



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KRISTA JAATINEN
AURINKOVOIMALOIDEN RAKENTAMISEN TEHOSTAMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Arto Saari
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Rakennetun ympäristön tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 9. maaliskuuta 2016

TIIVISTELMÄ

KRISTA JAATINEN: Aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostaminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 92 sivua, 14 liitesivua

Kesäkuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennustuotanto ja -talous

Tarkastaja: professori Arto Saari

Avainsanat: aurinkoenergia, aurinkovoimala, aurinkosähkö, rakentaminen

Aurinkoenergia on globaalisti nopeinten kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto ja sen rakentaminen on yleistynyt myös Suomessa viime vuosina. Aurinkovoimaloiden paneeli- ja sähkötekniikasta on saatavissa paljon tietoa, mutta rakennustekniikasta hyvin vähän. Tästä johtuen aurinkovoimaloiden rakentamiseen haluttiin perehtyä tarkemmin.

Aurinkovoimaloiden rakentamista lähdettiin kokonaistaloudellisesti tehostamaan analysoimalla muutamia Helenin aurinkovoimalaprojekteja, selvittämällä suunnitteluvaihetta helpottavia tyyppiratkaisuja sekä pyrkimällä nopeuttamaan soveltuvien kohteiden arviointia. Esimerkkiprojekteissa erityisesti soveltuvien kohteiden arviointi ja toteutussuunnittelu ovat aiheuttaneet suunniteltua enemmän kustannuksia, joten näihin vaiheisiin haluttiin selvennystä.

Aiheeseen liittyen tehtiin kattava kirjallisuusselvitys ja muutamia asiantuntijahaastatteluita. Pitkittäistutkimuksen avulla vertailtiin esimerkkiprojekteja, jonka lisäksi budjettitarjouskyselyllä tuotiin esille eri asennustapojen kustannusten eroavaisuuksia. Toimintatutkimus näkyy myös osittain tuloksissa, sillä tutkija työskentelee esimerkkiprojekteissa.

Soveltuvien kohteiden arviointi osoittautui odotettua haasteellisemmaksi, koska aurinkovoimaloiden tuomien lisäkuormien yhteisvaikutuksen määrittämiseen ei toistaiseksi ole suunnittelustandardeja. Lisäkuormien yhteisvaikutuksen suhde rakennusalan kantavuuteen esitetään rakennettavuusselvityksessä, jonka sisältö määrittää kohteen rakennusteknisen soveltuvuuden.

Tyyppiratkaisut määritettiin katon kantavuuden mukaan. Heikosti kantava katto vaatii aurinkosähköjärjestelmälle pollariasennuksen, kun taas vankalle loivalle katolle voidaan asentaa kellova järjestelmä. Seinille asennustapa on aina mekaaninen kiinnitys. Maa-asennuksista kelluva ratkaisu voidaan asentaa tiiville ja tasaiselle maalle, kairattava pollariasennus pehmeälle maalle ja kaivantoihin tehtävä pollariasennus kiviselle tai muutoin vahvat perustukset vaativalle aurinkosähköjärjestelmälle.

Aurinkovoimaloiden asennustavoista edullisin on katolle tehtävä kelluva-asennus, seuraavaksi mekaaninen asennus, seinäasennus, maalle kaivantoihin tehty pollariasennus ja lopuksi katon pollariasennus. Asennustapojen kustannustietojen lisäksi projektin kokonaistaloudellisen tehostamisen avuksi laadittiin rakennuttajan muistilista, joka helpottaa soveltuvien kohteiden arviointia, koko toteutussuunnittelua sekä toteuttamisvaihetta. Myös suuntaa antava tehtäväverkko koko aurinkovoimalaprojektista edesauttaa aikataulun hallintaa, jotta viivästyksistä muodostuvia lisäkustannuksia ei syntyisi.

Tutkimusten tulosten perusteella laadittiin kehitysehdotuksia tulevaisuuden aurinkovoimalaprojektien onnistumiseksi niin rakennusteknisesti kuin taloudellisesti. Kokonaisuudessaan tutkimuksen aikana saatiin paljon tietoa, mutta uudella alalla on paljon myös tutkittavaa. Näistä merkittävimpiä ovat rakenteiden kestävyysvarmistaminen ja aurinkosähköjärjestelmän tuoman lisäkuorman laskennan selkeyttäminen.

ABSTRACT

KRISTA JAATINEN: Intensifying of the building of solar power plants

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 92 pages, 14 Appendix pages

June 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Construction management and economics

Examiner: Professor Arto Saari

Keywords: solar energy, solar power plant, building, pv-system

Solar is the fastest-growing source of renewable energy and it has also become common in Finland during the last few years. There is much information available on the panel technique and electrical engineering of solar power plants but very little on construction engineering. Due to this the study involves knowledge of solar power plants' building in more detail.

To reach the goal of intensifying the building of solar power plants a few example projects from Helen were analyzed, typical assembly solutions were clarified and the evaluation of a suitable targets was accelerated. In the example projects, especially the evaluation of the suitable building objects and implementation planning have caused more costs than planned so clarification of these stages were wanted.

Research included an extensive literature report and the interviews of a few experts. Example projects were analyzed by a longitudinal study and with the help of budget competitive bidding the costs of different ways of assembly were compared. Activity analysis is also partly seen in the results because the researcher works in the example projects.

The evaluation of suitable targets proved to be more challenging than expected because there are no standards for planning and calculations of additional loads that pv-systems brings to mounting tray. Joint effect of additional loads and the bearing capacity of the mounting trays should be presented in the building report which determines the structural suitability of the building object.

The typical assembly solutions were determined according to the bearing capacity of the roof. A roof in which the bearing capacity is low requires bollard installation, whereas on a steady mild roof, a floating pv-system can be installed. To the walls the installation method is mechanical fastening. Floating solution can be also installed on the ground if the soil is heavy and the surface flat. Drilled bollard installation is suggested to soft soil and excavation bollard installation to stony ground or else to the pv-system that requires strong foundations.

The cheapest assembly solution for solar power plant is floating installation. Next one is mechanical installation, wall installation, ground excavation bollard installation and the most expensive one is bollard installation of the roof. In addition of the costs of different assembly solutions comparison, a check list of the constructor was made. The check list facilitates the evaluation of the suitable building objects, the implementation planning and installation stage. All together with help the economical intensifying of the project. There is also a suggestive task network diagram about solar projects which eases the control of the schedule so delays would not create extra costs.

On the basis of the study results improvement suggestions were drawn up for structurally and economically successful future solar power plant project. Much information was documented during the study but there still are a lot of researchable subjects in the new solar field. The most significant among these are ensuring the durability of the structures and the clarification of the calculation of the additional load brought by the pv-system.

ALKUSANAT

Tämän työn tarkoituksena oli esittää keinoja aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostamiseksi ja Helenin aurinkovoimalaprojektien toteutuksen kehittämiseksi. Ala nousee kovaa vauhtia Suomessa ja muualla maailmalla, joten toivon tämän työn sisällön auttavan niin Heleniä kuin muitakin alalla toimijoita saavuttamaan laadukkaita lopputuloksia aurinkovoimaloiden rakentamisessa ja alan eteenpäin viemisessä. Työ tehtiin Helenin toimeksiannosta Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustuotannon ja –talouden tiedekuntaan.

Haluan kiittää Atte Kalliota erittäin mielenkiintoisesta aiheesta, työn ohjauksesta ja ajatusten jakamisesta koko energia-alaa koskien. Ville Keräselle suuri kiitos mahtavasta esimiestyöstä ja Aku Kimarille päiviä keventäneistä keskustelutuokioista ja kaikista kärsivällisistä vastauksista hölmöimpiinkin kysymyksiini koskien aurinkovoimaloiden sähkötekniikkaa. Unohtaa ei tietenkään saa SaR:issa istuvia kollegojani, joiden luoman viihtyisän työympäristön vuoksi on joka aamu ollut mukavaa tulla töihin. Engijengi you rock!

Ohjaajalleni Arto Saarelle iso kiitos ohjauksesta, palautteista ja aina niin positiivisesta suhtautumisesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Suuri kiitos myös vanhemmilleni, jotka tsemppasivat ja mahdollistivat opiskeluni sekä hyväksyivät sen mukana tulleisiin ulkomaan opiskelu- ja työmahdollisuuksiin tarttumisen.

TTY on antanut paljon näiden vuosien aikana, joista yhtenä tärkeimpänä lukuisat ystävät ja erityisesti heistä parhain, Jasmin. Ilman häntä olisi tämä 6 vuotinen taival ollut aika paljon tylsempi ja tyhjempi.

Työn omistan 96-vuotiaalle mummilleni, joka on aina kannustanut ja sivussa salaa odottanut saavansa sukuun diplomi-insinööriin. Tässä se nyt pian on!

Helsingissä, 20.6.2016

Krista Jaatinen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 1.1 | Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma..... | 1 |
| 1.2 | Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset..... | 3 |
| 1.3 | Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus..... | 5 |
| 2. | KIRJALLISUUSSELVITYS | 6 |
| 2.1 | Aurinkovoimaloiden rakentaminen..... | 6 |
| 2.1.1 | Yleistä | 6 |
| 2.1.2 | Ennen rakentamista tehtävät selvitykset | 8 |
| 2.1.3 | Rakennusaluestat | 10 |
| 2.2 | Rakennustekniikka | 17 |
| 2.2.1 | Rakenteiden kestävyys | 17 |
| 2.2.2 | Vedeneristys..... | 24 |
| 2.3 | Määräykset ja standardit..... | 26 |
| 2.4 | Kunnossapito ja huolto..... | 30 |
| 2.5 | Asennustavat | 34 |
| 2.5.1 | Pollariasennus | 37 |
| 2.5.2 | Kelluva-asennus | 38 |
| 2.5.3 | Mekaanisesti kiinnitettävä asennus..... | 39 |
| 2.5.4 | Seinäasennus | 41 |
| 2.5.5 | Maa-asennus..... | 42 |
| 2.5.6 | Integroidut ratkaisut | 43 |
| 2.5.7 | Veden päälle asennettavat..... | 45 |
| 2.6 | Aurinkovoimalan rakentamisen kustannukset | 47 |
| 2.7 | Rakentamisen tulevaisuus | 51 |
| 2.8 | Yhteenveto | 52 |
| 3. | TUTKIMUS JA SEN TULOKSET | 56 |
| 3.1 | Esimerkkiprojektien esittely..... | 56 |
| 3.2 | Esimerkkiprojektien vertailu | 59 |
| 3.3 | Budjettitarjouskyselyn esittely | 61 |
| 3.4 | Budjettitarjouskyselyn tulokset..... | 62 |
| 3.5 | Tutkimuksen yhteenveto | 64 |
| 4. | KEHITYSEHDOTUKSET | 66 |
| 4.1 | Soveltuvien kohteiden arviointi | 66 |
| 4.1.1 | Olemassa olevat rakennukset..... | 67 |
| 4.1.2 | Uudet rakennukset..... | 69 |
| 4.1.3 | Maa-asennukset..... | 71 |
| 4.2 | Tyypiratkaisut..... | 71 |
| 4.3 | Kokonaistaloudellisuus | 72 |
| 4.4 | Kehitysehdotusten yhteenveto..... | 74 |
| 5. | TULOSTEN ARVIOINTI | 76 |

| | |
|------------------------|----|
| 6. JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 81 |
| LÄHDELUETTELO..... | 83 |

LIITE 1: Rakennuttajan muistilista

LIITE 2: Etelä-Suomen kuntien lupakäytännöt koskien aurinkovoimaloiden rakentamista, sähköpostikyselyn kysymykset ja vastausten koontitaulukko

LIITE 3: Budjettitarjouskyselyn saatekirje ja vastaustaulukkopohja

LIITE 4: Aurinkovoimalaprojektin tehtäväverkko

LIITE 5: Haastattelumuistio, Aku Kimari

LIITE 6: Palaverimuistio, Ilpo Viita & Ville Keränen

KUVALUETTELO

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| Kuva 1. | <i>Uusiutuvien energialähteiden vuosittaiset tuotantopotentiaalit sekä rajallisten energialähteiden hyödynnettävissä olevat reservit (terawatti-vuosi). (Perez & Perez, 2009).....</i> | <i>2</i> |
| Kuva 2. | <i>Alueittaiset ennusteet aurinkosähkön tuotannon kasvusta (OECD/IEA, 2014, s. 21).....</i> | <i>3</i> |
| Kuva 3. | <i>Tutkimuksen tavoitteet.....</i> | <i>4</i> |
| Kuva 4. | <i>Tutkimuksen tavoitteet ja metodit.....</i> | <i>5</i> |
| Kuva 5. | <i>Aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentit (Rasinkoski, 2013).....</i> | <i>9</i> |
| Kuva 6. | <i>Loivien kattojen yleinen rakenne (Solar Power World, 2015, s. 12).....</i> | <i>12</i> |
| Kuva 7. | <i>Harjakaton rakenne-esimerkki (Ruukki, 2016).....</i> | <i>14</i> |
| Kuva 8. | <i>Yleisimpiä asuin-, toimisto- ja liikerakennusten ulkoseinärakenteita (RT 82-11006, 2010).....</i> | <i>15</i> |
| Kuva 9. | <i>Tuulikuormien vaikutusalueita (Wills et al., 2014, s. 13).....</i> | <i>20</i> |
| Kuva 10. | <i>Vuoden 2015 edistyneimpiä kiinnitystuotteita. (Muokattu lähteestä Solar Power World, 2016).....</i> | <i>25</i> |
| Kuva 11. | <i>Aurinkovoimaloiden rakentamiseen liittyvät määräykset ja ohjeet.....</i> | <i>26</i> |
| Kuva 12. | <i>Neljän pisteen reunakiinnitys Suomen lumiolosuhteisiin (Finnwind Oy, 2013, s. 7).....</i> | <i>35</i> |
| Kuva 13. | <i>Rivivälin laskentaan vaikuttavat kulmat (NIBE, 2011, s. 37).....</i> | <i>36</i> |
| Kuva 14. | <i>Pollariasennuksen kiinnittyminen yläpohjan kantavaan rakenteeseen (Finnwind Oy, 2013, s. 14).....</i> | <i>37</i> |
| Kuva 15. | <i>Kivikon pollariasennus.....</i> | <i>38</i> |
| Kuva 16. | <i>Erilaisia kelluvia järjestelmiä (Finnwind Oy, 2013, s. 15).....</i> | <i>39</i> |
| Kuva 17. | <i>Kelluvien järjestelmien uusia telinetuotteita (Solar Power World, 2016).....</i> | <i>39</i> |
| Kuva 18. | <i>Esimerkkejä mekaanisista asennuksista kalteville katoille (Finnwind Oy, 2015b).....</i> | <i>40</i> |
| Kuva 19. | <i>Suvilahden aurinkovoimalan koolaukset (Helen Oy, 2015b; Helen Oy, 2014-2016a).....</i> | <i>41</i> |
| Kuva 20. | <i>Esimerkki seinäasennuksesta (Finnwind Oy, 2015c).....</i> | <i>41</i> |
| Kuva 21. | <i>Esimerkkejä pollariasennuksista maahan (Finnwind Oy, 2015a).....</i> | <i>43</i> |
| Kuva 22. | <i>Arkkitehtonisesti ja rakenteellisesti integroidut aurinkopaneelit (IEA, 2012, ss. 96-97).....</i> | <i>44</i> |
| Kuva 23. | <i>Kattopintaan liimautuvat aurinkopaneelit sekä julkisivun paneeliverhouksen tuuletustilan havainnollistus (IEA, 2012, ss. 99-100).....</i> | <i>45</i> |
| Kuva 24. | <i>Solar Synergyn veden päällä kelluva järjestelmä vasemmalla ja Ciel et Terren oikealla (Sinovoltaics, 2015).....</i> | <i>47</i> |
| Kuva 25. | <i>Kelluva aurinkosähköä käyttävä farmi (Sinovoltaics, 2015).....</i> | <i>47</i> |

| | | |
|-----------------|--|----|
| Kuva 26. | <i>Aurinkopaneelien hintakehitys ja tulevaisuuden ennusteet (Agora Energiewende, 2015, s. 6)</i> | 48 |
| Kuva 27. | <i>Maahan rakennetun aurinkovoimalan hankintakustannusten jakautuminen (Agora Energiewende, 2015, s. 40)</i> | 49 |
| Kuva 28. | <i>Aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannukset vuonna 2014 sekä optimistisin ja pessimistisin kustannuksista vuonna 2050 (Agora Energiewende, 2015, s. 50)</i> | 50 |
| Kuva 29. | <i>Helenin projektien elinkaari (Helen Oy, 2016)</i> | 56 |
| Kuva 30. | <i>Suvilahden aurinkovoimala (Helen Oy, 2014-2016a)</i> | 58 |
| Kuva 31. | <i>Kivikon aurinkovoimala</i> | 59 |
| Kuva 32. | <i>Kokonaiskustannusten jakautuminen eri asennustavoilla</i> | 61 |
| Kuva 33. | <i>Aurinkovoimalan eri toteutustapojen kustannusten vertailu</i> | 73 |

LYHENTEET, TERMIT JA MERKINNÄT

| | |
|----------------------|--|
| BOS | Balance of System costs, aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannusten loppuosuus paneelien ja invertterin jälkeen |
| EN | Eurooppalaisessa standardisoimisjärjestössä vahvistetun standardin tunnus |
| IEA | International Energy Agency |
| IOT | Internet of Things, esineiden internet, internet-verkon laajentuminen laitteisiin ja koneisiin |
| ISO | Kansainvälisessä standardisoimisjärjestössä vahvistetun standardin tunnus |
| IT | Information technologies, tietotekniikka |
| kWh | kilowattitunti, energian yksikkö |
| LCOE | Levelized cost of energy, aurinkosähkön tuotantohinta |
| MW | Megawatti, tehon yksikkö |
| OT | Operation technologies, yhteys- /tietoturva- / arkkitehtiasiat (aurinkovoimalan tuotantotietojen julkaisemiseen liittyen) |
| PPA | Power purchase agreement, palvelumalli, jossa tilaaja myy tuotetun sähkön kohteen omistajalle pitkäaikaisella sopimuksella |
| PV | Photovoltaic, valosähköinen ilmiö |
| PV-system | Aurinkosähköjärjestelmä |
| Rakennusalue | Katto-, seinä- tai maan pinta, jota käytetään aurinkosähköjärjestelmän asennusalueena |
| Ratu-kirjasto | Tuotannosuunnittelun vankka rakennustietopaketti |
| RT-kortisto | Rakennuttamisen, suunnitteluun, rakentamisen ja kunnossapidon tietopaketti |
| SFS | Suomessa vahvistetun standardin tunnus |
| Säteilysumma | Vuosittain auringon kokonaissäteily määrä neliötä kohden, yksikkö kWh/m ² /a |
| TTY | Tampereen teknillinen yliopisto |
| Utility-Scale system | Kokoluokka, jossa sähkö tuotetaan jakeluverkkoon |
| V _{na} | Valtioneuvoston asetus |
| W _p | Nimellisteho eli testausolosuhteissa saavutettu maksimiteho |

1. JOHDANTO

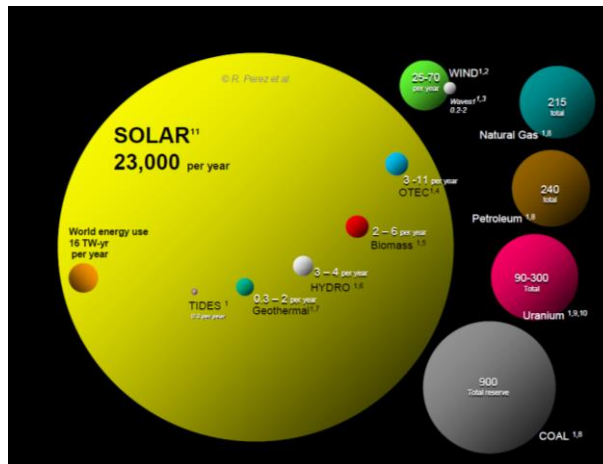
1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma

Kansainväliset ilmastostrategiat ja päästötavoitteet ohjaavat sekä energiantuottajia että kuluttajia kohti puhtaampaa energiaa. Uudet ilmastopimukset ja suomalaisten kiinnostuksen kasvaminen omaa energiankulutustaan kohtaan asettavat entistä enemmän vaatimuksia energiayhtiöille. Energiantuottajan roolissa Helen Oy on määrittänyt osaksi strategiaansa varmistaa tehokkaan ja toimintavarman, maailman parhaan kaupunkienergian tuotannon ja toimituksen. Helen haluaa tarjota asiakkailleen monipuolista energiantuotantoa ja viedä toiminnallaan eteenpäin koko energia-alan kehitystä kohti CO₂-neutraalia tulevaisuutta. (Helen Oy, 2016)

Osana Helenin puhtaamman energian tuotantostrategiaa on aurinkosähkökapasiteetin rakentaminen, jota on luvattu lisätä niin paljon kuin aurinkosähkölle on kysyntää. (Helen Oy, 2016) Helenillä on nimissään Suomen suurin aurinkovoimala, joka koostuu 2 992 paneelista ja on nimellisteholtaan 850 kW. Tällä hetkellä maailman suurin noin 9 miljoonasta paneelista koostuva aurinkovoimala sijaitsee puolestaan Yhdysvalloissa ja on nimellisteholtaan 580 MW (Topf, 2015).

Aurinkovoimaloita on rakennettu Suomessa ja maailmalla pääasiassa maalle sekä rakennuksien seinille ja katoille. Pilotointivaiheessa ovat myös veden päällä kelluvat aurinkovoimalat sekä rakenteisiin ja tienpintoihin integroidut ratkaisut. Näistä muutamia tuotteita on toistaiseksi kaupallistettu.

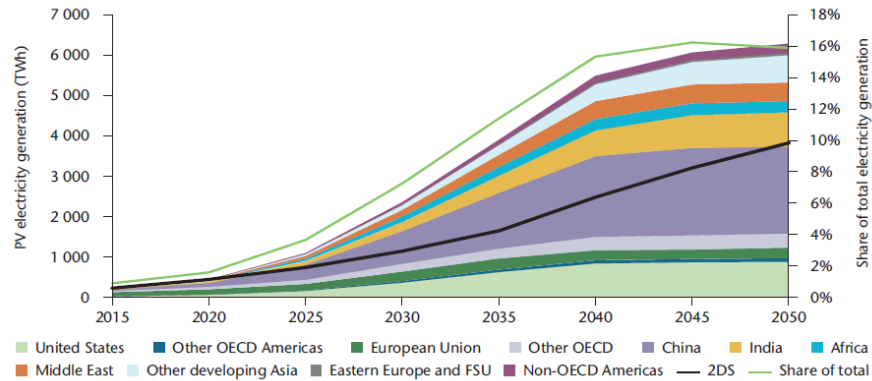
Maailman sähköntuotannosta aurinkoenergia kattaa noin 1,3 %:a, mutta asennetun kapasiteetin kasvu on ollut merkittävää viimeisen parin vuoden aikana (IEA PVPS, 2016, ss. 7, 15). Kasvuun ovat vaikuttaneet muun muassa tekniikan kehittyminen ja hintojen lasku sekä monenlaiset tukijärjestelmät ja palvelumallit. Kasvua ovat edistäneet myös aurinkoenergian vakauden ja kuvassa 1 näkyvän potentiaalin ymmärryksen lisääntyminen sekä globaalit tavoitteet päästöjen vähentämisestä, mitkä ovat ohjanneet myös sijoittajia kohti uusiutuvia energialähteitä fossiilisten polttoaineiden tukemisen sijaan. (Ahola, 2015; Hakkarainen at., 2015)



Kuva 1. Uusiutuvien energialähteiden vuosittaiset tuotantopotentialit sekä rajoittujen energialähteiden hyödynnettävissä olevat reservit (terawatti-vuosi). (Perez & Perez, 2009)

Aurinkosähköntuotantoa rajoittavat erityisesti pohjoisella pallon puoliskolla voimakkaat kausittaiset vaihtelut, kustannustehokkuus sähkön hinnan ollessa alhainen, säteilysumma sekä tekniikoiden matalat hyötysuhteet, joidenka vuoksi suurten tehojen voimalat vaativat suuren pinta-alan. Suomessa aurinkoenergian tuotannon yleistymistä rajoittavat lisäksi kansallisten tavoitteiden toimenpiteiden puuttuminen ja epäyhtenäinen byrokratia. (Ahola, 2015; Hakkarainen et al., 2015) Sähkön siirtohinnot ovat kuitenkin nousussa ja hallituksella on valmisteilla uusia toimenpiteitä kansallisiin tavoitteisiin pääsemiseksi (Liukko, 2016). Näiden uskotaan kiihdyttävä aurinkovoimaloiden rakentamisen kasvua Suomessa tulevina vuosina.

Aurinkovoimaloiden rakentaminen lähti nousuun vuonna 2006 ja nykyään aurinkoenergia on maailman nopeimmin kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto. Tulevaisuudessa aurinkosähkön ennustetaan kasvavan vuosittain lähes 100 GW tavoitellen 16 % osuutta koko maailman sähköntuotannosta vuoteen 2050 mennessä. Ennuste on nähtävillä kuvassa kaksi. Erityisesti aurinkoenergiaa täydentävän energiateknologian, kuten ennustus- ja säästämähdollisuuden kehitys- ja tukimekanismien muutokset tulevat vaikuttamaan merkittävästi alan kasvuun. Kuvan kaksi mukaisten kasvutavoitteiden toteutuminen vaatisi kuitenkin nykyistä suurempaa lähes 200 GW vuosittaista kasvua. Toteutuessaan alalla toimijoille avautuisi lähes 1500 miljardin euron markkinat jo pelkästään seuraavan 15 vuoden aikana. (Ahola, 2015; Hakkarainen et al., 2015; OECD/IEA, 2014)



Kuva 2. Alueittaiset ennusteet aurinkosähkön tuotannon kasvusta (OECD/IEA, 2014, s. 21)

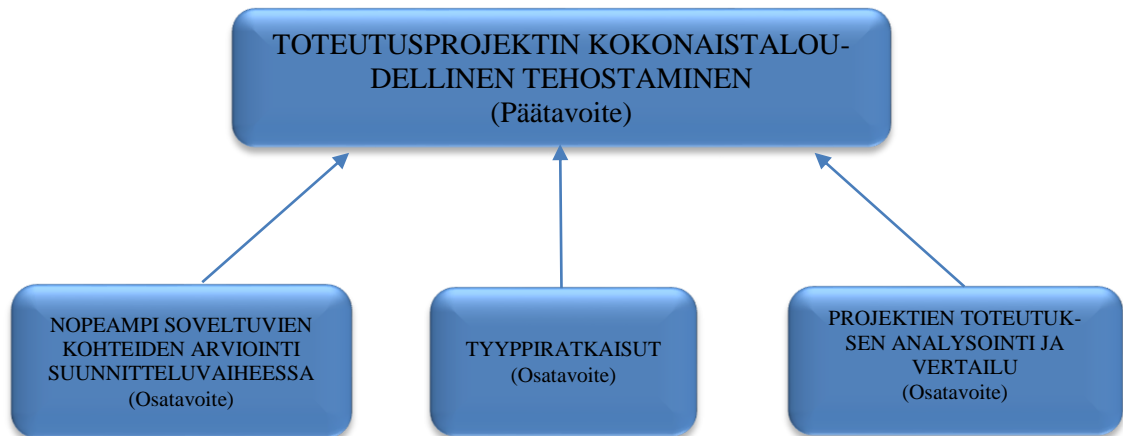
Tehtyjen selvityksien pohjalta voidaan todeta, että aurinkopaneelien tekniikasta ja tuottavuudesta sekä sähkötekniikasta on olemassa jo paljon tutkimustietoa, mutta itse voimalan rakentamisesta ei juurikaan. Rakentamisen osuus on aurinkovoimaloiden toteutuksessa pieni, mutta rakennusteknisten selvityksien ja asennustapaa koskevien toteutussuunnitelmien teko sitäkin tärkeämpää. Toteutusratkaisuiden selkeät linjaukset puuttuvat, mikä hidastaa aurinkovoimalaprojektien toteutusta kasvattaen projektin kustannuksia jatkuvasti. Helenin aurinkovoimalaprojektien kokemusten perusteella tietoa kaivataan erityisesti eri rakennusaloille soveltuvista tyyppiratkaisusta sekä näihin liittyvien asennuskustannusten vertailusta. Lisäksi soveltuvien kohteiden arviointi rakennusteknisestä näkökulmasta kaipaa selkeyttä erityisesti rakenteiden kantavuustarkasteluun.

Tutkimus on tärkeä, sillä sen avulla saadaan tehostettua aurinkovoimalaprojektien toteutusta sekä rakennusteknisesti että kokonaistaloudellisesti. Vastaavanlaista tutkimusta ei ole aiemmin tehty etenkin Suomessa, joten tuloksista tulee hyötymään sekä Helen Oy että muut puhtaampaan energiantuotantoon tähtäävät toimijat.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen päätavoitteena on Helenin aurinkovoimalaprojektien kokonaistaloudellinen tehostaminen. Tuloksien avulla nopeutetaan uusien mahdollisten kohteiden rakennusteknisen soveltuvuuden arviointia suunnitteluvaiheessa sekä selkeytetään eri tavalla toteutettavien aurinkovoimaloiden rakentamisen suunnittelua tyyppiratkaisuiden avulla.

Lisäksi tavoitteena on vertailla jo menneiden ja meneillään olevien aurinkoprojektien kokonaisuuksia suunnittelusta luovutusvaiheeseen, sekä analysoida tänä aikana esille tulleita haasteita. Haasteiden syyt ja seuraukset selvitetään ja ratkaisuehdotukset esitetään, jotta vastaavanlaisilta haasteilta vältytään tulevaisuuden projekteissa. Yhdistämällä käytännön opit kirjallisuusteoriaan, pyritään yksinkertaistamaan aurinkovoimalaprojektien toimintamallia tehostaen näin niiden rakentamista. Tutkimuksen pää- ja osatavoitteet on esitelty kuvassa 3.



Kuva 3. Tutkimuksen tavoitteet

Työssä keskitytään aurinkosähkön tuotantoon, sillä Helen hyödyntää kiinteistöihin paistavan auringon lämpöä kaukolämmön ja -jäähdytyksen kautta (Aaltonen, 2014). Työssä käsiteltävät aurinkovoimalat koostuvat aurinkopaneeleista, joiden toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Englanniksi tällaisista järjestelmistä käytetään yleisimmin nimitystä pv (photovoltaic) –system, mutta suomeksi aurinkovoimalakokonaisuudesta puhutaan aurinkosähkijärjestelmänä. Muihin aurinkoenergiaa hyödyntäviin tekniikoihin ei tässä työssä perehdytä.

Tutkimus on rajattu käsittelemään aurinkovoimalan rakentamista pääasiassa maalle sekä rakennuksien katoille ja seinille. Näille mahdolliset erilaiset asennustavat esitellään ja rakennuksista käsitellään sekä vanhoja että uusia rakennuksia. Rakennuksia ei rajata käytötarkoituksen mukaan, koska kohteen kustannustehokkuuteen vaikuttavat pääosin paneelien asennustapa, käytössä oleva pinta-ala sekä kohteen sähkönkulutus.

Rakennusalustoista eli katto-, seinä- ja maan pinnoista selvitetään niille aurinkovoimalan asentamisen rakennusteknisiä haasteita, kuten vedeneristyksen, kantavuuksien ja rakenteiden kestävyysvarmistaminen. Telineyrytyypeistä käsitellään toteutusratkaisuja eri katto- ja seinärakenteisiin sekä mahdollisia uusia kevyempiä ja nopeasti asennettavia kokonaisuuksia. Telineyrytyyppeihin ei perehdytä kovinkaan tarkasti, koska Helen tilaa aurinkovoimalat avaimet käteen –toimituksella, jolloin laitetoimittaja vastaa lopullisen kokonaisuuden suunnittelusta ja toteutuksesta. Helen antaa kuitenkin reunaehdot laadukkaasti ja teknisesti parhaan toteutusratkaisun löytymiseksi, mutta jättää laitetoimittajalle vapauden valita kohteeseen muun muassa parhaimman mahdollisen telinetyypin.

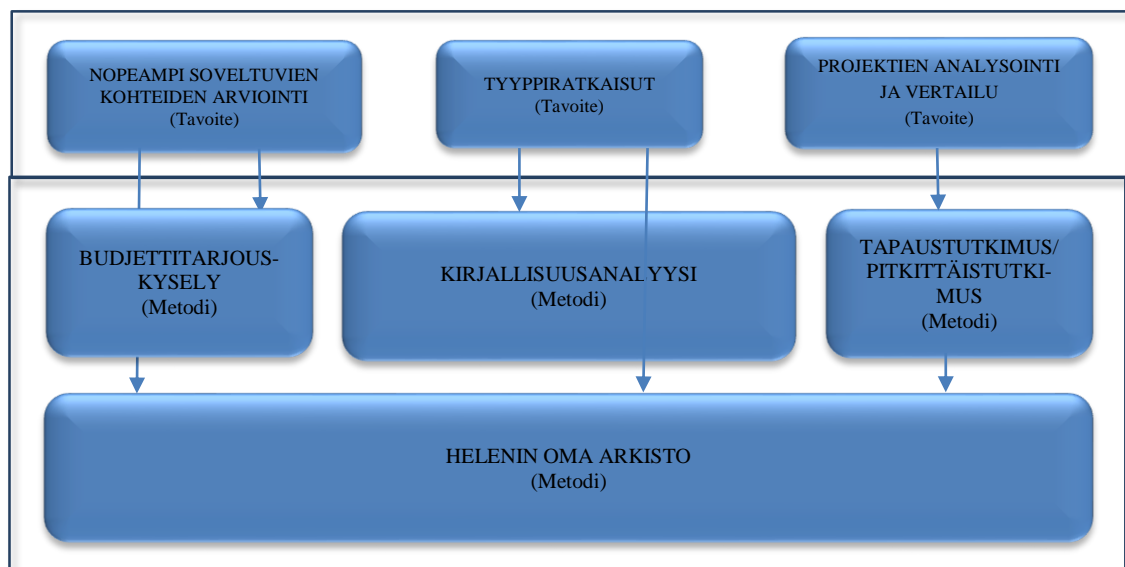
Tutkimuksessa käydään läpi myös mahdolliset aurinkovoimalan rakentamista koskevat määräykset, ohjeet ja standardit. Lisäksi tutkitaan aurinkovoimalan kunnossapitoa ja huoltoa rakennusteknisestä näkökulmasta. Sähkö- ja paneelitekniikkaa koskevat määräykset ja standardit on rajattu pois, mutta paloturvallisuuden liittyvät huolto-ohjeet esitetään.

Esimerkkeinä projektintoteutuksesta käytetään Helenin jo valmistuneita ja valmistumassa olevia aurinkovoimaloita. Kokonaistaloudellisuutta tarkastellaan aurinkovoimaloiden rakentamisen kustannusten muutoksien, projektintoteutuksen selkeytymisen kautta vähentyneiden resurssien sekä asennustavoittain jaoteltujen budjettitarjouskyselyiden avulla. Esimerkkiprojekteja koskevat kappaleet on salattu, koska niissä esiin tulevaa tietoa olisi mahdollista käyttää väärin, mikä ei taas palvele työn tarkoitusta Helenin toiminnan eteenpäin viemisestä.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus

Tutkimus perustuu kvalitatiiviseen eli laadulliseen tutkimukseen. Menetelmäsuuntauksen ominaispiirteiden mukaan tutkimusongelma ja sen tarkoitus pyritään ymmärtämään kokonaisvaltaisesti. Teoriapohja saadaan kirjallisuustutkimuksella, joka kerätään alan julkaisuista, seminaareista, artikkeleista, määräyksistä ja ohjeista, sekä kohdeyrityksen omista arkistoista. Tapaustutkimuksen, tarkemmin pitkittäistutkimuksen, avulla analysoidaan ja vertaillaan esimerkkiprojekteja. Esimerkkiprojekteiksi ovat valikoituneet suurimmat suunnitteluvaiheeseen edenneet Helenin aurinkovoimalaprojektit.

Kirjallisuus- ja tapaustutkimuksen lisäksi tutkimusta täydennetään budjettitarjouskyselyllä, jonka vastaanottajiksi on valittu Suomessa toimivia suurimpia aurinkovoimalatoimittajia. Budjettitarjouskysely koskee yleisimpiä asennustapoja, sillä asennuskustannukset ovat herkästi muuttuvia ja niiden tietous helpottaa soveltuvien kohteiden arviointia projektin kokonaistaloudellisesta näkökulmasta. Myös toimintatutkimus on pienessä roolissa, sillä tutkija on työskennellyt ja työskentelee edelleen avustavana rakennuttajana esimerkkiprojekteissa. Tutkimuksen tavoitteet ja metodit on koottu kuvaan 4.



Kuva 4. Tutkimuksen tavoitteet ja metodit

2. KIRJALLISUUSSELVITYS

Nykypäivänä mediasta voi löytää päivittäin uutisia aurinkoenergiaan liittyen. Ala on alkanut kasvaa kovaa vauhtia ja entistä suurempia voimaloita rakennetaan ympäri maailmaa. Pääosa voimaloista keskittyy sähköntuotantoon aurinkopaneeleiden avulla eli ne ovat niin sanottuja pv-järjestelmiä. Tietoa löytyy paljon liittyen järjestelmien tuotantopotentiaaleihin, hankintahintoihin ja kannattavuuteen, mutta rakennustekniikkaa koskeva tietous rajoittuu lausahduksiin, kuten: ”Aurinkosähköjärjestelmän rakennusalueen kantavuus on tarkistettava” tai, että: ”katon vesieristyksestä on huolehdittava”. Dokumentoitua tietoa ei asiasta juurikaan ole varsinkaan Suomen olosuhteissa, joten tähän lukuun kaksi on eritelty aurinkovoimaloiden rakentamiseen ja ylläpitoon liittyvät asiat sekä pyritty avaamaan niiden sisältöä yllä esitettyjä ilmauksia tarkemmin. Kirjallisuusselvityksen aikana esille tulleita asioita on koottu lisäksi aurinkovoimalan rakennuttajan avuksi muistilistaan, joka on diplomityön liitteenä 1.

2.1 Aurinkovoimaloiden rakentaminen

2.1.1 Yleistä

Suomessa suurien kokoluokkien, yli satojen kilowattien, aurinkovoimaloiden rakentaminen on varsinaisesti käynnistynyt vasta viime vuosina ja tällä hetkellä käytössä oleva aurinkosähkökapasiteetti on noin 20 MW_p:a. (Ahola, 2015; IEA PVPS, 2016, s. 18) Suomen nykyinen sähköverkko kestäisi noin 2000–4000 MW_p:a, mikä tarkoittaisi 1-2 kW_p:n aurinkovoimalaa per asunto (Similä et al, 2010, s. 194). Toistaiseksi Suomella ei kuitenkaan ole lukuihin pohjautuvia ennusteita tai tavoitteita aurinkosähkön rakentamisen lisäämiseen. Mikäli vuoden 2050 globaali ennuste 4 600 GW:n aurinkosähkön kokonaiskapasiteetista toteutuu, vaatii se myös investointeja sähköverkon kehittämiseen maailmalla. (OECD/IEA, 2014)

Aurinkosähköä rakennetaan kohteisiin, joissa sähkönkulutus on korkea kesäaikaan. Sijoitus on yleensä kannattava, kun tuotanto kulutetaan kohteessa ja sillä korvataan kalliimpaa ostoenergiaa. Lisäksi takaisinmaksuajan sijaan huomio tulisi suunnata kiinteistön nettonykyarvon nousuun. (Auvinen & Jalas, 2016) Aurinkovoimaloita rakentavat yritykset ja julkiset toimijat saavat sijoitukselleen 25 % investointituen, maatilat 35 % investointituen ja kotitaloudet voivat hakea 45 %:n kotitalousvähennystä investoinnin työkuiluista. (Auvinen & Liuksiala, 2016) Taloyhtiöiden haasteina ovat tukien puuttuminen sekä mitarointi (Juntunen, 2015).

Aurinkosähköjärjestelmien koot vaihtelevat muutaman kilowatin (kW) järjestelmistä aina megawatteihin (MW) saakka. Järjestelmät jaotellaan yleensä kolmeen kategoriaan asuinrakennuksiin ja kaupallisiin rakennuksiin soveltuviin sekä suurien, merkittävien kokoluokkien järjestelmiin, joista käytetään nimitystä Utility-Scale System. Utility-Scale kokoluokassa sähkö tuotetaan jakeluverkkoon eikä yksittäiseen kulutuskohteeseen kuten asuinrakennusten- ja kaupallisten rakennusten järjestelmissä. (Wills et al., 2014, s. 6)

Kotimaisuusaste puhuttaa paljon tänä päivänä ja Suomessa tehtyjen tutkimuksien mukaan aurinkovoimaloiden rakentamisen kotimaisuusaste on vähintään 48 %, sillä investoinnit sisältävät paljon palvelu- ja asennustyötä. Mikäli aurinkopaneelit valmistetaan Suomessa, nousee kotimaisuusaste 60–70 %:iin. (Lukin, 2016)

Yleisesti rakentamista ohjeistaa vuosikymmenien kokemuksilla koottu Ratu-kirjasto sekä RT-kortisto. Ratu ohjeistaa hyvään rakennustapaan parantaen työn tuottavuutta, laatua ja työturvallisuutta, kun taas RT-kortistosta löytyy tiedot rakennuttamiseen, suunnitteluun, rakentamiseen ja kunnossapitoon. Nämä tietopalvelut eivät kuitenkaan kata toistaiseksi aurinkovoimaloiden konkreettista rakentamista eli aurinkopaneelien telineitä ja kiinnityksiä rakennusalustaan. RT-kortistossa on saatavilla RT 70-10477, joka käsittelee ainoastaan aurinkosähköjärjestelmän osia, toimintamallia ja paneelitekniikkaa. (Rakennustieto, 2016)

Suomessa rakentaminen tapahtuu osittain rakennustyömaalla, osittain teollisesti, mutta elementtirakentamisen myötä rakentamistavan esivalmistusta ja kokoonpanotekniikkaa on alettu hyödyntää tehokkaammin. Tehdastyötä lisäämällä voidaan vähentää työmaalla tehtävän työn haasteita ja parantaa siten sekä rakennustuotannon tehokkuutta että laatua. Työmaalla Suomen olosuhteissa esiin tulleita haasteita ovat muun muassa epäsuotuisat olosuhteet, ainutkertaiset toteutusorganisaatiot, tuotantokaluston liikuttelutarve, logistiikan järjestäminen ja ammattitaitoisen työvoiman saatavuus. Lisäksi teollista rakentamistapaa eli esivalmistusasteen nostoa puoltaa myös tehtaiden mahdollisuus automaation hyödyntämiseen, nopeaan valmistukseen, erikoistumiseen ja tuotteiden kehittämiseen. Esivalmistusastetta voi nostaa esimerkiksi yhdistämällä rakennusosia toisiinsa jo tehtaalla ja toimittamalla suurempia osakokonaisuuksia työmaalle. (Teriö, 2002, ss. 6, 8)

Aurinkoenergian rakentamisen avuksi on hiljalleen tullut palveluita niin yrityksille kuin yksityisillekin. Yksi esimerkki on suomalaisen Sun Energia Oy:n verkkopalvelu, josta saa tiedot aurinkoenergian tuotantopotentialista rakennuksittain. Uusi verkkopalvelu eroaa aiemmin tarjolla olleista, esimerkiksi Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY:n ilmaisesta karttapalvelusta siinä, että uudessa verkkopalvelussa yhdistyvät Maanmittauslaitoksen, Tilastokeskuksen ja Ilmatieteenlaitoksen tiedot. HSY:n karttapalvelun tiedot perustuvat katon muotoon ja suuntaan, horisontin aiheuttamiin varjoihin sekä pilvisyyden vaihteluihin eri vuodenaikoina. Sun Energy on lisännyt näihin ominaisuuksiin ajantasaisen säätiedon ja säteilyn laadun sekä kannattavuus- ja elinkaarilaskelmat aurinkopaneeli-

investoinnin harkinnan avuksi. (Mansikka, 2016; Luotola, 2015) Reaaliaikaisen ja luotettavan tiedon saanti edesauttaa aurinkovoimaloiden määrän kasvua kaikissa kokoluokissa vieden samalla myös koko alaa eteenpäin. Näiden lisäksi tulee kuitenkin muistaa selvittää myös lähistölle kaavoitetut uudet rakennukset sekä ympäröivän puuston kasvu, jotta ne eivät tulevaisuudessa varjosta asennettuja paneeleita.

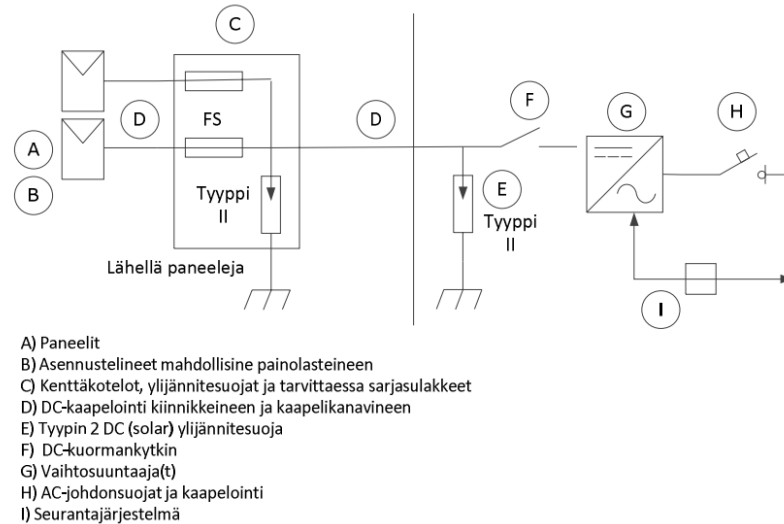
2.1.2 Ennen rakentamista tehtävät selvitykset

Mahdollisen kohteen löytyessä tehdään aurinkosähköjärjestelmälle sähkö- ja paneelitekniset selvitykset sekä rakennettavuusselvitys. Tämä työ keskittyy näistä ainoastaan rakennettavuusselvitykseen, jonka osa-alueita käsitellään tarkemmin luvussa 2.2. Rakennustekniikka. Muut selvitykset kuitenkin esitellään lyhyesti, koska nämä kolme yhdessä muodostavat aurinkovoimalan toteutusehdotuksen.

Paneeliteknisessä selvityksessä arvioidaan kohteen aurinkosähkötuotantoa mallinnuksen avulla. Mallinnuksessa tehdään auringonsäteily- ja varjoanalyysi sekä otetaan kantaa järjestelmän tekniseen toteutukseen eli paneeleilta odotettuihin ominaisuuksiin, paneelien määrään, kallistukseen, suuntaukseen, asennukseen ja hyödynnettävissä olevaan pinta-alaan. Hyödynnettävissä olevalla pinta-alalla tarkoitetaan alaa, jota voidaan käyttää paneelien asennukseen. Se saadaan vähentämällä rakennusalustan kokonaisalasta tuulikuormien kannalta kriittiset alueet, huoltoalueet, varjostukset ja alustan muodon kannalta ongelmalliset alueet. Esimerkiksi kattojen tapauksessa tuulikuorman kriittisiä alueita ovat katon nurkka- ja reuna-alueet. Katon muodon kannalta ongelmallisia alueita ovat muun muassa kallistusten taitekohdat ja iv-kojeet. Paneeliteknisessä selvityksessä ei oteta kantaa hyödynnettävän pinta-alan rakenteen kantavuuteen tai kestävyYTEEN, vaan nämä käsitellään rakennettavuusselvityksessä. (Rasinkoski, 2013; Helen Oy, 2014)

Paneelien asennuskulma vaikuttaa oleellisesti järjestelmän tuulikuormaan ja sitä kautta myös sekä rakennusalustan että telineiden kuormitukseen. Asennuskulma onkin yleensä kompromissi tuoton, kustannusten ja hyödynnettävissä olevan pinta-alan suhteen. Aiemmat suositukset noin 40 °:en asennuskulmasta etelään suunnattuna perustuvat paneelien hintoihin vuosia sitten, jolloin tuotannon maksimointi kannatti korkeasta asennushinnasta huolimatta. Nykyisillä paneelihinnoilla saadaan edullisin tuotetun energian hinta, kun asennuskulma on matala, jolloin asennuskustannukset ovat edulliset. Teoriassa jyrkillä asennuskulmilla saadaan paras tuotto asennettua tehoa kohti, mutta käytännössä näin ei usein kuitenkaan ole. Jyrkillä kulmilla horisontin varjojen vaikutus sähköntuotantoon on suurempi, jonka lisäksi peräkkäiset paneelirivit varjostavat helposti toisiaan, mikä johtaa suuriin riviväleihin ja asennustilan heikkoon hyödyntämiseen. Lisäksi Suomessa noin puolet säteilystä on hajasäteilyä, jonka saanti on tehokkaampaan matalilla asennuskulmilla. (Rasinkoski, 2013)

Sähköteknisen selvityksen tarkoituksena on määrittää aurinkosähköjärjestelmän osien sijoituspaikat, kaapelointireitit, sähköliityntä ja sen mahdolliset tehorojoitukset sekä järjestelmärakenne eli hajautettu vai keskitetty invertterijärjestelmä. (Kimari, 2016) Järjestelmän pääkomponentit on esitetty alla olevassa kuvassa 5.



Kuva 5. Aurinkosähköjärjestelmän pääkomponentit (Rasinkoski, 2013)

Sähköjärjestelmärakenne voidaan toteuttaa joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä ratkaisussa aurinkopaneelirivit eli stringit koonneet kenttäkotelo yhdistyvät kaikki yhdelle, joissain tapauksissa myös muutamalle, satojen kilowattien vaihtosuuntaajalle eli invertterille. Hajautetussa ratkaisussa jokainen kenttäkotelo yhdistyy omalle muutamien kymmenen kilowatin invertterilleen. Keskitetyn ja hajautetun järjestelmän hyötyjä ja haittoja on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Keskitetyn ja hajautetun järjestelmärakenteen hyödyt ja haitat. Muokattu lähteistä (Rasinkoski, 2013; Kimari, 2016)

| KESKITETTY JÄRJESTELMÄ | HAJAUTETTU JÄRJESTELMÄ |
|--|---|
| + Pienempi tilantarve + Isojen vaihtosuuntaajien ylikuormitettavuus parempi, mahdollistaa tehon optimoinnin + Mahdollisuus liittyä keskijänniteverkkoon normaalilla tekniikalla + Aktiivisen loistehon säätö helpommin toteutettavissa - Häiriötilanteet vaikuttavat koko laitokseen - Paneeliston sovittaminen vaihtosuuntaajaan hankalaa - Suurissa järjestelmissä urakoitsija tarvitsee S1-pätevyys | + Nopeampi invertterien saatavuus, lyhempi toimitusaika + Runsaasti tuotevalikoimaa + Mahdollisuus sovittaa paneeliketjut joustavasti esim. eri jännitteille + Vaihtosuuntaajat sijoitettavissa joustavasti, tarvittaessa myös ulos + Häiriötilanteet rajoittuvat vain pieneen osaan laitosta - Enemmän kaapelointeja, hitaampi asennus - Suurempi tilantarve |

Järjestelmärakenteen valinnan jälkeen on selvitettävä myös sähköliityntä. Sähköliitynnästä selvitetään, onko kyseisessä kohteessa pien- vai keskijännite sekä näiden mukaiset liityntäpaikat. Pienjännitetapauksessa tulisi olla vapaa sulakelähtö ja keskijännitetapauksessa keskijännitekatkaisija, jotta aurinkovoimala saadaan kytkettyä kohteen sähköverkkoon. Suurien aurinkovoimaloiden tapauksessa tulisi kohteessa olla valmiiksi keskijänniteliittymä, joka mahdollistaa suuremmat tehot. Mittarointi ei kuulu sähkötekniiseen selvitykseen, mutta sen järjestäminen tulee selvittää paikalliselta jakeluverkonhaltijalta, mikäli aurinkovoimalaprojekti etenee toteutukseen saakka. (Kimari, 2016)

Rakennettavuusselvityksen merkittävin osuus on varmistaa rakennusalustan kantavuus eli selvittää mahdollisuudet aurinkovoimalan toteutukselle. Selvityksen eli mitoituuslaskelmat tekeekin lähes poikkeuksetta rakennesuunnittelija. Kantavuuden tarkastelussa varmistetaan, että paneeliteknisen selvityksen ehdotus asennuskulmasta ja paneelien määrästä telineineen on rakennusalustan kuormien kestävyyspuutteissa mahdollinen. Rakennettavuusselvityksessä tulee lisäksi huomioida kohteen kaavamääräykset sekä nykyisen rakennusalustan rakenne ja kunto. Erityisesti katemateriaali tarkastetaan ja tehdään ehdotus vedeneristyksen tiiveyden varmistamisesta aurinkosähköjärjestelmän kiinnityksessä sekä sadevesien kulkusuuntien ja kaivojen toiminnan estymättömyydestä. Kattoille ja seinille rakennettaessa huomioidaan myös erikseen kantavan rakenteen kunto, rakenteiden käyttöiät sekä tehdyt kunnossapitotyöt ja korjaukset. Lisäksi lasketaan aurinkopaneelien tuuli- ja lumikuormat. Lopuksi otetaan kantaa asennustapaan kantavuuslaskelmiin perustuen sekä työturvallisuuden toteutukseen. (Autio, 2015; Viita & Keränen, 2016)

Näiden kolmen selvityksen perusteella päädytään kohteeseen sopivaan toteutustapaan. Lyhykäisyydessään asennustavan ja järjestelmäkokonaisuuden valinnassa huomioidaan siis käytävissä oleva pinta-ala ja haluttu teho, katon lisäkuormien kantavuus, materiaalien ja asennuksien kustannukset, asennuskulma ja sen vaikutus tuotantoon, sähköliityntä, osien sijoituspaikat sekä ulkonäkö ja takuut. (Kimari, 2016; Rasinkoski, 2013)

Paneeliteknisen-, sähkötekniisen- ja rakennettavuusselvityksen jälkeen tarkastellaan vielä investointikustannuksia, vaadittavia lupamenettelyitä, toteutusaikataulua sekä määritetään mahdolliset lisäselvitystarpeet.

2.1.3 Rakennusalustat

Rakennusalustoilla tarkoitetaan maanpintoja, seiniä ja kattoja, joille aurinkovoimalat yleisimmin asennetaan. Harvinaisemmat veden päälle asennetut sekä rakenteisiin integroidut ratkaisut on käsitelty luvussa 2.5 Asennustavat. Katto- ja maa-asennukset kattavat aurinkosähkökapasiteetista kumpikin noin puolet, joten seinäasennusten osuus aurinkosähköntuotannossa on hyvin pieni (OECD/IEA, 2014, s. 5).

Rakennusalustan kantavuuden tarkastelu tehdään rakennettavuusselvityksessä. Tätä varten on alustan rakenne ja sen eri materiaalien ominaisuudet selvitettävä. Maalle rakennettaessa selvitetään maa-ainekset noin metrin syvyyteen saakka. Seinä- ja kattopinnoille rakennettaessa tiedot kantavasta rakenteesta, kuormien kestävyydestä ja käytetyistä materiaaleista löytyy rakennesuunnitelmista kuten vesikaton rakenne- ja elementtien mitta- ja piirustuksista (Viita & Keränen, 2016). Rakennusalustojen kestävyysominaisuuksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.2.1 Rakenteiden kestävyys. Mikäli kyseessä on uusi vasta suunnitteilla oleva rakennus, voi suunnittelija varata valmiiksi järjestelmän tuomien lisäkuormien verran kantavuutta rakenteille tai suunnitella järjestelmän rakennettavaksi muun rakennuksen yhteydessä.

Katot

Aurinkovoimaloiden kattoasennuksille on kolme yleisintä asennustapaa; pollariasennus, painoperusteinen eli kelluva-asennus ja mekaaninen asennus. Asennustavoista on kerrottu tarkemmin luvussa 2.5. Kelluvia asennuksia ei kiinnitetä kattoon mekaanisesti, jonka vuoksi ne soveltuvat vain niin sanotuille tasakatoille, jotka kuitenkin lukeutuvat loiviin kattoihin. Loiville katoille soveltuvat myös pollari- ja mekaaniset asennukset ja jyrkille harjakatoille mekaaniset asennukset lappeen suuntaisesti. (Kuronen & Loisa, 2015) Myös paneelien kallistaminen on jyrkillä katoilla mahdollista, mutta tällöin järjestelmä vaatii lappeen suuntaista asennusta monipuolisemman telineratkaisun sekä raskaamman kiinnityksen tuulikuormien lisääntymisestä johtuen (NIBE, 2011). Harjakatoille rakennettaessa jalustojen ja telineiden investointikustannukset ovat noin 15–20 % laitekustannuksista. Loiville katoille puolestaan osuus on 15–40 % asennustavasta riippuen. Loiviksi katoiksi lukeutuvat kaltevuudeltaan alle 1:10 olevat katot ja jyrkiksi kaltevuudeltaan yli 1:20 olevat katot. Kaltevuusvälillä 1:10–1:20 on kiinnitettävä erityistä huomiota vesitiiveyteen, mikäli käytetään jyrkkien kattojen rakenneratkaisuja. (Kattoliitto ry, 2013)

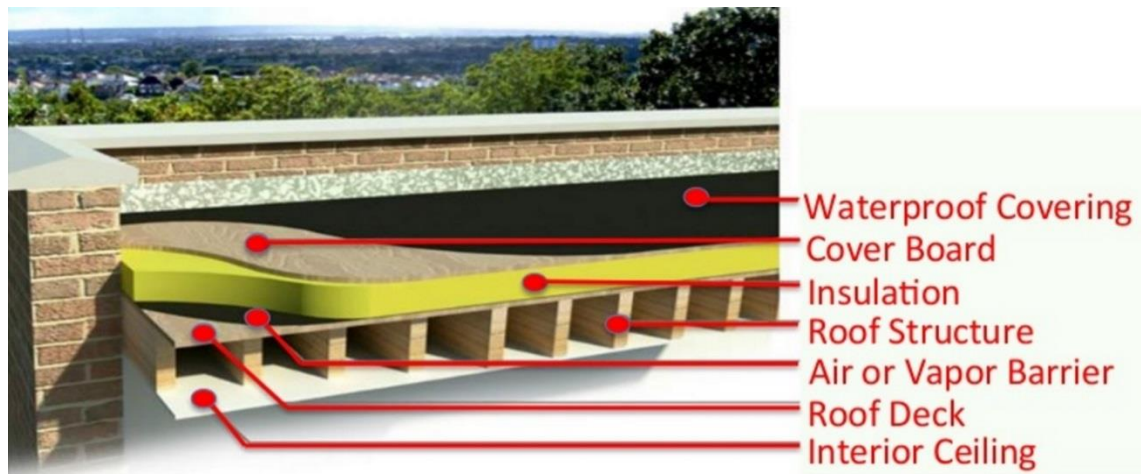
Aurinkovoimalaa katolle suunniteltaessa on vanhan katon kunto analysoitava. Pintapuolisella katsauksella saadaan käsitys katteen kunnosta ja selvittämällä jo suoritettuja korjaus- ja huoltotoimenpiteitä, saadaan selvitettyä katon elinkaaren vaiheita. Tarpeen mukaan kattoa korjataan aurinkovoimalan rakentamisen yhteydessä tai uusitaan kokonaan, mikäli katto alkaa olla käyttöikänsä päässä. (Autio, 2015) Aurinkosähköjärjestelmän asennuksen jälkeen on katteen uusinta tai katon muut korjaustyöt haasteellista toteuttaa. Yläpohjarakenteen käyttöikätaavoite on keskimäärin 25–50 vuotta ja vesikatteen 50 vuotta. Käyttöikätaavoitteet riippuvat rakenneratkaisusta, kaltevuudesta sekä käytettävistä materiaaleista. Katon käyttöikä tulee siis suhteuttaa aurinkosähköjärjestelmän käyttöikänsä, joka on yli 20 vuotta. (Zipp, 2013; Kattoliitto ry, 2013, s. 8)

Turvallisuussyistä on aurinkovoimaloiden kattoasennuksissa muutamia huomioitavia seikkoja. Räystäisiin ei saa tehdä aurinkosähköjärjestelmän kiinnityksiä ei saa hyödyn-

tää kiinnitysalustoina, sillä räystäsrakenne on yläpohjarakennetta heikompi. Aurinkopaneelit tulee asentaa yläpohjan kantavalle eli tuetulle osalle. Myöskin lumiesteille on jätettävä riittävä tila, jotta sulavat lumet eivät aiheuta vaaraa lappeen alla liikkuville. Nyrkki-sääntönä on ollut, ettei aurinkopaneeleita asenneta 1 metriä lähemmäksi lappeen reunaa.

Katon rakenneratkaisu suunnitellaan aina kohdekohtaisesti eikä jokaista loivaa tai jyrkkää kattoa voida olettaa rakenteeltaan samanlaiseksi. Tässä työssä yleisimpiä kattotyyppejä esitellään Toimivat Katot 2013 –julkaisun mukaisiin jaotteluihin perustuen. Katon kaltevuudella on merkitystä aurinkosähköjärjestelmän asennustapaa valittaessa, jonka vuoksi työssä esitellään loivat ja jyrkät katot kantavine rakenteineen. Koko rakennuksen kantavalla rakenteella on merkitystä kuormien siirtämisessä ja itse kattorakenteella asennuksen kiinnityksessä. Pollariasennus kiinnittyy katon kantavaan rakenteeseen, kuten useimmiten myös mekaaninen asennus, kun taas kelluvalle asennukselle merkittävää on katteen kulutuksen kesto sekä kuormien jakautuminen tasaisesti koko kattopinta-alalle.

Perinteinen yläpohjarakenne on sisäverhous, kantava rakenne, ilman- tai höyrynsulku, lämmöneriste, tuuletus, vedeneristeen alusrakenne ja varsinainen vedeneriste. Ilmansulku estää ilman virtauksen katon läpi ja mikäli rakennuksessa syntyy paljon kosteutta, korvataan ilmansulku höyrynsululla. Tuuletus tarvitaan, jotta rakenteisiin tiivistyvä kosteus poistuu. Kaikki rakenteeseen tulevat läpiviennit on tiivistettävä eikä rakenteen tuulettuminen saa estyä, jotta rakenneaurioilta vältytään. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 8-17) Loivien kattojen yleinen rakenne on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Loivien kattojen yleinen rakenne (Solar Power World, 2015, s. 12)

Loivien, eli kaltevuudeltaan alle 1:10 olevien, kattojen kaltevuus tehdään kantavalla rakenteella, jotka jaetaan ristikkorakenteisiin tai tasa-alustaisiin rakenteisiin. Ristikkorakenne voi olla puu- tai teräsristikko. Puuristikkorakenteissa lämmöneristeet asennetaan alapaarteiden väliin ja höyrynsulun alustana toimivat sisäkaton ruoheet ja laudoitus tai puulevyrakenne. Aurinkosähköjärjestelmää kiinnitettäessä puuristikkorakenteeseen ei siis ole vaarana höyrynsulun puhkaisu. Teräsristikkorakenteissa yläpohjarakenne tehdään

puolestaan yläpaarten yläpuolelle ja höyrynsulun alustana toimii esimerkiksi profiilipelti. Ristikkorakenteissa höyrynsululla ei yleensä ole riittävän kiinteää alustaa, mikä tuo haastetta läpivientien tiivistämiselle. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 14-15, 22)

Loivissa tasaisissa rakenteissa kantavana rakenteena on useimmiten betoninen ontelo-, TT-laatta tai profiilipelti. Betonirakenne on luja ja tukeva alusta höyrynsuluille ja läpivientien tiivistämiselle, mutta sen epätasainen pinta ja laattojen väliset hammastukset saattavat vaurioittaa ohutta höyrynsulkumateriaalia. Profiilipelti on puolestaan epätasainen pohja kantavana rakenteena, jonka vuoksi sen päälle tulee asettaa luja tasaava kerros esimerkiksi rakennuslevy. Tällöin höyrynsulun asentaminen tukevalle alustalle ja läpivientien tiivistäminen on luotettavaa. (Kattoliitto ry, 2013, s. 15) Aurinkosähköjärjestelmän asennuksen aikana on myös vältettävä turhaa liikennettä katolla ja vältettävä tiedossa olevia saumoja ja hammastuksen mahdollisia kohtia, jotta höyrynsulun rikkoutumista ei painumien vuoksi tapahtuisi. (Viita & Keränen, 2016)

Kattorakenteen tulee kokonaisuudessaan olla riittävän jäykkä, jotta katolle ei syntyisi painaumuksia aurinkosähköjärjestelmästä. Painaumamat vahingoittavat vedeneristystä ja estävät veden poistumista katolta. (Kattoliitto ry, 2013, s. 22) Mikäli vesi lammikoituu tai sen kulku estyy aurinkosähköjärjestelmän telineiden vuoksi, alkaa veden kertymäkohtiin muodostua bakteeristoa ja orgaanista kasvustoa, jotka lopulta aiheuttavat katteen ja kattorakenteen enneaikaisen vahingoittumisen. (Solar Power World, 2015, s. 10)

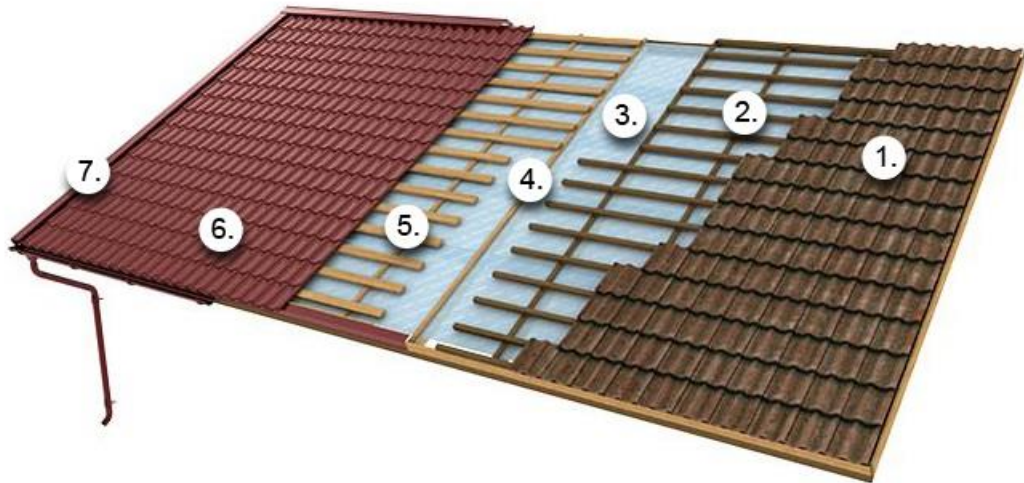
Bitumikermi on useimmiten loivien kattojen katemateriaalina, koska se kestää hyvin veden painetta. Muita harvemmin käytettyjä katemateriaalivaihtoehtoja ovat muovi- ja kumikermit. Loivilla bitumikatoilla käytetään kaksikermitettä, koska suosituksen mukaan yksi bitumikermi riittää ainoastaan 1:20 ja sitä jyrkemmille katoille. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 27-28) Aurinkosähköjärjestelmän kiinnityskohtat on lisäksi hyvä vahvistaa lisäkermillä. (Viita & Keränen, 2016)

Katemateriaali vaikuttaa asennuksissa valittaviin kiinnikkeisiin (Finnwind Oy, 2015b), sillä jokainen läpivienti on riski kattorakenteen vesitiivyydelle ja kestävyydelle. Katemateriaali kohtaisiin kiinniketyyppeihin ei kuitenkaan perehdytä tässä diplomityössä tarkemmin. Laitetoimittaja vastaa katemateriaaliin sopivan kiinnikkeen valinnasta, jonka vuoksi Helen ei aurinkovoimalan tilaajan roolissa ole tekemässä valintaan muutoin kuin valitun kiinnityksen hyväksyjänä.

Katot, joiden kaltevuus on suurempi kuin 1:20 lukeutuvat jyrkiksi katoiksi. Jyrkät katot ovat yleisimmin puurakenteisia, ja niiden kantavarakenne on palkki- tai ristikkorakenteinen. Jyrkillä katoilla käytetään epäjatkuvia katteita, kuten tiili-, pelti- ja aaltolevykatteita sekä muutamia bitumikatteita. Epäjatkuvien katteiden saumat eivät kestä veden painetta, joten niitä voidaan käyttää vain ulkopuolisella vedenpoistolla varustetuilla katoilla. Tällaisten katteiden alla käytetään vedenpitävää aluskatetta, -kermiä tai tiivissaumakatetta rakenteen tiiveyden varmistamiseksi tai mahdollisten kondenssihaittojen estämiseksi.

Jyrkillä katoilla aurinkosähköjärjestelmän kiinnitys läpäisee usein aluskatteen, joten läpivientitiivisteiden valinta on tehtävä sekä aluskate että itse katemateriaali huomioiden. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 62-63)

Kuvassa 7 on esitetty harjakaton yleinen kattorakenne. Kuvassa numero 1 esittää tiilikatetta, 2 ja 5 kattoruoteita, 3 aluskatetta, 4 kattotuoleja, 6 peltikatetta ja 7 vedenpoistoa.



Kuva 7. Harjakaton rakenne-esimerkki (Ruukki, 2016)

Aurinkosähköjärjestelmän kiinnitys pyritään kohdistamaan kattotuolien ja –ruoteiden risteyskohtaan, jotta kiinnitys on riittävän tukeva. Bitumikatteelle kiinnitys on suhteellisen helppoa, koska alustana on puulevy tai umpilaudoitus. Puulevyalusta jäykistää kattorakenteen paremmin kuin laudoitus ja joissain tapauksissa laudoitus vaatiikin vahvistusta esimerkiksi puulevyn avulla. (Kattoliitto ry, 2013, s. 68) Jyrkillä katoilla bitumikatteeseen tuleva kiinnitys myös vahvistetaan tiivistepellin avulla. (NIBE, 2011)

Peltikatteina käytetään profiilipeltejä ja konesaumattuja rivipeltejä, joiden alla ruodeväli on 200–600 mm riippuen katon kaltevuudesta. Konesaumattu pelti kestää veden painetta hyvin eikä välttämättä tarvitse aluskatetta. Profiilipellillä aluskate on ruoteen ja kattotuolin välissä. Materiaalina on yleisimmin kuumasinkitty teräsohutlevy. Pelliksi sopivat myös alumiini- ja kuparilevyt, jotka kestävät paremmin säätä ja korroosiota kuin teräs, eivätkä täten tarvitse kuumasinkkipinnoitusta. Metallien kanssa on tärkeää, että läpiviennit valmistetaan joko muovi- ja kumimateriaaleista tai samasta materiaalista kuin kate, jotta jalousasteet ja lämpöliikkeiden suuruudet ovat samat. Läpivienneillä on oltava käyttötarkoitukseen vaadittava mekaaninen lujuus sekä hyvä säänkestävyys. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 77-78) Konesaumatululle peltikatolle on mahdollista asentaa aurinkopaneelijärjestelmä ilman läpivientejä, jolloin kiinnitys tapahtuu katon pinnasta kohoaviin saumoihin. Asennus nopeutuu kun läpivientejä ei tarvitse tehdä, jonka lisäksi katteen käyttöikä säilyy ja mahdollisilta vuotokohdilta välttyään. (Pickerel, 2016)

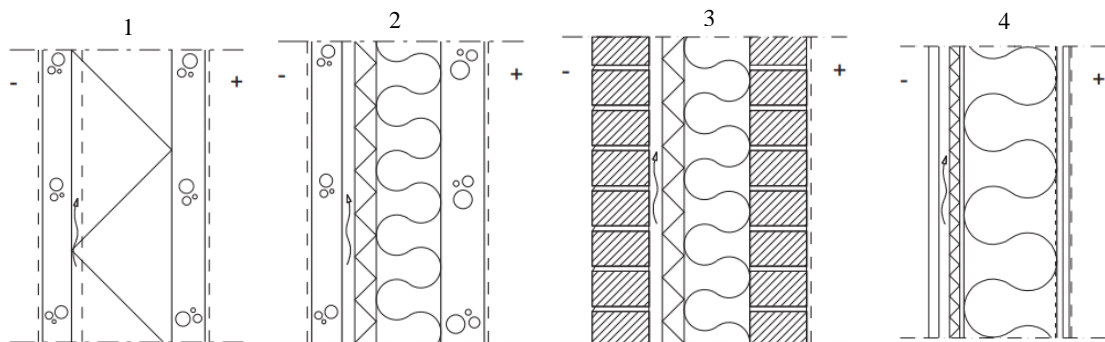
Kattotiilet voivat olla savi- tai betonitiiliä. Tiilien alla on aina aluskate, ja ruodeväli on 270–320 mm kaltevuudesta riippuen. Tiilikatteiden läpiviennit tiivistetään käyttämällä erityistä aluskatteen läpivientitiivistettä. Läpivientien välissä on oltava vähintään yksi ehjä tiili ja ne on sijoitettava ruode- ja tiilijaon mukaisesti lisäten tarpeen mukaan ruoteita. (Kattoliitto ry, 2013, s. 87) Tiilikatoille asentaminen voi olla hidasta, koska tiiliä joudutaan irrottamaan ja välillä loveamaan. Tiilikattoasennuksien etuna kuitenkin on, ettei itse tiileen tehdä reikiä, vaan kiinnike on koukun mallinen ja kiinnittyy suoraan kattotuoliin. (NIBE, 2011, ss. 45-60)

Seinät

Seinäasennuksissa kiinnitystapa on aina mekaaninen, jonka vuoksi rakenteen tuntemus on erityisen tärkeä. Mekaanisen kiinnikkeen on yletyttävä kantavaan rakenteeseen saakka, jotta aurinkopaneeli telineineen on tukevasti kiinnitetty.

Ulkoseinärakenteita tarkastellaan nyt pääasiassa pientaloja suurempien kohteiden kannalta. Tällöin yleisimpiä kantavia rakenteita ovat betoni ja teräsbetoni, hiljalleen yleistyvä puu ja joissain tapauksissa myös tiili. Telinevalmistaja määrittää käytettävän kiinniketyypin kantavan materiaalin ja seinän pintamateriaalin mukaan.

Alla olevaan kuvaan 8 on koottu neljä erilaista seinärakennetta.



Kuva 8. Yleisimpiä asuin-, toimisto- ja liikerakennusten ulkoseinärakenteita (RT 82-11006, 2010)

Kuvan 8 rakennetyypin 1 mukaiset betoniseinät ovat yleisimmän elementtiseiniä, jolloin sekä kantava rakenne että ulkokuori ovat betonia. Ulkokuoren viimeistely voi olla esimerkiksi tiiliverhous tai rappaus. Sandwich-elementeistä puhuttaessa sekä ulkokuori että kantava rakenne ovat teräsbetonia, kuten rakennetyypissä numero 2. Pintamateriaali voi olla esimerkiksi laatta, tiili tai rappaus. Tiiliseinissä eristeen molemmilla puolilla on muuraus rakennetyypin 3 mukaisesti. Vaihtoehtoisesti kantavan muurauksen lisäksi julkisivu voi olla esimerkiksi Rati-elementti tai julkisivulevy. Neljäs (4) rakennetyyppi on puurakenteinen ulkoseinä, jossa on koolattu kantava runko sekä halutunlainen julkisivuverhouslevy. Puurunkoiseen kiinnittämistä haastavaa tekee rakenteen sisällä olevaan koolaukseen kiinnittäminen. Koolaus on useimmiten noin 600 mm jaolla.

Seinille tuleva vuosittainen säteily määrä on kattopintoja matalampi, jonka vuoksi myös vuosittainen sähköntuotanto jää matalammaksi. Etujakin kuitenkin on, sillä niiden tuotanto on talvisin aamu- ja ilta-aikoina parempi, koska aurinko paistaa matalammalta. Tällöin myös sähkönhinta on korkeampi, joten seinäasennuksen kannattavuus kasvaa. Lisäksi talvella lumesta heijastunut säteily kohdistuu paneeleihin, mikä voi lisätä tuotantoa jopa 10 %. Satanut lumi ei myöskään pakkaudu paneelin päälle helposti. Integroiduissa seinäasennuksissa ei perinteisistä julkisivumateriaaleista tule kustannuksia. (Hakkarainen et al., 2015)

Maa

Maalle rakennettavat aurinkovoimalat ovat useimmiten utility-scale-kokoluokkaa eli useiden satojen kilowattien tai jopa megawattien suuruisia voimaloita, ja niiden tuottama sähkö menee yleiseen jakeluun tietyn kulutuskohteen sijaan. (Wills et al., 2014) Maalle asennettaessa telinetyyppejä on monenlaisia, koska asennus voidaan tehdä joko painoperusteisena tai maahan kaivetuin perustuksin. (Solar Power World, 2016) Maa-asennuksissa pollareiden sijaan puhutaan useimmiten pilareista tai paaluista.

Maaperä voi olla tarpeen selvittää ennen telinetyypin ja asennustavan valintaa, mutta katon rakennettavien aurinkosähköjärjestelmien kaltaisia kantavuuslaskelmia ei ole tarpeen tehdä. Etelä-Suomen rannikkoalueiden tyypillisiä maakerroksia ovat savi, turve, hiekka- ja soraharjut, kallioidet sekä moreeni. Pohjatutkimuksella voidaan selvittää rakennuspaikan topografia ja maakerrokset sekä niiden leikkauslujuudet ja routivuudet tarkemmin, mikäli se koetaan tarpeelliseksi. (Slunga, 2016, s. 2)

Aurinkosähköjärjestelmän paino riippuu telineratkaisusta, mutta kantavuuksien laskennassa käytetään järjestelmälle yleensä kokonaispainoa 30 kg/m^2 eli $0,3 \text{ kN/m}^2$. Tutkimuksien mukaan esimerkiksi saven leikkauslujuus on keskimäärin noin 15 kN/m^2 (Ronkainen, 2012, s. 43). Tämän perusteella aurinkosähköjärjestelmän voisi teoriassa asettaa saviselle maalle, mutta etenkin painoperusteisissa asennuksissa tämä järjestelmän kuorma $0,3 \text{ kN}$ ei jakaudu tasaisesti neliölle vaan betonipainojen kohdille. Tällöin maan pettäminen ja painumien syntyminen on mahdollista. Maalajien leikkauslujuuksia on yleisesti vaikea taulukoida, koska maakerrokset ovat usein eri maa-aineksien sekoituksia, jonka lisäksi lujuuden arvot voivat vaihdella paikoittain suuresti (Ronkainen, 2012, s. 44).

Aurinkosähköjärjestelmän paino jakautuu kiinteiden telinerunkojen avulla laajalle alueelle, joten oikein mitoitetuna yksittäisiä maanpainumia harvemmin syntyy. Painumat voivat kuitenkin heikentää tuotantotehoa, mikäli paneelit varjostavat toisiaan tai optimaalinen asennuskulma muuttuu. Haasteita maa-asennukselle voi Suomen olosuhteissa aiheuttaa etenkin maan pinnanmuotoja muuttava routa. Etelä-Suomessa routaraja on 180 cm , joten roudalle alttiit rakenteet tulisi joko perustaa tätä syvemmälle tai routaeristää. Routimattomalla maalla perustussyvyys on vapaammin määritettävissä. Routiminen riippuu pääasiassa maa-aineksen rakeisuudesta, joten hienorakeisia eli routivia maa-aineksia

ovat savi, siltti, lieju, moreeni ja pienirakeisimmat hiekat. Routimattomia ovat sen sijaan sorat, suurirakeisimmat hiekat ja kallio. (Slunga, 2016, ss. 8-9)

Yksiselitteistä ohjelinjaa aurinkosähköjärjestelmän telineiden perustusten syvyydestä ei ole, joten suunnittelija määrittää syvyyden telinetyypin mukaan. Pilarit voidaan esimerkiksi upottaa kaivantoon tai kairata maahan. Kaivantoihin tehtyjen perustusten syvyys on yleensä ollut noin 1 metri ja kaapeleille 0,7 metriä. Maahan kairattavien ruuvipaalujen varaan voidaan perustaa aurinkovoimala niin pehmeikölle kun hiekkamaallekin korkean kantokykynsä puolesta. Ruuvipaalun kierrelaippa vetää paalun maahan ja kun se kierretään routarajan alapuolelle, ei roudan vaikutuksista tarvitse juurikaan huolehtia. Kierrelaippa mahdollistaa ruuvipaalun kärjelle muista paaluja/pollareita/pilareita suuremman pinta-alan, jolloin sen kantavuus ja vetolujuus on korkeampi. Ruuvipaalujen maahan kairaus on asennuksena nopeampi kuin paneelirivistöjen suuntaisten kapeiden ojien kaivaminen, pollareiden asennus, kaivantojen täyttö, tiivistys ja tasaus. Kaivannot tehdään, jos maa on kovaa ja kivistä, tai jos aurinkovoimala tarvitsee jyrkät perustukset. Tällainen voi tulla kyseeseen, jos esimerkiksi telineisiin sijoitetaan useampia paneelirivejä päällekkäin. Ennen maa-asennuksia tulee selvittää alueella kulkevat sähkö- ja viemälinjat sekä tietoliikennekaapelit, jotta niitä ei vahingoiteta kaivannoilla tai kairauksilla. (Rakentaja.fi, 2015; Finnwind Oy, 2015a)

2.2 Rakennustekniikka

2.2.1 Rakenteiden kestävyys

Aurinkosähköjärjestelmän hyödyt tunnetaan globaalisti energiantuotannon monipuolisuuden ja päästöttömyyden lisäämisestä, mutta niiden asentamiseen liittyy myös haasteita. Haasteita ovat muun muassa sähkötekniset vaarat, tulipalot, sääolosuhteiden vaikutukset sekä rakenteiden kestävyys. Näihin vaaroihin ja haasteisiin ei toistaiseksi ole osoitettu riittävän päteviä aurinkosähköjärjestelmiä koskevia standardeja, koodeja ja ohjeita, mutta niitä kehitetään jatkuvasti. Yksi merkittävimmistä haasteista on myös järjestelmien ikääntymisen vaikutus. Aurinkoenergia-ala on vielä uusi ja järjestelmien asennukset vain muutaman vuoden ikäisiä, joten ikääntymisen vaikutuksista ei yksinkertaisesti ole vielä tietoa. (Wills et al., 2014, s. 2)

Sääolosuhteet kuten tuuli, lumi, korkeat lämpötilat ja kovat raekuurot voivat vahingoittaa paneeleita ja koko järjestelmää. Kuitenkin kuten jo aiemmin on todettu, aurinkoenergia-ala on vielä uusi ja näistä mahdollisista vaurioista ja niiden vakavuudesta on toistaiseksi hyvin vähän dokumentoitua tietoa. (Wills et al., 2014, s. 5)

Rakenteellinen kuormitus

Aurinkosähköjärjestelmän asentaminen vaatii rakennusalustalta kestävyysominaisuuksia, oli kyseessä sitten katto, seinä tai maa-alusta. Rakenteiden kestävyyttä käsitellään nyt

kattoihin keskittyen, koska katot ovat yleisiä aurinkovoimaloiden rakennusaloja ja maahan asennettavilla järjestelmillä ei rakennusalan kantavuus ole yhtä kriittinen kuin kattoasennuksissa.

Kattojen kuormituksesta vain pieni osa tulee itse aurinkosähköjärjestelmän painosta. Myös kattorakenteen omapaino aiheuttaa kuormitusta, mutta sitäkin merkittävämät ovat rakennusaloa kuormittavat ulkoiset voimat. Lumien kinostuminen, lämpötilamuu-
toksien aiheuttama lämpölaajeneminen, tuulen aiheuttama noste sekä roskien kerääntyminen voivat vahingoittaa sekä kattoa että aurinkosähköjärjestelmää. Järjestelmien mi-
toituksissa onkin huomioitava kaikki mahdolliset kuormitusten aiheuttajien vaikutus yh-
dessä ja yksittäin. (Wills et al., 2014, s. 9)

Asennustavoilla vaikutetaan rakennusalan kestävyys. Asennustavat on esitelty tar-
kemmin luvussa 2.5, mutta lyhyesti sanottuna kattoasennukset voidaan jaotella painope-
rusteisiin, mekaanisesti kiinnitettäviin, pollariikiinnityksiin ja integroituihin järjestelmiin.
Kattoasennuksista saatujen kokemusten mukaan painoperusteiset eli kelluvat järjestel-
mät eivät välttämättä pysy täysin paikoillaan, jonka vuoksi kattorakenteeseen tehtävät
kiinnitykset ovat luotettavampia. (Wills;Milke;Royle;& Steranka, 2014, ss. 9-11)

Kattorakenteen kestävyys kannalta kellovan asennuksen etuna on kattorakenteen lä-
päisemättömyys. Asennus on tällöin nopeaa, jolloin kustannuksia säästyy, ja jonka lisäksi
vesi ei pääse vuotamaan rei'istä rakenteeseen. Haitta puolesta on kuitenkin itse järjestel-
män ja sen painojen merkittävä omapainon lisäys kattorakenteelle. Mekaanisten kiinni-
tysten sekä pollariikiinnitysten arviointi ei ole kellovia asennuksia helpompaa, sillä katto-
rakenteet vaihtelevat ja voimat tulisi saada ohjattua paneelien telineiltä kiinnikkeiden tai
pollareiden kautta kattorakenteeseen ja rakennuksen kantavien rakenteiden kautta maa-
han. Tällöin on myös analysoitava eri osien kyky jakaa kuormitusta, sillä rakennuksen
katolla tuuliolosuhteet eivät ole samanlaiset reunoilla ja keskiosalla. (Wills et al., 2014,
s. 12) Rakenteiden kestävyys varmistaminen onkin ammattitaitoisen rakennesuunnit-
telijan tehtävä.

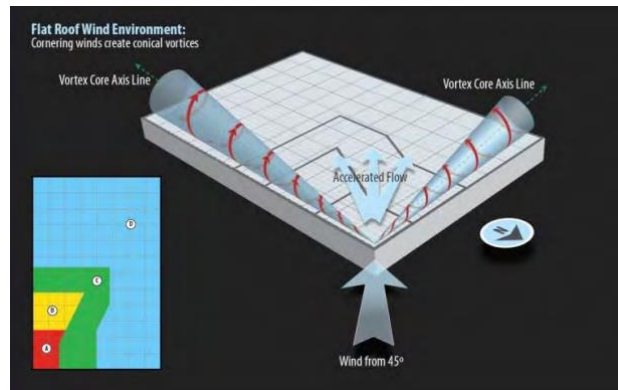
Lämpöeristeenä käytettävien villojen välissä voi kulkea tuuletusrakojen kattorakenteesta
riippuen. Raot ovat eristeiden pintakerroksissa, joissa käytetty villa on tavallisesti jyk-
vämpää. Mikäli lämmöneristettä käytetään vedeneristyksen alustana, kuten useissa loi-
vissa bitumikatoissa on tapana, on lämmöneristylevylle asetettu 50–60:n kN/m² puristus-
lujuuden vaatimus (Kattoliitto ry, 2013, s. 24). Aurinkosähköjärjestelmä kuormittaa kat-
torakennetta noin 0,30 kN/m², joten tuuletusrakojen painumisesta ei tarvitse olla huolis-
saan. Mikäli muutama tuuletusrako pääsee vähän painumaan, ei tämä vielä pääse vahin-
goittamaan kattorakennetta. Villa ei saa kuitenkaan päästä painumaan telineiden alla, jot-
tei vesi lammikoidu painaumiin ja vahingoita hiljalleen rakennetta. (Viita & Keränen,
2016) Tästä syystä telineiden kattopintaa koskettavien osuuksien on oltava pinta-alaltaan
riittävän leveitä, jotta kuormat jakautuvat niille tasaisesti eikä painaumiin synny.

Tuulikuormat

Tuulikuormien laskennan haastavuus sekä osittainen epätietoisuus ovat alan merkittäviä haasteita. Tuulikuormien vaikutuksia rakennusalaan ja aurinkosähköjärjestelmään on tutkittu, jotta asennusta, testausta ja ylläpitoa ohjaavat vaatimukset saataisiin määritettyä. Ongelmaksi on kuitenkin muodostunut maksimikuorman arviointi. (Wills et al., 2014, ss. 14-15) Tuulikuormien mitoittamiseen ja kuormien yhteisvaikutusten laskentaan ei ole olemassa Eurooppalaisia standardeja ja ohjeistuskin on hyvin rajattua. Kehittynein ohje kattoasennettujen aurinkosähköjärjestelmien tuulikuormien laskennasta on toistaiseksi vuonna 2014 päivitetty BRE DG489. Kyseessä on brittiläinen julkaisu *Wind loads on roof-mounted photovoltaic and solar thermal systems*, jossa on määritelty ulkoisen tuulenpaineen kertoimet erikseen katon nurkka-, reuna- ja keskiosille. Julkaisun ohjeissa on hyödynnetty myös eurokoodia EN 1991-1-4 liittyen kattorakenteisiin kohdistuviin tuulikuormiin, mutta tämä standardi ei kuitenkaan käsittele suoraan katoille sijoitettujen aurinkosähköjärjestelmien vaikutusta tuulikuormiin. Tästä syystä suunnittelijat ovat voineet vaan arvilla kuormien yhteisvaikutuksia standardin mukaisilla kertoimilla. (Autio, 2015; BRE, 2014)

Tuulikuormien laskennan rinnalle on kehitetty myös tuulitunnelitestaus, jolla havainnollistetaan tuulen vaikutusta järjestelmään. Tuulitunnelitesti tarjoaa oikein suoritettuna hyvät lähtökohdat kuormien vaikutusten tarkasteluun, mutta on kallista ja käytännössä vaikeasti toteutettavaa. Niin tuulikuormien laskennan kuin tunnelitestauksenkin kehittäminen on hankalaa, koska katolle tulevan ilmavirtauksen ominaisuudet ovat monipuoliset, jonka lisäksi aurinkosähköjärjestelmälle on useita erilaisia asennus- ja sommittelutapoja. Tuulitunnelitestausta kehitetään kuitenkin koko ajan, jotta saadut tulokset olisi yleistettävissä erilaisille järjestelmäkokonaisuuksille, eikä jokaista järjestelmäkokonaisuutta tarvitsisi testata erikseen. (Wills et al., 2014, ss. 18, 57) Brittiläisen julkaisun (BRE DG489) ohjeissa on hyödynnetty muun muassa tuulitunneleissa saatuja tutkimustuloksia. (Autio, 2015)

Yleisesti tuulikuormat jaetaan pääasiassa kolmeen alueeseen: keski-, reuna- ja nurkka-alueisiin. Nurkka-alueisiin kohdistuu suurin tuulikuorma, joka pienenee keskiosaa kohden. Reunoille muodostuu pyörteitä, joiden voimakkuuteen vaikuttaa rakennuksen muoto ja korkeus. Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty tuulikuormien vaikutusalueita. Punainen kuvastaa suurinta tuulikuormaa.



Kuva 9. Tuulikuormien vaikutusalueita (Wills et al., 2014, s. 13)

Tuulikuormat ovat erittäin merkittävässä osassa sekä rakennusalan että aurinkosähköjärjestelmän kestävyys- ja kantavuuden selvityksessä, sillä kovat tuulet luovat merkittäviä lisäkuormia tai kuormien keskittymiä yksittäisiin kohtiin. Rakennuksen muoto luo katon reuna-alueille pyörteet, joka yhdessä paneelialueelle kasvavan virtauksen kanssa kuormittavat rakenteita. Paneelialueella puhaltavaan virtaukseen vaikuttaa muun muassa rakennuksen korkeus sekä paneelialueen etäisyys katon reunasta. (Wills;Milke;Royle;& Steranka, 2014, s. 13) Tuulikuormien on todistettavasti nähty liikuttavan aurinkosähköjärjestelmää ja irrottavan sen osia, jolloin myös katemateriaali on vahingoittunut. (Zipp, 2013)

Erilaiset asennustavat kestävät tuulikuormat eri tavoin. Painoperusteinen järjestelmä pysyy paikoillaan painon ja kitkan avulla. Pollari kiinnityksessä pollari ottaa vastaan sekä ylös- että alaspäin kohdistuvat voimat kun taas mekaaniset kiinnikkeet ovat erilaiset ylös- ja alaspäin suuntautuville voimille. Tuuli ei suoranaisesti kuormita kattorakennetta kuten lumi tekee, vaan ennemminkin imuvaikutuksen kautta aiheuttaa nostetta aurinkosähköjärjestelmään (Viita & Keränen, 2016), joten nosteen suuruuden laskentaan vaikuttaa myös asennustapa. (Wills;Milke;Royle;& Steranka, 2014, s. 13)

Rakeet

Voimakkaat raekuurot ovat yksi aurinkosähköjärjestelmään kohdistuvista säärasituksista. Vahingot voivat olla fyysisesti näkyviä vaurioita tai esimerkiksi pieniä säröjä paneelin pinnassa, jolloin sähköntuottokyky laskee ja sähköiset vaaratekijät kasvavat. Tätä varten on kehitetty muun muassa amerikkalaiset standardit ASTM E1038 ja FM 4478, joiden mukaisilla testauksilla varmistetaan aurinkosähköjärjestelmän rakeiden kestävyys. Testaukset perustuvat kuitenkin yksittäisten kuurojen vaikutuksiin, eivätkä rakeiden aiheuttamiin vahinkoihin pitkällä aikavälillä. (Wills et al., 2014, ss. 23, 58)

Lumikuormat

Lumi vaikuttaa sekä järjestelmän rakenteen mitoittamiseen että sähköntuotantoon. Säättämällä aurinkopaneelien asennuskulman suuremmaksi kuin 20 astetta, valuu satanut lumi

pois paneelin päältä. Lumen vaikutuksesta aurinkopaneelien sähköntuotantoon on olemassa tietoa, mutta aurinkopaneelin ja kattopinnan väliin kinostuvan lumen vaikutuksesta rakenteisiin ei puolestaan ole. (Wills et al., 2014, s. 25)

Peruslumikuorma kuvaa tasakatolla olevan lumen määrää, joka esiintyy kerran 30 vuodessa. Tätä arvoa käytetään rakenteiden kantavuuksien mitoituksessa ja se on kerrottu kohteen rakennepiirustuksissa. Uusien rakennuksien kohdalla peruslumikuorman arvo saadaan rakentamismääräyksestä ja se on pääkaupunkiseudulla $180\text{--}200\text{ kg/m}^2$. Peruslumikuorman arvot ovat vuosien saatossa hieman muuttuneet. Vuosina 1955–1969 arvo oli noin 100 kg/m^2 ja vuosina 1969–1998 noin 180 kg/m^2 , kunnes se päättyi nykyiseen arvoonsa. (Ympäristöhallinto, 2016a) Tämän perusteella voidaan ennen 70-lukua suunniteltuja rakennuksia pitää riskirakenteina aurinkosähköjärjestelmien asennuksien kannalta, koska silloin lumikuorman mitoitusarvo on ollut puolet nykyisestä arvosta. Tästä johtuen katon kantavuuden varmistaminen laskennallisesti on tärkeää. Riskirakenteilla, eli tässä tapauksessa heikosti kantavilla katoilla, järjestelmän tuomat lisäkuormat pitää usein ohjata kantaville pystyrakenteille, jolloin toteutustavaksi jää oikeastaan vain pollariasennus. (Viita & Keränen, 2016)

Kattorakenteet suunnitellaan varmuuskertoimia käyttäen kestävämpään peruslumikuormaa suurempi kuorma. Lumen luonti on laaja-alaisilla katoilla suotavaa jo ennen kuin lumikuorma ylittää katon peruslumikuorman eli Helsingissä noin 200 kg/m^2 . Tavanomaiset omakotitalot eivät kokemuksen mukaan kuulu riskialttiisiin rakenteisiin toisin kuin laajemmat loivat kattorakenteet. (Ympäristöhallinto, 2016b) Lumen tiheys riippuu sen kosteudesta, jonka vuoksi tiheyden arvo on suurin keväällä. Tiheyden arvoksi käytetään mitoituksessa 350 kg/m^3 , joten noin 200 kg/m^2 kuorman aiheuttaa noin 60 cm lumikerros. (Autio, 2015) Mieluiten lumet tulee poistaa jo 40 cm peitepaksuuden ylittyessä (NIBE, 2011, s. 7). Lumikuorman suuruuden voi siis arvioida kertomalla lumikerroksen paksuuden lumen tiheydellä, eikä tulos saisi ylittää 200 kg/m^2 .

Likaantuminen ja roskat

Likaantuminen ja roskien kertyminen aiheuttavat myös haasteita järjestelmälle sekä kattorakenteille. Paneelin pinnalle kertyvä lika madaltaa sähköntuottavuutta ja kertyvät roskat kattopinnoilla estävät vesien kulkeutumisen kattokaivoihin. Lisäksi kattojen kaltevuudet ovat useasti hyvin matalat vesien ohjaukseen, jonka vuoksi välillä jo pelkät katto-saumamat tai pienet liitokset estävät vesien kulkeutumisen kattokaivoihin. (Wills et al., 2014, ss. 25-26)

Roskat voivat lisäksi olla myös paloturvallisuusriski. Tutkimuksen mukaan kattorakenteiden paloluokka säilyy aurinkosähköjärjestelmän asennuksesta huolimatta, kunhan katon ei pääse kerääntymään roskia. Roskat voivat nopeuttaa palon leviämistä tai syttyä itsestään palamaan lämpötilan noustessa paneelien ja kattopinnan välissä. Jotta roskien

kerääntymiseltä vältytään, tulisivat kattopinnat ja -kaivot tarkastaa muutaman kerran vuodessa, katolla on oltavat riittävät huoltokäytävät ja vaakasuuntaisia järjestelmän rakenteita, kuten kattopintaan kiinnitettäviä telineprofiileja, tulisi välttää. (Wills et al., 2014, ss. 25-26)

Kestävyyden tarkastelun haasteet

Tiedon puuttuminen sattuneista tapaturmista tai esiin tulleista haasteista liittyen lumi- ja tuulikuormiin, rakeisiin, tulipaloihin ynnä muihin, hankaloittavat aurinkosähköjärjestelmiä koskevien riskien määrittämistä. Kaikki dokumentoidut tiedot perustuvat vain muutamisiin selvitettyihin tapauksiin. Tieto on hyvin vajavaista eikä tarkkoja syitä tapahtuneille tapaturmille ole aina edes tiedossa. Epäilyt kohdistuvat lähinnä paneelien sähkövikaan, kaapelointeihin, järjestelmän kiinnitys- ja asennustapaan sekä tulipalojen leviämisenopeuden lisäämiseen. (Wills et al., 2014, s. 68)

Alan uutuus ei anna vielä tietoa järjestelmien pitkäikäisyydestä. Takuuajat ovat noin 20 vuoden luokkaa, mutta tutkimustietoa näidenkin toteutumisesta on kuitenkin vielä hyvin vähän. Jotta näihin odotettuihin takuuajoihin päästäisiin, pitää järjestelmän osat suojata vahingoittumiselta. Vahingoittumista voivat aiheuttaa muun muassa lämpötila, kosteus, UV-säteily, tuuli, rakeet, korkeajännitteet sekä korrosio, rikkoontuneet liittimet ja ylikuumentuneet kohdat. (Wills et al., 2014, s. 68)

Aurinkosähköjärjestelmien testauksissa ja mitoituksissa on rajoitteita, koska jokainen järjestelmä on uniikki. Lisäksi tekniikka kehittyy koko ajan ja uusien vaihtoehtoisten järjestelmäosien ja kokonaisuuksien valinnanvara kasvaa entisestään. Järjestelmäkokonaisuudet ovat erilaisia, jonka lisäksi myös niiden rakennusala ja ympäröivät olosuhteet vaihtelevat. Kaikkien järjestelmäkokonaisuuksien testaus eri olosuhteissa olisi merkittävän kallista, jonka lisäksi testaukset keskittyvät vain lyhyt aikaisiin testauksiin, kuten tuulikuormien hetkelliseen vaikutukseen, jolloin järjestelmän koko käyttöikä jää huomioimatta. Siispä nykyiset testausmenetelmät ja standardit eivät täysin takaa käyttöikä oletuksia eri ratkaisuille ja olosuhteille. (Wills et al., 2014, s. 68)

Lämpölaajeneminen ja materiaalien kestävyys

Telineiden osien, kiinnikkeiden ja rakennusosalustan välillä on materiaalia eroja, jolloin lämpölaajenemisen vaikutukset on huomioitava. Pitkät telineprofiilit laajenevat ja kutistuvat eri vuodenaikojen mukaan, jolloin niiden kiinnittymisissä on luonnollisesti oltava liikkumavaraa. Muuten rakenteet vahingoittuvat ja repivät esimerkiksi katon katemateriaalia liikkuessaan. (Zipp, 2013) Telineiden materiaalina useimmiten käytetään erilaisia alumiini- tai teräseoksia. Alumiinin lämpölaajenemiskerroin on noin $23 \cdot 10^{-6}/K$ ja raudalla lähes puolet pienempi $12 \cdot 10^{-6}/K$ (Seppänen et al., 2006, ss. 72-74). Lämpölaajenemisen vaikutukset ovat kuitenkin telinejärjestelmän osia kuormittavista voimista suhteellisen pienet (Hongjun et al., 2015).

Ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta syntyvä korroosio heikentää telinemateriaalien kestävyttä. Korroosion vaikutukset havaitaan esimerkiksi pinnan syöpymisenä tai ruosteena, jotka alkavat muodostua metallin reagoiessa hapen ja ilmasta tiivistyvän kosteuden, sadeveden tai kostean maaperän kanssa. Teräs voidaan pinnoittaa sinkillä korroosion estämiseksi. Alumiini, ruostumaton teräs ja titaani puolestaan kestävät hyvin korroosiota jo itsessään, koska ne ovat passivoituvia metalleja, joiden pinnalle muodostuu korroosiolta suojaava reaktiotuotekerros. Passivoituvilla metalleilla voi korroosiota esiintyä pienillä alueilla metallin pinnassa ja sen yleisin aiheuttaja on merivesi tai maantiesuolaus. Merivesi ja maantiesuolaus aiheuttavat näille metalleille myös jännityskorroosiota, jota ei voi paljain silmin havaita, ja joka voi pahimmillaan murtaa kuormitetun rakenteen. (Laitinen, 2012)

Tavallisesti luonnontilaisessa maaperässä korroosio on hidasta, mutta olosuhteet voivat vaihdella voimakkaasti. Kosteutta maassa on aina riittävästi, mutta happipitoisuus vaihtelee. Hienorakeisissa maissa ilma pääsee liikkumaan huonommin kuin karkearakeisissa maa-aineksissa, jolloin korroosio on hitaampaa. Maanpinnan tuntumassa puolestaan korroosioriski on suurin. Korroosiota kiihdyttävät maaperän happamoituminen sekä monet kemialliset aineet ja suolat. (Laitinen, 2012)

Eri jalousasteisia metalleja ei myöskään saisi yhdistää, koska epäjalompi pinta alkaa syöpyä jalomman pinnan kosketuksesta. Tätä kutsutaan galvaaniseksi korroosioksi. (Laitinen, 2012) Telineiden osat kootaan yhteen useimmiten erilaisin ruuvi- ja pulttiliitoksien (Hongjun et al., 2015), joten telineiden osien ja liitoksien/kiinnikkeiden materiaalien on oltava jalousasteiden vuoksi samat. Tämä on huomioitava myös pollareiden kiinnityksessä kattoristikoon tai muuhun kattorakenteen metallia sisältävään osaan. Myös liitoksien hitsaaminen voisi olla mahdollista, mutta se on hitaampaa ja liitoksen korroosion kestävyys matalampi kuin ruuvi- ja pulttiliitoksilla (Hongjun et al., 2015).

Kestävyysominaisuuksien parantamiseksi on alettu käyttää kulumisen kestäviä materiaaleja kuten anodisoitua alumiini, paksua sinkittyä terästä, ruostumatonta terästä sekä erilaisia teknologioita, jotka suojaavat UV-säteilyltä ja ikääntymiseltä. Telineiden materiaali- ja asennuskustannuksien madaltamiseksi on myös alettu kehittää erilaisia polymeerejä eli muoveja ja polymeerikomposiitteja eli muovin ja muiden materiaalien yhdistelmiä. (Hongjun et al., 2015)

Työmaatyöskentely

Katon kuntoa tulee varjella aurinkosähköjärjestelmän asennuksen aikana. Katto ei saa toimia varsinaisesti työmaana, jotta katolla olisi mahdollisimman vähän ylimääräistä liikennettä. Katolla kulkeminen, tippuvat tavarat, tavaroiden varastointi ja roskien kulkeutuminen kattokaivoihin voivat vahingoittaa sekä kattopintaa että koko kattorakennetta. (Zipp, 2013)

Rakenteiden mitoittaminen

Rakennuksen suunnitteluvaiheessa rakennesuunnittelija mitoittaa kantavat rakenteet lumi-, tuuli- ja hyötykuormien sekä rakenteiden omapainojen mukaan. Hyötykuorma määräytyy rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan (Puuinfo, 2011, s. 11). Mitoituksen alussa selvitetään eri kuormien suuruudet, jonka jälkeen lasketaan kuormitusyhdistelmät, joista suurimman mukaan rakenteiden mitoitus tehdään. (Puuinfo, 2011)

Mitoittavien kuormien laskennassa käytetään osavarmuuslukuja, jotka ovat suunniteluohjeissa vuosien mukaan hieman muuttuneet. Nykyiset osavarmuusluvut pysyville kuormille ovat 1,15 ja muuttuville kuormille 1,5. Aiemmin vastaavat luvut ovat olleet 1,2 ja 1,6. Näiden kautta voisi ajatella vanhojen ohjeiden mukaan mitoitetuissa rakennuksissa olevan hieman ylimitoitusta nykyisiin ohjeisiin nähden, mutta näin ei kuitenkaan ole. Kokonaisvarmuus on kuitenkin pysynyt samana, vaikka kertoimet ovat hieman muuttuneet, sillä osavarmuuksia huomioidaan mitoituskuormien laskennan lisäksi myös materiaalien kohdalla. Muutenkin jo olemassa olevien rakenteiden kantavuuksia tarkastettaessa, on laskemat hyvä suorittaa niiden ohjeiden ja normien mukaisesti, joiden mukaan rakennuksen suunnitelmat on aikanaan tehty. (Viita & Keränen, 2016)

2.2.2 Vedeneristys

Vedeneristyksestä tulee huolehtia, jotta aurinkovoimaloiden asennus ei aiheuta kosteusvaurioita rakennusalustaan eli seinä- tai kattorakenteisiin. Seinäasennuksista löytyy tois- taiseksi hyvin vähän dokumentoitua tietoa, mutta yleisesti voidaan sanoa, että aurinkosäh- köjärjestelmän kiinnityksien vedeneristys varmistetaan seinän pintamateriaaliin soveltu- vin tiivistein (Finnwind Oy, 2015c). Vaakasuuntaisilla kattopinnoilla vedeneristykseen on keskityttävä erityisesti, jotteivat vesien kulkusuunnat esty eikä vesi pääse lammikoi- tumaan katolle. (Wills;Milke;Royle;& Steranka, 2014, s. 26)

Erilaisille läpivienneillä on olemassa omat tiivistysosansa riippuen katemateriaalista. Eri materiaalien lämpö- ja kosteusliikkeet ovat erilaiset, mikä on huomioitava materiaalien yhdistelyä suunniteltaessa. (Kattoliitto ry, 2013, s. 66) Aurinkosähköjärjestelmien kiin- nityksissä on yleisimmin käytetty EPDM-kumitiivisteitä (Finnwind Oy, 2015c), jotka kestävät hyvin räsitystä, kuten korkeita lämpötilavaihteluita, UV-säteilyä ja kohteen ikääntymistä. Lähtökohtaisesti kiinnityksen läpiviennit eivät saisi tehdä tiivistämätöntä reikää vesieristeseen eivätkä höyrynsulkuun, sillä höyrynsulun tarkoituksena on estää sisäilman kosteuden pääsy rakenteeseen, johon se päästessään tiivistyy vedeksi (Kattoliitto ry, 2013, ss. 9, 18).

Pollarit asennetaan useimmiten katon rakentamisen tai korjauksen yhteydessä, joten ra- kennesuunnittelija on suunnitellut tiivistykset höyrynsulkujen ja vedeneristyksen lii- tynnöillä. Yleisenä ohjeena on, ettei pollareita, kuten muitakaan läpivientejä, sijoiteta

0,5 metriä lähemmäksi toisiaan tai pystyrakenteita. Lisäksi jireihin saa läpivienneistä sijoittaa ainoastaan kattokaivoja. (Kattoliitto ry, 2013, s. 49) Uuden rakennuksen yhteydessä toteutettavassa aurinkosähköjärjestelmässä voidaan voimalla suunnitella kiinnitettäväksi myös mekaanisesti tai painoperusteisena. Tällöin rakennesuunnittelija varmistaa höyrünsulkujen kestävyuden ja mekaanisen kiinnityksen kohdat, jottei kosteusvaurioiden syntyminen olisi mahdollista. Erityisesti suurissa rakennuksissa läpiviennit eivät saa vaikuttaa suunniteltuihin höyrünsulkuihin, koska suuret rakenteet liikkuvat merkittävän paljon, seinät pullistuvat lämpölaajenemisen vuoksi ja katot taipuvat lumikuormasta (Kattoliitto ry, 2013, ss. 14-15). Tällöin höyrünsulun kestävyys on laajojen liikkeiden vuoksi muutenkin kovilla, joten lisäkiinnitykset voisivat vaikuttaa vahingoittavasti höyrünsulun mukautumiseen rakennuksen lämpöliikkeisiin.

Läpivientien oikeanlaisen tiivistämisen lisäksi myös vesien kulkusuuntien esteettömyyden varmistaminen on erittäin tärkeää. Oikeanlainen kestävä kattorakenne ohjaa kallistuksilla katolle sataneet veden kattokaivoihin tai ulosheittäjiin. Valumatka saa olla maksimissaan 15 metriä. (Kattoliitto ry, 2013, s. 34) Aurinkosähköjärjestelmän telineet ja kaapeloinnit voivat ajattelemattomasti toteutettuna haitata vesien luonnollista kulkeutumista ja estää vesien poistumisen katolta. Pahimmassa tapauksessa järjestelmän asennukset, tai esimerkiksi painoperusteisessa järjestelmässä painojen paikoiltaan tippuminen, ohjaavat vedet väärään suuntaan aiheuttaen merkittävän kosteusvaurioriskin. Vaurioiden korjaaminen on vaikeampaa kun aurinkosähköjärjestelmä on jo asennettu, joten nämä seikat on syytä ottaa suunnittelussa huomioon. (Zipp, 2013)

Aurinkosähköjärjestelmien kiinnityksien ja telineiden kehitys on tuonut markkinoille yhä useampia erilaisia kiinnitystapoja sekä -osia, joiden avulla läpivientien vuotoriskit ja rakenteiden vahingoittuminen minimoidaan. Kehittyneimmät tuotteet ohjaavat veden pois läpiviennin ympäriltä ja keskittyvät tukevaan kiinnitykseen, jossa liikkeet eivät pääse vahingoittamaan katemateriaalia. (Solar Power World, 2016) Alla olevassa kuvassa 10 on kaksi vuonna 2015 palkittua, edistyksellistä ja kustannustehokasta kiinnitysosaa.



Kuva 10. Vuoden 2015 edistyksellisiä kiinnitystuotteita. (Muokattu lähteestä Solar Power World, 2016)

Bitumikermit jaetaan kolmeen eri tuote- ja käyttöluokkaan. Tuoteluokka määrittää kermin minimivaatimukset ja käyttöluokka kermiyhdistelmävaihtoehdot eri kattokaltevuuksille. Käyttöluokat VE40, VE80 ja VE80R kertovat katon minimikaltevuudet eli VE40 käyttöluokan minimikaltevuus on 1:40 ja VE80 minimikaltevuus 1:80. VE80R luokkaan kuuluvat raskaasti liikennöidyt ja/tai myöhemmin vaikeasti korjattavat tasot. Käyttöluokan mukaan määräytyvät kermiyhdistelmävaihtoehdot tuoteluokista TL1, TL2 ja TL3. Tuoteluokkaan TL1 kuuluvat kermit ovat vahvimpia ja luokan TL3 kermejä käytetään lähinnä vain alusrakenteina. (Kattoliitto ry, 2013, ss. 28-29) Olemassa olevien rakennuksien kermiyhdistelmiä ei ole suunniteltu aurinkosähköjärjestelmän asennukselle, mistä johtuen järjestelmän telineprofiilien alle tulisi laittaa lisäkermi, suosituksena luokkaa TL1. Tällöin varmistetaan vedeneristyksen tiivyydestä ja katon käyttöiän säilyvyydestä myös järjestelmän asennuksen jälkeen. Lisäksi lisäkerman ja telineprofiilin kiinnikkeen väliin tulisi asentaa tiiviste/laakeri suojaamaan kiinnityskohtaa. (Viita & Keränen, 2016)

2.3 Määräykset ja standardit

Aurinkovoimaloiden rakentamiseen liittyviä merkittävimpiä määräyksiä, asetuksia ja ohjeita on koottu alla olevaan kuvaa 11.



Kuva 11. Aurinkovoimaloiden rakentamiseen liittyvät määräykset ja ohjeet

Keskiössä on rakentamismääräyskokoelma, koska siihen pohjautuen kunnan rakennusvalvontavirasto tekee päätöksen aurinkovoimalan toteutuksesta. Seuraavana ovat työturvallisuusmääräykset, koska mikäli ne eivät täyty, voidaan koko työmaa sulkea. Seuraavana ovat standardit, joista eurokoodi ohjaa suunnittelua ja tuotestandardi/tekninen arviointi tuotteiden sertifiointia. Uloimmalla kehällä ovat ilmoitusvelvollisuudet aurinkovoimalan rakentamisesta palokunnalle ja paikalliselle jakeluverkonhaltijalle sekä RT-korttisto, Ratu-kirjasto ja Toimivat katot –julkaisu, joidenka ohjeet tulisi huomioida rakennusalustaan kiinnityksissä.

Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tarkemmin niitä kuvan ympyrässä esitettyjä alueita, jotka eivät ole muuten tässä työssä tulleet vielä esille.

Lupa-asiat

Rakentamista yleisesti ohjaavat säädökset on esitetty maankäyttö- ja rakennuslaissa, josta tarkemmat ohjeet ja säädökset löytyvät Suomen rakentamismääräyskokoelmasta. Kuntien kaavoitukset ja niitä täydentävät rakentamisjärjestykset ja -tapaohjeet perustuvat näihin lakeihin ja kokoelmiin. (Motiva, 2014c)

Lupa-asioita koskevat tiedot on kerätty Etelä-Suomen kuntien rakennusvalvontavirastoista sähköpostikyselyin, koska kuntien rakentamisjärjestyksissä ja -tapaohjeissa ei ollut juurikaan tietoa aurinkovoimaloiden rakentamisesta. Kyselyn toteuttamista ei suunniteltu diplomityön alussa, vaan tarve kyselylle huomattiin työn edistyessä.

Etelä-Suomen kuntien rakennusvalvontavirastoista saatujen vastauksien perusteella voidaan sanoa, että aurinkovoimaloiden lupakäytännöt vaihtelevat kunnittain. Sähköpostitse teetetyin kyselyn vastauksista tehty koontitaulukko on diplomityön liitteenä 2. Osassa kunnista pienen omakotitalon kokoluokan aurinkosähköjärjestelmän asennukseen riittää toimenpideilmoitus, kun taas osassa kunnista kyseinen ilmoitus ei ole ollenkaan käytössä. Tällöin pitää useimmiten hakea toimenpidelupaa, jonka tarpeen määrittää asemakaava, kohteen sijainti, asennustapa ja järjestelmän koko. Pääkaupunkiseudulla aurinkosähkö- ja -lämpöjärjestelmien asentaminen on vapautettu toimenpideluvasta, joten useimmiten järjestelmän voi ilmoittaa rakennusvalvontaan toimenpideluvasta kevennetyn lausuntomenettelyn avulla.

Maankäyttö- ja rakennuslaissa on säädetty naapurien kuulemisesta luvanvaraisten hankkeiden yhteydessä, mutta lopullisen päätöksen kuulemisen tarpeesta tekee kunnan rakennusvalvonta. Yleisesti toimenpidelupahakemukseen tulee liittää naapurien kuulemisen lisäksi itse hakemuslomake, ympäristöselvitys sekä pääpiirustuksia, joista ilmenee asemakaavamääräykset, kohteen sijainti ja aurinkovoimalan muuttama julkisivu. Lupa-asioissa on hyvä muistaa, että hakijana on aina kiinteistön omistaja, jonka vuoksi yksittäinen taloyhtiön asukas ei voi asentaa aurinkopaneeleja rakennukseen ilman taloyhtiön suostumusta.

Rakennuslupan hakeminen tulee yleisimmin kyseeseen, kun kohteen kantavia rakenteita tarvitsee aurinkosähköjärjestelmän rakentamisen yhteydessä vahvistaa, tai kun kyseessä on suuri, maisemakuvaa muuttava voimala, jolloin myös voimalan rakenteet ovat merkittävät. Aurinkovoimalan rakentaminen voi estyä täysin, jos kyseessä on historiallisesti merkittävä kohde tai suojeltu rakennus. Oman kunnan rakennusvalvontaan on syytä tarkistaa aurinkovoimaloita koskevat lupakäytännöt.

Aurinkovoimaloiden rakentamista koskevia lupa-asioita on kritisoitu kuntien välisten yhteisten suuntalinjojen puuttumisesta. Kritisointi on lopulta tuottanut tulosta, sillä useat kunnat uusivat parhaillaan lupakäytäntöjään aurinkovoimaloihin liittyen. Yhdistyneet säädökset tulevat edesauttamaan aurinkoenergian rakentamisen kasvua koko maassa sekä

nopeuttamaan pahimmillaan useamman kuukauden kestävästä lupaprosessista (Hakkarainen et al., 2015).

Rakentamismääräyskokoelman lisäksi aurinkosähköjärjestelmän turvallista asennusta ja käyttöä ohjaavat valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista, sähkömarkkinalaki sekä sähköturvallisuuslaki. Kaikkien markkinoilla olevien sähkölaitteiden on täytettävä sähköturvallisuuslain vaatimukset. Sähkömarkkinalaki puolestaan määrää muun muassa sen, että laitteiden ja asennusten on täytettävä verkkoon kytkemisen tekniset vaatimukset, ja että aurinkovoimalaa ei saa kytkeä verkkoon ilman verkkoyhtiön lupaa. (Motiva, 2014a; Motiva, 2014b)

Aurinkosähköjärjestelmän mekaanisen asennuksen saa tehdä omatoimisesti, mutta se saattaa vaikuttaa paneelin takuuehtoihin tai kotivakuutuksen kattavuuteen katon osalta. Verkkoon kytkettävien aurinkovoimaloiden sähkötyöt saa tehdä vain sähköasennusoikeudet omaava ja järjestelmälle on tehtävä aina käyttöönottotarkastus sekä tarkastuspöytäkirja. (Motiva, 2014b)

Standardit

Aurinkosähköjärjestelmien rakentamista ohjaavien lakien ja säädösten lisäksi on olemassa myös standardeja, joilla yhdessä aiemmin mainittujen ohjauskeinojen kanssa varmistetaan, että aurinkosähköjärjestelmän rakentaminen, asentaminen, verkkoon liittäminen ja käyttö ovat turvallisia. Nämä jo olemassa olevat standardit kohdistuvat pääasiassa järjestelmän laitteisiin ja komponentteihin. (Motiva, 2014a) Koska tämä diplomityö ei varsinaisesti käsittele aurinkovoimaloiden sähkötekniikkaa, ei myöskään sähkö- ja kone-tekniikkaan liittyviä standardeja esitellä.

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, joiden soveltaminen eri maissa vaatii kansallisten liitteiden laatimista. Eurokoodi koostuu yhdeksästä pääosasta, joihin sisältyy yhteensä 58 standardia. (SFS, 2014) Eurokoodeissa ei toistaiseksi ole tarkempia suunnitteluohjeita aurinkosähköjärjestelmille. Järjestelmän tuomien lisäkuormien laskennassa voidaan hyödyntää eurokoodi EN 1991-1 Rakenteiden kuormitukset, mutta kuormien yhteisvaikutuksen laskentaan ei eurokoodissa ole ohjetta. (Autio, 2015)

Standardeilla parannetaan muun muassa tuotteiden ja rakennusteollisuuden kilpailukykyä niin Euroopassa kuin muualla maailmassakin, kun liikkuvuus on vapaata. (SFS, 2011; SFS, 2014) Eri kirjainyhdistelmillä ilmoitetaan organisaatio, jossa standardin teksti on vahvistettu. Suomessa vahvistetun standardin tunnus on SFS, eurooppalaisessa standardisoimisjärjestössä CENissä vahvistetun EN ja kansainvälisessä standardisoimisjärjestössä ISOssa julkaistun ISO. (SFS, 2016b)

E-luku

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on säädetty sekä korjatuille että uudisrakennuksille E-luku (kWh_E/m^2), jolla tarkoitetaan rakennuksen vuotuista laskennallista ostoenergian kulutusta lämmitettyä nettoalaa kohden, energiamuotojen kertoimilla painotettuna. E-luvun laskennassa käytetään rakennusten energiatehokkuusmääräyksissä annettuja sääntöjä ja lähtöarvoja. Aurinkosähköjärjestelmä pienentää E-lukua, joten sillä voidaan ajatella olevan myönteinen vaikutus rakennuksen myyntiarvoon. (Motiva, 2014c) Valitettavaa kuitenkin on, että E-luvun laskennassa ei huomioida muille rakennuksille tai verkkoon syötetyn ylituotannon osuutta, vaan ainoastaan kyseistä rakennusta koskevan ostoenergian vähenemisen määrä (Ahola, 2015). Aurinkosähköjärjestelmän sähkön tuoton laskenta on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa D5, kohdassa 10.

Sertifikaatit

Sertifikaateilla voidaan osoittaa, että laitteet, komponentit ja rakennustuotteet ovat kansainvälisten, kansallisten tai paikallisten vaatimusten mukaiset. Harmonisoitu tuotestandardi hEN sekä eurooppalainen tekninen arviointi eli ETA määrittävät tuotteilta selvitetävät ominaisuudet, valmistuksen laadunvalvonnan vaatimukset sekä ilmoitettavat tiedot, jotta tuotesertifikaatti eli CE-merkintä voidaan myöntää. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on määrätty Suomessa käytettävien rakennusmateriaalien CE-merkinnöistä. Esimerkiksi teräs- ja alumiinirakenteiden on oltava tuotestandardi SFS-EN 1090 mukaiset. CE-merkintä ei kuitenkaan ole laatumerkki, vaan tuotteen käytettävyyden rakennuskohteeseen on arvioitava erikseen käytön, paikallisten olosuhteiden ja rakentamismääräysten vaatimusten perusteella. Esimerkiksi Suomen olosuhteissa on tarkistettava, täyttävätkö merkinnän mukaiset ominaisuudet pakkasenkestävyyden vaatimustason. Mikäli rakennustuotteen kelpoisuutta ei voi osoittaa CE-merkinnällä, voi valmistaja osoittaa sen tyyppihyväksynnällä, varmennustodistuksella tai valmistuksen valvonnalla. (SFS, 2011)

Työturvallisuus

Rakentamisen työturvallisuudesta on annettu valtioneuvoston asetus 205/2009. Asetuksen pykälän kahdeksan (8 §) mukaan laaditaan myös rakennusurakoita koskevat turvallisuusasiakirjat. (Finlex, 2009) Lisäksi työmaan yleiset työturvallisuustiedot on koottu osaksi Ratu-kirjastoa Rakennusalan työturvallisuus –julkaisuun (Rakennustieto, 2016). Sähkötöiden turvallisuusmääräykset on huomioitava erikseen. Julkaisussa OHSAS 18001 on puolestaan määrätty työterveys- ja työturvallisuusasioista. Tämä tullaan aikanaan korvaamaan, kun Standardisoimisjärjestö ISO:n standardi ISO 45001 valmistuu. (SFS, 2016a)

2.4 Kunnossapito ja huolto

Rakennusalan kestävyyteen vaikuttaa sen eliniän aikaisen kuormituksen lisäksi aurinkosähköjärjestelmän asennus. Huolimattomasti tehty asennus voi pahimmillaan johtaa useisiin huoltotoimenpiteisiin, joten niiden vähentämiseksi on seuraavaan listaan koottu kertauksena jo aiemmin esille tulleita, erityisesti kattoasennuksen aikana huomioitavia seikkoja:

- Asentajat ja järjestelmän kiinnikkeet eivät saa vahingoittaa vedeneristystä
- Jokaisen järjestelmän osan käyttöiän, suorituskyvyn ja kestävyyden on vastattava koko järjestelmälle suunniteltua käyttöikää
- Veden kulkeutuminen ja poistuminen sekä kaivojen toiminta ei saa estyä asennuksen aikana eikä sen jälkeen. Seisova vesi vahingoittaa sekä kattorakennetta että aurinkosähköjärjestelmää
- Aurinkosähköjärjestelmälle pääsy on suunniteltava niin, että tarkastukset, huollot ja korjaukset on mahdollista suorittaa tehokkaasti.

Näiden ohjeiden mukaan toimittaessa katto säilyttää kestävyys- ja vedeneristysominaisuutensa, järjestelmä suojaa rakennusta ja sen tuotantopotentiaali on maksimaalinen. (Wills et al., 2014, ss. 65-66)

Huolellisen asennuksen lisäksi myös kunnossapito- ja huoltosuunnitelmat ovat erittäin tärkeitä kokemusten perusteella. Laitetoimittajan kanssa tulee laatia huolto- ja kunnossapitosopimus ja aikataulu, joilla varmistetaan aurinkosähköjärjestelmän tarkastukset tasaisin väliajoin, mahdolliset korjaustoimenpiteet sekä tarvittava dokumentointi. Sopimukseen sisältyy muun muassa näköhavaintoihin perustuva tarkistus erityisesti liittynöille, helppopääsyisille kytkentäkoteloilta ja kaapelilinjoille sekä paneelien puhdistus tarvittaessa. Huoltohenkilön tulee olla aurinkosähköjärjestelmien asennuksiin perehtynyt ammattilainen, jotta hän huomaa ja tunnistaa vauriot sekä mahdolliset vaaratekijät. Sopimuksessa vastuualueiden on oltava selkeät ja sopimuksessa on syytä olla maininnat toimintatakuista, sillä mikäli huoltohenkilö ei kuulu asennuksen toteuttaneeseen yritykseen, ei hän vastaa virheistä, jotka paljastuvat asentajan aikaansaannoksiksi. (Murray, 2016; Wills et al., 2014, s. 62) Ylläpito- ja huoltokustannukset koostuvat muun muassa huoltotarkastuksista sekä noin 15 vuoden välein vaihdettavasta invertteristä. Merkittävä osuus näistä kustannuksista muodostuukin invertterin vaihdosta, jonka suuruus on noin 8-10 % aurinkovoimalan alkuinvestoinnista. (Auvinen & Jalas, 2016)

Aurinkosähköjärjestelmän tarkastuksien lisäksi myös rakennusala on tarkastettava, jotta käyttöikätaavoite toteutuu. Katemateriaaleille on olemassa omat huolto- ja kunnossapito-ohjeensa, jotka löytyvät Kattoliiton Toimivat katot –julkaisusta. Huoltotarkastukset tehdään katoille kaksi kertaa vuodessa ja jo pienillä toimenpiteillä estetään suuriakin rakenteellisia vahinkoja muodostumasta. Näitä toimenpiteitä ovat esimerkiksi kiinnikkei-

den ja läpivientien vedenpitävyyden ja mekaanisten vaurioiden tarkastus, kaivojen puhtauden varmistus sekä mahdollisten lätköitymisalueiden havainnointi. Mikäli huolto- ja korjaustoimenpiteitä tarvitsee tehdä, pätee niihin sama ohjeistus kuin aurinkovoimaloiden rakentamiseen eli kaivojen ja katteen pinnan on oltava puhtaat työn valmistuttua, eikä katetta saa käyttää suojaamatta varasto- tai työalueena. (Zipp, 2013; Kattoliitto ry, 2013, s. 49)

Yleiset kattotyöturvallisuuden vaatimukset edellyttävät putoamissuojausta ja nousuteitä, jotta huoltotoimenpiteet on turvallista suorittaa. Tästä syystä katoille sijoitetuille aurinkovoimaloille tulisi asentaa valjaiden kiinnitysvaijerit tai muut kiinteät putoamissuojaukset, jotka kiinnitetään kantavaan rakenteeseen tai erilliseen lisäruoteisiin valmistajan ohjeen mukaisesti. Suojaus ei saa kuitenkaan varjostaa paneeleita eikä paneeleilla puolestaan saa peittää katolla olevia tikkaita, kulkusilloja ja lumisuoja. Mikäli suurempia korjaus- tai huoltotöitä joudutaan toteuttamaan, on alhaalla rajattava turva-alue, huolehdittava katolla työmaan siisteydestä sekä estettävä tavaroiden putoaminen järkevällä sijoittelulla. (Kattoliitto ry, 2013) Seinille asennettujen järjestelmien huolto vaatii puolestaan aina henkilönostimen tai telineen jo pelkästään lumien poistamiseen.

Ilmasto-olosuhteet

Suomen lumiset talvet voivat aiheuttaa suurten kuormitusten lisäksi myös paneelien tehoalenemia. Paksut lumikerrokset eivät luonnollisesti päästä valoa lävitseen, jolloin paneeli ei pysty tuottamaan sähköä. (AccuWeather, 2015) Pohjois-Amerikan lumisissa oloissa tehdyssä tutkimuksessa (Heidari et al., 2015) selvitettiin tarkemmin lumen vaikutusta aurinkosähköjärjestelmän tuotantoon. Paneeleita asennettiin sekä varjosiin että varjottomiin paikkoihin pysty- ja vaakasuoraan, jolloin vuosittaiset tuotantoalenemat olivat 5:n ja 34 %:n välillä. Vähiten tuotantoalenemaa (5-12 %) lumesta aiheutui paneeleilla, jotka oli asennettu vaakasuoraan riviin (lyhyet sivut vastakkain), jyrkkään kulmaan (30° ja 45°) ja varjottomaan paikkaan. Suurin tuotantoalenema oli puolestaan tasaisella kattopinnalla vaakatasoon (asennuskulma 0 °) asennetuilla paneeleilla, missä ympäristö varjosti paneelikenttää. Tutkimuksen johtopäätöksiin mukaan lumisissa olosuhteissa paneelit kannattaa sijoittaa muutaman kymmenen asteen kulmaan vaakasuuntaisesti eli lyhyet sivut vastakkain ja varustaa tarvittaessa lumenpoistojärjestelmällä. Helposti huollettavilla aurinkopaneelikentillä lumen voi poistaa paneelin päältä pehmeäharjaisella harjalla (Finnwind, 2013).

Lumen kertymistä paneelien pinnalle pyritään estämään pinnoitteella, joka hylkii lunta ja sadevesiä. Pinnoitteen ja riittävän jyrkän asennuskulman avulla lumi ja vesi valuvat pois paneelin pinnalta. Jotta lumi poistuu myös paneelien alta, on kattopinnan ja paneelien välissä oltava vähintään 100 mm tuuletusrako. Aurinkosähköjärjestelmän telineet eivät myöskään saa estää lumien valumista pois kattopintaa pitkin. Tuuletusraon avulla myös tuuli pääsee kulkemaan paneelin alta, jolloin se viilentää paneelia kesäisin ja kuljettaa

lunta pois talvisin. (AccuWeather, 2015; Pasonen et al., 2012, ss. 27-28) Tuulella on merkitystä varsinkin kesähelteillä, sillä + 25 °C jälkeen jokainen asteen lisäys vähentää paneelin tehoa noin 0,35–0,5 %:a paneelityypistä riippuen (Suntekno, 2016, s. 6).

Lumi ja jää eivät saa vaurioittaa myöskään johtoja ja liittimiä, joten ne on kiinnitettävä hyvin ja suojattava talviolosuhteilta. Tasakatoilla lumi saattaa kinostua paikoittain, joten on tärkeää seurata, ettei kinostunut lumi ylitä kuormien kannalta maksimaalista peitepaksumutta eikä alipainetuulettimien korkeutta, jolloin yläpohjarakenteen tuulettuminen estyisi (Kattoliitto ry, 2013, s. 35). Pahimmat vauriot lumi voi aiheuttaa keväisin ja syksyisin, kun lumi vuorollaan sulaa ja jäätyy uudelleen. Lumella on kuitenkin myös positiivinen vaikutus, sillä lumesta heijastuneet auringonsäteet voimistavat paneelin sähköntuottoa (AccuWeather, 2015).

Paneelit voivat likaantua muun muassa ilmansaasteista tai lintujen jätöksistä. Tutkimusten mukaan paneelien pesu ei oleellisesti vaikuta paneelin tuottoon, ellei paneeli ole erityisen likainen. Siispä lintujen jätökset tulee pestä miedolla pesuaineella, mutta muu lika ja pöly paneelin päällä puhdistuvat useimmiten itsestään vesisateiden avulla. (Finnwind, 2013)

Asennuksen, kunnossapidon ja huollon vaikutukset paloturvallisuuteen

Aurinkosähköjärjestelmien yleistymisen vaikuttaa palokunnan pelastustoimenpiteisiin. Jo muutaman paneelin tuottama sähkö voi olla ihmiselle tappava, jonka vuoksi palokunnalle on ilmoitettava kaikista uusista asennuksista. Turvalliset aurinkosähköjärjestelmät ja pelastustoimet varmistetaan hyvällä suunnittelulla, toteutuksella, valvonnalla ja huoltotoimenpiteillä. (Wills et al., 2014, ss. 61, 63)

Aurinkosähköjärjestelmien merkittävimpana haasteena on niiden ainainen aktiivisuus, kun valoa on saatavilla. Järjestelmä tulisi olla suljettavissa nopeasti joko paneelirivistönä, kytkentäkotelosta tai yksittäisenä moduulina, mutta tämä on teknisesti haasteellista. Lisäksi akut jatkavat toimintaansa myös silloin kun valoa ei ole. Paneelien ja akkujen jatkuva toiminta aiheuttaa palokunnalle sähköiskun vaaran sekä vaikeuttaa heidän työtään hillitä paloa ja vähentää rakenteellisia vahinkoja. (AccuWeather, 2013; Wills et al., 2014, s. 65)

Kattopinnoilla olevat paneelit hankaloittavat luonnollisesti myös palokunnan liikkumista ja voivat pahimmillaan jopa estää palokuntaa tukahduttamasta paloa. Tästä syystä kattojen reunoilla on oltava vähintään metrin tila, joka mahdollistaa katolla liikkumisen. Lisäksi järjestelmän suunnittelussa tulen vaakasuuntaiseen leviämisherkkyyteen voidaan vaikuttaa paneelien riviväleillä sekä paneelin ja kattopinnan väliin jäävän tilan suuruudella. Paneelit eivät myöskään ole palonkestäviä, jonka lisäksi valmistusmateriaalit ovat palaessaan haitallisia hengitysteille sekä iholle, joten palokunnan on käytettävä hengityslaitteita välttääkseen turhan altistumisen. Suuren kokoluokan aurinkovoimaloihin palo-

kunta suhtautuu kuin mihin tahansa voimalaitoksen tai sähkönsiirtokentän paloon. Sammutustoimenpiteet suunnitellaan ennakkoon hyvin tarkasti, jonka vuoksi palokunnalle tehtävän ilmoituksen teko on erittäin tärkeää. (AccuWeather, 2013; Wills et al., 2014, s. 32)

Paloturvallisuutta edistetään merkkamalla sisäänpääsy, kulkutiet, savunpoistot ja kytkentäkotelot. Näiden lisäksi palokunnalle ilmoitetaan myös paneelikentän etäisyys katon reunasta sekä tiedot pääkytkimistä, inverttereistä, varavirtalähteestä, kaapelien ja johtojen kokonaisuuksista sekä virtapiirien katkaisumahdollisuuksista. Kulkuteiden on erityisesti julkisissa rakennuksissa mahdollistettavat palomiesten esteetön pääsy paneelikentän reuna-alueilta niille tuuletusalueille, kuten kattoikkunoille ja savunpoistoluukuille, joiden läheisyydessä tuli on. (Wills et al., 2014, s. 64)

International Building Code on vuoden 2012 julkaisussaan määritellyt, että aurinkosähköjärjestelmän paloluokituksen tulisi vastata kattorakenteen paloluokitusta. Järjestelmäkokonaisuuden paloluokitusta on kuitenkin vaikea arvioida. Jokainen järjestelmä on erillainen, joten kaikkien eri järjestelmäkokonaisuuksien testaaminen olisi hyvin kallista. Järjestelmän yksittäisille komponenteille on olemassa paloluokituksia, mutta kokonaisjärjestelmän paloluokituksen määrittäminen ja vertaaminen kattorakenteen paloluokkaan on vailla yksinkertaista metodia. Käytännössä yhtenäisten paloluokitusten toteutuminen voi kestää vielä vuosia. (Wills et al., 2014, s. 70)

Paloherkkyyttä nostavat sähköiset komponentit ja aurinkosähköjärjestelmän toimintalämpötilat. Maailmalla tapahtuneiden tulipalojen syynä on yleensä ollut maasulun suojaamattomuus tai johdotukset ja liittimet, jotka ovat aiheuttaneet sähkövian. Suomessa ei toistaiseksi ole ollut suurempia aurinkovoimalapaloja. Vaikka tässä työssä ei muuten käsitellä sähkötekniikkaa, tuodaan paloturvallisuuteen liittyvät seikat kuitenkin esille. Alla olevaan listaan on koottu suosituksia tulipalovaarojen minimoimiseksi:

- Oikeaoppiset asennustekniikat sekä huomion kiinnittäminen erityisesti kaapelointeihin
- Vuosittaiset ennakoivat huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet mahdollisten kehittyvien vaurioiden havainnointiin ja tarvittaviin korjauksiin
- Saatavan datan hyödyntäminen koko järjestelmän toiminnan tarkkailuun, jotta suunnittelemattomien huoltotoimenpiteiden tarpeet voidaan arvioida
- Paneelikentän ja maasulun toisistaan erottavan anturin yhdistäminen data järjestelmään, jotta ilmoitus häiriötilanteesta ja mahdollisesta tulipalovaarasta menee huoltohenkilökunnalle hyvissä ajoin
- Oikeaoppiset asennustekniikat sekä huomion kiinnittäminen erityisesti kaapelointeihin
- Eristysresistanssin mittaus kaikille johtimille, mukaan lukien paneelit ja niiden kaapeloinnit

- Tyhjäkäyntijännitteen ja napaisuuden tarkistus kaikille paneeliriveille ja syöttöpiireille
- Kaikkien paneelirivien ja syöttöpiirien toimintalukemien tarkistus
- Inverttereiden, katkaisimien ja kytkentäkoteloiden lämpökuvaus vähintään 50 %:n kuormalla sekä paneelientän lämpökuvaus, jotta tavallisista olosuhteista poikkeavat kuumentuneet kohdat huomataan
- Vuosittaiset ennakoivat huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet mahdollisten kehittyvien vaurioiden havainnointiin ja tarvittaviin korjauksiin
- Saatavan datan hyödyntäminen koko järjestelmän toiminnan tarkkailuun, jotta suunnittelemattomien huoltotoimenpiteiden tarpeet voidaan arvioida

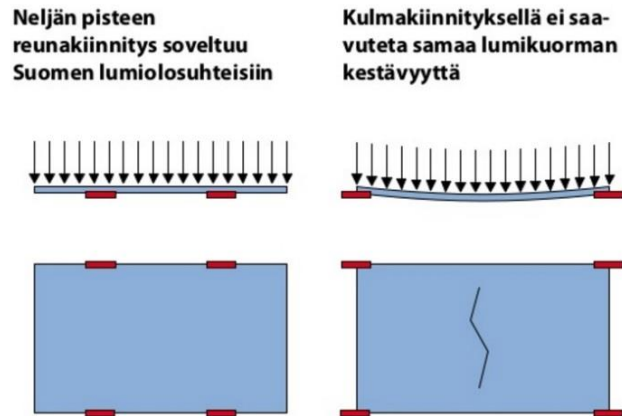
Yllä esitetyt paloturvallisuuteen liittyvät ohjeistukset on koottu kokemuksen ja tutkimusten perusteella. Kehityksen on jatkuttava, jotta turvallisuusvaatimuksista saadaan riittävän tarkkoja kaikkiin eri tilanteisiin. (Wills et al., 2014, ss. 61-62, 70)

2.5 Asennustavat

Asennustavan valinta lähtee liikkeelle rakennusalustasta ja sen rakenteesta. Alustoina toimivat yleisimmin katot, seinät ja maanpinta, joiden kaikkien rakenteissa on vaihteluita. Yhteistä kaikille alustoille ovat kuitenkin pääpiirteet, jotka alustasta on selvitettävä ennen asennustavan valintaan. Nämä ovat rakenteen kantavuuden tarkastelu, pinnan tasaisuus ja mahdolliset kallistukset sekä paikalliset lumi- ja tuuliolosuhteet. Kattojen tarkastelussa selvitetään myös vesien kulkusuunnat. (Finnwind Oy, 2013, s. 17) Pinnan tasaisuus ja kallistukset vaikuttavat pääasiassa paneelirivien aiheuttamiin varjoihin ja telineratkaisuun sekä kiinniketyypin valintaan kate- ja julkisivumateriaalin mukaan.

Aurinkopaneelien kiinnitysosista rakennusalustaan käytetään useimmiten nimityksiä jalusta, kisko ja telineprofiili riippuen hieman asennuskokonaisuudesta. (Kuronen & Loisa, 2015; Finnwind Oy, 2013; NIBE, 2011) Tässä työssä asennustelineen osia ei erotella tarkemmin, vaan telineellä tarkoitetaan telinekokonaisuutta, jolla aurinkopaneelit kiinnittyvät toisiinsa ja rakennusalustaan. Yleisimpiä asennustapoja telineineen on esitelty alaluissa 2.5.1–2.5.7.

Asennustelineet mitoitetaan olosuhteiden mukaan ja jokaiselle rakennusalustaan tulevalle kiinnikkeelle telinekokonaisuus on pääasiassa samanlainen. Kiinnikkeet ja telineille tulevat paneelit asennetaan tasaisilla jaoilla, jotta kuormitukset ovat tasaiset kaikille paneeleille, telineiden osille ja rakennusalustalle. Ulkomailla tehdyissä asennuksissa aurinkopaneelit on useimmiten kiinnitetty telineisiin kulmistaan. Suomen olosuhteissa aurinkopaneelit kiinnitetään pitkältä sivultaan kahdesta kohtaa, mikä perustuu lumikuormien ja tuulen aiheuttamien virtauksien mitoittamiseen. Tasaisen lumikuorman vuoksi paneeleita ei voi kiinnittää telineisiin nurkistaan, koska tällöin paneelin keskiosa kuormittuisi liikaa ja aiheuttaisi paneelin rikkoutumisen. (Finnwind Oy, 2013) Kuvassa 12 on havainnollistettu Suomen olosuhteisiin soveltuva neljän pisteen reunakiinnitys.

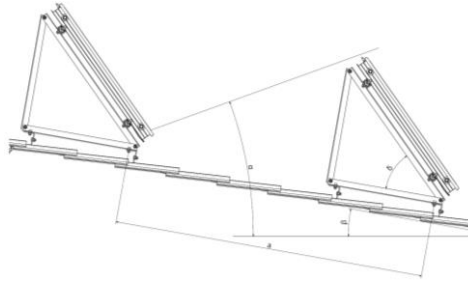


Kuva 12. Neljän pisteen reunakiinnitys Suomen lumiolosuhteisiin (Finnwind Oy, 2013, s. 7)

Telineitä on olemassa sekä kiinteitä että auringon ilmansuuntaa ja/tai korkeutta seuraavia ratkaisuja. Kiinteissä ratkaisuisa telineet asennetaan tuotannollisesti optimaaliseen kulmaan. Yhden akselin ratkaisuilla voidaan seurata joko auringon ilmansuuntaa tai korkeutta ja kahden akselin ratkaisuilla molempia. Kiinteät asennukset vaativat seuraavia ratkaisuja pienemmän pinta-alan, mutta ovat tuotannollisesti heikompia. Aurinkoa seuraavissa telineissä haasteita ovat olleet monimutkainen rakenne, alhainen käyttövarmuus, seurantalaitteen sähkönkulutus sekä kiinteää asennusta korkeampi hinta. Kehitys keskittyy näihin asioihin, jonka lisäksi seuraavia järjestelmiä kehitetään myös matalille asennuskulmille. (Hongjun et al., 2015)

Seurantajärjestelmän taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat siis edellisen kappaleen mukaan investointikustannukset, toimintavarmuus ja huoltotarve, aurinkosähköllä korvattun sähkön hinta sekä säteily määrä. Pilvisellä säällä säteily on pääasiassa hajasäteilyä ja auringon seuraaminen pienentää paneelin tuottoa jonkin verran. Pilvettömällä säällä tuotanto puolestaan suurenee. Suomeen tulevasta auringonsäteilystä 40–50 %:a on hajasäteilyä, sähkön hinta on alhainen ja olosuhteet aiheuttavat haasteita liikkuvien osien toimintavarmuuteen, joiden vuoksi seurantajärjestelmien käyttö ei ole nykyisillä järjestelmähinnoilla taloudellisesti kannattavaa. (Motiva, 2014)

Mikäli aurinkopaneeleja asennetaan useampaan riviin, eivät paneelirivit saa varjostaa toisiaan. Aurinkovoimalaa suunniteltaessa rivivälit lasketaan tarkkaan tuotantoa mallinnettaessa, jotta käytössä oleva pinta-ala saadaan tehokkaasti hyödynnettyä (Helen Oy, 2014-2016a). Alla olevassa kuvassa 13 on havainnollistettu rivivälin laskentaan vaikuttavat kulmat, joista α on rivien välinen varjostuskulma, β on katon kaltevuus ja δ on telineen ja paneelin kallistuskulma. (NIBE, 2011, ss. 36-37)



Kuva 13. Rivivälin laskentaan vaikuttavat kulmat (NIBE, 2011, s. 37)

Taulukkoon 2 on puolestaan koottu suuntaa antavia rivivälejä eri katto- ja telinekulmille. Taulukon arvoissa on hyväksytty 20 asteen varjostuskulma. (NIBE, 2011, s. 36) Taulukon arvot on laskettu aurinkokeräinriveille, mutta niitä voidaan hyödyntää myös aurinkopaneelien kohdalla, koska keräimet ja paneelit ovat kokoluokaltaan samanlaisia.

Taulukko 2. Rivivälejä eri kattokaltevuuksilla ja telinekulmilla (NIBE, 2011, s. 36)

| Katon kaltevuus β | Riviväli a | | |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Jalustakulma $\delta = 45^\circ$ | Jalustakulma $\delta = 35^\circ$ | Jalustakulma $\delta = 25^\circ$ |
| 0° | 3700 mm | 3350 mm | 3200 mm |
| 10° | 2700 mm | 2500 mm | 2550 mm |
| 20° | 2150 mm | 2100 mm | 2190 mm |
| 30° | 1800 mm | 1800 mm | 1950 mm |
| 40° | - | - | 1880 mm |

Aurinkopaneelitekniikka on kehittynyt merkittävästi viimeisien vuosikymmenien aikana, mutta telineteekniikka ei ole pysynyt kehityksessä mukana. Nykyiset telineratkaisut huomioivat tuuli- ja lumikuormat, maanjäristykset ja muut stabiliteettiin vaikuttavat tekijät. Vastatakseen kuitenkin nykypäivän paneelitekniikkaan, tulisi telineisiin olla kiinnitettävissä erilaisia paneelimoduuleita, materiaalien käyttöä ja ekologisuutta tulisi parantaa, kuljetusta, asennusta ja kunnossapitoa tehostaa ja turvallisuuskäsitteitä painottaa. Myös maiden välillä on eroavaisuuksia käytössä olevissa telineratkaisuissa. (Hongjun et al., 2015)

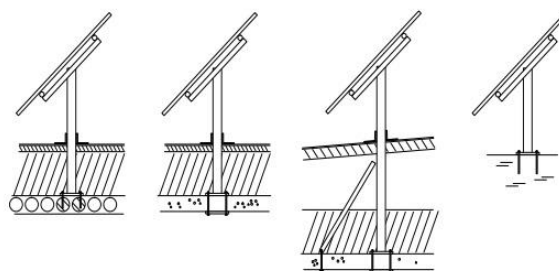
Nykyisellä telineteekniikalla asennuksen ongelmana ovat olleet myös monimutkaisuus ja hitaus, joihin ratkaisuina voisivat olla esimerkiksi telineisiin valmiiksi integroidut paneelit ja järjestelmien modulaarisuus eli mahdollisuus helposti lisätä ja poistaa valmiita moduuleja. (Hongjun, ym., 2015) Tästä hyvänä esimerkkinä on paneeliin valmiiksi integroidut kiinnikkeet kattopintaan sekä paneelien sarjaan kytkentään, jolloin asentaminen onnistuu ”plug-and-play”-tekniikalla. Asentamalla paneelit katolle uudella tekniikalla, yhdistyvät paneelien sarjaan kytkennät sekä kiinnittymiset toisiinsa automaattisesti, jolloin työvoimakustannukset laskevat 50 %:a. Yksi kehityssuunta on myös integroida mikroinvertterit valmiiksi paneelisiin. Nämä ratkaisut vaatisivat vähemmän asennuskoulutusta ja systeemitekniikka ja mahdollistaisivat työvoiman lisävähennykset, mikä puolestaan parantaisi voittomarginaalia, jota vähentyneet järjestelmäkustannukset ovat laskevat. (Andorka, 2014)

Aurinkoenergian asennukset ovat edenneet maailmalla jo vaiheeseen, jossa esimerkiksi Ranskassa pyritään pian tarjoamaan aurinkokeräinjärjestelmiä Ikean tyyliisesti kaikki yhdessä paketissa asiakkaan itse asennettavaksi. (Scharff, 2016) Vaikka jokainen kansalainen voisi tulevaisuudessa tehdä itse myös omat aurinkopaneeliasennuksensa, sähkötyöt pitää kuitenkin jättää ammattilaiselle. Paneelit kytketään sarjoiksi, joissa korkea tasajännite voi aiheuttaa hengenvaarallisen valokaaren väärin kytkettäessä. Siispä paneeli- ja invertteriasennuksia voivat tehdä Suomessa ainoastaan alan ammattilaiset. (Finnwind Oy, 2015a) Aurinkopaneeliasennuksia ei voi myöskään suositella kansalaisen itse suoritettavaksi, jotta rakennustekniset ongelmat eivät yleistyisi.

2.5.1 Pollariasennus

Pollariasennukseksi kutsutaan tässä työssä asennustapaa, jossa aurinkopaneelit telineineen kiinnittyvät kattoon pilareilla eli teräspollareilla. Pollarit kiinnittyvät kattorakenteen kantavaan osaan, jonka vuoksi asennustapaa käytetään erityisesti uudiskohteissa tai katon korjaustöiden yhteydessä. Pollarit ovat tukevia ja ne saadaan liitettyä vesitiiviisti vedeneristykseen, minkä vuoksi niitä suositellaan käytettäväksi silloin kun katolle asennetaan kiinteitä rakenteita vedeneristyksen yläpuolelle (Kattoliitto ry, 2013, s. 35). Pollariasennuksen telineiden investointikustannukset ovat tasakattoasennuksissa noin 40 % laitekustannuksista. (Kuronen & Loisa, 2015)

Tuulikuormien hallinta on helppoa tukevilla pollareilla, jonka vuoksi aurinkopaneelien kallistus optimikulmaan on mahdollista ja niiden etäisyys kattopinnasta on vapaasti määritettävissä (Kuronen & Loisa, 2015). Lisäksi katon huoltotyöt onnistuvat helpommin kelluvaan asennustapaan verrattuna (Finnwind Oy, 2013), mikäli paneelit on asennettu ainoastaan pollarilinjoille. Alla olevassa kuvassa 14 on esitetty pollariasennuksen kiinnityminen yläpohjan kantavaan rakenteeseen.



1. Ontelolaatan päälle rakennettu tasakatto
2. Betonilaatan (TT-laatta) päälle rakennettu tasakatto
3. Laatan päälle rakennettu katto kun korkea tuulettuva yläpohja
4. jne.

Kuva 14. Pollariasennuksen kiinnittyminen yläpohjan kantavaan rakenteeseen
(Finnwind Oy, 2013, s. 14)

Pollareiden kiinnitys on mahdollista myös kantaviin kattoristikoihin, kuten Helenin Kivikon aurinkovoimalassa on tehty (Helen Oy, 2015-2016). Kuvassa 15 on Kivikon aurinkovoimalan pollariasennus, jossa paneeleita on asennettu useampaan riviin pollarilinjojen välille.



Kuva 15. Kivikon pollariasennus

2.5.2 Kelluva-asennus

Kelluvassa asennuksessa rakennusaluustat ovat loivia kattoja tai tasaisia maanpintoja ja useimmiten jo olemassa olevia kohteita. Rakennusaluustaan ei tarvitse tehdä läpivientejä, vaan järjestelmä pysyy paikoillaan painoperusteisesti, mikä mahdollistaa nopean asennuksen ja vähentää katon läpivientien huoltotarvetta. Yksinkertaisuuden ja kalliiden kiinnikkeiden puuttumisen vuoksi kelluva-asennus telineineen on kustannustehokas vaihtoehto. (Finnwind Oy, 2016; Luhn et al., 2015, s. 30)

Tuulikuorman minimoimiseksi kallistuskulma jätetään yleensä 10–20 asteen välille, jonka lisäksi paneelin alareuna asetetaan lähelle katon pintaa. Telineet suunnitellaan siten, että niiden painoa on helppo kasvattaa ja tuulisuojan peittävyyttä lisätä, jotta tuuli ei liikuta järjestelmää. Tuulisuojan peittävyyttä lisätään muun muassa rivien päihin tulevilla levyillä sekä paneelien takana olevilla spoilerilevyillä. Telineiden yhteen liittäminen suureksi kokonaisuudeksi pitkittäis- ja poikittaisprofiilien avulla parantaa myös tuulikuormien sietokykyä, jolloin painolasteja ei tarvitse lisätä kuin kriittisiin kohtiin. Katon kantavuus on aina tarkistettava, sillä katon on kestävä painojen aiheuttama lisäkuorma. (Finnwind Oy, 2016; Rasinkoski, 2013)

Yleisimmin käytössä olevat kelluvat telinekokonaisuudet koostuvat telineprofiileista ja painoista. Asennusratkaisut ovat helposti muunneltavissa kohteen mukaisesti ja painot on useimmiten integroitu telineisiin. Painoilla on suuri pinta-ala, jotta niiden kattoon kohdistama pintapaine on pieni vaativissakin olosuhteissa. Telinekentästä voidaan myös telineprofiilien avulla rakentaa kahden suuntainen profiilimatriisi -runkoverkko, jolloin järjestelmän kokonaispainoa on mahdollista pienentää. Kiinteä runkoverkko mahdollistaa myös putoamissuojien kiinnityksen paneelienten reuna-alueilla. Pitkittäiset profiilit kuitenkin vaikeuttavat katon huoltotöitä, mutta kulkevat kiskoasennusjärjestelmää lukuun

ottamatta painojen päällä mahdollista veden vapaan juoksun katolla kaikkiin suuntiin. (Finnwind Oy, 2016) Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty esimerkkejä yleisesti käytössä olleista kelluvista telineistä paneeleineen.



Kuva 16. Erilaisia kelluvia järjestelmiä (Finnwind Oy, 2013, s. 15)

Kuvaan 17 on puolestaan koottu kuvia Solar Power Worldin listaamista vuoden 2015 parhaista telinetuotteista. Solar Power World listaa vuosittain aurinkoenergia-alan parhaimpia tuotteita ja toimijoita. Teline ratkaisuihin painotetaan toteutuksen yksinkertaisuutta, järjestelmän osien vähäistä määrää ja materiaalien kehitystä. (Solar Power World, 2016) Uusista ratkaisuista näkee myös betonipainojen uudet sijoituskohdat. Kokemukset ovat osoittaneet UV-säteilyn, kosteuden ja sulamis-jäätymisreaktion vaurioittavan betonia siten, että kuvan 16 mukaiset painona olleet betonilaatat ovat halkeilleet ja tipahtaneet paikoiltaan. Tällöin paino ei vaikuta enää halutulla kohdalla, jonka lisäksi se voi pudotessaan vahingoittaa katemateriaalia. (Pickerel, 2016c)



Kuva 17. Kelluvien järjestelmien uusia telinetuotteita (Solar Power World, 2016)

2.5.3 Mekaanisesti kiinnitettävä asennus

Mekaanista kiinnitystapaa käytetään kaltevilla katoilla sekä tasakatoilla, joilla olosuhteet ovat haastavat. Mekaanisesti kiinnitettävissä asennuksissa aurinkopaneelien telineet kiin-

nitetään kattorakenteeseen erilaisilla kattokiinnikkeillä, ruuveilla ynnä muilla kiinnitystarvikkeilla (Nissinen, 2012, ss. 27-45). Kiinnitystarvikkeita ei tässä työssä esitellä tarkemmin.

Harjakatoilla asennus tapahtuu telineprofiileilla yleensä kattolapteen suuntaisesti, mutta myös kallistetut järjestelmät ovat mahdollisia. Telineprofiileista muodostuu yksi- tai kaksikerroksinen ristikkorunko, jonka välien etäisyydet riippuvat siitä, asennetaanko paneelit vaaka- vai pystysuoraan. Myös kattopinnasta kallistavat järjestelmät ovat mahdollisia, mutta vaativat olosuhteisiin mitoitettua vahvempia telineet. Telineprofiilityypit ja niiden kiinnikkeet riippuvat katon katemateriaalista. (Finnwind Oy, 2015b) Alla olevassa kuvassa 18 on havainnollistettu kattolapteen suuntainen ja lappeesta kallistettu asennus sekä ristikkorunko.

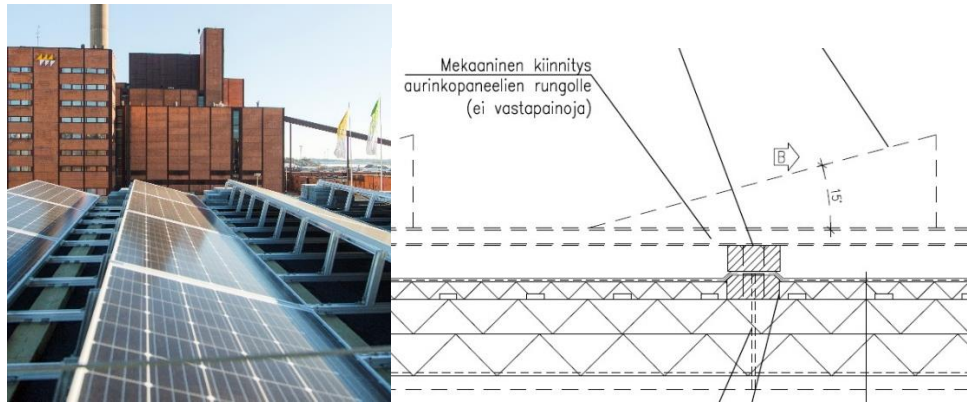


Kuva 18. Esimerkkejä mekaanisista asennuksista kalteville katoille (Finnwind Oy, 2015b)

Mekaaninen kiinnitys pyritään tekemään katon kantavaan rakenteeseen tai vesikatteen alustan ruoteiden ja kattotuolien risteyskohtaan. Näin varmistetaan tukeva kiinnitys. Kun kiinnitys tehdään kattorakenteen läpi, on asennuksessa erityisen tärkeää huolehtia katon tiiviynsä säilymisestä jokaisen läpiviennin kohdalla sekä huomioida nämä kohdat katon säännöllisissä tarkastuksissa. Kaikkiin kattomateriaaleihin on olemassa omat tiivistysosansa erilaisille läpiviennille, jotka selviävät katemateriaalin valmistajan ohjeista (Kattoliitto ry, 2013, s. 66). Yleisesti mekaanisten kiinnitysten vedeneristeenä on Suomessa käytetty ikääntymistä kestäviä EPDM kumitiivisteitä (Finnwind Oy, 2015b). Läpivientien tiivistykseen perehdytään tarkemmin luvussa 2.2.2 Vedeneristys.

Mekaaninen kiinnitys on kelluvaa kiinnitystä vahvempi, vaikka järjestelmän kokonaispaino onkin kevyempi. Mekaaninen kiinnitys ei myöskään aiheuta yhtä suurta puristusta eristyskerrokselle ja on nostettavissa korkeammalle katon pinnasta kuin kelluva-asennus. (Solar Power World, 2015, s. 27)

Katon korjauksen yhteydessä voidaan katon uusi rakenne suunnitella aurinkovoimala huomioon ottaen. Näin toimittiin Helenin Suvilahden aurinkovoimalaprojektissa, jossa kattorakenteeseen tehtiin koolaus aurinkopaneelien rivijaon mukaisesti. Tällöin mekaaninen kiinnitys onnistui helposti voimalaa varten suunniteltuihin koolauksiin. (Helen Oy, 2014-2016a) Kuvassa 19 on rajaus koolauksen rakennesuunnitelmasta sekä valmis aurinkovoimala.



Kuva 19. Suvilahden aurinkovoimalan koolaukset (Helen Oy, 2015b; Helen Oy, 2014-2016a)

Läpivientien tekeminen hidastaa asennusta ja nostaa kustannuksia. Kiinniketyyppejä kehitetäänkin nopeasti kiinnitettäviin ja eri materiaalien avulla kiinnikkeistä saadaan kestävämpiä ja kustannustehokkaampia. Kehityksessä pyritään esimerkiksi yhteen konkreettiseen kiinnikkeeseen ilman useita pienempiä osia sekä vedeneristystä parantavaan muotoiluun. (Solar Power World, 2016)

2.5.4 Seinäasennus

Seinäasennus toteutetaan mekaanisena kiinnityksenä hyödyntäen ruuveja, tulppia, ankureita ynnä muita kiinniketarvikkeita. (Nissinen, 2012, ss. 45-53) Kiinniketarvikkeet riippuvat seinämateriaalista, mutta asennustapa on kaikilla samanlainen. Asennusjärjestelmä soveltuu sekä pystysuoriin että kallistaviin seinäasennuksiin ja on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Esimerkki seinäasennuksesta (Finnwind Oy, 2015c)

Seinäasennuksien etuna on jyrkkä kallistuskulma, jolloin roskat ja lumi eivät peitä paneelia. Seinäasennuksia on kuitenkin toteutettu toistaiseksi kattoasennuksia vähemmän (OECD/IEA, 2014, s. 5). Etelään osoittavan suuren seinäpinta-alan löytäminen voi olla haasteellista, jonka lisäksi seinille osuu yleisesti kattoja enemmän varjoja. Tampereella 2 kW:n laitokselle tehdyn tutkimuksen mukaan seinäasennuksen tuotanto onkin vuosittain noin 24 % optimaaliseen kulmaan tehtyä kattoasennusta matalampi. (Paavola, 2013, s. 30) Seinäasennuksia voidaan hyödyntää kuitenkin sähköntuotannon lisäksi myös rakennusten jäähdytykseen asentamalla ne varjostamaan ikkunoita.

Seinäasennusten huolto on kattoasennuksia kalliimpaa, sillä paneelien luo pääsemiseen tarvitaan henkilönostin. Huoltotarpeen minimointiin on hyvä muistaa, ettei paneeleita tule sijoittaa seinustoille, joille lumet rakennuksen päältä talvisin pudotetaan (Finnwind Oy, 2013).

2.5.5 Maa-asennus

Maa-asennuksille vaihtoehdot ovat kelluva asennus sekä pilareiden varaan rakennettu pollariasennus. Maa-asennus on kannattava vaihtoehto isoille aurinkovoimaloille ja suurille tonteille. Vahvat rakenteet ja suuri käytössä oleva pinta-ala mahdollistavat paneelien asentamisen optimaaliseen asennuskulmaan tuotannon maksimoimiseksi. (Finnwind Oy, 2013) Maailman suurimmat aurinkovoimalat ovatkin maa-asennuksia (Topf, 2015).

Kuten muutkin asennustavat, myös maa-asennukset tulee sijoittaa varjottomille alueille, jonka lisäksi voimala-alue on viisasta aidata mahdollisen ilkivallan ja hengenvaarallisten jännitteiden varalta. Paneelien huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet ovat sen sijaan helpot, sillä ne onnistuvat maanpinnalta käsin. (Finnwind Oy, 2015a)

Maa ei asennusalustana vaadi kantavuustarkasteluja samalla tapaa kuin katto- ja seinärakenteet. Tämä mahdollistaa useat eri variaatiot maa-asennuksiksi. Pollariasennuksissa pollarit voidaan upottaa reilun metrin syvyiseen kapeaan kaivantoon tai kairata maahan. Kaikki kaivannot myös riviltä toiselle meneville kaapeleiden putkille sekä verkkoon syöttöä varten sähköpääkeskukseen menevälle maakaapelille kannattaa tehdä samalla kertaa. Kaapelikaivantojen syvyys on 70 cm. Haastetta asennukseen voi aiheuttaa epätasaiset pinnanmuodot, joten pollarit tulee suunnitella asennettavaksi heti oikeaan korkoon. (Finnwind Oy, 2015a) Kuvaan 21 on koottu erilaisia pollariasennuksia. Kuten kuvasta huomataan, voidaan paneeleita asentaa pollareiden varaan useampaan riviin sekä pystysuoraan (paneelien pitkät sivut vastakkain) telinetyypistä riippuen. Lisäksi osa telineistä kiinnitetään kahteen pollaririviin.



Kuva 21. Esimerkkejä pollariasennuksista maahan (Finnwind Oy, 2015a)

Solar Power World on listannut myös vuoden 2015 parhaimmat maa-asennustuotteet. Tuotteiden määrä on suurin verrattuna katoille tuleviin mekaanisiin tai kelluviin asennusratkaisuihin. Maa-asennuksissa muokattavuuden mahdollisuudet ovat suuret, kuten myös niiden markkinat, koska maailman suurimmat voimalat ovat maa-asennuksia. Parhaimpien tuotteiden listalla toistuvat ominaisuudet kuten asennuksen nopeus, vähäisempi perustusten lukumäärä paneelien määrään nähden, esivalmistusasteen nousu, epätasaiset maa-alustat, aurinkoa seuraavat telineet, materiaalien kestävyys ja ekologisuus sekä jorkamiehen mahdollisuus maa-asennuksen toteutukseen. (Solar Power World, 2016)

Maa-asennuksissa, kuten muissakin asennustavoissa, voidaan esivalmistelulla tutkitusti nopeuttaa asennusta ja laskea asennuskustannuksia. Kairauksella jo voitetaan aikaan verrattuna vaihtoehtoihin kaivantoihin ja betonivaluihin, jonka lisäksi telinekokonaisuuksia voidaan koota valmiiksi sisätiloissa. Tällöin välttyään ilmaston vaikutuksilta asennusnopeuteen, säästetään materiaaleja sekä parannetaan työturvallisuutta. (Pickerel, 2016a)

2.5.6 Integroidut ratkaisut

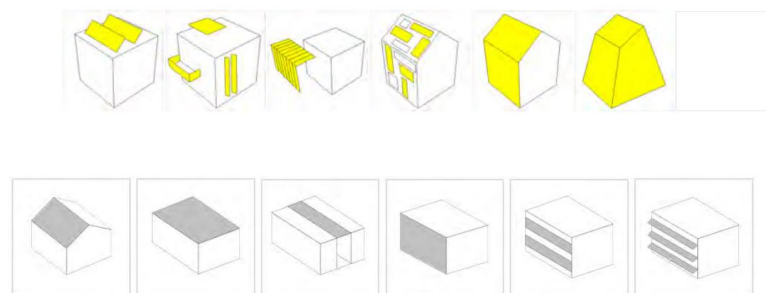
Rakennukseen integroiduilla aurinkopaneelilla pyritään ratkaisuun, joka on rakenteellisen korvaavuuden lisäksi myös toimiva ja esteettinen. Rakenteellisella korvaavuudella tarkoitetaan esimerkiksi julkisivu- tai vesikatamateriaalin korvaamista paneelilla. Rakenteellinen korvaavuus onkin ollut yksi integroitujen ratkaisuiden suurimmista haasteista, sillä niiden on vastattava rakennuksen perinteisten pintamateriaalien standardien mukaisia vaatimuksia. Vaatimuksena on muun muassa U-arvon säilyvyys eli rakenteen eristyskyvyn säilyvyys. Integroiduilla ratkaisuilla on haasteensa, mutta niiden etuna on myös arkkitehtonisen laadun parantuminen sekä kustannusten aleneminen, kun niillä korvataan muita rakennusmateriaaleja. (IEA, 2012, s. 7)

Kun integroiduilla ratkaisuilla korvataan rakennuksen vaippaa eli julkisivu- ja katemateriaaleja on paneelien täytettävä muun muassa seuraavat vaatimukset:

- kuormien on siirryttävä oikeaoppisesti paneeleilta rakennuksen kantaville rakenteille
- paneelien on kestävä ilmaston aiheuttama kuluminen, tuulen vaikutukset ja tulipalot
- vaurioituessaan paneeli ei saa aiheuttaa vaaraa
- ilkvallan mahdollisuudet tulee huomioida ja estää
- rakenteiden välille ei saa syntyä kylmäsiltoja
- rakenteiden U-arvot eivät saa huonontua
- paneeli ei saa vaikuttaa vesihöyryn tiivistymiseen väärään rakennekerrokseen, vaan seinän suunniteltu kuivuminen on säilyttävä
- paneeli- ja seinä-/kattomateriaalien tulee soveltua yhteen, jotta lämpölaajeneminen ei vahingoita saumoja ja yksityiskohtia
- paneelien kaapeloinnit eivät saa aiheuttaa tulipalovaaraa rakenteiden välissä
- paneelien lämpeneminen tulee huomioida sekä riittävä tuuletustila paneelin ja rakenteen välissä mahdollistaa.

Mikä tahansa paneeli ei siis sovellu integroitavaksi rakennuksen kaikkiin eri osiin. (IEA, 2012, ss. 7-8, 93) Vaatimuksen mukaisia sertifioituja paneeleja on markkinoilla jo useampia (IEA, 2012, s. 83) ja niiden käyttö on hiljalleen yleistynyt sekä Suomessa että maailmalla.

Alla olevassa kuvassa 22 on ylärivissä esitetty arkkitehtonisesti integroituja aurinkopaneeleita, eli paneelit ovat osana rakennusta. Alarivillä on esitetty varsinaiset rakenteisiin integroidut ratkaisuvaihtoehdot. Yleisesti puhuttaessa integroiduista ratkaisuista tarkoitetaan alarivin mukaisia asennusvaihtoehtoja.



Kuva 22. Arkkitehtonisesti ja rakenteellisesti integroidut aurinkopaneelit (IEA, 2012, ss. 96-97)

Ylärivillä vaihtoehdot aurinkopaneelien asennukselle ovat vasemmalta oikealle: teknisenä elementtinä lisätyt, useaan toimintatarkoitukseen teknisenä elementtinä lisätyt, vapaasti jalustalla olevat, osana julkisivua olevat, seinä- ja kattojulkisivun peittävät sekä aurinkoenergialle optimaalisesti muotoiltu rakennus. Alarivillä puolestaan vastaavassa

järjestyksessä ovat: harjakatto-, tasakatto-, kattoikkuna-, julkisivuverhouk- ja julkisivulasitusasennus sekä ulokkeet kuten lipat. (IEA, 2012, ss. 96-97)

Kattorakenteisiin integroidut paneelit voivat korvata katemateriaalia tai koko rakennetta, kuten esimerkiksi lasikattojen tapauksessa. Perinteiset kattojen päälle nostettavat aurinkosähköjärjestelmät ovat saaneet kritiikkiä esteettisyydestään, jonka vuoksi integroituja ratkaisuja on nykyään saatavilla maailmalla lähes kaikille eri katemateriaaleille ja rakennuksille tehtaista asuinrakennuksiin. Tasakatoille on lisäksi kehitetty niin sanottuja saumattomia paneeleja, jotka liimautuvat kattopintaan. Tämän mahdollistavat integroiduissa ratkaisuissa yleistyneet ohutkalvokennot. (IEA, 2012, ss. 97-99) Kuvan 23 vasemmassa reunassa ja keskellä on esitetty kattopintaan liimautuvat paneelit.



Kuva 23. Kattopintaan liimautuvat aurinkopaneelit sekä julkisivun paneeliverhouksen tuuletustilan havainnollistus (IEA, 2012, ss. 99-100)

Aurinkopaneeleista on tehty myös osittain läpinäkyviä ja kennojen muotoja paneelissa voidaan muuttaa, jolloin niitä on voitu hyödyntää myös kattoikkunoissa ja julkisivulasituksissa. Paneelit päästävät osittain valoa lävitseen, jolloin ne vähentävät sisälle pääsevän lämpösäteilyn määrään ja tuottavat samalla sähköä esimerkiksi jäähdytysjärjestelmän käyttöön. Seinissä paneeleita voidaan myös käyttää kattojen tavoin julkisivuverhouksena. Tällöin kantavan seinärakenteen ja paneelin väliin on jätävä tuuletustila, kuten kuvan 23 oikeassa reunassa on esitetty. Myös muutamia muita integroituja vaihtoehtoja, kuten paneelien käyttämistä varjostavina lippoina, parvekelaseina tai verhoina, on käytössä ja uusia kehitetään lisää koko ajan. (IEA, 2012, ss. 99-104)

2.5.7 Veden päälle asennettavat

Veden päälle rakennettavat aurinkovoimalat ovat yksi asennustapojen kehityslinjoista, joka on myös jo kaupallistettu. Kasvavat aurinkoenergiamarkkinat ja yhä suurempien aurinkovoimaloiden rakentaminen tarkoittavat myös suurempien pinta-alojen peittämistä paneeleilla, mutta suuria tyhjiä, tasaisia ja varjottomia alueita voi olla vaikea löytää. Muun muassa näistä syistä maat kuten Japani, Iso-Britannia ja Intia ovat alkaneet rakentaa megawattien aurinkovoimaloita vesistöjen päälle (Sinovoltaics, 2015). Vuonna 2016 valmistuu Iso-Britanniaan Euroopan suurin kelluva aurinkovoimala, joka on kapasiteetiltaan 6,3 MW. 23 000 paneelia sisältävä voimala rakentuu 61 000 ponttonin päälle ja 177 ankkurin varaan. (Clover, 2016) Maailman suurin yli 50 000 aurinkopaneelin kelluva voimala rakentuu parhaillaan Japaniin ja tulee olemaan kapasiteetiltaan 13,7 MW (Vaughan, 2016).

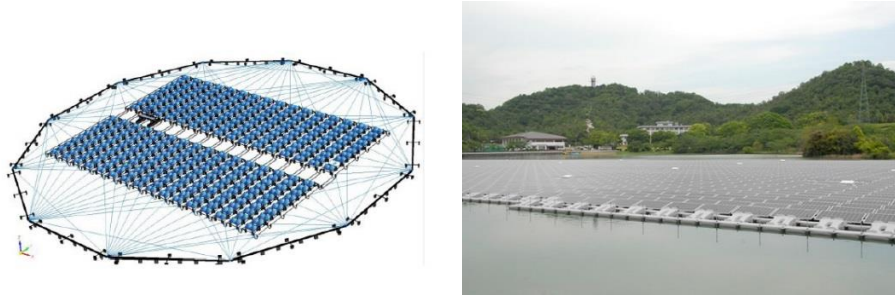
Aurinkopaneelit eivät pelkästään tuota energiaa, vaan suojaavat vesistöjä muun muassa saasteilta, liialliselta levän kasvulta ja kuumemmissa maissa erityisesti vesistöjen haihtumiselta ja kuivumiselta. Vesistö toimii samalla paneelien viilentäjänä, jolla on noin 11 % vaikutus paneelin tuotantotehon nousuun. Vesistöille sijoitetut aurinkovoimalat ovat myös turvassa maanjäristyksiltä. (Sinovoltaics, 2015)

Kelluvat voimalat rakennetaan ponttoonin päälle, joka voi koostua useista pienemmistä kellukkeista. Materiaalina käytetään UV-valon, korroosion ja vedon kestävästä HDPE muovia, joka on tuttua muun muassa muovisista maitopurkeista. HDPE on kierrätettävä ja soveltuu myös juomavesialtaisiin. Järjestelmä kiinnitetään esimerkiksi ankkureilla paikoilleen, mikä on syviin vesiin haastavaa ja kallista toteuttaa. Markkinajohtaja Solar Synergy ei tarvitse ankkurikiinnityksiä verkkomuodostelmansa vuoksi ollenkaan, joka on ollut heille merkittävä markkinaetu. Kelluviin järjestelmiin on toistaiseksi asennettu perinteisiä paneelimuodulleita. Perinteinen alumiinikehys, kuten muutkin metallit, syöpyvät korroosion vaikutuksesta, joten metalliosien tilalle on kehitelty polymeeriä, joka kestäisi merivesiolosuhteet. Sähkökaapeloinnit on toistaiseksi toteutettu veden päällä kulkevia tasoja pitkin. Vaikka osat eivät ole veden alla, on kaikki varustettava täysin vedenkestävillä suojuksilla. Invertterit ja akut pyritään sijoittamaan aina kuivalle maalle. (Vaughan, 2016; Sinovoltaics, 2015)

Rakentamiskustannukset ovat huomattavasti maa-asennuksia kalliimmat (Vaughan, 2016). Haasteita on tuottanut myös kelluvan alustan stabilointi, sillä tuulenpuuskat ja aallokko aiheuttavat paneeleille värityksiä, jotka saattavat aiheuttaa paneeleissa mikrohalkeamia, jolloin sen tuotantoteho laskee tai se rikkoutuu kokonaan. Muutamien kelluvien järjestelmien toimittajat voivat kuitenkin vakuuttaa järjestelmiensä kestävyys myös myrskytuulissa sekä 2 metrin aallokoissa. (Sinovoltaics, 2015)

Voimaloita on rakennettu muun muassa jäteveden käsittelylaitoksille, viinitarhoille ja kalaviljelylaitoksille, joissa vesivarannot ovat suuret ja sähköntarve myös. Suolaiseen veteen rakentamisessa haasteena on toistaiseksi materiaalien kestävyys, sillä suolavesi aiheuttaa korroosiota. Paneelivalmistajat eivät toistaiseksi anna takuita meriveteen asennetuille paneeleille. (Sinovoltaics, 2015)

Kelluvien järjestelmien toteutukselle on useampia eri vaihtoehtoja. Markkinajohtaja Solar Synergyn järjestelmän toteutuskustannukset ovat maa-asennuksien kanssa samaa luokkaa. Heidän kelluva järjestelmä perustuu hämähäkinverkko muodostelmassa kaapeleilla toisiinsa kiinnitettyihin itsestään kelluviin paneeleihin. Toinen markkinajohtaja on Ciel et Terre, joiden järjestelmä perustuu helposti ilman työkaluja toisiinsa kiinnitettäviin, patentoituihin moduuleihin. (Sinovoltaics, 2015) Molemmat järjestelmät on esitetty alla olevassa kuvassa 24.



Kuva 24. Solar Synergyn veden päällä kelluva järjestelmä vasemmalla ja Ciel et Terren oikealla (Sinovoltaics, 2015)

Tulevaisuudessa kelluvien aurinkovoimaloiden määrän uskotaan kasvavan. Lisäksi on ennustettu kelluvien aurinkovoimala farmien syntyä, joissa kellukkeiden päälle on luotu kasvualustoja erilaisille viljelmille. Paneelit tuottavat sähköä farmin tarvitsemaan valaistukseen, kastelujärjestelmän toimintaan sekä suolan poistoon kasteluvedestä. Väestön kasvu ja ilmastonmuutos haastavat ravinnon kasvun ja riittävyyden, jonka vuoksi uudet innovatiiviset ideat, kuten kelluva farmi, ovat tarpeen. (Sinovoltaics, 2015) Kelluva farmi on esitetty kuvassa 25.



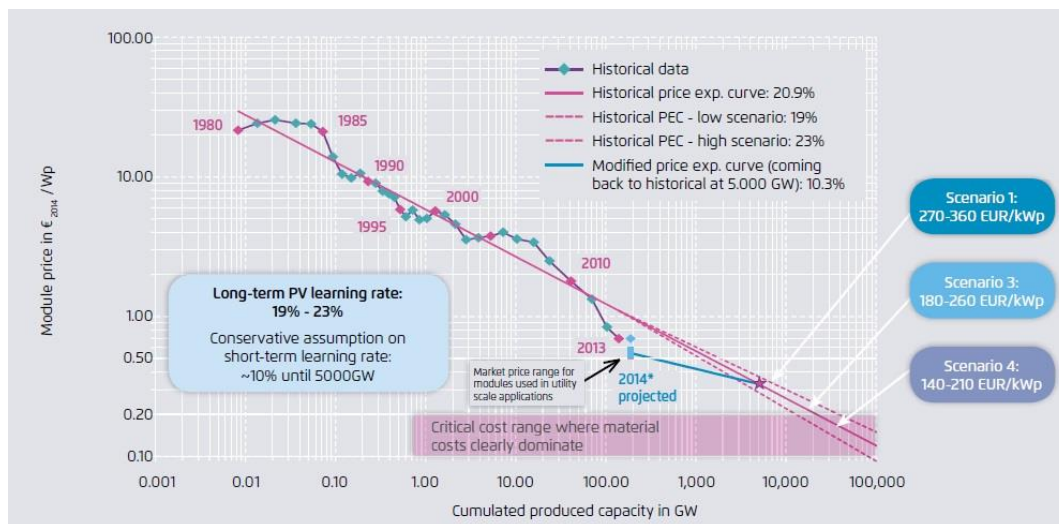
Kuva 25. Kelluva aurinkosähköä käyttävä farmi (Sinovoltaics, 2015)

2.6 Aurinkovoimalan rakentamisen kustannukset

Kustannusrakenteen muutokset

Lähtökohtaisesti aurinkovoimala investointi on kannattava tilaajalle, kun tuotettu sähkö kulutetaan kohteessa. Aurinkosähköjärjestelmän koko mitoitetaan kohteen kesäkulutuksen kuukausien mukaan, jotta ylituotantoa ei juurikaan muodostu. Ylituotannosta saatava korvaus on vain 1/3 ostosähkön hinnasta, joten investoinnin suuruus suhteessa korvauksen kautta saatuun hyötyyn ei ole tilaajalle kannattava. Aurinkovoimalan kannattavuus perustuu kohteen käyttäjiltä poistuviin sähkön siirtomaksuihin ja veroihin, jotka muodostavat 2/3 sähkön hinnasta. (Auvinen & Jalas, 2016) Lisäksi aurinkosähköntuottajan ei luonnollisesti tarvitse maksaa tuottamastaan sähköstä ja hän tekee oman osuutensa globaalien ilmasto- ja päästötavoitteiden eteen.

Aurinkovoimalan osista paneelien hinnat ovat laskeneet merkittävästi viimeisen parinkymmenen vuoden aikana. Keskimäärin kustannukset ovat laskeneet 20 %:a, kun tuotantokapasiteetti on tuplaantunut (Ahola, 2015). Alla olevassa kuvassa 26 nähdään paneelien hintakehitys, joka ennustetusti jatkaa laskuaan nykyisestä noin 0,6:sta €/W_p jopa 0,14:sta €/W_p optimistisimman skenaarion mukaan. (Agora Energiewende, 2015, s. 7).



Kuva 26. Aurinkopaneelien hintakehitys ja tulevaisuuden ennusteet (Agora Energiewende, 2015, s. 6)

Tulevaisuudessa hintojen laskuun tulee vaikuttamaan myös muut aurinkosähköjärjestelmän osat. Järjestelmäkustannukset ovat nykypäivänä noin 0,34 €/W_p, kun kustannuksista vähennetään paneelien ja invertterin osuus. Tämä koko muun järjestelmän kustannus tulee laskemaan noin 0,12–0,21:en €/W_p vuoteen 2050 mennessä. Hintojen laskuun vaikuttaa itse osien kehityksen lisäksi myös paneelien hyötysuhteen nousu sekä aurinkovoimaloiden yleisimpien kokoluokkien kasvu yli megawattien voimaloihin. (Agora Energiewende, 2015, ss. 8, 16, 38)

Järjestelmäkustannusten laskuun tulee vaikuttamaan merkittävästi teline- ja kiinnitysosien kehitys, joka on vasta hiljalleen alkanut. Paneelien kehitys on jatkunut jo vuosikymmeniä eikä näkyvissä ole aiempaa suurempia muutoksia lähitulevaisuudessa, joten seuraavat kehityksenkohteet ovat aiemmin alakynteen jääneet telineiden ja kiinnitysosien materiaalit, niiden koon pienentäminen ja materiaalin väheneminen sekä muotoilu ja sitä kautta saatava asennusnopeus. Esimerkiksi maahan asennettujen telineiden kustannusten ennustetaan laskevan nykyisestä noin 0,075:stä €/W_p jopa 0,016–0,038:an €/W_p vuoteen 2050 mennessä. Kustannus sisältää ainoastaan telineet, ei asennustyötä. (Agora Energiewende, 2015, ss. 32-33, 41-42; Andorka, 2014; Hongjun et al., 2015)

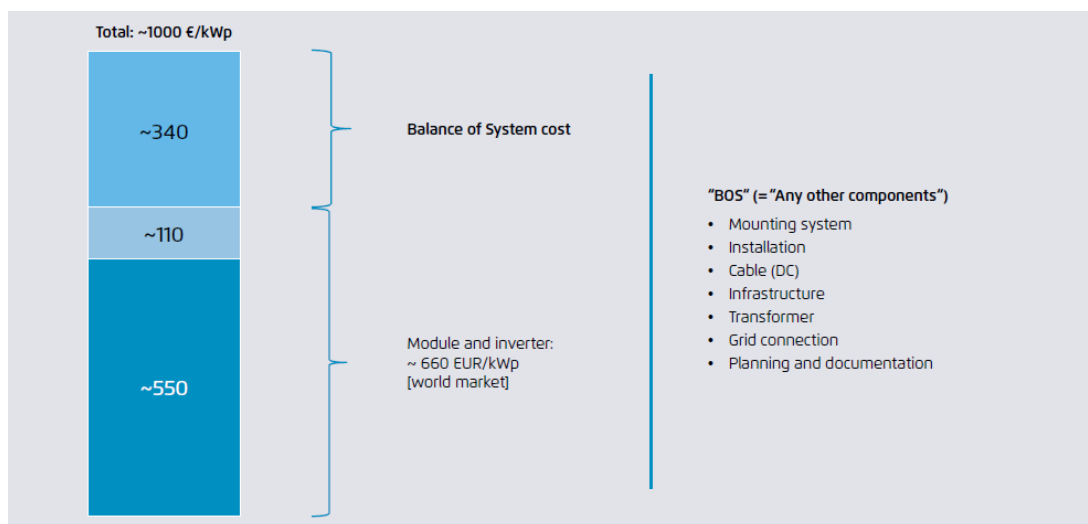
Lisäksi aurinkosähköjärjestelmän kokonaiskustannuksia pudottavat tulevaisuudessa inverttereiden hintakehitys. Invertterin osuus alkuinvestoinnista on merkittävä, jonka lisäksi suurin osa ylläpitokustannuksista muodostuu niiden vaihdoista 15 vuoden välein.

(Auvinen & Jalas, 2016) Inverttereiden hinnan on ennustettu laskevan nykyisestä noin 0,11:sta €/W_p jopa 0,023–0,039 €/W_p saakka (Agora Energiewende, 2015, s. 7).

Suomessa aurinkoenergia-ala on vasta alkanut kasvaa, joten yllä oleviin hintaluokkiin ei vielä aivan päästä. Suomessa koko aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannukset, paneelit mukaan luettuna, ovat 1-1,6 €/W_p. Itse tuotetun aurinkosähkönhinta on 3,3–5,3 snt/kWh investoinnin tehneelle yritykselle tai kunnalle ja 7,3–11,6 snt/kWh pienemmille kotitalouksille ja asunto-osakeyhtiöille. Aurinkosähkön tuotantohinta eli LCOE (levelized cost of energy) muodostuu alkuinvestoinnista sekä käyttöiän aikaisesta tuotosta ja ylläpitokuluista. Käyttöiäksi on laskelmissa oletettu yli 30 vuotta ja ylläpitokustannuksiksi 15 vuoden välein vaihdettava invertteri sekä huoltotarkastukset. (Auvinen & Jalas, 2016; Agora Energiewende, 2015, s. 53) Ennusteiden mukaan aurinkosähköstä tulee halvin sähkötuotantomuoto eri puolilla maailmaa. Euroopassa hinnaksi ennustetaan 4-6 snt/kWh vuoteen 2025 mennessä ja 2-4 snt/kWh vuoteen 2050 mennessä, kun se vuonna 2015 oli Saksassa noin 9 snt/kWh (Agora Energiewende, 2015, ss. 6, 8).

Kustannusten muodostuminen

Aurinkosähköjärjestelmä hankintakustannusten muodostumisessa voi maittain olla suuriakin eroja kattoasennuksien osalta. Maa-asennuksien kustannusten jakautuminen on vertailukelpoisempaa. (Agora Energiewende, 2015, s. 14) Alla olevassa kuvassa 27 on esitetty 1 MW maa-asennuksen kustannusten jakautuminen Saksassa.



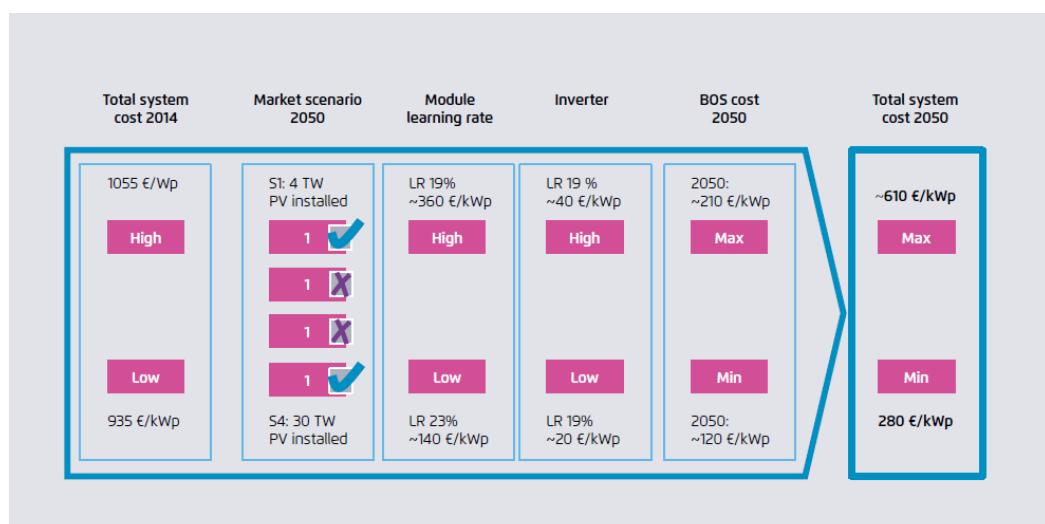
Kuva 27. Maahan rakennetun aurinkovoimalan hankintakustannusten jakautuminen (Agora Energiewende, 2015, s. 40)

Järjestelmän hankintakustannus on ollut noin 1 €/W_p, mikä on aiemmin mainittuun Suomen hankintahintavaihteluun 1-1,6:en €/W_p nähden hyvin edullinen. Paneelien osuus kustannuksista on kuvan mukaan noin 55 %:a, invertterin 11 %:a ja balance of system cost (BOS) eli järjestelmän kokonaiskustannuksien loppuosuus 34 %:a. Loppuosuuteen kuuluvat telineratkaisu, asennukset, kaapeloinnit, infrastruktuuri, muuntaja, sähköliityntä

sekä suunnittelu ja dokumentointi. Näistä merkittävimmät osuudet ovat telineratkaisu noin 0,075 €/W_p, sähköliityntä 0,06 €/W_p, asennukset 0,05 €/W_p, kaapelointi 0,05 €/W_p ja infrastruktuuri 0,04 €/W_p. Infrastruktuurin kustannuksiin kuuluvat muun muassa aurinkovoimalan aitaukset ja teiden rakentaminen, joten näiden kustannusten suuruus riippuu hyvin paljon kohteesta ja suurin osa kustannuksista muodostuu työvoimasta. Loput kokonaiskustannusten loppuosuudesta eli noin 0,06 €/W_p muodostuvat muuntajasta (0,02 €/W_p), kytkentäkoteloista (0,005 €/W_p/kotelo), suunnittelusta ja dokumentaatiosta (0,035 €/W_p). BOS kustannusten ennustetaan laskevan 39–65 %:a vuoteen 2050 mennessä. (Agora Energiewende, 2015, ss. 39-40, 45-47)

Tutkimuksen asennuskustannuksiin kuuluvat telineiden asentaminen, paneelien kiinnitys telineisiin sekä paneelirivistöjen liittäminen inverttereihin. Kustannukset muodostuvat pääosin työvoimasta ja ovat noin 0,05 €/W_p. Asennuskustannuksiin tulee laskevasti vaikuttamaan asennusnopeuden tehostuminen sekä mahdollisesti asennusten automaatio, jonka käyttö on kuitenkin toistaiseksi epävarmalla pohjalla. Varmemmin asennuskustannuksiin vaikuttaa standardisoinnit sekä yksityisten aurinkosähköjärjestelmien kokoluokkien kasvu. Riippuen aurinkopaneelien hyötysuhteen kehityksestä, voivat järjestelmien asennushinnat pudota 10–74 %:a eli jopa 0,013:en €/W_p saakka. Asennuskustannusten muutoksen skaala suurien kokoluokkien aurinkovoimaloissa on suuri myös siitä syystä, että kustannuksissa on huomattu olevan suurta vaihtelua eri puolilla maailmaa. Kehitysmaissa kustannukset ovat merkittävästi esimerkiksi Eurooppaa matalammat. (Agora Energiewende, 2015, s. 42)

Alla olevaan kuvaa 28 on vielä koottu maahan asennetun järjestelmän hankintakustannusten jakautuminen ja ennustetut kustannukset vuonna 2050.



Kuva 28. Aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannukset vuonna 2014 sekä optimistisin ja pessimistisin kustannuksista vuonna 2050 (Agora Energiewende, 2015, s. 50)

2.7 Rakentamisen tulevaisuus

Rakennusalan kehityshankkeet keskittyvät muun muassa paremman laadun ja tuottavuuden takaamiseen digitalisaation sekä yhteistyöhön perustuvien toimintamallien avulla. Uusissa toimintamalleissa laadun varmistaminen on yhteinen vastuu ja tavoitteet koko hankkeen onnistumiselle ovat yhteiset oman edun tavoittelun sijaan. Yhteistyöhön perustuvissa malleissa projektiorganisaatiosta luodaan verkosto, jonka osapuolet ovat mukana hankkeessa sen alusta loppuun saakka. (Keinänen, 2015; Rakennuslehti, 2015)

Digitalisaatiosta haetaan paljon apuja rakentamisen ja koko projektitoiminnan tehostamiseen. Suunnitelmien mallintaminen yleistyy kovaa vauhtia ja antaa rakennusalalle paljon mahdollisuuksia toiminnan tehostamiseen. Tietomalli itsessään jo yhdistää suunnitelmia uudella tavalla, joka ohjaa projektiorganisaatiota kohti yhteistoimintaa. Digitalisaation kautta myös tabletit ja erilaiset sovellukset ovat tulleet rakentamisen toteutuksen avuksi, kun esimerkiksi suunnitelmien kommentointi ja niihin kuvien liittäminen on mahdollista työmaalta käsin (Ahoranta, 2014).

Digitalisaatiota voisi hyödyntää yksittäisten vaiheiden ja pelkän ylläpidon lisäksi projektin seurannassa sen koko elinkaaren ajan. Tähän yksi toimiva tapa on erilaiset IoT-alustat. IoT eli Internet of Things hyödyntää eri laitteiden, esineiden ja tavaroiden kautta saamaansa dataa ja verkottaa nämä osapuolet yhteen. Tämä mahdollistaa esimerkiksi projektikohtaisen tiedon keräämisen yhteiselle IoT-alustalle kaikilta projektiorganisaation osapuolilta. Yhteisen alustan kautta kommunikointi, viestintä, dokumentointi ja tietojen siirtyminen helpottuvat, kun esimerkiksi työmaan eteneminen on selkeästi nähtävissä älylaitteiden kautta työmaalta tulevien tietojen avulla. Lisäksi saatava data projektin eri vaiheista kertyy suoraan alustalle analysoitavaksi ja toimii helposti lähtötietoina seuraaville vastaaville projekteille. Digitalisaation ei tule kuitenkaan nojautua liikaa rakentamisen kehityksessä, sillä ihmiset tekevät projektintoteutuksen. (Teittinen, 2016)

3D-tulostukselle kehitetään kasvavassa määrin erilaisia käyttötarkoituksia useilla eri aloilla. Myös rakentamisessa on puhuttu talojen 3D-tulostuksesta, vaikka todellisuudessa tarkoitetaan komponenttien tulostusta. Tulostusta hyödynnetään teknisesti vaativien rakenteiden valmistamisessa, joka perinteisin menetelmin olisi hankalaa. (Meronen, 2016)

3D-tulostamisella tarkoitetaan kerroksittaista komponentin valmistusta 3D-mallin pohjalta. Alun perin tulostimessa on sulatettu muovilankaa, jota on pursotettu kerroksiksi, mutta nykyään raaka-aineena voidaan käyttää myös metalleja, keramiikkaa ja komposiittimateriaaleja. 3D-tulostuksen kehittyessä uskotaan kokoonpanolinjojen tarpeen vähenevän, sillä tavoitteena on tulostaa valmiita laitteita, joihin tarvitsee vain kytkeä virta päälle. (Meronen, 2016)

2.8 Yhteenveto

Aurinkoenergia on globaalisti nopeimmin kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto ja sen potentiaali on valtava. Maailmalla aurinkosähköjärjestelmät ovat jo yli megawatin kokoluokkaa, kun taas Suomessa rakennetaan toistaiseksi satojen kilowattien voimaloita. Voimaloiden kokoluokkien kasvaessa niitä on alettu rakentaa erityisesti maalle, mutta yleisimmin satojen kilowattien ja sitä pienemmät järjestelmät sijoitetaan rakennuksien katoille ja harvoissa tapauksissa myös seinille. Suomessa aurinkovoimalat suunnitellaan yleisesti kulutuskohteen mukaan eikä niin sanottuja suuria utility-scale kokoluokan voimaloita ole vielä rakennettu. Tämä johtuu Suomen alhaisesta sähköhinnasta, jonka vuoksi tuotettua aurinkosähköä ei ole kannattavaa syöttää yleiseen sähkön jakeluverkkoon, vaan kuluttaa lähellä olevassa kohteessa. Tällöin säästytään sähkön siirtohäviöiltä ja kohteen ostosähköltä.

Aurinkoenergia-ala on vielä uusi, jonka vuoksi dokumentoitua tietoa aurinkovoimaloiden rakentamisesta ja niiden elinkaaresta on hyvin vähän. Tästä johtuen esimerkiksi Suomessa rakentamisen kokemusperäiseen tietoon perustuva Ratu-kirjasto ja RT-kortit eivät sisällä ohjeita aurinkovoimaloiden rakentamisesta, vaan ainoastaan paneelien sijoituksesta. Standardeissa ei myöskään ole toistaiseksi ohjeita aurinkosähköjärjestelmien rakenteiden suunnitteluun ja kuormien yhteisvaikutusten laskentaan, vaan rakennesuunnittelija yhdistää laskuissaan tuulitunnelitestien tuloksia kuormienlaskennasta oleviin mitoitusohjeisiin. Rakennusalan kantavuuden tarkastelu tulee tehdä rakennettavuusselvityksessä, koska olemassa olevat rakenteet on suunniteltu lakiin perustuvien mitoitusohjeiden mukaan. Aurinkosähköjärjestelmä tuo rakenteille lisäkuormaa, jolloin mitoituskuormat muuttuvat, joten rakenteen kantavuus on laskettava uudelleen. Aurinkosähköjärjestelmän osien tulee lisäksi olla sertifioituja, jotta käyttöikäavoitteisiin päästäisiin.

Aurinkosähköjärjestelmät voidaan asentaa eri rakennusaloilla muutamien eri tavoin, jonka lisäksi telinevaihtoehtoja on useita. Kun tähän lisätään vielä eri sähkötekniset vaihtoehdot toteutukselle, huomataan, että aurinkovoimala on hyvin kompleksinen järjestelmä ja yleistä on vaikea tehdä. Yhtä oikeaa asennustapaa ei luonnollisestikaan ole, niin kuin ei rakentamisessa yleensä. Asennustapojen hyötyjä ja haittoja on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Asennustapojen hyödyt ja haitat

| ASENNUSTAPA | HYÖDYT | HAITAT |
|---|--|--|
| Pollariasennus | + Rakennusteknisesti turvallinen, ei vahingoita rakennusalustaa + kestävä + hyvät vedeneristysominaisuudet + paneelien etäisyys rakennusalustasta helposti määritettävissä | - kallis - vain uusiin tai korjauksen yhteydessä asennettaviin kohteisiin (suositus) - hidas asentaa |
| Kelluva-asennus | + ei läpivientejä, joten niiden läpivientien huolto- tarve vähenee + edullinen + sekä tasakatoille että maanpinnoille + yksinkertainen rakenne ja nopea asennus + ei kalliita kiinnikkeitä + paneelikentän hyödyntäminen kattotyöturvalli- suudessa + ei vesien kulkua estäviä pitkiä profiileja | - järjestelmän suuri omapaino - kuormitukset keskittyvät painojen kohdille - painojen putoilu ja katteen vahingoittuminen - tasaisen alustan vaatimus |
| Mekaaninen asennus | + kevyt järjestelmä + vahva kiinnitys + sekä kalteville että tasakatoille + korkeammalle nostettavissa rakennusalustasta + ei painojen aiheuttamaa rakennusalustaan koh- distuvaa puristusta | - kelluvaa hitaampi asennus ja kalliimmat asennus- kustannukset - läpiviennit - pitkät profiilit estävät vesien kulkeutumisen kai- voihin - kiinnitysosien kestävyys - kiinnityksien kuppi-ilmiö |
| Seinäasennus | + kevyt järjestelmä + sama asennustapa ”aina” + jyrkkä kulma, ei kerry roskia ja lunta paneelin päälle + varjostavan vaikutuksen hyödyntäminen raken- nuksen jäähtyksessä | - kohteen löytyminen haastavaa - ympäristön varjot osuvat helpommin - huonompi vuosituotanto - kallis huolto, koska vaatii henkilönostimen |
| Maa-asennus | + Kelluva- tai pollariasennus + isot voimalat + helppo huolto ja kunnossapito + ei rakennusten aiheuttamia rakennusteknisiä haasteita + edullinen kelluvana | - aidattava ilkvallan ja eläinten takia - ympäristön varjot osuvat helpommin - kaivannot kalliita - pinnanmuotojen haasteet - roudan vaikutukset |
| Integroitu asennus | + vähentää rakennusmateriaalien tarvetta + esteettinen + vähentää rakennuksen sisälle pääsevää läm- pösäteilyä + arkkitehtonisen laadun kasvu + tulevaisuuden juttu, vie alan kehitystä eteenpäin | - kalliimpi kun mekaaninen asennus - rakenteiden vaatimuksiin vastaaminen - uusi tekniikka, vähän kohteita ja kokemuksia |
| Veden päällä kelluva-asennus | + erilaisia toteutusvaihtoehtoja + suojaa vesistöä + vesistö viilentää paneelia + suuria pinta-aloja, isoja voimaloita + suojassa maanjärjestyksiltä | - kustannustehokkuus - stabilointi, paneelien halkeilu - sähkön ja veden yhdistäminen - materiaalien kesto - ei merialueille - uusi tekniikka, vähän kohteita ja kokemuksia |

Rakennusteknisiä haasteita voikin esiintyä asennettaessa aurinkovoimaloita erityisesti jo olemassa oleviin rakennuksiin. Yleisimpiä ongelmia ovat olleet kattorakenteen ja aurinkosähköjärjestelmän käyttöikien kohtaamattomuus, kattorakenteen ymmärtämättömyys,

joka on aurinkosähköjärjestelmän asennuksesta johtuen vaurioitunut, kattopinnoilta vesien poistumisen ymmärtämättömyys, lämpöliikkeiden huomioon ottamattomuus, kattopinnan suojaamattomuus asennuksen ajaksi ja huoltosopimuksen puuttuminen.

Lähtökohtaisesti aurinkopaneelijärjestelmä telineineen on säilyttävä vakaana ja toimintavarmana yli 20 vuotta. Telineiden on kestettävä niin lumi- kuin tuulikuormatkin sekä muut ulkoiset kuormitukset, kuten maa-asennuksissa routa ja eroosio. Lisäksi asennuksen on oltava turvallinen ja luotettava, järjestelmän lähes huoltovapaa, kunnossapidon on oltava osaa ja järjestelmän osien kierrätettäviä. Kokonaisuudessaan järjestelmän käytettävyyden on oltava maksimaalinen mahdollisimman pienin kustannuksin.

Huollon ja kunnossapidon merkitystä ei saa aliarvioida aurinkosähköjärjestelmien eikä rakennusalan osalta. Kuten jo aiemmin mainittu, ala on hyvin uusi eikä kokemuseräistä tietoa pitkältä aikaväliltä vielä ole. Takuuajoista ei ole varmuuksia, jonka vuoksi kaikki sekä itse järjestelmän että rakennusalan käyttöikää edistävät toimenpiteet ovat tärkeitä. Säännöllisillä ammattilaisen tekemillä huoltotarkastuksilla ja korjaustoimenpiteillä minimoidaan mahdolliset vahingot sekä turvallisuusriskit.

Aurinkosähköjärjestelmistä on hiljalleen tullut kannattavia muiden sähköntuotantomuotojen rinnalla ja niiden kustannusten odotetaan laskevan tulevaisuudessa merkittävästi. Kustannusten laskuun tulee vaikuttamaan muun muassa paneelien hyötysuhteen mahdollinen nousu, sillä kustannukset lasketaan wattipiikki kohtaisesti. Hyötysuhteiden noustessa päästään samoihin tehoihin vähemmällä paneelimäärällä, joka tarkoittaisi luonnollisesti myös pienempää asennuspinta-alan tarvetta sekä vähemmän kuljetuksia ja asennettavia rakenteita.

Keskimäärin aurinkosähköjärjestelmän kustannuksista muodostuu 55 %:a paneeleista, 11 %:a invertteristä ja loput 34 %:a BOS kustannuksista. Siispä inverttereiden ja paneelien pienempikin kustannusten kehitys näkyy, koska niiden osuudet hankintakustannuksista ovat suuret. Merkittävimmin kustannusmuutoksen ennustetaan näkyvän kuitenkin BOS kustannuksissa, joissa laskua voi parhaimmillaan olla jopa 65 %:a, kun telineosien kehitys nopeuttaa myös asennusta. Huomattavaa kuitenkin on, että asennuksen osuus hankintakustannuksista on saksalaisen tutkimuksen mukaan hyvin pieni, vain noin 5 %:a. Lisäksi alan jatkuva kasvu tuo lisää laitetoimittajien välistä kilpailua ja aurinkovoimaloiden toteuttajien tarjoamia palvelu- ja rahoitusmalleja, jotka tulevat näkymään kustannuksien madaltumisena erityisesti kuluttajalle.

Teknologian kehitys voi näkyä aurinkoenergia-alalla esimerkiksi 3D printtauksen tuomien monimutkaisten osien valmistuksessa ja esivalmistusasteen nousussa. Teknologia ja digitalisaatio tuovat mahdollisuudet myös entistä helpompaa viestintään ja projektinhallintaan, jotka yhdessä rakennusalan yhteistyöhön tähtäävän murroksen kanssa tulevat varmasti vaikuttamaan myös aurinkovoimaloiden rakentamisessa. Digitaalisuus ei ole vastaus kaikkeen, mutta sitä voisi hyödyntää projektinseurannassa koko elinkaaren ajan,

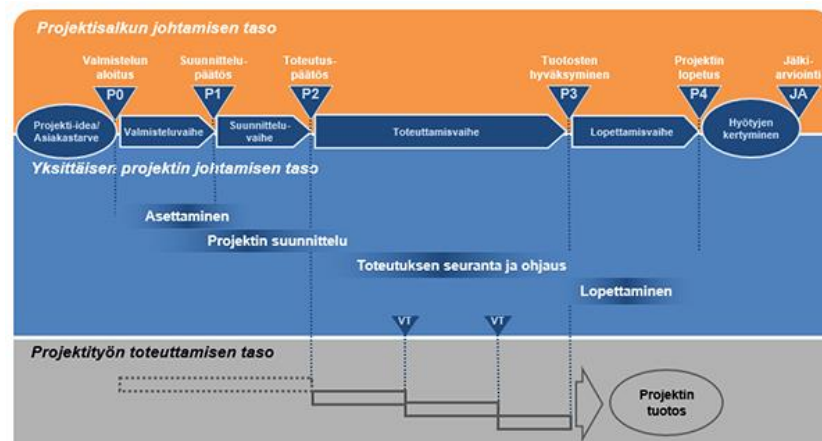
koska takuuajkojen toteutumisesta ei ole vielä varmaa tietoa. Vielä toistaiseksi rakennetaan avaimet käteen –toimituksena, jossa sekä suunnittelusta että toteutuksesta vastaa sama taho. Tulevaisuudessa aurinkovoimaloiden toteutusta saatetaan ositella enemmän, yhteistyömallien kautta tavoitteista ja riskien jaosta tulee yhteisiä tai samalla projektiorganisaatiolla rakennetaan useampia aurinkovoimaloita. Jopa Ikea-tyylisesti toteutettavat aurinkovoimalat voivat kotitalouksien suuruusluokassa olla mahdollisia tai järjestelmien ostaminen puhelinliittymien tavoin kuukausimaksulla. Yhteiskunnan uskotaan myös menevän yhä voimakkaammin kohti jakamistalouksia, jolloin ihmiset eivät halua enää omistaa kaikkea vain itselleen, vaan yhteisomistukset yleistyvät (Bushong, 2016). Kaikki nämä mahdolliset kehityssuunnat avaavat aurinkoenergia-alalle entistä enemmän kasvu- ja liiketoiminta mahdollisuuksia.

3. TUTKIMUS JA SEN TULOKSET

Kotitalouksia suuremman kokoluokan aurinkovoimaloita on alettu rakentaa Suomessa vasta viime vuosina ja niihin liittyviä yksityiskohtia ja kokemusperäistä tietoa ei ole juurikaan dokumentoitu julkisesti. Tässä kappaleessa esitellään muutamia Helenin toteuttamia Suomen suurimpia aurinkovoimalahankkeita. Lisäksi Suomen suurimmilta laitetoimittajilta on budjettitarjouskyselyiden avulla kerätty tietoa eri asennustavoin toteutettavien aurinkovoimaloiden asennusajoista sekä asennus- ja telinekustannuksista, jotta erilaisten aurinkovoimaloiden vertailu ja hankinnan suunnittelu olisi helpompaa.

3.1 Esimerkkiprojektien esittely

Tässä työssä esimerkkiprojektien tarkastelussa keskitytään pääasiassa projektin toteutusvaiheeseen. Alla olevassa kuvassa 29 on esitetty Helenin projektien elinkaari, jossa aurinkovoimalaprojektin toteutukseen lukeutuvat vaiheet P1-P4.



Kuva 29. Helenin projektien elinkaari (Helen Oy, 2016)

Yleisesti elinkaaren alku- ja loppuvaiheessa projekti linkittyy tiiviimmin osaksi yrityksen muuta toimintaa, näin myös Helenillä. Tästä syystä rakentamisen tehostamisen kannalta merkittävimmät vaiheet ovat juuri P1-P4. Mukaan esimerkkiprojektien tarkasteluun otetaan kuitenkin myös hankkeista tehtyjen arviointien kautta esille tulleita hyötyjä ja huomioita, sillä tarkastelu myös laajemmassa ympäristössä on erityisen tärkeää projektinhallinnan kehityksen kannalta. (Arto et al., 2008) Suunnitteluvaihe pitää sisällään mahdolliseen aurinkovoimalakohteeseen tutustumisen, monenlaisten selvityksien teon, alustavien suunnitelmien laatimisen tarjouskyselyä varten sekä tarjouskyselyn toteutuksen. Suunnitteluvaihe päättyy tarjouskyselyn mukaisiin sopimusneuvotteluihin, sillä hyväksytty tarjous on aurinkovoimalan investointipäätös. Toteuttamisvaihe sisältää aurinkovoimalan toimitusajan, asennukset, käyttöönoton sekä lopputarkastukset ja lopettamisvaihe

projektin loppudokumentoinnin ja takuuajat. Esimerkkiprojektien tutkimusaineistona toimivat pääasiassa Helenin projektidokumentit sekä osittain myös tutkijan tekemät huomiot projekteissa työskentelyn aikana.

Case 1: Suvilahti

Suvilahden sähköaseman katolle rakennettu aurinkovoimala oli Helenin ensimmäinen laatuaan. Aurinkovoimalan nimellinen teho on 340 kW_p ja se koostuu 1 194 paneelista. Projektin esiselvitys eli valmisteluvaihe alkoi syyskuussa 2013, toteutussuunnitteluvaihe toukokuussa 2014 ja voimala otettiin käyttöön maaliskuun alussa 2015. (Helen Oy, 2014-2016a) Ensimmäisen toimintavuotensa aikana voimala pääsi tavoitteisiin yli 200 000 kWh tuotannollaan (Virtanen, 2015).

Voimalan järjestelmä on hajautettu koostuen 9 invertteristä, joista kukin kerää tuotetun aurinkosähkön kahdelta kytkentäkotelolta. Yhteen kytkentäkoteloon yhdistyy 3 stringiä eli kolme riviä sarjaan kytkettyjä paneeleita. Aurinkovoimala on toteutettu kokonaistoi- mituksena avaimet käteen -periaatteella, jolloin toimittaja on vastannut suunnittelusta, toimituksesta, asennuksesta ja käyttöönotosta tarjouspyynnön mukaisessa laajuudessa. (Helen Oy, 2014-2016a)

Ennen aurinkovoimalan asennusta rakennuksen katto sekä julkisivu uusittiin, jolloin rakennuksen ja aurinkovoimalan käyttöiät saatiin vastaamaan toisiaan. Kattorakenteen uudet suunnitelmat sovitettiin yhteen aurinkopaneelien asennuksen kanssa. Tasaiseksi lu- keutuvan katon kallistukset säilytettiin ennallaan, mutta kantava rakenne muutettiin be- tonilaatasta koolausperusteiseksi. Aurinkovoimalan esiselvityksestä poiketen, päädyttiin mekaanisesti kiinnitettävään ratkaisuun ja tasakatoille useimmiten valittavasta kelluvasta asennustavasta luovuttiin suurista lisäkuormista johtuen. Ylimääräisiä painolasteja ei tarvittu, kun aurinkopaneelien riviväli ja kattorakenteeseen tehdyn koolauksen jako valit- tiin samoiksi, jolloin telineiksi tarkoitettut pitkittäisprofiilit saatiin kiinnitettyä mekaani- sesti koolaukseen. Tällöin myös järjestelmän tuomat rasitukset ja taipumat jäivät pieniksi. Järjestelmän paino on keskimäärin 15 kg/m². (Helen Oy, 2014-2016a)

Aurinkovoimalan toimittajan kanssa on laadittu neljän vuoden huoltosopimus. Sopimus kattaa järjestelmän toiminnan seurannan, kuukausittaiset yhteenvedot poikkeamista, ta- kuuseen kuulumattoman vuositarkastuksen järjestelmälle (visuaalinen ja sähköinen), kenttäkoteloiden ylijännitesuojien vaihdon sekä vikapalvelut arkisin. (Helen Oy, 2014-2016a)

Ennen Suvilahden projektin varsinaista aloitusta tehtiin kattava esiselvitys uudelleen projektin toteutukseen liittyvistä asioista, kuten työ- ja elinkeinoministeriön investointi- tuista, sähköliittymistä, urakan rajapinnoista, riskeistä ja toteutusratkaisuvaihtoehdoista. Tehdyissä esiselvityksissä saatu tieto on hyödynnettävissä myös muissa aurinkovoima- laprojekteissa, jolloin säästyy sekä aikaa että resursseja. (Helen Oy, 2014-2016a)



Kuva 30. Suvilahden aurinkovoimala (Helen Oy, 2014-2016a)

Case 2: Kattoasennus

Suvilahden lisäksi syksyn 2013 aurinkovoimaloiden yhteisessä esiselvityksessä oli toinenkin vaihtoehto rakennuspaikaksi. Voimalan nimellistehoksi suunniteltiin alustavasti noin 300 kW_p (noin 1150 paneelia), jonka lisäksi laajennusmahdollisuuksia olisi aina 400–460 kW_p saakka (yhteensä noin 1600 paneelia). (Helen Oy, 2014) Toteutussuunnittelu aloitettiin varsinaisesti joulukuussa 2014. Hanke kuitenkin keskeytettiin muutaman kuukauden jälkeen, koska kustannukset kattorakenteiden vahvistuksesta ja aurinkovoimalan toteutusratkaisusta nousivat hyvin suuriksi tehden voimalahankkeesta kannattamattoman. (Helen Oy, 2014-2016b)

Case 3: Kivikko

Helen rakensi toistaiseksi Suomen suurimman aurinkovoimalan Helsinkiin, Kivikon hiihtohallin katolle. Voimalan nimellisteho on noin 850 kW_p ja se koostuu 2 992 paneelista. Projektin esiselvitys toteutettiin yhtäaikaisesti Suvilahden aurinkovoimalan kanssa syksyllä 2013. Varsinainen Kivikon toteutussuunnittelu aloitettiin maaliskuussa 2015 ja voimala valmistui huhtikuussa 2016. (Helen Oy, 2015-2016)

Voimalan järjestelmä on keskitetty koostuen kahdesta invertteristä, joista kumpikin kerää tuotetun aurinkosähkön kolmelta kytkentäkotelolta. Yhteen kytkentäkoteloon yhdistyy 3 stringiä eli kolme riviä sarjaan kytkettyjä paneeleita. Suvilahden aurinkovoimalan tavoin, Kivikon hanke toteutettiin avaimet käteen -periaatteella, joka sisältää myös 4 vuoden huoltosopimuksen. (Helen Oy, 2015-2016)

Kivikon hiihtohallin rakentamisen yhteydessä sen katolle on asennettu pollarit aurinkovoimalaa varten. Hiihtohallin rakennusvaiheessa aurinkovoimalaa ei kuitenkaan toteutettu, joten Helenin laitetoimittaja suunnitteli aurinkosähköjärjestelmänsä näiden valmiiden pollareiden päälle. Pollarit jakautuvat hallin pituussuunnassa kattoristikoiden mukaisesti noin 6 metrin välein ja leveysuunnassa vaihtelevasti 4,2–4,5 tai 6 metrin välein. Aurinkopaneelien teräksiset telineet koostuvat kolmesta ristikkäisestä I-palkista sekä itse paneelin jalustasta. Kivikon katon kaltevuus on 1:10 ja järjestelmän kokonaispaino ilman pollareita noin 26 kg/m². (Helen Oy, 2015-2016)



Kuva 31. Kivikon aurinkovoimala

Case 4: maa-asennus

Helenin yksi suunnitteilla olevista aurinkovoimaloista on maahan asennettu aurinkosähköjärjestelmä. Se on suunniteltu asennettavaksi painoperusteisena noin 250 kg painoisille betonilaatoille kiinnitettyihin telineisiin. Telineisiin paneelit asennetaan vaakatasoon kahteen riviin. Voimala tulee koostumaan 2 000 paneelista ja on nimellisteholtaan noin 510 kW_p. (Helen Oy, 2015a)

Järjestelmä toteutetaan hajautetusti, jolloin se koostuu 17 invertteristä, joista kukin kerää tuotetun aurinkosähkön yhdeltä kytkentäkotelolta. Yhteen kytkentäkoteloon yhdistyy 6 stringiä eli kuusi riviä sarjaan kytkettyjä paneeleita, joista kussakin stringissä on 20 paneelia. Aurinkovoimala tullaan toteuttamaan kokonaistoimituksena avaimet käteen -periaatteella, jolloin toimittaja vastaa suunnittelusta, toimituksesta, asennuksesta ja käyttöönotosta tarjouspyynnön mukaisessa laajuudessa. (Helen Oy, 2015a)

3.2 Esimerkkiprojektien vertailu

Kevääseen 2016 mennessä Helen on toteuttanut kaksi suurempaa aurinkovoimalaprojektia tuotantoon saakka, Suvilahden 340 kW_p:n sekä Kivikon 850 kW_p:n aurinkovoimalan. Lisäksi vireillä on useita aurinkovoimalaprojekteja, joiden nimellistehot asettuvat keskimäärin näiden voimaloiden välille.

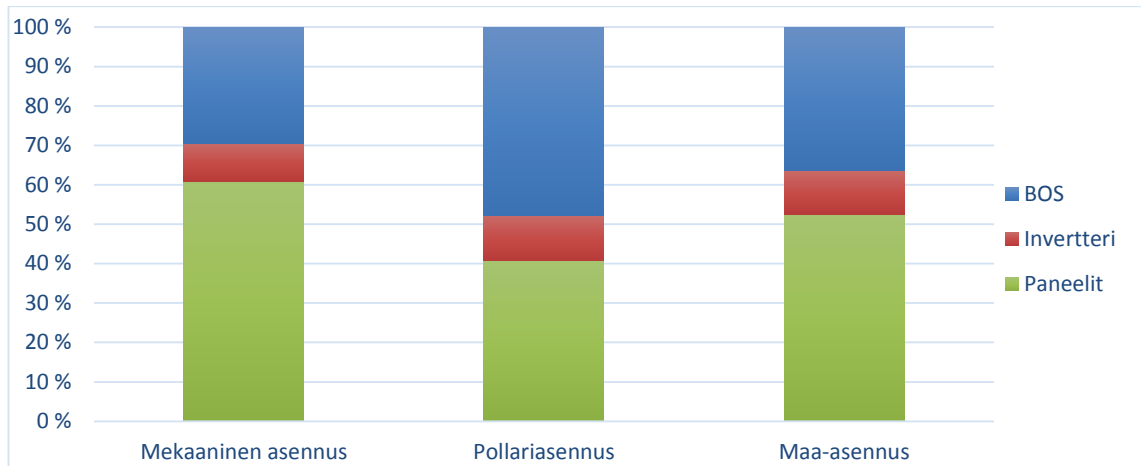
Suvilahden hankinnalle eli tarjouskyselyn teolle, lähettämislle, vastaanottamiselle, sopimusneuvotteluille ja tilaukselle oli varattu reilusti aikaa. Kyseessä oli Helenin ensimmäinen iso aurinkovoimalaprojekti, joten tarjouskyselyn luonti vaati erityistä paneutumista. Tämän lisäksi hankinnan aikana jatkettiin selvitystyötä liittyen muun muassa aurinkosähkötuotteisiin, palvelumalleihin ja voimalan käyttö- ja kunnossapitotoimintojen järjestämiseen, joista kaikista on ollut merkittävästi hyötyä uusien vastaavien projektien toteutussuunnittelussa. Ensimmäinen laatuaan oleva projekti on luonnollisesti uusien asioiden opettelua ja kehittämistä, mutta hyvällä dokumentoinnilla varmistetaan saatujen tietojen kulkeutuminen eteenpäin myös jatkossa. Dokumentoinnin lisäksi aurinkovoimaloiden toteutusorganisaatio on Helenin puolella pyritty pitämään samana, jotta edellisten projektien opit siirtyvät varmasti seuraavien projektien kehittämiseen.

Suvilahden ja Kivikon aurinkovoimaloita on markkinoitu nimikkopaneeliperiaatteella, jossa myydään yhden paneelin tuotanto-osuutta, ei omistusta. Useat sähköyhtiöt ovat kopioineet tätä yksityiselle asiakkaalle suunnattua palvelumallia Helenin jälkeen. Uutena yrityksille suunnattuna palvelumallina on PPA (power purchase agreement), jossa Helen investoi, Suvilahden ja Kivikon voimaloiden tapaan, aurinkosähköjärjestelmään, mutta myy tuotetun sähkön kiinteistön käyttäjille tai omistajille pitkäaikaisella sopimuksella. Tämä kyseinen palvelumalli voisi olla yksi mahdollisuus saada myös taloyhtiöt mukaan aurinkosähköntuotantoon, kunhan valtion tukipolitiikan muutokset ensin ratkeavat. Eri-laisten palvelumallien kehitys on yksi merkittävä aurinkoenergia-alan liiketoimintamahdollisuus. Siihen ei kuitenkaan keskitytä tässä työssä, sillä palvelumallit ovat osa valmisteluvaihetta, eivätkä varsinaisesti vaikuta voimalan rakentamiseen itsessään.

Aurinkovoimalat toteutetaan yleensä avaimet käteen – periaatteella, mutta hankintojen osittelulla voitaisiin tulevaisuudessa tavoitella kokonaistaloudellisia hyötyjä. Pienemmät hankintakokonaisuudet mahdollistaisivat pienempien toimijoiden osallistumisen tarjouskilpailuihin, mikä kasvattaisi kilpailua ja mahdollisesti alentaisi kustannuksia. Hankintojen osittelu vähentäisi myös riskiä yhden urakoitsijan ongelmien vaikutuksesta koko työmaahan. Aikataulullisesti kyseisellä hankintojen osittelulla ei juurikaan hyödytä, sillä suunnittelu, toimitus ja asennus ovat täysin riippuvaisia toisistaan. Siispä aikataulullisesti resurssien vähenemisen kautta saatavia kustannushyötyjä ei myöskään muodostu. Lisäksi hankintoihin osittelulla riski eri toimijoiden yhteensovituksesta kasvaa. Ala on vielä hyvin uusi ja laitetoimittajat tarjoavat myös kokonaisjärjestelmän suunnittelun oman tarjouksensa mukaisesti. Yksittäisiä pelkkiä aurinkovoimaloiden suunnittelijoita ei vielä aurinkoenergia-alan markkinoilla oikeastaan ole, joten aurinkovoimalan toteutuksen kannalta on toistaiseksi sujuvampaa antaa laitetoimittajan vastata myös suunnittelusta. Ositteltujen hankintasisältöjen puutteet voisivat aiheuttaa erimielisyyksiä, hidastaa projektin etenemistä ja pahimmillaan johtaa kustannuksia kasvattaviin lisä- ja muutostöihin.

Helenillä on asennustavoista toistaiseksi toteutettu koolaukseen kiinnittyvä järjestelmä tasakatolle sekä pollareihin kiinnittyvä telinejärjestelmä kaltevalle katolle. Katon päälle rakentuva ylimääräinen koolaus ei ole mekaanisista asennustavoista yleinen, sillä mekaanisissa asennuksissa kiinnitys tulee useimmiten suoraan katemateriaaliin. Myöskin pollariasennus poikkesi tavanomaisista maailmalla toteutetuista pollariasennuksista, sillä paneelirivejä asennettiin myös pollarilinjojen väleihin, joka vaati useampia teräspalkkeja rakenteen mahdollistamiseksi.

Kuvassa 33 on esitetty hankintakustannusten jakautuminen eri asennustavoilla. Kustannustiedot perustuvat Helenin toteuttamien ja vireillä olevien hankkeiden tarjouskyselyihin, joissa aurinkovoimalat hankitaan avaimet käteen -periaatteella. Kustannukset eivät ole toteutuneita kustannuksia, mutta antavat suuntaa eri asennustapojen kustannusten jakautumisesta paneeleihin, inverttereihin ja muihin kustannuksiin eli BOS kustannuksiin.



Kuva 32. Kokonaiskustannusten jakautuminen eri asennustavoilla

Kuvasta nähdään, että invertterin prosentuaalinen osuus kustannuksista on kaikissa asennustavoissa ollut keskimäärin yhtä suuri noin 10 %:a. Paneelien osuus kustannuksista sen sijaan vaihtelee. Pollariasennuksissa BOS kustannuksia nostaa telineiden materiaalikustannukset sekä asennustyön kesto. Asennustyötä hidastaa pollarilinjoja kokoavien massiivisten teräspalkkien liikuttelun hitaus ja palkkien pulttiliitokset. Verratessa Suvilahden koolaukseen kiinnitettyyn järjestelmään ovat pollarit kokoavat palkit ja paneelirivien suuntaiset palkit lisämateriaalia, mikä luonnollisesti nostaa materiaalikustannuksia.

Maa-asennuksessa taas paneelien yksikköhinta on ollut alhaisempi kuin muissa asennustavoissa. Tähän on osasyynä muun muassa se, että maa-asennuksessa hyödynnettävissä oleva pinta-ala on kattoasennuksia suurempi, jolloin haluttuun tehoon päästään täyttämällä suurempi alue heikompi tehoisilla, mutta halvemmilla paneeleilla. Mekaanisen asennuksen kohdalla puolestaan tila on ollut hyvin rajattu, jolloin järjestelmään on valittu tehokkaat paneelit. Tasakatolle on mekaaninen asennus myös sujunut rutiininomaisesti ja nopeasti, koska merkittävä osa Suomen suurista aurinkovoimala-asennuksista on toteutettu tasakatoille.

3.3 Budjettitarjouskyselyn esittely

Budjettitarjouskyselyllä saadaan tarkempia hintatietoja, vaikka vastaajat ilmoittaisivatkin hintojen olevan alustavia. Tämän budjettitarjouskyselyn päätarkoituksena oli saada selville eri asennustapojen kustannukset sekä niihin kuluva aika. Asennus voi aiheuttaa projektille lisäkustannuksia, jonka vuoksi keskimääräisiin asennuskustannuksiin tahdottiin perehtyä. Kyselyn tuloksilla vastataan siis osittain tutkimuksen päätavoitteeseen projektin kokonaistaloudellisesta tehostamisesta.

Tietous asennusajoista ja -kustannuksista eri asennustavoittain helpottaa myös soveltuvien kohteiden arviointia taloudellisesta näkökulmasta. Tulokset ovat toki suuntaa antavia arvioita, koska kysely tehtiin kuvitteelliselle kohteelle, mutta niiden avulla on helppompaa vertailla eri toteutusvaihtoehtoja mahdolliselle kohteelle.

Kysely kohdistui 500 kW_p:in aurinkovoimalan toteutukseen viidellä eri asennustavalla. Kyselyssä pyydettiin määrittämään muun muassa aurinkopaneelien määrä, asennustelineiden materiaali ja näiden massa neliötä kohden. Eri toimittajat käyttivät erilaisia paneeleita ja telineitä, joiden aiheuttamien kuormien suuruudet ovat erittäin merkittäviä varsinkin kattoasennuksissa. Myös projektityölle pyydettiin hinta-arviota, jotta nähtäisiin onko eri asennustapojen suunnittelulla ja muulla projektioinnilla merkittävää vaikutusta kustannuksiin.

Kyselyssä asennustöihin ei lukeudu sähkötyöt. Sähkötyöt suorittaa yleisesti aliurakoitsija, jonka vuoksi niiden erottelu muusta työstä on suhteellisen helppoa. Lisäksi kyselyssä ei määritelty, onko kyseessä hajautettu vai keskitetty aurinkosähköjärjestelmä, jolloin kyselyyn vastanneiden toimittajien ei tarvinnut selvittää yksikköhintoja muille järjestelmän komponenteille kuin aurinkopaneeleille ja telineille. Vastaukset keskittyvät vain aurinkovoimalan BOS kustannuksiin ja niistäkin vain telineisiin, asennukseen ja projektointiin eli muut siihen kuuluvat infra, kaapeloinnit, sähkötyöt, kytkentäkotelot, liittynät ja muuntaja on rajattu pois.

Asennustyön kustannukset ja siihen kuluva aika pyritään esittämään sekä watti- että paneelikohtaisesti tuloksissa. Asennustyöhön liittyen on pyydetty määrittämään myös työn esivalmistusaste, koska tiedettiin, että osa toimittajista valmistele paneeli- ja telinetoimituksensa pidemmälle tehtaalla, jolloin itse työmaalla tehtävän työn osuus on pienempi. Korkeampi esivalmistusaste vähentää työmaan aikataulun venymisen riskiä, mutta tahdottiin myös saada käsitys sen vaikutuksista kustannuksiin.

Kyselyyn vastaajiksi valittiin kuusi suomalaista alan merkittävintä ja vakainta toimijaa, joiden kanssa Helen Oy on kiinnostunut tekemään yhteistyötä. Yritykset ovat Kaukomarkkinat Oy, Green Energy Finland Oy, Naps Solar Systems Oy, Valoe Oyj, Nocart Oy sekä NWE Sales Oy. Budjettitarjouskyselyn saatekirje ja vastauslomake ovat diplomityön liitteenä 4.

3.4 Budjettitarjouskyselyn tulokset

Budjettitarjouskysely asetui loppukevääseen 2016, joka näkyi vastausprosentissa. Alan kasvun ja kevätauringon mukanaan tuoma kiinnostus aurinkovoimaloita kohtaan on tehnyt laitetoimittajista kiireisiä. Kuudesta laitetoimittajasta kaksi vastasi budjettitarjouskyselyyn ja loput ilmoittivat, ettei kiireiden puolesta ole resursseja vastauksien antamiseen. Vastanneiden yritysten kilpailuedun säilyttämiseksi tuloksista esitetään vain yhteenvetot.

500 kW_p:n aurinkovoimalaan asennettavien paneelien lukumäärä vaihteli välillä 1755–1920 kpl riippuen paneelin tehosta. Alla olevaan yhteenveto taulukkoon 4 on koottu kyselyyn saadut vastaukset koskien teline- ja asennuskustannuksia, asennusaikoja sekä projektointikustannuksia.

Taulukko 4. Budjettitarjouskyselyyn vastauksien yhteenvetotaulukko

| Asennustapa | Telineiden kustannukset | Asennuskustannukset | Asennusaika | Projektointikustannukset |
|------------------------------------|-------------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| Kelluva-asennus | 0,12-0,24 €/Wp | 10-15 % kokonaiskustannuksista noin 0,11 €/Wp | n. 4 viikkoa/ 1700-2000 h | 0,01-0,06 €/Wp |
| Mekaanisesti kiinnitettävä asennus | 0,11-0,20 €/Wp | 10-15 % kokonaiskustannuksista noin 0,14 €/Wp | n. 6 viikkoa/ | 1-5 % kokonaiskustannuksista |
| Pollariasennus | 0,19-0,75 €/Wp | 10-15 % kokonaiskustannuksista | n. 8 viikkoa/ 1800-2100 h | 1-5 % kokonaiskustannuksista |
| Maa-asennus | 0,15-0,28 €/Wp | 10-15 % kokonaiskustannuksista noin 0,16 €/Wp | n. 8 viikkoa/ 1800-2100 h | 1-5 % kokonaiskustannuksista |
| Seinäasennus 100 kWp | 0,08-0,12 €/Wp | 10-15 % kokonaiskustannuksista noin 0,22 €/Wp | n. 3 viikkoa/ 200-300 h | 1-5 % kokonaiskustannuksista |

Taulukon avulla voidaan vetää johtopäätökset, että teline- ja asennushintoihin perustuen edullisin vaihtoehto on kelluva-asennus. Seuraavana on katolle mekaanisesti kiinnitettävä asennus, seinäasennus ja näiden jälkeen maa-asennus. Tässä kyselyssä maa-asennus ajateltiin toteutettavaksi kaivannoin ja pollarein, joten mikäli maa-asennus on mahdollisuus toteuttaa kelluvana, laskevat sen kustannukset taulukossa esitetyistä kustannuksista. Pollariasennus on asennustavoista kallein ja vie aikaa suunnilleen saman verran kuin maahan tehty pollariasennus. Projektointikustannusten osuus on kaikilla asennustavoilla 1-5 %:a ja vain kelluvasta-asennuksesta saatiin tarkemmat tiedot, joten näiden tietojen perusteella ei voida sanoa eri asennustapojen vaikutuksista projektointikustannuksien suuruuteen. Muutaman prosentin osuus on kuitenkin suhteellisen pieni kokonaiskustannuksista, mutta aurinkovoimaloiden kokoluokkien kasvaessa sen merkitys kasvaa rahallisesti.

Seinäasennuksen työn osuus on suurempi suhteessa muihin asennustapoihin, koska se pitää sisällään asennustyöhön tarvittavan henkilönostimen. Integroituja asennuksia ei ole taulukossa ollenkaan, koska niihin ei saatu kyselyn mukaisia vastauksia. Integroitavien ratkaisuiden toimittajia ja toteutuneita kohteita on toistaiseksi hyvin vähän, joten vastaukset olivat vain yhden laitetoimittajan vastuulla. Sähköpostikeskustelujen kautta saatiin kuitenkin selville, että seinälle integroitava järjestelmä on noin 15–20 %:a kalliimpi kuin kaltevalle katolle lappeen suuntaisesti tehty mekaaninen asennus. Lappeen suuntaisen mekaanisen asennuksen kustannukset ovat keskimäärin 1,6–2,5 €/W_p, sillä näitä asennuksia tehdään pääasiassa asuinrakennusten harjakatoille (Auvinen & Jalas, 2016). Integroiduksi järjestelmäksi ajateltiin tässä tapauksessa julkisivuverhoukseksi tarkoitettu, ei rakenteeseen upotettu, ratkaisu.

Kyselyiden avulla tavoiteltu tieto asennusajoista miestyöpäivä/ W_p ei toteutunut, mutta vastauksien avulla voidaan kuitenkin nähdä asennustapojen asennusaikojen erot. Valitettavasti vastauksissa esitettiin aikataulut eri tavoin, joten niistä ei voitu muodostaa keskiarvoa, jonka avulla vastauksia olisi voitu pitää yleistettävämminä. Tilaajan roolissa tieto asennusajoista kuitenkin helpottaa koko projektin aikataulun suunnittelua. Rakennusprojektin aikaisen lisätyöt muodostuvat asennusvaiheessa, joten tieto yleisistä asennuskustannuksista helpottaa asennustyön onnistumisen seuraamista.

Kaikkiin kyselyn kohtiin, kuten esivalmistusasteeseen ei saatu vastauksia. Tästä voidaan päätellä, että esivalmistusta ei juurikaan tapahdu, vaan työ tehdään pääasiassa työmaalla. Teline rakenteiden painoja koskien vastauksia ei saatu kuin mekaanisesti kiinnitettävään ja kelluvaan asennukseen, jotka olivat mekaanisesti kiinnitettävälle järjestelmälle 7 kg/m^2 ja kelluvalle 15 kg/m^2 . Maa- tai seinäasennuksen telineiden painoista ei saatu tietoja.

Vastauksissa näkyy voimakasta vaihtelua esimerkiksi pollariasennuksen kohdalla, mikä voi johtua osittain siitä, ettei 500 kW_p :n koko luokan voimalasta ole molemmilla vastanneilla vielä referenssejä. Todelliset pollariasennuksen kustannukset ovat Helenin referenssien mukaan lähempänä $0,75$:tä €/ W_p kuin $0,19$:ta €/ W_p , kun myös pollarit lasketaan mukaan telinekustannuksiin.

3.5 Tutkimuksen yhteenveto

Kuten jo kirjallisuusselvityksessä tuli ilmi, on aurinkosähköjärjestelmä hyvin kompleksinen ja kompleksisuutta lisää vielä entisestään erilaiset rakennusalueet. Myös budjettitarjouskyselyyn vastanneet painottivat, että asennustavoista on hyvin vaikea tehdä yleistyksiä, koska ne ovat täysin kohdekohtaisia, sillä telineratkaisut, rakennusalue, vuodenaika, rakennuksen korkeus ja muoto tekevät jokaisesta järjestelmästä omanlaisensa. Lisäksi vastanneilla ei ollut vielä referenssejä kaikista eri asennustavoista kysytyssä 500 kW_p :n kokoluokassa, joten kyselyn vastaukset ovat hyvin suuntaa antavia.

Budjettitarjouskyselyn mukaan kelluva-asennus kestää noin 4 viikkoa, jolloin asennusnopeus on 88–96 paneelia/päivä. Maa-asennukseen kuuluu noin 8 viikkoa, jolloin asennusnopeus on puolestaan 44–48 paneelia/päivä. Kyselyn mukaan asennettavia paneeleita oli 1755–1920 kappaletta. Vastaavasti mekaaninen asennus vie keskimäärin 6 viikkoa eli 30 päivää, johon vertailukohtana Suvilahden mekaaninen asennus, joka toteutui noin 40 paneelia/päivä vauhdilla. Katolle pollariasennus vie kyselyn mukaan noin 8 viikkoa, jolloin paneeleita asennettaisiin maa-asennuksen kanssa samaa vauhtia 44–48 kpl/päivä. Kivikossa asennukseen sujui vauhdilla noin 45 paneelia/päivä. Kuten jo aiemmin todettu, ei Suvilahden ja Kivikon asennusmiesten määrästä, kuten ei myöskään kyselyn vastauksiin laskettujen työmiesten määrästä, ole tietoa, joten aikatauluja ei täysin voi verrata toisiinsa.

Kirjallisuusselvityksessä esille tuotu kustannusjakauma perustui 1 MW aurinkovoimalan maa-asennukseen Saksassa. Esimerkkiprojektien vertailussa esitetty kustannusjakauma Helenin maa-asennuksesta mukaillee hyvin paljon kirjallisuusselvityksessä esitettyä kustannusjakaumaa. Helenin maa-asennuksessa paneelien osuus on noin 53 %:a, invertterin 11 %:a ja BOS eli muiden kustannusten osuus 36 %:a. Saksalaisessa tutkimuksessa paneelien osuus oli 55 %:a, invertterin 11 %:a ja muut kustannukset 34 %:a. Prosentuaalinen kustannusten jakautuminen on siis hyvin lähellä yhden maailman johtavan aurinkoenergiamaan aurinkovoimaloiden kustannuksia (IEA PVPS, 2016).

Kun yksittäisten osa-alueiden kustannuksia tarkastellaan prosentiosuuksien sijaan eurotasolla, huomataan hintojen olevan Suomessa merkittävästi suuremmat kuin Saksassa. Saksalaisten tutkimuksessa telineiden osuus oli 0,075 €/W_p, asennuksen 0,05 €/W_p ja projektionnin 0,035 €/W_p eli noin 3,5 %:a kokonaiskustannuksista. Kyselyn vastausten mukaan vastaavat hinnat puolet pienemmälle aurinkovoimalalle Suomessa olivat telineille 0,15–0,28 €/W_p, asennukselle 0,16 €/W_p ja projektionnille 1-5 %:a. Kirjallisuusselvityksessä asennukseen kuului paneelien liittäminen invertterille asti, kun taas budjettitarjouskyselyssä asennus rajoittui vain paneelien asennukseen saakka. Saksan hinnat ovat Suomen hintoja matalampia, sillä heillä on alasta jo useiden kymmenien vuosien kokemus. Lisäksi wattipiikki kohtaiset kustannukset laskevat, mitä suurempaa voimalaa rakennetaan ja tutkimuksessa esitetty aurinkovoimala on puolet suurempi kuin budjettitarjouskyselyssä esitetty voimala. Vertailun puolesta hintojen eroavaisuudet on kuitenkin mielenkiintoista esittää.

4. KEHITYSEHDOTUKSET

Näissä kehitysehdotuksissa tuodaan esille huomioitavia asioita, joiden avulla aurinkovoimaloiden rakentamista saadaan tehostettua. Kehitysehdotuksissa keskitytään soveltuvien kohteiden arviointiin, tyyppiratkaisuihin sekä muutamiin kokonaistaloudellisuuteen vaikuttaviin tekijöihin.

Vaikka budjettitarjouskyselyn vastauksia ei saatu odotettua määrää, saadaan kehitysehdotukset laadittua näihin muutamiin vastauksiin, esimerkkiprojektien vertailuun, laajaan kirjallisuusselvitykseen sekä tutkijan aurinkovoimalaprojekteissa työskentelyn aikana saatuihin kokemuseräisiin oppeihin pohjautuen.

4.1 Soveltuvien kohteiden arviointi

Aurinkosähköjärjestelmän tuotannon kannalta soveltuvan kohteen kesäkuukausien sähkönkulutus saadaan katettua järjestelmän tuottamalla sähköllä. Tästä syystä kannattavia kohteita ovat sellaiset, joiden sähkönkulutus on kesäaikaan suurta. Tästä johtuen suuret kattopinta-alat omaavat rakennukset kuten koulut ja liikuntahallit, poikkeuksena jäähallit, eivät ole aurinkosähköjärjestelmälle kannattavia kohteita sähkön tuotantoon perustuvalla palvelumallilla.

Paneelien tuotantotehokkuuden kannalta soveltuvimpia ovat kohteet, joiden hyödynnettävä pinta-ala on suuri, paneelit saadaan suunnattua keskimäärin etelään ja paneelikenttää ei varjosta ympäröivät rakennukset, puut ynnä muut sellaiset. Sähkötekniikan puolesta soveltuvassa kohteessa on sähköliityntä mahdollisuus ja tilan puolesta sijoituspaikat inverttereille ja kaapeloinneille.

Rakennusteknisesti ei soveltuvinta kohdetta eli kantavinta rakennetta voida hakea kattotai seinärakenteeseen perustuen. Rakenteiden vahvuudet mitoitetaan suunniteltujen rakenteiden ja niitä vastaavien kertoimien mukaan, joten eri seinä- tai kattorakennetyyppejä ei voida jaotella kantavuuden perusteella. Rakenteiden mitoituksessa käytetään osavarmuuskertoimia eli suunnitellut rakenteet niin sanotusti ylimitoitetaan, jotta ne varmasti kestävät kaikki niille kohdistuvat kuormat. Osavarmuusluvut saadaan eurokoodien mitoitusohjeista eli rakenteiden suunnittelun standardeista, joiden mukaan suunniteltaessa rakenteet ovat Suomen rakentamismääräyskokoelman vaatimuksien mukaiset. Suomen rakentamismääräyskokoelma kuuluu maankäyttö- ja rakennuslakiin, joten osavarmuuksien mukaisen ylimitoituksen hyödyntäminen aurinkosähköjärjestelmän tuomien lisäkuormien kestävyys on käytännössä lainvastaista. Rakennusten lumikuormien kestävyys mitoitetaan nykyisten standardien mukaan 200:lle kg/m², joka toteutuu keskimäärin keran kolmessakymmenessä vuodessa. Lisäksi mitoituksessa saadut arvot pyöristetään ylös-

päin, jonka kautta muodostuu myös hieman ylimitoitusta. Lähtökohtaisesti voidaan ajatella, että olemassa olevat kattorakenteet kestävät aurinkosähköjärjestelmän tuoman lisäkuorman juuri näiden osavarmuuksiin, pyöristyksiin ja lumikuormien ylimitoituksiin perustuen, mutta kattorakenteen kantavuus on silti osoitettava laskennallisesti lumikuormia ja osavarmuuslukuja hyödyntämättä.

Katot ovat rakennusalustana esteettisempiä kuin seinät tai maa, koska katolla paneelit eivät ole näkyvissä ja paikka on suojaisa. Katoilla tuotettu sähkö on myös lähellä kulu- tusta. Loivilla katoilla aurinkosähköjärjestelmät ovat vielä huomaamattomampia kuin jyr-killä katoilla, jonka lisäksi säteily määrä on loiville katoille hyvä ja tällaisia kattoja on olemassa runsaasti. Katoilla käytössä oleva pinta-ala on tosin rajatumpi, kantavuudet on tarkistettava ja katon kunnosta huolehdittava, jottei aurinkosähköjärjestelmän asennuk- sella vahingoiteta olemassa olevia rakenteita ja lyhennetä katon käyttöikä.

Seinäasennuksen yhtenä etuna on jyrkkä asennuskulma, jolloin roskat ja lumi eivät ke- räännä paneelin pinnalle. Lisäksi seinäasennuksia voidaan hyödyntää myös rakennuksen varjostukseen viilentämään sisätiloja. Optimaalista etelään suunnattua seinää on kuiten-kin haasteellista löytää, hyödynnettävä pinta-ala on usein kattoa pienempi ja kaikki asen-nus ja huoltotyöt on tehtävä henkilönostimelta tai rakennustelineeltä. Seinäasennuksia on toteutettu maa- ja kattoasennuksia vähemmän, joten niistä on haasteellista löytää tietoa. Laitetoimittaja määrittää seinärakenteeseen kestävimpiä kiinnitystavan.

Maa-asennuksien etuna ovat isot käytettävät pinta-alat, jonka lisäksi rakennusalusta on helppo, koska suurempia kantavuustarkasteluja ei tarvitse tehdä. Järjestelmän osia ei myöskään tarvitse nostaa katolle eikä putoamissuojauksesta huolehtia ja huolto on help- poa maasta käsin. Maa-asennuksia kuitenkin helposti varjostavat ympäröivä kasvusto tai rakennukset, jonka lisäksi ne on aidattava ilkevallalta ja eläimiltä.

Paloturvallisuus on hyvä huomioida jo soveltuvan kohteen arvioinnissa. Tuulikuormien vuoksi katoilla reuna- ja nurkka-alueille ei sijoiteta paneeleita, mikä helpottaa myös pa- lokunnan työskentelyä tulipalon sattuessa. Palokunta vaatii vähintään 1 metrin tilan katon reunoille turvallisuussyistä. Lisäksi aurinkosähköjärjestelmän tulisi olla kytkettävissä pois tuotannosta palon sattuessa eivätkä aurinkopaneelit saisi estää palokunnan pääsyä savunpoistoluukuille ja kattoikkunoille.

4.1.1 Olemassa olevat rakennukset

Olemassa oleviin rakennuksiin suunniteltaessa aurinkosähköjärjestelmää, tulee rakennus- alustan kantavuus varmistaa. Seinäasennuksissa laitetoimittaja määrittää kiinnityskohtien tarpeellisuuden seinärakenteen mukaan, mutta kattoasennuksissa tilaajan tulee varmistaa katon kantavuus ja ilmoittaa tarjouskyselyssä maksimaalinen kuorma, jonka aurinkosäh- köjärjestelmä saa katolle lisätä.

Katon kantavuus varmistetaan rakennettavuusselvityksessä. Luotettavuuden kannalta rakennettavuusselvityksen tulisi tehdä henkilön, jolla on rakenteiden mitoittamiseen riittävät pätevyudet eli rakennesuunnittelijan.

Kantavuuden tarkastelussa verrataan kohteelle suunniteltuja kuormia toteutuneisiin. Suunniteltu rakenne ei välttämättä vastaa täysin toteutettua rakennetta tai rakenteen materiaalien painot on voitu mitoittaa todellista suuremmiksi, jolloin muutamien kymmenien kilojen lisäkuorman kantavuus on jo varmistettu. Lisäksi mitoituksia laskettaessa välitulokset pyöristetään ylöspäin, joten jo pelkästään mitoituksien laskeminen tarkoilla arvoilla voi tuoda rakenteen kantavuuteen riittävän, aurinkosähköjärjestelmän tuomaa lisäkuormaa vastaavan, suuruusluokan lisäyksen. Myös syvällisen harkinnan perusteella voidaan rakenteen mitoituskuorman ylitys muutamalla prosentilla hyväksyä. (Viita & Keränen, 2016)

Jotta suunnitellut ja toteutuneet kuormat saadaan selvitettyä, on rakennuttajan tai muun tilaajan edustajan hankittava rakennesuunnittelijalle kohteen vesikaton rakennepiirustukset sekä mahdolliset elementtipiirustukset. Vesikaton rakennepiirustuksista selviävät omapainojen lisäksi myös hyötykuormat. Ilmanvaihtolaitteistojen ripustuksille on useimmiten varattu noin 50 kg/m^2 , joten mikäli tätä kapasiteettia ei ole käytetty kokonaan, voidaan se käyttää aurinkosähköjärjestelmän tuomiin lisäkuormiin. Mikäli ripustusten kapasiteetti on joissain osissa kokonaan käytössä ja joissain vain osittain, voidaan aurinkosähköjärjestelmän asennus suunnitella vain kohtiin, joissa koko varattu kapasiteetti ei ole käytössä.

Rakennettavuusselvityksen yksi merkittävin tehtävä on määrittää katon kantavuus. Mikäli kohteessa vierailut rakennuttaja on havainnut muita rakennusteknisiä haasteita, tulee myös nämä käsitellä selvityksessä. Näitä voivat olla muun muassa katteen käyttöiän ja uusimistarpeen määrittäminen, villan puristuslujuuden riittävyys, telineiden alle tulevan lisäkermin tarve ja lumipeitteen maksimipaksuuden määrittäminen. Rakennuttajan on hyvä lisäksi selvittää ja myös tiedottaa rakennettavuusselvityksen tekijää kohteeseen sen elinkaaren aikana tehdyistä huolto- ja korjaustoimenpiteistä.

Kattorakenteen kantavuudesta puhuttaessa tulee esiin usein myös lumien kinostuminen ja niiden poisto. Kattorakenteet mitoittetaan 200 kg/m^2 lumikuormalle, joka vastaa noin 60 cm lumipeitettä kevättalvella. Mikäli tämä peitepaksuus on lähellä toteutua, tulee lumet poistaa katolta ja paneelien päältä. Muissa tapauksissa lumenpoistojärjestelmä tulee kuitenkin suhteuttaa talviajan tuotantotavoitteisiin. Lumien poiston aiheuttamat huoltokustannukset voivat nousta korkeammiksi kuin paneelien sähköntuotannon kustannus-hyöty ennen seuraavaa lumisadetta. Lisäksi aurinkopaneeli lämpiää toimiessaan, jonka perusteella lumi sen päällä sulaa, ellei koko paneeli ole lumen peitossa. Aurinkopaneelien päälle kertyvän lumen määrästä ei kuitenkaan ole toistaiseksi tehty tieteellistä tutkimusta.

Rakennuksen iän perusteella voidaan tehdä muutamia johtopäätöksiä. Ennen 70-lukua suunnitellut rakennukset on mitoitettu lumikuormalle 100 kg/m^2 . Nykyisin rakennukset mitoitetaan tuplasti suuremmalle lumikuormalle, joten vanhan mitoituksen mukaiset rakennukset kuuluvat kantavuuden puolesta riskirakenteisiin. Tästä syystä katon kantavuus voi olla heikoilla, jonka vuoksi aurinkosähköjärjestelmän tuoma lisäkuorma tulee ohjata suoraan rakennuksen pystyrakenteille. Tämä onnistuu pollareiden avulla, mutta vaatii kuormien ohjaukseen mahdollisesti myös ristikkorakenteen. Kustannustarkastelun mukaan pollarijärjestelmä on itsessään jo muita asennustapoja kalliimpi, jonka lisäksi myös ristikkorakenne tuo omat kustannuksensa. Tähän perustuen voidaan ennen 70-lukua suunniteltuja rakennuksia kattoja pitää riskialttiina rakennusaluistoina rakenteiden kantavuudelle ja aurinkovoimalaprojektin kustannustehokkuudelle.

Omakotitalojen kohdalla ei rakenteiden kantavuus ole yleensä ongelma, vaan huomio kannattaa keskittää vedeneristykseen. Laitetoimittajat eivät välttämättä tunne kattorakentamista, jonka vuoksi asennuksissa on syytä olla mukana rakennusalan asiantuntija. Järjestelmän asennuksien läpiviennit ovat riski kattorakenteen kestävyydelle ja käyttöiälle, joten vedeneristyksen toteutukseen tulee kiinnittää huomiota.

Mekaanisesti olemassa oleviin koolauksiin kiinnittäminen voi olla haasteellista, mikäli piirustuksista näkyvä koolauksen jako ei toteudukaan. Tämä koskee erityisesti seinärakenteita, joilla on usein kattorakenteita suurempi koolausväli.

Olemassa oleviin rakennuksiin olisi ihanteellista asentaa aurinkosähköjärjestelmät muiden julkisivu- tai katonkorjaustöiden yhteydessä, jolloin sekä rakenteen että aurinkosähköjärjestelmän käyttöiät saataisiin vastaamaan toisiaan. Lisäksi järjestelmät voitaisiin kiinnittää korjauksen yhteydessä kantavaan rakenteeseen, jolloin ne saisi liitettyä oikeapoisesti vedeneristykseen ja höyrynsulkuun.

4.1.2 Uudet rakennukset

Uusille rakennuksille aurinkosähköjärjestelmä voidaan suunnitella muun rakennesuunnittelun yhteydessä tai mitoittaa rakennuksen rakenteet mielellään vähintään 30 kg/m^2 myöhemmin asennettavaa aurinkosähköjärjestelmää varten. Aurinkosähköjärjestelmän asennuksesta on etua myös tavoitellun E-luvun saavuttamisessa, mutta on hyvä muistaa, ettei kohteen ulkopuolelle menevä tuotettu sähkö vaikuta E-lukuun. Järjestelmän mitoittaminen yli kohteen kesäaikaisen sähkönkulutuksen ei muutenkaan ole taloudellisesti kannattavaa.

Rakennusteknisesti turvallisin on toteuttaa aurinkosähköjärjestelmän asennus pollareilla. Pollarit asennetaan katon rakentamisvaiheessa ja ne kiinnittyvät katon kantavaan rakenteeseen, joten aurinkosähköjärjestelmän asennus ei vaadi enää erillisiä läpivientejä kattorakenteeseen. Myös järjestelmän tuomat lisäkuormat siirtyvät tällöin suoraan kantaville

rakenteille, joten katon kantavuus on tällöin oikein mitoitettuna turvattu. Pollarit asennetaan yleisimmin loiville katoille, koska jyrkillä harjakatoilla yleisin asennustapa on mekaaninen kiinnitys lappeen suuntaisesti. Pollarit voitaisiin asentaa myös jyrkille katoille, mutta usein aurinkosähköjärjestelmä saadaan kiinnitettyä tukevasti harjakaton koolaukseen tai muuhun kantavaan rakenteeseen. Mekaaninen kiinnitystapa on pollariasennusta edullisempi, joten harjakaton suunnittelun yhteydessä on tärkeää suunnitella myös läpivientien tiivistyksen varmistaminen, mikäli mekaaninen asennus päätetään toteuttaa. Harjakatoilla paneelit tulee sijoittaa lähelle harjaa, jottei valuva lumi pakkaudu reunoille muodostaen suuria kuormia. Lumi ei saisi myöskään kinostua katon harjan yläosaan, jossa harjakatoilla sijaitsevat useimmiten alipainetuulettimet, sillä kinostuva lumi ei saa yltää alipainetuulettimien tasolle.

Loiville katoille kelluvan järjestelmän asentaminen on tutkimuksen mukaan edullisin asennustapa. Kelluvan asennuksen telineet painavat keskimäärin noin 17 kg/m^2 ja paneeli reilut 10 kg/m^2 , joten kattorakenteelle tuleva lisäkuorma on syytä mitoittaa vähintään 30 kg/m^2 . Kelluvan asennuksen suunnittelussa myös käytettävän villan puristuslujuuteen on kiinnitettävä huomiota, jotta se ei painu järjestelmän alla. Painumat aiheuttavat veden lätköitymistä ja voivat lisäksi vahingoittaa katetta asennuksen ja huoltotöiden yhteydessä. Myös katteen lujuusominaisuuksien on kestettävä kelluvan järjestelmän paino, jonka vuoksi vähintään kaksikermikatteen käyttö on aiheellinen ja mielellään luokan TL1 kermi. Katemateriaalia valitessa voi tumman bitumikermin sijaan pohtia myös vaaleaa katetta, koska kattopinnan kuumeneminen laskee paneelien tuotantotehoa. Katteen värillä ei kuitenkaan ole todistettu Suomen oloissa olevan suurta merkitystä paneelien sähkön tuotantoon.

Uusien tai vanhojen korjattavien rakennusten suunnittelun yhteydessä on yksi vaihtoehto aurinkosähköjärjestelmälle myös integroitu asennus. Sekä integroituihin seinä- että kattoasennuksiin on saatavilla paneelivaihtoehtoja, jotka ovat Suomen U-arvojen mukaisia. Paneeleja käytettäessä rakenteen osana, säästyy myös korvattavan rakenteen materiaalikustannuksia.

Uusien energiatehokkaiden ja ympäristöystävällisten rakennusten rakenneratkaisuiden suunnittelussa on tärkeää huomioida tulipaloherkkyys. Sähkölaitteet kuitenkin lisäävät paloturvallisuusriskiä, vaikka järjestelmän osat vastaisivatkin kattorakenteiden paloluokituksia. Kantava puurakenne ja kierrätysmateriaaleista valmistettu eriste yhdistettynä aurinkosähköjärjestelmään eivät anna palokunnalle juurikaan mahdollisuuksia estää tulipalon leviämistä.

Mikäli aurinkosähköjärjestelmien asennuksia ajatellaan jo uusien asuinalueiden kaavoitusvaiheessa, tulisi tällöin rakennuksien suurimmat seinäpinta-alat ja katot suunnata etelään, jotta aurinkosähköjärjestelmän tuotto olisi optimaalinen. Kaavoituksessa on hyvä huomioida myös ympäröivien rakennusten korkeudet sekä puuston kasvu, jotteivat ne tulevaisuudessa varjosta aurinkopaneelikenttää.

4.1.3 Maa-asennukset

Maa-asennukset tulevat edullisimmaksi jo valmiiksi tasaisilla ja tiiviillä maa-alueilla, joille painoperusteinen eli kelluva asentaminen on mahdollista. Asennus on tällöin nopeaa ja telien kustannukset pollariasennusta matalammat. Pehmeille maille kuten savitasangoille on kairattavien ruuvipaalujen asennus soveltuva roudan kestävyuden ja helpon asennuksen puolesta. Lisäksi korroosion eteneminen on hitaampaa hienorakeisissa maa-aineksissa. Kaivantojen tekeminen on kairausta kalliimpaa ja hitaampaa ja sen käyttämisestä voisi suositella vain kovalle ja kivisille alustoille, joille painoperusteinen asennus ei maan pinnanmuotojen puolesta ole mahdollista. Kaivantoja tehdessä kannattaa kaikki kaivannot myös kaapeleille tehdä samalla kertaa. Kaapelit on upotettava vähintään 0,7 metrin syvään kaivantoon.

Rannikkoalueilla maaperä on usein savista, jolle väärin asennettuna paneelirivit saattavat painua tai roudan vaikutuksesta kohota vuoden aikojen mukaan. Paneelirivien epätasaisuus heikentää niiden tuotantoa. Kokenut laitetoimittaja tai rakennesuunnittelija auttavat riittävän perustusten syvyyden määrittämisessä.

4.2 Tyyppiratkaisut

Olemassa olevien standardien, tietojen ja tutkimustulosten perusteella ei voida tehdä selkeitä yleistyksiä tyyppiratkaisuista. Tyyppiratkaisut katoille voidaan lyhykäisyydessään kuitenkin esittää katon kantavuuteen perustuen, joka selviää rakennettavuusselvityksestä.

Kun kattorakenteen tiedetään kestävä hyvin lisäkuormaa, voidaan katolle sijoittaa kelluva aurinkosähköjärjestelmä. Mikäli järjestelmän tuoma lisäkuorma pitää kuitenkin saada ohjattua suoraan kantaville rakenteille, on järjestelmä asennettava mekaanisesti, jolloin kuormat siirtyvät vaakasuuntaisten palkkirakenteiden kautta kantaville pystyrakenteille eli pilareille. Jos katon kantavuus on heikko, on vaihtoehtona oikeastaan vain pollarijärjestelmä, jotta lisäkuormat ohjautuvat suoraan rakennuksen kantaville pystyrakenteille kuormittamatta katon vaakarakenteita.

Seinärakenteisiin aurinkosähköjärjestelmä kiinnitetään aina mekaanisesti, joten asennusvaihtoehtoja ei ole muita kuin perinteinen mekaaninen asennus tai uudempi ja asennuskustannuksiltaan suurempi integroitu asennus.

Tasaiselle jo tiivistyneelle maalle kelluva ratkaisu on kustannustehokkain. Mikäli maa on pehmeää ja helposti roudan liikuteltavissa, tulisi aurinkosähköjärjestelmä perustukset tehdä maahan vähintään metrin syvyyteen. Tällöin ratkaisu on pollariasennus, joka pehmeään maahan saadaan toteutettua kairaamalla, mutta kiviseen ja kovaan maahan on pollarit asennettava kaivannoin. Kaivantoihin tehtävä asennus voi tulla kyseeseen myös tapauksessa, jossa järjestelmä vaatii hyvin vahvat perustukset.

4.3 Kokonaistaloudellisuus

Kokonaistaloudellisuutta lähestytään näissä ehdotuksissa keskittyen asennuskustannuksien vaikutuksiin sekä tilaajan omien henkilöstöresurssien kustannusten vähentämiseen.

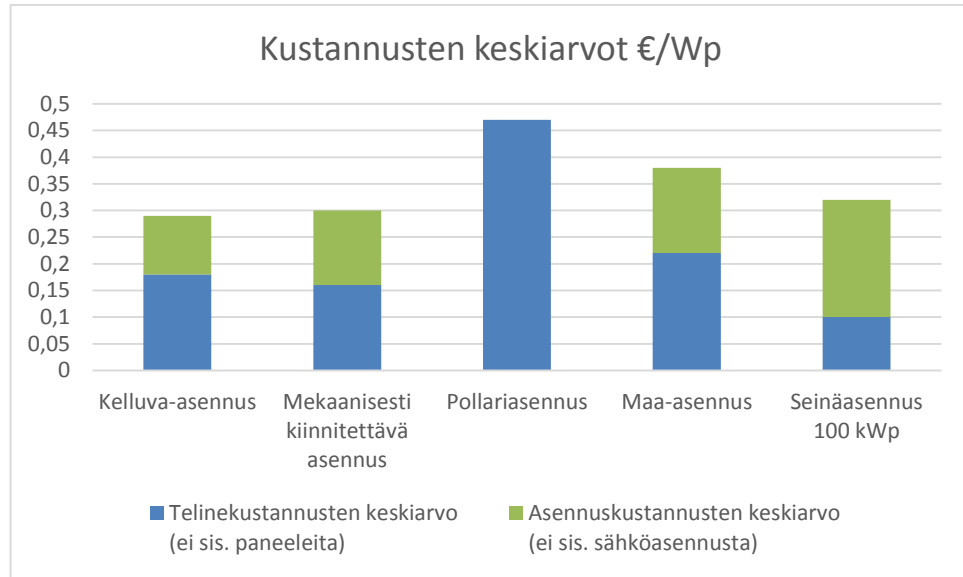
Tilaajan sisäisiä kustannuksia voivat nostaa erityisesti toteutussuunnittelun yhteydessä haasteiden myötä lisääntynyt työmäärä ja aikataulun venyminen. Tästä johtuen on suunnittelun ohjauksen tueksi laadittu rakennuttajan muistilista, josta selviää suunnittelu- ja toteuttamisvaiheessa tarkastettavat ja huomioitavat seikat sekä rakennettavuusselvityksen sisältö. Muistilistan tarkoituksena on nopeuttaa selvitystyötä sekä suunnitelmien tarkistusta ja yhteensovitusta. Muistilista on koottu tämän diplomityön edetessä ja se on työn liitteenä 1.

Koko aurinkovoimalan toteutuksesta eli projektinvaiheista P1-P4 on laadittu tehtäväverkko, josta nähdään tarkemmin tehtävien väliset suhteet ja aikataulun joustomahdollisuudet. Tehtäväverkkoon on myös merkattu sinisellä kriittinen polku, jonka tehtävien myöhästyminen vaikuttaa koko projektin aikatauluun. (Artto et al., 2008, ss. 131-141) Tehtäväverkko on mitoitettu 8 kuukaudelle, koska esimerkkiprojekteihin meni keskimäärin 12 kuukautta ja aikataulua on mahdollista kiristää. Esitetty tehtäväverkko on kevennetty versio projektinhallinnan oppien mukaisesta tehtäväverkosta, koska tässä ei ole annettu tarkkoja päivämääriä, joustovaroja, nuolien kohdistus ei perustu tehtävien välisiin suhteisiin eivätkä kaikki tehtävät ole kytköksissä toisiinsa. Tehtäväverkossa on kuitenkin esitetty kaikki merkittävimmät tehtävät projektin aikana sekä niiden kestot. Harvat tehtävät vaativat samoja henkilöresursseja, joten monia tehtäviä voidaan lomittaa yläreunassa olevan kokonaisuikataulussa pysymiseksi.

Tehtäväverkko on laadittu esimerkkiprojektien mukaan ja sen tarkoituksena on vähentää aikataulun viivästyksien tuomia lisäkustannuksia projektille. Tehtäväverkon avulla projektin aikataulun toteutumisen seuranta ja suunnittelu tehostuu. Uusien projektien tavoiteaikataulujen suunnittelu yksinkertaistuu, kun eri tehtävien väliset suhteet nähdään selkeästi ja projektikokonaisuus on kuvattuna yhdellä aikajanalla. On kuitenkin hyvä muistaa, että jokainen aurinkovoimala on oma kompleksinen kokonaisuutensa. Tästä johtuen tehtäväverkkoa ei voi suoraan soveltaa projektista toiseen, vaan esimerkiksi asennustavan viemä aika on aina laskettava erikseen. Tehtäväverkkoa tullaan täydentämään uusien aurinkovoimalaprojektien oppien perusteella, mutta tämän hetkinen versio on esitetty liitteenä 5.

Tässä diplomityössä ei käsitellä sähkötekniikkaa, jonka vuoksi sähköasennustyöt eriteltiin pois budjettitarjouskyselystä. Kyselyn mukainen 500 kW_p:n aurinkovoimala voidaan ajatella toteutettavaksi sähköteknisesti samalla tavalla asennustavasta riippumatta. Tällöin myös invertterit ja paneelit ovat kaikilla asennustavoilla samanlaiset sekä niiden kustannukset yhtä suuret. Siispä aurinkovoimaloiden eri toteutusvaihtoehtojen kustannuksia

voidaan vertailla huomioiden ainoastaan teline- ja asennuskustannukset. Budjettitarjouskyselyn vastauksien perusteella on laadittu kuva 34, josta nähdään tuloksissa esitettyä taulukkoa 4 selkeämmin aurinkovoimaloiden eri toteutusvaihtoehtojen kustannusvaihtelut.



Kuva 33. Aurinkovoimalan eri toteutustapojen kustannusten vertailu

Kuvasta 34 nähdään, että mikäli aurinkovoimala toteutetaan sähköteknisesti kaikissa vaihtoehtoissa samalla tapaa ja paneelien sekä invertterin kustannukset ovat kaikissa vaihtoehtoissa samat, on asennustavoista kelluva ratkaisu edullisin toteutusvaihtoehto. Tämän jälkeen tulee mekaaninen asennus, seinäasennus, kaivannoin toteutettu maa-asennus ja viimeisenä pollariasennus. Pollariratkaisulle ei budjettitarjouskyselyssä saatu vastauksia asennuksen kustannuksiin, mutta jo pelkästään pollariratkaisun telien materiaalikustannukset ylittävät muiden toteutustapojen asennus- ja teliekustannukset yhteensä.

Paneelien osuus aurinkovoimalan hankintakustannuksista on noin puolet (kuva 33), joten niiden kustannusten muutokset näkyvät selkeästi kokonaiskustannuksissa. Pienemmillä osa-alueilla kustannusten alenemat tulevat kuitenkin prosentuaalisesti olemaan suurempia kuin paneeleilla tulevaisuudessa. Näitä ovat muun muassa järjestelmän komponenttien osien pieneneminen, telineratkaisuiden kehitys ja yksinkertaistuminen sekä asennusammattitaidon kasvu. Näiden nykyiset kustannukset on nyt taulukoitu tähän diplomityöhön, joten niiden kehitystä Suomessa voidaan jatkossa seurata.

Lisä- ja muutostyökustannuksia muodostuu yleensä rakennusvaiheessa eli tässä tapauksessa asennuksen yhteydessä. Tulevaisuudessa asennusta voisikin ohjata kohti suurempaa esivalmistusastetta ja elementtiasennuksia, jolloin asennusaika katolla tai muulla raken-

nusalustalla lyhenee, ilmasto-olosuhteiden vaikutus asennusaikaan vähenee, asennuskustannukset laskevat, kun tehtaalla eri työvaiheet saadaan limitettyä helpommin, jonka lisäksi työturvallisuusaste nousee, kun katolla tai muilla työmailla työskentelyaika lyhenee.

4.4 Kehitysehdotusten yhteenveto

Ennen tutkimustyön aloitusta oli yhtenä tavoitteena laatia toimintamalli, jonka avulla soveltuvan kohteen arviointiin menisi noin puoli tuntia. Soveltuvan kohteen arviointiin on Helenillä kulunut projektointikustannuksia esimerkkiprojekteissa, joten tähän haluttiin kustannuksia säästävä muutos. Tutkimustyön edetessä selvisi kuitenkin, ettei aurinkosähköjärjestelmän aiheuttamien lisäkuormien suuruuden laskentaan, eli kuormien yhteysvaikutukseen, ole edes ohjeistavia standardeja. Siispä niiden vaikutusta rakennusalaan ja sen kestävyYTEEN on vaikea arvioida, joten rakennettavuusselvitystyön on syytä teettää rakenteiden mitoituksiin perehtyneellä asiantuntijalla eli rakennesuunnittelijalla. Rakennettavuusselvityksessä olemassa olevan rakenteen riittävän kantavuuden todistamiseen voidaan käyttää seuraavia keinoja: toteutuneiden ja suunniteltujen omapainojen vertailu, IV-ripustuksille varatun kapasiteetin käyttö, tarkoilla pyöristämättömillä arvoilla mitoittaminen, joidenka lisäksi muutaman prosentin mitoituskuorman ylitys voi harkinnan mukaan olla hyväksyttävää. Tutkimuksen aikana selvisi myös, että rakenteiden kantavuuden puolesta riskirakenteita ovat ennen 70-lukua suunnitellut rakennukset, joten niiden katoille aurinkovoimalan suunnittelua kannattaa välttää.

Aurinkovoimaloiden asennukset ovat uusi asia Suomessa, jonka vuoksi kaikilla rakennesuunnittelijoilla ei ole tietoutta mahdollisista asennusvaihtoehdoista. Myöskään kattojen kantavuuden ja niin sanotun oikean asennustavan yhdistämiseen ei ole toistaiseksi ohjeita, vaan tyyppiratkaisut perustuvat ainoastaan lisäkuormien ohjaamisen tarpeeseen suoraan tai välillisesti kantaville rakenteille. Tämän vuoksi rakennuttaja tai muu aurinkovoimalaprojektissa työskentelevä ja eri asennustavat tunteva henkilö voi tarvittaessa ohjeistaa rakennettavuusselvityksen tekijää, jotta toteuttamiskelpoinen vaihtoehto aurinkovoimalalle löydetään.

Uusien rakennusten yhteydessä on suositeltavaa suunnitella aurinkosähköjärjestelmä muun rakennesuunnittelun yhteydessä ja mielellään toteuttaa rakennuksen rakentamisen yhteydessä. Sama pätee myös vanhojen rakennusten tapauksiin eli aurinkosähköjärjestelmä olisi ihanteellisinta toteuttaa rakennuksen saneerauksen yhteydessä. Tällöin varmistetaan aurinkojärjestelmän telinerakenteiden liitynnät rakennukseen rakennusteknisesti oikea oppisesti.

Maa-asennus on suhteellisen helppo ratkaisu, sillä rakennusalan eli maaperän kantavuutta ei suuremmin tarvitse mitoittaa ja asennus maanpäällä on helppoa. Mikäli maa-asennus saadaan toteutettua kelluvana, voi asennustapa olla kaikista vaihtoehdoista edullisin. Kelluvan maa-asennuksen telinekustannuksia voidaan pitää lähes samana kuin katolle asennetun kelluvan järjestelmän, mutta asennuskustannukset sen sijaan laskevat.

Kuva 34 mukaisissa maa-asennuskustannuksissa on mukana pollarilinjojen kaivuutyöt ja kelluvan kattoasennuksen kustannuksiin sisältyy järjestelmän osien nostotyöt ja työskentely katolla. Suuri osa kaivuutöistä sekä nostot eivät puolestaan kuulu maalle kelluvana asennuksena toteutettavan aurinkovoimalan kustannuksiin, joten asennuskustannukset vähenevät. Valmiiksi tasatut ja tiivistyneet maa-alueet olisivatkin kustannustehokas rakennusalue, varsinkin jos tuotettu aurinkosähkö saataisiin kulutettua lähellä tuotantoa.

Seinäasennuksista on vaikea tehdä ehdotuksia, koska niistä on saatavilla hyvin vähän tietoa. Seinäasennukset eivät nykyisten tietojen mukaan myöskään vaikuta kannattavilta, koska asennukset ja huollot ovat katto- ja maa-asennuksia kalliimpia. Lisäksi paneeliken- tälle hyödynnettävä pinta-ala on pienempi ja sitä kautta myös tuotanto, joka jo muutenkin on vuositasolla kattoasennuksia matalampi.

Koska aurinkovoimaloiden rakentamisesta olevaa tutkimustietoa ja muuta dataa on saa- tavilla toistaiseksi hyvin vähän, olisi tärkeää dokumentoida kaikki aurinkovoimaloihin liittyvä tieto mahdollisimman tarkasti. Näistä muodostuu hiljalleen yritykselle oma Ratu- kirjasto eli kokemuseräinen tietokirjasto oikeaan oppiseen rakentamiseen liittyen. Näitä tietoja voidaan myös hyödyntää alaa koskevien tutkimusten teossa ja alan kehityksessä. Sitä kautta myös tyyppiratkaisut voivat kokemusten kerryttyä selkeytyä. Lisäksi doku- mentointi on erittäin tärkeää tulevaisuuden kannalta, sillä mikäli joskus aurinkovoimaloi- den yhteydessä havaitaan rakennusteknisiä- tai muita ongelmia, on suunnitelmien ja muun dokumentoinnin avulla todistettavissa, etteivät vastaavat ongelmat koske kaikkia rakennettuja aurinkovoimaloita. Tulevaisuudessa IoT:n ja muun teknologian yleistymi- nen yksinkertaistaa dokumentointia ja samalla myös lähtötietojen saatavuutta, jolloin myös projektin osapuolten välinen viestintä ja kommunikointi helpottuvat, ja toiminta tehostuu.

5. TULOSTEN ARVIOINTI

Tulosten arvioinnissa käsitellään tulosten luotettavuutta sekä diplomityölle asetettujen tavoitteiden toteutumista. Saatuja tuloksia verrataan aikaisempaan tietoon ja tuodaan esille erityisesti saavutettu uusi tai muuten merkittävä tieto. Lisäksi käsitellään tuloksien tieteellistä ja käytännöllistä merkitystä sekä yleistettävyyttä.

Keskeisten tulosten suhde aikaisempaan tietoon

Diplomityössä haluttiin paneutua aurinkovoimaloiden rakentamiseen perinteisten paneelien tuotantoon ja sähkötekniikkaan keskittyvien tutkimusten sijaan. Diplomityön osatavoitteiksi asetettiin soveltuvien kohteiden nopeampi arviointi, tyyppiratkaisuiden löytyminen sekä esimerkkiprojektien toteutuksen analysointi ja vertailu. Soveltuvien kohteiden arviointi on Helenin aurinkovoimalaprojekteissa osoittautunut haasteeksi ja sen aiheuttamat kustannukset ovat olleet suuria. Myös tyyppiratkaisuiden löytyminen helpottaisi soveltuvien kohteiden arviointia. Esimerkkiprojektien vertailulla ja analysoinnilla puolestaan haettiin jatkuvaa kehitystä projektitoimintaan, etteivät jo kertaalleen koetut haasteet toistuisi, ja aurinkovoimaloiden toteutusmalli yksinkertaistuisi. Näiden kaikkien osatavoitteiden avulla tähdättiin työn päätavoitteeseen eli aurinkovoimalaprojektin kokonaistaloudelliseen tehostamiseen.

Soveltuvien kohteiden arviointia lähdettiin selvittämään aurinkovoimaloiden rakennusalojen kestävyuden ja kantavuuden kautta. Tutkimuksen aikana pian kävi kuitenkin ilmi, että aiheesta olemassa oleva kirjallinen tieto rajoittuu lauseisiin ”Rakennusalan kantavuus on tarkistettava ja materiaalien kestävyys varmistettava.” Siispä tämän työn kirjallisuusselvityksessä on kerrottu tarkemmin sekä rakennusalan että materiaalien kestävyteen vaikuttavista asioista sekä rakennusalan kantavuuden laskennallisesta tarkastamisesta.

Tavoiteltuun toimintamalliin, jolla soveltuvien kohteiden arviointi olisi toteutunut nopeasti noin 30 minuutissa, ei päästy. Tähän merkittävin syy on rakenteiden kantavuuden tarkastamisen haasteellisuus. Mitoituskuormien laskentaa ohjaavat rakentamisen standardit eivät toistaiseksi pidä sisällään laskentamallia aurinkosähköjärjestelmärakenteen tuomien lisäkuormien yhteisvaikutuksesta. Tällä hetkellä kuormien yhteisvaikutus lasketaan soveltamalla eurooppalaisten tuulitunnelitestien tuloksia ja useampia mitoitusstandardeja liittyen tuuli- ja lumikuormiin sekä rakenteiden omapainoihin. Lisäkuormien suuruuden arviointi onkin vahvasti nämä laskennat tekevän suunnittelijan arvioitavissa. Lisäkuormien suuruuden lisäksi on osoitettava, että rakennusalan kantavuus riittää vastaanottamaan nämä aurinkosähköjärjestelmän tuomat kuormat. Suomen laki ei toistaiseksi vaadi näiden laskelmien ja selvityksien tekoa, mutta oma järki sen sijaan niitä suosittelee. Suositeltavaa onkin esittää näiden laskelmien lopputulokset rakennettavuusselvityksessä,

jonka laatii rakenteiden kantavuuksien mitoituksiin erikoistunut ammattilainen. Rakennettavuusselvityksen vähimmäissisältö on esitetty työn liitteenä olevassa muistilistassa sekä kehitysehdotuksissa.

Aurinkovoimaloiden tyyppiratkaisuista ei löytynyt tietoa. Tyyppiratkaisuiden luomisen avulla tavoiteltiin yksiselitteisiä ratkaisuja erilaisten aurinkovoimaloiden rakentamiseen sekä osittain myös soveltuvien kohteiden nopeampaa arviointia. Kirjallisuusselvityksen avulla pian kuitenkin todistettiin, kuinka kompleksinen kokonaisuus aurinkovoimala on, jonka vuoksi lähes jokainen järjestelmäkokonaisuus on erilainen ja tyyppiratkaisuiden löytyminen tästä johtuen lähes mahdotonta. Sähkötekniinen toteutustapa vaihtelee, asennustapoja on useita ja telineratkaisuja valtava määrä, jonka lisäksi jokainen rakennus- alusta on hieman erilainen. Rakennus- alustaan vaikuttaa muun muassa sen muoto, suuntaus, rakenne ja korkeus, eikä pelkän rakennus- alustan rakennetyypin tietämyksellä voida tehdä johtopäätöksiä rakenteen kantavuudesta. Katoille tyyppiratkaisu voidaan esittää kattorakenteen kantavuuden mukaan, seinille toteutustapa on aina mekaaninen asennus ja maa- asennuksissa kannattaa suosia tasaisia, kovia ja tiivistyneitä maa- alueita, joille kel- luva asennustapa on mahdollinen.

Toteutuneista projekteista on julkisesti tietoa vain uutisissa, koska yritysten projektiko- htaiset tiedot ovat salaisia. Kaikista projekteista voidaan kuitenkin oppia jotain, joten He- lenin muutamia esimerkkiprojekteja haluttiin tuoda esille mahdollisimman avoimesti. Esimerkkiprojektien kautta tärkeimmät projektitoiminnan tehostamisen opit liittyvät suunnitelmien sisältöihin ja tarkastukseen sekä lähtötietojen tarkkuuteen. Suunnittelun sujuvuuden ja sen ohjauksen tueksi laadittiin rakennuttajan muistilista, johon on listattu sekä suunnittelun että toteutuksen aikana huomioitavia ja tarkistettavia seikkoja. Osa tut- kimuksen tiedoista jouduttiin salaamaan, koska niiden julkaiseminen ei olisi palvellut He- lenin tavoitetta tälle työlle yrityksen toiminnan kehittämistä.

Erityisesti suunnitelma-, mutta myös muut haasteet ovat venyttäneet esimerkkiprojektien aikatauluja. Aikataulutavoitteiden onnistumiseksi avattiin koko aurinkovoimalaprojekti tehtäväverkon kaltaiseen malliin, jonka tarkoituksena on helpottaa koko projektin aikais- ten merkittävimpien tehtävien ja niiden suhteiden hahmottamista sekä aikataulun suun- nittelua ja seurantaa. Tehtäväverkko on laadittu esimerkkiprojektien kulun mukaan ja se perustuu ainoastaan Helenin aurinkovoimalaprojektien kokouspöytäkirjoihin, koska min- käänlaista aurinkovoimalaprojektien tehtävälustausta tai muuta projektin erivaiheita ku- vastavaa mallia ei ollut saatavilla.

Kokonaistaloudellisuutta tarkasteltiin lähinnä asennustapojen kustannusten vertailun kautta, mutta myös projektitoiminnan mahdollinen tehostuminen rakennuttajan muistilis- tan ja tehtäväverkon avulla laskevat varsinkin Helenin sisäisiä projektikustannuksia. Kir- jallisuusselvityksessä on esitetty aurinkovoimalan hankintakustannusten muodostumi- nen, joka on vastaavasti esitetty myös Helenin esimerkkiprojekteista. Hankintakustannus-

ten muodostumista on mielenkiintoista seurata ja vertailla eri asennustapojen välillä. Hankintakustannuksista tilaaja pystyy konkreettisesti vaikuttamaan pääasiassa vain BOS kustannuksiin ja niistäkin vain asennustapaan ja sitä kautta myös telineisiin. Tästä syystä budjettitarjouskyselyssä haettiin vastauksia eri asennustapojen asennus- ja telinekustannuksiin, jotta näiden perusteella voidaan vertailla toteutusvaihtoehtoja. Kustannustietoutta löytyy paljon paneelien tuottavuuteen, erikokoisten aurinkovoimaloiden kokonaiskustannuksiin ja paneelien hintakehitykseen liittyen. Asennustapoihin liittyvää kustannusvertailua ei suoranaisesti löytynyt, joten saaduille tuloksille ei toistaiseksi ole vertailukohdetta muuten kuin maa-asennuksen osalta. Kirjallisuusselvityksessä tuli kuitenkin ilmi, että alan kehitys on siirtymässä teline- ja asennuskustannusten madaltamiseen. Tähän työhön taulukoidut, budjettitarjouskyselystä saadut vastaukset antavat nyt suuntaa asennustapojen ja telineiden kustannuksista Suomessa, joten niiden kehitystä voidaan seurata tulevaisuudessa.

Tutkimuksen aikana vahvistui toden teolla käsitys siitä, ettei aurinkovoimaloiden rakentustekniikkaa ole tutkittu juuri lainkaan. Tähän työhön on koottu yhteen tietoa sekä aasialaisista, amerikkalaisista että eurooppalaisista tutkimuksista ja alan julkaisuista, mutta siitä huolimatta paljon olisi vielä tutkittavaa. Tärkeää kuitenkin on, että aurinkovoimaloiden rakentamisesta on nyt kirjoitettu julkinen työ suomeksi, jonka avulla jatkotutkimuksiin on helpompi lähteä.

Kaikki työn liitteet on tehty tämän tutkimusprojektin aikana ja ne perustuvat tässä työssä esitettyihin asioihin. Liitteet on laadittu, koska sellaisia ei ole ollut aiemmin saatavilla aurinkovoimalaprojekteihin liittyen. Liitteiden ja työn muiden tuloksien toivotaan edistävän sekä Helenin että muiden alalla toimijoiden aurinkovoimaloiden rakentamista ja koko alan kehitystä.

Tulosten luotettavuus

Kirjallisuusselvityksen aineisto on koottu eurooppalaisista, amerikkalaisista ja aasialaisista tutkimusaineistoista ja alan julkaisuista. Kaikki aineisto ei välttämättä ole suoraan hyödynnettävissä aurinkovoimaloiden rakentamiseen Suomessa, koska ilmasto-olosuhteet vaihtelevat luonnollisesti maantieteellisen sijainnin mukaan. Esimerkiksi amerikkalainen johtava aurinkoenergia-alaan keskittynyt sivusto Solar Power World esittelee vuosittain alan parhaimpia uutuuksia ja järjestelmien osia. Näitä tietoja on muun muassa hyödynnetty asennustapojen esittelyssä. Ennen näiden osien ja tuotteiden käyttöä Suomessa, on hyvä verrata niiden testausolosuhteita maamme olosuhteisiin sekä tarkistaa CE-merkintöjen sopivuus. Myös muutamia saman sivuston artikkeleita on käytetty lähdeaineistona. Merkittävän aurinkoenergiasivuston artikkeleiden kirjoittajia voidaan pitää luotettavina lähteinä, onhan Yhdysvallat yksi suurimmista aurinkoenergian rakentajista. Näitä lähteitä on kuitenkin käytetty lähinnä suuntaa antavina ja ajatuksia herättelevinä tietoina, ei niinkään faktoina oikea oppisesta rakentamisesta.

Tutkimuksessa ja varsinkin esimerkkikohteiden esittelyssä on käytetty paljon Helenin omaa rajatusti saatavilla olevaa aineistoa. Heleniä pidetään Suomen aurinkovoimaloiden rakentamisen lippulaivana, joten haastateltujen henkilöiden ja yrityksen aineistojen käyttöä voidaan pitää soveltuvina lähteinä, mutta ei kuitenkaan absoluuttisena totuutena. Helenin kautta tulleen aineiston ovat laatineet aurinkovoimaloiden projektiorganisaatio ja se perustuu hyvin vankkaan kokemukseen aurinkovoimaloiden rakentamisesta Suomessa. Koska RT-kortistossa eikä RATU-kirjastossa ole vielä juuri minkäänlaista tietoa aurinkovoimaloiden rakentamiseen liittyen, voi kokemusperäisen tiedon keruun aloittaa päätoimijoiden dokumenteista.

Kustannuksia koskeva kirjallisuusosuus perustuu pääosin saksalaiseen tutkimukseen ja sen tulokset kertovat globaalista aurinkosähkön markkinatilanteesta. Suomessa ala on vasta viime vuosina alkanut kasvaa, joten markkinat ovat vielä selkeästi kalliimmat kuin esimerkiksi Saksassa. Kustannusten kehityksestä puhuttaessa ei Suomessa välttämättä kannata olettaa tutkimuksen mukaisia yhtä suuria kustannusten alenemisiä, koska Suomessa markkinat ovat pienet ja olosuhteet haastavat. Vaikka kaikki tiedot eivät olisikaan täysin käytettävissä sellaisenaan, on kaikki suuntaa antavakin tieto kuitenkin syytä hyödyntää, koska dokumentoitua tietoa ja dataa on saatavilla niin vähän.

Budjettitarjouskyselyyn vastaajiksi valittiin Suomen suurimpia aurinkosähköjärjestelmien laitetoimittajia 6 kappaletta. Vastauksia saatiin vain kahdelta laitetoimittajalta, vaikka vastausaikaa pidennettiin kuukaudella ja sitä oli lopulta yhteensä kaksi kuukautta. Vastauksien skaala oli muutamissa kohdissa suuri ja esimerkiksi asennusaikojen vastaukset annettiin eritavoin. Useimmat vastaukset olisivat helpottaneet yleistettävämpien keskiarvojen määrittämistä ja tulosten vertailua. Suuremman vastausprosentin saamiseksi olisi kysely voitu mahdollisesti suorittaa haastatteluin, mutta budjettitarjouskysely, kuten muutkin tarjouskyselyt, toteutetaan lähes poikkeuksetta sähköisesti, joten haastattelu- vaihtoehtoa ei edes kyselyn suunnittelun yhteydessä ajateltu.

Molemmat vastaajat ovat tehneet Helenin kanssa yhteistyötä ja he ovat todistettavasti luotettavia toimijoita. Heidän vastauksiinsa voidaan luottaa, vaikka molemmilla vastaajilla ei ollut kaikista eri asennustavoista referenssejä satojen kilowattien kokoluokassa. Vastaajat painottivat, että vastaukset ovat suuntaa antavia, koska jokainen aurinkovoimala on oma kompleksinen kokonaisuutensa eikä hintoja voi yleistää kaikkiin kohteisiin sopiviksi. Saatujen vastauksien perusteella saatiin kuitenkin tehtyä vertailua eri asennustapojen kustannuksista ja esitettyä niiden hintajärjestys.

Tulosten yleistettävyys

Tulokset ovat yleistettävissä Suomessa rakennettaville aurinkovoimaloille. Tuloksien mukaisia ohjeita rakennusalojen kantavuuksien tarkasteluun ja suunnittelun ohjaukseen voidaan hyödyntää missä tahansa aurinkosähköjärjestelmiä koskevassa projektissa

ja tuloksissa kustannusten esiintuonti auttaa vertailemaan eritavoin toteutettuja aurinkovoimaloita. Tehtäväverkon avulla koko projektin toteutus hahmottuu uudellekin alalla työskentelevälle ja rakennuttajan muistilistasta on hyvä tarkastaa rakennusteknisesti merkittäviä seikkoja, jotta aurinkovoimalan rakentaminen on laadukasta ja turvallista.

Tässä diplomityössä esille tuodut tiedot keskittyviä suuren kokoluokan eli satojen kilowattien (kW) aurinkovoimaloiden rakentamiseen, mutta kaikki tieto on toki sovellettavissa myös pienempiin voimaloihin. Lisäksi työn pääpaino on kattoasennuksissa, koska niissä rakennustekniset ongelmia tulee esiin luonnollisesti maa-asennuksia enemmän. Seinäasennuksia käsitellään myös, mutta suhteessa vähemmän, koska niiden osuus aurinkovoimaloiden rakentamisesta on hyvin pieni ja niistä on toistaiseksi erittäin vähän dokumentoitua tietoa tai minkäänlaisia tutkimuksia. Työssä olevia tietoja kannattaakin ensisijaisesti hyödyntää kattoasennuksien tekemiseen.

Kuten jo aiemmin todettu, kustannustiedot ovat suuntaa antavia. Lisäksi kirjallisuusselvityksen useat lähteet ovat aurinkovoimaloiden suurimmista rakentajamaista, joten niitä voidaan luotettavina, muttei täysin yhteensopivina sellaisenaan Suomen olosuhteisiin tai lainopillisiin määräyksiin. Niistä kuitenkin saadaan tärkeää tietoa aurinkoenergia-alan kehityssuunnista.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostumista lähestyttiin muutamalta eri osa-alueelta. Asennustapoihin perustuvan kustannusselvityksen mukaan edullisin aurinkovoimalan toteutustapa on kelluva-asennus. Seuraavaksi tulee mekaaninen kiinnitys ja viimeisenä pollari-asennus. Se, onko kelluva katto- vai maa-asennus edullisempi ei suoraan selvinnyt tässä tutkimuksessa. Seinäasennus on mekaanista kattoasennusta kalliimpi ja integroitu ratkaisu puolestaan seinäasennusta kalliimpi. Kokonaisuudessaan tämä hintajärjestys oli myös tutkijan oletuksien mukainen ja se vahvistui budjettitarjouksen myötä.

Soveltuvimmaksi kohteeksi voi tutkimuksen perusteella esittää 70-luvun jälkeen suunniteltua loivaa kattoa, jonka korjaus on jo tehty tai tullaan tekemään aurinkosähköjärjestelmän asennuksen yhteydessä. Ennen 70-lukua suunniteltuja rakennuksia tulee välttää. Ihanteellisin ja kustannustehokkain toteutustapa tällaiselle katolle olisi kelluva-asennus. Yhtä optimaalinen kohde olisi myös tasainen ja jo tiivistetty laaja maa-alue, jolle myös kelluvan aurinkosähköjärjestelmän asennus olisi mahdollista. Yleistystä yhdestä oikeasta asennustavasta tietynlaiselle rakennusalustalle ei kuitenkaan voida antaa, sillä aurinkosähköjärjestelmän kompleksisuuden vaikutukset tulivat esille niin kirjallisuusselvityksessä kuin tutkimuksessakin. Tämän vuoksi myöskään tyyppiratkaisuja ei onnistuttu määrittämään muuten kuin rakennusalustan kantavuuteen perustuen. Kantavuuteen perustuen heikoille kattorakenteille on aurinkosähköjärjestelmä asennettava pollareiden avulla, jotta järjestelmän tuomat lisäkuormat siirtyvät suoraan rakennuksen kantaville pystyrakenteille. Mikäli katon kantavuus on riittävä ohjaamaan kuormat vaakarakenteille, on mekaaninen asennus mahdollinen. Kelluva-asennus voidaan toteuttaa, mikäli koko katon pinta-ala kestää aurinkosähköjärjestelmän tuoman lisäkuorman. Seinille asennustapa on puolestaan aina mekaaninen kiinnitys. Maa-asennuksista kelluva ratkaisu voidaan asentaa tiiviille ja tasaiselle maalle, kairattava pollariasennus pehmeälle maalle ja kaivantoihin tehtävä pollariasennus kiviselle tai muutoin vahvat perustukset vaativalle aurinkosähköjärjestelmälle.

Soveltuvan kohteen arviointiin selkein tapa on ohjata kohteen rakennepiirustukset rakennesuunnittelijalle, joka määrittää rakennettavuusselvitykseen aurinkosähköjärjestelmän tuomat lisäkuormat ja olemassa olevan rakenteen kantavuuden. Rakennuttaja voi ohjeistaa rakennesuunnittelijaa sopivan asennustavan valinnassa sekä huolehtia, että suunnittelijalla on laskelmiin tarvittavat lähtötiedot. Rakennettavuusselvityksessä tulee esittää myös muun muassa aurinkosähköjärjestelmän ja rakennusalustan käyttöiän yhteensopivuus, vedeneristyksen varmistaminen sekä kohteelle sallittavan lumipeitteen maksimipaksuus.

Aurinkosähköjärjestelmän huolto- ja kunnossapitotoimenpiteiden säännöllinen toteutuminen voidaan varmistaa laitetoimittajan kanssa tehtävällä huoltosopimukselle. Myös rakennusalustan, erityisesti katon, huoltotoimenpiteistä on huolehdittava eikä aurinkovoimala saa vaikeuttaa niiden toteuttamista. Huoltohenkilökunnan on oltava alan ammattilaisia, kuten myös asennuksen tekijöiden, jotta sekä rakennusalustan että järjestelmän elinkaaritavoitteet toteutuvat. Asennuksen toteuttajan tulisi ymmärtää myös erityisesti kattorakentamisesta sekä rakennusprojektin päätoteuttajana toimimisesta. Näissä asioissa voi ohjeistaa myös tilaajan nimeämä rakennuttaja, sillä aurinkovoimaloiden asentajat ovat usein ainoastaan sähköalan ammattilaisia. Yksi aurinkoenergian jatkuvan kehityksen ja menestyksen avaimista onkin myös osaavan henkilöstön kouluttaminen. Ammattitaitoiset ihmiset luovat luotettavaa pohjaa alalle sekä kestävämpiä ratkaisuja, jolloin alan on mahdollista kehittyä ja nousta merkittäväksi osaksi energian kokonaistuotantoa.

Aurinkovoimalaa koskevien tietojen dokumentointi on erittäin tärkeää, sillä uudella alalla tehtyjä tutkimuksia ja kokemusperäistä tietoa on saatavissa vielä hyvin vähän. Siispä kaikki dokumentointi kerryttää rakentamisen tehostamiseen ohjaavaa tietoa. Lisäksi aurinkovoimaloiden ja rakennusalojen takuuajoista on vähän kokemuksia, joten oikeaoppinen toteutustapa on syytä olla todistettavissa dokumentein mahdollisesti tulevaisuudessa esiintyvien kestävyys- tai muiden haasteiden yhteydessä.

Alan jatkuva kasvu tulee näkymään kustannusten lisäksi myös monipuolisemmissa tutkimuksissa ja asennustekniikoiden kehittymisenä. Parhaat käytännöt ja tekniikat alkavat lopulta vaikuttamaan alan kehityssuuntiin ja mahdollistavat tulevaisuudessa jopa tyyppiratkaisuiden luonnin. Esimerkiksi kattomateriaalit kehittyvät varmasti hiljalleen vastamaan aurinkovoimaloiden rakennusteknisiin haasteisiin, kuten vedeneristykseen ja kateen kulumiseen. Alan kasvua tulee edesauttamaan myös jatkuvasti tiukentuvat rakennuksien energiatehokkuusmääräykset ja päästötavoitteet.

Tulevaisuuden kehityssuunnista aurinkoenergiamarkkinoihin tulee vaikuttamaan myös digitalisaation kehittyminen, jolloin tiedon hankinta on entistä helpompaa, joka auttaa myös projektien sisäisessä viestinnässä. Lisäksi 3D tulostus ja robotisaatio tuovat oman lisänsä komponenttien kehitykseen ja asennukseen. Huomioitavaa on myös tuotteiden tarpeen väheneminen ihmisten keskuudessa ja hiljalleen siirtyminen omistustarpeesta jakamishaluun. Tulevaisuudessa jaettavat suuremmat investoinnit tulevat varmasti vaikuttamaan myös aurinkosähköjärjestelmien yksityisiin hankintoihin. Markkinoilla on syytä pysyä mukana muutoksissa, sillä ala ja teknologiat tulevat kehittymään meistä riippumatta.

Aurinkovoimaloiden rakentamisen jatkotutkimusaiheita on monia. Näistä ehkä merkittävimpiä ovat telinerakenteiden keventäminen, rakenteiden kestävyysvarmistaminen, aurinkosähköjärjestelmän tuoman lisäkuorman laskennan selkeyttäminen sekä laajempi kyselytutkimus aurinkovoimalaprojektien haasteista.

LÄHDELUETTELO

- Aaltonen, J. (2014). *Lämpöä auringosta ja jätevedestä Sörnäisissä*. (Helen Oy) Haettu 17. maaliskuuta 2016 osoitteesta <http://blogi.helen.fi/lampoa-auringosta-ja-jatevedesta-sornaisissa/>
- AccuWeather. (2013). *Solar Panels Present New Dangers to Firefighters*. Haettu 19. helmikuuta 2016 osoitteesta [Accuweather.com: http://www.accuweather.com/en/weather-news/firefighters-danger-solar-panels/19689021](http://www.accuweather.com/en/weather-news/firefighters-danger-solar-panels/19689021)
- AccuWeather. (2015). *Are Solar Panels Usable in Snowy Climates?* Haettu 16. helmikuuta 2016 osoitteesta [AccuWeather.com: http://www.accuweather.com/en/weather-news/are-solar-panels-usable-in-sno/21894748](http://www.accuweather.com/en/weather-news/are-solar-panels-usable-in-sno/21894748)
- Agora Energiewende. (2015). *Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems*. Berlin, Germany: Fraunhofer ISE. Haettu 11. toukokuuta 2016 osoitteesta https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Kosten-Photovoltaik-2050/AgoraEnergiewende_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf
- Ahola, J. (Esiintyjä). (2015). *Aurinkosähkön tulevaisuudennäkymät ja kannattavuus Suomessa*. Ilmansuojelupäivät 19.08.2015, Lappeenranta. Haettu 8. helmikuuta 2016 osoitteesta http://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkosahkon-tulevaisuudennakymat-ja-kannattavuus-suomessa
- Ahoranta, S. (2014). *Rakennustöiden ennakkosuunnittelun ja valvonnan tehostaminen*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Andorka, F. (2014). *Should you use integrated solar panels?* Haettu 22. maaliskuuta 2016 osoitteesta [Solar Power World: http://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/should-you-use-integrated-solar-panels/](http://www.solarpowerworldonline.com/2014/01/should-you-use-integrated-solar-panels/)
- Artto, K.;Martinsuo, M.;& Kujala, J. (2008). *Projekttiliiketoiminta* (2. painos p.). Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

- Autio, H. (2015). *Rakennettavuusselvitys, aurinkovoimala*. Helsinki: Sweco (saatavilla rajoitetusti). Haettu 11. huhtikuuta 2016 osoitteesta M:\Projektit\Rakennus\KJAA- Krista Jaatinen\Kivikko
- Auvinen, K.;& Jalas, M. (2016). *Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus*. Haettu 7. huhtikuuta 2016 osoitteesta Finsolar: http://www.finsolar.net/?page_id=1363&lang=fi
- Auvinen, K.;& Liuksiala, L. (7. huhtikuuta 2016). *Aurinkoenergiainvestointien tuet*. Haettu 2016 osoitteesta Finsolar: http://www.finsolar.net/?page_id=3044&lang=fi
- BRE. (2014). *DG 489, Wind loads on roof-mounted photovoltaic and solar thermal systems*. Haettu 27. huhtikuuta 2016 osoitteesta BRE National Solar Centre: <http://www.brebookshop.com/samples/327363.pdf>
- Bushong, S. (2016). *Four points to know about the growing community solar market*. Haettu 8. maaliskuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.solarpowerworldonline.com/2016/02/things-to-know-about-community-solar-market/>
- Clover, I. (2016). *Lightsource begins work on Europe's largest floating PV array in London*. Haettu 19. helmikuuta 2016 osoitteesta PV-magazine.com: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/lightsource-begins-work-on-europes-largest-floating-pv-array-in-london_100023228/#axzz40cUijvsf
- Finlex. (2009). *Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta*. Haettu 23. toukokuuta 2016 osoitteesta Finlex: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090205>
- Finnwind. (2013). *Aurinkoenergiaopas*. Haettu 25. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.finnwind.fi/aurinko/Aurinkoenergiaopas-Finnwind.pdf>
- Finnwind Oy. (2013). *Esimerkkejä ja kokemuksia aurinkosähköasennuksista*. Haettu 26. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.slideshare.net/finnwind/finnwind-kokemuksia-aurinkoshkasennuksista-yritykset-ja-julkiset-kohteet>
- Finnwind Oy. (2015a). *Aurinkopaneelien maa-asennustelineen rakentaminen*. Haettu 2. helmikuuta 2016 osoitteesta <http://www.finnwind.fi/asennus/FS-MP-maa-asennusteline-perustus.pdf>
- Finnwind Oy. (2015b). *Finnwind Fast Sun harjakattojen asennusjärjestelmä*. Haettu 26. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.finnwind.fi/asennus/Finnwind-FS-H-harjakattojen-asennustelineet.pdf>

- Finnwind Oy. (2015c). *Finnwind Fast Sun seinäasennusjärjestelmä*. Haettu 1. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.finnwind.fi/asennus/Finnwind-FS-W-sein%C3%A4asennusj%C3%A4rjestelm%C3%A4.pdf>
- Finnwind Oy. (2016). *Finnwind Fast Sun aurinkopaneelien asennusjärjestelmä tasakatoille*. Haettu 26. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.finnwind.fi/asennus/Finnwind-FS-M-asennusteline.pdf>
- Hakkarainen, T.;Hakkarainen, E.;Ikäheimo, J.;& Tsupari, E. (2015). *The role and opportunities for solar energy in Finland and Europe*. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Haettu 21. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T217.pdf>
- Heidari, N.;Gwamuri, J.;Townsend, T.;& Pearce, J. M. (2015). Impact of Snow and Ground Interference on Photovoltaic Electric System Performance. *IEEE Journal of Photovoltaics, Volume 5, Issue 6*, 1680-1685. Haettu 24. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7219369&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7219369>
- Helen Oy. (2014). *Aurinkovoimala, esisuunnittelun dokumentit*. Haettu 9. maaliskuuta 2016 osoitteesta (saatavilla rajoitetusti).
- Helen Oy. (2014-2016a). *Suvilahden aurinkovoimala, toteutusprojektin dokumentit*. Haettu 8. maaliskuuta 2016 osoitteesta (saatavilla rajoitetusti): <http://heldok/tyotilat/energiaratkaisut/projektit/aurinkosahkoselvitys/Dokumentit/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2ftyotilat%2fenergiaratkaisut%2fprojektit%2faurinkosahkoselvitys%2fDokumentit%2fSuvilahden%20toteutusprojekti%2fProjektidokumentit&FolderCTID>
- Helen Oy. (2014-2016b). *Aurinkosähköselvitys, kokousmuistiot*. Haettu 11. maaliskuu 2016 osoitteesta (saatavilla rajoitetusti): <http://heldok/tyotilat/energiaratkaisut/projektit/aurinkosahkoselvitys/default.aspx?RootFolder=%2ftyotilat%2fenergiaratkaisut%2fprojektit%2faurinkosahkoselvitys%2fDokumentit%2fSuvilahden%20toteutusprojekti%2fProjektiryhm%C3%A4%2fKokousmuistiot&FolderCTID=>
- Helen Oy. (2015-2016). *Kivikon aurinkovoimala, toteutusprojektin dokumentit*. Haettu 3. maaliskuuta 2016 osoitteesta (saatavilla rajoitetusti): <http://heldok/tyotilat/energiaratkaisut/projektit/aurinkosahkoselvitys/Dokumentit/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2ftyotilat%2fenergiaratkaisut%2fprojektit%2faurinkosahkoselvitys%2fDokumentit%2fKivikon%20toteutusprojekti&FolderCTID=&View=%7bDA3C201F-CDA8->

- Helen Oy. (2015a). *Aurinkovoimala, esisuunnittelun dokumentit*. Haettu 31. maaliskuuta 2016 osoitteesta (saatavissa rajoitetusti).
- Helen Oy. (2015b). *Mediapankki*. Haettu 5. huhtikuuta 2016 osoitteesta <http://helen.mediabank.fi/fi/material/search#/keyword:aurinkovoimala>
- Helen Oy. (2016). *Helppo-malli*. Haettu 10. maaliskuuta 2016 osoitteesta (saatavilla rajoitetusti): <http://intranet/Yritystietoa/Hankkeet-ja-projektit/helppo/Sivut/Home.aspx>
- Helen Oy. (2016). *Strategia*. Haettu 8. helmikuuta 2016 osoitteesta <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/tietoa-meista/liiketoiminta/strategia/>
- Hongjun, N.;Wenfan, L.;Xingxing, W.;Haoyang, L.;Yongpei, Z.;& Minqi, Z. (2015). *Research Progress of PV Mounting System for Solar Power Station*. Nantong University. Nantong, Jiangsu, China: Atlantis press. Haettu 4. huhtikuuta 2016 osoitteesta http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=25836262
- IEA. (2012). *Solar energy systems in architecture, integration criteria and guidelines*. International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme. Haettu 26. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March20131.pdf>
- IEA PVPS. (2016). *Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2015*. IEA International Energy Agency. Haettu 5. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/PICS/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final_2_02.pdf
- Juntunen, J. (2015). *Taloyhtiöiden hankintaohjeita*. Haettu 7. huhtikuuta 2016 osoitteesta Finsolar: http://www.finsolar.net/?page_id=2087&lang=fi
- Kattoliitto ry. (2013). *Toimivat katot 2013*. Sastamala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- Keinänen, J. (20. maaliskuu 2015). *Tulevaisuuden rakennuttamisessa valta on verkostoilla - laadun vuoksi*. Haettu 13. huhtikuuta 2016 osoitteesta Rakennuslehti, Blogi: <http://www.rakennuslehti.fi/blogit/tulevaisuuden-rakennuttamisessa-valta-on-verkostoilla-laadun-vuoksi/>
- Kimari, A. (11. toukokuu 2016). Aurinkovoimaloiden sähkötekkinen selvitys. (K. Jaatinen, Haastattelija) Helsinki.

- Kuronen, J.;& Loisa, L. (2015). *Aurinkoenergiatarkastelu, Taustaraportti 6, Liite 1.* FInZEB-hanke. Haettu 4. huhtikuuta 2016 osoitteesta http://finzeb.fi/wp-content/uploads/2015/03/FInZEB-Taustaraportti-_6_Aurinkosahkotarkastelut.pdf
- Laitinen, K. (2012). *Korroosio.* Haettu 25. toukokuuta 2016 osoitteesta Teräsrakenneyhdistys: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf>
- Liukko, A. (Esiintyjä). (16. maaliskuuta 2016). *Preparations for the New Finnish Subsidy Scheme for Renewables.* Energy Week 2016, Vaasa.
- Luhn, J.;Stubben, B.;Faust, A.;& Klinkman, J. (2015). *Overcoming the toughest solar mounting problems.* Haettu 4. huhtikuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.slideshare.net/SolarPowerWorld/overcoming-the-toughest-solar-mounting-problems>
- Lukin, E. (16. toukokuu 2016). *FinSolar-hanke edisti aurinkoenergian liiketoimintaa Suomessa.* Haettu 26. toukokuuta 2016 osoitteesta Tekes, Uutiset 2016: <http://www.tekes.fi/nyt/uutiset-2016/finsolar-hanke-edisti-aurinkoenergian-liiketoimintaa-suomessa/>
- Luotola, J. (29. lokakuu 2015). Katso, kuinka paljon talosi tuottaisi aurinkosähköä - Pk-seudun laskelmat katto katolta. *Tekniikka&talous.* Haettu 25. helmikuuta 2016 osoitteesta Tekniikka&talous: <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/katso-kuinka-paljon-talosi-tuottaisi-aurinkosahkoa-pk-seudun-laskelmat-katto-katolta-6061386>
- Mansikka, O. (6. huhtikuu 2016). Kannattaisiko katolle asentaa aurinkopaneelit? Suomalaisyrittäjä lupaa kertoa sen talon tarkkuudella. *Helsingin Sanomat.* Haettu 8. huhtikuuta 2016 osoitteesta Helsingin Sanomat: <http://www.hs.fi/talous/a1459917674751>
- Meronen, J. (2016). Printattua tavaraa. *HELINS Helsingin insinöörien jäsenlehti*(1), ss. 10-13.
- Motiva. (2014). *Aurinkopaneelien asentaminen.* Haettu 6. huhtikuuta 2016 osoitteesta http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen
- Motiva. (2014a). *Aurinkosähkö, Lainsäädäntö ja muu ohjaus.* Haettu 13. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/lainsaadanto_ja_muu_ohjaus

- Motiva. (2014b). *Aurinkosähkö, Lupa-asiat*. Haettu 13. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/lupa-asiat
- Motiva. (2014c). *Aurinkosähkö, Rakentaminen*. Haettu 13. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/lainsaadanto_ja_muu_ohjaus/rakentaminen
- Murray, J. (2016). *Industry aims to extend life of solar panels with new Repair Agreement*. Haettu 8. tammikuuta 2016 osoitteesta BusinessGreen: <http://www.businessgreen.com/bg/news/2440388/industry-aims-to-extend-life-of-solar-panels-with-new-repair-agreement>
- NIBE. (2011). *Asentajan käsikirja, Solar FP215 P/PL*. Haettu 27. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.nibe.fi/nibedocuments/8910/031971-1.pdf>
- Nissinen, R. (2012). *Aurinkopaneelien kiinnitys eri katto- ja seinämateriaaleihin*. Riihimäki: Hämeen ammattikorkeakoulu. Haettu 26. tammikuuta 2016 osoitteesta Opinnäytetyö: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/49697/nissinen_reko.pdf?sequence=1
- OECD/IEA. (2014). *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*. IEA International Energy Agency. Haettu 19. tammikuuta 2016 osoitteesta https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf
- Paavola, M. (2013). *Verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Haettu 5. huhtikuuta 2016 osoitteesta http://www.tampere.fi/liitteet/v/6HSsw1Wei/Diplomityo_Paavola_painettuversio.pdf
- Pasonen, R.;Mäki, K.;Alanen, R.;& Sipilä, K. (2012). *Arctic solar energy solutions*. Espoo: VTT. Haettu 27. tammikuu 2016 osoitteesta <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T15.pdf>
- Perez, R.;& Perez, M. (2009). *Total recoverable reserves are shown for the finite resources*. IEA/SHC Solar Update. Haettu 18. tammikuuta 2016 osoitteesta <http://www.asrc.albany.edu/people/faculty/perez/Kit/pdf/a-fundamental-look-at%20the-planetary-energy-reserves.pdf>

- Pickerel, K. (16. maaliskuu 2016). *Is your metal roof solar-ready?* Haettu 13. huhtikuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.solarpowerworldonline.com/2016/03/metal-roof-solar-ready/>
- Pickerel, K. (15. maaliskuu 2016a). *Ground-mount pre-assembly aids work speed on solar projects.* Haettu 14. huhtikuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.solarpowerworldonline.com/2016/03/ground-mount-pre-assembly-aids-work-speed-solar-projects/>
- Pickerel, K. (7. huhtikuu 2016c). *What's up with solar ballast?* Haettu 14. huhtikuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.solarpowerworldonline.com/2016/04/whats-solar-ballast/>
- Puuinfo. (2010). EC 5 Sovelluslaskelmat, Hallirakennus. (toinen painos). Haettu 3. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennus/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf>
- Puuinfo. (2011). Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje. Teoksessa *RIL 205-1-2009 liite B* (kolmas painos p.). Haettu 3. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi5lyhennettysuunnitteluohjeweekolmaspainos10913rilinkorjauksin.pdf>
- Rakennuslehti. (2015). *UiBEX-tutkimusohjelma.* Haettu 13. huhtikuuta 2016 osoitteesta <http://www.rakennuslehti.fi/mainos/uibex-tutkimusohjelma/>
- Rakennustieto. (2016). *Tietotuotteet ammattilaisille.* Haettu 13. huhtikuu 2016 osoitteesta <https://www.rakennustieto.fi/index/tuotteet.html>
- Rakentaja.fi. (2015). *Ruuvipaalut - vaivaton perustusmenetelmä kaikkeen rakentamiseen.* Haettu 10. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.rakentaja.fi/artikkelit/9928/ruuvipaalut__vaivaton.htm
- Rasinkoski, A. (2013). *Suvilahden sähköaseman aurinkosähköjärjestelmä, Esiselvitys.* Soleras (saatavilla rajoitetusti). Haettu 8. huhtikuuta 2016 osoitteesta <http://heldok/tyotilat/energiaratkaisut/projektit/aurinkosahkoselvitys/Dokumentit/Suvilahden%20esiselvitys/Esiselvityksess%C3%A4%20ty%C3%B6stetty%20materiaali/HELEN%20Suvilahden%20s%C3%A4hk%C3%B6aseman%20aurinkos%C3%A4hk%C3%B6%20esiselvitys%20Soleras%20>

- Ronkainen, N. (2012). *Suomen maalajien ominaisuuksia*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Haettu 10. toukokuuta 2016 osoitteesta https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf
- RT 82-11006. (2010). Ulkoseinärakenteita. *Rakentamismääräyskokoelma*.
- Ruukki. (2016). *Miten tiilikatto vaihdetaan peltikatoksi?* Haettu 6. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.ruukki.com/fin/katot/tuki-ja-ohjeet/usein-kysytyt-kysymykset/kattoremontista>
- Scharff, C. (29. helmikuuta 2016). *Opticube veut devenir l'Ikea du solaire thermique*. Haettu 4. maaliskuuta 2016 osoitteesta L'Echo, Journal en Ligne: http://journal.lecho.be/ipaper/20160225?itm_campaign=newsstream_paper#detail/9736677
- Seppänen, R.;Kervinen, M.;Parkkila, I.;Karkela, L.;& Meriläinen, P. (2006). *maol taulukot* (2.-3. painos p.). Keuruu: Otava.
- SFS. (2011). *CE-merkintä rakennustuotteisiin 2013 mennessä*. Haettu 20. tammikuuta 2016 osoitteesta Suomen Standardisoimisliitto SFS: <http://www.sfs.fi/files/307/ce-merkinta2013.pdf>
- SFS. (2014). *Eurokoodit*. Haettu 23. toukokuuta 2016 osoitteesta Suomen Standardisoimisliitto SFS ry: <http://www.sfs.fi/aihealueet/eurokoodit>
- SFS. (2016a). *OHSAS 18001 Työterveys- ja työturvallisuusjohtaminen*. Haettu 23. toukokuuta 2016 osoitteesta http://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/tuotteet_valokeilassa/ohsas_18001_tyoterveys-ja_tyoturvallisuusjohtaminen
- SFS. (2016b). *SFS, EN, ISO?* Haettu toukokuuta 2016 osoitteesta Suomen Standardisoimisliitto SFS ry: http://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi/sfs_en_iso
- Similä et al. (2010). *Energy Visions 2050* (toinen painos p.). Porvoo: VTT.
- Sinovoltaics. (2015). *Floating Solar (PV) Systems: why they are taking off*. Haettu 19. helmikuuta 2016 osoitteesta <http://sinovoltaics.com/technology/floating-solar-pv-systems-why-they-are-taking-off/>
- Slunga, E. (2016). *Pohjarakenteiden suunnittelu*. Suunnitteluohje, Teknillinen korkeakoulu. Haettu 10. toukokuuta 2016 osoitteesta <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK00s669.pdf>

- Solar Power World. (2015). *Top Tips for Mounting on Low-Slope Roofing*. Haettu 6. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.slideshare.net/SolarPowerWorld/top-tips-for-mounting-on-lowslope-roofing>
- Solar Power World. (2016). *2015 Top Solar Mounting Products*. Haettu 17. helmikuuta 2016 osoitteesta <http://www.solarpowerworldonline.com/2015-top-solar-products/2015-top-solarnting-products/>
- Suntekno. (2016). *Aurinkopaneelit*. Haettu 25. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf>
- Teittinen, T. (14. maaliskuu 2016). Tiedonhallintaratkaisuiden ja tietomallien asiantuntija, luennoitsija. *Keskustelu rakennusalan tulevaisuudesta IT-alan avulla Tampereen teknillisellä yliopistolla*.
- Teriö, O. (2002). *Betonirakentamisen esivalmistusasteen nosto*. Tampere: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Haettu 26. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22327/Betonirakentamisen+esivalmistusasteen+nostaminen.pdf>
- Topf, A. (2015). *The World's 10 Biggest Solar Farms*. (Oilprice.com) Haettu 16. helmikuuta 2016 osoitteesta <http://oilprice.com/Alternative-Energy/Solar-Energy/The-Worlds-10-Biggest-Solar-Farms.html>
- Vaughan, A. (2016). *Japan begins work on 'world's largest' floating solar farm*. Haettu 19. helmikuuta 2016 osoitteesta [theguardian.com: http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/27/japan-begins-work-on-worlds-largest-floating-solar-farm](http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/27/japan-begins-work-on-worlds-largest-floating-solar-farm)
- Viita, I.;& Keränen, V. (4. toukokuu 2016). Palaveri koskien pv-järjestelmien rakennustekniikkaa. *Palaverimuistio*. Helsinki.
- Wills, R.;Milke, J.;Royle, S.;& Steranka, K. (2014). *Commercial Roof-Mounted Photovoltaic System Installation Best Practices Review and All Hazard Assessment*. University of Maryland. Quincy, Massachusetts, U.S.A.: Fire Protection Research Foundation. Haettu 21. huhtikuuta 2016 osoitteesta <http://www.nfpa.org/~media/files/research/research-foundation/research-foundation-reports/building-and-life-safety/rfcommercialroofmountedphotovoltaicsysteminstallation.pdf?la=en>
- Virtanen, S. (2015). *Keväällä käynnistynyt Suvilahden aurinkovoimala täytti odotukset*. (Tekniikka&Talous) Haettu 8. maaliskuuta 2016 osoitteesta <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/kevaalla-kaynnistynyt-suvilahden-aurinkovoimala-taytti-odotukset-3483139>

Ympäristöhallinto. (2016a). *Kattojen peruslumikuorma*. Haettu 3. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/kattolumikuorma.html>

Ympäristöhallinto. (2016b). *Katon lumikuorman arviointi*. Haettu 3. toukokuuta 2016 osoitteesta <http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/95/lumikuormanarviointi.html>

Zipp, K. (2013). *6 Ways To Avoid Damaging Roofs When Installing Solar Panels*. Haettu 1. helmikuuta 2016 osoitteesta Solar Power World: <http://www.solarpowerworldonline.com/2013/03/6-ways-to-avoid-damaging-roofs/>

LIITE 1: RAKENNUTTAJAN MUISTILISTA

AURINKOVOIMALOIDEN RAKENNUTTAJAN MUISTILISTA

| Suunnitteluvaihe | Rakennettavuus selvityksen sisältö (vähintään seuraavat) |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Rakennusalusta kestää sille tulevat lisäkuormat - Rakennusalustan ja pv-järjestelmän käyttöiän yhteensopivuus - Katteen kunto - Rakennusalustalle tehdyt huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet - Vähintään 100 mm väli paneelin ja katto-/seinäpinnan välissä - Telineprofiilien kiinnityksien määrä (= asennuksen nopeus), suosi pitkittäislinjoja - Telineprofiilien leveys, jotta kuormat jakautuvat tasaisemmin isommalle alalle ja kestävyys nousee - Kiinnityksen joustavuus/kestävyys <ul style="list-style-type: none"> o Tuuli liikuttaa, lumi painaa, lämpöliikkeiden oltava yhtä suuret - Kaikkien metalliosien materiaalin oltava sama galvaanisen korroosion välttämiseksi - Pyydä asennuksen tekijöiltä selvitys/suunnitelma läpivientien tiivistyksistä <ul style="list-style-type: none"> o Lisäkermin tarve +laakeri/tiiviste - Veden juoksusuunnat eivät saa estyä <ul style="list-style-type: none"> o Juoksusuunnat voi merkata jo lähtötietoihin - Käytetty villa ja sen puristuslujuus - Höyrynsulku ei saisi puhjeta - Kattotuolien ja -ruoteiden jako - Maa-asennuksissa selvitä alueella kulkevat viemäri- ja sähkölinjat sekä puhelin- ja tietoliikennekaapelit - Pv-järjestelmän sekä rakennusalustan huoltosuunnitelmat <ul style="list-style-type: none"> o Rakennusalustan huollot mahdollista toteuttaa pv-järjestelmästä huolimatta - Huoltokirjaan ohjeet lumipeitteen maksimipaksuudesta - Lumipeite ei saa ylettyä alipainetuulettimien tasolle, jottei niiden toiminta esty - Palokunnan vaatimat pelastustiet <ul style="list-style-type: none"> o 1 m katon reunoilla ja pääsy savunpoistoluukuille - Tarjouskyselyyn vaatimus kohteeseen tutustumisesta ennen tarjouksen jättämistä - (Tarjouskyselyyn valokuvaliite kohteesta) - Lähtötietojen tarkentaminen sopimusneuvotteluissa - Suunnitelmien tarkastamiselle varattava 2-3 viikkoa - Suunnitelmien yhteensovitus suunnittelupalaverissa - Routaraja Etelä-Suomessa 180 cm, kaivannot vähintään 0,7 m syvyyteen ja perustukset 1 metrin syvyyteen | <ul style="list-style-type: none"> - Rakennusalustan lisäkuormien kantavuus - Katteen kunto ja vedeneristys ja (lisäkermin tarve) - Käyttöiän kohtaaminen/tarvittava saneeraus - Villan puristuslujuuden riittävyys - Lumipeitteen maksimaalinen paksuus - Kohteen kaavamääräykset - (Työturvallisuuden toteutus) - Muuta <p style="text-align: center;">Toteuttamisvaihe</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rakennusalusta kestää asennuksen aikaisen kulutuksen <ul style="list-style-type: none"> o Kattoa ei saa käyttää suojaamatta varasto- ja työalueena o Mahdollisimman vähän liikennettä katolla - Veden juoksusuunnat eivät saa estyä (veden valumatka max 15 m) - Kestävyys varmistamisen toteutuminen <ul style="list-style-type: none"> o Lisäkermi + tiiviste/laakeri - Telineiden kiinnikkeet eivät saa tehdä kermiin kuppia, johon vesi ja roskat voivat kertyä - Kiinnikkeitä ei saa asentaa jiiriin eikä katteen saumakohtiin - Läpivientien väli tulisi olla vähintään 500 mm - Kattokaivot eivät saa tukkiutua asennuksen aikaisesta roskasta - Mahdollisten kaivantojen kohtien merkkaukset ja täyttömaan paksuuden varmistus (0,7 m), ettei nosturi vahingoita maahan kaivettuja kaapeleita - Kaivojen ja katteen pinnan/rakennusalustan oltava puhtaat työn valmistuttua - Lumen poisto tarvittaessa pehmeällä harjalla - Katolle pääsy turvallisesti - Työturvallisuus - Katon huoltotoimenpiteiden mahdollistamisen varmistaminen - Ilmoitus ja selvitys pv-järjestelmästä palokunnalle - Päätoteuttajan velvollisuuksien toteutuminen |

LIITE 2: ETELÄ-SUOMEN KUNTIEN LUPAKÄYTÄNNÖT KOSKIEN AURINKOVOIMALOIDEN RAKENTAMISTA, SÄHKÖPOSTIKYSELYN KYSYMYKSET JA VASTAUKSIEN KOONTITÄULUKKO

Hei,

Tiedustelin seuraavia asioita aurinkovoimaloiden (aurinkopaneelit) rakentamiseen liittyen:

- 1) Riittääkö (kunta) toimenpideilmoitus katonsuuntaisille paneeliasennuksille? Onko tähän suurusluokka/paneelimäärä rajoitusta? Päteekö siis sama sääntö myös omakotitaloja suuremmille julkisille rakennuksille?
- 2) Mikäli toimenpideilmoitus katon suuntaisille asennuksille riittää, tasakattojen osalta tulkitaisin asian niin, että vaakatasoon katon suuntaisesti asetetut paneelit menevät toimenpideilmoituksella, mutta tasakatonle esim 20 asteen kulmaan asetetut paneelit vaativat toimenpideluvan, onko näin?
- 3) Saako omalle tontille maahan asentaa aurinkopaneeleita toimenpideilmoituksella? Onko tähän suurusluokka rajaa? Päteekö sama toimenpideilmoitus-käytäntö, jos kyseessä on vuokratontti, ja aurinkovoimalan rakentamiseen on tontin omistajan lupa?
- 4) Onko seinäasennuksiin aina saatava toimenpidelupa? Mikäli tämä on tapauskohtaista, kuinka pieni on aurinkovoimalan oltava, jotta toimenpideilmoitus riittää?
- 5) Onko selkeää rajaa (esim aurinkovoimalan koko) tai selkeitä linjauksia, milloin on suoritettava naapurien kuuleminen aurinkovoimalan rakentamista suunniteltaessa?
- 6) Pätevätkö nämä kaikki yllä olevat säännöt, oli aurinkovoimalan toteuttajana yksityinen henkilö, yritys tai yhteisö?
- 7) Onko olemassa tilannetta, jossa aurinkovoimala vaatisi rakennusluvan?

Kirjoitan asiaan liittyen diplomityötä ja kokoaisin lupakäytännöistä tiedot yhteen Etelä-Suomenläänin kunnittain. Kiitokset jo etukäteen vastauksistanne ja ajastanne.

| KOONTI ETELÄ-SUOMENLÄÄNIN KUNTIEN LUPAKÄYTÄNNÖISTÄ KOSKIEN AURINKOVOIMALOIDEN RAKENTAMISTA | | | | | | |
|--|---|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Laadittu 28.01.2016 | Kattoasennus | | Seinäasennus | | Maa-asennus | |
| | Asemakaava- alueella | Asemakaavan ulkopuolella | Asemakaava- alueella | Asemakaavan ulkopuolella | Asemakaava- alueella | Asemakaavan ulkopuolella |
| Loviisa | | | | | | |
| Toimenpidelupa | x | * | * | * | | |
| Toimenpideilmoitus (ei käytössä) | | | | | | |
| Rakennuslupa | Vaaditaan kun voimala on suuri ja/tai merkityksellinen maisemakuvassa | | | | | |
| * | Toimenpidelupaa ei tarvita, mikäli paneelit eivät näyt katu- ym yleiselle alueelle | | | | | |
| | | | | | | |
| Järvenpää | | | | | | |
| Toimenpidelupa (va- pautettu) | | | | | | |
| Toimenpideilmoitus | x | x | x | x | x | |
| Rakennuslupa | Kaupallinen ja/tai mittava tuotanto, suojellut kohteet vähintään toimenpidelupa | | | | | |
| Huomiot | Rakennusjärjestys uusiutuu 2016 | | | | | |
| | | | | | | |
| Siuntio | | | | | | |
| Toimenpidelupa | * | * | * | * | * | * |
| Toimenpideilmoitus | * | * | * | * | * | * |
| Rakennuslupa | Käytännössä ei milloinkaan | | | | | |
| * | Tapauskohtaista kaavasta ja kohteen sijainnista riippuen | | | | | |
| Tuusula | | | | | | |
| Toimenpidelupa | > 3 m ² | > 3 m ² | > 3 m ² | > 3 m ² | * | * |
| Toimenpideilmoitus | ≤ 3 m ² | | ≤ 3 m ² | | * | * |
| Rakennuslupa | Iso alue, esim satoja paneeleja. Tällöin ei ole kyseessä enää rakennelma | | | | | |
| * | Tapauskohtaista | | | | | |
| | | | | | | |
| Nurmijärvi | | | | | | |
| Toimenpidelupa | | | | | | |
| Toimenpideilmoitus | > 3 m ² | > 3 m ² | > 3 m ² | > 3 m ² | * | * |
| Rakennuslupa | Ei tietoa | | | | | |
| * | Tapauskohtaista | | | | | |
| | Rakennusjärjestyksessä ei mainintaa paneeleista erikseen, joten usein käsittelee tapauskohtaista. | | | | | |
| | | | | | | |
| Hanko | | | | | | |
| Toimenpidelupa | * | * | | | | |
| Toimenpideilmoitus | x | x | ** | ** | ** | ** |
| Rakennuslupa | Isommat voimalat | | | | | |
| * | Kun paneelit eivät ole lappeen suuntaiset | | | | | |
| ** | Yksittäiset paneelit ilmoituksella kunhan naapurin on kuultu. Isommat tapauskohtaisesti | | | | | |
| | Naapurin kuuleminen periaatteessa aina oltava | | | | | |
| | | | | | | |
| Kerava | | | | | | |
| Toimenpidelupa | * ≥ 7 m ² | * ≥ 7 m ² | | | x | x |
| Toimenpideilmoitus (ei käytössä) | | | | | | |
| Rakennuslupa | Mikäli paneelialue vaatii huoltorakennuksen | | | | | |
| * | Lappeen suuntaisesti ≤ 7 m ² ei tarvitse lupaa. ≥ 7 m ² lupaharkinnan kautta | | | | | |
| | puolen hehtaarin aidattu rakennukseton Keravan Energia Oy:n aurinkopaneelikenttä luvitettiin toi- menpideluvalla | | | | | |
| | | | | | | |
| Porvoo | | | | | | |
| Toimenpidelupa | X* | | X* | | x | |
| Toimenpideilmoitus | | x | | x | | x |
| Rakennuslupa | Suuret voimalat ja rakenteisiin, liikennejärjestelyihin yms. vaikuttavat | | | | | |
| * | Kun julkisivu muuttuu merkittävästi | | | | | |
| | Kun voimala näkyy naapureille, on heitä kuultava | | | | | |
| | Vanhassa Porvoossa ja suojeltuihin rakennuksiin paneelit pääsääntöisesti kiellettyjä | | | | | |

| Kirkkonummi | | | | | | |
|----------------------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Toimenpidelupa | * | * | * | * | ** | ** |
| Toimenpideilmoitus (ei käytössä) | | | | | | |
| Rakennuslupa | Saattaa ilmetä | | | | | |
| * | Tapauskohtaisesti ulkonäöllisen muutoksen suuruuden mukaisesti. Vähäiset julkisivumuutokset vapautettu luvanvaraisuudesta. | | | | | |
| ** | Kyseessä rakennelma, joten lupaharkinnan kautta | | | | | |
| Vihti | | | | | | |
| Toimenpidelupa | | | | | | |
| Toimenpideilmoitus | X * | | X * | | X * | |
| Rakennuslupa | Jos erilliset paneelit ovat itsessään niin suuri ja vaikutuksiltaan merkittävä kokonaisuus, että sitä on pidettävä rakennuksena. Jos paneelien asentaminen edellyttää rakennukseen muita merkittäviä muutoksia, esim. kantavien rakenteiden muuttamista | | | | | |
| * | Merkittävä hanke (suuri koko, selvä vaikutus naapureihin, suojeltu rakennus) vaatii toimenpideluvan | | | | | |
| Naapurien kuuleminen | Sisällytetään toimenpidelupa hakemukseen jos lupa vaaditaan | | | | | |
| Sipoo | | | | | | |
| Toimenpidelupa | | | | | | |
| Toimenpideilmoitus | ≥ 5 m ² | ≥ 5 m ² | ≥ 5 m ² | ≥ 5 m ² | ≥ 5 m ² | ≥ 5 m ² |
| Rakennuslupa | Tiedot suuntaa antavia, sillä rakennusjärjestyksen uudistus on juuri työn alla. Luvat tarkentuvat piakkoin. | | | | | |
| Raasepori | | | | | | |
| Toimenpidelupa | X | | X | | X | |
| Toimenpideilmoitus | | X | | X | | X |
| Rakennuslupa | Kun kyseessä mittavat rakenteet eli rakentaminen, ei vain toimenpide | | | | | |
| | Kaikkia rajanaapureita kuultava aina toimenpideluvan yhteydessä | | | | | |
| Huomiot | Rakennusjärjestys uusiutuu 2016 | | | | | |
| Karkkila | | | | | | |
| Toimenpidelupa | ≥ 50 m ² | | | | | |
| Toimenpideilmoitus | 5-50 m ² * | | | | | |
| Rakennuslupa | Suojeillut rakennukset | | | | | |
| * | Toimenpidelupa edellytetään jos kyseessä merkittävät rakenteet | | | | | |
| Naapureiden kuuleminen | Kun olennaista merkitystä naapureille tai vaatii rakennusluvan | | | | | |

LIITE 3: BUDJETTITARJOUSKYSELYN SAATEKIRJE JA VASTAUSTAULUKKOPOHJA

Hei,

Helenillä tehdään parhaillaan diplomityötä aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostamiseksi. Osana tutkimusta tehdään budjettitarjouskysely, jonka tarkoituksena on helpottaa uusien kohteiden soveltuvuuden arviointia sekä projektin kokonaiskustannusten hallintaa. Olemme valinneet kyselyyn mukaan 6 suomalaista laitetoimittajaa, joiden kanssa olemme kiinnostuneet yhteistyöstä.

Kyselyn vastaukset kirjataan liitteenä olevaan taulukkoon.

Budjettitarjouskyselyyn tavoitteena on saada tietoa eri asennustapojen aikatauluista ja kustannuksista. Asennustavoiksi on valittu seinäasennus (ei integroitu), maa-asennus sekä katoille tehtävistä asennuksista koolaukseen kiinnitettävä asennus, kelluva- ja pollari-asennus. Toimittaja saa itse päättää telineissä käyttämänsä materiaalin sekä telinetyypin, mutta ratkaisun on tultava esille kyselyn vastauksissa. Toteutettava kohde on 500 kWp aurinkovoimala, joten myös paneelien määrä tulee ilmoittaa. Asennusajan ajatellaan alkavan, kun telineiden osat saapuvat laitetoimittajalle ja päättyvän, kun paneelit ovat paikoillaan. Sähkötoita (sähköasennukset, liittännät, kaapeloinnit, kaapelihyllyt yms.) ei tarvitse laskea mukaan asennukseen.

Projekti ajatellaan toteutettavaksi Helenille tutulla avaimet käteen -periaatteella, jolloin sekä suunnittelu että toteutus kuuluu päätoteuttajalle. Laitetoimittaja on rakennusurakan päätoteuttaja. Kokonaisvaltaisesti kuvitellussa esimerkkiprojektissa käytetään hyviä suunnittelu- ja rakentamiskäytäntöjä sekä standardien mukaisia, tyyppihyväksytyjä tuotteita.

Asennustapakohtaisesti on taulukossa pyydetty myös esimerkkikohdetta ja toteutunutta asennusaikaa. Mikäli teillä on referenssi kyseisestä asennustavasta, merkatkaa tiedot tähän kohtaan ja ilmoittakaa myös toteutusvuosi. Taulukossa olevalla esivalmistusasteella tarkoitetaan asennuksen valmistelevia töitä, joita ei tehdä työmaalla. Vastausta toivotaan prosentteina. Mikäli telineosien kaikki kiinnitys tehdään työmaalla, on esivalmistusaste 0 %.

Tarkennuksia asennustavoista ja -alustoista:

- Katto
 - tasaiseksi lukeutuva neliskanttinen kermikatto, asennukseen käytössä oleva ala 160m x 50m. Katteena kermi ja kantava rakenteena teräsbetoni-laatta. Maksimipaino 25 kg/m². Paneelien kallistuskulma 10-25 astetta.
 - Kattorakenteen koolauksen voi ajatella olevan itse määrittämän paneelirivijaon mukainen

- Pollarit asennettu valmiiksi 6m x 6m jaolla.
- Seinäasennus HUOM! 100 kWp
 - Asennuskulma 90-60 astetta. Kiinnitys betoniseinään.
- Maa-asennus pollareilla
 - Asennuskulma noin 30 astetta.
 - Alue 160 m x 50 m
 - Kaivannot ja pollarien asennus. Ei muita maanrakennustöitä.

Kyselyn ajatuksena on asentamisen tarkastelu kaikessa yksinkertaisuudessaan. Rakennusluvut ja työmaapalvelut ajatellaan tilaajan vastuulle. Asennuskustannuksiin tulee kuitenkin laskea kattoratkaisuissa putoamissuojaukseen käytettävät suojakaiteet ja seinäasennuksissa rakennustelineet tai muu asennusalusta. Asennusalusta tulee ilmoittaa kyselyn vastauksissa. Myös nostot tulee huomioida kustannuksissa.

Kyselyn tavoitteena on saada mahdollisimman vertailukelpoiset tulokset, joten kaikki kyselyyn liittyvät kommentit ja kysymykset ovat tervetulleita. Vastauksien liitteeksi on oikein suotavaa liittää lyhyt raportti, joka sisältää selvennyksiä kuten telinetyypin (mahdollisesti myös kuva), telineiden materiaalin, esivalmistusasteen selvennyksen, kuvauksen projektityön sisällöstä yms.

Kyselyn tuloksina saatavat asennusajat tullaan ilmoittamaan yhteenvedossa W/miestyöpäivä sekä paneelia/miestyöpäivä ja asennushinnat €/W sekä €/paneeli. Paneelien ja telineiden yksikköhintoja ei julkaista diplomityössä eikä tietoja anneta muille kyselyyn vastanneille.

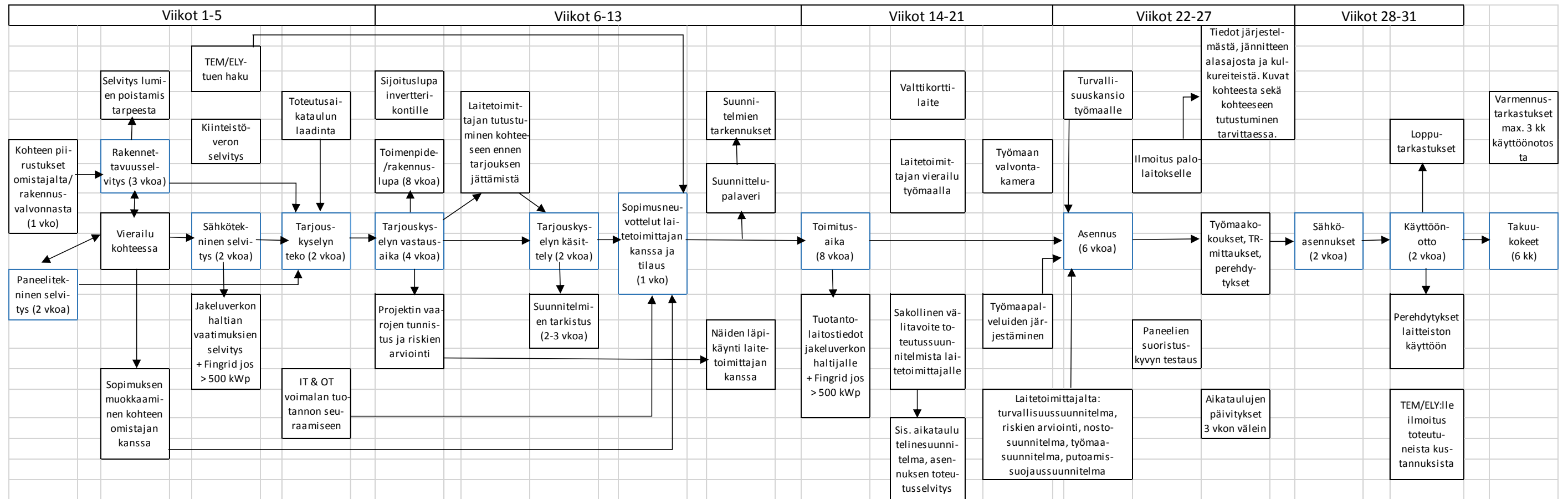
Diplomityössä tuodaan esille kyselyyn osallistuneet yritykset, mutta tuloksia ei tulla esittämään yrityskohtaisesti. Työ julkaistaan kesällä 2016, jolloin se tullaan toimittamaan sähköisesti myös kyselyyn osallistuneille yrityksille.

Vastaa erittäin mielelläni kaikkiin kysymyksiin ja kommentteihin.

| HELEN AURINKOVOIMALA 500 kWp (Etelä-Suomi) | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------|---------------------------------------|--|----------------------|--------------------------------|
| Asennustapojen budjettitarjouskysely, deadline 22.4.2016 | | | | | | |
| Yritys / taulukon täyttänyt hlö | | | | | | |
| Päivämäärä | | | | | | |
| KELLUVA-ASENNUS | | | | | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Tyyppi | Lukumäärä / yksikkö | Yksikköhinta | Paino [kg/m2] | Huomiot |
| Aurinkopaneeli | | | | | | |
| Asennustelineet ja kiinnikkeet | | | | | | Esim telineiden materiaali? |
| Projektityö (suunnittelu, kokoukset, projektinhallinta, dokumentointi) | | - | | | - | |
| Lisätyöt | | - | | | - | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Yksikköhinta | Arvioitu asennusaika [W/miestyöpäivä] | Esimerkkikohde ja toteutunut asennusaika | Esivalmistusaste [%] | Kommentit esivalmistusasteesta |
| Asennustyö (sis. paneelien ja telineiden asennus, ei sähköitä) | | | | | | |
| KOOLAUKSEEN KIINNITETTÄVÄ ASENNUS | | | | | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Tyyppi | Lukumäärä / yksikkö | Yksikköhinta | Paino [kg/m2] | Huomiot |
| Aurinkopaneeli | | | | | | |
| Asennustelineet ja kiinnikkeet | | | | | | Telineiden materiaali? |
| Projektityö (suunnittelu, kokoukset, projektinhallinta, dokumentointi) | | - | | | - | |
| Lisätyöt | | - | | | - | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Yksikköhinta | Arvioitu asennusaika [W/miestyöpäivä] | Esimerkkikohde ja toteutunut asennusaika | Esivalmistusaste [%] | Kommentit esivalmistusasteesta |
| Asennustyö (sis. paneelien ja telineiden asennus, ei sähköitä) | | | | | | |
| POLLARIASENNUS | | | | | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Tyyppi | Lukumäärä / yksikkö | Yksikköhinta | Paino [kg/m2] | Huomiot |
| Aurinkopaneeli | | | | | | |
| Asennustelineet ja kiinnikkeet | | | | | | Telineiden materiaali? |
| Projektityö (suunnittelu, kokoukset, projektinhallinta, dokumentointi) | | - | | | - | |
| Lisätyöt | | - | | | - | |

| | | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------|---------------------------------------|--|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Yksikköhinta | Arvioitu asennusaika [W/miestyöpäivä] | Esimerkkikohde ja toteutunut asennusaika | Esivalmistusaste [%] | Kommentit esivalmistusasteesta | |
| Asennustyö (sis. paneelien ja telien asennus, ei sähköitä) | | | | | | | |
| SEINÄASENNUS 100kWp | | | | | | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Tyyppi | Lukumäärä / yksikkö | Yksikköhinta | Paino [kg/m2] | Huomiot | |
| Aurinkopaneeli | | | | | | | |
| Asennustelineet ja kiinnikkeet | | | | | | Telineiden materiaali? | |
| Projektityö (suunnittelu, kokoukset, projektinhallinta, dokumentointi) | | - | | | - | | |
| Lisätyöt | | - | | | - | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Yksikköhinta | Arvioitu asennusaika [W/miestyöpäivä] | Esimerkkikohde ja toteutunut asennusaika | Esivalmistusaste [%] | Kommentit esivalmistusasteesta | Työskentelyalusta |
| Asennustyö (sis. paneelien ja telien asennus, ei sähköitä) | | | | | | | |
| MAA-ASENNUS (kaivanto+pollarit) | | | | | | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Tyyppi | Lukumäärä / yksikkö | Yksikköhinta | Paino [kg/m2] | Huomiot | |
| Aurinkopaneeli | | | | | | | |
| Asennustelineet ja kiinnikkeet | | | | | | Telineiden materiaali? | |
| Projektityö (suunnittelu, kokoukset, projektinhallinta, dokumentointi) | | - | | | - | | |
| Lisätyöt | | - | | | - | | |
| Komponentti | Valmistaja / toimittaja | Yksikköhinta | Arvioitu asennusaika [W/miestyöpäivä] | Esimerkkikohde ja toteutunut asennusaika | Esivalmistusaste [%] | Kommentit esivalmistusasteesta | |
| Asennustyö (sis. paneelien ja telien asennus, ei sähköitä) | | | | | | | |

LIITE 4: AURINKOVOIMALAPROJEKTIN TEHTÄVÄVERKKO



LIITE 5: HAASTATTELUMUISTIO, AKU KIMARI

Haastattelumuistio

Aika: 11.5.2016 klo 14

Paikka: SaR-talo, Salmisaaren voimalaitos, Helsinki

Haastateltava: Aku Kimari, sähkövoimatekniikan insinööri/projekti-insinööri, Helen Oy

Haastattelija: Krista Jaatinen, tekninen harjoittelija, Helen Oy

Aku Kimari on työskennellyt molemmissa Helenin toteutuneissa suuren kokoluokan aurinkovoimalaprojekteissa. Suvilahdessa Kimari oli mukana käyttöönotossa, loppudokumentoinnissa ja varmennustarkastuksessa ja Kivikossa (Suomen suurin aurinkovoimala) hän toimi projektipäällikkönä. Lisäksi Kimari on tehnyt sähkötekniset selvitykset kaikista Helenin tulevista aurinkovoimalahankkeista.

1. Mitä sähköteknisessä selvityksessä tehdään pääpiirteisesti?
 - Selvitetään järjestelmän osien sijoituspaikat ja kaapelointireitit.
 - Päätetään järjestelmätyyppi eli hajautettu vai keskitetty invertterijärjestelmä.
 - Selvitetään sähköliityntä ja sen mahdollisesti aiheuttamat tehorojoitukset.

2. Mitkä ovat keskitetyn ja hajautetun järjestelmän merkittävimmät hyödyt ja haitat?
 - Hajautettu vaatii enemmän tilaa ja kaapelointien määrä kasvaa. Hajautettua invertteri-järjestelmää ei suositella yli 500 kW:lle (Kimarin oma mielipide), koska sen suuruisille tehoille on saatavissa myös keskitettyjä inverttereitä. Yhden tai useamman suuremman invertterin hankinta on kannattavampaa tilansäästön puolesta ja asennus on nopeampi ja yksinkertaisempi toteuttaa (puhutaan käytännössä yli 0,5 MW tai sitä suuremmista aurinkovoimaloista).
 - Molemmissa järjestelmävaihtoehdoissa on huomioitava inverttereiden mahdollinen ilmanvaihto ja tuuletustila, Megawatt stationissa (MWS) tämä on jo huomioitu integroidussa kokonaisuudessa.
 - Hajautetun toimitusaika on lyhyempi, koska pienien invertterien saatavuus on parempi eikä keskijännitelaitteiden pitkiä toimitusaikoja (3 kk) tarvitse odottaa. Lisäksi pienjännitejärjestelmien eli pääosin hajautettujen invertteri-järjestelmien urakoitsijoiden määrä on suurempi, koska ei tarvitse olla suurjännitetöiden edellyttämää S1-pätevyyttä järjestelmän asentavalla yrityksellä.

3. Mitä sähköliitynnällä tarkoitetaan lyhykäisyydessään?
 - Selvitetään kumpi on kyseessä pienjännite (400 V tai 690 V) vai keskijännite (10–20 kV). Seuraavaksi selvitetään liityntäpaikka eli pienjännitetapauksessa vapaan 3-vaihesulakelähdön olemassa olo ja keskijännitetapauksessa keskijännitekatkaisijan. Huomioitavaa on, että keskijänniteliittymä mahdollistaa suuremmat tehot aurinkovoimalalta.

4. Muuta huomioitavaa?

Sähkötekni­sen selvityksen jälkeen tulee myöhemmin mittarointi eli sähkö­n tuotannon ja kulutuksen kaksisuuntaisen mittauksen järjestäminen. Mittaroinnin toteutuksen ohjeis­taa paikallinen jakeluverkonhaltija. Tullin vaatimus mittaroinnista on, että sen on oltava riittävän luotettava, jonka vuoksi Helenin aurinkovoimaloissa on käytetty HSV:n etä­luettavia sähkömittareita.

LIITE 6: PALAVERIMUISTIO, ILPO VIITA & VILLE KERÄNEN

Palaverimuistio

Aika: 4.5.2016 klo 12-13:30

Paikka: SaR-talo, Salmisaaren voimalaitos, Helsinki

Osallistujat:

Ilpo Viita, rakennesuunnittelija/johtaja, Sweco Oy

Ville Keränen, rakennesuunnittelija/rakennuttamispäällikkö, Helen Oy

Krista Jaatinen, tekninen harjoittelija, Helen Oy

Käsiteltävät asiat liittyen aurinkosähköjärjestelmien rakentamiseen olemassa oleville katoille:

Kattorakenteiden mitoitus

- Ovatko osavarmuusluvut mitoittavilla kuormilla muuttuneet ja voidaanko muutosta hyödyntää kantavuuden tarkastelussa?
 - Pysyvillä kuormilla 1,15 (1,35)
 - Muuttuvilla 1,5
 - Hyötykuormissa muutosta, toimistoille 2,5, varastoille 7,5

Päätös: osavarmuusluvut ovat muuttuneet, esimerkiksi muuttuvilla kuormilla luku on ollut 1,6. Muutos on kuitenkin hyvin pieni, eikä sitä voida hyödyntää kantavuuden tarkistuksissa, koska kokonaisvarmuus pysyy kuitenkin samana, sillä niin sanottu ylimääräinen osuus on mennyt materiaalin varmuuteen.

Lähtökohtaisesti kantavuuden tarkistuksessa voidaan laskelmat tehdä rakennuksen suunnitteluun käytettyjen normien mukaan. Nykyisien normien käyttö vanhojen rakenteiden kantavuuden tarkistuksessa johtaa vain hankaluuksiin.

- Peruslumikuormat kasvaneet
 - 1955-1969 100 kg/m², 1969-1998 180 kg/m² ja nyt 200 kg/m²

Päätös: Peruslumikuorman arvo on tuplaantunut verrattaessa ennen vuotta 1969 mitoitettuihin rakennuksiin. Siispä ennen vuotta 1969 mitoitettujen rakennusten kohdalla voidaan suoraan todeta, että aurinkosähköjärjestelmän tuoma kuorma tulee ohjata kantaville pystylinjoille. Kyseessä on tällöin väistämättä pollari-ristikko-rakenne.

- Onko tuulikuorman laskennassa muutoksia, painekertoimet, nopeuspaineen arvot...
 - Voiko tuulikuormaa mitenkään lajitella esim katon korkeuden ja maastoluokan mukaan niin että jonkun rajan yli kun mennään niin joudutaan

laittamaan pollarit... Eli vaikuttaako rakennuksen korkeus valittavaan toteutustapaan.

Päätös: Tuulikuorman merkitys kattoa kuormittavana on vähäinen, joten siihen ei tarvitse suuremmin keskittyä. Tuulikuorma aiheuttaa lähinnä nostetta aurinkosähköjärjestelmälle ja on tällöin oleellisempi kiinnityksen suunnittelussa kuin katon kantavuuden tarkastelussa. Lisäksi mitoitettava maksimaalinen tuuli- ja lumikuorma eivät vaikuta yhtäaikaisesti.

- Entä vaikuttaako kattotyyppi mitenkään aurinkovoimaloiden rakennusalan kantavuuden tarkasteluun? Tai voiko kattotyypin perusteella tehdään mitään päätelmiä kantavuudesta?

Päätös: Ei vaikuta eli ei voi. Suunnittelu ja mitoitus tehdään aina kattorakenteen mukaisesti, joten toista rakenneratkaisua ei voida kantavuudeltaan pitää parempana kuin toista. Kantavuuden tarkastelussa on suunnitellut ja toteutuneet kuormat aina tarkistettava.

Bitumikermikatot

- Miten kermin kestävyyttä voisi verrata järjestelmän aiheuttamaan painoon?
 - Kuormitus 300 N/m²
 - TL2 pitk 600 poik 400 N/50mm
 - Eli voiko yksinkertaistaa monta kermiä tulisi järjestelmän alla olla?

Päätös: Aurinkosähköjärjestelmän kiinnityskohtien alle tulisi aina laittaa lisäkermi vahvikkeeksi. Mielellään tuoteluokasta TL1. Lisäksi lisäkermin ja järjestelmän kiinnikeosan väliin tulisi laittaa laakeri suojaamaan kiinnityskohtaa.

Eristysvillat

- Painumisen merkitys
 - Lämmöneristelevyjen pintakerrosten puristuslujuudet 50 ja 60 kPa (kattoliitto s. 24) eli 60 kN/m², voiko verrata yks yhteen järjestelmän nelökuorman kanssa.

Päätös: Villojen puristuslujuudet ovat suhteessa niin suuret verrattuna järjestelmän omapainoon (noin 30 kg/m²), että villojen painumisesta ja niissä olevien tuuletusrakojen painumisesta ei tarvitse olla huolissaan. Mikäli muutama tuuletusrako painuu hieman, ei kattorakenne siitä vielä vahingoitu. Aurinkosähköjärjestelmän telineillä jaetaan kuorma tasaisesti katolle eikä vain yksittäisiin kohtiin.

Onko mahdollista, että höyrynsulkujen puhkomisesta tulee ongelmia tulevaisuudessa? Jos painumat rikkovat mikäli alustassa hammastuksia jne. tai lämpöliikkeet rakenteen sisällä rikkovat.

Päätös: tämä on mahdollista, joten kriittisistä kohdista kuten saumojen paikoista tulee olla tietoisia ja niitä tulee välttää järjestelmän asennuksessa.

Mistä tulisi rakenneteknillisesti olla huolissaan pitkällä tähtäimellä?

Päätös: vedeneristyksestä, jonka vuoksi pollarirakennetta tulisi suosia. Pollarit saadaan ankkuroitua kantavaan rakenteeseen sekä liitettyä höyrynsulkuun ja vedeneristykseen, jolloin kattorakenteen käyttöikä säilyy eikä rakennetta vaurioiteta aurinkosähköjärjestelmän kiinnityksessä.

Tästä syystä johtuen olisi ihannoitavaa tehdä aurinkosähköjärjestelmän asennus katon saaneeraus yhteydessä, jotta sekä järjestelmän että kattorakenteen käyttöiät saadaan vastaamaan toisiaan ja liitännät saadaan toteutettua rakennusteknisesti oikea oppisesti.

Vaihtoehdot kantavuuden tarkasteluun?

Päätös:

- Selvitetään suunnitelmat (vesikaton rakennekuvasta hyötykuormat ja rakenteen omapainot, elementtien mittakuvista tarkennuksia) ja paljon on oikeasti käytössä mitoitettua kapasiteetista
- Selvitetään paljon IV-ripustuksille on varattu (yleensä noin 50 kg/m²) ja missä ripustuksia menee eli paljonko on käytössä. Hyödynnetään IV-ripustuksille suunniteltua, mutta käyttämätöntä, kapasiteettia ja tarpeen mukaan jätetään paneelirivi asentamatta kohtaan, jossa koko kapasiteetti on käytössä.
- Harkinnan perusteella voidaan rakenteen mitoituskuorman ylitys muutamalla prosentilla hyväksyä.
- Muistetaan myös, että mitoitettaessa rakenteita, välitulokset on aina pyöristetty ylöspäin. Siispä jo tarkkoja arvoja laskettaessa voidaan löytää kantavuudesta tarvittava suuruusluokka, joka kattaa aurinkosähköjärjestelmän tuoman lisäkuorman.