



Anton Store

Teollisen kokoluokan aurinkovoima- hankkeen kannattavuuteen ja toteu- tettavuuteen vaikuttavia tekijöitä Suomessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

3.11.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Anton Store
Otsikko:	Teollisen kokoluokan aurinkovoimahankkeen kannattavuuden ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä Suomessa
Sivumäärä:	23 sivua
Aika:	3.11.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiatekniikka
Ohjaajat:	Tiimivetäjä, aurinkovoima Minna Junnikkala Lehtori Kari Salmi

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella teollisen kokoluokan aurinkovoimahankkeen esiselvityskriteereitä Suomessa, keskittyen erityisesti tärkeimpiin hankkeen kannattavuuteen ja toteutettavuuteen vaikuttaviin tekijöihin. Tarkastelu oli osa energia-alan yritykselle tehtyä esiselvityskriteeristöä ja raporttipohjaa, jotka on laadittu aurinkovoimahankkeiden potentiaalisten alueiden kartoittamiseksi. Työssä keskityttiin kolmeen keskeiseen tekijään: säteilyolosuhteisiin, maaperän ominaisuuksiin ja sähköliitännätarkaisuihin.

Säteilyolosuhteiden tarkastelu osoitti, että paras tuotantopotentiaali aurinkovoimaloille Suomessa on maan etelä- ja kaakkoisosissa sekä länsirannikolla, joissa suurempi vuotuinen säteily määrä tukee hankkeiden kannattavuutta.

Maaperän osalta työssä arvioitiin maaperän ominaisuuksien vaikutusta perustamistarkaisuihin. Tiivis maa soveltuu lyöntipaaluilla perustettaville aurinkopaneelijärjestelmille ja on yksinkertaisin ja kustannustehokkain. Pehmeät ja kallioidet maaperät vaativat ruuvi- tai painoperustuksia, jotka ovat kustannuksiltaan kalliimpia.

Sähköliitännätarkaisujen osalta havaittiin, että sähköverkon liityntäpisteen etäisyys ja liittymän jännitetaso vaikuttavat merkittävästi liitännäkustannuksiin. Alle 5 MW:n voimalat voidaan liittää keskijänniteverkkoon, mutta suuremmat voimalat vaativat yhteyden suurjänniteverkkoon, mikä kasvattaa kustannuksia.

Opinnäytetyössä esiteltäisiin kriteereihin perustuen voidaan tunnistaa mahdollisia aurinkovoimahankkeille soveltuvia alueita.

Avainsanat: aurinkovoima, aurinkovoimahanke, teollisen kokoluokan aurinkovoima, kartoitus, esiselvitys, hankekehitys

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Anton Store
Title: Factors Affecting the Profitability and Feasibility of Utility-Scale Solar Power Projects in Finland
Number of Pages: 23 pages
Date: 3 November 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Energy Technology
Supervisor: Minna Junnikkala, Team Leader, Solar Power
Kari Salmi, Senior Lecturer

The objective of this thesis was to examine the preliminary assessment criteria for a utility-scale solar power project in Finland, with a particular focus on key factors affecting the profitability and feasibility of such project. This study was part of a framework and reporting template prepared for an energy company to help identify potential areas for solar power projects. It focused on three main factors: radiation conditions, soil properties, and electrical connection solutions.

The examination of radiation conditions showed that the best production potential for solar power plants in Finland is in the southern and southeastern regions as well as along the western coast, where the higher annual radiation levels support the profitability of projects.

As regards soil, the thesis evaluated the impact of soil properties on foundation solutions. Dense soil is suitable for solar panel systems with driven piles and is the most cost-effective option. Soft and rocky soils require screw or ballast foundations, which are more expensive.

For electrical connection solutions, it was found that the distance to the grid connection point and the connection voltage level significantly impact connection costs. Plants with a capacity of less than 5 MW can be connected to the medium voltage network, but larger plants require a connection to the high voltage network, which increases costs.

On the basis of the criteria presented in the thesis, areas suitable for potential solar power projects can be identified.

Keywords: solar power, solar power project, utility scale solar, mapping, preliminary assessment, project development

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Uusiutuvan energian markkinat ja kehityskulut maailmalla	1
3	Aurinkovoima energianlähteenä	3
3.1	Aurinkolämpö	4
3.2	Aurinkosähkö	5
4	Aurinkovoima Suomessa	7
4.1	Aurinkovoima sähköjärjestelmän tukena	7
4.2	Aurinkovoima ja vetytalous	8
4.3	Teollisen kokoluokan aurinkovoima Suomessa	9
5	Kannattavuuteen vaikuttavat tekijät Suomessa	9
5.1	Säteilyolosuhteet	10
5.2	Maaperä	12
5.3	Sähköverkkoliitettä	16
6	Yhteenveto	18
	Lähteet	20

Lyhenteet

COP28	Conference of the Parties. 28. Yhdistyneiden kansakuntien ilmasto- kokous.
GW	Gigawatti. Tehon yksikkö.
kV	Kilovoltti. Jännitteen yksikkö.
LCOE	Levelized Cost of Electricity. Sähkötuotannon nettokustannus tuo- tantolaitoksen koko elinkaaren ajalta muutettuna nykyarvoon.
MW	Megawatti. Tehon yksikkö.
NREL	The National Renewable Energy Laboratory. Yhdysvaltain energia- ministeriön kansallinen uusiutuvan energian laboratorio.
USAID	U.S. Agency for International Development. Yhdysvaltain kehitysyh- teistyövirasto.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan teollisen kokoluokan aurinkovoimahankkeen kannattavuuteen ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä Suomessa. Tarkastelu on osa energia-alan yritykselle tehtyä esiselvityskriteeristöä ja raporttipohjaa, jotka on laadittu aurinkovoimahankkeiden potentiaalisten alueiden kartoittamiseksi. Esiselvityskriteeristön ja raporttipohjan avulla yrityksen on helppompaa arvioida ja verrata eri hankealueiden teknistaloudellista toteutettavuutta ja ympäristövaikutuksia sekä muita alueeseen liittyviä riskejä.

Opinnäytetyössä esitellään tärkeimmät aurinkovoimahankkeen kannattavuuteen ja toteutettavuuteen vaikuttavat tekijät, jotka tulisi ottaa huomioon teollisen kokoluokan aurinkovoimahankkeen kartoitus- ja esiselvitysvaiheessa. Myöhemmin, hankkeen mahdollisesti edetessä, huomioitavaksi tulee laajempi joukko kriteerejä, joihin palataan lyhyesti opinnäytetyön yhteenvedossa. Opinnäytetyö ei sisällä varsinaisia kannattavuuslaskelmia eikä pyri arvioimaan hankkeiden kannattavuutta numeeristen analyysien tai laskelmien tasolla.

Johdannon jälkeen työn toisessa luvussa käydään läpi uusituvan energian markkinoita ja kehityskulkuja maailmalla. Kolmas luku keskittyy tarkastelemaan aurinkoenergiaa energianlähteenä. Neljäs luku käsittelee aurinkovoimaa Suomessa, minkä jälkeen viidennessä luvussa tarkastellaan aurinkovoiman kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä Suomessa. Luvussa kuusi siirrytään johtopäätöksiin ja yhteenvetoon.

2 Uusiutuvan energian markkinat ja kehityskulut maailmalla

Moderni yhteiskunta perustuu suurelta osalta ihmiskunnan kykyyn hyödyntää ja muuntaa energiaa muodosta toiseen. Vauraimmat ja teknologisesti kehittyneet edistyneimmät maat käyttävät myös henkilöä kohden eniten energiaa. Tämän myötä voidaan olettaa, että energiankulutus tulee kasvamaan

tulevaisuudessa, kun niin kehittyvät kuin vauraatkin maat pyrkivät edelleen nostamaan elintasoaan. [Smets ym. 2016: 5.]

Ympäristön ja ilmaston onneksi elintason nousun tavoittelu kanavoituu suuremmissa määrin uusiutuvan energian lisäämiseen. Vuonna 2023 jokaista fossiilisiin polttoaineisiin sijoitettua dollaria kohden käytettiin 1,7 dollaria puhtaan energian investointeihin. Viisi vuotta aiemmin tämä suhde oli vielä 1:1. [World Energy Investment 2023: 12.]

Euroopan unionin määritelmän mukaan uusiutuva energia tarkoittaa energiaa, joka tuotetaan luonnonvaroista, jotka uusiutuvat jatkuvasti ihmisen toiminnasta huolimatta. Näitä uusiutuvia energialähteitä ovat esimerkiksi aurinkovoima, tuulivoima, vesivoima ja geoterminen energia. Uusiutuvaan energiaan kuuluu myös sellainen biomassa, jonka tuotanto on kestävää eikä heikennä luonnon monimuotoisuutta tai vähennä hiilinieluja. [EU 2018/2001.] Vaikka ydinvoima on vähähiilinen energiantuotantomuoto, joka ei tuota hiilidioksidipäästöjä toiminnan aikana, sitä ei pidetä uusiutuvana energialähteenä, koska uraanivarat ovat rajalliset [Morse 2024].

Vuonna 2023 uusiutuvien energialähteiden kehitys otti merkittäviä askelia eteenpäin, mikä heijastaa maailmanlaajuisia pyrkimystä kohti kestävämpää ja puhtaampaa energiantuotantoa. Uusiutuvan energian kapasiteetti kasvoi maailmanlaajuisesti yhteensä lähes 50 % vuoteen 2022 verrattuna, eli noin 507 gigawatin (GW) verran. [Renewables 2023: 14.]

Uusiutuvan energian kasvun ennustetaan jatkuvan, sillä varsinkin aurinko- ja tuulivoiman tuotantokustannukset ovat viime vuosina laskeneet merkittävästi. Elinkaaren ajalta laskettujen tuotantokustannusten (engl. Levelized Cost of Energy, LCOE) perusteella mitattuna aurinkovoima ja tuulivoima ovat jo fossiilisia energialähteitä ja ydinvoimaa edullisempia energiantuotantomuotoja kaikkialla, missä tuuli- ja aurinkovoimaa voidaan hyödyntää. [Renewables 2023: 49.]

Uusi taloudellinen ympäristö tuo kuitenkin lisähaasteita uusiutuvan energian laajentumiselle. Inflaatio ja keskuspankkien peruskoron nousu alle yhdestä

prosentista lähes viiteen prosenttiin ovat kasvattaneet sekä laitteiston kustannuksia että rahoituskuluja, erityisesti tuuli- ja aurinkovoimahankkeissa. [Renewables 2023: 10.]

Dubaissa marraskuussa 2023 järjestetyssä YK:n COP28-ilmastokokouksessa yli 130 kansallista hallitusta sopi yhteistyöstä maailman uusiutuvan energian kapasiteetin kolminkertaistamiseksi. Tämä tarkoittaa vähintään 11 000 gigawattia uutta uusiutuvaa energiantuotantokapasiteettia vuoteen 2030 mennessä. Tavoite edellyttää johdonmukaisen ilmastopolitiikan ja -toimien jatkamista. Nykyisten arvioiden perusteella maailmanlaajuisen uusiutuvan energian kapasiteetin ennustetaan saavuttavan 7 300 GW tehon vuoteen 2028 mennessä. Kasvu-
vauhdin jatkuessa samana maailmanlaajuinen kapasiteetti kasvaisi ennusteiden mukaan 2,5-kertaiseksi nykytasosta vuoteen 2030 mennessä, jääden kuitenkin alle kokouksessa asetetun kolminkertaistumistavoitteen. [Renewables 2023: 3, 7.]

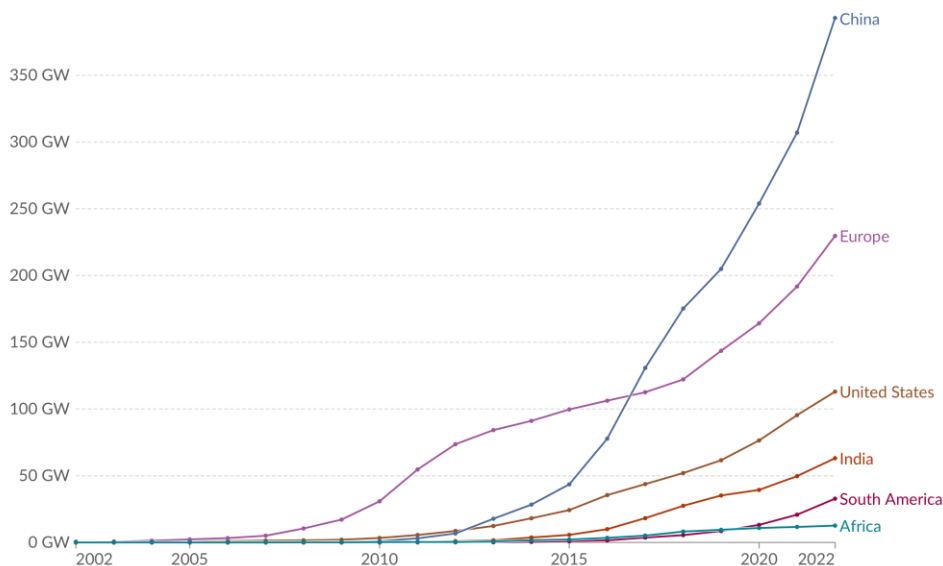
3 Aurinkovoima energianlähteenä

Aurinkovoiman osuus uusiutuvan energian tuotannon kasvusta koko maailman tasolla tarkasteltuna vuonna 2023 oli merkittävä. Se kattoi lähes kolme neljäsosaa, eli noin 346 GW, uusiutuvan energian vuotuisesta lisäyksestä, mikä on enemmän kuin koskaan aiemmin. Tämä alleviivaa aurinkoenergian kasvavaa roolia uusiutuvan energian tuotannon kasvussa globaalisti. Samana vuonna tuulivoimaa, joka on toinen merkittävästi kasvava uusiutuvan energian lähde, lisättiin markkinoille noin 116 GW kapasiteetin edestä. Aurinkovoiman kasvu tuulivoimaan verrattuna oli siis melkein kolminkertainen. [Renewable capacity statistics 2024.]

Alla olevassa kuvassa 1 on esitetty aurinkovoiman rakennetun kapasiteetin kumulatiivinen kasvu gigawatteina maailman väkirikkaimmilla alueilla [Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics 2023].

Installed solar energy capacity

Cumulative installed solar capacity, measured in gigawatts (GW).



Data source: International Renewable Energy Agency (2023)

OurWorldinData.org/renewable-energy | CC BY

Kuva 1. Asennetun aurinkovoimakapasiteetin kasvu maailman väkimmäillä alueilla [Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics 2023].

Kiina johtaa ennätysellisellä kasvullaan aurinko- ja tuulivoiman kehitystä ja on ottanut käyttöön eniten uutta uusiutuvaa energiantuotantoa koko maailmassa. Vaikka Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Brasiliassa uusiutuvan energian kapasiteetin lisäykset saavuttivat vuonna 2023 myös kaikkien aikojen ennätystä, Kiinan edistys oli poikkeuksellista maan asentaessa yhtä paljon uutta aurinkovoimaa kuin koko maailmassa asennettiin yhteensä edellisenä vuonna 2022. [Renewables 2023: 7.]

Aurinkoenergian hyödyntämisen tekniikat voidaan karkeasti jaotella lämpöä tuottaviin sekä sähköä tuottaviin sovellutuksiin [Mertens 2014: 12]. Näitä tekniikoita esitellään tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

3.1 Aurinkolämpö

Yleisimmin aurinkoenergiaa muutetaan lämmöksi aurinkokeräimien avulla. Aurinkokeräimissä auringon säteilyn energia muunnetaan lämmöksi, joka

johdetaan lämmönsiirtoaineen välityksellä käyttökohteeseen. Lämmönsiirtoaine voi olla nestemäistä tai kaasua. Useimmiten tehokkaan lämmön hyödyntämisen edellytyksenä järjestelmiin kuuluu myös lämpövarasto, kuten lämminvesivaraaja. [Aurinkolämpöjärjestelmät 2024.]

Teollisuudessa aurinkolämpöä hyödynnetään Suomessa vielä suhteellisen vähän. Esimerkiksi Sipoossa on pilotoitu maalämpöä ja aurinkokeräimiä yhdistämällä kaukolämmön tuotantoa uusiutuvasti. Sipoon laitoksessa kesäajan ylimääräinen aurinkolämmön tuotanto hyödynnetään syöttämällä se maalämmön keruupiiriin. Näin kallioon varastoituu lämpöä käytettäväksi seuraavalla lämmityskaudella. [Teollinen aurinkolämpö 2024.]

3.2 Aurinkosähkö

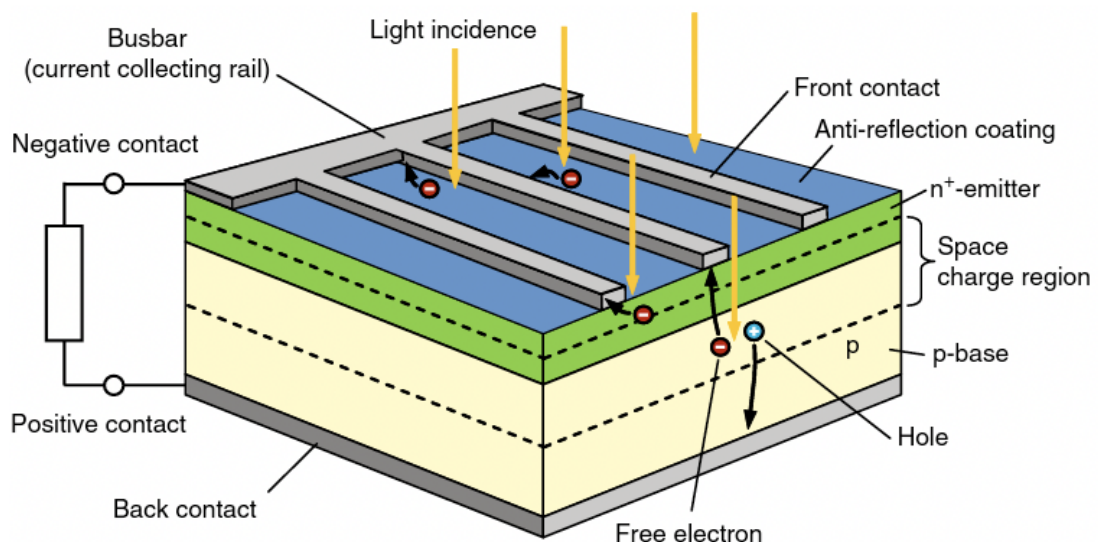
Aurinkoenergian hyödyntämisen suuren kasvun takana ovat ennen kaikkea edistysaskeleet aurinkosähkön puolella, jossa auringon säteilyn energia muunnetaan aurinkokennoissa sähköenergiaksi. Aurinkosähkön juuret ulottuvat 1800-luvulle, jolloin ranskalainen fyysikko Alexandre Edmond Becquerel havaitsi vuonna 1839 niin kutsutun valosähköisen (engl. *photovoltaics*) ilmiön, jossa valo vaikutti materiaalin sähköisiin ominaisuuksiin. 1900-luvun alussa Albert Einstein selitti fotonien, eli valohiukkasten, toiminnan tässä ilmiössä, josta hän ansaitsi ainoaksi jääneen Nobelin tiedepalkintonsa. Ensimmäisiä puolijohdeteknologiaan perustuvia aurinkokennoja alettiin käyttämään ja kehittämään avaruusohjelmien ohessa 1950-luvulla. Nämä aurinkokennot olivat vielä hyötysuhteeltaan vaatimattomia, pystyessään muuntamaan noin 8 % niiden vastaanottamasta auringonsäteilystä sähköenergiaksi. [Ismail 2023: 4; Mertens 2014: 15–20.]

Aurinkokennojen hyötysuhteen kehitys on tämän jälkeen ollut nopeaa, varsinkin viime vuosikymmeninä. Yksi- ja monikiteisiin piikennoihin perustuvat teknologiat ovat tällä hetkellä yleisimpiä kaupallisessa käytössä. Niiden hyötysuhteet ovat kasvaneet huomattavasti aiempaan verrattuna. Esimerkiksi yksikiteisten aurinkokennojen hyötysuhde on noussut 2000-luvun alun 16 %:sta nykypäivän yli 22

%.iin. Laboratoriokokeissa kokeillaan jatkuvasti uusia teknologioita, joilla saavutetut hyötysuhde-ennätykset jatkavat nousuaan. Aurinkokennon hyötysuhteen ennätyslukema, 47,6 %, on saavutettu moniliitoskennoilla, joissa hyödynnetään auringonsäteilyn keskittämistekniikkaa. [Fraunhofer 2024: 7, 33.]

Aurinkokenno koostuu pääosin puolijohteista, tavallisesti piistä, joka on myös keskeinen materiaali muissa sähkötekniikan laitteiden kuten diodien, transistorien ja tietokonepiirien valmistuksessa. Aurinkokennoissa käytettävä pii on käsitelty siten, että sen pinnalle muodostuu p- ja n-tyyppisten puolijohdeiden rajapinta, eli pn-liitos. [Mertens 2014: 69.]

Pn-liitos aikaansaadaan, kun n-tyypin puolijohdeeseen saostetaan alkuaineita, joilla on ylimääräisiä elektroneja. Vastaavasti p-tyypin puolijohdeeseen saostetaan alkuaineita, joilla on vähemmän elektroneja. Tämä aiheuttaa p-tyypin puolijohdeeseen positiivisen varauksen ja n-tyypin puolijohdeeseen negatiivisen varauksen. [Mertens 2014: 70; Aurinkosähköteknologiat 2024.] Kuvassa 2 on havainnollistettu pn-liitos sekä elektronien virtaus aurinkokennossa.



Kuva 2. Aurinkokennon läpileikkaus [Mertens 2014: 70].

Kun auringon säteily osuu aurinkokennon pintaan, fotonit vapauttavat elektroneja piikiteen sidoksista. Vapautuneet elektronit liikkuvat kennon sisällä p-puolelta n-puolelle synnyttäen sähkövirran ja jännite-eron. N-puolella olevat ylimääräiset elektronit johdetaan takaisin p-puolelle ulkoisen virtapiirin kautta. Ulkoinen virtapiiri voidaan kytkeä laitteisiin, jossa syntynyt tasavirta voidaan hyödyntää. Syntynyt tasavirta voidaan myös muuntaa sähköverkkoon sopivaksi vaihtovirraksi vaihtosuuntaajan eli invertterin avulla. [Aurinkosähköteknologiat 2024; Mertens 2014: 70.]

4 Aurinkovoima Suomessa

Suomessa on laadittu kunnianhimoiset ilmastotavoitteet. Nämä tavoitteet ja niiden saavuttamiseksi laadittu strategia on esitelty työ- ja elinkeinoministeriön laatimassa julkaisussa *Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia* [2022]. Strategian keskiössä ovat vihreä siirtymä, lämmönpoltoon perustumattoman tuotannon edistäminen, energiajärjestelmän sähköistäminen ja vetytalouden edistäminen. Aurinkovoiman lisääminen Suomessa tukee jokaista strategian keskeistä elementtiä. Tässä luvussa tutustaan tarkemmin aurinkovoiman hyötyihin Suomessa.

4.1 Aurinkovoima sähköjärjestelmän tukena

Aurinkovoima täydentää hyvin vihreän siirtymän ja energiajärjestelmän sähköistämisen tavoitetta Suomessa voimakkaasti lisääntyneen tuulivoimatuotannon rinnalla. Lillmanin [2017] Suomessa ja Solbakkenin ym. [2016: 4] Norjassa tehtyjen tutkimusten mukaan tuulen ja aurinkovoiman välillä on todettu olevan negatiivinen korrelaatio pohjoismaisissa olosuhteissa. Tämä tarkoittaa, että keskimäärin aurinkovoima ja tuulivoima tuottavat sähköä eri aikoihin täydentäen toisiaan. Negatiivista korrelaatiota havaittiin tutkimuksen mukaan niin päivätasolla, tyynien päivien ollessa keskimäärin aurinkoisempia, kuin myös vuositasolla tarkasteltuna. Vuositasolla voidaan huomata, että kesällä on keskimäärin tyynempää, mutta aurinkovoima tuottaa kesän valoisana vuodenaikana enemmän. Vastaavasti talvella, kun aurinkovoima ei juuri tuota, on keskimäärin

tuulisempaa. Tämän negatiivisen korrelaation hyödyntäminen voi osaltaan edesauttaa sähköverkon tasapainottamisessa, kun säästä riippuvaisen uusiutuvan energian osuus sähköntuotannossa kasvaa. [Solbakken ym. 2016: 4.]

Venäjän helmikuussa 2022 aloittama hyökkäyssota Ukrainassa on nostanut energijärjestelmän huoltovarmuuden keskusteluun myös Suomessa. Kokeemukset Ukrainassa ovat osoittaneet hajautettujen uusiutuvien energiantuotantomuotojen hyödyn energiantuotannon huoltovarmuudelle kriisitilanteissa. Ukrainassa uusiutuva energia on ollut keskeinen osa energijärjestelmän resilienssin kehittämistä. U.S. Agency for International Development (USAID) ja Yhdysvaltain energiaministeriön kansallinen uusiutuvan energian laboratorio (NREL) tukevat Ukrainan pyrkimyksiä integroida lisää uusiutuvaa energiaa sähköverkkoon. Nämä toimet auttavat parantamaan energiavarmuutta ja vähentämään riippuvuutta polttoaineista, kuten dieselistä, joita on vaikea toimittaa sodan aikana. [Dreves ym. 2023.] Ukrainan esimerkki osoittaa, että yhdessä muiden sähköverkon resilienssiä parantavien toimien kanssa uusiutuvat energialähteet voivat parantaa merkittävästi yhteiskunnan energihuoltovarmuutta myös Suomessa.

4.2 Aurinkovoima ja vetytalous

Päästötavoitteiden saavuttamiseksi merkittävä tekijä on fossiilisten raaka-aineiden korvaaminen niin teollisuudessa kuin energiantuotannossakin. Breyerin ym. [2024] mukaan uusiutuvilla energialähteillä tuotettu vety, vihreä vety, nousee keskeiseksi välivaiheen energianvälittäjäksi, mikä mahdollistaa fossiilisista energianlähteistä luopumisen. Tehokkuus- ja kustannustekijät tekevät suorasta sähköistyksestä ensisijaisen ratkaisun energia- ja teollisuusjärjestelmän fossiilisista lähteistä luopumiselle. Vedylle ja sen johdannaisille jää kuitenkin olennainen rooli vaikeasti sähköistettävillä aloilla, kuten kemianteollisuudessa, merenkulun ja ilmailun polttoaineissa sekä teräksen valmistuksessa. [Breyer ym. 2024.]

Kustannustehokkaasti ja päästöttömästi tuotettu sähkö on vihreän vetyjalostuksen elinehto. Ibáñez-Riojan ym. [2023] tutkimuksen mukaan

kustannustehokkain ja nopeimmin toteutettavissa oleva tapa vihreän vedyn tuotannon mahdollistamiseksi on yhdistelmä aurinkovoimaa, tuulivoimaa ja energiavarastointia. Aurinkovoimalla on tässä tärkeä rooli sen ollessa LCOE-kustannuksiltaan halvin sähköntuotantomuoto.

4.3 Teollisen kokoluokan aurinkovoima Suomessa

Suomessa aurinkovoimaa on jo jonkin aikaa hyödynnetty vapaa-ajan asuntojen, omakotitalojen ja liiketilojen katoilla. Teknologisen kehityksen ansiosta myös teollisen mittaluokan aurinkovoimalat yleistyvät Suomessa. [Suomen uusiutuvat 2024.]

Teollisen kokoluokan aurinkovoimalaksi luokitellaan yli 1 000 kilowatin eli yhden megawatin aurinkoenergiaprojektit. Luokittelu tulee Sähkömarkkinalain [2013] nojalla annetusta valtioneuvoston asetuksesta sähkömarkkinoista [2009], jossa teholtaan vähintään yhden megavoltin voimalaitokset ovat ilmoitusvelvollisia sähkömarkkinaviranomaisille.

Suuren, teollisen kokoluokan aurinkovoimalat ovat yleensä maa-asenteisia, tai joissakin tapauksissa kelluvia järjestelmiä, jotka syöttävät sähköä verkkoon. On myös mahdollista, että tuotettu sähkö voidaan käyttää suoraan kulutukseen, voimaloiden sijoituessa lähelle suuria kulutuskeskuksia tai teollisuutta. [World Energy Investment 2023: 23.]

5 Kannattavuuteen vaikuttavat tekijät Suomessa

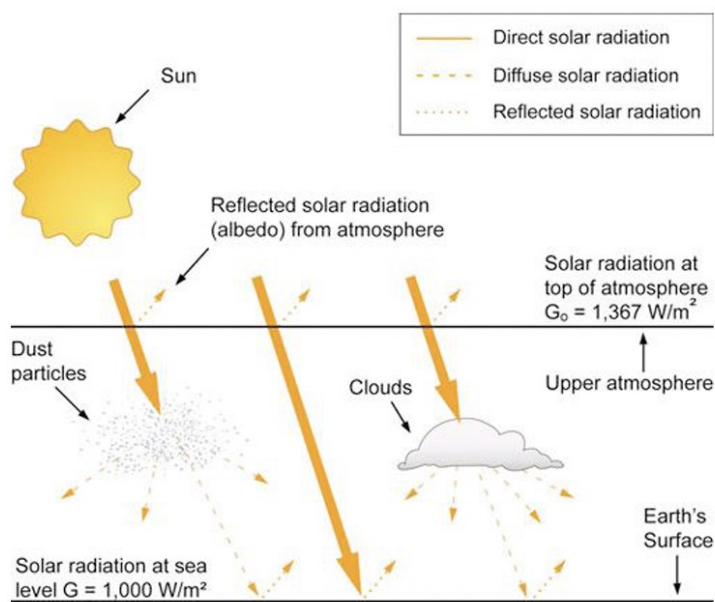
Tässä luvussa tarkastellaan teollisen kokoluokan aurinkovoiman kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä Suomessa. Tarkastelussa keskitytään keskeisimpiin tekijöihin, joihin hankealueita kartoittava yritys voi esiselvitysvaiheessa vaikuttaa, eli säteilyolosuhteisiin, maaperään ja sähköliitintään. [Malinen 2023: 18.]

5.1 Säteilypoosuhteet

Suomessa auringon säteilyn määrä vaihtelee vuodenaikojen mukaan merkittävästi pohjoisen sijainnin takia. Maan kallistuskulma ja kiertorata auringon ympäri vaikuttavat siihen, että Suomessa toukokuun ja elokuun välisenä aikana kertyy noin puolet koko vuoden auringon säteilymäärästä. [Energialaskennan testivuo-det nykyilmastossa 2012.]

Aurinkopaneeleille osuva kokonaissäteily (engl. *irradiance*) koostuu auringon suorasta säteilystä (engl. *direct radiation*) sekä hajasäteilystä (engl. *diffuse radiation*). Hajasäteily on auringon säteilyä, joka on hajaantunutta, absorboitunutta tai heijastunutta säteilyä. Hajautumista, absorboitumista ja heijastumista voi tapahtua esimerkiksi ilmakehässä auringon säteilyn osuessa hiukkasiin ja ilmakehän muihin partikkeleihin matkallaan maahan. Hajasäteilyä aiheuttaa myös esimerkiksi auringon säteilyn heijastuminen pilvistä, vedestä ja maasta. [Stapleton & Neill 2012: 19–20.]

Kuva 3 havainnollistaa auringon säteilyn hajautumista, absorboitumista ja heijastumista ilmakehässä.



Kuva 3. Auringon säteilyn eteneminen ilmakehän läpi maanpinnalle [Stapleton & Neill 2012: 20].

Hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on Suomessa varsin suuri, sillä aurinko on pohjoisen sijainnin vuoksi matalalla horisontissa verrattaessa lähempänä päiväntasaajaa oleviin alueisiin. Tämä tarkoittaa, että auringonsäteily kulkee pitkän matkan ilmakehässä, mikä altistaa sen hajautusta aiheuttaville olosuhteille [Stapleton & Neill 2012: 19]. Suomen oloissa talvella, maan ollessa lumen peitossa, voi heijastuksen vaikutuksesta paneeleihin kohdistuva kokonaissäteily kuitenkin moninkertaistua hetkellisesti [Auringonsäteilyn määrä Suomessa 2024d]. Aurinkopaneelien suuntauksella ja kallistuskulmalla pyritään optimoimaan paneeliin osuva auringon säteilyn määrä. [Stapleton & Neill 2012: 28.]

Kuten alla olevasta kuvasta 4 on havaittavissa, parhaimmat säteilyolosuhteet painottuvat Suomessa maan etelä- ja kaakkoisosiin sekä länsirannikolle [Huld & Pinedo-Pascua 2024].



Kuva 4. Suomen alueelliset vaihtelut auringon säteilyn vuosikertymässä [Huld & Pinedo-Pascua 2024].

Aurinkopaneelien tuottama vuotuinen sähköenergia E voidaan laskea seuraavalla kaavalla (1):

$$E = I \cdot \eta \cdot PR \quad (1)$$

E on vuotuinen tuotettu sähköenergia (kWh/m²/vuosi)

I on aurinkopaneelin pinnalle tuleva vuotuinen säteily määrä (kWh/m²/vuosi)

η on aurinkopaneelien hyötysuhde (desimaalilukuna, esim. 0,21)

PR on järjestelmän hyötysuhde (tyypillisesti välillä 0,75–0,9)

Kaava osoittaa, että paneelien tuottama vuotuinen sähköenergia on tulos vuotuisesta säteilystä, joka kerrotaan aurinkopaneelien hyötysuhteella ja järjestelmän häviöllä. Tämän takia säteilyn määrä vaikuttaa suoraan samassa suhteessa aurinkopaneelien tuottamaan vuotuiseseen sähköenergian määrään. Näin ollen potentiaalisen aurinkovoimalan sijainnissa säteilyolosuhteilla on suuri painoarvo.

Paikallisiin säteilyolosuhteisiin vaikuttavat myös varjostusta aiheuttavat maaston muodot, kasvillisuus ja maa-albedo eli heijastavuus. Esimerkiksi maaston korkeat kohdat tai kasvillisuus voivat aiheuttaa varjostusta, joka vähentää paneelien saamaa säteily määrää. Maa-albedo vaikuttaa heijastuneen säteilyn määrään, joka voi lisätä paneelien saamaa kokonaissäteily määrää. Tuoreen nurmen heijastuvuuskerroin on noin 0,26, kun taas puhtaan lumipeitteen kerroin voi olla noin 0,8, jolloin jopa 80 % säteilystä heijastuu. [Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants A Project Developer's Guide 2015: 44.]

5.2 Maaperä

Aurinkovoimalan perustamistavan valintaan vaikuttavat merkittävästi maaperän ominaisuudet. Perustamistavalla tarkoitetaan menetelmää, jolla aurinkopaneelita kannattavat telineet kiinnitetään maahan siten, että ne pysyvät vakaasti paikallaan. Tällä ratkaisulla on huomattava vaikutus aurinkovoimalan rakennus- ja materiaalikustannuksiin. Vaikka suuria maaperätutkimuksia ei yleensä tehdä projektin alkuvaiheessa, aurinkovoimalan potentiaalista hankealuetta

kartoitettaessa on maaperän ominaisuudet kuitenkin syytä huomioida jo esiselvitys- ja kartoitusvaiheessa. [Donaldson & Brearley 2015.]

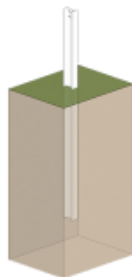
Maaperätutkimukset ja vetokokeet ovat välttämättömiä, jotta saadaan selville maaperän kantavuus, koostumus, routaolosuhteet ja mahdolliset eroosiota aiheuttavat tekijät. Erityisesti suurissa aurinkovoimapuistoissa, joissa maaperän koostumus voi vaihdella alueittain, on tärkeää suorittaa perusteellinen maaperätutkimus ennen perustamistavan valintaa. Kattava analyysi ja huolellinen maaperätutkimus mahdollistavat optimaalisen perustussuunnittelun ja mitoituksen, mikä voi vähentää materiaalikustannuksia ja pienentää tulevia huoltokustannuksia. [Donaldson & Brearley 2015.]

Aurinkovoimapuiston perustukset on suunniteltava siten, että ne kestävät paikalliset dynaamiset ja staattiset kuormat, mukaan lukien tuulen aiheuttamat voimat ja lumen paino. Perustusten suunnittelussa on huomioitava myös maaperän taipumus muokkautua ajan myötä, erityisesti jos kyseessä on pehmeä tai kostea maaperä, jossa maaperän plastiset muodonmuutokset voivat vaikuttaa rakenteiden vakauteen. Maaperän riittämätön tutkiminen voi aiheuttaa merkittäviä kustannuksia projektin myöhemmässä vaiheessa, jos perustuksia joudutaan korjaamaan tai vahvistamaan projektin aikana tai sen jälkeen. [Donaldson & Brearley 2015.]

Maaperän olosuhteet vaikuttavat siihen, millainen perustamistapa on kussakin tapauksessa kustannustehokkain ja teknisesti toimivin ratkaisu. Seistolan [2023: 26] mukaan erilaisia perustamisratkaisuja ovat esimerkiksi painoperusteinen, ruuvipaalu, lyöntipaalu ja kierrepaalut, joista seuraavaksi lyhyt esittely.

Lyöntipaalut (kuva 5) ovat yksi suosituimmista ja kustannustehokkaimmista perustamistavoista tiiviille maaperille, kuten savelle, hiekalle ja soralle. Ne asennetaan nopeasti syväälle maahan käyttäen paalutuskoneita, mikä tekee niistä kustannustehokkaan ja suositeltavan ratkaisun erityisesti suurille aurinkovoimapuistoille. Paalut voidaan upottaa maahan ilman ylimääräisiä tukitoimia, ja ne tarjoavat tarpeeksi vahvan tuen aurinkopaneelien rakenteille erityisesti, kun

maaperässä on hyvä kantavuus ja se on suhteellisen kuivaa. Lyöntipaalut eivät kuitenkaan sovi alueille, joilla maaperä sisältää suuria kiviä tai lohkareita, jotka voisivat estää paalun upottamisen. [Bushong 2014.]



Kuva 5. Lyöntipaalu [Solar Foundation Engineering Services 2024].

Kierrepaaluja (kuva 6) käytetään perustamisratkaisuna pehmeillä maaperillä, kuten savi- tai turvemaalla, joissa maaperän kantavuus on heikkoa ja maan puristuslujuus voi olla huono [Bushong 2014]. Kierrepaalut toimivat siten, että paalun alaosassa on kierrelaippa, joka ruuvataan maahan. Tämä menetelmä parantaa paalun vakautta ja mahdollistaa paremman ankkuroimisen pehmeässä maaperässä, jossa tavalliset lyöntipaalut eivät pysy vakaasti. Ruuvipaalut asennetaan yleensä ilman suurempia maansiirtotöitä, joita halutaan kustannussyistä välttää. Tämä tekee niistä kustannustehokkaamman ja nopeamman ratkaisun erityisesti silloin, kun halutaan välttää suuria maansiirtoja pehmeämmän maaperän alueilla. [Markkanen 2024: 29–31.]



Kuva 6. Kierrepaalu [Solar Foundation Engineering Services 2024].

Ruuvipaaluja (kuva 7) käytetään alueilla, joilla on kovempi maaperä tai muita esteitä, jotka vaikeuttavat paalujen lyömistä. Esiporausta voidaan käyttää, jos ruuvipaalua ei saada asennettua maahan muuten tarvittavalle syvyydelle. Esiporaus on kuitenkin kalliimpaa ja tuo asennukseen lisää kustannuksia, sekä lisää asentamiseen kuluvaa aikaa. Esiporaus on kuitenkin edullisempi vaihtoehto kuin painoperusteinen perustus. [Bushong 2014; Markkanen 2024:32.]



Kuva 7. Ruuvipaalu [Solar Foundation Engineering Services 2024].

Painoperustuksessa (kuva 8) aurinkopaneelirakenteet asennetaan esimerkiksi betoni- tai valurakenteiden päälle. Painoperustukset voivat olla sopiva ratkaisu tilanteissa, joissa maaperän kantavuus on heikkoa, kuten löyhässä hiekassa tai pehmeässä savessa, tai jos pohjavesitaso on korkea. Painoperustuksia voidaan käyttää myös sellaisilla alueilla, jossa maaperä on karkeaa ja sisältää suuria kiviä tai lohkareita, joita ei voida helposti poistaa. Painoperustukset sopivat myös ympäristöihin, joissa maanmuokkaus halutaan minimoida esimerkiksi ympäristöllisistä syistä. Maaperän mahdollinen painuma, eroosio ja routanousu tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Vaikka painoperustukset ovat kalliimpia toteuttaa kuin muut perustustavat, ne luovat kuitenkin vaihtoehdon maaperissä, joissa paalutus ei ole mahdollista. [Bushong 2014; Markkanen 2024:32–34.]



Kuva 8. Painoperusteinen aurinkopaneeliteline [Concrete foundation solar mounting system 2024].

Routivilla alueilla Suomessa perustusten on kestettävä myös talvella tapahtuva maaperän jäätyminen ja sulaminen. Jäätyessään maaperä tarttuu kiinni siihen upotettuihin esineisiin kuten paaluihin, mikä aiheuttaa routivaan maahan upotettuun esineeseen nostovoiman. Routivia maalajeja ovat esimerkiksi savi ja siltti ja routimattomia maalajeja ovat esimerkiksi hiekkainen sora ja sorainen hiekkamoreeni. Routiminen voi aiheuttaa rakenteiden liikkumista ja vaurioitumista. Tämä tarkoittaa, että ruuvipaalut tulee asentaa routarajan alapuolelle, mikä auttaa ehkäisemään roudan aiheuttamat vauriot ja takaa rakenteen pitkäaikaisen kestävyuden. Lisäksi maanvaihdolla ja hyvällä vesienhallinnalla voidaan vähentää maan routimista. [Markkanen 2024: 44–46.]

5.3 Sähköverkkoliitäntä

Sähköverkkoliitännällä on merkittävä vaikutus aurinkovoimapuiston kannattavuuteen, sillä liitännäkustannukset voivat muodostaa suuren osan hankkeen investointikuluista. Liitynnän kustannukset riippuvat tuotantolaitoksen koosta, sijainnista, etäisyydestä liittymispisteeseen sekä käytettävästä verkkojännitetasosta. [Malinen 2023: 36.]

Pienempiä, alle 5 MW:n aurinkovoimaloita voidaan liittää 20 kV:n keskijänniteverkkoon tai haarajohtoihin. Tuotantoteholtaan alle 10 MW:n voimala voidaan liittää keskijänniteverkon sähköasemaan. Jos sähköasema sijaitsee lähellä ja

sitä ei tarvitse liitännän mahdollistamiseksi laajentaa, liityntäkustannukset pysyvät kohtuullisina. [Seistola 2023: 27; Malinen 2023: 29.]

Suuremmat, yli 10 MW:n aurinkovoimalat tulee liittää 110 kV:n suurjänniteverkkoon, joka nostaa kustannuksia korkeampien liittymismaksujen ja suurempien muuntajien vuoksi [Seistola 2023: 28; Malinen 2023: 29].

Kuvassa 9 on esitetty vuonna 2024 voimassa olevat kantaverkon liittymismaksut Fingridin kantaverkkoon liityttäessä.

Kantaverkon liittymismaksut 2024 (€, alv 0 %)

Liittyminen nykyiseen 400 kV kytkinlaitokseen	2 200 000
Liittyminen nykyiseen 220 kV kytkinlaitokseen	1 400 000
Liittyminen nykyiseen 110 kV kytkinlaitokseen	800 000
Mikäli liityntää varten rakennetaan uusi kantaverkon kytkinlaitos, Fingrid perii Asiakkaalta liittymismaksun jokaisesta uuteen kytkinlaitokseen rakennettavasta katkaisijakentästä.	
Liittyminen kantaverkon 110 kV voimajohtoon:	800 000
Johdonvarsiliitynnän liittymismaksu peritään alkavalta muuntajan nimellisteholta 25 MVA (ONAN) tai 31,5 MVA (ONAF), kuitenkin enintään kaksi liittymismaksua yhtä liityntää kohden.	
Jos liittyjän tarpeesta rakennettuun kytkinlaitokseen rakennetaan uusia liityntöjä ensimmäisen kymmenen vuoden aikana kytkinlaitoksen käyttöönotosta kolmatta osapuolta tai Fingridiä varten, Fingrid hyvittää ensimmäiselle liittyjälle tämän aikana Fingridille maksaman liittymismaksun, josta vähennetään uuden liitynnän käyttöönoton hetkellä voimassa oleva kytkinlaitoksen liittymismaksu.	

FINGRID

Kuva 9. Kantaverkon liittymismaksut vuonna 2024 [Kantaverkon liittymismaksut 2024].

Alle 60 MW:n aurinkopuistot voidaan liittää 110 kV:n verkkoon ilman erillistä kytkinlaitosta, niin kutsutulla johdonvarsiliitännällä. Yli 60 MW:n puistot vaativat puolestaan kytkinlaitoksen liitännän mahdollistamiseksi. Mikäli valmista lähellä olevaa kytkinlaitosta ei ole, liittyjä joutuu osallistumaan sen rakentamisen kustannuksiin. 110 kV:n kytkinlaitokseen voi liittää teholtaan maksimissaan 250 MW:in tuotantolaitoksen. [Liittyminen kantaverkkoon 2024.]

Yli 250 MW:n tuotantolaitokset tulee liittää 220 kV:n tai 400 kV:n johtoon, johon liittyminen tapahtuu aina kytkinlaitoksen kautta. Kytkinlaitosliittymisen

seurauksena kustannukset verkkoon liittämiselle niissä tapauksissa kasvavat merkittävästi [Liittyminen kantaverkkoon 2024].

Aurinkovoimalan sijainnin suunnittelussa on tärkeää huomioida hankealueen etäisyys sähkön liityntäpisteeseen. Kouvolan kaupungin tilaamassa aurinkovoimapotentialin selvityksessä [Kouvolan aurinkovoimapotentialin selvitys 2024: 18] on esitetty verkkoliitääntää koskevia suuntavia periaatteita. Selvityksen mukaan 15–50 MW:n tehoisten aurinkovoimapuistojen tulisi sijaita mahdollisimman lähellä liityntäpistettä, jotta erillisen ilmajohtolinjan rakentamiselta liittymistä varten vältyttäisiin. Teknialoudellisesti kohtuullinen etäisyys liityntäpisteeseen on selvityksen mukaan noin kolme kilometriä 50 MW:n hankkeelle, ja noin viisi kilometriä 100 MW tai sitä suuremmille hankkeille. [Kouvolan aurinkovoimapotentialin selvitys 2024: 18.]

6 Yhteenveto

Teollisen kokoluokan aurinkovoimahankkeen onnistumisen kannalta on tärkeää tarkastella hankkeen kannattavuuteen ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä jo esiselvitysvaiheessa. Tässä opinnäytetyössä on esitelty tärkeimmät esiselvityskriteerit, jotka esiselvitysvaiheessa tulee huomioida. Näitä kriteerejä ovat säteilyolosuhteet, maaperän ominaisuudet ja sähköliitääntäratkaisut.

Säteilyolosuhteet ovat kriittinen tekijä aurinkovoimaloiden kannattavuudelle, sillä ne määrittävät hankkeen tuotantopotentialin. Suomen etelä- ja kaakkoisosat tarjoavat maantieteellisesti parhaat säteilyolosuhteet. Näillä alueilla esimerkiksi perustamiskustannuksiltaan kalliimmatkin hankkeet voivat olla taloudellisesti kannattavia paremman säteilyn ansiosta

Toinen keskeinen tekijä on maaperä, jonka ominaisuudet määrittävät aurinkopaneeleja tukevien rakenteiden perustamiskustannukset ja teknisen toteutettavuuden. Maaperän kantavuus, routaolosuhteet ja eroosioherkkyys voivat vaihdella alueittain, joten nämä tekijät on huomioitava jo esiselvitysvaiheessa. Eri maaperätyypit edellyttävät erilaisia perustamisratkaisuja. Tiiviillä mailla voidaan

hyödyntää kustannustehokkaita lyöntipaaluja, kun taas pehmeillä mailla tai kallioisilla alueilla tarvitaan kalliimpia ruuvi- tai painoperustuksia.

Liitântäkustannukset voivat muodostaa merkittävän osan hankkeen kokonaiskustannuksista, joten kolmas olennainen esiselvityskriteeri on sähköliitântärätkeisyys. Kustannukset riippuvat siitä, kuinka lähellä sähköasemaa tai liittymispistettä hanke sijaitsee ja minkä jännitetaso liitântä on tarkoituksenmukainen. Pienemmät, alle 5 MW:n tehoiset aurinkovoimalat voidaan liittää keskijänniteverkkoon, mutta suuremmat voimalat vaativat yhteyden suurjänniteverkkoon, mikä nostaa kustannuksia merkittävästi.

Vaikka edellä mainitut tekijät ovat aurinkovoimahankkeen esiselvityksessä keskeisimpiä, myös muita seikkoja tulee huomioida projektin kokonaisvaltaisessa arvioinnissa. Liitântäkustannusten lisäksi hankkeen kannattavuuteen vaikuttaa myös muita taloudellisia tekijöitä. Jotkut näistä, kuten maanvuokra, ovat sellaisia, joihin yritys voi vaikuttaa. Lisäksi on paljon yrityksestä riippumattomia taloudellisia tekijöitä, kuten aurinkopaneelien ja telineiden hintakehitys, rakentamisen kustannukset sekä sähkö- ja rahoitusmarkkinoiden tilanne.

Myös luontoarvot, kulttuuriympäristön huomioiminen, kunnalliset ja maakunnalliset kaavat, tiet ja muu infrastruktuuri sekä lähellä oleva asutus ovat kaikki asioita, joilla voi olla merkittävä vaikutus hankkeen toteuttamismahdollisuuksiin. Näiden seikkojen selvittämiseen ei kuitenkaan ole tarpeen investoida resursseja aikaisessa vaiheessa uusia potentiaalisia hankealueita etsittäessä. Esimerkiksi luontoarvojen ja kaavoitustilanteen selvittäminen ovat ajankohtaisia vasta myöhemmin, kun mahdollinen toteuttamiskelpoinen hankealue on ensin tunnistettu.

Lähteet

Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2024. Verkkoaineisto. Motiva <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Luettu 20.9.2024

Aurinkolämpöjärjestelmät. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat>. Päivitetty 31.1.2024. Luettu 19.9.2024.

Aurinkosähköteknologiat. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat>. Luettu 20.9.2024

Breyer Christian, Lopez Gabriel, Bogdanov Dmitrii & Laaksonen Petteri. 2024. The role of electricity-based hydrogen in the emerging power-to-X economy. Elsevier. International Journal of Hydrogen Energy, 49, sivut 351-359.

Concrete foundation solar mounting system. 2024. Verkkoaineisto. Broad. <https://www.broadsolartek.com/solar-panel-concrete-foundation_p10.html>. Luettu 12.10.2024.

Bushong, Steven. 2014. White Paper: Foundation Selection for Ground Mounted PV Solar Systems. Solar Power World. Verkkoaineisto. <<https://www.solarpowerworldonline.com/2014/07/white-paper-foundation-selection-ground-mounted-pv-solar-systems/>>. Luettu 14.10.2024.

Donaldson, Bob & Brearley, David. 2015. Geotechnical Analysis and PV Foundation Design. SolarPro Magazine. Verkkoaineisto. <https://definitive-solar.webvent.tv/uploads/assets/4789/document/0001-SP8.3_FE_Donaldson.pdf>. Luettu 14.10.2024.

Dreves Harrison, Fall Sara & McCan Isabel. 2023. Ukraine Fights To Build More Resilient, Renewable Energy System in Midst of War. 27.7.2023. NREL. Verkkoartikkeli. Saatavilla: <<https://www.nrel.gov/news/features/2023/ukraine-fights-to-build-a-more-resilient-renewable-energy-system-in-the-midst-of-war.html>>. Luettu 28.9.2024.

Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2012. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>>. Luettu 29.9.2024.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. EU 2018/2001. Saatavilla: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32018L2001#>>. Luettu 5.10.2024.

Huld, Thomas & Pinedo-Pascua, Irene. 2024. Global irradiation and solar electricity potential Optimally-inclined photovoltaic modules, Finland. PVGIS. European Commission, Joint Research Centre Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit. Saatavilla: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. Luettu 29.9.2024.

Ibáñez-Rioja Alejandro, Sakas Georgios, Järvinen Lauri & Puranen Pietari. 2023. Off-Grid Green Hydrogen Production Systems. In Smart Grids—Renewable Energy, Power Electronics, Signal Processing and Communication Systems Applications (s. 37-72). Cham Springer International Publishing.

Imail Basel I.2023. Solar PV Panels - Recent Advances and Future Prospects. E-kirja. IntechOpen.

Kantaverkon liittymismaksut 2024. 2024. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-liittymismaksut-2024.pdf>>. Luettu 16.10.2024.

Kouvola aurinkovoimapotentiaalin selvitys. 2024. Verkkoaineisto. Finnish Consulting Group (FCG). <https://www.kouvola.fi/wp-content/uploads/2024/05/raportti_aurinkovoimapotentiaalin_selvitys_10.4.2024.pdf>. Luettu 20.10.2024.

Liittyminen kantaverkkoon. 2024. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/#suunnittelu>>. Luettu 16.10.2024.

Lillman, Samuli. 2017. Tuuli- ja aurinkovoiman yhteiskäyttö. Opinnäytetyö. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Malinen, Pipsa. 2023. Kihniön Aitonevan aurinkovoimahankkeen toteutettavuus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Markkanen Laura. 2024. Aurinkovoimalan sijoittaminen ja perustamistaparatkaisut. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Trepo-julkaisuarkisto.

Mertens, Konrad. 2014. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice. E-kirja. John Wiley & Sons Incorporated.

Morse Elizabeth. 2024. Nonrenewable Energy. 18.3.2024. National Geographic Society. Verkkoartikkeli. Saatavilla: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/non-renewable-energy/>>. Luettu 25.10.2024.

Photovoltaics Report. 2024 Verkkoaineisto. Fraunhofer ISE. <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/renewable-energy-data.html>>. Päivitetty 30.7.2024. Luettu 30.10.2024.

Rakennamme alustaa puhtaalle sähköjärjestelmälle. 2024. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/?tag=3463&page-Size=5&page=1&language=fi#voimajohtohankkeemme>>. Luettu 16.10.2024.

Renewable Capacity Statistics 2024. 2024. Verkkoaineisto. International Renewable Energy Agency (IRENA). <<https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>>. Luettu 16.9.2024.

Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics. 2023. Verkkoaineisto. International Renewable Energy Agency (IRENA). Käsitelty Our World in Data:n toimesta. <<https://ourworldindata.org/renewable-energy>>. Luettu 16.9.2024.

Renewables 2023. 2024. Verkkoaineisto. International Energy Agency (IEA). <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>>. Luettu 15.9.2024.

Seistola Elmeri. 2023. Teollisen mittakaavan aurinkosähköhankeen kannattavuuden tarkastelu. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. LUTPub-julkaisuarkisto.

Smets, Arno H.M, Klaus Jäger, Olindo Isabella, René A.C.M.M. van Swaaij & Miro Zeman. 2016. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. E-kirja. UIT Cambridge.

Solar Foundation Engineering Services. 2024. Verkkoaineisto. Polar Racking. <<https://www.polarracking.com/solar-foundation-engineering-services/>>. Luettu 17.10.2024.

Solbakken Kine, Babar Bilal & Boström Tobias. 2016. Correlation of wind and solar power in high-latitude arctic areas in Northern Norway and Svalbard. *Renew. Energy Environ. Sustain.* 1, 42 (2016).

Stapleton, Geoff & Neill Susan. 2012. Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation. E-kirja. Routledge.

Suomen uusiutuvat. 2024. Yleistä aurinkovoimasta. Verkkoaineisto. <<https://suomenuusiutuvat.fi/aurinkovoima/yleista-aurinkovoimasta/>>. Luettu 14.9.2024.

Sähkömarkkinalaki. 2013. 588/2013.

Teollinen aurinkolämpö. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/teollinen_aurinkolampo>. Luettu 19.9.2024.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 - kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Verkkoaineisto. <<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>>. Luettu 18.10.2024.

Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants A Project Developer's Guide. 2015. Verkkoaineisto. IFC.<<https://documents1.worldbank.org/curated/en/690161467992462412/pdf/99396-WP-Box393199B-PUBLIC-IFC-Solar-Report-Web-08-05.pdf>>. Luettu 14.10.2024.

Valtionneuvoston asetus sähkömarkkinoista. 2009. 65/2009.

World Energy Investment 2023. 2023. Verkkoaineisto. International Energy Agency (IEA). <<https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>>. Luettu 15.9.2024.