



Karelia-ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka (AMK)

Aurinkovoimalan suunnittelu ja taloudellinen optimointi osana sähkömarkkinaa

- Tapaus selvitys Pohjois-Karjalan haja-asutusalueella

Jiri Karjalainen

Opinnäytetyö, syyskuu 2022

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Syyskuu 2022
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Jiri Karjalainen

Nimeke
Aurinkovoimalan suunnittelu ja taloudellinen optimointi osana sähkömarkkinaa – Tapausselvi-
tys Pohjois-Karjalan haja-asutusalueella

Toimeksiantaja
Karelia-amk, UusiutuWat -hanke

Tiivistelmä

Opinnäytetyö toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun UusiutuWat-hankkeen toimesta. Opin-
näytetyössä tutkittiin, verrattiin sekä tarkasteltiin maa-asenteisesti rakennettujen, megawatti-
kokoluokan aurinkovoimaloihin vaikuttavia tekijöitä. Pääsääntöinen tarkastelu toteutettiin pie-
nimuotoisen sähköntuotannon rajapinnassa, mikä on sähkömarkkinalain mukaan kaksi mega-
volttiampeeria.

Tapaustutkimukseen pohjautuvassa opinnäytetyössä käytettiin menetelmänä aineistotriangu-
laatiota, jonka avulla useiden eri tiedonkeruumenetelmien avulla pystyttiin vastaamaan opin-
näytetyössä esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tutkimuskysymysten avulla luotiin tapausesi-
merkki (Case-tutkimus). Tämän jälkeen luotiin mallinnus aurinkovoimalasta, mikä toteutettiin
PV*SOL premium-ohjelmalla. Mallinnetusta aurinkovoimalasta saatuja tuloksia analysoitiin
määrälliseen tutkimukseen pohjautuen Excel-ohjelman avulla. Mallinnuksesta saatuja tuloksia
pystyttiin vertaamaan tutkimuskysymysten kautta saatujen tietojen sekä raja-arvojen osalta.

Aurinkovoimala mallinnettiin opinnäytetyössä mahdollisimman lähelle pienimuotoisen sähkön-
tuotannon raja-arvoa, jolloin voimalan tehoksi muodostui 1,98 MW. Suomen sähkömarkkinat
ovat joustavat teholtaan alle 2 MW:n kokoluokan aurinkovoimaloiden osalta, mikä vaikuttaa
siihen, että megawatti-kokoluokan aurinkovoimaloiden kehitys näyttää Suomessa lupaavalta.
Lisäksi megawatti-kokoluokan aurinkovoimalahankkeet voivat hakeutua eri tukimuotojen pii-
riin, mikä kannustaa ja ohjaa uusiutuvan energian tuottamiseen yhdessä kehitteillä olevan uu-
siutuvan energian taksonomian kanssa. Aurinkoenergia-alan tulevaisuudennäkymät ovat va-
loisat, minkä vuoksi työn lopussa esiteltävät opinnäytetyön jatkoselvitysmahdollisuudet tulevat
olemaan pian ajankohtaisia. Aurinkovoimaloiden kehitys tulee vaatimaan tehokasta yhteis-
työtä etenkin maankäytön osalta.

Kieli
suomi

Sivuja 88
Liitteet 1
Liitesivumäärä 1

Asiasanat
Aurinkovoimalat, sähkömarkkinat, aurinkoenergia, optimointi



THESIS
September 2022
Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Jiri Karjalainen

Title
Solar Power Plant Planning and Financial Optimization as Part of the Electricity Market - Case study in the Scattered Settlement Area of North Karelia

Commissioned by
Karelia University of Applied Sciences, UusiutuWat project

Abstract

This study was conducted at Karelia University of Applied Sciences for the UusiutuWat project. The goals of this study were to investigate, compare and examine factors that are affecting megawatt-scale ground-mounted solar power plants. The main examination was carried out at the interface of small-scale electricity production, which according to the Finnish Electricity Market Act is two megavolt-amperes.

The study was based on a case study where the data for this study was collected using research questions. With the help of the research questions, a case example modeling of the megawatt-scale ground-mounted solar power plant was created, which was carried out with the help of PV*SOL premium software. Finally, the results obtained from modeled megawatt-scale ground-mounted solar power plant were analyzed based on quantitative research using the Excel software.

The megawatt-scale ground-mounted solar power plant was modeled as close as possible to the interface of small-scale electricity production. Consequently, power output of the ground-mounted solar power plant was 1.98 MWp. In conclusion, the research proved that the Finnish electricity market is flexible regarding solar power plants with a power output of less than 2 MW, which means that the development of megawatt-scale ground-mounted solar power plants look promising in Finland. In addition, megawatt-scale solar power projects can apply for different forms of energy aids, which encourages and guides the production of renewable energy together with the renewable energy taxonomy which is under development. The development of solar power plants will require effective cooperation, especially in terms of land use.

Language
Finnish

Pages 88
Appendices 1
Pages of Appendices 1

Keywords

solar power plants, electricity markets, solar energy, optimization

Sisältö

1	Johdanto	8
2	Opinnäytetyön tavoite ja aiheen rajaus	10
3	Aurinkopaneelit	12
3.1	Aurinkopaneelin toiminta	12
3.2	Teollisen mittakaavan aurinkopaneelit	13
4	Ympäristövaikutukset	14
5	Aurinkovoimala ja sääolosuhteet	16
5.1	Lämpötila	16
5.2	Säteily	16
5.3	Varjostukset	17
6	Teollisen mittakaavan aurinkovoimalan rakenne ja komponentit	18
6.1	Keskusinvertterit	19
6.2	Paneeliketjukohtaiset invertterit	21
6.3	Akkujärjestelmät	23
7	Teollisen mittakaavan aurinkovoimalan suunnittelu	26
7.1	Maankäyttö teollisen mittakaavan aurinkovoimaloissa	26
7.2	Telineiden asennus	30
7.3	Ympäristövaikutusten arviointimenettely	32
7.4	Standardit ja menettelyt	33
7.5	Sähköverkkoon liittyminen ja liittymismaksut	35
8	Taloudelliset tuet ja rajoitteet	38
8.1	Preemio- ja syöttötariffijärjestelmä	38
8.2	MW-kokoluokan aurinkovoimaloiden energiatuet	39
8.3	Sähköverotus	41
9	Liiketoimintamallit sähkömarkkinoilla	42
9.1	PPA (Power purchase agreement)	43
9.2	Energiayhteisöt	44
9.3	Sähköä suoraan markkinoille	46
9.4	Leasing- ja osamaksusopimus sekä joukkorahoitus	46
9.5	Aurinkosähköön sijoittaminen	47
10	Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät	48
11	Case-kohteen kartoitus	50
11.1	Case-kohteen kriteerit	50
11.2	Case Rääkkylän Oravinlahti	52
12	Case-kohteen mallinnus PV*SOL-ohjelmiston avulla	60
13	Aurinkovoimala mallinnuksesta saatujen tulosten tarkastelu	63
14	Pohdinta	72
14.1	Tulosten luotettavuuden tarkastelu	76
14.2	Jatkoselvitysmahdollisuudet	77
14.3	Tulevaisuuden näkymät	79
	Lähteet	82

Liitteet

Liite 1 Voimalaitos tyyppi B:n järjestelmätekniset vaatimukset.

Sanasto

Alueverkko muodostuu Fingridin kantaverkkoon kuulumattomista 110 kV:n sähköjohdoista. Alueverkko on kanta- ja jakeluverkon välimuoto. (STUK 2021.)

Aurinkopaneeli muodostuu sarjaan kytketyistä aurinkokennoista, jotka ovat asennettu kehikon sisälle. Aurinkopaneeli tuottaa tasavirtaa (DC).

Aurinkovoimala on kokonaisuus, jonka tarkoituksena on tuottaa auringonvalon avulla sähköä. Aurinkovoimalasta voidaan käyttää myös nimeä aurinkosähköjärjestelmä.

Finlex on oikeudellisen aineiston julkinen ja maksuton Internet-palvelu, jonka omistaa oikeusministeriö (Finlex 2022).

GTK on lyhenne sanasta Geologian tutkimuskeskus, joka tutkii maa- ja kallioperää. GTK on työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa.

Haja-asutusalue on asemakaavan ulkopuolinen ja samalla harvaan asuttu alue (Valter 2013).

Huipunkäyttöaika saadaan, kun toteutunut vuosituotanto jaetaan voimalan nimellisteholla.

IEA eli International Energy Agency.

Jakeluverkko muodostuu keskijännite- ja pienjänniteverkoista, jotka ovat alle 110 kV:n sähköverkkoja. Jakeluverkot omistavat eri verkkoyhtiöt. (STUK 2021.)

Kantaverkko on Fingrid Oy:n omistama kokomaan kattava suurjännitteinen sähkönsiirtoverkko, jossa jännite on joko 110, 220 tai 400 kV (STUK 2021).

Keskusinvertteri on invertteriratkaisu, jossa paneeliketjut kootaan keskitetysti yhdelle tai useammalle keskusinvertterille. Menetelmää käytetään suurissa aurinkovoimalahankkeissa.

Wattipiikkiteho (Wp) on tehon yksikkö. Wattipiikki kuvaa tehoa, jonka aurinkopaneeli pystyy tuottamaan standardiolosuhteissa. Tällöin säteilyenergia on 1000 W/m^2 , lämpötila $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ilmassa AM 1,5. (RT 103076, 2019, 2.)

Volttiampeeri reaktiivista tehoa (VAr) on loistehon yksikkö. Loisteho värähtelee edestakaisin kuorman ja siirtoverkon välillä, minkä vuoksi se ei ole työtä tekevää tehoa. Jännitteen ja pätötehon ollessa vakio kasvattaa loistetehon suurentuminen energian siirtohäviöitä, koska loisteho suurentaa piirissä kulkevaa virtaa. (Silvonen 2017, 6, 8.)

Volttiampeeri (VA) on näennäistehon yksikkö. Näennäisteho on tavallisesti pätötehoa suurempi, koska näennäisteho sisältää sekä pätö- että loistehon. (Silvonen 2017, 6, 8.)

Watti (W) on pätötehon yksikkö. Pätöteholla tarkoitetaan sähkölaitteen todellisuudessa kuluttamaa tehoa. ”Pätöteho on sama kuin jakson ajalta laskettu keskimääräinen hetkellinen teho”. (Silvonen 2017, 6, 7.)

Paneeliketju on usean sarjaan kytketyn aurinkopaneelin muodostama kokonaisuus, joka kytketään lopuksi verkkoinvertteriin.

Pienimuotoinen sähköntuotanto kuvaa ”voimalaitosta tai usean voimalaitoksen muodostamaa kokonaisuutta, jonka teho on enintään kaksi megavoltttiampeeria” (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 3 §).

PV*SOL-ohjelmisto on ammattisovellus aurinkosähköjärjestelmien tai aurinkovoimaloiden simuloinnille.

Spot-hinta on sähkön markkinahinta (e/MWh), joka vaihtelee tarjonnan ja kysynnän mukaan (Nordic Green Energy 2021). Hinta määräytyy ostojen ja

myyntien leikkauspisteessä. Hinta ei sisällä veroja tai sähköverkon siirtohintoja (Motiva 2021c).

String-invertteri eli suomeksi ketjuinvertteri kokoaa yhden tai useamman paneeliketjun johdotukset yhteen.

Sähkömarkkina tarkoittaa sähkömarkkinalain mukaan sähkön tuotantoa, tuontia, vientiä ja toimitusta sekä sähkön siirtoa ja jakelua (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 2 §).

Utility-scale power plant on englanninkielinen nimitys verkkoon kytketystä aurinkovoimalasta, jonka teho on suurempi kuin 10 MW (Ahola 2019, 13).

Verkkoinvertteri muuttaa verkkoon kytketyissä järjestelmissä aurinkopaneelien tuottaman tasavirran (DC) sähkölaitteiden käyttämäksi vaihtovirraksi (AC). Verkkoinvertterin tehtävänä on myös huolehtia suojauksista ja oikeanlaisesta tahdistumisesta verkkoon. (Käpylehto 2016, 53.)

Ympäristövaikutusten arviointimenettely eli lyhennettynä YVA on lakiin pohjautuva menetelmä, jossa selvitetään perusteellisesti hankkeen ympäristövaikutukset, hankkeen toteutuksen mahdollisuudet ja eri toimijoiden kuulemiset.

1 Johdanto

IEA:n julkaiseman, National Survey Report of PV Power Applications in Finland 2019, raportin mukaan vuoteen 2019 mennessä Suomeen ei ollut asennettu vielä yhtään verkkoon kytkettyä Utility-scale-kokoluokan ($P > 10$ MW) maa-asenteista aurinkovoimalaa. Samoin keski- ja suurjänniteverkkoon kytkettyjä MW-kokoluokan maa-asenteisia aurinkosähköä tuottavia aurinkovoimaloita ei vielä tällöin Suomessa esiintynyt. Samassa raportissa kirjoittaja ja energiatehokkuuden professori Jere Ahola toteaa, ettei Suomessa Utility-scale-kokoisilla aurinkovoimaloilla ole vielä taloudellista potentiaalia Suomen sähköverkossa. (Ahola 2019, 5, 11–13.)

Kuitenkin, kun asiaa tarkastellaan wattitasolla niin MW-kokoluokan maa-asenteiset verkkoon kytketyt aurinkovoimalat ovat arvioitu kaikkein edullisimmaksi tuotantomuodoksi tuottaa aurinkosähköä, kun mukaan ei oteta muuntajien tai maanrakennustöiden osuutta. (Ahola 2019, 11, 12.) Suomen ensimmäinen maa-asenteinen aurinkovoimala oli 0,250 MW:n tehoinen ja sen rakennutti v. 2016 Keravan energia (Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017, 3).

Nykyään suurten aurinkovoimaloiden rakentaminen näyttää valoisammalta. Tällä hetkellä Suomeen on suunnitteilla Pohjoismaiden suurin aurinkovoimala, jonka on tarkoitus rakentua Kalantiin IBV Suomi Oy:n rakentamana vuosien 2023–2024 aikana (Uusikaupunki 2021). Samoin Pohjois-Karjalan maakuntakeskukseen Joensuuun on suunnitteilla 50–100 MW:n aurinkovoimala (Väinämö 2021). Lisäksi Suomen suurimman uusiutuvan energian sijoitusyhtiön Korkian tavoitteena on tuottaa Suomeen seuraavan kolmen vuoden aikana tuhat megawattia teollista aurinkosähköä, mikä kytkettäisiin valtakunnan verkkoon (Lähteenmäki 2022).

Aurinkoenergian kehitystä ovat ajaneet Suomen energiapolitiikka, ilmastotavoitteet ja kohonneet hinnat päästökaupassa etenkin hiili-, turve- ja kaasuvoiman

osalta. Lisäksi sähköhinnan voimakkaat muutokset ovat ajaneet toimialan kehitystä eteenpäin. Suomessa on tällä hetkellä yhdet maailman vapaimmat ja toimivimmat sähkömarkkinat, minkä vuoksi erikokoiset toimijat voivat hyödyntää mahdollisuutta sen käyttämisessä (Lehto 2022).

Myös sähköyhtiöiden ja aurinkoenergia palveluita myyvien yritysten toteuttamat aurinkovoimalat ovat kasvussa. Näiden tietojen pohjalta, aurinkovoimaloiden tarkastelu MW-kokoluokassa tuntui kiinnostavalta, ajankohtaiselta sekä alkuun jopa jokseenkin vieraalta aiheelta. Lisäksi mielenkiintoa aiheeseen nosti havainto Pohjois-Karjalan 2040 maakuntakaavasta, jossa ei ole käsitelty aurinkosähköä tai aurinkosähköön soveltuvia potentiaalisia maa-alueita. Kyseistä tarkastelua on tehty esimerkiksi Suomen länsirannikoilla. Lisäksi alueellisesti on toteutettu laajoja selvityksiä tuulivoiman osalta. Tuulivoima voi hyödyntää aurinkosähkön kanssa samaa sähköverkkoinfrastruktuuria ja täydentää sekä tasapainottaa toisistaan vaihtelevaa sääolosuhteisiin perustuvaa tuotantoa.

Näiden tietojen pohjalta opinnäytetyössä luodaan case-tapaus (englanniksi case study) MW-kokoluokkaan kuuluvasta aurinkovoimalasta, mikä pohjautuu tapaustutkimukseen. Tapaustutkimuksessa yhdestä tai korkeintaan muutamasta kohteesta tuotetaan yksityiskohtaista sekä tiivistä tietoa eikä se näin ollen pyri suoraan yleistettävyyteen (Jyväskylän yliopisto 2015).

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda onnistunut ja luotettava simulointi case-tapauksen aurinkovoimalasta Pohjois-Karjalan haja-asutusalueella sekä vastata kattavasti ja mahdollisimman laadukkaasti opinnäytetyön tavoiteosiossa määritettyihin tutkimuskysymyksiin. Case-tapauksen suunnittelun tueksi kerätään tutkimuskysymysten pohjalta tietoa aurinkovoimaloiden teknillisistä, hallinnollisista, energiapoliittisista, taloudellisista ja liiketoiminnallisista reunaehdoista, jotka asettavat omat vaatimuksensa aurinkovoimaloiden suunnitteluun. Tietoperustaa täydennetään lisäksi asiantuntijahaastatteluilla.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Karelian UusiutuWat -hanke. Opinnäytetyön case-tapauksen aurinkovoimalan simuloinnit ja tarkastelut ideoitiin alun perin toteuttavaksi valmiiksi olevalla maa-alueelle, joka olisi ollut yksityisen maanomistajan omistuksessa. Suunnitelman peruuntuessa, opinnäytetyön tarkastelu ja suuntaus päätettiin säilyttää ennallaan, mutta maa-alueiden tarkastelu ja uuden maa-alueen valinta lisättiin työn sisältöön. Maa-alueen kartoitus tuo opinnäytetyöhön mukaan lisää syvyyttä ja auttaa ymmärtämään konkreettisia asioita, jotka kulkevat virallisten hankesuunnittelujen mukana. Opinnäytetyöllä ei ole tarkoituksena hakea tarvittavia lupia, kaavoituksia tai muita konkreettisia toimintoja, jotka vaikuttaisivat maanomistajan tai muun lähialueen toimintaan.

2 Opinnäytetyön tavoite ja aiheen rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda onnistunut ja luotettava simulointi case-tapauksen aurinkovoimalasta Pohjois-Karjalan haja-asutusalueella sekä vastata kattavasti ja mahdollisimman laadukkaasti opinnäytetyön tutkimuskysymyksiin. Tavoitteena on selvittää tapaustutkimukseen pohjautuen case-tapauksen osalta, mitä maa-asenteisen aurinkovoimalan rakentaminen vaatii ja mitkä ovat tapaukseen vaikuttavia teknillisiä, taloudellisia, hallinnollisia ja energiapoliittisia reunaehtoja sekä mitkä tekijät vaikuttavat MW-kokoluokan aurinkovoimaloiden sijaintiin. Lisäksi tavoitteena on selvittää liiketoimintamahdollisuuksia, joilla tuotettua sähköenergiaa voidaan siirtää ja myydä eteenpäin sähkömarkkinoilla sekä tarkastella energiayrittäjyyden eri näkökulmia aurinkosähkön tuotannossa. Opinnäytetyön aikana on tavoitteena kerätä tietoa aiheeseen liittyviltä asiantuntijoilta case-tapauksen sekä tietoperustan tueksi.

Opinnäytetyö on rajattu maa-asenteisiin MW-kokoluokan aurinkovoimaloihin, joiden teho on rajattu kattamaan yli yhden MW:n aurinkovoimalat. Pienimuotoisen sähköntuotannon raja-arvona pidetään 1. luvun ja 3. §:n mukaan voimalaitosta tai useammasta voimalaitoksesta muodostuvaa kokonaisuutta, jonka teho

on enintään 2 MVA (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 3 §). Tämän rajauksen avulla myös pienimuotoiseen sähköntuotantoon kuuluvien aurinkovoimaloiden tarkastelusta ja niihin liittyvistä reunaehdoista saadaan muodostettua kokonaisvaltaisempi kuva.

Aurinkosähköön liittyvä yleinen teoriaosuus on pyritty kuvaamaan lyhyesti, mutta selkeästi. Aurinkosähkön teoriaosuus toimii suunnittelun ja syvällisemmän teoreettisen tiedon pohjatietona, minkä vuoksi se tuodaan esille opinnäytetyön tietoperustassa. Lisäksi asioiden syvempi ymmärtäminen auttaa hahmottaa paremmin laaja-alaisen aiheen kokonaiskuvaa.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset case-tapauksen pohjalta ovat:

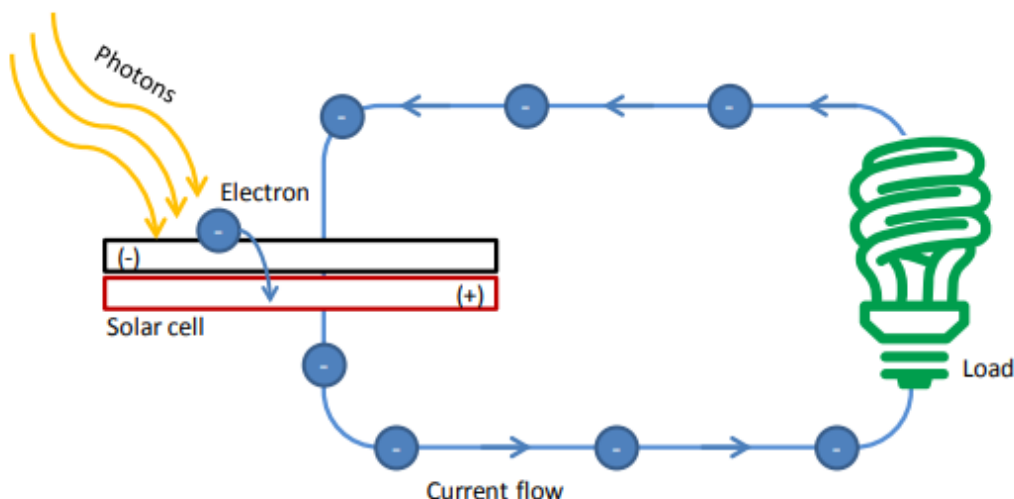
1. Mitä maa-asenteisen aurinkovoimalan rakentaminen vaatii ja mitkä ovat siihen vaikuttavia teknillisiä, taloudellisia, hallinnollisia ja energiapoliittisia reunaehdoja eri MW-kokoluokkien aurinkovoimaloissa?
2. Mitkä tekijät vaikuttavat MW-kokoluokan aurinkovoimaloiden sijainnin määrittämiseen?
3. Millaiset ovat MW-kokoluokan aurinkovoimalan liiketoimintamahdollisuudet sähkömarkkinoilla, joilla tuotettua energiaa voidaan myydä tai siirtää eteenpäin sähkömarkkinoilla?
4. Mitkä ovat energiayrittäjyyden mahdollisuudet aurinkosähkön tuotannossa?
5. Voidaanko asiantuntijahaastatteluilla vahvistaa tai täydentää tietoa case-tapauksen sekä tietoperustan tueksi?
6. Voidaanko aurinkovoimalasimuloinnin tuloksia ja mallinuksia pitää luotettavana?

3 Aurinkopaneelit

3.1 Aurinkopaneelin toiminta

Aurinkopaneeli koostuu pääpiirteissään useista toisiinsa kytketyistä aurinkokennoista, ja aurinkokenno puolestaan koostuu kahdesta kerroksesta puolijohtavaa materiaalia (Zervos & Lins 2010, 116). Aurinkokennoissa käytettävien pääsääntöisten raaka-aineiden eli kiteisten, monikiteisten tai amorfisten kennojen sarjaan kytkennällä saadaan mahdollistettua haluttu jännitteen taso aurinkopaneelille (Energiateollisuus 2022a).

Kuvassa yksi on esitetty sähkövirran muodostuminen aurinkopaneelissa (kuva 1). Auringonvalo koostuu pienistä suurenergisistä paketeista eli kvanteista, joiden fotonit pystyvät irrottamaan elektroneita atomeistaan tilanteessa, missä auringonvalo paistaa sopivalle materiaalipinnalle (Käpylehto 2016, 24, 25.) Yleisimmin käytettyjen aurinkokennojen elektronien virtaus on mahdollistettu Pn-liitoksen avulla. Aurinkokennon N-tyyppin puolijohde sisältää enemmän elektroneja kuin P-tyyppin puolijohde, jonka vuoksi n-puolen elektronit pyrkivät kulkeutumaan p-puolen aukkoihin. Sähkönjohtavuus siis perustuu vapaiden elektronien ja aukkojen liikkeeseen. Elektronit voidaan johtaa lopuksi takaisin p-puolelle ulkoisen virtapiirin kautta. N-tyyppin puolijohteisiin on saostettu usein arseenia ja P-tyyppin puolijohteisiin booria. (Motiva 2021a.)



Kuva 1. Sähkövirran muodostuminen (Kuva: NREL 2016, 8).

3.2 Teollisen mittakaavan aurinkopaneelit

Teollisen mittakaavan maa-asenteisissa aurinkovoimaloissa käytetään usein yli 500 Wp:n aurinkopaneeleja (Solarigo Systems Oy 2022b). Suuremman tehollisen vaatimuksen vuoksi maa-asenteisten aurinkovoimaloiden paneelityyppeinä käytetään tavallisimmin yksi- tai monikideaurinkopaneeleja. Yksikideaurinkopaneelin tunnistaa mustasta väristä sekä yksikidekennolle tyypillisistä pyöreistä kulmista. Monikidepaneelit ovat puolestaan väriltään sinisiä sekä kennot ovat muodoltaan neliömäisiä. Monikidepaneelit ovat edullisempia yksikiteisiin paneelisiin verrattuna, minkä vuoksi niitä käytetään usein suurissa järjestelmissä, kuten maa-asenteisissa aurinkovoimaloissa. Tällöin paneelien lukumäärä voimalassa täytyy kasvattaa, koska monikidepaneelien tehontuotto on hieman alhaisempi yksikiteisiin aurinkopaneeleihin verrattuna. Toisaalta monikiteiset aurinkopaneelit toimivat hieman paremmin hajasäteilyn vallitessa (Finnwind 2022).

Molemmat, niin yksi- kuin monikideaurinkopaneelit voidaan leikata half-cut-tekniikalla, missä aurinkokenno leikataan kahtia. Menetelmän avulla sähkövirta saadaan puolitettua. Tällöin paneelista saadaan irti parempi hyötysuhde johtuen pienemmästä hukkalämmön ja resistiivisyyden määrästä. Lisäksi kennojen ylä-

ja alaosat eivät ole riippuvaisia toisistaan, jolloin mahdolliset varjostukset eivät vaikuta koko paneelin toimintaan. Half-cut paneelit kestävät myös paremmin mekaanista rasitusta, mikä on edukseen aurinkopaneelien pitkän elinkaaren aikana (Finnwind 2022).

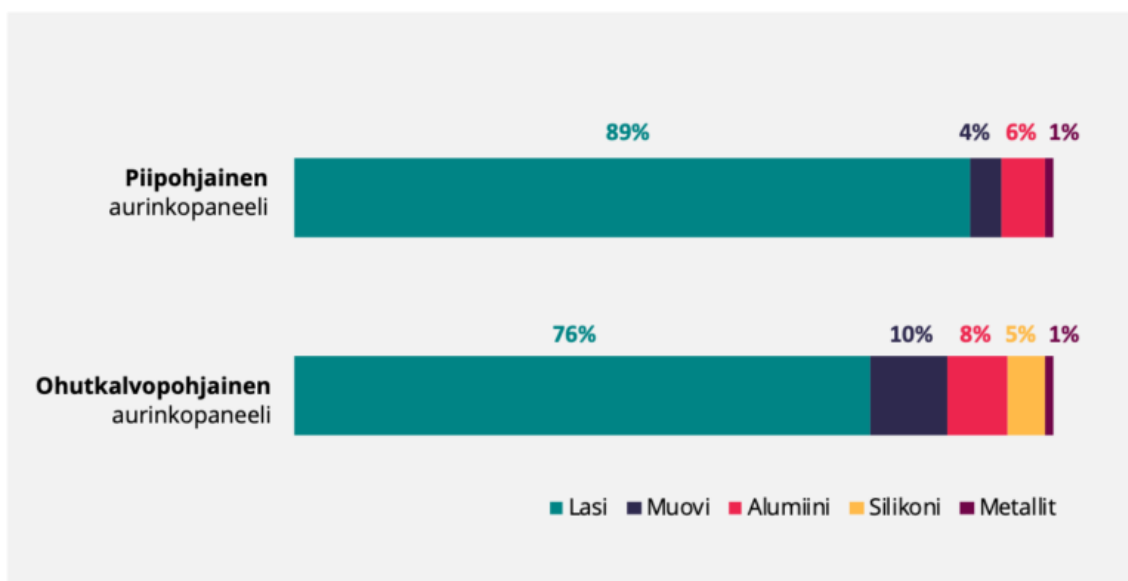
Myös uusia aurinkopaneelitekniikoita ollaan ottamassa käyttöön. Solarigo Systems Oy:n Juho Lasosen mukaan kaksipuolinen aurinkopaneeli tuottaa energiaa myös maasta heijastuvasta säteilystä. Tämä perustuu kaksipuolisen paneelin taustamateriaaliin, joka päästää valoa lävitseen. Myös N-tyyppin paneelit ovat yleistymässä tulevaisuuden markkinoilla. Kyseisessä tekniikassa puolijoh-teeseen saostetaan fosforia johtuen sen korkeammasta elektronimäärästä P-tyyppi paneeleissa käytettävään booriin nähden. (Maukonen 2022, 12.)

4 Ympäristövaikutukset

Aurinkopaneelit käyttävät energianlähteenä aurinkoa, joka on samalla ainut, mutta loputon energianlähde. Aurinkosähkön tuotantovaiheessa, jossa voimala tuottaa sähköenergiaa, vältetään usealta biodiversiteettiä ja ilmastoa uhkaavalta riskitekijältä. Aurinkosähkön tuotanto ei aiheuta happosateita, jätevesiä, savua, melua tai kasvihuonekaasuja. Samalla vältetään saastuttavien kaasujen tuottamiselta. Lisäksi suurin osa aurinkokennoista on valmistettu piistä, joka on myrkytön ja samalla maapallon toiseksi yleisin alkuaine. Piitä esiintyy yleisimmin hiekassa. Pii, kuten myös aurinkopaneelien valmistuksessa käytetyt lasi ja alumiini voidaan kierrättää. (Zervos & Lins 2010, 116, 117.)

Alumiinin lisäksi paneelien kennoista, johtimista ja kehyksistä voidaan energia-tehokkuuden professori Jere Aholan mukaan kierrättää hopeaa ja kuparia (Saarinen 2021). Piipohjaisen aurinkopaneelien koostumus on esitetty kuvassa kaksi (kuva 2). Lisäksi järjestelmät ovat helposti asennettavissa, huollon tarve on

vähäinen sekä voimalat ovat pitkäikäisiä. Lisäksi aurinkovoimaloita voidaan helposti laajentaa. (Tahkokorpi ym. 2016, 172.)



Kuva 2. Aurinkopaneelin koostumus (Kuva: Vakkuri 2020).

Aurinkopaneelien kierrättäminen ja valmistaminen tulevat aiheuttamaan kuitenkin suuria globaaleja haasteita tulevaisuudessa. Paneelien valmistaminen vaatii lukuisia myrkyllisiä kemikaaleja, jotka ilman asianmukaista jätteenkäsittelyä aiheuttavat nopeasti kasvavassa aurinkoenergiateollisuudessa merkittäviä ympäristöriskejä. (International Renewable Energy Agency 2016a, 43) Aurinkopaneelien valmistukseen vaadittava polyyppiin valmistus vaatii tuotantovaiheessa erilaisia kemikaaleja ja paljon energiaa, jonka saamiseksi yleisemmin käytetään fossiilisia polttoaineita. (Finnwatch 2021.)

Ilman asianmukaisia aurinkopaneelisiin erikoistuneita kierrätyslaitoksia tulee aurinkopaneelien volyymin kasvaessa eteen vielä suuria haasteita. Aurinkopaneelien hinnat ovat kehityksen myötä laskeneet nopeaa tahtia, jonka vuoksi vanhat paneelit korvataan yleisimmin uusilla. Aurinkovoimaloiden yleistyessä kasvaa myös elinkaaren loppua lähestyvien aurinkopaneelien volyymi, joka voi kuitenkin vauhdittaa aurinkopaneelien kierrättämisen edistämistä (International Renewable Energy Agency 2016a, 33).

5 Aurinkovoimala ja sääolosuhteet

5.1 Lämpötila

Aurinkokennon lämpötila voi joissain tilanteissa nousta jopa 20–30 astetta ulkoilman lämpötilaa korkeammaksi, mikä johtaa paneelin jännitteen ja tätä kautta myös tehon alentumiseen. Useimpien paneelien teho laskee 0.4 %/1 °C, kun lämpötila ylittää 25 astetta. Tämän takia paneelit toimivat parhaiten viileässä ilmassa. (Tahkokorpi ym. 2016, 140, 141.) Tämän seurauksena Suomi on viileän ilmastonsa vuoksi suotuisaa aluetta aurinkosähkön tuotannolle. Lisäksi maa-asenteisten aurinkovoimaloiden etuna on, että ne pääsevät tuulettumaan vapaasti. Tämän seurauksena maa-asenteisesti rakennettujen aurinkopaneeliketjujen lämpötila voi olla jopa 10 astetta matalampi kuin kattoon asennettujen aurinkopaneeliketjujen. Samalla energiatuotannollinen lasku vuositasolla pienenee noin kaksi prosenttia kattoasennukseen verrattuna. (Käpylehto 2016, 123.)

5.2 Säteily

Parhaimmillaan Suomessa voidaan saada yhdestä asennetusta kilowattipiikistä, kWp, hieman yli 900 kilowattituntia, kWh, sähköä (Käpylehto 2016, 117). Säteilähäviöitä tapahtuu, koska ilmakehä suodattaa ja heijastaa osan säteilystä takaisin. Lisäksi pilvien laatu, määrä ja paksuus ovat tekijöitä, jotka voivat alentaa auringon suoraa säteilyä. Näillä tekijöillä on suuri merkitys aurinkovoimalan tehoon, koska aurinkopaneelien virta-jännite ominaiskäyrä on suoraan verrannollinen auringonvalon intensiteettiin. (Tahkokorpi ym. 2016, 13, 28, 141.) Suomessa aurinkovoiman tyypillinen huipunkäyttöaika säteilytietojen pohjalta on 982 tuntia vuodessa (Vakkilainen & Kivistö 2017, 9).

Suomessa hajasäteilyn määrä on noin puolet kokonaissäteilystä, kun asiaa tarkastellaan vaakatasolta mitatun säteilyn näkökulmasta. Säteily on Suomessa voimakkainta kirkkaana kevättalvena, jolloin aurinko paistaa pitkään korkealta

taivaalta. Tällöin myös lumen aiheuttama säteilyn heijastus on aurinkopaneelleille eduksi, mikäli paneelit ovat puhtaat ja kokonaispinta-ala on käytettävissä. Talvella paneelien teho on kuitenkin lähes nolla, mikä on seurausta auringon alhaisesta asennosta ja säteilyn puutteesta. (Tahkokorpi ym. 2016, 26, 36, 139.)

Lumikuorman lisäksi paneelien vastaanottamaa säteilyä voi haitata erityisesti siitepöly, joka voi palaa paneeleihin kiinni. Tällöin paneelit olisi hyvä puhdistaa aika-ajoin vedellä tuoton maksimoimiseksi. (PKS 2018.) Lisäksi huomioon tulee ottaa ilmansaasteet, jotka voivat likaannuttaa tai aiheuttaa korroosiota paneeleihin. Etenkin hiukkaset ja pöly alentavat paneelien hyötysuhdetta merkittävästi. Lisäksi lintujen ulosteet voivat koitua ongelmaksi tietyillä alueilla. (IFC 2015, 60, 63.)

5.3 Varjostukset

Varjostukset eivät ole usein maa-asenteisissa aurinkovoimaloissa yhtä isossa roolissa kuin ahtaissa kiinteistöpinta-aloissa, joissa säteilyä rajoittavia tekijöitä voi olla lukuisia. Aurinkovoimaloissa varjostukset ja oikosulut voidaan kuitenkin ohittaa ohitusdiodien kautta, jotka asennetaan paneelikohtaisesti sarjaan kytkeytyissä järjestelmissä. Lisäksi parhaimman tuotannon varmistamiseksi verkkoon kytkeytyissä järjestelmissä käytetään apuna MPPT-säätimiä. MPPT-säädin on virtajännite ominaiskäyrää seuraava verkkoinvertterin toiminto, jolla voidaan havaita mahdolliset häiriöt tai jännitteen laskut ja välittää niistä tiedot inverttereille. Tuotantomuodot, joissa energiaan varastoidaan akkuihin, voidaan MPP-säätimien avulla kasvattaa latausvirtaa useita 10 prosentteja. (Tahkokorpi ym. 2016, 150, 151, 202.)

6 Teollisen mittakaavan aurinkovoimalan rakenne ja komponentit

Maa-asenteiset aurinkovoimalat voidaan muodostaa joko käyttämällä hajautettua tai keskitettyä topologiaa. Hajautettua menetelmää käytetään, kun aurinkovoimala toteutetaan sarjaan kytketyillä paneeliketjuilla (englanniksi stringeillä) ja useammilla sekä samankokoisilla inverttereillä. Keskitettyä järjestelmää käytetään puolestaan, kun paneeliketjut kytketään rinnakkain yhteen tai useampaan suureen sekä homogeeniseen ryhmittymään. (Mäkinen 2019 7,8.)

Lähtökohtaisesti keskitetty topologia vaatii homogeenisemmat olosuhteet verrattuna hajautettuun järjestelmään. Aurinkovoimaloiden homo- heterogeenisuudella tarkoitetaan ympäristössä vaihtuvien olosuhteiden poikkeavuutta tai laitekohtaisten komponenttien eroavaisuuksia toisiinsa nähden. Mitä suurempi ympäristön, olosuhteiden tai laitteiden keskinäinen poikkeama on, niin sitä suurempi on voimalan heterogeenisuus. Yli 100 kW voimalat kuuluvat yleensä heterogeeniseen ryhmittymään. (Harri 2020, 14.) Teholtaan 100 kVA – 2 MVA tuotantolaitokset katsotaan kuuluvan hajautetun tuotannon piiriin (Käpylehto 2016, 126).

Aurinkopaneelien ja inverttereiden lisäksi aurinkovoimalan komponentteihin kuuluvat turvakytkimet, sähköpääkeskus, sähkömittari ja sähköverkko (Tahkokorpi ym. 2016, 161). Lisäksi voimalan komponentteihin kuuluvat asennustelineet, DC-kaapelit, DC-kytkentäkotelot, AC- ja tietoliikennekaapeloinnit sekä mahdolliset pienjännitekeskukset, muuntajat ja keskijännitekojeistot (Mäkinen 2019, 7).

Aurinkovoimalan eri komponentit aiheuttavat tehohäviöitä voimalan eri vaiheissa. Häviöitä aurinkopaneelien ja sähköverkon välillä aiheutuu niin johdotuksen vastuksissa, säätimissä, inverttereissä sekä mahdollisesti järjestelmiin liitetyissä akustoissa. Paneelien ja järjestelmään kuuluvien muiden komponenttien

avulla voidaan määrittää voimalan järjestelmähyötysuhde. (Tahkokorpi ym. 2016, 169.)

Lisäksi maa-asenteiset aurinkovoimalat tulee suojata aitauksella. Aitaus estää mahdollisen järjestelmään kohdistuvan ilkivallan ja suojaa hengenvaaraa aiheuttavilta suurilta jännitteiltä. (Jaatinen 2016, 67.) Aitauksella voidaan estää myös voimalaan kohdistuvia varkauksia. Lisäksi järjestelmä voi sisältää turvakameroita ja liiketunnistimia. (RT 103076, 2019, 11; Stapleton & Neil 2012, 94.)

6.1 Keskusinvertterit

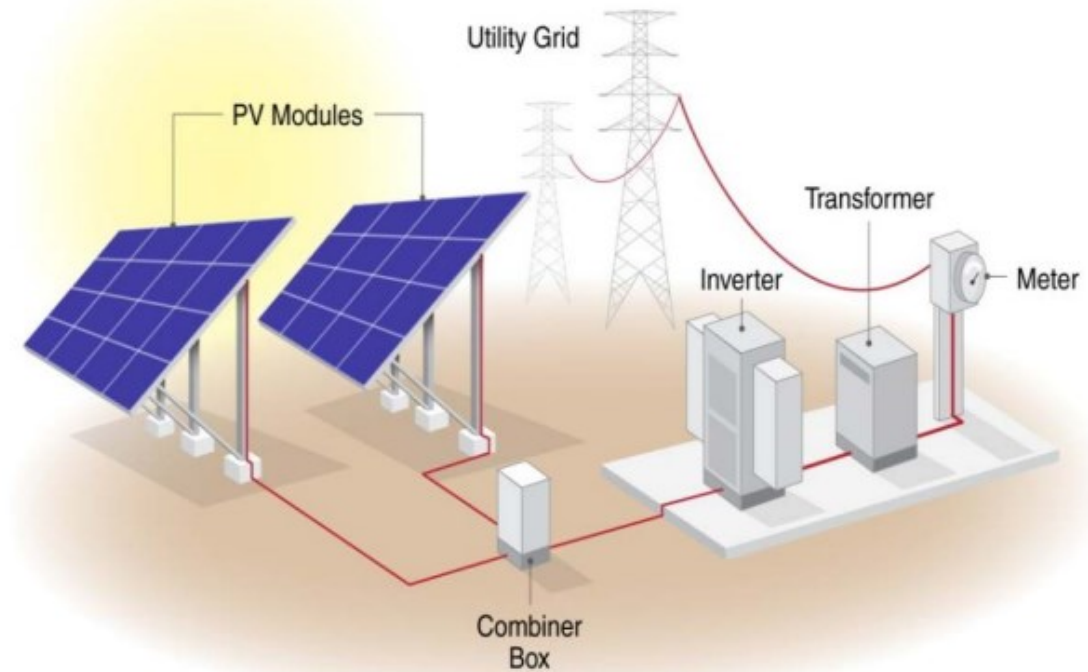
Keskitettyyn invertteriin on liitetty rinnakkain useita sarjaan kytkettyjä aurinkopaneeliketjuja. Keskitetyssä inverttereissä on usein yhtä invertteriä kohden yksi MPPT säädin. Tämän vuoksi aurinkovoimalan teho laskee merkittävästi häiriötilanteissa tai olosuhteiden aiheuttamista erinäisistä varjostuksista. Tämän takia paneelien asennustelineiden kaltevuuskulmat ja ilmansuunnan suuntaukset ovat oltava yhtenäiset. (Mäkinen 2019, 17).

Keskitettyllä invertterillä toimivaa aurinkovoimalaa on kuitenkin helpompi hallita yhtenä kokonaisuutena, koska se vähentää paneeliketjukohtaisten invertterien lukumäärää ja samalla kokonaisliitännöiden määrä vähenee (Trinasolar 2018). Lisäksi etuna on ympärivuorokautinen mahdollisuus tuottaa loistehon kompensointia joko osa tai täysteholla (Mäkinen 2019, 8).

Keskusinvertterit voivat sisältää myös yli 1 MW:n järjestelmissä muuntajan, jolla jännite voidaan muuntaa suoraan esimerkiksi 20 kV:n keskijännitteeksi. Lisäksi keskusinvertterit sisältävät usein aurinkosähköjärjestelmän suojalaitteiston. (Novergy 2017.) Kuvassa kolme on esitetty keskusinvertterillä toteutettu aurinkosähköjärjestelmä (kuva 3).

Keskusinvertterin negatiivisena puolena on mahdollinen toimintahäiriö, koska tällöin vaikutukset kohdistuvat koko voimalaan, jolloin huollon tarve kasvaa ja

koko voimalan toiminta voidaan joutua ajamaan alas (Trinasolar 2018). Alasajon tapahtuessa huollon tarve saattaa viivästyä, koska keskusinverttereiden huoltaminen vaatii erikoiskoulutuksen osaavan henkilöstön (Misbrener 2018).



Kuva 3. Verkkoon liitetty maa-asenteinen aurinkovoimala keskusinvertterillä (Kuva: NREL 2016, 9).

Kuten kuvasta kolme havaitaan, useiden eri aurinkopaneeliketjujen johdotuksia voidaan yhdistää pienempiin DC-kytkentäkoteloihin, jotka sisältävät useita turvallisuusominaisuuksia. Paneeliketjujen johtimet yhdistetään kytkentäkoteloihin sulakkeisiin, joista johtimet yhdistetään yhdeksi keskitetylle invertterille meneväksi johtimeksi, jolloin siirtohäviöitä ja materiaalikustannuksia saadaan pienennettyä. Lisäksi kytkentäkotelot voivat sisältää erotuskytkimiä, hätäkatkaisimen, valokaarivikojen ehkäisylaitteiston sekä muita valvontalaitteistoja. Samalla kytkentäkotelot suojaavat invertteriä ylijännitteeltä sekä ylivirralla, ja ne helpottavat aurinkovoimaloiden asennusta, huoltoa sekä sähkön alasajoa. Oikein asennettuna kytkentäkotelot toimivat koko voimalan elinkaaren ajan. (Smalley 2015b.) Yhteen kytkentäkoteloon voidaan asentaa joko 16, 24 tai 28 rinnakkaista paneeliketjua (Mäkinen 2019, 17).

Invertterien jälkeen sähkön jännite muutetaan oikeaan jännitteeseen muuntajan avulla. Jännitettä nostetaan, kun sähköä siirretään siirtojohtimien kautta kanta-, alue- tai jakeluverkkoon. Näin ollen sähkövirtaa ja samalla siirtohäviöitä saadaan pienennettyä. Sähköasemilla sähkön jännitettä saadaan pienennettyä 20 kilovoltiin eli keskijänniteverkkoon sopivaksi. Sähköjakelupaikan lähistöllä olevissa jakelumuuntamoissa sähköjännitettä pienennetään edelleen 400 volttiin. Lopuksi pienjännitejohtojen avulla sähkövirtaa saadaan muuntamoista edelleen kuluttajille. (STUK 2021.)

6.2 Paneeliketjukohtaiset invertterit

Paneeliketjukohtaisia inverttereitä (englanniksi string-inverttereitä) käytetään yleisemmin hajautetussa aurinkosähkön tuotannossa, missä paneeliketjujen pituudet pyritään pitämään samanmittaisina. Samoin saman tehoisia inverttereitä käyttämällä saadaan muun muassa inverttereiden käyttöönotosta, dokumentoinnista sekä huolloista luotettavampaa sekä sujuvampaa. (Mäkinen 2019, 7.) Invertterit asennetaan tällöin paneeliketjukohtaisessa asennuksessa joko paneelirivien alle tai erilliseen rakennukseen (RT 103076, 2019, 11).

String-inverttereiden avulla voimalaan on helpompi lisätä tai siitä voidaan helpommin poistaa tarvittavia moduuleja sekä komponentteja. Paneelirivikohtainen asennus myös pienentää inverttereiden tilantarvetta ja vähentää DC-kaapelihäviöitä. Kuitenkin tehokkaiden string-inverttereiden kaapelihäviöt ovat DC-AC puolella samaa luokkaa keskitettyjen inverttereiden kanssa. (Novergy 2017.)

Lisäksi sarjaan kytkennän etuna on, että jännite saadaan nostettua korkeaksi ja virta pidettyä pienenä, mikä alentaa energian kokonaishäviötä tuotantoketjussa (Käpylehto 2016, 65). Myös string-invertteri ratkaisuissa voidaan hyödyntää kytkentäkoteloiden käyttöä. Kytkentäkoteloita käytetään hajautetussa aurinkosähkön tuotannossa AC-kaapeloinnin puolella, koska matkat inverttereiltä

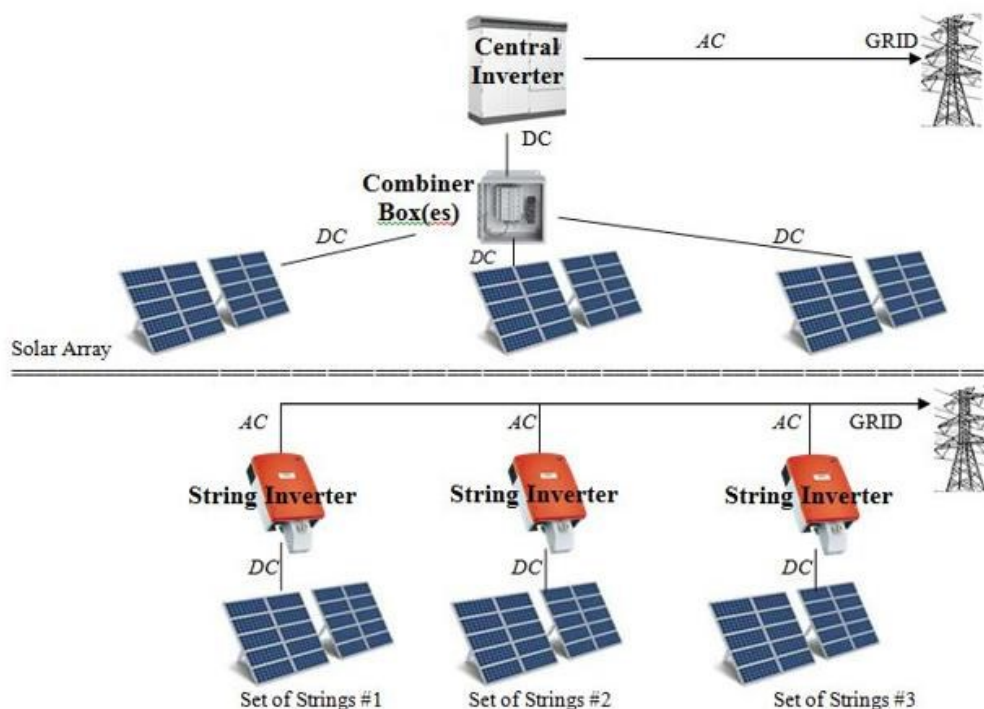
puistomuuntamoille voivat olla hyvinkin pitkiä. (Mäkinen 2019, 7). Kuvassa neljä on esitetty keskusinvertteri ja string-invertteri toteutusten eroavaisuudet (kuva 4).

Sähköpostihaastattelun perusteella Solarigo Systems Oy:n projektipäällikön Ville Vairisen mukaan nykyisten string-invertterien teknologia on kehittynyt eteenpäin ja nykyisin on saatavilla teholtaan jopa 100–300 kW olevia yksittäisiä laitteita. Tällöin investointikustannuksista saadaan Vairisen mukaan edullisempia ja samalla kentän tuotannon optimointi on helpompaa. (Vairinen, 2022.)

Mahdollisten toimintahäiriöiden ilmaantuessa, häiriö ei vaikuta usein koko voimalaan vaan yksittäiseen tai yksittäisiin paneeliketjuihin, joihin invertteri on liitetty (Novergy 2017). Tämä lisää samalla voimalan luotettavuutta sekä tehokkuutta (Stapleton & Neil 2012, 65). Toimintahäiriön ilmaantuessa inverttereiden huoltamisen voi tehdä sähköalan ammattihenkilö. Lisäksi yritys tai yhteisö voi pitää tarvittavia varalla olevia inverttereitä tai varaosia saatavilla, jolloin mahdolliset huoltotyöt saadaan toteutettua nopeasti ja paneeliketjukohtaiset tuotantotappiot saadaan minimiin. (Misbrener 2018.) Myös Vairisen mukaan huolto/käytökustannukset ovat tulleet edullisemmaksi, koska yksittäisen laitteen rikkoutuminen ei pudota koko kentän tuotantoa pois (Vairinen 2022).

Lisäksi invertterit tulee vaihtaa keskimäärin kerran voimalan elinkaaren aikana eli noin 15 vuoden kohdilla. Invertterien uusimisen aiheuttaa niiden sisältämä tehoelektroniikka, joka tuottaa tehon syöttötilanteessa hukkalämpöä, joka kuluttaa sekä heikentää invertteriä elinkaarensa aikana (Harri 2020, 8).

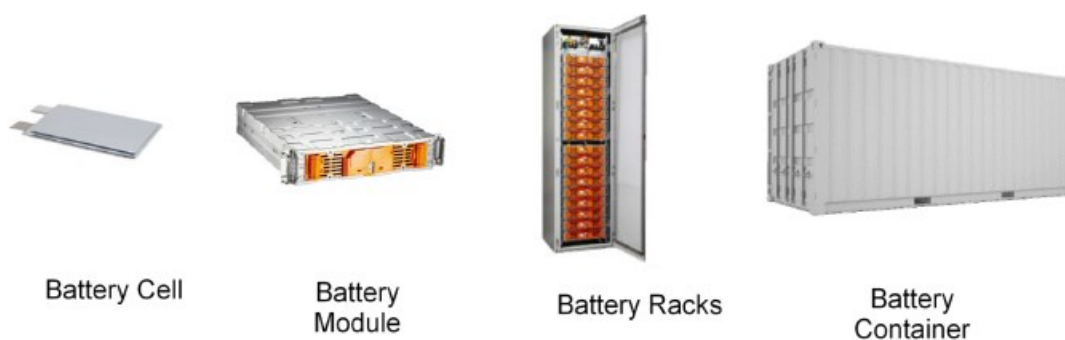
Eteen voi siis tulla haasteita etenkin MW-kokoluokan laitoksissa keskusinvertteri ja string ratkaisujen valitsemisen välillä. Vairisen mukaan kuitenkin maailmalla ollaan menossa kohti yleistyneempää string inverttereiden käyttöä. Tällöin keskitettyjä inverttereitä käytetään Vairisen mukaan vasta, kun puhutaan teholtaan yli 100 MWp laajoista aurinkosähköpuistoista (Vairinen 2022).



Kuva 4. Keskusinvertterin ja string-invertteri toteutusten kuvaajat (Kuva: se king alpha 2017).

6.3 Akkujärjestelmät

Akkuvarastoinnin avulla voidaan parantaa aurinkovoimalan joustavuutta. Tällöin sähköä voidaan varastoida tehokkaasti akkuihin ja varastoitua sähköä voidaan tämän jälkeen syöttää uudelleen sähköverkkoon. Lisäksi akkujärjestelmän koko on helposti skaalattavissa, eivätkä maantieteelliset esteet sähkön varastointiin ole yhtä rajoittavia kuin monessa muussa energiantuotantomuodossa. Samoin varastoitua sähköenergiaa voidaan akkujärjestelmien avulla viedä lähemmäksi varsinaista käyttökohdetta. Verkkoon syötettävien akkujärjestelmien teknologiana voidaan hyödyntää esimerkiksi litiumioni-, natriumrikki- ja lyijyhappoakkuja, joista litiumioniakuissa on ollut suurin markkinapotentiaali sekä asennuskapasiteetti viime vuosina. (International Renewable Energy Agency 2019b, 6,16.) Kuvassa viisi (kuva 5) esitetään tyypillisen akkuvaraston komponentit.



Kuva 5. Tyypillisen DC akkujärjestelmän komponentit (Kuva: NREL 2021, 28).

Teollisen mittakaavan aurinkovoimaloiden akkujärjestelmät voivat tarjota muun muassa taajuuden, aurinkovoimalan lähtötehon ja säätelyreservin seurannan sekä säätelyn palveluita. Sähköverkko-operaattoreiden vaatimuksiin voidaan vastata akkujärjestelmien avulla jopa millisekunneissa, kun puolestaan muussa muussa sähköntuotantomuodossa säätelyyn voi kestää useista sekunneista jopa useisiin minuutteihin. Lisäksi akkujärjestelmän avulla sähköä voidaan varastoida sähkön kysynnän huippuhetkiin tai tilanteisiin, joissa sähköverkko tarvitsee äkillisesti vahvistusta. Samalla saadaan pienennettyä riippuvuutta diesel generaattoreista. Tästä on apua myös sähkön ylituotantotilanteissa, koska silloin akkuja käytetään sähköenergian varastoina, jolloin taloudellinen etu kasvaa ja sähköverkon ylläpito pienenee. (International Renewable Energy Agency 2019b, 9,10.)

Myös Pohjois-Karjalan Sähkönsiirto Oy:lle tehdyn sähköpostihaastattelun perusteella, palvelupäällikkö Raimo Toivasen mukaan, sähkövarastoilla olisi mahdollista tasata aurinkovoimalaitosten aiheuttamia sähkönlaadun haasteita. Lisäksi Toivasen mukaan 1–5 MVA sähkövarastoilla voitaisiin parantaa varasyötötilanteissa jännitejäykkyyttä, että toimitusvarmuutta suurhäiriötilanteissa. (Toivanen 2022.)

Tulevaisuudessa tulee olemaan tarvetta keskipitkänajan (4–16 tunnin) energian varastointiin, koska fossiilisten tuotantomuotojen päästöoikeuksien hinnat tulevat nousemaan ja aurinko- sekä tuulivoimalla tullaan saavuttamaan

tulevaisuudessa vesivoiman kapasiteetti. Tällä hetkellä sähkön varastointijärjestelmän kehitystä hidastavat sähkön varastoinnin arvokkuus, koska varastoiminen on arvokkaampaa kuin fossiilisten varavoimaloiden käyttäminen. Energia-varastojen kehittämiseksi ja kaupallistamiseksi on siis suurta tarvetta. (Peljo 2020.)

Akkujärjestelmien hyödynnettävyyttä rajoittavat korkeiden kustannusten lisäksi, viranomaisien sääntelyt ja eri sidosryhmien osittainen tiedonpuute akkujärjestelmien hyödyistä. Eri puolilla maailmaa suoritettujen pilottihankkeiden kautta voidaan lisätä eri sidosryhmien tietoisuutta akkujärjestelmien monipuolisista hyödyistä ja erilaisista käyttömahdollisuuksista. (International Renewable Energy Agency 2019, 14,15.)

Esimerkiksi Suomeen on rakentumassa Kalajoen hybridisähköpuisto, jossa tuuli- ja aurinkovoiman osalta hyödynnetään alueen yhteistä sähköverkkoinfrastruktuuria, jolloin tuotettua sähköenergiaa tullaan syöttämään kantaverkkoon. Samanaikaisesti alueella suoritetaan aurinkopaneelien testausta, aurinkosähköpilotointeja sekä teollisen kokoluokan sähkövarastointia. (Solarigo Systems Oy 2022a.) Kuvassa kuusi (kuva 6) on havainnollistettu aurinko- ja tuulivoiman hyödynnettävyyttä samalla alueella.



Kuva 5. Tuuli- ja aurinkovoimaloita voidaan hyödyntää samalla kiinteistöllä ja yhdistää samaan sähkövarastoon sekä sähköverkkoinfrastruktuuriin eli voidaan hyödyntää ns. hybridimuotoa (Kuva: International Renewable Energy Agency 2019b, 5).

7 Teollisen mittakaavan aurinkovoimalan suunnittelu

7.1 Maankäyttö teollisen mittakaavan aurinkovoimaloissa

Karkeana lukuarvona piipohjaisia aurinkopaneeleita käyttäville aurinkovoimaloille on pidetty suhdannetta, jossa 1 MW:n aurinkovoimala tarvitsee toimiakseen noin 0.8–1.5 ha:n pinta-alan (IFC 2015, 60). Kaavaillun aurinkovoimalahankkeen maaperätutkimukset tehdään koeporauksin ja -kaivannoin, joita tehdään 5–10 asennettua megawattia kohden. Maaperätutkimukset aloitetaan asennettavan maa-alueen kulmista, minkä jälkeen käydään läpi jäljelle jäävä alue. Maaperätutkimuksissa voidaan selvittää aurinkovoimala-alueelta pohjaveden tilaa, maaperän laatua ja maaperän mahdollista hylkimisvastusta sekä

vetolujuutta, jotka kohdistuvat maaperään upotettaviin paalutusrakenteisiin. (Bushong 2014.)

Potentiaalisia aurinkovoimala-alueita ovat sähkönsiirtoverkon läheisyydessä sijaitsevat laajat ja avarat alueet, kuten entiset turvetuotantoalueet, läjitys ja täyttöalueet, peitetyt kaatopaikat, jätteenkäsittelyalueet sekä monet muut jo käytöstä poistuneet avarat sekä esteettömät alueet. (Ramboll Finland 2021a, 95.) Tällaisia suuria käytöstä poistuneita alueita ovat myös esimerkiksi kaivosteollisuuden rikastushiekka-altaiden maa-alueet, mihin Solarigo Systems Oy yhdessä kumppaneidensa kanssa aikoo rakennuttaa Pohjois-Pohjanmaalle 100 MW:n tehoisen aurinkosähköpuiston. Hanke mahdollistaa lisäksi samanaikaisesti jätealtaiden hyödynnettävyyden kaivosteollisuuden tarpeiden osalta. (Solarigo Systems Oy 2022b.)

Esimerkiksi ympäristöluvitettua ja lainvoimaista turvetuotantopinta-alaa on Pohjois-Karjalassa vajaa 4000 ha (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2021, 56). Pohjois-Karjalan ilmasto- ja energiaohjelman tavoitteena on luopua energiaturpeen käytöstä vuoteen 2030 mennessä sekä Suomen kokonaistavoitteena on puolittaa energiaturpeen käyttö vuoteen 2030 mennessä (Laatikainen & Suomi 2021, 1).

Turvetuotantoalueita hyödyntämällä vältytään metsän kaatamiselta sekä pelto- maan korvaamiselta energiantuotantoon. Lisäksi alueella on usein jo myönnetty ympäristölupa, tila on avara ja aurinkoinen sekä tiestöä on jo valmiiksi rakennettuna tuotantoalueen läheisyyteen. Lisäksi voimassa olevan ympäristöluvan lupamääräysten mukaisesti voidaan tehdä vaaditut jälkihoitotoimet. (Mäkäräinen 2020, 2.)

Väitöskirjan turvetuotantoalueiden jatkokäytöstä tehneen Kari Laasasenahon mukaan, etenkin paksuturpeiset alueet ovat hankalia biomassan kasvatukselle, joten aurinkovoimalahankkeet ovat hyvä vaihtoehto yleisimmin käytetyn metsityksen rinnalle, jatkotoimenpiteitä ajatellen. (Pentikäinen 2022). Tällä hetkellä useat Suomen suurimmat aurinkoenergiահankkeet ovat suunnitteilla poistuville

tai poistetuille turvetuotantoalueille. Kuitenkin sijoitusyhtiö Korkian mukaan vanhalle turvesuolle ei ole kannattavaa rakentaa aurinkovoimalaa huonon pohjan ja sen aiheuttamien korkeiden rakennuskustannusten vuoksi (Lähteenmäki 2022).

Ennen kuin aurinkovoimalahankkeessa siirrytään maanmuokkaukseen tai sähköverkon rakennustyöhön, tulee huomioon ottaa tiettyjä asioita, kuten sähkökaapelien sijainnit voimalan rakennusalueella. Maakaapeleita vaarantavassa ja maakaapeleiden sijainnin selvittämisessä tulee työn suorittajan ennen maanrakennustöiden tai sähkökaapeleiden läheisyydessä tapahtuvan työn aloittamista varmistaa, sijaitseeko työskentelyalueella sähkökaapeleita. Sähkökaapeleiden sijainnit sekä tarpeelliset tiedot ja ohjeet saa maksutta verkonhaltijalta digitaalisessa muodossa. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 110 §.)

Maa-alueiden näkökulmasta aurinkovoimalahankkeita voivat estää etenkin Natura-alueet, muinaismuistomaat ja eri vesiluontotyyppien suojelualueet. Samoin aurinkovoimaloiden maisemallinen hyväksyttävyyys tulee varmistaa. Alueen kunnan tai kaupungin asettamat määräykset voivat asettaa rajoitteita ja erilaisia lupavaatimuksia toiminnalle, jotka ovat esitettynä kuvassa seitsemän (kuva 7). (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021a, 44, 45.) Lisäksi aurinkovoimalahankkeita estäviä tai pinta-alaa rajoittavia alueita ovat valtakunnallisesti arvokkaat maisema-alueet, jotka valtioneuvosto hyväksyi vuonna 2021. Myös maankäyttö ja rakennuslaki voivat tuoda omat haasteensa aurinkovoimalahankkeiden suunnitteluun. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021b, 12, 17.)

Maa-alueiden käyttö tai vuokraus voivat tuoda merkittäviä tuloja yksityisille maanomistajille. Tällöin maanomistaja saa esimerkiksi vuosittain vuokramaksuja vuokraamastaan maa-alasta. Maanvuokrauksesta saatavat tulot voivat korvata muista maatalousmuodoista saatavia tuloja tai tasapainottaa maataloudessa tapahtuvia hintojen muutoksia, mikä voi houkuttaa maanomistajia lähemmään mukaan aurinkoenergia-alan yrittäjyyteen. Lisäksi maa-alue kunnostetaan aurinkovoimalan käyttöön päätyttyä. (Renew Wisconsin 2021.)

Fortumin tuuli- ja aurinkovoimalan hankekehitysjohtajan Mikko Iso-Tryckärin mukaan suomalaiset maanomistajat ovatkin olleet kiinnostuneita aurinkovoimanhankkeista, joihin kunnat sekä viranomaiset ovat suhtautuneet positiivisella asenteella (Rytsy 2022). Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää energiayhtiö Ilmattaren 100 MW:n Loimaan aurinkovoimapuistohanketta, joka tulee sijoittumaan Loimaan kaupungin metsätalousmaalle. Kyseisen puistoalueen vuokraus tuo samalla kaupungille merkittäviä vuokra- ja verotuloja koko aurinkovoimalan elinkaaren ajan, mikä kertoo hyvästä yhteistyöstä uusiutuvan energian ja maa-alueiden vaihtoehtoisen hyödyntämisen mahdollisuuksista. (Kupila 2022.)

Eri maalajien kantavuus ja routivuus ominaisuudet on esitetty ja koottu taulukoon yksi (GTK 2022). RT-luokituksella tarkoitetaan rakennusteknistä luokitusta. Rakennuskelpoisuuteen vaikuttavat maan kantavuuden lisäksi myös kaittavuus, vedenläpäisevyys, pinnanmuodot, pohjavedenpinnan korkeusvaihtelut ja maaperän kerrosjärjestys (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007b, 41). Maaperän kantavuuteen vaikuttavat lisäksi mahdolliset tulvat ja maaperän eroosio (IFC 2015, 59).

RT-luokitellut maalajit	Ominaisuudet	
	Kantavuus	Routivuus
Moreeni		
Soramoreeni (SrMr)	Ei tiedossa	routimaton
Hiekkamoreeni (Mr)	Ei tiedossa	routimaton/routiva
Hienoaineksinen moreeni (HMr), (hieta-, hiesu- ja savimoreeni)	suuri	routiva
Karkearakenteiset kerrostumat (Jäätikkömuodostumat/Ranta-, joki- tai tuulikerrostumat)		
Pienet kivet, sora (Sr)	kohtalainen/suuri	routimaton
Hiekka (Hk)	kohtalainen/suuri	routimaton
Karkea hieta (Ht)	kohtalainen	routimaton/routiva
Hienorakenteiset kerrostumat		
Hieno hieta (HHT)	pieni-kohtalainen/painuminen suuri	routiva
Hiesu (Hs)	pieni-kohtalainen/painuminen suuri	routiva
Savi (Sa)	pieni/painuminen suuri	routiva
Liejuhiesu (LjHs)	pieni/painuminen suuri	routiva
Liejusavi (LjSa)	pieni/painuminen suuri	routiva
Eloperäiset kerrostumat		
Lieju (Lj)	painuminen suuri	routiva
Saraturve (Ct)	painuminen suuri	routiva
Rahkaturve (St)	painuminen suuri	routiva

Taulukko 1. Eri maalajien kantavuus ja routivuus ominaisuudet.

7.2 Telineiden asennus

Useimmiten aurinkovoimala-alueet ovat rakennettu jo valmiiksi häiriintyneisiin maaperiin, kuten maatalousmaille tai pelloille, joissa maaperää on jo aikaisemmin muokattu. Maanmuokkauksesta aiheutuneet onkalot edesauttavat routimista ja ilmataskut yhdessä veden ja kemikaalien kanssa voivat aiheuttaa maa-asenteisten paalutusrakenteiden ruostumista. Mitä pienempi maan resistiivisyys on, sitä paremmin maaperä johtaa sähkövirtaa ja sitä nopeammin teräspaalut korrosioituvat. Myös maaperän alhainen pH voi nopeuttaa ruostumista. Tämän vuoksi teräspaalut on usein kuumasinkittyjä, jolloin sinkki toimii uhrimetallina ja estää paalujen ruostumista. (Canada 2012, 60–64.)

Maa-asenteiset aurinkovoimalat voidaan kuitenkin asentaa lähes mihin tahansa maaperään eri paalutusmuotojen sekä niistä koostuvien mahdollisten hybridiversioiden ansiosta. Maa-asenteisten aurinkopaneelien telineet paalutetaan maahan yleisimmin joko lyömällä tai ruuvaamalla. (Smalley 2015a.) Sähköpostihaastattelun perusteella Solarigo Systems Oy:n projektipäällikkö Ville Vairisen mukaan telinerakenteet tulee saada perustettua noin 1,8 m:n syvyyteen (Vairinen 2022).

Telineistä aiheutuvat kuormitukset tulee laskea maaperän kestävyuden osalta. Ruuvipaalutuksessa, jossa paalut kierretään maahan, paaluja ei tarvitse upottaa maahan yhtä syväälle kuin perinteisessä lyöntipaalutusmenetelmässä. Kierrettävän ruuvipaalutuksen etuna on suuri kantokyky ja vähäinen maa-aineksen läpäisyvaatimus. Haittapuolena on kallis ja hidas asennus. (Smalley 2015a). Esimerkiksi EPV Energia Oy:n aurinkovoimalahankkeessa kierrepaalutus ei edellyttä turvetuotanto alueella vesipinnan alennusta ja näin ollen ojien syvennyksille alueella ei ole tarvetta (Mäkäräinen 2020, 10).

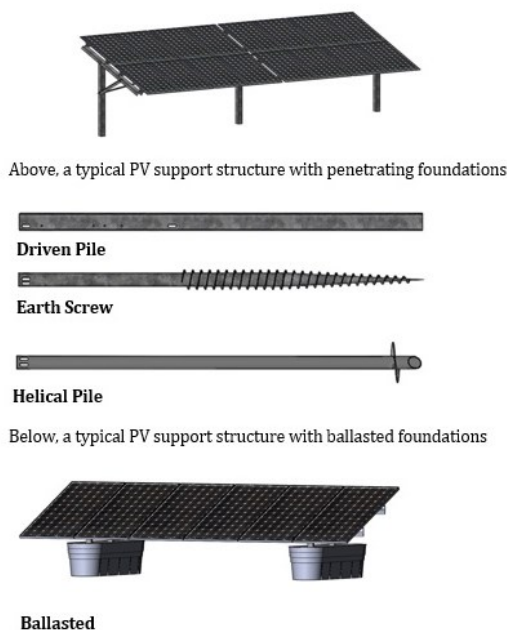
Vaihtoehtona sille, että maaperän olosuhteet tai rajoitukset eivät suosi maahan upotettavaa paalutusta, voidaan telineet asentaa myös betonipainojen tai muusta materiaalista olevien tukirakenteiden päälle. Menetelmä on kuitenkin

kallis, johtuen alustojen suuresta painosta ja tämän vaatimasta koneellisesta työvoimasta, jolloin myös maaperän tulee kestää raskaankaluston liikkuminen alueella. (Pickerel 2017.)

Sähköpostihaastattelun perusteella Solarigo Systems Oy:n projektipäällikön Ville Vairisen mukaan betonipainojen korvaajana voidaan hyödyntää esimerkiksi uusiokäytettyjä ratapaaluja, jolloin muuten murskaukseen menevät materiaalit saadaan uudelleen hyötykäyttöön. Kyseisellä menetelmällä on toteutettu Solarigo Systems Oy:n maa-asenteisia aurinkovoimaloita. Samalla käytettäessä ns. kelluvaa rakennetta voimalan kustannusten laskennassa ei tarvitse Vairisen mukaan käyttää yhtä suurta riskikerrointa verrattuna paalutettuihin asennusmenetelmiin. (Vairinen 2022.) Erilaiset aurinkopaneelien telineasennusten menetelmät on esitetty kuvassa kuusi (kuva 6).

Maa-asenteisten aurinkopaneelien asennuskulmat voivat voimalan sijainnin mukaan vaihdella 10–45 asteen välillä (IFC 2015, 74). Tällöin nyrkkisääntönä paneelirivien väliin jäävälle tilalle pidetään etäisyyttä, joka on kolme kertaa paneelitelien kokonaiskorkeus (Stapleton & Neil 2012, 95). Lisäksi yleisesti ottaen rivivälien katsotaan olevan oikeissa rajoissa, mikäli vuosittaiset tappiot varjostusten osalta ovat alle 1 % (IFC 2015, 69).

Telineiden asennuksen jälkeen paneelirivien aluset voidaan päällystää esimerkiksi kuorikkeella tai muulla katteella, jotka estävät kasvillisuuden muodostumista sekä alentavat tätä kautta riskiä paneelien varjostumiselle. (RT 103076, 2019, 11.)



Kuva 6. Eri paalutusmenetelmien vaihtoehdot telineasennuksille (Kuva: Bushong 2014).

7.3 Ympäristövaikutusten arviointimenettely

YVA-menettelyssä otetaan yleisesti huomioon maankäyttö ja sen muutoksesta aiheutuvat ympäristön muuttuvat vaikutukset, kuten vaikutukset hydrologiaan, eläimistöön, kasvistoon ja esteettömyyteen. Lisäksi huomioidaan jo olemassa olevat arkeologiset ja kulttuuriset tekijät sekä itse maaperän soveltuvuus kaavailtuun hankkeeseen. YVA-perustuu eurooppalaiseen direktiiviin ja kansallisiin lakeihin. (Räsänen 2020.)

Suomessa ei ole vielä yhtenäistä valtakunnallista ohjetta aurinkoenergia järjestelmien rakentamiselle. Teollisen kokoluokan ($P > 1$ MW) aurinkovoimalahakkeet eivät automaattisesti edellytä YVA-menettelyä, koska ne eivät kuulu YVA lain liitteen yksi hankeluettelo. YVA:ta voidaan soveltaa YVA lain liitteen yksi kohdan 8 b) mukaisiin aurinkoenergia hankkeisiin, joihin kuuluu energian ja aineiden siirtoa sekä varastointia vähintään 220 kilovoltin maanpäällisten voimajohtojen kautta. Tällöin maanpäällisten voimajohtojen pituuden on oltava yli 15

kilometriä. Mikäli aurinkoenergiaprojektissa ilmenee YVA-lain liitteessä yksi rinnastettavia merkittäviä ympäristövaikutuksia, voidaan yksittäistapauksessa hankkeen katsoa olevan YVA-velvollinen. YVA menettelyn päätöksen tekee toimialueen ELY-keskus. (Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus 2021a, 44.)

Esimerkiksi Suomen Luonnonsuojeluliitto (SLL) vaati YVA-selvitystä Pohjoismaiden suurimmasta suunnitteilla olevasta aurinkovoimalasta, Kalannin aurinkovoimalasta. SLL koki, ettei aurinkovoimaloihin liittyvää YVA-vaatimusta ollut tuotu riittävän selkeästi esille. Tämän seurauksena SLL vaati kahta YVA-lain kohtaa selvitettäväksi. ELY-keskus on päätöksessään ottanut huomioon hankkeen sijainnin, eri ominaisuudet, luonnon sietokyvyn sekä hankevaikutuksen luonteen. Ympäristövaikutusten katsottiin vastaavan ympäristövaikutuksiltaan tavansaomaista yleiskaavan mukaista rakentamista, jonka vuoksi hanke ei vaatinut YVA-menettelyä. Lisäksi YVA-lain sisältövaatimukset täyttyivät jo aiemmin tehdyistä selvityksistä ja hankealueen rajauksesta. Kyseissä hankkeissa jo rajatun ja poistettavan metsäalueen määrä on noin 200 ha. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021b, 1–3, 11, 13, 14, 16, 21.)

7.4 Standardit ja menettelyt

Alla olevassa taulukossa ja kuvassa on esitettyä yleisiä standardeja ja menettelyjä, joita tulee ottaa huomioon aurinkovoimalaa suunniteltaessa, käyttöönotossa ja huoltotöitä suorittaessa (taulukko 2 ja kuva 7). Jokainen hanke ja tuotantolaitos tulee arvioida omana kokonaisuutena, mutta tietyt standardit ja menetelmät toimivat aina suunnittelun tukena. Erityisesti maa-asenteisiin aurinkovoimaloihin liittyviä vaatimuksia, muutoksia ja rajoituksia käsitellään standardissa IEC TS 62738, mikä koskee lähinnä keski- ja suurjänniteverkkoon kytkettäviä voimaloita (SFS 2022b).

Standardi	Standardin sisältö
SFS-EN 62446-1:2016+A1:2018	Käyttöönottotestit, tarkastukset ja dokumentointi
SFS-EN IEC 62446-2:2020	Kunnossapito
IEC/TS 62446-3:2017	Lämpökameran käyttö tarkastuksissa
IEC/TS 62548	Ohjeet aurinkosähköpaneeliston suunnitteluun
IEC/TS 62738	Ohjeet aurinkosähköpaneeliston suunnitteluun (suuret voimalat)
SFS 6000-7-712	Aurinkosähköasennukset
SFS-EN 61724	Käytön valvonta
SFS-EN 50524:2021	Aurinkosähkövaihtosuuntaajien datalehdet

Taulukko 2. Aurinkovoimaloihin koskevia standardeja. Koottu aineistoista SFS (2022a) ja Tukes (2022).

Menettely (laki, vastuuviranomainen)	Aurinkoenergia		
	Teollinen aurinkovoimala (> 1 MW)	Keskikokoinen (10kW–1 MW)	Kotitalouskäyttö (<10 kW)
Alueidenkäytön suunnittelu			
Kaavoitus (MRL, Maakunnan liitto tai kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Suunnittelutarveratkaisu (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Poikkeamispäätös (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Tuotantolaitoksen suunnittelu			
YVA (YVAL, ELY-keskus)	Ehkä	--	--
Tutkimuslupa (Muinaismuistolaki, Museovirasto)	Ehkä	--	--
Natura-arviointi (LSL)	Ehkä	--	--
Tutkimuslupa (LunL, Maanmittauslaitos)	Ehkä	--	--
Tuotantolaitoksen rakentaminen, päivittäminen ja verkkoon liittäminen			
Voimalaitosten rakentamista ja käytöstä poistamista koskevat ilmoitukset (Sähkömarkkinalaki, Energiavirasto)	Kyllä	--	--
Rakennuslupa (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Toimenpidelupa (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	Ehkä	Ehkä
Rakennuksen purkulupa (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Rakennuksen purkamisilmoitus (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	--	--
Kajoamislupa (Muinaismuistolaki, Museovirasto)	Ehkä	--	--
Poikkeus luontotyyppien suojelusta (LSL, ELY-keskus)	Ehkä	--	--
Poikkeus rauhoitusäännöksistä ja eliölajien suojelusta (LSL, YM, ELY-keskus)	Ehkä	--	--
Ilmoitus Natura-alueeseen vaikuttavasta toimenpiteestä (LSL, ELY-keskus)	Ehkä	--	--
Hankelupa suurjännitejohdon rakentamiseen (Sähkömarkkinalaki, Energiavirasto, TEM)	Ehkä	--	--
Kiinteän omaisuuden käyttöoikeus			
Lunastuslupa (LunL, Maanmittauslaitos, valtioneuvosto)	Ehkä	--	--
Yhdyskuntateknisten laitteiden sijoittaminen (MRL, kunnan rakennusvalvontaviranomainen)	Ehkä	Ehkä	Ehkä
Ilmoitus johdon sijoittamisesta toisen vesialueelle (VL, ELY-keskus)	Ehkä	Ehkä	Ehkä
Kunnan suostumus (Sähkömarkkinalaki, kunta)	Ehkä	--	--

Kuva 7. Teollisen kokoluokan aurinkovoimalaan liittyviä menettelyjä (Kuva: Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021a, 42).

Aurinkovoimalat luokitellaan tyyppiluokkien mukaan, joita ovat tyyppiluokat A, B, C, ja D. Eri tyyppiluokille on asetettu erilaisia vaatimuksia mitoitustehon ja liittymispisteen jännitetason perusteella. Kuvassa kahdeksan on eriteltynä eri voimalaitosten tyyppiluokat (kuva 8). Kyseistä VJV2018 vaatimusta hyödynnetään voimalaitoksille, joiden hankintasopimus on tehty 19.5.2018 jälkeen (Fingrid 2018).

Tyyppi-luokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{max}
Tyyppi A	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW. ($0,8 \text{ kW} \leq P_{max} < 1 \text{ MW}$)
Tyyppi B	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 1 MW mutta alle 10 MW. ($1 \text{ MW} \leq P_{max} < 10 \text{ MW}$)
Tyyppi C	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 30 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{max} < 30 \text{ MW}$)
Tyyppi D	Liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV	tai (+)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 30 MW. ($P_{max} \geq 30 \text{ MW}$)

¹ Riippumatta liittymissopimuksen mukaisesta liittymispisteen jännitteestä, tyyppien A ja B voimalaitosten liittymispisteen jännitetasoksi katsotaan se jännitetaso, johon voimalaitoksen päämuuntaja liitetään tai jännitetaso, johon voimalaitos liittyy suoraan ilman päämuuntajaa.

Kuva 8. Voimalaitosten tyyppiluokitukset (Kuva: Fingrid 2018, 9).

7.5 Sähköverkkoon liittyminen ja liittymismaksut

Aurinkovoimaloiden liittämisessä sähköverkkoon koskevat yleiset turvallisuusmääräykset. Sähköverkkomääräykset vaativat, että verkonhaltijalla tulee olla vapaa pääsy turvakytkimelle, joka tulee sijaita aurinkovoimalan ja sähköverkon välissä (Tahkokorpi ym. 2016, 162). Turvakytkeminen rinnalla hyvin tärkeinä turvallisuusominaisuuksina ovat verkkoinverttereiden saarekekäytön esto sekä verkkokoodi. Saarekekäytönesto estää invertteriä syöttämästä sähköä verkkoon tilanteessa, jossa sähköverkolla ei ole referenssitajuutta tai -jännitettä. Verkkokoodilla puolestaan määritellään sähköverkon sallitut taajuus- ja jännitealueet

sekä aikajakso, jonka jälkeen verkkoon tahdistuminen on sallittua. (Mäkinen 2019, 4.)

Verkkoon liittymisen tärkeimmät kriteerit ovat verkon riittävä kapasiteetti, vakaus sekä läheinen sijainti ja saavutettavuus (IFC 2015, 62). Sähköverkkoon liityttäessä liittyjän laitteistolle ja liittyjälle voidaan asettaa ainoastaan tekniset vaatimukset, jotka ovat tarpeellisia liittynän toteuttamiseksi (Energiavirasto 2018, 5). Sähkömarkkina-alaissa määritetäänkin, että verkonhaltijan on pyynnöstä tai kohtuullista korvausta vastaan liitettävä sähköverkkoonsa voimalaitokset tai sähkökäyttöpaikat, jotka täyttävät tekniset vaatimukset (Sähkömarkkinalaki 1430/2014, 20 §).

Sähköverkon liittymismaksulla liittyjä saa sovitun liittymistehon mukaisesti siirtää tai vastaanottaa tehoa sähköverkkoon (Energiavirasto 2018, 2). Voimaloiden liittymisessä jakeluverkkoon on alueellisia eroja ja nämä tulee aina huomioida ja varmistaa tapauskohtaisesti oman alueen sähköyhtiöltä. Lisäksi ennen liittämistä sähköverkkoon tulee sähkön ostajan oltava tiedossa. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021a, 46.)

Jakeluverkon eri hinnoittelumenetelmät ovat vyöhyke- ja aluekohtainen hinnoittelu sekä tapauskohtainen hinnoittelu. Sähköverkkoon liityttäessä tapauskohtaista hinnoittelua käytetään pienjänniteverkossa, jos tarkasteluhetkellä alueella ei ole muita potentiaalisia liittyjiä, jotka voisivat hyödyntää rakennettua verkkoa. Lisäksi hinnoittelua käytetään keski- ja suurjännitteisten liittymien hinnoitteluun sekä vyöhyke- ja aluehinnoittelun ulkopuolelle jäävien pienjänniteverkon liittymiin. Tilanteessa, jossa liittyjiä on useita, tulee kapasiteettivarausmaksu periä kaikilta liittyjiltä tasapuolisesti, vaikka yksittäisen toimijan liittyminen edellyttäisi sähköverkon vahvistamista. (Energiavirasto 2018, 9,14,15.)

”Tapauskohtaisen hinnoittelun tulee noudattaa seuraavaa muotoa $a + b \times P$, missä

a on kustannus, joka sisältää välittömät verkkoon liittämistä aiheuttavat verkon laajennuskustannukset; ei sisällä verkon vahvistamisesta ja kehittämisestä aiheutuvia kustannuksia [€].

b on kapasiteettivarausmaksu, jolla huomioidaan olemassa olevan verkon keskimääräisiä vahvistuskustannuksia [€/kVA] tai [€/MVA]

P on liittyjän liittymisteho [kVA] tai [MVA]”. (Energiavirasto 2018, 14, 15.)

Kapasiteettivarausmaksulla on tarkoituksena huomioida vain liittymätehon aiheuttama keskimääräinen tarve verkon vahvemmalle siirtokyvyille ja siirtokyvyn kasvattamiselle. Verkon kehittämiseksi ja vahvistamiseksi katsotaan kaikki toimenpiteet, jotka tehdään olemassa olevalle sähköverkolle. (Energiavirasto 2018 8,9.) Verkon kehittäminen ja vahvistaminen mahdollistaa sen, että tuotantolaitos voi toimia ongelmitta myös sähköverkon jännitteen ja taajuuden vaihdellessa (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021a, 45).

Kapasiteettivarausmaksua ei voida periä tuotannon osalta, kun liitetään enintään 2 MVA:n tuotantolaitos verkkoon. Jos mukana on kulutusta, kapasiteettivarausmaksua peritään kulutuksen osalta. (Energiavirasto 2018, 26.) Sähkömarkkinalaissa määritetäänkin, että ”pienimuotoisen sähköntuotannon jakeluverkkoon liittämistä veloitettavaan liittymismaksuun ei saa sisällyttää sähköverkon vahvistamisesta aiheutuvia kustannuksia” (Sähkömarkkinalaki 236/2019, 56 §). Lisäksi pienimuotoinen sähköntuotanto ei vaadi sähköverkkolupaa (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 4 §). Puolestaan verkonhaltijan tulee periä liittymismaksussa tuotannon kapasiteettivarausmaksu yli 2 MVA:n tuotantolaitosten osalta, jolloin perittävä korvaus voi vaihdella ja päivittyä tapauskohtaisesti (Energiavirasto 2018, 26, 27).

Satakuntaliiton teettämän esiselvityksen mukaan teholtaan noin 0,1–2 MW:n voimalat voidaan liittää 20 kV:n verkkoon tai haaroihin. Puolestaan teholtaan noin 2–15 MW voimalat voidaan liittää 20 kV sähköasemaan. Suuren mittakaavan voimalat, teholtaan noin 10–15 MW, voidaan liittää 110 kV:n suurjänniteverkkoon tai 20 kV sähköasemaan. Teholtaan yli 15 MW voimalat ovat puolestaan liitettävä 110 kV verkkoon lähelle liittymispistettä. Kaikki kohteet tulee

muistaa kuitenkin huomioida tapauskohtaisesti sekä noudattaa kyseisille tehoalueille laadittuja määräyksiä. (Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017, 11,12.)

Samassa esiselvityksessä todetaan, että 20 kV keskijänniteverkkoonliittyminen voidaan tehdä yhdellä keskijännitemaakaapelilla. Tämä on suurissa aurinkovoimaloissa teknistaloudellisesti kannattavaa, mikäli voimalan ja liittymispisteen etäisyys on 10–15 MW:n tehoisissa voimaloissa maksimissaan noin 10–15 kilometriä. Puolestaan suurjänniteverkkoon liittyminen nostaa aurinkovoimalan kustannuksia. 110 kV verkkoon liittyminen nostaakin aurinkosähkön tuotantokustannuksia, euroa/MWh, noin 10 %. Kyseinen hinnan nousu johtuu korkeammasta liittymismaksusta ja liityntään tarvittavista kytkinlaitteistoista. (Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017, 11,12.)

Suomessa sähkömarkkinalakien toteutumista sekä markkinoiden kehittymisestä vastaa Energiavirasto, ja sähköverkkojen turvallisuudesta vastaa Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Energian hinnoittelun seuraaminen ja kokonaisvastuu energia-alan sääntelystä on työ- ja elinkeinoministeriöllä. (Lehto 2022.)

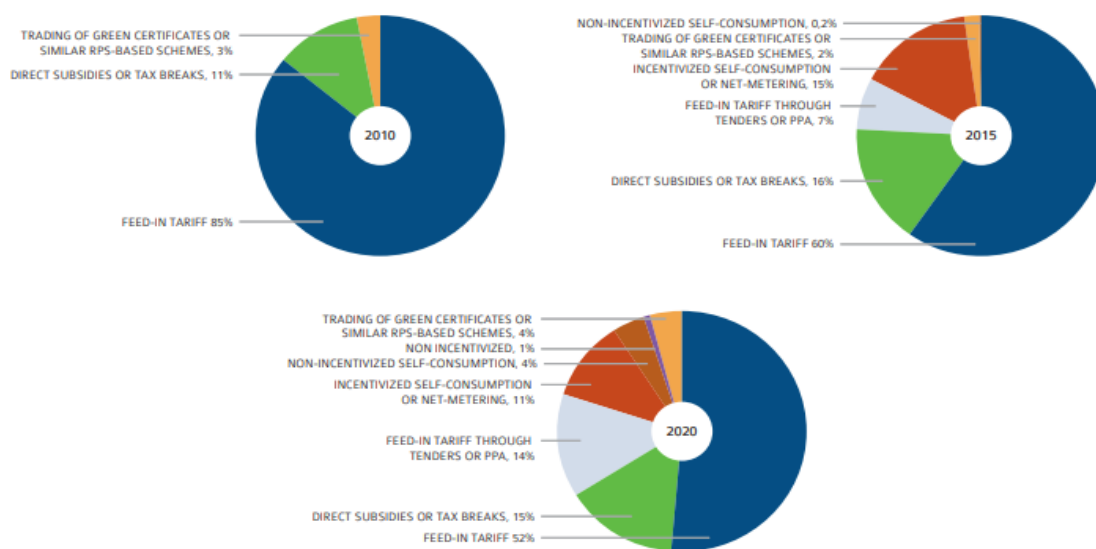
8 Taloudelliset tuet ja rajoitteet

8.1 Premio- ja syöttötariffijärjestelmä

Aiempina vuosina aurinkoenergiaa ei valittu mukaan syöttötariffijärjestelmään, johon kuului sähköntuotantoa muun muassa tuulivoimalla, biokaasulla, metsähakkeella sekä muilla erilaisilla puupolttoaineilla. Syöttötariffijärjestelmän korvaajaksi esitettiin tuolloin premiojärjestelmää, joka on teknologianeutraali tarjouskilpailujärjestelmä. Raja-arvoksi asetettiin tuotanto, jossa 800 000 kWh energiamäärällisesti vuodessa ylittävä tuotanto oli premiokilpailutuksen piirissä ja sen alittava tuotanto työ- ja elinkeinoministeriön tukien piirissä (Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017, 20, 21.)

Preemiojärjestelmä otettiin käyttöön keväällä 2019 ja sitä hoitaa Energiavirasto. Tarjouksia hyväksyttiin vuosituotannolle, joka ei ylitä energiamäärässä 1,4 TWh:ta eli 1.4 miljoonaa MWh:ta. (Motiva 2021b.) Preemiotukea maksetaan 12 vuoden ajalta kertaluontoisesti, minkä vuoksi vuonna 2019 järjestelmään mukaan päässeiden hankkeiden tuki on edelleen voimassa, eikä toiminnalle ole vielä kaavailtu jatkoa tulevaisuutta ajatellen. Ensimmäiseen preemiotuen piiriin valittiin huutokaupan perusteella seitsemän tuulivoima hanketta, joiden keskimääräinen tukipalkkio oli 2,5 e/MWh. (Ahola 2019, 19). Kuvassa yhdeksän on esitetty tukijärjestelmien vaikutusta aurinkovoimala markkinoiden mahdollistajana ja kannustajana (kuva 9).

FIGURE 3.2: EVOLUTION OF MARKET INCENTIVES AND ENABLERS: 2010, 2015, 2020



SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

Kuva 9. Markkinoiden mahdollistajat ja kannustajat maailmalla vuosina 2010, 2015, 2020. Tukijärjestelmillä on huomattava merkitys markkinoiden kehittämisessä (Kuva: International Energy Agency 2021, 33).

8.2 MW-kokoluokan aurinkovoimaloiden energiatuet

Business Finlandin energiatukea voi hakea yli 10 000 euroa ylittävistä uusiutuvan energian tai energiasäästön hankkeista. Tällöin Business Finlandin

myöntämän tuen osuus voi olla aurinkosähkön investointihankkeissa 15 %. Aurinkosähköhankkeissa pitkäaikainen sähkönmyyntisopimus tai sähkön pitkäaikainen ostaja tulee esittää, kun toteutetaan teholtaan 1–5 MW:n aurinkovoimalahankkeita. Mikäli voimaloissa hyödynnetään energiavarastoja, saa energiavarastojen kustannusten enimmäismäärä olla enintään 50 % aurinkosähköhankkeen kokonaiskustannuksista. Energiavarastoja hyödyntävät hankkeet edellyttävät samanaikaisesti investointia uusiutuvan energian tuotantokapasiteettiin tai koneisiin ja laitteisiin, joilla parannetaan energiatehokkuutta. (Business Finland 2022.)

Tukea ei voi kuitenkaan saada teholtaan yli 5 MW:n sähköntuotantohankkeista, jollei se sisällä uutta teknologiaa, tai hankkeista, jotka ovat käynnistetty ennen tukipäätöstä. Tukea ei myönnetä myöskään maataloille, joissa energiaa käytetään maatalouden tuotannon toimiin. Asunto-osakeyhtiöt ja asuinkiinteistöt jäävät myös tukipiirin ulkopuolelle. Toteutetun toiminnan rahoitus ei saa tulla valtion talousarviosta. (Business Finland 2022.)

Suuret aurinkoenergiահankkeet voivat kuitenkin saada hallitukselta kärkihanke- rahoitusta, joka voi olla suurimmillaan 40 % investointikustannuksista (Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017, 26). Yli 5 milj. euron investointikustannuksen ylittävät hankkeet voivat hakeutua TEMin eli Suomen työ- ja elinkeinoministeriö alaisuudessa olevaan Suomen kestävän kasvun ohjelmaan. Kyseisessä energiainvestointitukihakemuksessa katsotaan eri hankkeiden kustannustehokkuutta, toteutettavuutta, energia- ja päästövaikutuksia, teknologian tai hankkeen monistettavuutta sekä hankkeeseen ulottuvia muita vaikutuksia. Suomen kestävän kasvun ohjelma soveltuu näin ollen suurille aurinkoenergia hankkeille. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022a.)

Lisäksi Euroopan alue- ja rakennepolitiikka voi mahdollistaa aurinkovoimaloiden toteutumista Pohjois-Karjalan alueella. Joensuu kuuluu EU:n alueellisen valtion- tuen I tukitason tukialueeseen, mikä edistää investointien toteutumista ja alueellista kehitystä harvaan asutuilla alueilla. Enimmäistukitasot I tukialueen kohdalla

ovat: pienyritykset 40 %, keskisuuretyritykset 30 % ja suuret yritykset 20 %. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022b.) Tukirahoituksesta Suomessa vastaavat ELY-keskukset, Business Finland ja Leader-ryhmät. EU:n maaseuturahaston myöntämistä tukirahoista vastaavat niin ELY-keskukset kuin Leader-ryhmät. ELY-keskukset vastaavat maaseuturahaston lisäksi investoinneista, tuotekehityksestä ja toiminnan kehittämisestä. Business Finlandin vastuulla ovat innovaatiot sekä hankkeet, jotka tähtäävät kansainvälistymiseen. (Vainio 2021).

8.3 Sähköverotus

Kuvassa kymmenen on esitetty aurinkovoimaloiden sähköverotuksen käyttäytymistä eri kokoisilla tuotantolaitoksilla. Verovelvollisuus koostuu energiaverosta ja huoltovarmuusmaksusta. Verovelliseksi tulee liittyä ennen kuin voimalaitos tai sähkövarasto aloittaa toimintansa. Veroilmoituksessa ilmoitetaan vain tuotetun sähkön määrä. (Vero 2022.)

Järjestelmän koko	Alle 100 kW	100–2 000 kW	100–2 000 kW
Vuotuinen tuotantomäärä		alle 800 MWh	yli 800 MWh
Rekisteröityminen Tulliin		x	x
Veroilmoitus		Kerran vuodessa	Kuukausittain
Verovapaus	x	x	

Kuva 10. Sähköverotuksen käyttäytyminen eri kokoisissa tuotantolaitoksissa (Kuva: Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy 2017).

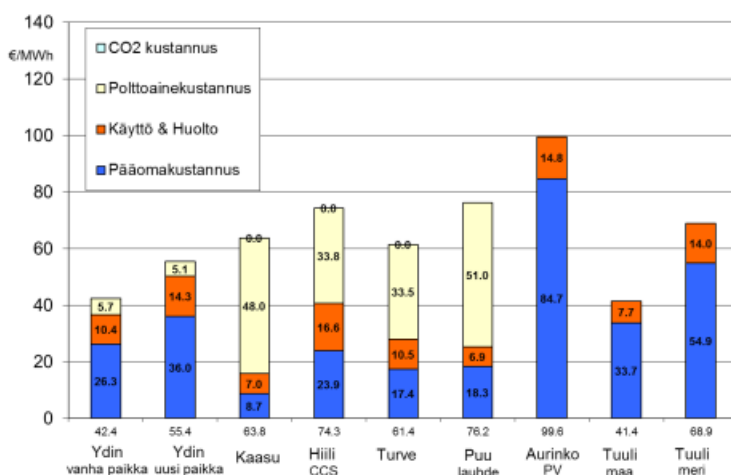
Kuten kuvasta 10 havaitaan niin pienvoimalaitokset, joiden nimellisteho on yli 100 kVA, mutta vuosituotanto ei ylitä 800 000 kWh:ta antavat tuotetusta sähköenergian määrästä yhden veroilmoituksen vuodessa, mikä johtuu enemmän valvonnallisista syistä. Tällöin pienvoimalaitokset rekisteröityvät sähkön pientuottajaksi. Vastaavasti nimellisteholtaan yli 100 kVA ja 800 000 kWh:n vuosituotannon ylittävät voimalaitokset antavat veroilmoituksen kuukausittain. Kuukausittainen ilmoitus on annettava vaikkei voimalaitos syöttäisi verkkoon yhtään sähköenergiaa. (Vero 2022).

Myöskään sähkövero tai huoltovarmuusmaksua ei tarvitse maksaa, mikäli pienimuotoinen sähkötuottaja ei kuluta itse tuotettua sähköä. Tällöin kustannukset maksaa kuluttaja. (Vero 2022.)

Mikäli aurinkovoimalan yhteydessä hyödynnetään sähkövarastoa, katsotaan sähkövaraston kuuluvan osaksi kyseistä voimalaa. Tällöin verkkoon syötetty sähköenergia tai mahdollisesti verkosta ladattu sähköenergia ilmoitetaan yhdessä voimalaitoksen tuotannon kanssa. (Vero 2022.)

9 Liiketoimintamallit sähkömarkkinoilla

Maa-asenteiset aurinkovoimalat ovat isoja ja kalliita investointeja (kuva 11). Näin ollen suoran pääoman sijoittaminen kerralla ei aina ole taloudellisesti mahdollista tai kannattavaa. Investointia on hyvä tarkastella energiayrittäjyyden erilaisista vaihtoehdoista, mikä auttaa samalla näkemään investointia useammasta eri näkökulmasta.



Kuva 1. Eri voimalatostyyppien sähköntuotantokustannukset, päästökauppa 0 €/tCO₂.

Kuva 11. Aurinkosähkön pääoma- ja käyttökustannus e/MWh -tarkastelussa. Ei sisällä päästöoikeuden hintoja (Kuva: Vakkilainen & Kivistö 2017, 11).

9.1 PPA (Power purchase agreement)

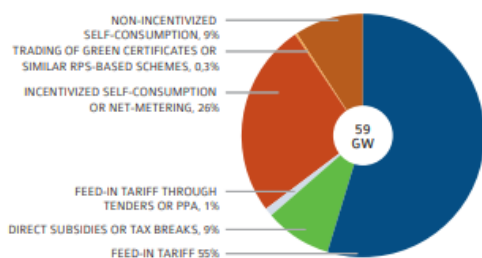
PPA soveltuu isojen sähkönhankkijoiden ohella, myös pienten kuluttajien keskuuteen. PPA-sopimuksessa sopimuskauden kesto voi olla esimerkiksi yli 10 vuotta eikä palvelunostajan tarvitse sijoittaa kerralla suurta pääomaa investoinnin hankintaan. Aurinkoenergiaan perehtynyt yritys siis vastaa aurinkovoimalan rakentamisesta, asennuksesta ja voimalan tuotantoriskeistä koko sopimuskauden ajan. Sähkön ostaja, esimerkiksi kunta, sitoutuu maksamaan aurinkosähköjärjestelmän tuottaman energian sovitun sopimuskauden ajan. (Valtonen 2020, 9.)

Jos aurinkoenergian tuotanto ei kata kaikkea sähkön ostajan energiantarvetta, on sähkönostajan ostettava puuttuva sähköenergian määrä sähkömarkkinoilla voimassa olevilla hinnoilla. Ylituotannossa sähkön ostaja myy ylimääräisen sähkön markkinoille. Vaihtoehtoisesti sähkösopimus voidaan tehdä myös kiinteästä tuotantomäärästä ja tällöin sähkön tuottajan on ostettava sähköä muualta, mikäli tuotannolla ei saada katettua vaadittua energiantarvetta. (Vattenfall 2021.)

Sähkön hinta on usein sama kuin ostajan nykyinen sähkön kokonaishinta sähkön siirtoineen ja veroineen. Sopimuksen avulla pystytään suojautumaan sähkön hinnannousun riskeiltä ja samalla välttämään sähköverojen sekä siirtohintojen maksuista. PPA-sopimuksen etuna on lisäksi se, että sovitun sopimuskauden loputtua aurinkovoimala siirtyy tuottamaan ilmaista energiaa palvelunostajan omistukseen. Mahdolliset huoltokulut tulee ottaa huomioon sopimuskauden päättyttyä. (Valtonen 2020.) Kuvassa 12 on esitetty, PPA-mallin esiintymistä keskityn ja hajautetun aurinkosähkön osalta (kuva 12).

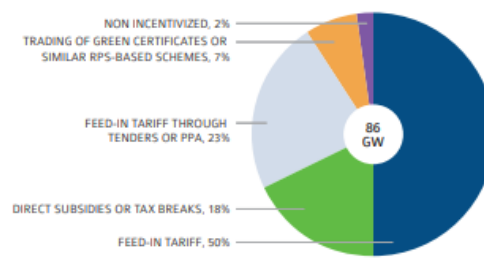
PV MARKET DRIVERS

FIGURE 3.1A: MAIN DRIVERS OF THE DISTRIBUTED PV MARKET IN 2020



SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

FIGURE 3.1B: MAIN DRIVERS OF THE CENTRALIZED PV MARKET IN 2020



SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

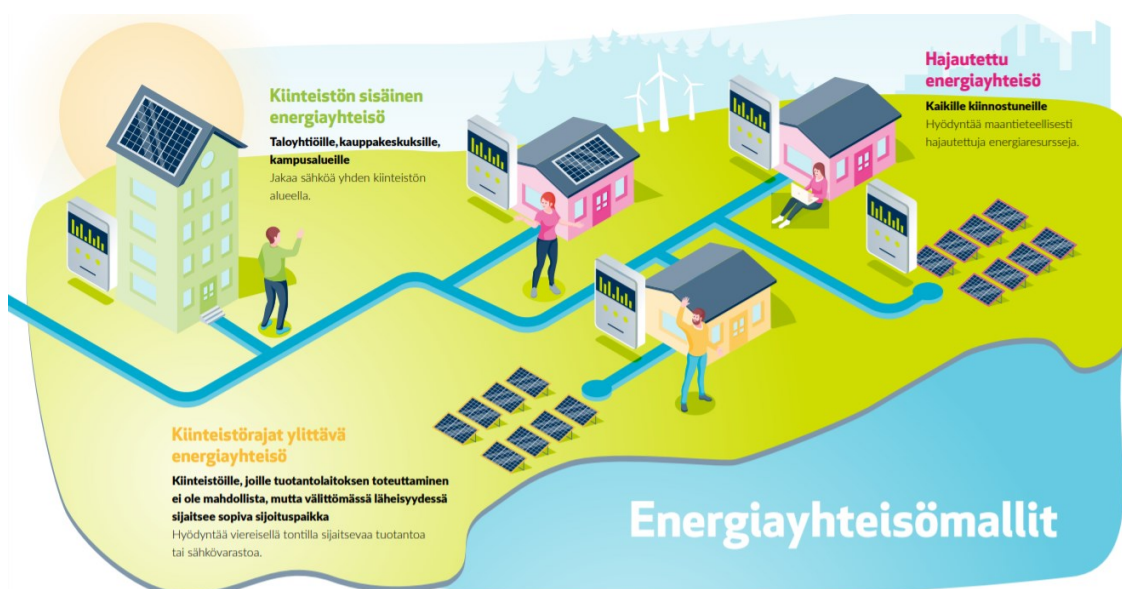
Kuva 12. Hajautetun ja keskitetyn aurinkosähkön kannustimet maailmalla (Kuva: International Energy Agency 2021, 32).

Kuvasta 12. voidaan havaita, että International Energy Agencyn teettämän selvityksen mukaan PPA-malli on huomattavasti yleisemmin käytetty liiketoimintamuoto keskitetyssä aurinkosähkön tuotannossa.

9.2 Energiayhteisöt

Energiayhteisössä ajetaan usein taloudellisen hyödyn ja oman sähköntuotannon lisäksi yhteisön ja ympäristön hyötyjä. Ne koostuvat eri toimijoiden tai alueiden yhteenliittymistä, jotka ovat moitteettomasti toimiessaan energiatehokkaita ratkaisuja tuottaa fossiilivapaata energiaa. Suomessa energiayhteisöt voidaan jakaa kolmeen erilaiseen kategoriaan, joita ovat kiinteistön sisäinen energiayhteisöt, kiinteistörajat ylittävät energiayhteisöt ja hajautetut energiayhteisöt. (Elenia & VTT 2021b.) Energiayhteisöjen luokittelu on esitetty kuvassa 13.

Sähkön taloudellinen hyöty, toimintavarmuus sekä sen rinnalla kulkeva energiamavaraisuus kannustavat usein energiayhteisöihin liittymistä. Etenkin aurinkosähkövoimaloiden pitkä elinkaari ja pienet huoltokustannukset sekä toimintavarmuus tekevät energiayhteisöihin liittymisestä erittäin varteenotettavan vaihtoehdon.



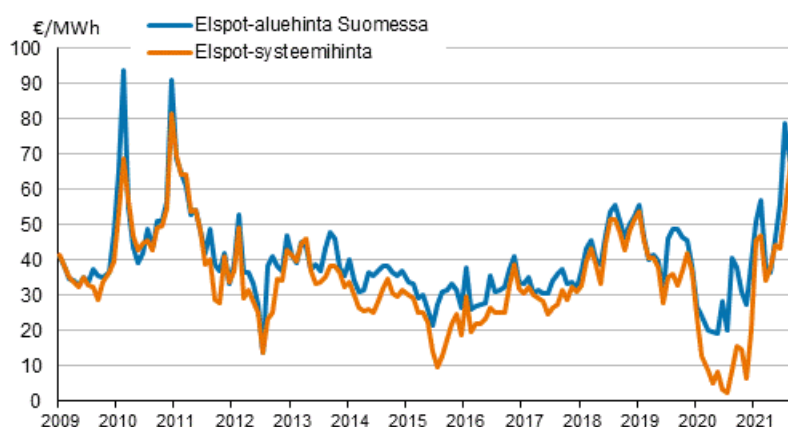
Kuva 13. Energiayhteisömallit (Kuva: Elenia & VTT 2021a, 7).

Kiinteistörajan ylittävät energiayhteisöt saivat 15.7.2021 sähkömarkkinalain mukaisen päivityksen (Järventausta 2021). Tässä päivityksessä pienimuotoinen ja erillisen linjan kautta tapahtuva sähköntuotanto jää luvanvaraisen sähköverkko-toiminnan ulkopuolelle (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 4 §). Tällöin teholtaan alle kahden megavolttiampeerin voimalaitos mahdollistaa ja tukee aurinkosähköjärjestelmien tulevaisuutta ja kannustaa investoimaan aurinkovoimaloiden suunnittelua sekä rakentamista.

Kiinteistörajan ylittävässä energiayhteisössä kuitenkin on ehtona, etteivät sähkökäyttöpaikkojen liittymisjohdot saa yhdessä erillisen sähkölinjan kanssa muodostaa rengasyhteyttä sähköverkkoon tai sähköverkkojen käyttäjille. Jos erillinen linja yhdistää vähintään kaksi jakeluverkkoon liitettyä käyttöpaikkaa toisiinsa, tulee tällöin toiminnasta luvanvaraista sähköverkkotoimintaa. (Järventausta 2021.)

9.3 Sähköä suoraan markkinoille

Sähkön hinta voi määräytyä Spot-hinnan tai erikseen sähköyhtiön kanssa sovitujen ehtojen mukaisesti. Tukkumarkkinoiden Spot-hinta määräytyy pohjoismaisen Nord Pool -sähköpörssin mukaan. Hinta määräytyy sähköpörssissä seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille vuorokautta edeltävänä päivänä. Tätä kuvaa yksikkö Elspot, joka muodostuu sähköpörssiin syötettyjen osto- ja myyntitarjousten leikkauspisteessä. (Nordic Green Energy 2021.) Verkkoon syötetty sähkö ei sisällä sähkön siirtoa tai veroja. Tämän seurauksena verkkoon syötetyn sähkön myyntitulot voivat jäädä usein pieneksi. (Motiva 2021c.) Kuvassa 14 on esitetty Elspot hintojen vaihtelua vuosina 2009–2021.



Kuva 14. Nord Pool Spot –sähköpörssin kuukausikeskiarvot taulukoituna (Kuva: tilastokeskus 2021).

9.4 Leasing- ja osamaksusopimus sekä joukkorahoitus

Osamaksusopimus on hyödyllinen vaihtoehto esimerkiksi kunnille. Investointia ei yleensä käsitellä velkana, jolloin pääomaa voidaan sijoittaa pitkällä aikavälillä muihin investointeihin. Kunta voi esimerkiksi suorittaa aurinkovoimalasta vuodessa neljä erillistä maksua, jolloin voimalan takaisinmaksuaika jakaantuu useaan pienempään erään. (Auvinen & Liuksiala 2020).

Puolestaan leasing-sopimuksessa aurinkovoimalasta maksetaan vuokraa tai käyttömaksua. Voimalan voi tällöin hankkia itselleen mahdollisesti sopimuskauden lopussa määriteltyä jäännösarvoa vastaan. (Auvinen & Liuksiala 2020).

Myös yksittäisten paneelien vuokraus on yleistynyt. Tällöin piensijoittajat ovat osana aurinkovoimalaa. Tällöin sijoittaja ei hae taloudellista voittoa vaan haluavat olla osana uusiutuvan energian tuottamista ja sen hyödyntämistä. Tällöin paneelin vuokra on sähkölaskun hyvitystä suurempi, ja aurinkovoimalayritys tuottaa toiminnallaan voittoa. (Vikman 2018.)

9.5 Aurinkosähköön sijoittaminen

Uusiutuvaan energiaan sijoittaminen, etenkin aurinkosähkön osalta on uusi ja paljon kysymyksiä herättävä aihe. Uusiutuvan energian sijoitusyhtiö Korkian ja sen uusiutuvasta energiasta vastaavan johtajan Mikko Kanteron mukaan sijoittajille riittää uusiutuvan energian hankkeissa 4–5 prosentin tuotto aikaisemman 5–8 prosentin sijaan (Lähtenmäki 2022). Esimerkiksi Korkian mukaan uusiutuvaan energiaan ja etenkin aurinkosähköön voi sijoittaa kolmessa eri vaiheessa, joita ovat: hankekehitys, voimalaitoksen/voimalaitosten rakentaminen ja valmiit tuotantolaitokset. Hankekehitysvaiheen loppupuolen sijoituksille luvataan lyhyellä aikajänteellä pääoman tuotoksi >10 % vuosittaista korkoa. Puolestaan rakennusvaiheen ja voimalaitoksen operoinnin osalta luku on pitkällä aikajänteellä 5–8 %. Sijoituksiin vaaditaan tosin suurta pääomaa, mikä karsii sijoittajat ammattimaisen sijoitusporukan keskuuteen. (Korkia 2022.)

Tulevaisuudessa myös uusiutuvan energian sijoittamista tarkastellaan EU:n taksonomian avulla. Euroopan Unioni on lähtenyt kehittämään taksonomiaansa, jonka tarkoituksena on säädellä rahoitusmarkkinoita sekä edistää sellaisia toimintoja, jotka tukevat ilmasto- ja ympäristötavoitteita. Taksonomian kautta sijoittajia ja heidän pääomaansa pyritään kohdentamaan ympäristöystävällisiin, kestäviin ja vastuullisiin hankkeisiin. Tämän avulla sijoitukselle voidaan määrittää aste,

jossa määritetään sijoituksen ympäristökestävyys ja varmistetaan toiminnan vastuullisuus. Tämän vuoksi finanssitoimijoiden on julkaistava tietoa heidän toteuttaman toimintansa kestävyysriskeistä sekä tietoa sijoitustuotteista, joita on mainostettu kestävinä sekä vastuullisina. Taksonomialla voidaan edesauttaa näin ollen kestävien ja ympäristöystävällisten sijoituskohteiden kehitystä ja kannattavuutta, kuten aurinkovoimaloiden kehitystä. Jotta taloudellisen toiminnan voidaan katsoa olevan EU:n taksonomian mukaista, tulee sen merkittävästi edistää yhtä tai useampaa ympäristötavoitetta ja olla aiheuttamatta merkittävää haittaa muille ympäristötavoitteille sekä oltava eettisten työ- ja ihmisoikeusperiaatteiden mukaisia. Kyseiset ympäristötavoitteet on esitetty kuvassa 15. Taksonomian on tarkoitus täydentyä sekä kehittyä vuosien 2022–2023 aikana, minkä vuoksi puhutaankin uudesta sekä ajankohtaisesta uudistuksesta. (WWF 2022; Ramboll 2022, 2–4.)



Kuva 15. EU-taksonomian ympäristötavoitteet (Kuva: Ramboll Finland 2022b, 4).

10 Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät

Opinnäytetyö pohjautuu tapaustutkimukseen. Tapaustutkimuksessa ei pyritä tilastolliseen yleistämiseen, koska yleistämistä tärkeämpää on tapauksen kokonaisvaltainen ymmärtäminen (Malmsten 2007, 73). Tapaustutkimuksen sisällä voidaan käyttää erilaisia aineistoja ja menetelmiä. Tämän vuoksi tapaustutkimus ei ole menetelmä, vaan tutkimustapa tai tutkimusstrategia, joka muodostaa perusteellisen ja tarkkapiirteisen kuvauksen tutkittavasta ilmiöstä. (Bamberg, Jokinen & Laine 2007, 9.)

Opinnäytetyön aineistoa kerätään aineistotriangulaatioon pohjautuen. Aineistotriangulaatiossa aineistoa kerätään eri lähteistä ja eri menetelmin. Aineistotriangulaatiossa tapaustutkija käyttää usein virallisia dokumentteja, sanomalehti- ja haastatteluaineistoja ja täydentää tietoa esimerkiksi erilaisilla tilastoaineistoilla. (Bamberg, Jokinen & Laine 2007, 24.)

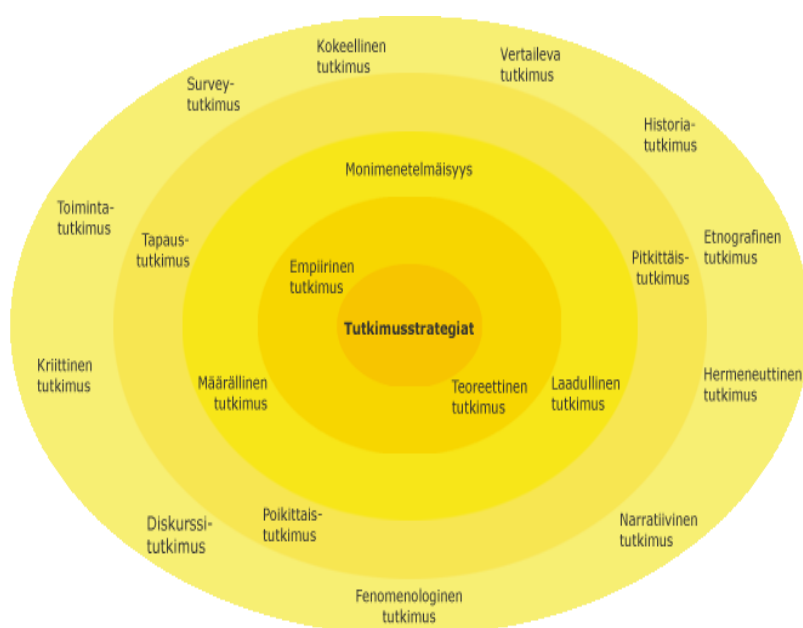
Opinnäytetyön aineiston keruussa hyödynnetään kyseisiä aineistonkeruumenetelmiä, jonka vuoksi voidaan todeta, että opinnäytetyössä hyödynnetään aineistotriangulaatiota osana kokonaisvaltaista tapaustutkimusta. Opinnäytetyön tietoperustan laadinnassa on hyödynnetty aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, raportteja, nettiartikkeleita, verkkolehtiä, diplomitoita ja hankeselvityksiä. Opinnäytetyön hallinnollisia puolia on tarkasteltu eri ministeriöiden ja virastojen asettamien vaatimusten mukaisesti. Lisäksi eri laitevalmistajien ja sähköyhtiöiden sivustot antavat tietoa käytetyistä menetelmistä ja komponenteista.

Haastattelut kohdennetaan tietoperustassa käsiteltävien aiheiden asiantuntijoihin, joiden tietoutta yhdistetään käsiteltyyn tietoperustaan case-tapauksen ja tutkimuskysymysten osalta. Asiantuntijoina voidaan opinnäytetyötä ajatellen pitää sähköyhtiöitä, aurinkovoimaloita rakennuttavia yrityksiä, ministeriöitä, virastoja ja laitevalmistajia.

Toimintatutkimus on yksi tapaustutkimuksen versio, ja se perustuu aina johonkin tapaukseen. Toimintatutkimuksessa vuorottelevat suunnittelu, toiminta ja toiminnan arviointi. Nämä ovat elementtejä, joita pidetään toimintatutkimuksen vahvuuksina. (Lehtonen 2007, 245, 246.) Tämän seurauksena aurinkovoimalan suunnittelu ja simulointi PV*SOL-ohjelmistolla toimivat osana toimintatutkimusta. Case-tapauksen simulointi osuuden pohjatietona hyödynnetään sähköisiä karttoja, kuten maanmittauslaitosta, GTK:ta ja Pohjois-Karjalan maakunta-kaavaa. Tämän jälkeen case-tapauksesta luodaan simulointi PV*SOL laskentaohjelmistolla, josta saatuja tuloksia voidaan tarkastella Excel tiedoston avulla eri parametrien osalta.

Lisäksi opinnäytetyössä hyödynnetään lopuksi määrällistä tutkimusta, koska simuloinnista saatuja tuloksia pyritään selittämään numeraalisesti. Määrällisessä tutkimuksessa tapausta selitetään numeerisesti tulosten, vertailujen ja syyseuraus-suhteiden avulla (Jyväskylän yliopisto 2015).

Kuvassa 16 on esitetty erilaiset tutkimusstrategiat. Kuten kuvasta voidaan päätellä niin opinnäytetyössä käytetyt menetelmät: tapaustutkimus, toimintatutkimus ja määrällinen tutkimus ovat sidoksissa toisiinsa, joka vahvistaa tutkimuksen luotettavuutta.



Kuva 16. Erilaiset tutkimusstrategiat ja niiden yhtäläisyydet toisiin tutkimusstrategioihin (Kuva: Jyväskylän Yliopisto 2014).

11 Case-kohteen kartoitus

11.1 Case-kohteen kriteerit

Kriteereinä case kohteen kartoituksessa ovat lukuisat jo tietoperustassa esitetyt tiedot teollisen mittakaavan aurinkovoimaloiden maankäytöstä, sähköverkkoon

liittymisestä ja liittymismaksuista. Yhtenä kriteerinä on mahdollisimman vähän routiva maaperä, mikä mahdollistaisi raskaankaluston liikkumisen alueella. Betonipainoihin perustava asennusmenetelmä vaatii koneellista työvoimaa, minkä vuoksi tämä asennusmenetelmä tulisi ottaa huomioon maaperää tarkasteltaessa. Samalla kantava maaperä helpottaa alueella liikkumista ja nopeuttaa kokonaisvaltaisesti aurinkovoimalan asennusta.

Verkkoliityntäpisteiden/-pisteiden sekä sähköasemien läheisyydet alentavat investointikustannuksia sekä mahdollistavat vakaan ja luotettavan sähkönsiirron aurinkovoimalasta sähköverkkoon. Samalla riski mahdollisille häiriöille sähköverkossa vähenee, jolloin aurinkovoimalan tuotantoa saadaan optimoitua. Lisäksi pitkät maakaapelit AC-kaapeloinnin puolella myös lisäävät loistehon määrää.

Lisäksi alueen läheisyydessä tulee olla olemassa olevaa tiestöä. Tämä helpottaa aurinkovoimalan asennusta, huoltamista, käyttöönottoa ja mahdollistaa pelastuslaitoksen tai sähköverkkoyhtiön nopean sekä turvallisen reitin hätä-/erotuskytkimille.

Alueen tulee myös olla kokonaisvaltaisesti avara sekä esteetön, jolloin paneelien avulla saadaan tuotettua paras mahdollinen teho. Alue ei saa myöskään sijoittua luonnonsuojelu, Natura 2000, muinaismuistomaa tai muuten kulttuurisesti merkittävälle alueelle eikä myöskään sijoittua tärkeiden pohjaveden ottoalueille.

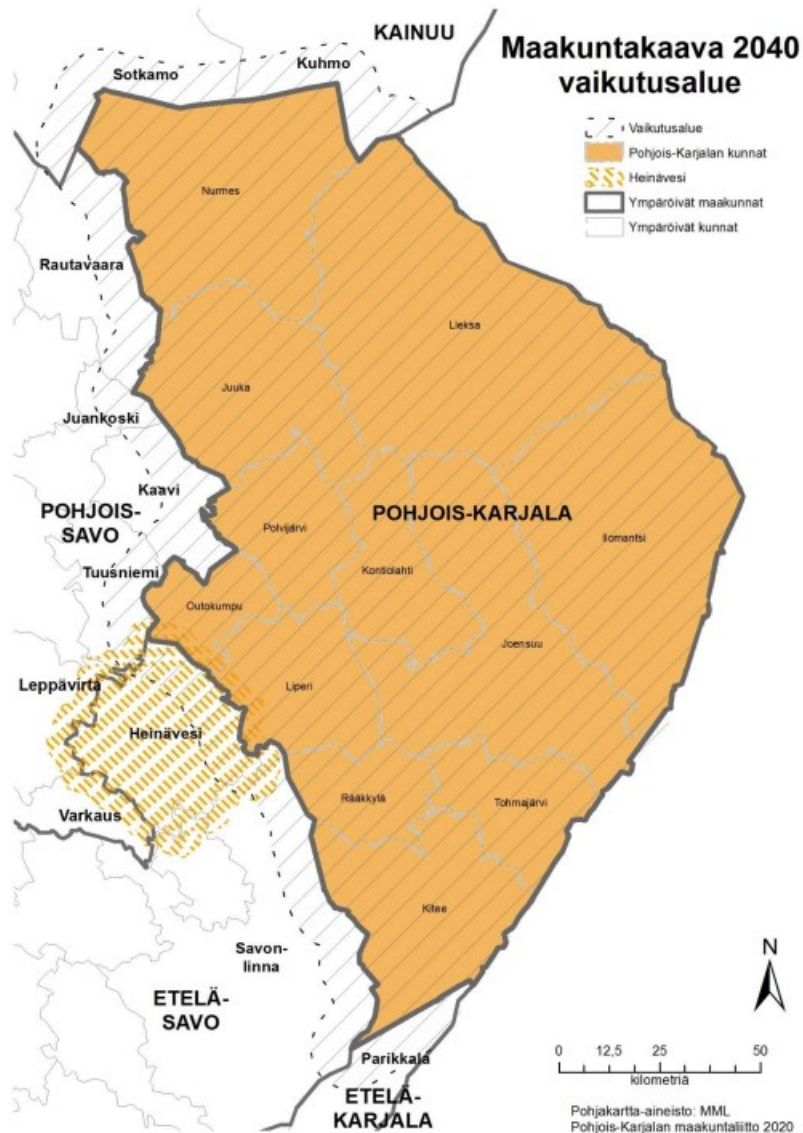
Kartoituksessa olisi myös hyvä välttää erittäin pölyisiä ja likaantuvia alueita. Pölyisyys ja lika sekä mahdolliset rakennukset ja puusto aiheuttavat varjostuksia, jotka voivat alentaa aurinkovoimalan tuotantoa merkittävästi. Myös ilmansaasteet voivat aiheuttaa korroosiota paneeleihin sekä muihin komponentteihin. Tätä ongelmaa ei katsota kuitenkaan merkittäväksi tekijäksi Pohjois-Karjalan alueella. Alueen valinta ei saa myöskään aiheuttaa haittaa alueen muulle olemassa olevalle toiminnalle tai lähialueen asukkaille.

Tämän opinnäytetyön case-kohteen vallinnan kriteerinä on lisäksi maa-alueen pinta-ala. Pinta-alan tulisi olla kokonaisuudessaan sellainen, jotta siihen olisi teknisesti sekä järkevästi mahdollista mallintaa tehollisesti 2 MW:n aurinkovoimala, jolloin vältetään pienimuotoisen sähköntuotannon raja-arvon ylittämistä. Tämä vaatii tietoperustaan pohjautuen 1.5–3 ha:n kokoisen maa-alueen. Lisäksi case-kohteen kartoituksessa pyritään välttämään alueita, jotka sijoittuvat kahden eri maanomistajan rajapisteeseen. Tällöin voimalan kartoittamisesta sekä useiden eri maanomistajien kanssa käytävästä kommunikoinnista koituisi opinnäytetyön puitteissa haastavaa. Lisäksi tarkasteltavan kohteen valinnassa pyritään välttämään peltoalueita, jotka ovat jo valjastettuna ruuantuotannolle. Tässä opinnäytetyössä kartoitettavan maa-alueen tulee lisäksi sijoittua taajamatoiminto alueiden ulkopuolelle.

Opinnäytetyön Case-kohteen valinnan yksi tärkeä kriteeri on saada valitun maa-alueen maanomistajalta hyväksytty lupa suorittaa PV*SOL-simulointi maanomistajan omistamalleen maa-alueelle sekä kuulla maanomistajan kommentteja sekä mielipiteitä kyseistä maa-alueesta. Tällä varmistuksella on tarkoituksena pyrkiä tilanteeseen, jossa simuloinnin tulosten tarkastelusta ja kriittisestä arvioinnista ei koidu haittaa maanomistajalle tai mahdollisesti muille opinnäytetyötä lukeville tahoille.

11.2 Case Rääkkylän Oravinlahti

Pohjois-Karjalan maakunta sijaitsee Itä-Suomessa. Maakunnan maakuntakeskuksena toimii Joensuu ja Pohjois-Karjalan maakunta on jaettu 13 eri kuntaan. Maakunnat on esitetty kuvassa 17. Pohjois-Karjalaan maakuntaa liittyi uusimpana Heinävesi.



Kuva 17. Pohjois-Karjalan kunnat kartalla (Kuva: Maakuntaliitto 2020).

Pohjois-Karjala on hyvin metsäistä aluetta, sillä maapinta-alasta noin 89 % on metsätalousmaata ja maakunnan maapinta-alasta noin 4 % on suojeltua. Lisäksi maakunnan metsäpinta-alasta noin 56 % on yksityisessä omistuksessa. (Jahkonen 2018.)

Aurinkovoimalan case-tapaukseksi valittiin Rääkkylän Oravinlahti, joka sijaitsee taajamatoiminto alueen ulkopuolella. Rääkkylän alueelta tarkasteltiin aluksi Kansalaisen karttapaikan avulla eri alueiden kiinteistötunnuksia ja

kiinteistörajojen kokoa sekä sijoittumista muuhun ympäröivään alueeseen. Muutamien ennalta valittujen maa-alueiden omistajuuksien tiedustelu suoritettiin maanmittauslaitoksen puhelinpalvelun avulla, josta saatiin selville eri kiinteistötunnuksilla olevien maa-alueiden omistajien tiedot. Tämä johti tilanteeseen, jossa maanomistaja antoi luvan käyttää hänen omistamiaan maa-alueita osana aurinkovoimala tarkastelua.

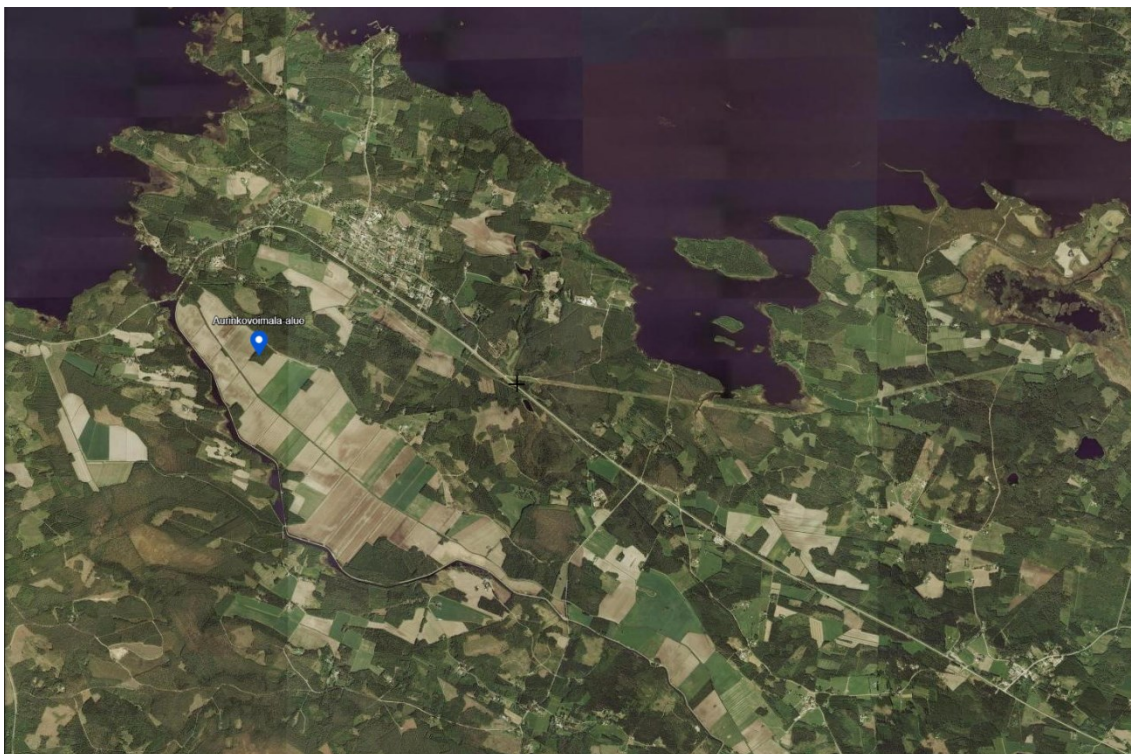
Rääkkylä sijaitsee Pohjois-Karjalan maakunnan eteläisessä osassa, jonka vuoksi alueen vuosittainen säteily määrä on hieman suurempi kuin Pohjois-Karjalan pohjoisilla alueilla. Lisäksi säteilytehon määrään vaikuttavat tarkasteltavan alueen sijoittuminen lounas-etelä ilmansuuntaan, mikä helpottaa samalla myös voimalan visuaalisen ilmeen muodostumista. Valitulla alueella ja sen läheisyydessä sijaitsee runsaasti peltobiotalousaluetta, jonka vuoksi alue on avaraa. Valitun kohteen alue ei sijoitu suojelualueille, Natura 2000 verkostoon, tärkeiden pohjaveden ottoalueisiin tai merkittäviin kulttuuriympäristöihin. Alue ei myöskään sijoitu Pohjois-Karjalan valtakunnallisesti arvokkaiden maisema-alueiden listalle. Aurinkovoimala-alue on esitetty kansalaisen karttapaikan ortoilmakuvan avulla kuvassa 18.

Kuten kuvasta 18 havaitaan niin tarkastelu toteutetaan metsäalueen tilalle ja tarkasteltavassa tilanteessa metsäaluetta raivattaisiin aurinkovoimalan alta. Valintaan vaikuttivat maanomistajan kertomat tiedot metsäkaistaleen laadusta sekä siihen kohdistuneista aiemmista suunnitelmista. Aurinkovoimalahankkeita, jossa metsäaluetta raivataan pois aurinkovoimalan alta on jo Suomessa esiintynyt. Tämä käy ilmi opinnäytetyön tietoperustasta.

Tässä kappaleessa käsitellään maanomistajalta saatuja tietoja sekä kommentteja kyseisen metsäkaistaleen ominaisuuksista. Maanomistajan mukaan metsäalue on ollut tarkoituksena raivata pelloksi jo aiempina vuosina. Metsäalueen läpi kulkee hiekkasärkkä, jonka seurauksena kyseisen alueen viljelyominaisuudet eivät ole halutulla tasolla. Tähän vaikuttavat alueen kuivuus ja kivisyys. Kivisyyden vuoksi myös alueen raivaaminen peltobiotalousalueeksi

on arvokasta, koska investoinnin suhde tuottoihin ei ole tällöin halutulla tasolla. Lisäksi kyseisen alueen taloudellinen puuntuottokyky on heikko, koska liian järeät ja runsas oksaiset puut laskevat puun arvonsaantia sahateollisuuden parissa. Tämän tilanteen aiheuttavat pääasiassa avara sekä aurinkoinen alue, jolloin puiden ei tarvitse kilpailla alueella olevasta valon määrästä. Näiden kyseisten maanomistajalta saatujen tietojen ja kommenttien pohjalta alueeksi päädyttiin valitsemaan kyseinen metsäkaistale, johon tarkempi tarkastelu tullaan suorittamaan.

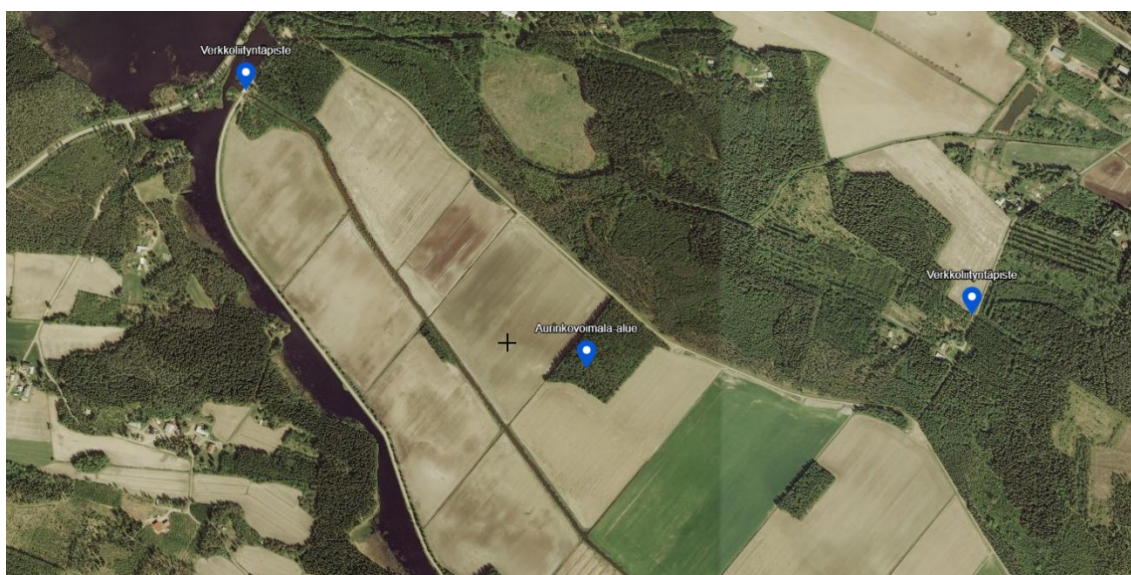
Tulee kuitenkin huomioida, jotta metsäkaistaleet etenkin avarilla alueilla voivat tietyissä kohteissa olla tärkeitä luonnon monimuotoisuuden kannalta. Tämä tilanne tulisi ottaa huomioon myös mahdollisessa lupaprosessissa ja jatkotoimenpidein tarkastelussa.



Kuva 18. Ortoilmakuva aurinkovoimalan sijoittumisesta kartalla (Kuvankaappaus: © Kansalaisen karttapaikka 2022).

Kuvassa 19 on esitetty kartalla keskijänniteverkon verkkoliityntäpisteet. Verkkoliityntäpisteiden paikat ovat saatu maanomistajan tietojen pohjalta.

Vasemman puoleiseen muuntajaan, joka sijaitsee pumppaamon kohdilla, tulee 20 kV:n sähkölinja. Toinen puistomuuntaja sijaitsee peltoalueen pohjoispuolella. Tietoperustaan pohjautuen liittymissä voitaisiin hyödyntää AC-kytkentäkoteloiden käyttöä, mikäli matkat aurinkovoimaloista puistomuuntajille ovat pitkiä. Muuntajien sijoittuminen aurinkovoimala-alueeseen näyttäytyy positiivisessa valossa.



Kuva 19. Ortoilmakuva aurinkovoimalan ja verkkoliityntäpisteiden sijoittumisesta kartalla (Kuvankaappaus: © Kansalaisen karttapaikka 2022).

Pohjois-Karjalan sähköisestä maakuntakaavan karttapalveluyhdistelmän kuvasta 20 havaitaan tarkasteltavan kohteen pohjoispuolella sijaitsevan myös energianhuollonalue, johon 110 kV:n sähkölinja päättyy.

Lisäksi samasta kuvasta voidaan havaita, ettei alue sijaitse taajamatoimintojen alueella tai luonnonsuojelualueella.

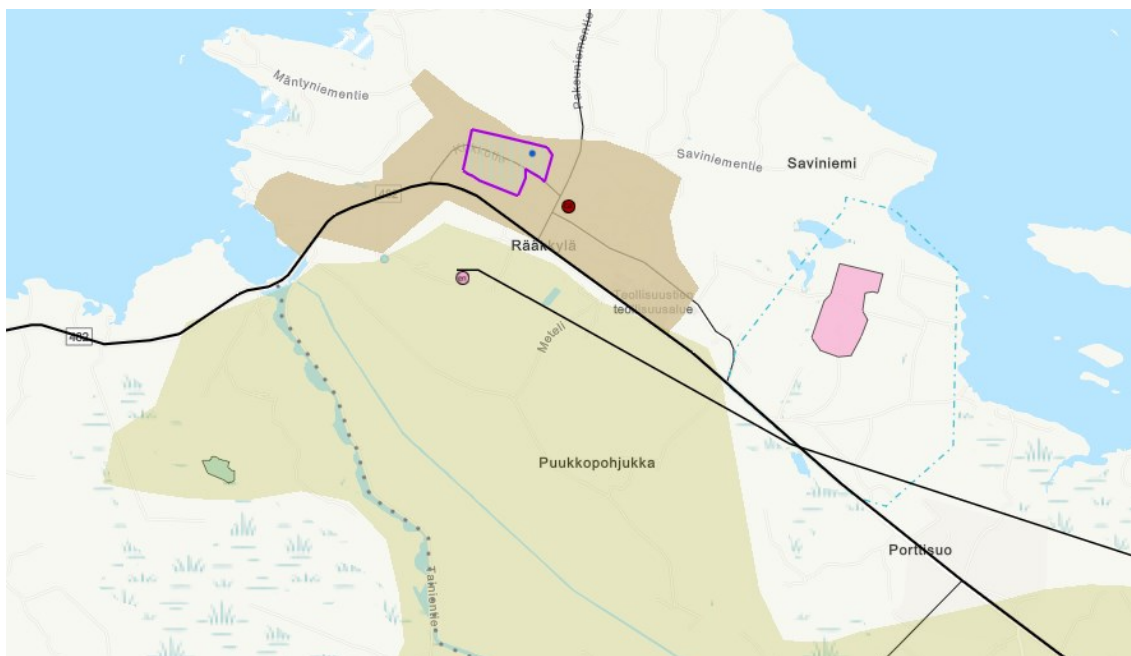
Alueen pohjoispuolelta kulkee 110 kV:n sähköverkko, joka päättyy energianhuollon alueeseen. Energiahuollon alue on sijoittunut Rääkkylän taajamatoimintojen eteläiselle puolelle. 110 kV sähköverkon sijoittuminen, energiahuollon ja taajamatoiminnon alue sekä muut huomioon otettavat tiedot, kuten mahdolliset luonnonsuojelualueet haettiin Pohjois-Karjalan

maakuntakaavan sähköisestä karttapalveluyhdistelmän. Kyseiset tiedot on esitetty kuvassa 20.

Case-tapauksen aurinkovoimalaa ei tarvitse kuitenkaan liittää 110 kV:n sähköverkkoon. Tämä johtuu aurinkovoimalan suunnitteilla olevasta 2 MW:n tehosta, jolloin voimala voitaisiin tietoperustaan pohjautuen liittää 20 kV:n verkkoon tai sen haaroihin. 110 kV:n sähkölinja siis antaa viitteitä alueella olevasta vahvemmassa sähköverkkotoiminnasta sekä mahdollistaisi kohteen laajemman tarkastelun mahdollisesti isompien aurinkovoimaloiden kohdalla.

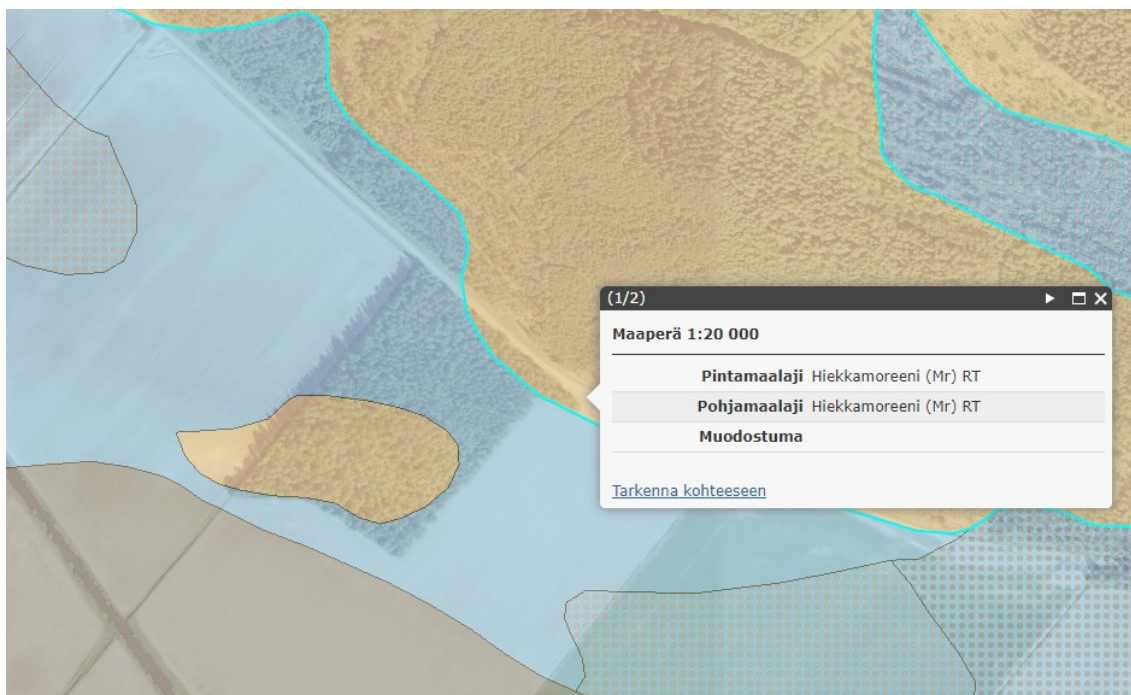
Pohjois-Karjalan Sähkönsiirto Oy:ltä kysyttiin sähköpostihaastattelussa aurinkovoimaloiden teknisistä vaatimuksista sähköverkkoon liittymisen osalta. Pohjois-Karjalan Sähkönsiirros ohjeistus perustuu palvelupäällikkö Toivasen mukaan jo tietoperustassa käsiteltyyn Fingridin ”Voimalaitoksen järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018” mukaisiin ohjeisiin. (Toivanen 2022). Ohjeistuksessa voimalaitokset luokitellaan tyyppiluokan A, B, C ja D mukaan. Dokumentti on esitetty liitteessä 1, jossa esitetään voimalaitos tyyppi B:n vaatimukset, mikä koskee juurikin case-kohteeseen taivoiteltavaa 2 MW:n voimalaa. Kuvasta 8. havaitaan, että tyyppi B:n liittymispisteen jännitetason on oltava alle 110 kV ja voimalaitoksen mitoutustehon on oltava välillä $1 \text{ MW} \leq P_{\text{max}} < 10 \text{ MW}$.

Toivasen mukaan jokainen voimalaitos selvitetään tapauskohtaisesti, jossa huomioon otetaan muun muassa voimalan sijoittuminen PKSS:n sähköverkkoon, verkon kapasiteetti ja suojaus sekä muut vaaditut toimenpiteet. Liittymiskohdan verkkoon määrittää verkkoyhtiö liittymisperusteiden mukaisesti. Lisäksi Toivasen mukaan liittymistä helpottavat verkon kapasiteetin sekä verkon vakauden näkökannalta liittymispisteen läheinen sjainti olemassa oleviin sähköasemiin. Kuitenkin kantaverkon kapasiteetti voimalaitoskokoluokassa C ja D voi asettaa omat rajoitteensa. (Toivanen 2022.)

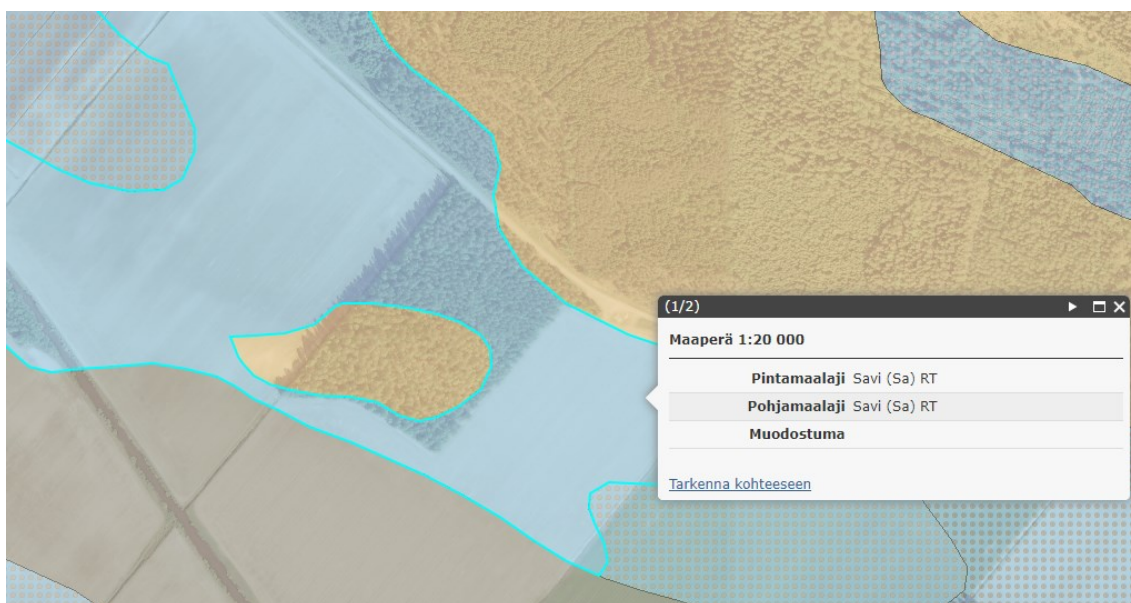


Kuva 20. Aurinkovoimala-alueen ympärille sijoittuvat toiminnot (Kuvankaappaus: © Pohjois-Karjalan maakuntakaavan karttapalveluyhdistelmä 2022).

Valitun alueen maaperätiedot on haettu GTK:n eli Geologian tutkimuskeskuksen sähköisestä maankamara karttapalvelusta. Maaperätiedot sekä maaperän alueellinen jakautuminen on esitetty kuvissa 21 ja 22. Samoista kuvista havaitaan aurinkovoimala-alueen sijoittuvan pääsasiassa kantavalle hiekkamoreeni pitoiselle pohjalle, jota ympäröi savi.



Kuva 21. Aurinkovoimala-alueen ympäröivät maalajit, hiekkamoreeni (Kuvankaappaus: © GTK maankamara 2022).



Kuva 22. Aurinkovoimala-alueen ympäröivät maalajit, savi (Kuvankaappaus: © GTK maankamara 2022).

12 Case-kohteen mallinnus PV*SOL-ohjelmiston avulla

Aurinkovoimala-alueen paneelien kattama leveys on 2D-mallinnuksen mukaan 131 metriä sekä pituus 173 metriä. Näin ollen aurinkopaneelien muodostamaksi pinta-alaksi muodostuu 2,27 ha, jonka päälle tulee kaapeloinnin, DC/AC-keräinlaatikoiden, invertterien sekä mahdollisen aitauksen vaatima lisätilantarve. Karkeana lukuarvona piipohjaisia aurinkopaneeleita käyttäville aurinkovoimaloille on tietoperustaan pohjautuen pidetty suhdannetta, jossa 1 MW:n aurinkovoimala tarvitsee toimiakseen noin 0.8–1.5 ha:n pinta-alan. Tähän lukuarvoon verrattuna suhdanne asettuu kyseisen pinta-alallisen rajauksen välille.

Aurinkovoimalan aurinkopaneelien asennuksista, riviväleistä, kallistuskulmista sekä telineiden etäisyyksistä tehtiin useita eri malleja, jotta eri parametrien vaikutukset sekä vertailu olisivat luotettavampia. Kyseisessä mallinnuksessa kaikki tuotettu sähköenergia syötettiin sähköverkkoon eikä kyseisessä tarkastelussa otettu huomioon esimerkiksi akkuvarastoinnin hyödynnettävyyttä.

Aurinkovoimala kuuluu tietoperustaan pohjautuen tehonsa puolesta heterogeeniseen ryhmittymään, koska suurissa järjestelmissä ja yli 100 kVA:n tehoisissa aurinkovoimaloissa asennuskulmat sekä telineiden asennot ovat harvoin täysin yhdenmukaiset, mikä johtuu usein maaperän vaihtelevuudesta tai lukuisten komponenttien lievistä epätasapainosta toisiinsa nähden. Samoin aurinkovoimala kuuluu tietoperustaan pohjautune hajautetun sähköntuotannon piiriin.

Paneeliketjut pyrittiin asettamaan maa-alueen pinta-alan ja muodon puolesta yhteen sekä mahdollisemman homogeeniseen ryhmittymään, missä paneelirivien pituudet pidettiin kaikkien aurinkopaneeliketjujen osalta saman mittaisina. Samalla paneelirivikohtaiset tuotannolliset erot sekä mahdolliset häiriöt ovat helpompia havaita järjestelmästä. Lisäksi myös inverttereiden asentaminen ja hallitseminen on helpompaa, kun paneelirivistöt muodostetaan yhdenmukaisiksi. Tietoperustaan pohjautuen sekä kyseisten tietojen perusteella

aurinkovoimalasimuloinnissa tulisi hyödyntää paneeliketjukohtaisten string-inverttereiden käyttöä, jolloin myös mahdolliset tuotannolliset tappiot kyseisen voimalan osalta saataisiin minimiin.

Aurinkopaneeleina käytettiin tehokkaita 600 Watin Si monocryalline eli yksikiteisiä aurinkopaneeleita. Tietoperustaan pohjautuen teollisen eli yli 1 MW:n aurinkovoimaloissa käytetään usein yli 500 Wp aurinkopaneeleja, minkä seurauksena kyseisen voimalan mallinnus suoritettiin tehokkailla 600 Watin aurinkopaneeleilla.

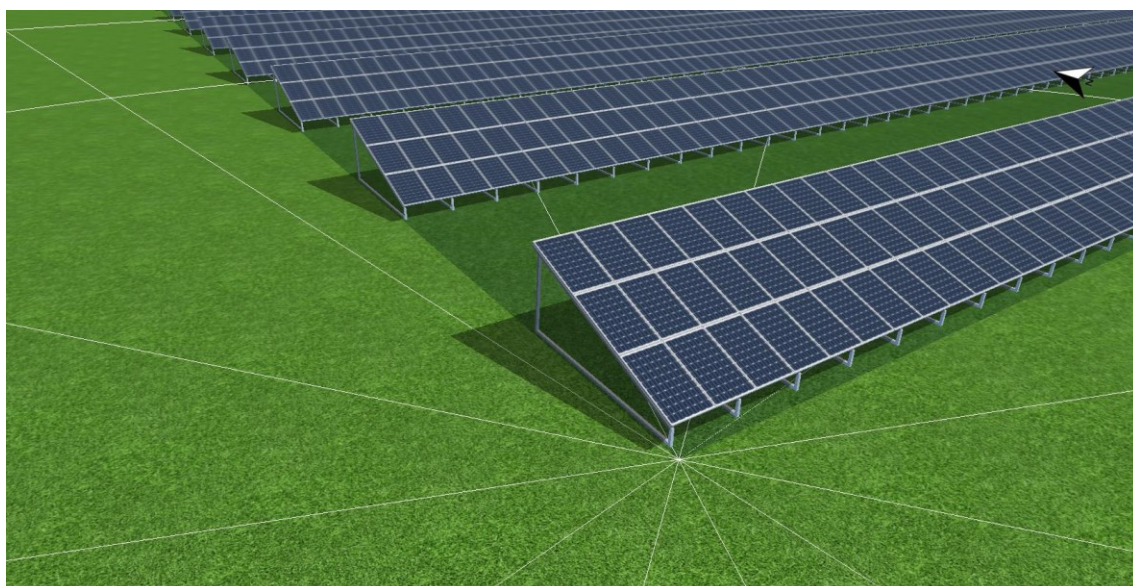
Paneeleita asetettiin päällekkäin paneelirivikohtaisesti kolme kappaletta, mikä esitetään kuvassa 23. Tällä ratkaisulla kyseiselle alueelle saatiin mallinnettua 1,98 megawatin voimala, jossa varjostukset jäivät vähäiseksi.

Kyseisessä 3D-mallinnuksessa ei tarvitse ottaa juurikaan ympäröivää miljööttä huomioon, koska alue on avara eikä merkittäviä varjostavia tekijöitä ole aivan voimala-alueen lähistöllä. Varjostusten aiheuttama tehon alenema esitetään prosentuaalisesti kuvassa 24.

Tarkasteluun ei valikoitu tiettyjä aurinkopaneeli tai invertteri merkkejä vaan valinnat tehtiin ohjelmiston ehdottamien suosituksen mukaisesti. PV*SOL-ohjelmistosta ei löytynyt vaihtoehtoiseen tarkasteluun monikiteisiä 600 Watin aurinkopaneeleita, mikä rajasi valinnan yksikiteisiin aurinkopaneeleihin. Tietoperustaan pohjautuen yksikiteisten aurinkopaneelien tehontuotto on parempaa sekä pitkäikäisempää monikiteisiin aurinkopaneeleihin verrattuna. Puolestaan monikitepaneelit ottavat hieman paremmin vastaan hajasäteilyä.

Tehontarkastelua olisi siis voitu suorittaa vastaavan kokoisella voimalalla myös monikiteisten aurinkopaneelien avulla, mikäli se olisi ollut mahdollista. Ongelmaksi olisi monikiteisten paneelien kohdalla todennäköisimmin muodostunut rajattu pinta-ala, koska aurinkopaneelien lukumäärää olisi täytynyt kasvattaa, jotta voimalan teho olisi saatua mallinnettua samoihin lukuarvoihin.

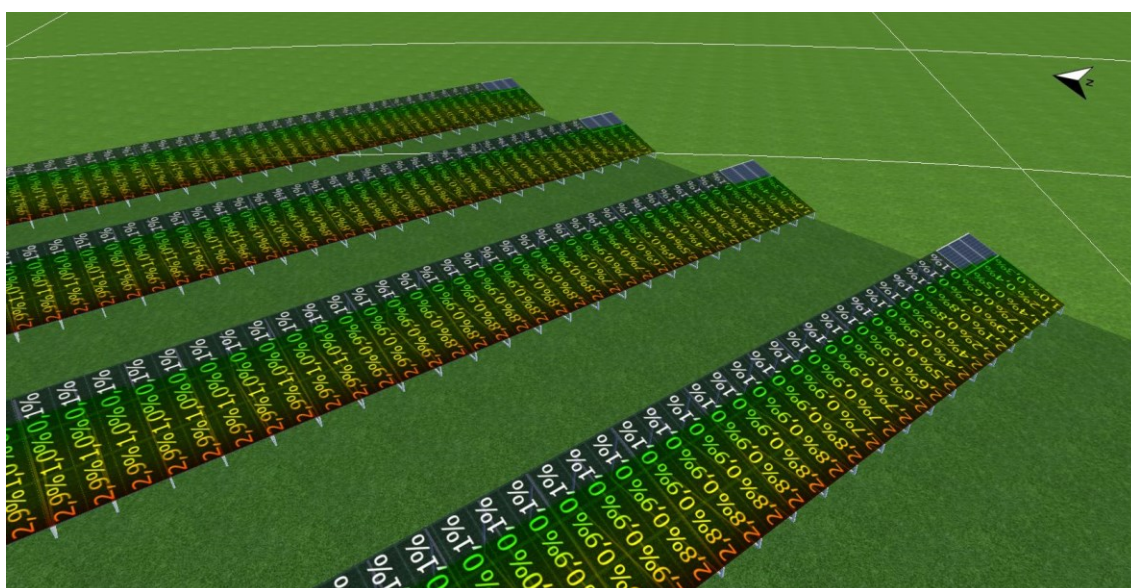
Mallinnetussa aurinkovoimalassa tulee inverttereiden sijoittamiseen kiinnittää huomiota, koska Suomen olosuhteet vaikuttavat aurinkovoimalan suunnitteluun. Invertterit tuottavat tietoperustaan pohjautuen hukkalämpöä, jonka vuoksi sulava lumi voi jäätyä ja vaurioittaa invertteriä, mikäli niitä ei säilytetä asianmukaisessa paikassa. Tämän vuoksi ne tulee sijoittaa omaan erilliseen tilaan, jossa on varmistettu tuulettuminen inverttereiden aiheuttaman hukkalämmön seurauksena.



Kuva 23. 2-D mallinnuskuva aurinkopaneelirivistä (Kuvankaappaus: PV*SOL).

Maa-asenteisten aurinkopaneelien asennuskulmat voivat voimalan sijainnin mukaan vaihdella tietoperustaan pohjautuen 10–45 asteen välillä. Aurinkopaneelien kallistuskulmaksi valittiin case-tapauksen osalta 20 astetta, johtuen pienemmästä varjostuksesta sekä tuulikuormasta jyrkempään asennuskulmaan nähdessä. Jyrkempää asennuskulmaa käytettäessä paneelirivien pituutta joudutaan kasvattamaan, koska jyrkempi asennuskulma vaikuttaa paneelirivien muodostamaan varjostukseen. Jyrkempi asennuskulma on usein rajoittava tekijä pinta-alallisen rajauksen vaatiessa. Toisaalta juuri tuulikuorman takia sekä painopuusteista asennusmenetelmää käytettäessä suositaan usein loivempia asennuskulmia.

Paneelirivien etäisyydeksi muodostui 10,5 metriä. Huomioon otettiin lisäksi aurinkopaneelien alin korkeus, joka asetettiin arvoon 0,7 metriä, johtuen Pohjois-Karjalan talvisesta lumipeitteisyydestä. Voidaan myös olettaa, että koska maa-alue sijaitsee metsämaapohjalla ja on maanomistajan mukaan tyypiltään kivikoinen niin alueella ei tarvitsisi kiinnittää merkittävää huomiota alueen niittoon kasvillisuudesta aurinkopaneelirivien välistä. Tietoperustaan pohjautuen aluetta voitaisiin kuitenkin tarvittaessa päällystää kuorikkeella tai muulla katteella. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi paneelirivien alustat.



Kuva 24. Aurinkopaneelien prosentuaaliset varjostukset 2-D mallinnuksessa (Kuvankaappaus: PV*SOL).

13 Aurinkovoimala mallinnuksesta saatujen tulosten tarkastelu

Voimalan teho saatiin mallinnettua mahdollisimman lähelle tavoiteltua kahden MW:n lukemaa, jolloin pysytään pienimuotoisen sähköntuotannon raja-arvoissa. Näin ollen voimalan osalta ei voida periä kapasiteettivarauskmaksua eikä voimalan perustaminen vaadi sähköverkkolupaa. Vuotuinen tuotantomäärä ylittää kuvan 25 tietojen perusteella 800 MWh:n raja-arvon, minkä vuoksi on

rekisteröidyttävä tulliin sekä laadittava veroilmoitus kuukausittain. Sähköveroa tai huoltovarmuusmaksua ei kyseisessä tapauksessa tarvitsisi maksaa, koska kaikki tuotettu sähkö siirrettäisiin suoraan sähköverkkoon eikä omiin kulutuskoh-teisiin.

Yleisesti ottaen sekä tietoperustaan pohjautuen aurinkopaneelien rivivälien kat-sotaan olevan oikeissa rajoissa, mikäli vuosittaiset tappiot varjostusten osalta ovat alle 1 %. Case-kohteen voimalassa varjostukset muodostavat vuosittain kuvan 25 perusteella 1.2 % prosentoin tappion. Tämän perusteella rivivälien ja valitun asennuskulman ei katsota aiheuttavan merkittävää tuotannollista tap-piota voimalan tuottoon, vaikka pinta-ala sekä aurinkovoimala-alue asettavat omat rajauksensa paneelirivien mallintamiselle.

Aurinkovoimalan tuotanto esitetään kuvassa 25. Kuvasta 25 havaitaan, että verkkoon syötettäväksi sähköenergian määräksi muodostuu 1 739 376 kWh eli 1 739 MWh vuodessa. Esimerkiksi Lempäälän energiayhteisön teholtaan 2 MW:n aurinkovoimala tuottaa arviolta vuodessa 1 800 MWh sähköä, joten jälki-tarkastelussa PV*SOL-ohjelmistosta saatua tulosta voidaan pitää luotettavana tähän lukuarvoon verrattuna (Lempäälän energia 2018). Lempäälän voima-loissa on puolestaan käytetty keskitettyjä inverttereitä sekä aurinkopaneelien lu-kumäärä on suurempi, mutta teho alhaisempi.

Kyseinen Oravilahteen mallinnettu voimala tulisi tietoperustaan pohjautuen liit-tää 20 kV:n sähköverkkoon tai sen haaroihin ja noudattaa liitteen 1 mukaista menettelyä. Mahdolliset liittymispisteiden paikat on esitetty kuvassa 19, mutta todellisen liittymispisteen päättää alueen verkkoyhtiö.

Voimala ei tulisi vaatimaan tietoperustaan pohjautuen YVA-selostusta, mutta voimalan maisemallinen hyväksyttävyyys tulisi varmistaa kunnalta. Lisäksi voi-malaa perustettaessa tulisi ottaa huomioon kuvan 7 mukaiset ehdot, jotka kos-kevat teollisen kokoluokan aurinkovoimala projektien menettelyitä.

Rääkkylä Oravilahti 1,98 MW

Simulation Results

Results Total System

PV System	
PV Generator Output	1 980,00 kWp
Spec. Annual Yield	877,09 kWh/kWp
Performance Ratio (PR)	90,82 %
Yield Reduction due to Shading	1,2 %/Year
Grid Feed-in	1 739 376 kWh/Year
Grid Feed-in in the first year (incl. module degradation)	1 739 376 kWh/Year
Standby Consumption (Inverter)	2 740 kWh/Year
CO ₂ Emissions avoided	816 219 kg / year

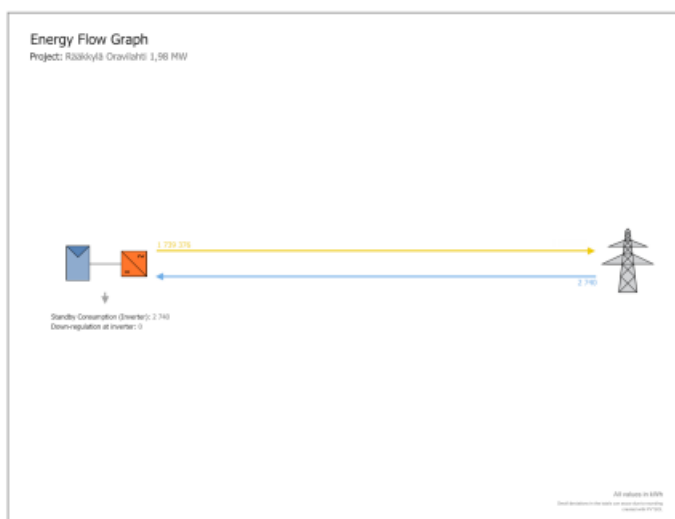


Figure: Energy flow

Kuva 25. Simulointi tulokset (Kuvankaappaus: PV*SOL).

Aurinkopaneelien lämpötila pysyy PV*SOL-ohjelmistosta Excel tiedostoon vietyjen tietojen pohjalta hallussa. Tämä esitetään taulukossa kolme (taulukko 3). Moduulin lämpötila ei ylitä pitkäkestoisesti tietoperustassa esitettyä 25 asteen lukemaan, jonka jälkeen tehon alenema olisi yleisesti 0.4 %/1 °C. Huomioon tulee ottaa kuitenkin PV*SOL-ohjelmiston tietokanta, joka perustuu vuosiin 1996–2015. Kyseisten taulukossa kaksi esitettyjen lämpötilojen perusteella lämpötiloilla ei koeta olevan merkittävää vaikutusta aurinkovoimalan mahdolliseen tehon alenemaan. Hetkellisiä ja lyhytaikaisia kausivaihteluita voi kuitenkin ilmetä.

Kuukausi	Ulkoilman lämpötila	Moduulin lämpötila
Tammikuu	-9.00	-8.74
Helmikuu	-8.45	-7.44
Maaliskuu	-4.00	-1.85
Huhtikuu	2.44	5.87
Toukokuu	9.64	13.80
Kesäkuu	14.04	18.54
Heinäkuu	17.84	22.20
Elokuu	15.33	18.79
Syyskuu	9.94	12.07
Lokakuu	3.64	4.53
Marraskuu	-0.98	-0.68
Joulukuu	-5.31	-5.26
Keskiarvo	3.83	6.07

Taulukko 3. Ulkoilman ja moduulien lämpötilat perustuen PV*SOL-ohjelmiston tietokantaan.

Aurinkovoimalan visuaalinen ilme kohteessa sekä voimalan yleisimmät tekniset tiedot esitetään kuvissa 26 ja 27. Simulointi on mallinnettu metsän päälle, jotta voimalan todellinen koko sekä sen sijoittuminen lähialueeseen tulisi paremmin esille. Yhden aurinkopaneeliketjun tehoksi muodostui 180 kWp, joita mallinnettiin yhteensä 11 kappaletta. Paneeleita alueelle sijoittui kokonaisuudessaan 3300 ja paneeliketjukohtaisten inverttereiden kokonaismääräksi muodostui 132 kappaletta. Aurinkovoimalasimulointi tehtiin yhden minuutin tarkkuudella, jolloin tuloksista saadaan luotettavampia, kuin käytettäessä tuntikohtaista tarkastelua.

Project Overview

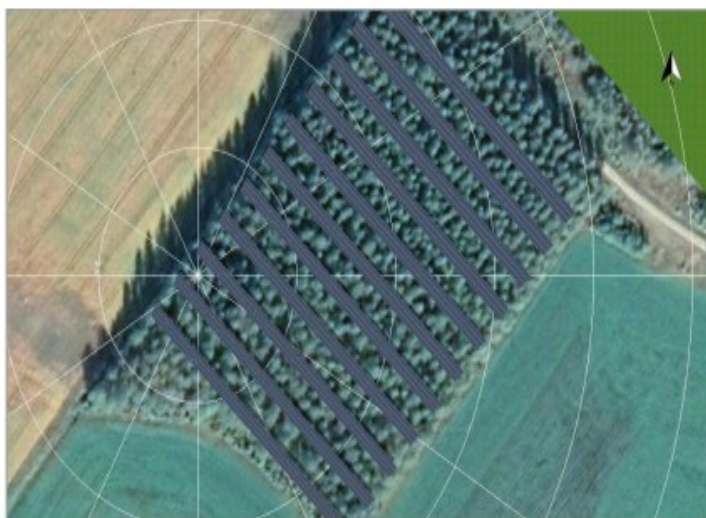


Figure: Overview Image, 3D Design

PV System

3D, Grid-connected PV System

Climate Data	Joensuu, FIN (1996 - 2015)
Values source	Meteonorm 8.1
PV Generator Output	1980 kWp
PV Generator Surface	9 339,4 m ²
Number of PV Modules	3300
Number of Inverters	132

Kuva 26. Aurinkovoimalan havainnekuva (Kuvankaappaus: PV*SOL).

Rääkkylä Oravilahti 1,98 MW

Set-up of the System

Overview

System Data

Type of System	3D, Grid-connected PV System
----------------	------------------------------

Climate Data

Location	Joensuu, FIN (1996 - 2015)
Values source	Meteonorm 8.1
Resolution of the data	1 min
Simulation models used:	
- Diffuse Irradiation onto Horizontal Plane	Hofmann
- Irradiance onto tilted surface	Hay & Davies

Module Areas

1. Module Area - Open Area (Map Section)-Area Southwest

PV Generator, 1. Module Area - Open Area (Map Section)-Area Southwest

Name	Open Area (Map Section)-Area Southwest
PV Modules	3300 x 600 Wp - Si monocrystalline - 1500 V (v1)
Manufacturer	Example
Inclination	20 °
Orientation	Southwest 222 °
Installation Type	Mounted - Open Space
PV Generator Surface	9 339,4 m ²

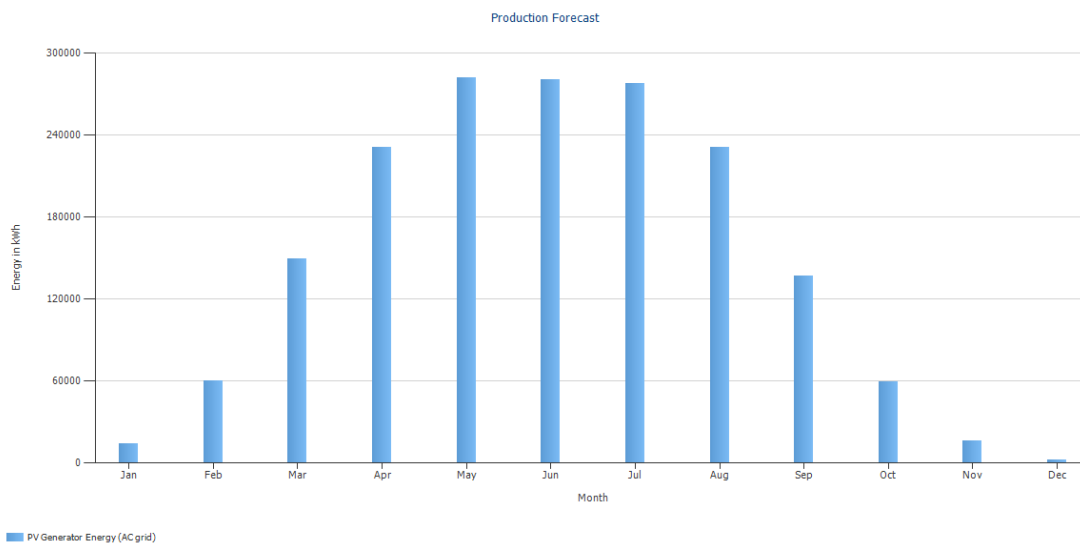


Figure: 1. Module Area - Open Area (Map Section)-Area Southwest

Kuva 27. Aurinkovoimalan toinen havainnekuva (Kuvankaappaus: PV*SOL).

Kuvassa 28. Esitetään aurinkovoimalan sähköenergian tuotanto kuukausikoh-
taisena diagrammina. Diagrammin tiedot tuotiin PV*SOL-ohjelmistosta ladattu-
jen tulosten kautta Excel tiedostoon, mikä mahdollistaa tulosten tarkemman tar-
kastelun. Taulukossa neljä (taulukko 4) tarkastellaan vuoden 2021 sähkön
Spot-hintojen perusteella aurinkovoimalan karkeaa taloudellista tuottavuutta.
Spot-hintojen tiedot ovat haettu omavoima.fi sivustolta osiosta pörssisähkön
kuukausihinnat. Taulukosta havaitaan aurinkovoimalan tuottavan parhaiten

kesä-, heinä- ja elokuussa, jolloin myös sähkön Spot hinta on ollut kesäkuuta lukuun ottamatta reilusti keskiarvon yläpuolella.



Kuva 28. Aurinkovoimalan kuukausittainen sähköenergian tuotanto (Kuvankaappaus: PV*SOL).

Kuukausi	Vuoden 2021 Spot hinta e/kwh veroton (alv0%)	Aurinkovoimalan verkkoon syötetty sähköntuotanto kWh	Aurinkovoimalan vuoden 2021 taloudellinen tuottavuus euroina verkkoon syötetyn sähkön osalta
Tammikuu	0.051	13980	716
Helmikuu	0.057	59619	3408
Maaliskuu	0.038	149620	5739
Huhtikuu	0.037	230860	8482
Toukokuu	0.046	281880	12952
Kesäkuu	0.056	280930	15774
Heinäkuu	0.079	278070	21895
Elokuu	0.068	230890	15751
Syyskuu	0.089	137020	12228
Lokakuu	0.065	58855	3819
Marraskuu	0.086	15848	1359
Joulukuu	0.194	1810	350
yhteensä		1739382	102474

Taulukko 4. Aurinkovoimalan taloudellinen tuottavuus vuoden 2021 Spot-hintojen perusteella.

Case kohteen aurinkovoimalasta ei voida periä kapasiteettivarausmaksua, koska voimalan teho ei ylitä 2 MW:n raja-arvoa. Voimalaa ei myöskään kyseisissä tilanteissa liitetä suoraan sähkönkulutuskohteisiin, jossa hyödynnettäisiin voimalan tuottamaa sähköenergiaa, joten kapasiteettivarausmaksua ei voida myöskään periä tämän rajauksen puitteissa.

Tarkasteltaessa menneitä tukimuotoja, case-kohteen aurinkovoimala olisi voinut hakeutua työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa olevaan preemiokilpailutuksen piiriin. Tämä olisi ollut mahdollista, koska voimalan tuotto ylitti kilpailutukseen vaadittavan 800 000 kWh:n vuosituotannon sekä alitti reilusti preemiojärjestelmän yläraja-arvon, joka oli 1.4 miljoonaa kilowattituntia. Mahdollisten vastaavanlaisten tukimuotojen ilmaantuessa tulevaisuudessa on hyvä siis tarkastella asiaa laaja-alaisesti, koska vastaavanlaisia tukipaketteja voi ilmaantua myös tulevaisuudessa.

IEA:n julkaiseman, National Survey Report of PV Power Applications in Finland 2019, raportin mukaan vuoteen 2019 mennessä Suomeen ei ollut asennettu vielä yhtään verkkoon kytkettyä Utility-scale-kokoluokan ($P > 10$ MW) maa-asenteista aurinkovoimalaa. Kyseissä raportissa 10–20 MW tehoisten verkkoon kytkettyjen maa-asenteisten aurinkovoimaloiden kustannukseksi on Suomessa arvioitu olevan välillä 0,5–0,6 [€/W]. Hinta ei sisällä muuntajien tai maanrakennustöiden osutta. (Ahola 2019, 12.)

Vaikka oletettava wattikohtainen kustannus laitettaisiin case kohteen tapauksessa oletetusti yläkanttiin arvoon 1,00 [€/W] tulisivat kyseisen voimalan investointikustannukset jäämään ilman muuntajien tai maanrakennustöiden osutta alle 2 miljoonan euron. Oletetaan, jotta voimalan voisi liittää kuvien 19 mukaisiin verkkoliityntäpisteisiin, jolloin muuntajien osuudesta tai sähköverkkoon liittymisestä ei aiheutuisi merkittäviä kustannuksia. Nykyisin wattikohtaisten kustannusten odotetaan olevan alhaisempi, johtuen alentuneista komponenttien kustannuksista.

Case-kohteen aurinkovoimala voisi hakeutua Business Finlandin energiatuen piiriin, koska voimalan kokonaisinvestoinnit ylittävät reilusti vaaditun 10 000 euron raja-arvon. Tällöin tuenosuus olisi 15 % investointihankkeista. Kyseisen case-tapauksen osalta tulisi kuitenkin esittää aurinkosähkön pitkäaikainen ostaja tai pitkäaikainen sähkönmyyntisopimus, koska voimalan teho asettuu kyseiselle ehdolle asetettuun 1–5 MW:n voimaloiden raja-arvoon.

Pitkäaikaisena sähköntuotannon ostajana voisi toimia esimerkiksi case-tapauksen osalta Pohjois-Karjalan Sähkö, koska sähköpostihaastattelun perusteella PKS:n aurinkosähköasiantuntija Mika Pirhosen mukaan PKS ostaa kaiken verkkoon syötetyn aurinkosähkön ilman tuotantokatkoja, missä hyödynnetään pörsisähkön mukaista hinnoittelua (Pirhonen 2022). Case-tapauksen voimalassa ei hyödynnetä energiavarastoja, jolloin kustannusten enimmäismäärä saisi olla Business Finlandin energiatukea hakiessa 50 % aurinkosähköhankkeiden kokonaiskustannuksista.

Hallituksen kärkihankerahoitus voi suurissa aurinkoenergiainvestointihankkeissa olla suurimmillaan 40 % kokonaisinvestointikustannuksista. Case-kohteen ei katsota luokituvan tehonsa puolesta kyseisen tuen piiriin. Myöskään case-kohteen ei katsota asetuvan työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa kuuluvaan kestävä kasvun ohjelmaan, koska investointikustannukset tulevat jäämään alle viiden miljoonan euron.

Energiayrittäjyyden näkökulmasta case-kohteen aurinkovoimalan liiketoimintamuodoiksi voisivat soveltua verkkoon syötetyn Spot-hintaisen sähkön ohella vaihtoehtoisesti osamaksusopimuksen solmiminen esimerkiksi paikallisen kunnan kanssa tai yksittäisten paneelien vuokraaminen esimerkiksi piensijoittajille. PPA-mallissa usein aurinkoenergiayritys vastaa voimalan rakentamisesta, asennuksesta sekä tuotantoriskeistä toisen yrityksen tai kiinteistön puolesta. Näissä edellä mainituissa ratkaisuissa maa-alueesta maksettaisiin vuokratuloja maanomistajalle, mikä voisi tasapainottaa maanomistajan muista tuotantomuodoista saatuja tuloja ja mahdollistaa energiayrittäjyyteen mukaan lähtemistä. Aurinkopaneelien vuokrausta laajemman sijoitustoiminnan rakentumista ei katsota rakentuvan kyseisen case-tapauksen ympärille

Puolestaan energiayhteisömalleista hajautettu sekä kiinteistörajat ylittävät energiayhteisöt olisivat vaihtoehtoisia toimintamalleja energiayrittäjyyden näkökulmasta. Kiinteistön sisäinen energiayhteisö ei sovellu kyseiseen kohteeseen maantieteellisistä sekä kiinteistörajauksellisten ehtojen seurauksena. Case-

kohteen voimala kuuluu pienimuotoisen sähköntuotannon raja-arvon piiriin. Tällöin tietoperustaan pohjautuen erillisen linjan kautta tapahtuva sähköntuotanto ei vaatisi luvanvaraista sähköverkkotoimintaa, mikäli sähkönkäyttöpaikkojen liittymisjohdot eivät erillisen linjan kanssa muodostaisi rengasyhteyttä sähköverkkoon tai sähköverkon käyttäjille.

Ennen toiminnan aloittamista tulisi selvittää paikallisen verkkoyhtiön suhtautuminen aurinkoenergian tuotantoon yksittäisten aurinkovoimaloiden osalta. Suhtautuminen aurinkoenergiaa kohtaan Pohjois-Karjalan alueella on positiivista. Tästä kertoo muun muassa se, että sähköpostihaastattelun perusteella PKS:n aurinkosähköasiantuntija Mika Pirhosen mukaan PKS ostaa kaiken verkkoon syötetyn aurinkosähkön ilman tuotantokattoja, missä hyödynnetään pörssisähkön mukaista hinnoittelua. (Pirhonen 2022.) Tämän vuoksi yhden vuoden tuotavuuden tarkastelu tehtiin Spot-hinnan perusteella. PKS ei ole vielä suunnitellut aurinkopaneelien vuokraamista tai PPA-mallin hyödynnettävyyttä aurinkoenergian tuotannossa (Pirhonen 2022).

Sähköpostihaastattelun perusteella palvelupäällikkö Raimo Toivasen mukaan PKS sähkönsiirto Oy ei voi verkkoyhtiön asemansa takia rakentaa sähköntuotantoa vaan pyrkii kehittämään jakeluverkkoa siten, että aurinkoenergian tuotanto Pohjois-Karjalan alueella olisi mahdollista ja kannattavaa. Suhtautuminen uusiutuvan tuotannon lisääntymisen toimialueella näyttäytyy myös tässä valossa positiiviselta. (Toivanen 2022.)

14 Pohdinta

Opinnäytetyön kuuteen tutkimuskysymykseen onnistuttiin vastaamaan perusteellisesti opinnäytetyön tavoiteltujen rajausten puitteissa. Opinnäytetyöstä selviää, mitä maa-asenteisen MW-kokoluokan aurinkovoimalan rakentaminen pääpiirteissään vaatii ja mitkä ovat siihen vaikuttavia teknillisiä, taloudellisia,

hallinnollisia ja energiapoliittisia reunaehtoja. Myös MW-kokoluokan aurinkovoimalan sijaintiin vaikuttavia tekijöitä esiintyy useamassa eri kappaleessa. Samoin liiketoimintamahdollisuudet tuotiin esille useasta eri näkökulmasta niin aurinkoenergian myymisen kuin sähkönsiirtämisen osalta. Lisäksi energiayrittäjyyden näkökulmat aurinkosähkön tuotannossa selviävät opinnäytetyön sisällöstä sekä asiantuntijahaastatteluilla pystyttiin vahvistamaan ja täydentämään tietoa case-tapauksen sekä tietoperustan tueksi.

Useampaan opinnäytetyön tutkimuskysymyksistä vastattiin tietoperustan kautta. Tämän vuoksi tietoperusta on muodostettu tarkasti ja kattavasti. Kappaleessa ”Aurinkovoimala mallinnuksesta saatujen tulosten tarkastelu” tarkastellaan pääasiassa mallinnuksesta saatuja tuloksia sekä niiden kytkeytymistä osana tietoperustaan sekä esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tämän vuoksi myös tietoperustan kautta vastataan tutkimuskysymyksiin, jotta tutkittavasta asiasta saadaan yksityiskohtainen ja tarkka kuvaus.

Asiantuntijahaastattelujen kohdehenkilöinä olivat Solarigo Systems Oy:n projektipäällikkö Ville Varinen, PKS Sähkönsiirto Oy:n palvelupäällikkö Raimo Toivonen sekä PKS aurinkosähköasiantuntija Mika Pirhonen. Voidaan todeta, jotta henkilöt ja heiltä saadut tiedot olivat luotettavia, tärkeitä sekä ajankohtaisia.

Voidaan todeta, että työstä olisi hyötyä kaikille aurinkoenergiasta kiinnostuneille ihmisille, yrityksille tai yhteisöille. Lisäksi opinnäytetyöstä on hyötyä hankkeelle, johon opinnäytetyö toteutettiin, koska alkuperäisen toimeksiannon suuntaus pysyi tavoitelluissa raameissa. Näiden tietojen pohjalta todetaan, että opinnäytetyössä päästiin suunniteltuihin tavoitteisiin sekä pysyttiin opinnäytetyön tavoittelussa rajauksessa.

Opinnäytetyöprosessin aikana haasteeksi koitui meneillä olevien aurinkoenergia hankkeiden seuraaminen sekä näistä ilmaantuvan tiedon kytkeytyminen muuhun tarkasteltavaan lähdeaineistoon, mihin vaikuttivat osittain erimieliset näkemykset eri toimijoiden keskuudessa. Uusien aurinkovoimalahankkeiden

seuraaminen vaati toimialan jatkuvaa tarkastelua, koska voimaloiden teknisissä toteutuksissa tapahtuu nopeaa kehitystä.

Aurinkoenergian kehitys etenee tällä hetkellä energiasektorilla huimaa vauhtia, joten opinnäytetyön ajankohta sekä tarkastelu teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden näkökulmasta osuu erittäin hyvin tämänhetkiseen sekä tulevaan energiapoliittiseen asemaan.

Myös poliittisella ja lainsäädännöllisellä puolella eletään jatkuvan kehityksen vaihetta, eikä aurinkoenergia ole vielä selvästi saavuttanut täysin yhtenäistä toimintamallia. Muun muassa Business Finlandin aurinkosähköhankkeiden energiatuen osuus pieneni 20 %:sta 15 %:iin vuoden 2022 kohdilla, minkä vuoksi etenkin aurinkosähkön poliittisella sekä lainsäädännöllisellä puolella tietoja joutuu seuraamaan tarkasti. Erityisesti EU:n taksonomian kehitys on vielä vaiheessa, mikä tulee tarkentumaan kuluvien vuosien aikana.

Opinnäytetyön aiheen tarkka rajaaminen oli haastava prosessi sekä asioiden esittäminen selkokielisesti etenkin ulkopuolisen lukijan näkökulmasta tuotti välillä haastavuuksia. Opinnäytetyön suurimman haasteen tarjosi valitun maa-alueen rajaaminen ja siihen liittyvät reunaehdot. Katsoin tämän haasteen kuitenkin kehittävänä kokonaisuutena, koska oma tietouteni maa-alueisiin liittyvistä haasteista, kriteereistä sekä erilaisten maalajien ominaisuuksista kasvoivat valtavasti. Lisäksi ymmärrykseni turvetuotantoaluiden eri käyttömahdollisuuksista ja vastakkainasetteluista syventyi opinnäytetyö prosessin edetessä. Myös Solarigo Systemsille kohdennetun sähköpostihaastattelun perusteella projektipäällikkö Ville Varisen mukaan eniten räätälöintiä aiheuttavat käytettävissä oleva maa-alue ja sen tuomat haasteet, itse kustannuskomponentit ja tuotanto ovat Vairisen mukaan hyvin mallinnettavissa.

Opinnäytetyön lähdeluettelo on kattava, koska tietoa joutui etsimään useista eri lähteistä sekä useammalla eri menetelmällä. Lähdeluettelo ei sisällä suinkaan kaikkea luettua tietoa, vaan luetteloon pyrittiin valikoimaan tuorein ja luotettavin

tieto eri aineistojen keskuudesta. Lähdeluettelon kattavuuteen vaikuttivat lisäksi työn monialaisuus sekä työn tietoperustaa haluttiin vahvistaa niin ulkomaisista kuin kotimaisista lähteistä.

Opinnäytetyö on kokonaisuudessaan hyödyllinen tietopaketti ulkopuolisille lukijalle. Case-tapaukset ovat aina yksilöllisiä, mutta niissä voivat toistua useammassa eri hankkeessa samanlaisia lainalaisuuksia. Hallinnollisia puolia ei voi sivuuttaa, joten niitä voidaan pitää lähes valideina hankkeessa kuin hankkeessa.

Uskon, että opinnäytetyötä lukiessa, lukijan tietous aurinkovoimaloiden mahdollisista vahvuuksista tai heikkouksista syvenee sekä lukija pystyy tarkastelemaan aiempaa mielipidettään aihetta kohtaan kriittisemmin. Tämän seurauksena aurinkoenergia, joka on samalla kasvavin energiatuotantomuoto tuo energiasektorille omat mahdollisuudet sekä haasteet, jotka olisi hyvä tuntea. Samalla se auttaa energiasektorin kokonaisvaltaista ymmärtämistä sekä lisää tietoutta omavaraisesta energiantuotannosta. Etenkin ennätyskorkeiden sähkönhintojen aikana huoli ulkomaisen energian riippuvuudesta on voinut muuttaa monien eri toimijoiden ja ihmisten näkemyksiä aurinkoenergiasta uudelleen.

Tekijä kuvailisi kyseistä opinnäytetyötä kehittävänä ja laaja-alaista oppimista syventävänä prosessina, joka auttoi ymmärtämään erilaisten hankkeiden laaja-alaisuuden useasta eri näkökulmasta. Todellisia hankkeita suoritettaessa sidosryhmien merkitys ja eri alan asiantuntijoiden tietouden sekä avun merkitys kasvavat. Tietoperustan laatiminen tutkimuskysymysten avulla auttoi tiedon laaja-alaisessa etsimisessä. Tämä auttoi syventymään opinnäytetyön aihetta kohtaan sekä vahvisti ymmärrystä aurinkovoimaloiden mahdollisuuksista ja haasteista. Opinnäytetyön prosessi auttoi kehittämään lisäksi tieteellisen raportoinnin kirjoittamista sekä kriittistä lähdetarkastelua.

14.1 Tulosten luotettavuuden tarkastelu

Tulosten luotettavuuden tarkastelussa analysoidaan mahdollisia ongelmakohtia, jatkokehitysmahdollisuuksia sekä epävarmuustekijöitä, jotka voisivat mahdollisesti vaikuttaa case-kohteen simuloinnista saatuihin tuloksiin tai reaalitilanteessa ilmaantuvan hankkeen toteutettavuuteen. Näitä ilmaantuvia asioita ei otettu mukaan opinnäytetyön tarkempaan tarkasteluun, jotta pysyttäisiin opinnäytetyön mukaisissa rajauksissa ja raameissa. Lisäksi tulosten luotettavuuden tarkastelu sisältää tietoja, jotka opinnäytetyötä tehdessä jättävät kokonaisuutta katsoen lisäselvityksiä tai tietoja, joista ei ole suoraa varmuutta. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi sääolosuhteet tai realistiset investointikustannukset.

Maanomistajan mukaan Oravinlahden peltoalue voi olla pölyinen etenkin kevätöiden ja kuivien keväiden aikana. Tämä on tekijä, joka tulisi ottaa tarkastelun alle, koska pölyisyys ja mahdollinen lika paneelien pinnalla voivat alentaa aurinkovoimalan hyötysuhdetta. Kuitenkin, mikäli merkittävää pölyyntymistä ilmaantuisi alueella eikä esimerkiksi sadevesi riittäisi aurinkopaneelien puhdistamiseen voisi tällöin kyseeseen tulla mekaaninen vesipuhdistus.

Tarkka taloudellinen tarkastelu, jonka avulla voimalan toteutettavuutta voitaisiin analysoida vaatisi perusteelliset tiedot eri komponenttien kokonaisinvestointikustannuksista. Myös eri valmistajien komponenteista olisi hyvä tehdä vertailua, jotta päästäisiin kustannustehokkuudeltaan parhaimpaan lukuarvoon. Samoin maanmuokkauksen kustannukset, maa-alueen raivaus, maa-alueen vuokrahinta sekä voimalan jäännösarvon nykyarvo tulisi ottaa huomioon. Lisäksi huomio tulisi kiinnittää laskentakorkokantaan, investointiaikaan, nettotuottoihin, kumulatiivisiin nettotuottoihin, sisäiseen korkoon, tuottojen ja kustannusten nykyarvoon sekä takaisinmaksuaikaan. Näiden tietojen pohjalta tarkka taloudellinen tarkastelu olisi mahdollista.

Todelliseen taloudelliseen tuottoon vaikuttavat myös sähkönhintojen muutokset, laitteiden mahdollinen vioittuminen, invertterien uusiminen, energiatuet, korot

sekä vuosittaiset vaihtelevat sääolosuhteet. Alueen todellisten olosuhteiden vaikutusta voimalan tehoon sekä eri komponenttien tehohäviöitä on hankalaa ennustaa. Luonnolliseen taloudelliseen tuotannon laskuun vaikuttavat kuitenkin aurinkopaneelien, invertterien sekä muiden komponenttien alentunut teho niiden elinkaaren aikana. Aurinkopaneelien tehonalenema on noin 0.5 % vuodessa.

Tarkemmassa tarkastelussa tulisi ottaa huomioon mahdollinen maaston kallistuskulma, joka sijoitettaisiin PV*SOL-ohjelmistoon. Lisäksi verkkoliityntäpisteen paikka tulisi varmistaa sähköyhtiöltä sekä verrata verkkoliityntäpisteen kannattavuutta ja taloudellisuutta voimalan kokonaiskuvaan.

Lisäksi havaitaan, että PV*SOL-ohjelmistolla ei voitaisi tehdä suuria, teollisen mittakaavan aurinkovoimaloita, koska ohjelmisto on rajoittanut maksimaalisten paneelien määrää. Tällaista usean MW:n aurinkovoimalaa kokeiltiin mallintaa turvetuotantoalueelle. Myöskään keskitettyjä inverttereitä ei havaita ohjelmistossa, joten vertailua string-inverttereiden ja keskusinverttereiden suhteen ei voida tehdä. Myös nykyisten markkinoilla olevien string-invertterien teho on kasvanut reilusti viime vuosien aikana. Tästä syystä tarkastelua olisi hyvä myös tehdä ohjelmistolla, jossa olisi mukana string-inverttereitä, joiden teho olisi yli 100 kW.

14.2 Jatkoselvitysmahdollisuudet

Tämän opinnäytetyön jatkokehitysmahdollisuudet ovat hyvin laajat. Tarkan taloudellisen tuotannon ja eri lupamenettelyprossien käsittelyn sekä selvitysten rinnalla opinnäytetyössä mallinnetusta aurinkovoimalasta voitaisiin myös laatia hiilijalanjäljen laskenta SimaPro -ohjelmistolla. Tällöin hankkeen todelliset kasvihuonekaasut (hiilidioksidiekvivalentti CO₂-ekv.) voitaisiin määrittää. Näin ollen ympäristövaikutukset saataisiin esitettyä numeraalisesti kaaviokuvaajan avulla, joka mahdollistaisi tarkasteltavan kohteen syvemmän sekä kriittisemmän

tarkastelun. Tämän avulla voitaisiin selvittää myös hiilinielujen, kuten opinnäyte-työssä kaavaillun pienen metsäalueen, korvaamista sekä kompensoimista au-rinkoenergian avulla.

Lisäksi maaperätutkimuksien avulla päätettäisiin voimalan lopullinen paalutus- menetelmä sekä syvyys. Aurinkopaneelirivien tarkin etäisyys tulisi laskea tar- kasti sille osoitetuilla kaavoilla. Maaperäanalyysi vaatisi tarkan selvityksen, joka tulisi toteuttaa ammattilaisten toimesta. Niinpä opinnäyteyön tarkastelussa käy- tettiin yleisiä teoreettisia ja yleisesti vakiintuneita arvoja.

Lisäksi yksi mielenkiintoinen ja tärkeä jatkoselvitysmahdollisuus olisi selvittää Pohjois-Karjalan eri maakuntien alueelta, jotta miten eri maa-alueiden vuokra- hinnat vaihtelevat hehtaarikohtaisesti. Samalla voisi selvittää, jotta voisiko niistä löytää tiettyjä syy-yhteyksiä, jotka auttaisivat maa-alueiden taloudellisen tarkas- telun määrityksessä sekä vertailussa. Samalla olisi mielenkiintoista selvittää mil- lainen olisi eri maa-alueita vuokraavien maanomistamien kiinnostus lähteä mu- kaan aurinkoenergia yrittäjyyteen. Eli olisiko maanomistajilla maan vuokrauk- sesta saatavien tulojen lisäksi kiinnostusta lähteä mukaan esimerkiksi osak- kaaksi aurinkovoimalahankkeeseen.

Samoin verkkoliityntäpisteestä tulisi tehdä oma dokumentointi, jossa ilmenee verkkoyhtiön määrittämä verkonliittymispiste sekä voimala-alueen etäisyys mui- hin asuin- ja aluerakennuksiin. Tästä löytyy internetistä hyvä esimerkki pdf do- kumentista ”Aurinkoenergian tuotantoalue, Heinineva/Lapua - Suunnittelutarve- ratkaisun hakemussuunnitelma”. Myös aurinkopaneelitestejä ja pieniä pilotoin- teja olisi hyvä tehdä alueella, kun suunnitellaan useiden MW:n aurinkovoima- loita.

Tarkempiin suunnitteluihin tulisi lisäksi valita useita eri alueita, jotta valitun alu- een vahvuudet ja heikkoudet tulisi kartoitettua tehokkaasti. Lisäksi toiminnasta olisi syytä laatia riskien hallintaprosessi eli niin sanottu Risk Management pro- cess. Lisäksi alueen lähistöllä oleville asukkaille olisi hyvä tehdä

aurinkoenergiaan liittyviä kyselyitä, kuulemisia sekä herättää keskustelua sekä yleistä mielenkiintoa aurinkoenergiaa kohtaan.

Lisäksi mielenkiintoista olisi selvittää, kuinka paljon säätövoimaista sähköenergiaa, kuten vesivoimaa, tarvitaan ja missä suhteessa, mikäli säästä riippuvaisen ja teholtaan vaihtelevan aurinkoenergian tuotanto kasvaisi merkittävästi ajan saatossa.

14.3 Tulevaisuuden näkymät

Tulevaisuuteen on kaavailtu mm. aurinkovedyn tuottamista valokatalyysin avulla. Vedyn avulla voitaisiin tasata energiantuotannon ja kulutuksen heilahteluja. Ideana on erottaa vesimolekyylistä vetyä ja happea kemiallisessa prosessissa, joka saa energiansa auringonvalosta. Tässä tuotantomuodossa vedyn ja polttokennon avulla tuotettua energiaa voitaisiin syöttää sähköverkkoon ja käyttää muiden materiaalien ja kemikaalien valmistukseen. (Tanskanen 2021.) Lisäksi tulevaisuudessa tullaan mahdollisesti huomaamaan perovskiitti, väriaineherkistettyjen sekä jo valmiiksi kierrettävässä muodossa olevien orgaanisten aurinkopaneelien ilmestyminen markkinoille (Aurinkotekniikka 2022).

Suomalainen osaaminen näkyy jo nyt vahvasti kotimaan ohella ulkomailla ja tulevaisuudessa aurinkovoimaloiden kysyntä tulee varmasti lisääntymään. Esimerkiksi suomalainen teknologiayhtiö Wärtsilä tulee toimittamaan aurinkoenergian varastointijärjestelmiä Yhdysvaltojen Kalifornian ja Havaijin osavaltioihin, joiden yhteenlaskettu teho tulee olemaan 500 MW. Hanke tulee olemaan yksi maailman suurimmista aurinkovoiman ja energiavarastojen yhteisprojekteista. (Lassuri 2022.) Uskon, että tällaisten isojen edelläkävijä- ja yhteishankkeiden avulla tullaan saamaan laadukasta tietoa akkuvarastojen hyödyntämisen mahdollisuuksista myös Suomessa.

Tulevaisuuden aurinkovoimaloiden suurimpina haasteina tulevat olemaan komponenttien toimitusvarmuus sekä vastuullinen ja taloudellisesti tehokas kierrättäminen. Kiinassa tuotetaan nyt jo yli 80 prosenttia maailman aurinkopaneeleista, mikä lisää riskikerrointa mahdolliselle komponenttipulalle. Esimerkiksi Kiinan Jangtse-joen suistoalueella, missä valmistetaan suurin osa maailman aurinkopaneeleista, määrättiin yli 13 miljoonaa ihmistä ulkonaliikkumiskieltoon koronapandemian takia. Lisäksi alue on aurinkopaneeleissa käytettävien puolijohteiden yksiä tärkeimpiä toimittajia. (Tanninen 2022.)

Tämän seurauksena, etenkin suuremmat rajoitukset alueille, joissa valmistetaan merkittäviä määriä aurinkopaneeleita tai niiden komponentteja, voivat hankaloittaa merkittävästi toimitusketjuja ja hintojen alaspäin menevää suhdannetta. Tällaiset tuotannolliset esteet komponenttien saatavuudessa heijastuvat toimitusketjujen volyyymiin ja sitä kautta eri komponenttien nouseviin kustannuksiin. Tällöin myös aurinkovoimaloiden taloudellinen tuottavuus heikkenee, mikä tulisi ottaa huomioon mahdollisia riskitekijöitä kartoittaessa.

Lisäksi sähkönhinnan muutokset ja muuttuvat ulkopoliittiset tekijät voivat tuoda uusia haasteita tulevaisuudessa. Aurinkovoimaloiden rakentaminen näyttäytyy nykyisillä markkinahinnoilla kuitenkin vakavasti varteenotettavalta vaihtoehdolta. Kun tarkastellaan Spot-sähkön kuukausikeskihintoja niin huomataan, jotta heinäkuussa 2022 verkkoon myydystä sähköstä (snt/kWh alv0%) sai jopa yhdeksänkertaisen hinnan varattuna vuoteen 2020. Vuoden 2022 heinäkuussa Spot-sähkön kuukausikeskihinta oli 18,433 snt/kWh ja vuonna 2020 2,018 snt/kWh. Puolestaan vuonna 2021 lukema oli 7,874 snt/kWh alv0% hinnoilla. (Omavoima 2022.)

Suomessa luonnonkatastrofien riskiä ei ole juuri ole olemassa, joten järkevällä maankäytöllisellä suunnittelulla sekä eri sidosryhmien välisen energiapoliittisen yhteistyön avulla vaikuttaa aurinkovoimaloiden rakentaminen tulevaisuutta ajatellen valoisalta. Erityisen mielenkiintoista on nähdä mihin suuntaan turvetuotantoaluiden käyttö etenee ja tullaanko niitä hyödyntämään kuinka laajasti

aurinkosähkön tuotannossa. Aurinkovoimaloiden rakentaminen turvetuotantoalueille on näyttäytynyt positiivisessa valossa, mutta jatkuvat muutokset maailman ulkopoliittisessa tilanteessa aiheuttavat painetta etenkin energiaturpeen nostamiselle kuluttajien ja voimalaitosten käyttöön, vaikkakin päästöoikeuksien hinnat ovatkin korkealla.

Suhtautuminen aurinkoenergiaan ja etenkin sen ostamiseen Pohjois-Karjalan verkkoalueella näyttää positiivisessa valossa. Samoin valtakunnan tasolla eri tukimuodot, kannustimet sekä ohjauskeinot kannustavat aurinkovoiman lisäämiseen. Lisäksi eri sidosryhmien välinen yhteistyö eri maa-alueiden hyödynnettävyydestä sekä niihin kohdistuvista jatkotoimenpiteistä motivoivat yhteistä tavoitetta, jossa uusiutuvien energiavarojen käyttöä tullaan lisäämään niin valtakunnallisella kuin alueellisella tasolla.

Lähteet

- Ahola, J. 2019. International Energy Agency. National Survey Report of PV Power Applications in Finland. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/09/NSR_Finland_2019.pdf. 3.2.2022.
- Aurinkotekniikka. 2022. Aurinkopaneelien kierrätys. Youtube-video. <https://www.youtube.com/watch?v=kq5Pj7UUUa8>. 13.7.2022.
- Auvinen, K. & Liuksiala, L. 2020. Hankintaohje kunnille. Finsolar. <https://finsolar.net/edistamisvinkit/hankintaohje-kunnille/>. 21.1.2022.
- Bamberg, J., Jokinen, P. & Laine, M. 2007. Tapaustutkimuksen taito. Helsinki: Gaudeamus.
- Bushong, S. 2014. White Paper: Foundation Selection For Ground Mounted PV Solar Systems. Solar Power World. 18.7.2014. <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/07/white-paper-foundation-selection-ground-mounted-pv-solar-systems/>. 23.1.2022.
- Business Finland. Energiatuki. 2022. <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>. 23.3.2022.
- Canada, S. 2012. Corrosion Impacts on Steel Piles. Solar Pro. https://www.solarprofesional.com/_files/ugd/d49ff9_856d1929711b467e8bfc2765c96ea8e2.pdf. 23.8.2022.
- Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 2021a. Uusiutuvan energian tuotantolaitosten lupamenettelyt ja muut hallinnolliset menettelyt. [file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Menettelyk%C3%A4sikirja%20\(1\)%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Menettelyk%C3%A4sikirja%20(1)%20(3).pdf). 11.1.2022.
- Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 2021b. PÄÄTÖS YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTIMENETTELYN SOVELTAMISESTA YKSITÄISTAPAUKSESSA AURINKOENERGIAHANKE, KALANTI UUSIKAUPUNKI. https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/43224515/P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+20211214_Kalannin+aurinkoenergian+tuotantoalue%2C+Uusikaupunki_YVA.pdf/9fe56795-f122-5d21-f037-3c92096f8b60?t=1639479424662. 23.8.2022.
- Elenia & VTT. 2021a. Energiayhteisökäsikirja. <https://www.elenia.fi/files/7de35936c413685a502e8cfe531bdc1e42653201/elenia-energiayhteisokasikirja.pdf>. 10.1.2022.
- Elenia & VTT. 2021b. Energiayhteisöt. <https://www.elenia.fi/tulevaisuuden-energia/sahkontuotanto-ja-kulutus/energiayhteisot>. 10.1.2022.
- Energiateollisuus. 2022. Aurinkosähkö. <https://energia.fi/energiasta/energian-tuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima>. 12.1.2022.
- Energiavirasto. 2018. Menetelmät liittämistä perittävien maksujen määrittämiseksi (Liittymien hinnoittelumenetelmät). <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12768744/Liittymien-hinnoittelumenetelm%C3%A4t.pdf/4f688ec1-4da9-bf7c-2314-087ed394ac4c/Liittymien-hinnoittelumenetelm%C3%A4t.pdf?t=1593167892101>. 22.2.2022.

- Fingrid. 2018. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>. 22.1.2022.
- Finlex. 2022. <https://www.finlex.fi/fi/>. 6.8.2022.
- Finnwatch. 2021. Aurinkosähkön pimeä puoli. 13.7.2021. <https://finnwatch.org/fi/tutkimukset/862-aurinkosaehkoen-pimeae-puoli>. 31.7.2022.
- Finnwind. 2022. FAQ aurinkopaneeli usein kysyttyä. <https://finnwind.fi/aurinkopaneeli-usein-kysyttya/#kide>. 28.6.2022.
- GTK. 2022. Maalajiominaisuudet. <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/kuvat/maalajiominaisuudet.pdf>. 7.2.2022.
- Haavisto-Hyvärinen, M & Kutvonen H. 2007. GTK. Maaperän käyttöopas. https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/gtk_maaperakan_kayttoopas.pdf. 7.2.2022.
- Harri, M. 2022. Tampereen yliopisto. Aurinkovoimalan keskitetyn ja hajautetun invertteriratkaisun teknistaloudellinen analyysi. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122007/HarriMikael.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. 24.3.2022.
- IFC. 2015. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants A Project Developer's Guide. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report_Web+_08+05.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG. 22.2.2022.
- International Energy Agency. 2021b. Trends in Photovoltaic Applications. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-1.pdf>. 17.1.2022.
- International Renewable Energy Agency. 2016a. End-of-life management solar photovoltaic panels. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf.
- International Renewable Energy Agency. 2019b. UTILITY-SCALE BATTERIES INNOVATION LANDSCAPE BRIEF. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf. 8.3.2022.
- Jaatinen, K. 2016. Aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostaminen. Tampereen teknillinen Yliopisto. Rakennustuotanto ja -talous. Diplomityö. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24192/Jaatinen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. 20.1.2022.
- Jahkonen, M. 2018. Metsäbiotalouden nykytila Pohjois-Karjalassa. <https://www.pohjois-karjala.fi/documents/33565/34097/Mets%c3%a4biotalouden+nykytila.pdf/98a7bf70-e18e-48f6-4f50-7e3de4e1656c>. 10.1.2022.
- Jyväskylän Yliopisto. 2015. Tapaustutkimus. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>. 24.1.2022.
- Jyväskylän Yliopisto. 2014. Tutkimusstrategiat. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat>. 24.1.2022.

- Järventausta, P. 2021. Lähienergiayhteisöt ja tulevaisuuden bisnesmallit. Kommunikoiva Energia: Lähienergiayhteisöt yritysten näkökulmasta webinaari. 25.11.2021.
- Korkia. 2022. Korkian uusiutuvan energian webinaari. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=nTfsiWhsHBQ&t=2025s>. 2.3.2022.
- Kupila, S. 2022. Talouselämä. Energiayhtiö kehittää 170 hehtaarin aurinkovoimalaa Loimaalla – sähköä jopa 35 000 kerrostaloasunnolle. 17.6.2022. <https://www.talouselama.fi/uutiset/energiayhtio-kehittaa-170-hehtaarin-aurinkovoimalaa-loimaalla-sahkoa-jopa-35-000-kerrostaloasunnolle/b9eed12a-3651-49cb-b2ec-c9f903450b8d>. 13.7.2022.
- Käpylehto, J. 2016. Auringosta sähkö kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into kustannus Oy.
- Laatikainen, S., Suomi, T. 2021 Turpeen käytön ja tuotannon näkymät Pohjois-Karjalassa vuoteen 2040. GTK. <https://www.pohjois-karjala.fi/documents/33565/12360100/Turpeen+ka%CC%88yto%CC%88n+ja+tuotannon+na%CC%88kyma%CC%88t+Pohjois-Karjalassa+vuoteen+2040.pdf/a0c7fe5d-9f0d-5bc5-8500-a00ce9294d2d?version=1.0>. 22.2.2022.
- Lassuri, A. 2022. Wärtsilä toimittaa aurinkoenergian varastointijärjestelmiä Yhdysvaltoihin – Tilausten arvo satoja miljoonia. Yle. <https://yle.fi/uutiset/3-12532337>. 13.7.2022.
- Lehto, I. 2022. Energiateollisuus. Sääntelyn tavoitteena kohtuulliset hinnat ja luotettava sähköntoimitus. https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot/lainsaadanto_ja_viranomaisvalvonta. 21.1.2022.
- Lehtonen, P. 2007. Tapaus- ja toimintatutkimuksen yhdistäminen. Teoksessa Bamberg, J., Jokinen, P. & Laine, M. Tapaustutkimuksen taito. Helsinki: Gaudeamus, 245–246.
- Lempäälän energia. 2018. SOLARIGO TOTEUTTAA 2 000 KWP AURINKOSÄHKÖVOIMALAN LEMENE-HANKKEESEEN. <http://www.lempaalanenergia.fi/content/fi/36/20502/Solarigo%20toteuttaa%202%20000%20kWp%20aurinkos%C3%A4hk%C3%B6voimalan%20LEMENE-hankkeeseen.html>. 18.7.2022.
- Lähteenmäki, P. 2022. Sijoitusyhtiö tuo isot aurinkovoimalat Suomeen ja uskoo sähkön hintoihin – Kannattaako aurinkopaneelit nyt hankkia myös kotiin? Talouselämä. 18.2.2022. <https://www.talouselama.fi/uutiset/sijoitusyhtio-tuo-isot-aurinkovoimalat-suomeen-ja-uskoo-sahkon-hintoihin-kannattaako-aurinkopaneelit-nyt-hankkia-myo-kotiin/13880207-fb5b-4dbb-b615-ed0574496827>. 18.2.2022.
- Malmsten, A. 2007. Rajaaminen. Teoksessa Bamberg, J., Jokinen, P. & Laine, M. Tapaustutkimuksen taito. Helsinki: Gaudeamus, 73.
- Maukonen, M. 2022. Aurinkoenergia-ala kehittyy huimaa vauhtia. Enertec 1/2022, 8–13. <https://www.publico.com/magazine/pdf/953.pdf#page=8>. 28.6.2022.
- Misbrener, K. 2018. How to choose between string and central inverters in utility-scale installations. Solar Power World. 13.12.2018.

- <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/12/choose-between-string-and-central-inverters-utility-scale-solar/>. 17.1.2022.
- Motiva. 2021a. Aurinkosähköteknologiat. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat. 16.11.2021.
- Motiva. 2021b. Preemiojärjestelmä. 2021b. 21.1.2022.
- Motiva. 2021c. Ylijäämä sähkön myynti. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijäämasahkon_myynti. 21.1.2022
- Mäkinen, J. 2019. Aurinkosähkö osana energiamurrosta PV-voimalan suunnittelijan opas suunnittelu – toteutus – ylläpito. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A5440&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>. 30.3.2022.
- Mäkäräinen, S. 2020. AURINKOENERGIAN TUOTANTOALUE, HEININEVA / LAPUA SUUNNITTELUTARVERATKAISUN HAKEMUSSUUNNITELMA. <http://julkaisu.lapua.fi/dweb/kuulutus/6372296831179713871.1587360711457.PDF> 22.2.2022.
- Nordic Green Energy. 2022. Spot-hinta. <https://www.nordicgreen.fi/asiakaspalvelu/spot-hinta/>. 12.1.2022.
- Novergy. 2017. Which is better – solar string inverter Vs central inverter. <https://www.novergysolar.com/solar-string-inverter-vs-central-inverter/>. 15.1.2022.
- NREL 2016. Facility-Scale Solar Photovoltaic Guidebook. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67122.pdf>. 18.12.2021.
- Omavoima. 2022. Pörssisähkön hinta kuukausittain. <https://omavoima.fi/spot-sahkon-hintahistoria>. 24.8.2022.
- Peljo, P. 2021. Aurinko- ja tuulivoiman kasvun myötä sähkön varastointi on aiempaa hankalampaa ja hintavaihtelut suurempia – ratkaisu voi löytyä uudenlaisesta akkuteknologiasta ja sähkön muuttamisesta vety-polttoaineeksi. Mustread. 7.10.2021. <https://www.mustread.fi/artikkelit/aurinko-ja-tuulivoiman-kasvun-myota-sahkon-varastointi-on-aiempaa-hankalampaa-ja-hintavaihtelut-suurempia-ratkaisu-voiloytya-uudenlaisesta-akkuteknologiasta-ja-sahkon-muuttamisesta-ve-ty-polttoainee/>. 15.3.2022.
- Pentikäinen, P. 2022. Turvesoille syntyy uutta elämää. Insinööri-lehti. <https://insinööri-lehti.fi/digilehti/in0620/turvesoille-syntyy-uutta-elamaa>. 22.2.2022.
- Pickerel, K. 2017. What are the different types of ground-mount solar racking systems? 13.2.2017. <https://www.solarpowerworldonline.com/2017/02/different-types-ground-mount-solar-racking-systems/>. 16.7.2022.
- Pirhonen, M. 2022. Aurinkosähköasiantuntija. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy. Sähköpostihaastattelu. 25.4.2022.
- PKS. 2018. Pitääkö aurinkopaneelit pestä, jos puista tulee roskia niiden päälle? Kuinka paljon se vaikuttaa sähköntuottoon? Voiko ne pestä itse painepesurilla? Millaista pesuainetta ne sietävät? 23.2.2018 <https://urly.fi/2HPg>. 10.1.2021.

- Pohjois-Karjalan ELY-keskus. 2021. Pohjois-Karjalan vesienhoidon toimenpideohjelma 2022–2027. <https://www.doria.fi/handle/10024/184956>. 16.7.2022.
- Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. 2021. Kaavayhdistelmä. <https://pkliitto.maps.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=bcd145b519d1423a8c0b4c362e5f65ed>. 13.12.2021.
- Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. 2021. Pohjois-Karjalan Maakuntakaava 2040. <https://www.pohjois-karjala.fi/documents/33565/10166322/Maakuntakaava2040+Liiteosio1.pdf/f2e10475-75c5-2ea1-513a-c410435ec774?version=1.0>. 13.12.2021.
- Ramboll Finland. 2021a. ENERGIANTUOTANTO POHJANMAALLA JA ETELÄ-POHJANMAALLA 2050. <https://epliitto.fi/wp-content/uploads/2021/06/Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvitys-saavutettava.pdf>. 22.2.2022
- Ramboll Finland. 2022b. Pikaopas EU-taksonomiaan. <https://urly.fi/2Jpt>. 23.3.2022.
- Renew Wisconsin. 2021. Utility Scale Solar Farms in Wisconsin. <https://www.renewwisconsin.org/solarfarms/>. 18.12.2021.
- RT 103076. 2019. Verkkoon kytketyt aurinkosähköjärjestelmät. Rakennustieto.
- Räsänen, M. 2020. Aurinkoenergiesijoitus – tehokas keino vähentää hiilijalanjälkeä. <https://www.korkia.fi/aurinkoenergiesijoitus-tehokas-keino-va-hentaa-hiilijalanjalkea/>. 2.3.2022.
- Rytsy, A. 2022. Paistaako päivä teollisen mittakaavan aurinkosähkölle? Fingridlehti. 12.4.2022. <https://www.fingridlehti.fi/paistaako-paiva-teollisen-mittakaavan-aurinkosahkolle/>. 13.7.2022.
- Saarinen, R. 2021. Jere Ahola: Auringon voimalla. Tekijälehti. 23.6.2021. <https://tekijalehti.fi/2021/06/23/nakija-jere-ahola-auringon-voimalla/>. 2.2.2022.
- Seeking Alpha. 2017. 6.2.2017. <https://seekingalpha.com/article/4078337-enphase-vs-solaredge-changing-module-level-power-electronics-landscape>. 15.1.2022.
- SFS. 2022a. Aurinko. <https://sales.sfs.fi/fi/index/hakutulos.html.stx>. 30.7.2022.
- SFS. 2022b. Aurinkosähköpaneelistot. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/IEC/ID5/6/666125.html.stx>. 30.7.2022.
- Silvonen, K. 2017. SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIikka. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1513524/course/section/188482/tXt4.pdf>. 30.8.2022.
- Smalley, J. 2015a. What is the best foundation for a ground-mount solar array? <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/08/what-is-the-best-foundation-for-a-ground-mount-solar-array/>. 17.8.2015.
- Smalley, J. 2015b. What is combiner box? Solar Power World. 30.6.2015. <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/06/what-is-a-combiner-box/>. 3.2.2022.
- Solarigo Systems Oy. 2022a. Suomen ensimmäinen teollisen hybridisähkøpuiston rakentaminen Kalajoelle varmistui. <https://www.solarigo.fi/post/suomen-ensimmaisenteollisen-hybridisahkopuiston-rakentaminen-kalajoelle-varmistui>. 17.3.2022.

- Solarigo Systems Oy. 2022b. 100 MWp:n aurinkosähkötoteutus kaivosten rikastushiekka-altaille Pohjois-Pohjanmaalle. 20.5.2022. <https://www.solarigo.fi/post/100-mwp-aurinkosahkototeutus-kaivosten-rikastushiekka-altaille-pohjois-pohjanmaalle>. 7.6.2022.
- Stapleton, G. & Susan N. 2012. Grid-connected solar electric systems the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation. X: Earthscan.
- STUK. 2021. Sähkönsiirto ja -jakelu. <https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>. 23.2.2022.
- Sähkömarkkinalaki 588/2013. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>. 10.1.2022.
- Tahkokorpi, M., Erat, B., Hänninen, P., Nyman, C., Rasinkoski, A. & Wiljander, M. 2016. Aurinko-energia Suomessa. Helsinki: Into kustannus.
- Tanskanen, J. 2021. Aurinko on loputon energian lähde, mutta nykyiset menetelmät ovat tehottomia – nyt käsillä voi olla kaiken mullistava teknologia: valokatalyyysi. Yle. <https://yle.fi/uutiset/3-12169463>. 22.11.2021.
- Tanninen, H. 2022. Koronavirustapausten määrä nousee Kiinassa – Nyt ulkomaaliikkumiskieltoon joutumassa alue, jossa valmistetaan merkittävä osa maailman aurinkopaneeleista. Kauppalehti. 7.7.2022. <https://urly.fi/2Jpu>. 18.7.2022.
- Tilastokeskus. 2021. Energian hinnat. https://www.stat.fi/til/ehi/2021/03/ehi_2021_03_2021-12-09_kuv_006_fi.html. 21.1.2022.
- Toivanen, R. 2022. Palvelupäällikkö. PKS Sähkönsiirto Oy. Sähköpostihaastattelu. 25.4.2022.
- Trinasolar. 2018. The difference between string and central solar inverters. <https://mgr.trinasolar.com/us/resources/blog/differences-between-string-and-central-solar-inverters> 15.1.2022.
- Tukes. 2022. Aurinkosähkölaitteet. <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/aurinkosahkojarjestelmat>. 30.7.2022.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022b. Korkeamman investointituen tukialueet päätetty vuosille 2022–2027. <https://tem.fi/tukialueet>. 24.8.2022.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022a. Suomen kestävä kasvun ohjelman energiainvestointitukihakemus. <https://tem.fi/-/suomen-kestavan-kasvun-ohjelman-energiainvestointitukihakemuksen-86-hakemusta>. 18.3.2022.
- Uusikaupunki. 2021. Aurinkosähköä Kalannista 2024 – Kalantiin suunnitteilla Pohjoismaiden suurin aurinkovoimala. 30.6.2021. <https://uusikaupunki.fi/uutiset/aurinkosahkoa-kalannista-2024-kalantiin-suunnitteilla-pohjoismaiden-suurin-aurinkovoimala>. 12.1.2022.
- Uudenmaanliitto & Ramboll Finland Oy. 2017. UUDENMAAN AURINKOENERGIASELVITYS - Aurinkoenergian tuotannon edistämisen mahdollisuudet Uudellamaalla. https://www.uudenmaanliitto.fi/files/21285/Uudenmaan_aurinkoenergiaselvitys_%28E193-2017%29.pdf. 13.12.2021.
- Vainio, V. 2021. Euroopan unionin tukirahaa on tarjolla myös pienille ja keski-suurille yrityksille. <https://www.op-media.fi/yrittajyyseuroopan-unionin-tukirahaa-on-tarjolla-myos-pienille-ja-keskisuurille-yrityksille/>. 24.8.2022.

- Vairinen, V. 2022. Projektipäällikkö. Solarigo Systems Oy. Sähköpostihaastattelu. 17.3.2022.
- Vakkilainen, E & Kivistö, A. 2017. Sähkön tuontatokustannusvertailu. LUT Scientific and Expertise Publications. https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/S%c3%a4hk%c3%b6n%20tuontatokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y. 7.2. 2022.
- Vakkuri, I. 2020. Aurinkopaneelit elinkaaren lopussa – kiertotaloutta parhaimmillaan vai vuori vaarallista jätettä? Korkia. Blogi. 5.3.2022. <https://www.korkia.fi/aurinkopaneelit-elinkaaren-lopussa-kiertotaloutta-parhaimmillaan-vai-vuori-vaarallista-jatetta/>. 13.7.2022.
- Valtonen, P. 2020. Väre. <https://navitas.fi/download.php?id=253>. 10.1.2022.
- Valtioneuvoston termipankki. 2013. Haja-asutusalue. <https://valter.sanakirja.fi/all/all/haja-asutusalue>. 1.1.2022.
- Vattenfall. 2021. PPA-sopimukset lisäävät investointeja tuuli- ja aurinkoenergiiaan. <https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/ppa-sopimukset-lisaavat-investointeja-tuuli-ja-aurinkoenergiiaan>. 10.1.2022.
- Vero. 2022. Energiaverotus. <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotus3/>. 23.1.2022.
- Vikman, M. 2018. Aurinkopaneeleita tarjotaan yhä enemmän vuokralle: "Yhden paneelin tuotolla pesee 230 koneellista pyykkiä". Yle. 28.6.2018. <https://yle.fi/uutiset/3-10278051>. 21.2.2022.
- Väinämö, J. 2021. Ranskalainen Neon suunnittelee aurinkovoimalaa Joensuun liksenvaaralle. Yle. 17.12.2021. <https://yle.fi/uutiset/3-12235799>. 3.2.2022.
- Zervos, A., Lins, C., 2010. Renewable energy in Europe. United Kingdom: Earthscan.
- WWF. 2022. TAKSONOMIA PÄHKINÄNKUORESSA – TÄMÄ ON HYVÄ TIETÄÄ EU:N KESTÄVÄN RAHOITUKSEN "EKOMERKISTÄ". 25.1.2022. <https://wwf.fi/uutiset/2022/01/taksonomia-pahkinankuoressa-tama-on-hyva-tietaa-eun-kestavan-rahoituksen-ekomerkista/>. 23.3.2022.

Liite 1. Voimalaitos tyyppi B:n järjestelmätekniiset vaatimukset (Fingrid 2018).

1 Yleistiedot	Viite
1.1 Sähköpääkaavio (single line diagram)	
1.2 Rakenne	
Voimalaitoksen tyyppi (esim. tuulivoima, aurinkovoima, biomassa, kaasutus)	
Perustiedot (esim. tuulivoimalaitoksesta tornin korkeus, roottorin halkaisija, suuntaajakäyttö yms.)	
1.3 Sijaintitieto (paikkakunta, alue, liittymispiste, koordinaatit)	
2 Muuntajien tekniiset tiedot:	
2.1 Voimalaitoksen muuntajien lukumäärä, toimittaja- ja tyyppitiedot	
2.2 Muuntajien dokumentaatio ja datalehdet	
Teho [MVA], virta [A], muuntosuhde [ensio/toisio], oikosulkuimpedanssi [%], oikosulkuresistanssi [%], kytkentäryhmä ja maadoitustiedot, käämikytimen säätöalue ja askel [%,%], käämikytimen askeleiden määrä ja valittu askel [kpl, askel]	
3 Voimalaitoksen tekniiset tiedot:	
3.1 Sähköntuotantoyksiköiden lukumäärä, toimittaja- ja tyyppitiedot	
3.4 Sähköntuotantoyksiköiden dokumentaatio ja datalehdet	
Näennäisteho [MVA], mitoitus-teho [MW], maksimiteho [MW], minimiteho [MW], virta [A], jännite [V], taajuus [Hz]	
Tahtikoneista sähköiset parametrit (resistanssit, reaktanssit ja niihin liittyvät aikavakiot) ks. taulukko 7.4	
3.5 Tuotantotehon riippuvuus käyttöolosuhteista (esim. tuulen voimakkuus, lämpötila)	
3.6 Mahdollisesti käytössä olevat kompensointi- ja/tai tehokertoimen korjaamisessa käytettävät laitteet	
Lukumäärä, tyyppi, mitoitusarvot (teho, virta, jännite, taajuus)	
Mikäli hyödynnetään yliaaltojen suodatuksen, tiedot rakenteesta ja viritystaajuudesta	
4 Voimalaitoksen ominaisuudet:	
Seuraavat kohdat voidaan korvata esim. valmistajan laitedokumenteilla, IEC61400-21 standardin mukaisella testausdokumentaatiolla tai muulla testausdokumentaatiolla	
4.1 Tiedot voimalaitoksen loistehokapasiteetista ja generaattoreiden PQ-diagrammit	
4.2 Tiedot voimalaitoksen kyvystä toimia ali- ja ylijännitteellä	
4.3 Tiedot voimalaitoksen kyvystä toimia ali- ja ylitajuudella	
4.4 Tiedot voimalaitoksen kyvystä toimia jännitehäiriöiden yhteydessä	
4.5 Tiedot voimalaitoksen vikavirran syötöstä jännitehäiriön aikana	
4.6 Tiedot voimalaitoksen päteohonsäätöominaisuuksista	
4.7 Tiedot voimalaitoksen jänniteensäätöominaisuuksista	
5 Voimalaitoksen suojaustiedot:	
5.1 Voimalaitoksen relesuojauskaavio	
5.2 Voimalaitoksen lopulliset relesuojasasettelut	
5.3 Tiedot saarekesuojan toimintaperiaatteesta	
6 Käyttönottodokumentit:	
6.1 Käyttönottopöytäkirjat	
6.2 Jänniteensäädön lopulliset asetteluarvot ja toimintatila	
Vaatimustenmukaisuusilmoitus	
Liittyjän edustaja vahvistaa allekirjoituksellaan, että tämän taulukon viitetietojen osoittamat dokumentit todentavat voimalaitoksen täyttävän sille asetetut Vaatimukset. Paikka, aika, allekirjoitus ja nimenselvennys:	