunnan tarkastus, mukaan lukien kiinnikkeiden tiukkuuden varmistaminen.

Kiinnikkeiden kireyden tarkistaminen on erityisen tärkeää, sillä ajan myötä luonnonilmiöt, kuten tuuli, lämpötilanvaihtelut ja mahdolliset tulipalot, voivat heikentää kiinnityksen lujuutta. Löysät kiinnikkeet voivat aiheuttaa paneelien irtoamisen tuulen nostovoiman vaikutuksesta, mikä ei ainoastaan vaaranna aurinkosähköjärjestelmän toimintaa, vaan myös lisää riskiä ympäröivälle alueelle. Säännöllinen kiinnikkeiden tarkastus ja kiristäminen on siten keskeinen osa turvallista ja kestävästä järjestelmän ylläpitoa.

Kokonaiskatsaus voimalan kunnosta on tärkeä toteuttaa muiden huoltotöiden kanssa. Paneelien lämpökamera kuvaus, kuten dronin kanssa. Saa hyvän yleiskuvan aurinkopaneelien kunnosta, koska jätökset ja peittymät näkyvät lämpötilaerona paneelin pinnalla, jos paneeli on toimiva.

Taulukko 1. Aurinkovoimalan tarkistusvastuu

<i>Tarkistuslista</i>	<i>Maaliko</i>	<i>Sähköasentaja</i>	<i>Tarkistusväli</i>
<i>Paneelien visuaalinen tarkistus</i>	Voi tehdä katselmuksen, muttei koskea	Tarvittaessa vahvistus analyysissä	Kuukausittainen
<i>Kiinnikkeiden silmämääräinen tarkastus</i>	Tarkistaa näkyvät löysät kiinnikkeet	Kiristää ja vaihtaa kiinnityksiä	1–2 kertaa vuodessa
<i>Lumen ja roskien poistaminen</i>	Voi tehdä ei-jännitteisiltä alueilta	Tarvittaessa poistaa sähköasennusten läheltä	Tarvittaessa (talvi)
<i>Invertterin toiminnan tarkistus</i>	Ei saa avata tai käsitellä	Tarkistaa jännitteiset osat, yhteydet ja hälytykset	Vuosittain
<i>Sähkölaitosten ja kaapeleiden tarkistus</i>	Ei sallittu	Vain sähköalan ammattilainen	Vuosittain
<i>Termograafinen tarkistus (esim. dronella)</i>	Voi operoida, jos koulutettu laitteistoon	Analysoi sähköisten ongelmien merkit	Vuosittain / tarvittaessa
<i>Vikatilanteiden ensihavainto ja ilmoitus</i>	Voi ilmoittaa poikkeamista	Vastaa teknisestä selvityksestä	Tarvittaessa
<i>Tulipalo ja muu hätätilanne</i>	Ilmoittaa, varmistaa henkilöturvallisuus, ei sammuttaa sähköjä	Irrottaa jännitteet turvallisesti, arvioi vauriot	Hätätilanne
<i>Paneelin rikkoutuminen</i>	Varoittaa, eristää alueen, ilmoittaa asiantuntijalle	Arvioi vauriot, suorittaa turvalliset purku-/huoltotoimet	Tarvittaessa
<i>Sähköjärjestelmän toimintahäiriö tai oikosulku</i>	Ei saa tehdä korjaavia toimenpiteitä	Selvittää vian ja suorittaa korjaukset	Häiriön ilmetessä

### 4.3 Alihankinta ja sen hallinta aurinkovoimalahankkeissa

Alihankinta muodostaa keskeisen osan kiinteistöalan teknisiä investointeja ja ylläpidon järjestämistä, erityisesti silloin kun tarvitaan erikoistunutta osaamista, jota ei ole tarkoituksenmukaista ylläpitää omassa organisaatiossa. Tällaisia tilanteita esiintyy usein muun muassa aurinkosähköjärjestelmien, LVI-tekniikan tai kiinteistöautomaation asennus- ja huoltoprojekteissa (Bertoldi et al., 2011; Levitt, 2013; Talamo & Atta, 2019).

Alihankkijoiden hallinta edellyttää toimivia prosesseja ja selkeää roolijakoa. Kiinteistöpäällikön vastuu ulottuu käytännön valvontaan ja laadun varmistamiseen: hänen tehtävänä on huolehtia siitä, että palvelut toimitetaan sopimuksen mukaisesti, oikea-aikaisesti ja sovitulla laatutasolla. Tämä edellyttää teknisen sisällön tuntemusta, mutta myös hyviä projektinhallinnan ja viestinnän valmiuksia eri osapuolten välillä (Singh et al., 2009).

Osto-organisaation rooli korostuu hankintaketjun suunnittelussa ja toteutuksessa, johon kuuluvat toimittajavalinnat, kilpailutus, sopimushallinta sekä riskien arviointi. Alihankintasuhteissa keskeisiä riskejä ovat toimitusvarmuus, resurssien riittävyys ja laatuvariaabelit, erityisesti teknisesti vaativissa projekteissa (Akinwusi, 2024; Zhang, 2015). Toimiva alihankintamalli edellyttää luottamusta, avointa viestintää ja selkeästi määriteltyjä vastuita, joiden avulla varmistetaan sujuva yhteistyö ja projektin tekninen, laadullinen ja taloudellinen onnistuminen. Tämä korostuu hankkeissa, joissa toimii useita aliurakoitsijoita ja joissa puutteellinen tiedonkulku voi heikentää työn laatua ja etenemistä (Lai et al., 2006).

Alihankintaprosessi voidaan jäsentää selkeisiin vaiheisiin, mikä helpottaa kokonaisuuden hallintaa. Taulukossa 1 esitetään aurinkovoimalan ylläpidon kannalta keskeiset vaiheet, vastuut ja huomioitavat näkökohdat.

Taulukko 2. Alihankintaprosessin vaiheet aurinkovoimalahankkeessa

<i>Vaihe</i>	<i>Kuvaus</i>	<i>Vastuutoimija</i>	<i>Tarkennuksia ja esimerkkejä</i>
<i>Tarpeen määrittely</i>	Selvitetään, mitä palvelua tarvitaan ja millä vaatimuksin	Kiinteistöpäällikkö, suunnittelu	Tekninen vaatimus, budjetti, riskianalyysi, elinkaaritavoitteet
<i>Markkinakar toitus</i>	Tunnistetaan potentiaaliset alihankkijat ja markkinariskit	Osto-organisaatio	Toimittajien esikarsinta, taustaselvitykset, toimittajaluettelot
<i>Toimittaja-arviointi</i>	Arvioidaan ehdokkaiden kyvykkyys ja luotettavuus	Osto + kiinteistöpäällikkö	Sertifikaatit, referenssit, resurssit, vastuut
<i>Sopimusten laatiminen</i>	Määritellään palvelusisältö, aikataulut, laatuvaatimukset ja vastuunjako	Osto-organisaatio, juridiikka	YSE 1998, palvelutasot, takuut, sanktioit
<i>Aloitus ja työnvalmist elu</i>	Sovitaan aloituskäytännöistä ja viestinnästä	Kiinteistöpäällikkö, valvonta	Turvallisuusohjeet, työmaakäytännöt, tiedottaminen
<i>Toteutus ja seuranta</i>	Työnsuoritus ja sen valvonta sovitun mukaisesti	Alihankkija, valvoja	Työmaakäynnit, valokuvadokumentointi, poikkeamaraportit
<i>Vastaanotto ja tarkastus</i>	Tarkastetaan ja dokumentoidaan lopputulos ennen luovutusta	Kiinteistöpäällikkö	Loppudokumentit, koekäyttö, käyttäjien perehdytys
<i>Arviointi ja palaute</i>	Arvioidaan toimittajien suorittaminen ja mahdolliset kehitystarpeet	Osto + kiinteistöpäällikkö	Jälkiarviointi, palaute, sopimuksen uusimisen arviointi

#### 4.4 Hankintastrategia ja laadunhallinta alihankinnassa

Alihankinnan suunnittelu kannattaa perustaa selkeään strategiseen viitekehykseen, joka tukee päätöksentekoa ja riskien hallintaa. Tässä tarkoituksessa Kraljicin hankintamatriisi (1983) toimii hyödyllisenä työkaluna. Matriisin avulla hankinnat luokitellaan niiden liiketoimintavaikutusten ja markkinariskien perusteella neljään luokkaan: rutiini-, vipu-, pullonkaula- ja strategiset hankinnat. Esimerkiksi aurinkovoimaloiden sähkötekniinen ylläpito voidaan tulkita strategiseksi hankinnaksi, sillä sen vaikutus järjestelmän käyttövarmuuteen on suuri ja pätevien toimittajien saatavuus voi olla rajattua erityisesti syrjäisillä alueilla (Wilmer, 2024; van de Sande, 2024).

Toinen keskeinen malli on van Weelenin hankintaprosessi (2005), joka jäsentää alihankinnan etenemisen vaiheittain: tarvemäärittelystä toimittajan valintaan, sopimuksen laadintaan ja lopulta toiminnan seurantaan ja arviointiin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että aurinkovoimalan huoltopalvelun hankinta aloitetaan huolellisella tarpeen ja riskien määrittelyllä. Tämän jälkeen arvioidaan mahdolliset toimittajat esimerkiksi referenssien, sertifikaattien ja aiempien näyttöjen perusteella, sovitaan palvelusisällöistä ja laaditaan selkeät vastuunjaot sekä seurantamenettelyt (Paldanius, 2023; Andersson & Lindblad, 2023).

Tutkimusten mukaan onnistunut hankinta vaatii selkeän strategian, mutta myös panostusta kumppanuuksien pitkäjänteiseen kehittämiseen. Ulkoistettujen palvelujen hallinta, etenkin teknologisesti vaativissa ympäristöissä kuten aurinkovoimaloissa, perustuu vahvasti luottamukseen, avoimuuteen ja laadun jatkuvaan seurantaan (Setiyowati & Zemmy, 2021). Näin syntyy kestävä toimittajasuhde, joka tukee järjestelmän luotettavuutta ja elinkaaritehokkuutta.

## 5 Yhteenveto

### 5.1 Tutkimukset tavoitteet ja tausta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, millaisia vaatimuksia aurinkovoimalat asettavat osaksi kiinteistöjen ylläpitoa ja teknistä hallintaa. Tarkastelu kohdistui järjestelmien asennuslaatuun, elinkaaren aikaiseen kunnossapitoon ja alihankintojen hallintaan. Työssä painotettiin kiinteistöpäällikön ja osto-organisaation näkökulmia, sillä heidän roolinsa korostuvat sekä järjestelmän teknisessä toimivuudessa että yhteistyön koordinoinnissa urakoitsijoiden kanssa.

Tutkimuksessa havaittiin, että aurinkovoimaloiden onnistunut toteutus edellyttää teknisten ratkaisujen lisäksi hallinnollisia ja organisatorisia valmiuksia. Asennusvaiheen laadulla sekä dokumentoinnin ajantasaisuudella on keskeinen merkitys järjestelmän käyttövarmuuden ja elinkaaren hallinnan kannalta.

### 5.2 Keskeiset havainnot

Tässä työssä esitetyt havainnot perustuvat Senaatti-kiinteistöjen Varsinais-Suomen alueen kiinteistökohteissa tehtyihin käytännön tarkasteluihin aurinkosähköjärjestelmien asennuksesta ja ylläpidosta. Empiirinen aineisto muodostui visuaalisista havainnoista sekä huolto- ja asennusdokumenttien tarkastelusta, joita hyödynnettiin teoreettisen viitekehyksen rinnalla järjestelmien toimivuutta ja riskejä arvioitaessa.

Dokumentaation merkitys korostui järjestelmän koko elinkaaren aikana, sillä puutteellinen dokumentointi vaikeuttaa sekä teknistä arviointia että tehokasta ylläpitoa. Tämän vuoksi muutokset ja poikkeamat tulee kirjata ajantasaisesti teknisiin asiakirjoihin.

Lisäksi havaittiin, että kohdekäynnit ennen asennusta tukevat onnistunutta toteutusta, koska niiden avulla voidaan tunnistaa rakenteellisia ja ympäristöllisiä

tekijöitä, kuten varjostuksia, jotka vaikuttavat voimalan sijoitteluun ja tuottotehokkuuteen. Aurinkovoimalan liittäminen osaksi kiinteistön huoltosuunnitelmaa selkeyttää vastuita ja tukee ennakoivaa kunnossapitoa.

Ylläpidossa kiinteistöhoitajan ja sähköasentajan välinen työnjako todettiin toimivaksi. Kiinteistöhoitaja vastaa visuaalisesta tarkkailusta, kun taas sähköasentaja toteuttaa tekniset tarkastukset, ja tarkistuslistaan perustuva seuranta tukee järjestelmän luotettavuutta.

### 5.3 Asennuksen merkittävimmät huomiot

Erityisesti vanhemmassa aurinkovoimalakohteessa tehdyt havainnot toivat esiin useita kriittisiä asennuspuutteita, kuten puutteelliset kiinnikkeet tuulenojauuspelleissä, löysät ruuvit ja siistimättömän johdotuksen. Tällaiset virheet voivat heikentää järjestelmän mekaanista vakautta, sähköturvallisuutta ja lyhentää käyttöikä.

Tuulensuojien merkitys korostuu erityisesti kelluvissa kattoasennuksissa, joissa tuulen aiheuttama noste voi vaarantaa paneelien kiinnityksen. Painopohjaisten järjestelmien osalta myös painojen sijoittelu ja määrä vaikuttavat rakenteen kestävyteen ja pitkäaikaiseen toimivuuteen.

Asennuksen onnistuminen edellyttää yhtenäistä toteutusta, joka saavutetaan rajatulla urakoitsijamäärällä, selkeällä vastuunjaolla ja dokumentoidulla laadunhallinnalla. Työturvallisuuden varmistamiseksi asentajien pätevyyksien voimassaolo tulee tarkistaa ennen työn aloittamista.

Ostajan vastuu korostuu järjestelmän lopputarkastuksessa, jossa arvioidaan paneelien kunto, kiinnikkeiden lujuus ja järjestelmän toimivuus. Erityisesti pikaliittimien yhteensopivuus ja johdotuksen asianmukainen kiinnitys vaikuttavat merkittävästi järjestelmän pitkäaikaiseen toimintavarmuuteen ja turvallisuuteen.

## 6 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön keskeinen tavoite oli tuottaa kokonaisvaltainen kuva aurinkovoimaloiden roolista osana kiinteistön teknistä ylläpitoa. Työ osoitti, että aurinkosähköjärjestelmän tekninen luotettavuus ei riipu ainoastaan komponenttien laadusta, vaan ratkaisevassa roolissa ovat myös asennuksen ja huollon käytännön toteutus, dokumentointi sekä alihankintaan liittyvät hallintakäytännöt silloin, kun ulkoistettu, toimintamalli otetaan käyttöön.

Työssä yhdistettiin sekä kirjallisuuteen perustuva viitekehys että käytännön havaintoihin pohjautuva aineisto, mikä mahdollisti monipuolisen tarkastelun aiheesta. Kenttätyön kautta nousi esiin käytännön haasteita, kuten asennusvirheitä ja dokumentoinnin puutteita, joita ei välttämättä hahmoteta pelkän teorian pohjalta. Tämä toi esiin sen, kuinka tärkeää on yhdistää tekninen osaaminen huolellisen projektinhallintaan, erityisesti silloin kun hankkeessa toimii useita eri osapuolia.

Lisäksi havaittiin, että vaikka aurinkopaneelien valmistusteknologia on jo kypsää, suurin osa ongelmista syntyy asennus- tai huoltovaiheessa. Tämä korostaa laadunvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon merkitystä, mikä jäi osin aliarvioiduksi monissa tarkastelluissa kohteissa. Opinnäytetyön kautta syntyi selkeä kuva siitä, että kiinteistöpäälliköiden ja osto-organisaation välinen roolitus kaipaa nykyistä selkeämpiä toimintamalleja erityisesti alihankinnan suhteen.

Työprosessin edetessä oma ymmärrykseni aurinkosähköjärjestelmien elinkaaresta sekä kiinteistönhoidon teknisistä ja organisatorisista erityispiirteistä syveni merkittävästi. Näiden asioiden yhdistäminen samaan tarkastelukehykseen osoittautui haastavaksi, mutta samalla avautui selkeämmin, miten tekninen toteutus, operatiivinen huolto ja hallinnollinen vastuunjako kytkeytyvät toisiinsa kiinteistön elinkaaren eri vaiheissa ja miten kriittistä on tarkastella niitä yhdessä, ei erillisinä osioina.

## Lähteet

Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., ... & Friesen, G. (2014). "Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field." Report IEA-PVPS T13-01:2014. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS).

International Energy Agency (IEA) Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS). (2022). "IEA-PVPS Report T13-25:2022.

Pacheco, R. (2024). Henkilökohtainen asiantuntijahaastattelu / 1Komma5 Finland. Haastattelupäivä: 09.09.2024.

Bucher, C., Wandel, J. & Joss, D., 2022. Life Expectancy of PV Inverters and Optimizers in Residential PV Systems. In: Proceedings of WCPEC-8 (EU PVSEC).

Croce, P., Formichi, P. & Landi, F. (2021). Extreme ground snow loads in Europe from 1951 to 2100. *Climate*, 9(9), 133.

Kopp, G. A., Banks, D., & Gavanski, E. (2012). Wind loads on rooftop solar photovoltaic arrays and their dependence on module inclination. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 111, pp. 40–52.

Rakennustieto RT 103756. (2025). Kiinteistön Aurinkosähköjärjestelmät.

Tran, K. T., & Le, N. T. T. (2024). Predicting the intention to install solar photovoltaic panels in emerging markets. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*.

Bhuiyan, M.A.S., 2024. Modeling Half-Cut Photovoltaic Modules with Bypass Diodes Under Various Shading Conditions. PhD thesis. Purdue University.

Kabalıcı, E. (2020). Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods. *Solar Energy*, 206, 1074–1090.

Shawky, A., Ahmed, M., Orabi, M. & Aroudi, A.E. (2020). Classification of three-phase grid-tied microinverters in photovoltaic applications. *Energies*, 13(11), 2929.

Ikkurti, H.P. & Saha, S. (2015). A comprehensive techno-economic review of microinverters for Building Integrated Photovoltaics (BIPV). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, pp.1405–1415.

SFS-EN 1991-1-6. (2005). Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-6: General actions – Snow loads.

Tammelin, B., Laurila, T., & Sääntti, K. (2013). Wind loads on buildings and structures: Practical applications for engineers. *Building Science Reports*, 67, pp. 99–115.

Thevenard, D. & Pelland, S. (2013). Estimating the loss of photovoltaic output due to snow cover. *Solar Energy*, 92, pp. 408–414.

Wacklin, V. (2024). Mekaaniset asennukset aurinkosähköjärjestelmissä: harjakattoasennukset. LUT University Repository.

S. Harb, M. Kedia, H. Zhang and R. S. Balog, "Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system — A comprehensive study," 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, USA, 2013.

M. W. Rowell, S. G. Daroczi, D. W. J. Harwood and A. Gabor, "The Effect of Laminate Construction and Temperature Cycling on the Fracture Strength and Performance of Encapsulated Solar Cells," in 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, USA, 2018.

De Beer, T. (2025). The Solar Power of Pricing: Does Electricity Pricing Policy Drive Residential Solar Demand?

Belloni, E., Ferrucci, T., & Fioriti, D. (2024). Renewable Energy Communities Equipped With Electric Mobility Infrastructures: Energy and Economic Modeling With Flexible Market Data Conditions. *IEEE*.

E. Andenæs, B. P. Jelle, K. Ramlo, T. Kolås, J. Selj and S. E. Foss, "The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells," *Solar Energy*, vol. 159, pp. 318-328, 2018.

Ilse, K., Micheli, L., Figgis, B., Lange, K., Daßler, D., Hanifi, H., Wolfertstetter, F., Naumann, V., Hagendorf, C., Gottschalg, R., & Bagdahn, J. (2019). Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. *Joule*, 3, 2303–2321.

Guingane, T. T., et al. (2024). Determination of the Performance Scores of a Photovoltaic Power Plant in Burkina-Faso. *Advances in Materials Physics and Chemistry*.

Altunç, B., & Minaz, M. R. (2024). Modeling and Performance Analysis of a Rooftop Photovoltaic System for Batman: Impact of Seasonal Shading on Energy Efficiency. *Journal of Engineering and Technology*.

Ali, E. M. & Mohamed, W. M. (2024) 'A Powerful Technique Associated with Grey Wolves Optimization Algorithm to Track the PV Modules' Global Maximum Power During Partial Shading', *International Telecommunications Energy Conference*.

Haque, A., Bharath, K. V. S., & Khan, M. A. (2019). Fault diagnosis of photovoltaic modules. *Energy Science & Engineering*.

Bertoldi, P., Rezessy, S., & Boza-Kiss, B. (2011). A snapshot of the European energy service market in 2010 and policy recommendations to foster a further market development. *Energy Policy*, 39(10), 6190–6199.

Levitt, J.D. (2013). *Facilities Management: Managing Maintenance for Buildings and Facilities*. McGraw-Hill.

Talamo, C. & Atta, N. (2019). *Invitations to Tender for Facility Management Services*. Springer.

Singh, J., Limaye, D.R., Henderson, B., & Shi, X. (2009). *Public Procurement of Energy Efficiency Services: Lessons from International Experience*. World Bank.

Akinwusi, D. (2024). *Comparative Analysis of Sustainable Facility Management Strategies*. Theseus.fi.

Zhang, X. (2015). Green real estate development in China: State of art and prospect agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1–13.

Lai, J.H.K., Yik, F.W.H., & Chan, K.T. (2006). Problems with specialist subcontracting in the construction industry. *Building Services Engineering Research and Technology*, 27(4), 261–271.

Kraljic, P. (1983). Purchasing must become supply management. *Harvard Business Review*, 61(5), 109–117.

Wilmer, W. (2024). The Future of Global Sourcing: A Buyer's Perspective. University of Twente.

van de Sande, J. (2024). Securing the Energy Transition: A Comprehensive Exploration of Supply Chain Risks. ISCTE University Institute of Lisbon.

Van Weele, A. J. (2005). Purchasing and Supply Chain Management: Analysis, Strategy, Planning and Practice. 4th ed. Cengage Learning.

Paldanius, I. (2023). Supplier Management with a Contract in Project Purchasing. University of Vaasa.

Andersson, O. & Lindblad, F. (2023). What is the feasibility of using Power Purchase Agreements as a green electricity sourcing method for a large industrial company? A Case Study. Uppsala University.