

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

**AURINKOSÄHKÖN TUOTTAMINEN POHJOISMAISSA JA
MUUALLA**

Solar power production in Nordic countries and elsewhere

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka

Työn ohjaaja: Tutkijaopettaja, TkT Antti Kosonen

Lappeenrannassa 7.3.2015

Anna Huostila

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	2
1 JOHDANTO	3
2 AURINKOSÄHKÖ	4
2.1 Aurinko ja sen säteily	4
2.2 Aurinkopaneelit: säteilystä sähköksi	5
2.2.1 Aurinkopaneelin toimintaperiaate	5
2.2.2 Yksi- ja monikiteiset aurinkopaneelit	6
2.2.3 Muita aurinkopaneelityyppejä	7
2.2.4 Aurinkopaneelien hyötyjä ja haittoja	8
3 AURINKOSÄHKÖN NYKYTILANNE POHJOISMAISSA JA MUUALLA	8
3.1 Suomi	9
3.2 Ruotsi	9
3.3 Tanska	10
3.4 Norja	10
3.5 Saksa	10
3.6 Italia	11
3.7 Kiina	11
4 AURINKOSÄHKÖN TUOTTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ	11
4.1 Säteily	11
4.2 Lämpötila	12
4.3 Pöly, lika, lumi ja kuura	12
4.4 Varjostukset	13
4.5 Suunta- ja asennuskulma	13
4.6 Paneelien väliset erot	14
4.7 Siirtojohtimien tehohäviöt	14
4.8 Invertterin häviöt	15
5 TUTKIMUSMENETELMÄT	15
5.1 Sunny Portal	15
5.2 HOMER	16
6 TUTKIMUSTULOKSET	18

6.1	Suomi	18
6.2	Ruotsi	19
6.3	Tanska	20
6.4	Norja.....	22
6.5	Saksa	23
6.6	Italia.....	24
6.7	Kiina.....	25
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	26
7.1	Yksittäisten voimaloiden ominaistuottojen ja niille simuloitujen maksimiominaistuottojen välistä tarkastelua	26
7.1.1	Esimerkki paneelin mahdollisesta peittymisestä	28
7.1.2	Esimerkki paneelin oikeasta tasokulmasta	28
7.2	Sähkötuotannon jakautumisen tarkastelua eri kuukausina Pohjoismaissa ja muualla.....	28
7.3	Vertailua maiden välillä Pohjoismaissa ja muualla	34
7.3.1	Tarkastelua vuositasolla	35
7.3.2	Kuukausitason tarkastelua	36
7.3.3	Ominaistuottojen ja maksimiominaistuottojen välisen eron tarkastelua	37
8	YHTEENVETO	38
	LÄHTEET	40

LIITTEET

Liite 1. Aurinkosähkövoimaloiden sijoittuminen kartalla

SYMBOLILUETTELO

<i>E</i>	energia	[Wh]
<i>P</i>	teho	[W]
<i>T</i>	lämpötila	[°C]
	selkeyskerroin	[kWh/m ² /d]
	ominaistuotto	[kWh/kW]

Alaindeksit

p	nimellisteho
---	--------------

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatin työ on saanut ajatuksen Roger Andrews'n kirjoituksesta Energy Matters verkkosivulla, mikä kertoo maailman eri maiden aurinkosähkökapasiteetin määrittämisestä. Kirjoituksen mukaan tällä hetkellä ei ole saatavilla tarkkoja lukemia eri maiden aurinkosähkökapasiteetista. Luvut, joita on saatavilla, eroavat lähteestä riippuen. Kirjoittaja onkin kirjoituksessaan määrittänyt eri maille ja alueille kapasiteettikertoimet, käyttäen hyväksi Wikipediasta sekä Sunny Portalista saatavia eri voimalaitosten tuotantolukemia. (Andrews 2014.)

Aurinkovoimaloiden tuotantolukemia on mahdollista saada selville internetistä löytyvien verkkotietokantojen avulla, kuten Roger Andrews oli omassa selvitystyössään käyttänyt (Andrews 2014). Tässä selvitystyössä käytetään invertterivalmistaja SMA:n tuottamaa Sunny Portal -pilvipalvelua, joka on yksi esimerkki aurinkovoimaloiden tietoja keräävistä verkkotietokannoista (Sunny Portal). Aurinkovoimaloille on myös mahdollista simuloida simulointiohjelmien avulla tuotantolukemia, kun tiedetään voimalan koko, sijainti, sekä sijaintipaikan kuukausittaiset keskilämpötilat. Simulointiohjelman avulla on myös mahdollista määrittää voimalan sijaintipaikalle sopiva aurinkopaneelin taso- sekä suuntakulma, jolla on mahdollista saada suurin sähköntuotanto. Tässä työssä käytettävä HOMER 2.68 BETA on yksi esimerkki tällaisesta simulointiohjelmasta. (HOMER Energy a.)

Aurinkosähkön tuotanto on ollut viime vuosien aikana kasvussa. Tämä on huomattavissa esimerkiksi siitä, että suurin osa Sunny Portalissa olevista voimaloista, on asennettu viime vuosien aikana. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole tiedossa, millä tasolla aurinkovoimaloiden asennukset maailmalla ovat. Eli saadaanko niistä sellaisia tuotantolukemia, joita niiden sijainnin määrittämät olosuhteet niille edellyttävät.

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena onkin selvittää millä tasolla aurinkopaneelien toiminta on Pohjoismaissa ja muualla, ja mitkä tekijät vaikuttavat paneelien toimintaan. Selvityksen kohdemaiksi valittiin Suomi, Ruotsi, Norja, Tanska, Saksa, Italia ja Kiina. Islanti jätettiin selvityksen ulkopuolelle, koska Sunny Portalissa ei ole raportoitu yhdenkään islantilaisen voimalan tietoja. Saksa, Italia ja Kiina valikoituivat Pohjoismaiden rinnalle sen takia, että ne

kuuluvat maailman johtavimpiin aurinkosähkön tuottajiin. Selvitys tehdään vertailemalla kohdemaista kerättyjen aurinkosähkövoimaloiden ominaistuottoja simuloimalla saatuihin maksimimainaistuottoihin. Vertailussa on myös tarkoitus käyttää hyväksi voimaloiden aurinkopaneelien taso- ja suuntakulmia, sekä simulointien käyttämiä vuoden keskilämpötiloja, selkeys kertoimia ja vuoden keskimääräisiä säteilyarvoja. Vertailua on tarkoitus tehdä myös selvitysmaiden välillä.

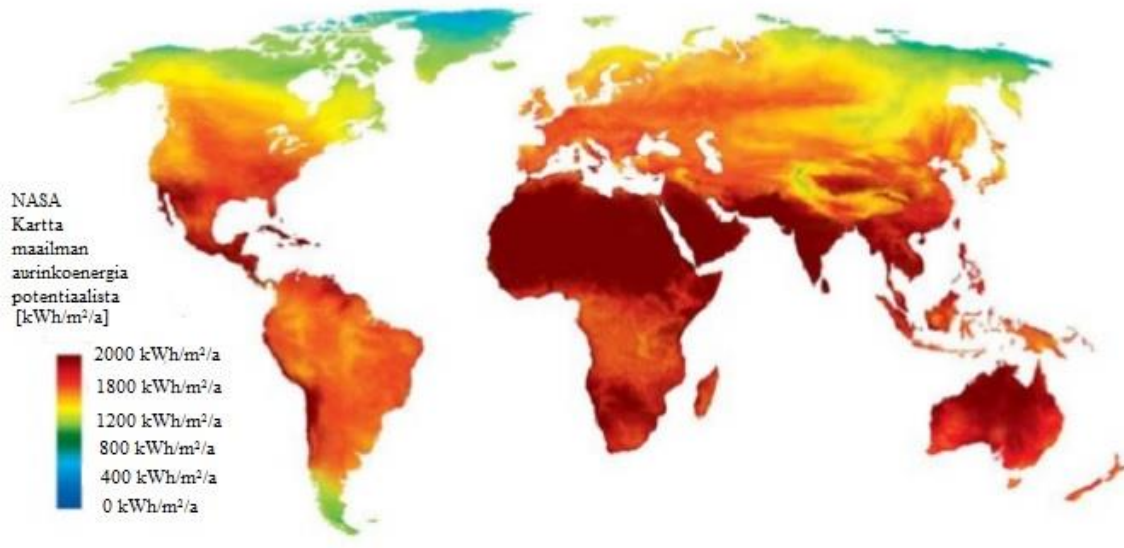
2 AURINKOSÄHKÖ

2.1 Aurinko ja sen säteily

Aurinko on heliumista ja vedystä rakentuva kaasupallo, tähti, jota maa ja muut aurinkokuntamme planeetat kiertävät. Auringon halkaisija on 1 390 000 kilometriä ja sen etäisyys maahan on 149,6 miljoonaa kilometriä. Auringosta peräisin olevan säteilyn matka maanpinnalle kestää kahdeksan ja puoli minuuttia. (Tähtiakatemia.) Auringon tuottama energia on lähtöisin sen ytimeistä, jossa vety fuusioituu heliumiksi. Aurinko on tällä hetkellä elinkaarensa puolessa välissä ja sen oletetaan toimivan vielä ainakin 5 miljardia vuotta. (NRPIF.)

Auringosta maahan kohdistuvan säteilyn teho on 170 PW. Auringon säteilystä noin puolet palautuu maapallon pinnalta takaisin avaruuteen tai absorboituu ilmakehässä oleviin kaasuihin, kuten vesihöyryyn. Suurin osa maan pinnalle jäävästä auringon säteilytehosta muuttuu lämmöksi, ja tästä jäljelle jäävä osa muodostaa tuulia ja merivirtoja sekä osallistuu fotosynteesiin. Maan pinnalle tulevan auringon säteilyn energiatiheys on parhaimmillaan noin 1 kW/m². Auringosta peräisin olevan energian suuruus maan pinnalle on 15 000-kertainen verrattuna vuosittaiseen energian kokonaiskäyttöön maapallolla. (Hellgren et al. 1996, 28.)

Auringon säteily jakautuu maanpinnalle epätasaisesti, kuten kuva 1 osoittaa. Suurimmat auringon säteilymäärät osuvat kääntöpiirien välillä. Toisaalta, kuten kuvasta 1 voi huomata, Saksaan, jonka aurinkopaneelikapasiteetti on yksi maailman suurimmista (REN 21 2014, 49), tuleva säteily määrä on lähes yhtä suuri kuin Suomeen tulevan säteilyn määrä.



Kuva 1. Auringon säteilyn jakautuminen maapallolla (Ahola 2012).

2.2 Aurinkopaneelit: säteilystä sähköksi

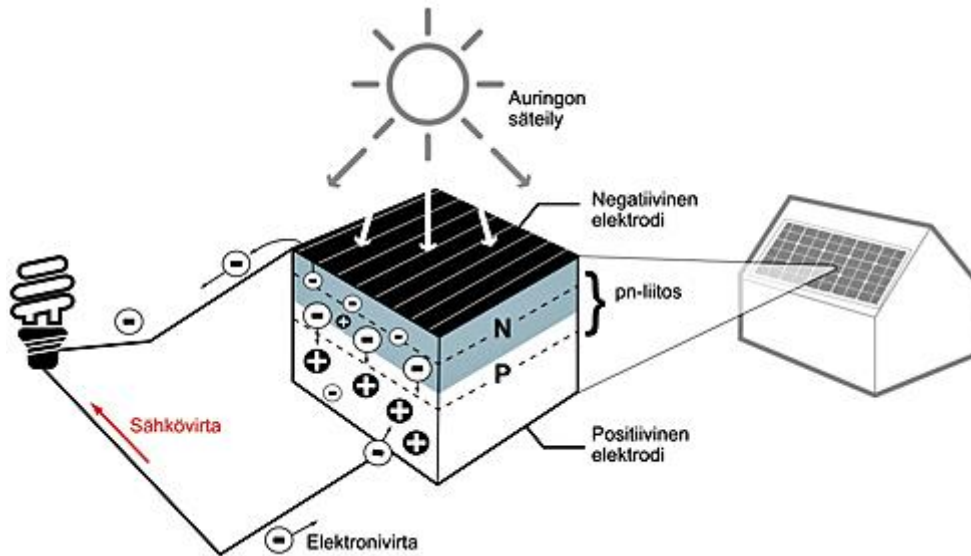
Auringon säteily koostuu fotoneista, eli hiukkasista, jotka kuljettavat auringon säteilyenergiaa auringosta maanpinnalle. Fotoneiden törmätessä aurinkokennojen pintaan, siirtyy fotoneihin varastoitunut energia kennon elektroneihin. Elektronit siirtävät fotoneista saamansa energian aurinkokennojen virtajohtimiin, jolloin syntyy sähköä. Tätä kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi. (Motiva.)

2.2.1 Aurinkopaneelin toimintaperiaate

Aurinkopaneeli koostuu useista yhteen kytketyistä aurinkokennoista. Aurinkokennojen toiminta perustuu puolijohderajapintaan, millä tarkoitetaan kahden erilaisen puolijohdelevyn liitoskohtaa. Tätä liitoskohtaa kutsutaan aurinkopaneelitekniikassa p-n-liitokseksi. Nimi p-n-liitos tulee siitä, että toinen levy on varaukseltaan positiivinen (p) ja toinen negatiivinen (n). Esimerkiksi negatiiviseen pii-levyyn on lisätty negatiivisesti varautunutta ainetta, joka yleensä aurinkopaneelitekniikassa on fosforia. Positiiviseen piilevyyn on taas lisätty positiivisesti varautunutta ainetta, joka usein aurinkopaneelitekniikassa on booria. Kun levyt liitetään yhteen, muodostuu niiden välille sähkökenttä. (Boyle (toim.) 2004, 69–71.)

Auringon säteilyn osuessa kennon pintaan, fotonit kulkeutuu sen läpi. Tämän jälkeen fotonit siirtävät varastoimansa energian kennomateriaalin positiivisille ja negatiivisille

varauksenkuljettajille. Positiiviset ja negatiiviset varauksenkuljettajat alkavat kulkeutua eri suuntiin p-n-liitoksen sähkökentän vaikutuksen takia. P-n-liitoksesta varauksenkuljettajat kulkevat ulkoiseen virtapiiriin, jossa voi olla esimerkiksi hehkulamppu, kuten kuva 2 osoittaa. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio a.)



Kuva 2. Aurinkopaneelin toimintaperiaate (Motiva).

2.2.2 Yksi- ja monikiteiset aurinkopaneelit

Yleisimmät aurinkopaneelityypit valmistetaan yksi- (c-Si) tai monikiteisestä (mc-Si) piistä. Yksikiteisillä piipaneeleilla päästään tällä hetkellä parempiin hyötysuhteisiin, kuin monikiteisillä paneeleilla. Yksikiteisten paneelien hyötysuhde voi olla jopa 25 prosenttia. Yksikiteisten piipaneelien suurimpia ongelmia ovat kuitenkin suuret valmistuskustannukset, sekä valmistukseen kuluva suuri energiamäärä. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

Monikiteiset piipaneelit ovat yksikiteisiä helpompia valmistaa, mutta niiden hyötysuhde on yksikiteisiä heikompi. Monikiteisten paneelien hyötysuhde on noin 20 prosenttia. Monikiteiset piipaneelit tekee helposti valmistettaviksi se, että pii saadaan monikiteiseksi saattamalla sula pii kiinteään muotoon. Monikiteisyys kuitenkin altistaa piitä hilavirheille, mikä saattaa heikentää paneelin toimintaa ja vaikuttaa paneelin sähköntuotantoon. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

2.2.3 Muita aurinkopaneelityyppejä

Yksi- ja monikiteisten piipaneelien lisäksi on olemassa myös muita aurinkopaneelityyppejä. Näitä ovat muun muassa ohutkalvo-, nano- ja avaruusteknologiaan perustuvat paneelit. Nämä paneelityypit eivät kuitenkaan ole vielä saavuttaneet yksi- ja monikiteisten paneelien kaltaista suosiota, huonompien hyötysuhteiden tai korkeampien valmistuskustannuksien takia. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

Ohutkalvoteknologiassa aurinkopaneeli valmistetaan käyttämällä metallipuolijohdeyhdisteitä kuten kadmium-telluridia (CdTe) tai kupari-indium-diselenidia (CIS). Edellä mainittujen lisäksi ohutkalvoteknologiassa voidaan käyttää amorfista piitä (a-Si), jolla ei ole kiderakennetta. Ohutkalvoteknologia on viime aikoina yleistynyt yksi- tai monikiteisiä piipaneelleja pienempien materiaalikustannuksien takia, mikä johtuu vähäisemmästä aktiivisen aineen määrästä. CIS-paneelien hyötysuhde on 18 prosenttia, CdTe-paneelien 16 prosenttia ja amorfisesta piistä valmistettujen paneelien 13 prosenttia. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

Väriaineaurinkopaneeli on yksi aurinkopaneeliteollisuuden uusimmista keksinnöistä. Niiden toiminta perustuu nanoteknologiaan ja sähköntuotanto titaanidioksidinanopartikkeleiden pintaan kiinnittyneiden väriainemolekyylien kykyyn tuottaa auringon säteilystä sähköä. Väriaineaurinkopaneelien etuina pidetään vähäisiä valmistus- ja käyttökustannuksia. Nanoteknologiaan perustuvien paneelien hyötysuhde on kuitenkin vain 11 prosenttia. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

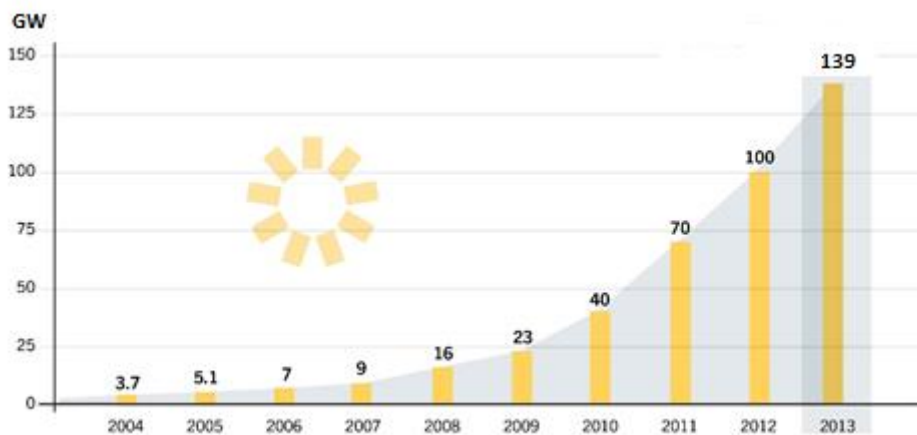
Avaruusteknologiaan perustuvat aurinkopaneelit on valmistettu Ga-As-materiaalista, ja niiden rakenne perustuu niin kutsuttuun monikerrosteknologiaan. Avaruusteknologiaan perustuvia paneeleita käytetään vain avaruudessa, niiden korkeiden valmistuskustannuksien takia. Niiden hyötysuhde voi olla jopa 40 prosenttia, mikä on huomattavasti enemmän kuin yleisimmillä puolijohdeteknologiaan perustuvilla piipaneelleilla. (Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b.)

2.2.4 Aurinkopaneelien hyötyjä ja haittoja

Aurinkopaneelien vaikutus ympäristöön on pienempi kuin muiden sähköntuotantomenetelmien, kun otetaan huomioon sekä uusiutumattomat että uusiutuvat energiantuotantomenetelmät. Aurinkopaneelit eivät tuota ympäristöön lainkaan kaasu- tai nestemäisiä päästöjä. Toisaalta paneelien vaurioituessa on mahdollista, että ympäristöön pääsee paneelista myrkyllisiä aineita, kuten kadmiumia, jota käytetään joissakin paneeleissa valmistusmateriaalina. Vaikka aurinkopaneelit eivät aiheutakaan suoranaisesti haittaa ympäristölleen, eivät ne välttämättä miellytä kaikkien silmää. Esimerkiksi omakotitalon katolle asennetut paneelit saattavat aiheuttaa erimielisyyksiä naapureiden välillä. (Boyle (toim.) 2004, 95–96.)

3 AURINKOSÄHKÖN NYKYTILANNE POHJOISMAISSA JA MUUALLA

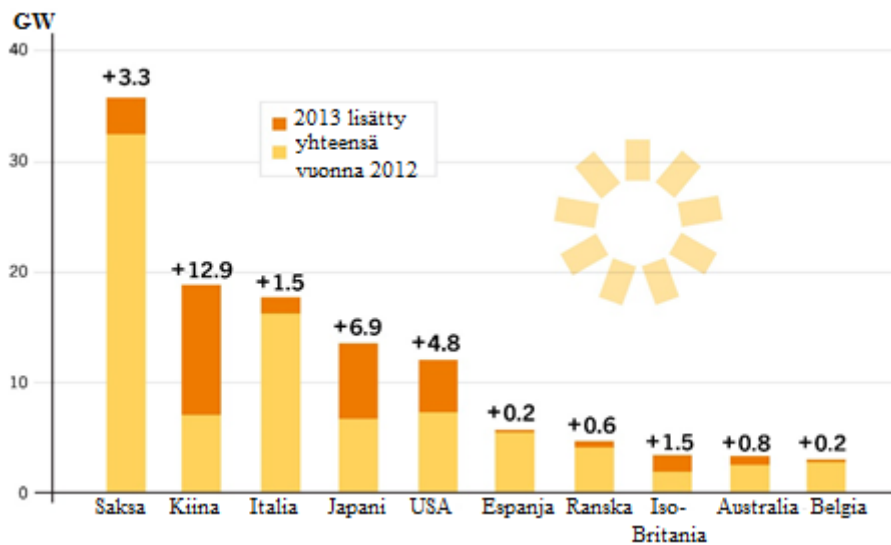
Vuonna 2013 aurinkopaneeleja asennettiin vesivoimaa lukuun ottamatta enemmän kuin muita uusiutuvia energiantuotantojärjestelmiä. Maailmassa kyseisenä vuonna asennettiin 39 GW:n tehosta aurinkosähkövoimaloita, mikä nosti voimaloiden yhteenlasketun määrän 139 GW:iin. Aurinkosähkövoimaloiden yhteenlaskettua kapasiteettia, ja sen kasvua vuosien 2004 ja 2013 välisenä aikana maailmassa, havainnollistetaan kuvassa 3. (REN 21 2014, 47.)



Kuva 3. Aurinkosähkökapasiteetin kasvu maailmalla vuosina 2004-2013 (REN 21 2014, 49).

Vuonna 2013 Aasia nousi ensimmäistä kertaa Euroopan ohi aurinkosähkömarkkinoiden johtajaksi. Tämä kehitys johtuu suurimmaksi osaksi Kiinan lisäämästä aurinkosähkön

tuotantokapasiteetista. Vuonna 2013 maailman kolme eniten aurinkosähkövoimaloita asentanutta maata olivat Kiina, Japani ja Yhdysvallat. Saksa säilytti vuonna 2013 asemansa maana, jolla on eniten aurinkopaneelikapasiteettia maailmassa. Tämä käy ilmi kuvasta 4. Tämän lisäksi Saksa jatkoi Euroopan aurinkosähkömarkkinoiden johtajana. (REN 21 2014, 47.) Maailman suurin aurinkovoimala sijaitsee Yhdysvalloissa, Kalifornian San Luis Obisbon piirikunnassa ja se on teholtaan 550 MW (Ikkala 2014).



Kuva 4. 10 maata, joilla on eniten aurinkopaneelikapasiteettia maailmassa. (REN 21 2014, 49).

3.1 Suomi

Aurinkosähkön tuotanto on Suomessa hyvin pienimuotoista, eikä tarkkoja tuotanto- ja asennuslukuja ole tällä hetkellä saatavilla. Aurinkosähkö esitetäänkin useissa lähteissä muiden uusiutuvien energialähteiden kanssa. Kuitenkin Fortumin mukaan tämänhetkinen aurinkosähköjärjestelmien määrä on noin 10 MW, ja näistä suurin osa on asennettu mökeille, eikä niitä ole kytketty verkkoon (Fortum 2014). Suomen suurin aurinkosähkövoimala on 322 kW:n kokoinen, ja se sijaitsee Salossa Astrum-liikekeskuksessa (Aurinkoenergia.fi 2015).

3.2 Ruotsi

Viime vuosien aikana Ruotsissa on asennettu yhä enemmän ja enemmän aurinkokennojärjestelmiä. Kun tutkitaan yli 40 W:n aurinkosähkövoimaloita, voidaan todeta, että vuosien 2012 ja 2013 välillä asennettujen voimaloiden yhteenlaskettu teho

kaksinkertaistui. Vuonna 2013 Ruotsissa asennettiin 19,1 MW:n edestä aurinkosähkövoimaloita, kun taas vuonna 2012 asennettujen voimaloiden yhteenlaskettu teho oli 8,3 MW. Vuonna 2013 yli 40 W:n aurinkovoimaloiden kumulatiivinen teho oli 43,2 MW, jolla voitiinkin tuottaa noin 39 GWh sähköä vuodessa. Tämä vastasi 0,03 prosenttia vuoden 2013 sähkön tuotannosta Ruotsissa. (Lindahl 2014, 4.)

3.3 Tanska

Aurinkosähkövoimaloiden määrä on Tanskassa kasvanut räjähdysmäisesti 2010-luvun aikana. Räjähdyksmäisen kasvun aiheutti Tanskan hallituksen päätös aurinkosähkön myynnin vuosinetotuksesta. Hallitus kuitenkin päätti lopettaa vuosinetotuksen ensimmäisen vuoden, eli vuoden 2012 jälkeen, minkä takia vuonna 2013 asennettiin vähemmän voimaloita kuin vuonna 2012. Vuonna 2012 yli 40 W:n voimaloita asennettiin 72 221 kappaletta ja niiden yhteen laskettu teho oli 406,7 MW. Vuonna 2013 voimaloita asennettiin kuitenkin enää 29 370 kappaletta, 155,4 MW:n edestä. Vuonna 2013 Tanskan yli 40 W:n aurinkosähköjärjestelmien kumulatiiviseksi tehoksi olikin arvioitu 563,3 MW. (Ahm 2014, 4,7–8.)

3.4 Norja

Vuonna 2013 Norjaan asennettiin 0,62 MW:n edestä yli 40 W:n aurinkosähkövoimaloita. Samana vuonna yli 40 W:n aurinkosähkövoimaloiden kumulatiivinen teho oli 8,5 MW, mikä oli 0,5 MW:n lisäys vuoteen 2012. Norjassa tuotettiin 0,006 prosenttia sähköstä aurinkokennojärjestelmien avulla vuonna 2013. (Holm 2014, 4–5.)

3.5 Saksa

Saksa on yksi maailman johtavista aurinkosähkön tuottajista. Vuonna 2013 Saksassa kulutetusta energiasta 0,7 prosenttia oli aurinkopaneeleilla tuotettua. Kyseisenä vuonna yli 40 W:n aurinkopaneelijärjestelmien yhteenlaskettu kapasiteetti oli 35,9 GW, kun vuonna 2012 se oli 32,6 GW. (Wissing 2014, 7,9.)

3.6 Italia

Vuonna 2013 Italian aurinkopaneelien kumulatiivinen kapasiteetti kasvoi 10 prosentilla edellisvuoteen verrattuna. Kumulatiivinen kapasiteetti oli näin ollen vuonna 2013 Italiassa 18 070 MW ja asennettujen aurinkopaneelijärjestelmien määrä oli 590 500 kappaletta. Aurinkopaneeleilla tuotettiin sähköä 7 prosenttia vuonna 2013 ja 5,6 prosenttia vuonna 2012 koko Italian sähkön kulutuksesta. (Castello et al. 2014, 4–7.)

3.7 Kiina

Vuonna 2013 Kiinaan asennettujen, yli 40 W:n aurinkosähkövoimaloiden kapasiteetti kasvoi 306 prosentilla edellisvuoteen nähden, ja se oli vuoden lopussa 13 GW. Kumulatiivinen kapasiteetti puolestaan nousi kyseisenä vuonna 19,7 GW:iin. Kiinan valtion tavoitteena oli vuoden 2012 "Twelfth plan of five years on renewable energy" lausunnon mukaan lisätä aurinkosähkön tuotantoa niin, että kumulatiivinen kapasiteetti vuonna 2015 olisi 20 GW ja vuonna 2020 jo 50 GW. (Lv et al. 2014, 1-4, 19.)

4 AURINKOSÄHKÖN TUOTTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Aurinkopaneeleilla ei yleensä yllätä niiden potentiaaliseen maksimituottoon. Tähän löytyy useita syitä, jotka usein johtuvat joko ympäristön asettamista olosuhteista, tai teknisistä seikoista (Gevorkian 2011, 118). Seuraavaksi kerrotaankin tarkemmin eräistä seikoista, jotka vaikuttavat aurinkopaneelien tuotannon suuruuteen.

4.1 Säteily

Kuten kuva 1 kertoo, auringon säteily jakautuu epätasaisesti maapallolle. Säteily on voimakkainta kääntöpiirien välisellä alueella. Toisaalta voidaan myös todeta, ettei yhdessä maailman johtavimmista aurinkosähkön tuottajista, Saksassa auringon säteily ole juurikaan voimakkaampaa kuin Suomessa.

Auringon säteilyn voimakkuus vaikuttaa myös paneelista saatavaan tehoon. Mitä suurempi auringon säteily on, sitä suurempi teho paneelista saadaan. Esimerkiksi jos 50 W_p:n paneeliin, jossa kulkee 13 V:n latausjännite, saadaan standardiolosuhteissa paneelista 40 W:n teho. Standardiolosuhteella tarkoitetaan olosuhdetta, jolloin auringonsäteily on

voimakkuudeltaan 1000 W/m^2 , paneelin lämpötila $+25^\circ \text{C}$, ja aurinko horisontin yläpuolella $41,81^\circ$. Kun auringon säteilytehot ovat 500 W/m^2 ja 100 W/m^2 ovat tehotuotannot 20 W ja 4 W . (Suntekno 2010.)

4.2 Lämpötila

Aurinkopaneelin lämpötila vaikuttaa myös paneelista saatavaan tehoon. Paneelissa kulkevan virran on huomattu kasvavan noin 0,065 prosenttia paneelin lämpötilan kasvaessa yhdellä asteella. Tämä ilmiö perustuu siihen, että lämpötilan kohotessa paneelissa kulkevien termisten varaustenkuljettajien määrä lisääntyy. Kun paneelin lämpötila nousee asteella, puolestaan tyhjäkäyntijännite kääntyy laskuun noin 0,5 prosentilla. Koska tyhjäkäyntijännitteen lasku on suurempi kuin virran kasvu, alenee paneelin teho yhtä paljon kuin tyhjäkäyntijännite paneelin lämpötilan noustessa. Tämän takia paneeleista saadaankin suurempi teho silloin kun ympäristön lämpötila on alhainen. Esimerkiksi, kun ympäristön lämpötila on 0 astetta, on paneelista saatava teho 10 prosenttia suurempi kuin ympäristön lämpötilan ollessa 25 astetta. Vaikka ympäristön lämpötila olisi 25 astetta, saattaa paneelin lämpötila olla yli 50 astetta auringon lämpösäteilyn takia. Tämä voikin aiheuttaa hyvällä paneelilla yli 10 prosentin tehon vähennyksen ja huonolla paneelilla tätäkin suuremman vähentymisen. Paneelien lämpenemisen takia, ne on asennettava niin, että tuuli ja ilmavirrat pääsisivät jäädyttämään paneeleita mahdollisimman tehokkaasti. (Suntekno 2010.) Jos paneeli asennetaan esimerkiksi katolle, ei sitä saa kiinnittää kattoon kiinni, vaan katon pinnan ja paneelin välille on jätettävä tilaa, jossa ilmavirta voi kulkea.

4.3 Pöly, lika, lumi ja kuura

Pöly, lika, lumi ja kuura vaikuttavat negatiivisesti aurinkopaneelien tuotantoon. Ne peittävät paneelin pintaa, ja estävät näin fotonien kulkeutumisen paneelin pinnan läpi. Paneelin pintaa onkin pidettävä puhtaana, jotta tuotanto saataisiin pidettyä mahdollisimman hyvänä. Sade auttaa pitämään paneelin pintaa puhtaana pölyltä ja lialta (Helen). Paneeleita ei suositella asennettavaksi alle 10° kulmaan, sillä tällöin sade ei pääse puhdistamaan paneelia kunnolla (Clean Energy Council).

4.4 Varjostukset

Varjostukset vaikuttavat aurinkopaneelien tuotantoon, sillä varjot estävät auringon säteilyn kulkeutumista paneelille. Jopa osittainen varjostus paneelilla vaikuttaa rajusti paneelista saatavaan tuottoon. Esimerkiksi jos 36 kennon aurinkopaneelista, yksi kenno peittyy varjosta, putoaa paneelin teho puolella. Tämän takia onkin aurinkopaneeleja asennettaessa huomioitava mahdolliset varjoja aiheuttavat tekijät. Näitä voivat olla puut, ympärillä olevat rakennukset tai savupiiput. (plug into the sun, 2–3.) Terävät varjot, kuten rakennuksien tai savupiippujen varjot aiheuttavat suurempia sähköntuotto-menetyksiä kuin siroavat varjot, jotka voivat olla peräisin esimerkiksi puiden oksista.

4.5 Suunta- ja asennuskulma

Auringon säteilyn tulokulma vaihtelee vuorokauden sekä vuoden eri aikoina. Tämä vaikuttaakin paneelista saatavan tehon suuruuteen. Paneeli saa suurimman säteilytehon auringosta silloin, kun paneelin normaalin ja säteilyn välinen kulma on nolla. Säteilyn tulokulman muuttuessa myös säteilyn teho muuttuu. Esimerkiksi jos säteilyn tulokulma paneelille on 30°, pienenee säteilyteho 13 prosentilla. Auringon säteilyn tulokulmaan voidaan vaikuttaa paneelin suunta- ja asennuskulman avulla. Paneelit on suunnattava niin, että se saavat mahdollisimman pitkän ajan päivästä auringon säteilyä. (Suntekno 2010.) Yksityiskäyttöön tarkoitettujen aurinkopaneelien asennetaan tyypillisesti omakotitalojen katoille, sillä tällöin paneelille osuu vähiten varjostuksia ja maan pinnan tasolta ei mene ylimääräistä tilaa paneelin käyttöön (Aurinkovirta a).

Aurinkopaneelin suunta- ja kallistuskulmalla on mahdollista vaikuttaa aurinkopaneelista saatavaan sähkön vuosituottoon ja siihen miten sähköntuotanto jakautuu päivän sisällä eri tunneille ja eri kuukausien välillä. Etelään suunnatuilla aurinkopaneeleilla saadaan suurimmat vuosituotannot ja niiden päivän huipputuotanto ajoittuu keskipäivälle. Paneelin suuntauksen ollessa itään päin, paneelin huipputuotanto ajoittuu aamupäivälle, kun taas länteen suunnatuilla paneeleilla huipputuotanto ajoittuu iltapäivälle. Jos paneeli on asennettu jyrkästi itään päin, putoaa iltapäivän tuotanto huomattavasti. Edellä mainittujen ilmansuuntien lisäksi hyviä paneelien suuntausvaihtoehtoja ovat kaakko ja lounas. (Aurinkovirta a.)

Katoille asennettavien aurinkopaneelien kallistuskulmat vaihtelevat tyypillisesti 10° – 40° asteen välillä, eli katon harjan suuntaisesti. Kulman muuttaminen muun kuin katon harjan kulmaksi, ei yleensä anna hyötyä sähköntuotannossa. Tasamaalla ja tasakatolla sijaitsevia aurinkopaneeleita voidaan asentaa optimitasokulmaan, joka Etelä-Suomessa on noin 40° . Aurinkopaneeleita on myös mahdollista asentaa erityistapauksissa 80° – 90° kulmaan. Nämä ovat yleensä seinäasennuksia. (Aurinkovirta a.)

4.6 Paneelien väliset erot

Kuten luvussa 2.2 kerrottiin, on olemassa erilaisia aurinkopaneelityyppejä, joiden hyötysuhteet ovat myös mallikohtaisia. Paneelien väliset tuotantoerot saadaan kuitenkin selville vain käytössä. Photon Laboratory on julkaissut listan, jossa eri valmistajien paneelit on laitettu paremmuusjärjestykseen suorituskykynsä perusteella. Suorituskyky ottaa huomioon paneelin hyötysuhteen standardioloissa sekä saatavilla olevan säteilyn määrän. – Vuonna 2013 parhaimmaksi aurinkopaneelimalliksi arvioitiin Sorey Energy valmistama yksikiteinen SR-190 paneeli, jonka suorituskyky 94,0 prosenttia. Heikoin sähköntuotto oli vuonna 2013 Ever Green Solar yhtiön valmistamalla ES-180-RL paneelilla, jonka suorituskyky oli 76,6 prosenttia. (Photon Laboratory, 3–5,7.) Myös samanmallisilla paneeleilla saattaa olla eroja niiden nimellistehoissa. Paneelien valmistajat yleensä merkitsevät paneelin nimellistehon perään $0/+5$ W, tai $+3$ W, ja tätä kutsutaan tehotoleranssiksi (Aurinkovirta b).

4.7 Siirtojohtimien tehohäviöt

Siirtojohtimessa kulkeva virta lämmittää johdinta, mikä aiheuttaa paneeleissa tehohäviötä. Jotta tehohäviöt saataisiin mahdollisimman pieniksi, tulisi johtimen virran ja resistanssin olla mahdollisimman pieniä. Tämä onnistuu käyttämällä mahdollisimman paksua ja hyvin sähköä johtavaa johdinta. (Suntekno 2010.) Sarjaankytkennällä saadaan nostettua paneelin jännitettä (Energiateollisuus). Hyviä johdinmateriaaleja ovat esimerkiksi kupari ja hopea. Kuparia käytetään yleisesti johdinmateriaalina, mutta hopeaa vain esimerkiksi aurinkopaneelien pintaliitoksissa. (Suntekno 2010.)

4.8 Invertterin häviöt

Aurinkopaneelit tuottavat tasavirtaa. Jotta aurinkopaneelien tuottamaa sähköä voitaisiin käyttää hyväksi, on tasavirta muutettava invertterin avulla vaihtovirraksi. Invertterin avulla paneelin synnyttämän virran jännite voidaan muuttaa sähköverkkoon sopivaan muotoon. Invertteri tuottaa joko siniaaltoa, tai modifioitua siniaaltoa. Modifioitua siniaaltoa käyttävät erilaiset sähkömoottorit ja lämmitysvastukset. Siniaaltoa puolestaan käyttävät kaikki sähköverkon laitteet. Modifioitua siniaaltoa tuottavilla inverttereillä on kuitenkin siniaaltoa tuottaviin inverttereihin nähden pienemmät häviöt. Jos aurinkopaneeleilla halutaan tuottaa sähköä valtakunnan verkkoon, on käytettävä verkkoinverttereitä. (Kekkonen 2014.) Hyvän verkkoinvertterin hyötysuhde on 97,5 ja 98,5 prosentin välillä. Se osa mitä verkkoinvertteri ei pysty muuttamaan sähköksi (1,5–2,5 prosenttia), muuttuu hukkalämmöksi. (Aurinkovirta c.)

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusta varten kerättiin 321 aurinkosähkövoimalan tiedot ympäri maailmaa. Tuloksissa keskitytään kuitenkin vain Pohjoismaiden, pois lukien Islannin, sekä Saksan, Italian ja Kiinan voimaloiden tarkasteluun. – Aurinkosähkövoimaloiden tiedot saatiin kerättyä invertterivalmistaja SMA:n ylläpitämän Sunny Portal -pilvipalvelun avulla. Kerättyjen voimaloiden sijaintitietojen perusteella, jokaiselle voimalaitoksen paikkakunnalle simuloitiin oma maksimiominaistuohto. Simulointiohjelmana työssä käytettiin HOMER:a.

5.1 Sunny Portal

Vuonna 1981 perustettu SMA Solar technology AG on yksi maailman johtavimmista invertterien valmistajista. Yrityksellä on yli 5000 työntekijää yli 21 maassa, ja sen päämaja sijaitsee Niestetalissa, Saksassa. Sen liikevaihto oli vuonna 2013 932,5 miljoonaa euroa. Yritys tuottaa inverttereitä sekä teollisuusmaihin, että kehittyviin maihin. (SMA.)

Tutkimukseen osallistuvien aurinkovoimaloiden tiedot kerättiin SMA:n ylläpitämästä pilvipalvelusta, Sunny Portalista. Sunny Portal on kaikille avoin pilvipalvelu, josta löytyvät kaikkien SMA:n invertterien ohjaamien voimaloiden tiedot, jos vain käyttäjä on sinne rekisteröitynyt ja asettanut tiedot julkisiksi. Voimaloista kerättäviä tietoja olivat voimalan

nimi, maantieteellinen sijainti, paneelien suunta- ja tasokulmat, jos ne olivat erikseen voimalan tiedoissa ilmoitettu. Näiden tietojen lisäksi dokumentoitiin voimalan teho sekä kuukausikohtainen tuotanto yhden vuoden ajalta. Suurin osa tuotantotiedoista on peräisin vuosilta 2012–2014. Kuukausikohtaisten tuotantojen perusteella laskettiin kullekin voimalalle vuosituotanto, jonka avulla laskettiin ominaistuotto. Ominaisuotto saatiin laskettua seuraavalla tavalla:

$$\frac{\text{Voimalan vuosituotanto [kWh]}}{\text{Voimalan nimellisteho [kWp]}} \quad (1)$$

Ominaisuottojen avulla on tässä työssä tarkoituksena vertailla voimaloiden toimintaa vertailukelpoisesti toisiinsa, ja selvittää minkälaisia voimaloiden erot ovat maan sisällä, sekä tutkittavien maiden välillä.

Työssä käytettävät voimalat valittiin maantieteellisen sijaintinsa sekä voimalasta saatavien tietojen perusteella. Voimalat pyrittiin valitsemaan maan sisällä niin, että ne kattaisivat maan mahdollisimman laajasti, mutta kuitenkin niin, ettei voimaloita olisi maata kohti kymmentä enempää. Voimaloita ei valittu kymmentä enempää, ettei työstä tulisi liian laajaa. Dokumentointiin pyrittiin ottamaan mukaan ne voimalat, joista oli saatavilla tutkimuksen kannalta oleelliset tiedot. Tämä ei kuitenkaan onnistunut suurimmassa osassa voimaloista, sillä suurin osa ei ole julkaissut Sunny Portalissa tietoja paneelien suunta- ja/tai asennuskulmista. Vaikka asennus- ja/tai suuntakulma puuttui suurimmasta osasta voimaloista, ei sitä pidetty esteenä voimalan ottamiseksi tutkimukseen mukaan.

Tätä työtä varten on dokumentoitu Sunny Portalista eri maiden voimaloita aakkosjärjestyksessä A:sta L kirjaimen. Lisäksi työssä on käytetty hyväksi Sami Piironen dokumentoimia Ruotsin ja Norjan voimaloita. Liitteenä on kuva, josta näkyy kaikkien tätä työtä varten kerättyjen voimaloiden sijainti.

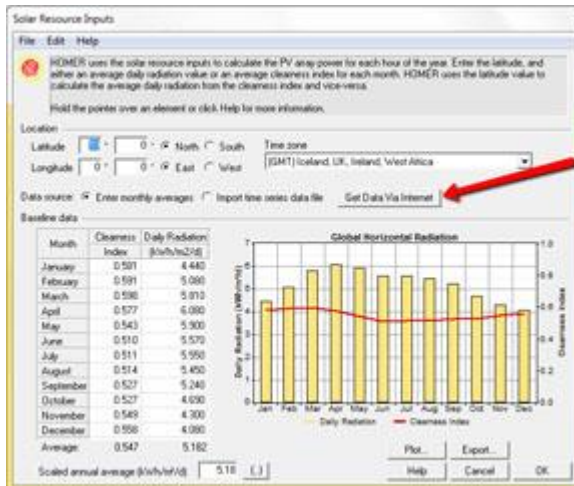
5.2 HOMER

HOMER simulointiohjelma suunniteltiin aluksi National Renewable Energy Laboratory:n, mutta nykyään sen toiminnasta vastaa HOMER Energy. HOMER:a voidaan käyttää, kun

halutaan mallintaa uusiutuvia luonnonvaroja energialähteenä käyttäviä energiantuotantojärjestelmiä. Simuloitavat järjestelmät voivat olla kytkettyjä verkkoon, mutta se ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Simulointien lisäksi HOMER:lla voidaan tehdä optimointi- ja herkkyysoanalyysyjä, joiden avulla voidaan arvioida projektin taloudellisia ja teknisiä puolia. HOMER:lla voidaan mallintaa seuraavanlaisia energiantuotantojärjestelmiä: aurinkopaneelijärjestelmiä, tuulivoimaloita, vesivoimaloita, biomassaa käyttäviä energiantuotantojärjestelmiä, generaattoreita, jotka käyttävät dieseliä, bensiiniä, biokaasua tai vaihtoehtoisia polttoaineita, sähköverkkoa, mikroturbiineja sekä polttokennoja. Energian varastointiin voidaan simuloinneissa käyttää vauhtipyöriä, akkuja, virtausakkuja sekä vetyä. (HOMER Energy a.)

Tuotannon simulointi tehtiin 1 kW:n aurinkosähköjärjestelmälle. Simuloinnissa aurinkosähkövoimalaitos liitettiin sähköverkkoon. Simulointiin määritettiin valmiiksi erilaisia paneelien kaltevuuskulmia ja suunnaksi etelä. Kaltevuuskulmien vaihtoehdot olivat 0° – 90° välillä, 5° välein.

Jokaisen simuloinnin kohdalla määriteltiin erikseen voimalan sijainti, syöttämällä ohjelmaan sen sijaintipaikan koordinaatit. Sijainnin lisäksi jokaisen voimalan kohdalle määritettiin erikseen aikavyöhyke, jossa voimala sijaitsee. Voimalan sijaintitietojen syöttämistä ohjelmaan havainnollistetaan kuvassa 5. Sijaintitietojen perusteella HOMER etsi NASA:n tietokannan perusteella simuloitavalle paikalle sen päivittäisen säteilyn määrän keskiarvon kuukausittain, sekä näiden perusteella säteilyn vuoden keskiarvon skaalattuna. Säteilyarvojen lisäksi ohjelma määrittä satelliittien avulla paikalle kuukausi–kohtaisen selkeyskertoimen. Tämän jälkeen internetistä etsittiin jokaiselle paikkakunnalle jokaisen kuukauden keskilämpötilat, jotka syötettiin HOMER:iin. Joissakin tapauksissa keskilämpötiloja ei simuloitavalle paikkakunnalle löytynyt, jolloin simuloitaessa jouduttiin käyttämään jonkin läheisen kaupungin lämpötilatietoja.



Kuva 5. Voimalan sijaintitietojen syöttäminen HOMER:iin (HOMER Energy b).

Ohjelmaan syötettyjen sijainti-, aikavyöhyke- ja keskilämpötilatietojen perusteella HOMER laski jokaiselle kaltevuuskulmalle erikseen kuukausittaisen sekä koko vuoden sähköntuotannon. Eri kaltevuuskulmilla saaduista tuotannoista valittiin sen kulman tuotanto, jonka vuosituotanto oli suurin. Tällä tavalla saatiin määritettyä voimalalle sen sijainnin edellyttämä maksimiominaistuotto, jota vertaillaan voimalan ominaistuottoon.

6 TUTKIMUSTULOKSET

Tutkimustulokset on esitetty maittain seuraavien lukujen taulukoissa. Taulukoissa kerrotaan jokaisen tutkimukseen osallistuvan voimalan sijaintipaikkakunta, ja mitkä ovat paneelien suunta- ja tasokulmat, jos ne ovat tiedossa. Lisäksi taulukoissa esitetään jokaiselle paikkakunnalle simulointeja varten etsitty vuoden keskilämpötila, ja simulointiohjelman käyttämä vuoden keskimääräinen säteilyarvo sekä selkeyskerroin. Näiden tietojen lisäksi, taulukoissa esitetään jokaiselle voimalalle toteutuneet ominaistuotot sekä voimalan sijaintitietojen perusteella paikkakunnalle HOMER:lla määritetyt maksimiominaistuotot. Taulukoissa näkyy myös taso- ja suuntakulmat, joilla simuloidut maksimiominaistuotot on määritetty.

6.1 Suomi

Suomesta tutkittavat aurinkosähkövoimalat sijaitsevat Espoossa, Jokipiissä, Porissa, Vihtavuorella, Siivakkalassa, Kuukanniemessä, Nuijamaalla, Artjärvellä, Vaasassa sekä

Lappeenrannassa, kuten taulukosta 1 näkyy. Kaikista voimaloista ei ole Sunny Portalissa saatavilla tietoja taso- tai suuntakulmista. Vuoden keskimääräiset säteilymäärät vaihtelevat Vihtavuoren 2,60 kWh/m²/d ja Porin 2,98 kWh/m²/d:n välillä ja vuoden keskilämpötilat Vihtavuoren 2,6 °C ja Porin 4,8 °C välillä. Selkeys kertoimien perusteella selkeintä sää on Porissa, jonka selkeyskerroin on 0,55 ja pilvisintä Espoossa, jonka selkeyskerroin on 0,489.

Taulukko 1. Tutkimustuloksia Suomesta.

	Espoo	Jokipii	Pori	Vihtavuori	Siivakkala	Kuukanniemi	Nuijamaa	Artjärvi	Vaasa	Lappeenranta
Simuloinnin tasokulma	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Voimalan tasokulma	0;5	45;30	45;60;30	-	-	-	-	14	-	35
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	0	0;45	0	-	-	-	-	35	-	0
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	2,73	2,65	2,98	2,60	2,68	2,71	2,79	2,82	2,78	2,71
Vuoden keski-lämpötila [°C]	4,5	3,2	4,8	2,6	3,4	4,2	4,2	4,0	3,9	4,2
Selkeyskerroin	0,489	0,5	0,55	0,49	0,496	0,494	0,507	0,513	0,528	0,494
Simuloitu maksimi-ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1005	995	1105	983	1011	996	1043	1057	1026	997
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	718	626	921	536	793	824	785	873	861	905

6.2 Ruotsi

Ruotsista kerättiin aurinkosähkövoimaloiden tiedot Vikikingstadista, Sävsjöstä, Valdemarsvikistä, Uppsalasta, Skruvistä, Vaxholmista, Haaparannasta, Klippanista, Bohusista ja Tandsbystä, kuten taulukosta 2 voi havaita. Mikään tutkimukseen kuuluvista

voimalaitoksista ei ollut tietoja kerättäessä antanut tietoja aurinkopaneelien taso- tai suuntakulmista. Säteilyn määrä vaihtelee tutkimukseen kuuluvilla paikkakunnilla Tandsbyn 2,47 kWh/m²/d ja Klippanin 2,91 kWh/m²/d välillä. Vuoden keskilämpötilojen vaihtelu on puolestaan Haaparannan 1,5 °C ja Klippanin 8,2 °C välillä. Selkeintä sää on Vaxholmissa, jossa selkeyskerroin on 0,509. Pilvisintä sää puolestaan on Sävsjössä, jossa selkeyskerroin on 0,464.

Taulukko 2. Tutkimustuloksia Ruotsista.

	Vikingstad	Sävsjö	Valdemarsvik	Uppsala	Skruv	Vaxholm	Haaparanta	Klippan	Bohus	Tandsby
Simuloinnin tasokulma	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Voimalan tasokulma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	2,78	2,73	2,86	2,75	2,80	2,87	2,50	2,91	2,76	2,47
Vuoden keski-lämpötila [°C]	6,5	6,3	6,5	6,6	6,7	7	1,5	8,2	7,4	2,6
Selkeyskerroin	0,482	0,464	0,493	0,49	0,469	0,508	0,503	0,482	0,472	0,467
Simuloitu maksimiominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1016	992	1043	1018	1018	1045	940	1024	1002	911
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	951	976	966	917	835	969	993	1366	322	1063

6.3 Tanska

Tanskan tutkimuspaikkakunniksi valikoitui Aalborg, Esbjerg, Kööpenhamina, Randers NØ, Haderslev, Fredrikssund, Kalundborg ja Hurup thy. Kaikista tutkimuksessa käytetyistä aurinkovoimaloista on saatavilla tiedot aurinkopaneelien tasokulmista, kuten taulukosta 3

voi havaita. Kööpenhaminaa lukuun ottamatta, on kaikista saatavilla myös tiedot paneelien suuntakulmista. Voimaloiden aurinkopaneelien tasokulmat vaihtelivat, 2° ja 45° välillä. Simulointien perusteella maksimiominaistuothon saa tasokulman ollessa 40° tai 45°. Voimaloiden paneelien suuntakulmat vaihtelevat -10° ja 90° välillä, kun taas kaikki simuloinnit on suoritettu suuntakulman ollessa 0°, eli suunnan ollessa etelään. Säteilynmäärä Tanskasta tutkittavilla voimaloilla on Haderslevin ja Esbjergin 2,86 kWh/kW ja Aalborgin 3,09 kWh/kW välillä. Vuoden keskilämpötilat puolestaan jakautuvat 7,7 °C ja 8,7 °C välille. Lämpimintä on Hurup thyssa ja kylmintä Aalborgissa ja Fredrikssundissa. Selkeyskerroimet vaihtelevat Haderslevin 0,466 ja Aalborgin 0,518 välillä.

Taulukko 3. Tutkimustuloksia Tanskasta.

	Aalborg	Esbjerg	Kööpenhamina	Randers NØ	Haderslev	Fredrikssund	Kalundborg	Hurup thy
Simuloinnin tasokulma	40	45	45	45	40	45	45	45
Voimalan tasokulma	37	42;2	15	8	22	45	20	15;25
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	0	-20	-	-70	90; -90	-10	-65	-15
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	3,09	2,86	2,90	2,92	2,86	2,9	2,91	2,88
Vuoden keskilämpötila [°C]	7,7	8,3	8,2	7,8	7,9	7,7	8,2	8,7
Selkeyskerroin	0,518	0,469	0,477	0,487	0,466	0,477	0,479	0,483
Simuloitu maksimiominaistuothon per vuosi [kWh/kW]	1084	1014	1035	1044	1005	1038	1039	1026
Voimalan ominaistuothon per vuosi [kWh/kW]	1015	965	940	905	923	1103	966	1013

6.4 Norja

Norjan aurinkosähkövoimaloista tutkimukseen osallistui Oslossa, Bergenissä ja Sandnessissa sijaitsevat voimalaitokset. Voimaloista ei ole Sunny Portalissa saatavilla tietoja taso- tai suuntakulmista, kuten taulukosta 4 voi havaita. Simuloimalla havaittiin, sähköntuotannon kannalta parhaiksi tasokulmiksi 45°. Suuntakulmana puolestaan käytettiin kaikissa simuloinneissa 0°. Säteilyn määrä vaihtelee tutkimukseen osallistuvien voimalaitoksien kesken Bergenissä 2,57 kWh/m²/d ja Sandnessissa 2,8 kWh/m²/d välillä. Vuoden korkein keskilämpötila on Bergenissä 7,6 °C ja alhaisin Oslossa 5,7 °C. Selkeintä sää on Bergenissä, jossa selkeyskerroin on 0,489. Pilvisintä puolestaan on Sandnessissa, jossa selkeyskerroin on 0,463.

Taulukko 4. Tutkimustuloksia Norjasta.

	Oslo	Bergen	Sandnes
Simuloinnin tasokulma	45	45	45
Voimalan tasokulma	-	-	-
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0
Voimalan suuntakulma	-	-	-
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	2,75	2,57	2,80
Vuoden keski-lämpötila [°C]	5,7	7,6	7,4
Selkeyskerroin	0,488	0,489	0,463
Simuloitu maksimiominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1008	913	1005
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	858	762	745

6.5 Saksa

Saksan tutkimustulokset on esitetty taulukossa 5. Saksasta kerättiin tiedot seitsemästä aurinkosähkövoimalasta, jotka sijaitsevat Hampurissa, Kölnissä, Berliinissä, Dresdenissä, Kasselissa, Heidelbergissä ja Passaussa. Voimaloiden paneelit on asennettu 0° ja 60° välille. Simulointien avulla saatiin kaikille paikkakunnille määritettyä sähköntuotannon kannalta parhaaksi tasokulmaksi 40°. Voimaloiden paneelit on puolestaan suunnattu -116° ja 64° asteen välille. Simuloinnit paikkakunnille suoritettiin suuntakulman ollessa 0°. Vuoden keskimääräinen säteilyn määrä vaihtelee Kasselin 2,71 kWh/m²/d ja Passaun 3,19 kWh/m²/d välillä. Vuoden keskilämpötilojen vaihteluväli on tutkittavilla paikkakunnilla Passaun 8,2 °C ja Heidelbergin 10,6 °C. Selkeintä sää on Passaussa ja pilvisintä Heidelbergissa. Passaussa selkeyskerroin on 0,463, kun taas Passaussa selkeyskerroin on 0,411.

Taulukko 5. Tutkimustuloksia Saksasta.

	Köln	Hampuri	Berliini	Dresden	Kassel	Heidelberg	Passau
Simuloinnin tasokulma	40	40	40	40	40	40	40
Voimalan tasokulma	32	60	0	9;12	22	38	30
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	40	7	0	-5	5	64; -116	45
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	2,82	2,73	2,74	2,81	2,71	3,06	3,19
Selkeyskerroin	0,424	0,432	0,425	0,425	0,411	0,45	0,463
Vuoden keski-lämpötila [°C]	10,0	9,0	9,7	9,2	9,0	10,6	8,2
Simuloitu maksimiominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	946	937	934	952	909	1018	1092
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	905	938	689	941	900	824	973

6.6 Italia

Italian tutkimustulokset on esitetty taulukossa 6. Italiasta kerättiin viiden aurinkosähkövoimalan tiedot. Nämä voimalaitokset sijaitsevat Astissa, Bolognassa, Milanossa, Barissa ja Venetsiassa. Astissa sijaitsevaa voimalaa lukuun ottamatta ei ole tiedossa paneelien taso-, eikä suuntakulmia. Astissa sijaitsevan voimalan tasokulma on 8° ja suuntakulmat 150°, -10° sekä -30°. Vuoden keskimääräiset säteilymäärät jakautuvat voimaloiden sijaintien perusteella, Milanon 3,69 kWh/m²/d ja Barin 4,18 kWh/m²/d välille. Vuoden keskilämpötilat puolestaan jakautuvat Astin 11,3 °C ja Barin 15,7 °C välille. Selkeyskertoimien perusteella selkeintä sää on Barissa ja pilvisintä Milanossa. Barissa selkeyskerroin on 0,541 ja Milanossa 0,509.

Taulukko 6. Tutkimustuloksia Italiasta.

	Asti	Bologna	Milano	Bari	Venetsia
Simuloinnin tasokulma	40	40	40	35	40
Voimalan tasokulma	8	-	-	-	-
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	150; -10; -30	-	-	-	-
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	3,87	3,82	3,69	4,18	3,87
Vuoden keski-lämpötila [°C]	11,3	13,2	11,4	15,7	12,7
Selkeyskerroin	0,528	0,521	0,509	0,541	0,535
Simuloitu maksimiominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1288	1227	1231	1278	1280
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1039	1191	960	1166	1110

6.7 Kiina

Kiinan tutkimustulokset on esitetty taulukossa 7. Kiinasta tutkimukseen valittiin Pekingissä, Xuzhoussa, Qingdaossa, Nanchangissa sekä Zhongshan Cityssä sijaitsevat aurinkosähkövoimalat. Näistä voimaloista ei ole Sunny Portalissa saatavilla tietoja aurinkopaneelien suunta- tai tasokulmista. Simuloimalla paikkakunnille saatiin paneelien tasokulmille optimiarvoiksi kulmia 25° ja 30° välillä. Suuntakulmina simuloinneissa käytettiin 0°. Vuoden keskimääräiset säteilyarvot vaihtelevat simuloituilla paikkakunnilla Pekingin 4,00 kWh/m²/d ja Zhongshan Cityn 4,39 kWh/m²/d välillä. Lämpimintä sää on Zhongshan Cityssä, missä vuoden keskilämpötila on 21,9 °C. Kylmintä puolestaan on Pekingissä, missä vuoden keskilämpötila on 11,8 °C. Sää on selkeyskertomien perusteella selkeintä Pekingissä ja pilvisintä Nanchangissa. Pekingin selkeyskerroin on 0,51 ja Nanchangin 0,464.

Taulukko 7. Tutkimustuloksia Kiinasta.

	Peking	Xuzhou	Qingdao	Nanchang	Zhongshan City
Simuloinnin tasokulma	35	30	30	25	25
Voimalan tasokulma	-	-	-	-	-
Simuloinnin suuntakulma	0	0	0	0	0
Voimalan suuntakulma	-	-	-	-	-
Säteilyn määrä [kWh/m ² /d]	4,00	4,05	4,07	4,10	4,39
Selkeyskerroin	0,51	0,484	0,496	0,464	0,475
Vuoden keski-lämpötila [°C]	11,8	14,3	12,3	17,5	21,9
Simuloitu maksimiominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	1292	1222	1265	1134	1226
Voimalan ominaistuotto per vuosi [kWh/kW]	719	1037	1073	675	1120

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Yksittäisten voimaloiden ominaistuottojen ja niille simuloitujen maksimiominaistuottojen välistä tarkastelua

Suurimman osan selvitykseen kuuluvista paneeleista ominaistuotto jäi voimalalle simuloidusta ominaistuotosta. Tätä eroa voidaan selittää jo sillä, että maksimiominaistuottoja simuloitaessa on käytetty parhaita mahdollista suunta- ja tasokulmaa. Suurin osa voimaloista jää noin 1–200 kWh/kW niille simuloituista maksimiominaistuoista. Tätä eroa voidaan suurimmaksi osaksi selittää simulointien epätarkkuudella todelliseen tilanteeseen verrattuna. Simuloinnit perustuvat paikkakunnan keskilämpötilaan ja -säteilyyn, eikä niissä huomioida vuosien välistä olosuhteiden vaihtelua, joten ne saattavat olla ylioptimistisia olosuhteiden arvioinnissa. Onkin mahdollista, että syy simuloidusta arvosta jäämiseen johtuu siitä, että paneelin pinnalle on päässyt keskivertoa vuotta vähemmän auringon säteilyä. Tämä johtuu usein normaalia voimakkaammasta pilvisyydestä, joka estää säteilyn tulemisen maan pinnalle. Tästä esimerkkinä on Saksan Kasselissa sijaitsevan voimala, jonka ominaistuotto on 900 kWh/kW, kun sille paikkakunnalle simuloitu maksimiominaistuotto on 909 kWh/kW. Simuloinneissa optimaaliseksi tasokulmaksi on saatu 40°, suuntakulman ollessa 0°. Voimalan paneelit ovat asennettu 22° tasokulmaan ja ne ovat suunnattu –5° etelästä.

Toki simulointien epätarkkuudella ja vuosien välisellä sään vaihtelulla ei yksin voida selittää simulointien ja voimaloiden ominaistuottojen eroa. Eroa voidaan selittää myös sillä, ettei paneeli toimi kunnolla. Tämä on todennäköinen syy varsinkin silloin kun simulointien ja voimaloiden ominaistuottojen välinen ero on suuri. Paneelien toimintaan vaikuttaa muun muassa asennuksen epäonnistuminen, ja paneelin peittyminen lialla, lumella tai kuuralla. Muita syitä ovat inverttereiden ja siirtojohtimien tehohäviöt, sekä paneelien väliset erot. Tässä selvityksessä näihin ei kuitenkaan kiinnitetä sen tarkemmin huomiota, sillä näiden merkityksestä paneelien toimintaan ei ole saatavilla tietoja. Asennuksen epäonnistumisella tarkoitetaan vääränlaista suunta- ja/tai tasokulmaa, ja paneelin peittymistä varjostuksilla. Etenkin Pohjoismaissa ja muualla, jossa talvikuukausina sataa lunta, on huomattava lumen

vaikutus aurinkosähkön tuotannossa. Talvikuukausina lumen poistaminen paneelin pinnalta jää usein tekemättä. Tämä on huomattavissa kuvista 6 ja 7, jotka kuvaavat Suomen ja Ruotsin voimaloiden keskimääräisten ominaistuottojen eroamista simulointien keskimääräisistä maksimiominaistuotoista. Vääränlaisia suunta- ja/tai asennuskulmia selittävät usein se, että aurinkopaneeli on asennettu katolle, mikä aiheuttaa omat rajoituksensa paneelin asentamiselle. Paneelit asennetaan yleensä katon harjan suuntaisesti, mikä tarkoittaa sitä, ettei paneeleja kyetä asentamaan sähköntuotannon kannalta parhaimpaan kulmaan. Toisaalta sähköntuotannon kannalta parhaimpaan kulmaan asentaminen, ei katolle asennettaessa ole taloudellisesti kannattavaa, sillä telineet joiden avulla paneeli saataisiin suunnattua parhaimpaan kulmaan harjakatolla saattaa maksaa enemmän kuin paneeli itsessään.

Selvitystyötä tehtäessä löydettiin myös voimaloita, joiden ominaistuotto on suurempi kuin paikkakunnalle simuloitu maksimituotto. Pieni ero on tässäkin selitettävissä simulointien, perustumisella vuoden sääolosuhteiden ja säteilymäärien keskiarvoon sekä sillä, että todellisuudessa vuodet eivät ole keskenään samanlaisia. Eräs selittävä tekijä saattaa olla myös se, että paneelien nimellistehot saattavat erota niille ilmoitetuista nimellistehoista. Paneelien valmistajat saattavat esimerkiksi ilmoittaa paneelin nimellistehon perään $0/+5$ W, tai $+/-3$ W (Aurinkovirta b). Tämä tarkoittaa sitä, että todellisuudessa paneelin nimellisteho saattaa olla hieman ilmoitettua nimellistehoa suurempi tai pienempi. Jos paneelin nimellisteho on ilmoitettua suurempi, saadaan paneelista suurempi sähköntuotanto. Tämä vaikuttaakin ominaistuoton laskentaan, sillä siinä ei huomioida tehotoleranssia. Toki on myös mahdollista, että voimalan paneelit toimivat paremmin kuin simuloinnit olettavat. Tässä tapauksessa olisikin syytä tutkia, miten paneelit on asennettu ja miettiä mikä selittää paneelien hyvän tuotannon. Esimerkiksi Ruotsin Klippanissa sijaitsevan voimalan ominaistuotto ylittää simuloidun maksimiominaistuotonsa 342 kWh/kW:lla. Voimalan asennuskulmat eivät ole tiedossa, joten niiden perusteella ei voida analysoida ominaistuoton ja maksimituoton välistä eroa. Ero on myös niin suuri, ettei se selitettävissä pelkästään vuosien välisellä säätyypin vaihtelulla.

7.1.1 Esimerkki paneelin mahdollisesta peittymisestä

Suomen Jokipiissä sijaitseva aurinkosähkövoimalan aurinkopaneelit on asennettu tismalleen samoihin kulmiin, mitä simuloitaessa voimalalle maksimiominaistuettoa on käytetty. Tasokulma on 45° ja paneelien suunta on etelää kohti. Vaikka paneelit ovat asennettu simulointien perusteella parhaimpaan tasokulmaan ja suuntaan, ei voimalan ominaistuetto ole lähelläkään simuloitua maksimiominaistuettoa. Voimalan ominaistuetto on 626 kWh/kW, kun taas simuloitu maksimiominaistuetto on 995 kWh/kW. Todennäköisin syy siihen, minkä takia voimalan ominaistueton ja simuloidun maksimiominaistueton ero on suuri, se, että paneelin toimintaa häiritsee jonkinlainen peittyminen tai varjostuminen.

7.1.2 Esimerkki paneelin oikeasta tasokulmasta

Saksan Berliinissä sijaitsevassa aurinkosähkövoimalassa paneelit on asennettu 0° kulmaan, kun taas simuloitaessa voimalalle maksimiominaistuettoa on käytetty 40° kulmaa. Voimalan paneelit on toisaalta asennettu samaan suuntaan kuin simuloitaessa, jolloin suuntana käytettiin etelää. Voimalan ominaistuetto jää 245 kWh/kW päähän simuloidusta maksimiominaistuetosta. Syy tähän eroon löytyy todennäköisesti voimalan tasokulmasta, joka on huono, sillä paneelien ollessa vaakatasossa sade ei pääse pesemään paneelia puhtaaksi liasta.

7.2 Sähköntuotannon jakautumisen tarkastelua eri kuukausina Pohjoismaissa ja muualla

Kuvissa 6–12 kuvataan selvitysmaiden voimaloiden ominaistuettojen sekä niille simuloitujen maksimiominaistuettojen keskiarvojen jakautumista vuoden eri kuukausille. Lisäksi kuvissa 6–12 on esitetty maan voimaloiden suurin ja pienin ominaistuetanto sekä simuloitu maksimiominaistuetanto. Nämä on esitetty pylväiden päihin piirrettyinä viivoina.

Tutkittaessa selvitykseen osallistuvien maiden voimaloiden keskimääriä ominaistuettoja, sekä niille simuloituja maksimiominaistuettoja kuvista 6–12, huomataan, että voimaloiden sähköntuotanto kasvaa kesää kohti ja vähenee talvea kohti. Tämä on huomattavissa sekä simuloiduissa maksimiominaistuettoissa, että voimaloiden ominaistuettoissa. Ilmiö johtuu

vuodenaikojen aiheuttamasta sään sekä päivän pituuden vaihtelusta. Kiinan voimaloiden maksimiominaistuettoa sekä ominaistuettolukemia tarkasteltaessa, huomataan kuukausien välisen vaihtelun sähköntuotannossa olevan pienempää kuin esimerkiksi Suomessa. Tämä voi johtua siitä, ettei säätyyppien vaihtelu vuodenaikojen välillä ole huomattavaa, mikä johtunee siitä että Kiinan voimalat sijaitsevat selvitykseen osallistuvista maista lähimpänä Päiväntasajaa. Kuvista 6–12 voidaankin huomata, että talvi- ja kesäkuukausien välinen ero aurinkosähkön tuotannossa on suurempi mitä kauemmaksi Päiväntasajasta kuljetaan.

Simulointien perusteella eniten aurinkosähköä tuottavin kuukausi on Pohjoismaiden, sekä Saksan, että Kiinan voimaloilla toukokuussa. Italian voimaloissa aurinkosähköä eniten tuottavin kuukausi on simulointien perusteella heinäkuu. Selvitykseen kerättyjen vuosien perusteella sähköä eniten tuottavin kuukausi on Suomen, Ruotsin, Tanskan, Norjan, Saksan ja Italian voimaloissa heinäkuu. Kiinan voimaloissa eniten sähköä tuottavin kuukausi on elokuu. Kuvista voi myös huomata sen, että kaikissa muissa maissa, paitsi Kiinassa, voimaloiden ominaistuettojen keskiarvo on suurempi kuin simuloitujen maksimiominaistuettojen keskiarvo, kun tarkastellaan voimaloiden eniten sähköä tuottavinta kuukautta.

Simulointien perusteella joulukuu on muualla, paitsi Kiinassa, vähiten sähköä tuottavin kuukausi. Kiinassa se on tammikuu. Selvitystä varten kerättyjen vuosien perusteella joulukuu on vähiten sähköä tuottavin kuukausi vain Suomessa ja Norjassa. Ruotsin, Tanskan, Saksan sekä Italian voimalat tuottavat vähiten sähköä tammikuussa. Kiinassa vähiten sähköä tuotetaan helmikuussa. Paikoissa, joissa talvella sataa lunta, on huomioitava lumen vaikutus sähköntuotantoon. Esimerkiksi Suomen ja Ruotsin voimaloissa aurinkopaneelit peittyvät talvella lumella, minkä takia niillä ei pystytä tuottamaan sähköä, ellei niitä puhdisteta lumesta. Talvikuukausina on myös huomioitava pilvisyyden vaikutus sähköntuotantoon.

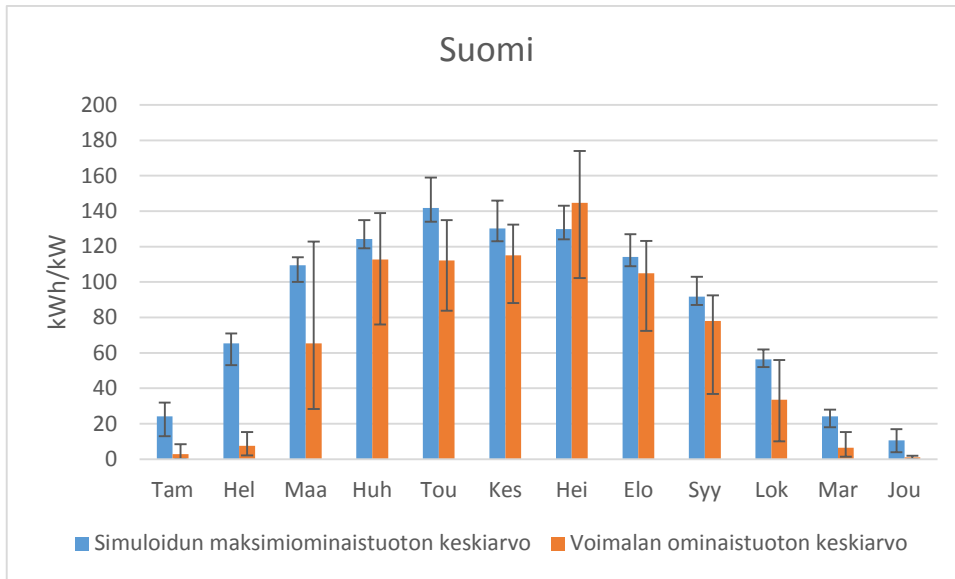
Ruotsissa, Tanskassa, Saksassa sekä Italiassa voimaloiden ominaistuettojen ero simuloituihin ominaismaksimituettoihin verrattuna kasvaa, mitä lähemmäksi talvea mennään. Puolestaan kesäkuukausia kohti mentäessä ominaistuettojen ja simuloitujen maksimiominaistuettojen ero kapenee niin, että kesäkuukausina ominaistuetot ovat suurempia kuin simuloitujen maksimiominaistuetot. Italiassa simuloitujen

maksimiominaistuuottojen ero kuukausien välillä on paljon tasaisempi kuin voimaloiden ominaistuotoilla. Saksassa, Ruotsissa ja Tanskassa on huomattavissa sama ilmiö, tosin ei yhtä voimakkaasti. Niiden ominaistuotot noudattavat paremmin samaa trendiä simuloitujen maksimiominaistuuottojen kanssa.

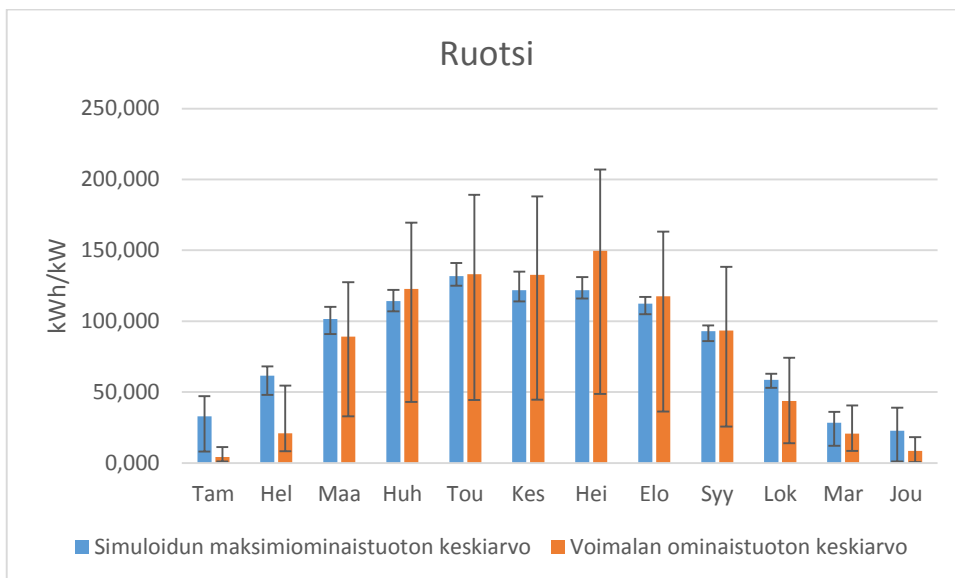
Suomessa, kuten Ruotsissa, Tanskassa, Italiassa ja Saksassa voimaloiden ominaistuotot seuraavat niille simuloitujen maksimituuottojen asettamaa tyyliä. Suomessa onkin näkyvissä sama kuin Ruotsissa, Tanskassa, Italiassa sekä Saksassa; voimaloiden ominaistuuottojen ja simuloitujen maksimituuottojen ero kapenee kesää kohti ja kasvaa talvea kohti. Suomessa aurinkosähkövoimalat jäävät muina kuukausina, kuin heinäkuussa, niille simuloituista maksimiominaistuotoista.

Norjassa kuukausitason tarkastelussa tuloksiin vaikuttaa todennäköisesti se, että Norjasta tutkitaan vain kolmea voimalaa. Suuremmalla otannalla saataisiin eliminoitua yksittäisten voimaloiden tuloksien vaikutus maan kokonaistulokseen. Norjassa kuukausitason simuloitujen maksimiominaistuotot lisääntyvät Ruotsin, Tanskan, Saksan, Italian ja Suomen tapaan kesää kohti mentäessä ja vähentyvät talvea kohti. Maaliskuun jälkeen kuukausikohtainen ominaistuotto ei kuitenkaan jatka kasvuaan, kuten muissa vertailumaissa, Kiinaa lukuun ottamatta, vaan ominaistuotto pienenee toukokuuta kohden. Toukokuun jälkeen ominaistuoton määrä lähtee kuitenkin uudestaan kasvuun kesä-heinäkuuksi, kääntyen takaisin laskuun talvea kohti.

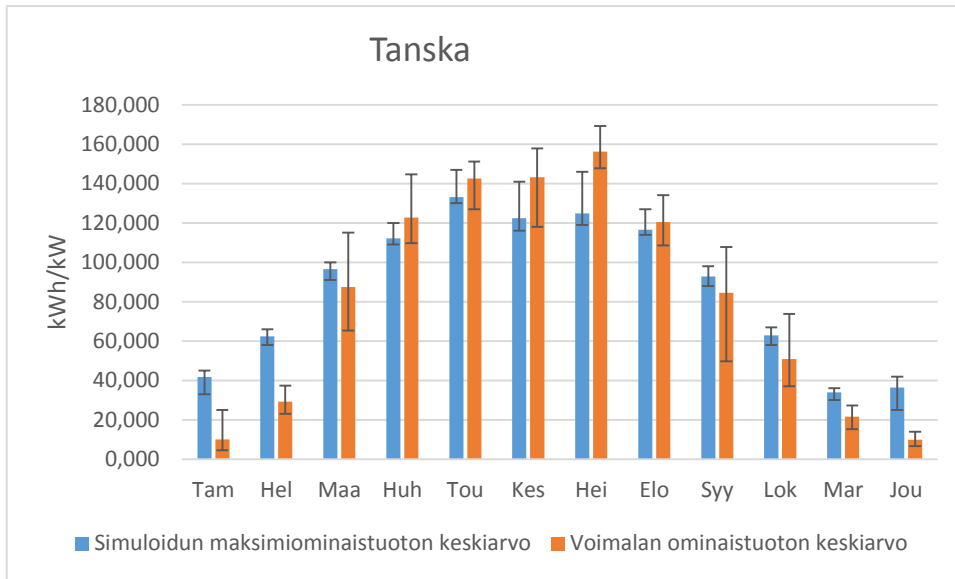
Kiinassa voimaloiden ominaistuotot jäävät kuvan 12 perusteella joka kuukausi simuloituista maksimituotoista. Tähän voi olla syynä se, että kaksi viidestä voimalasta ei toimi kunnolla.



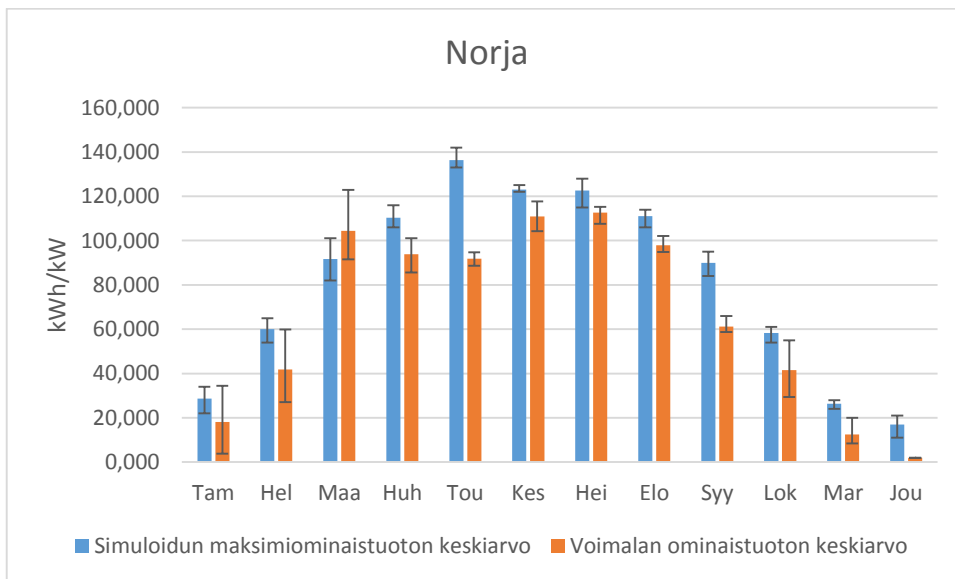
Kuva 6. Suomen voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



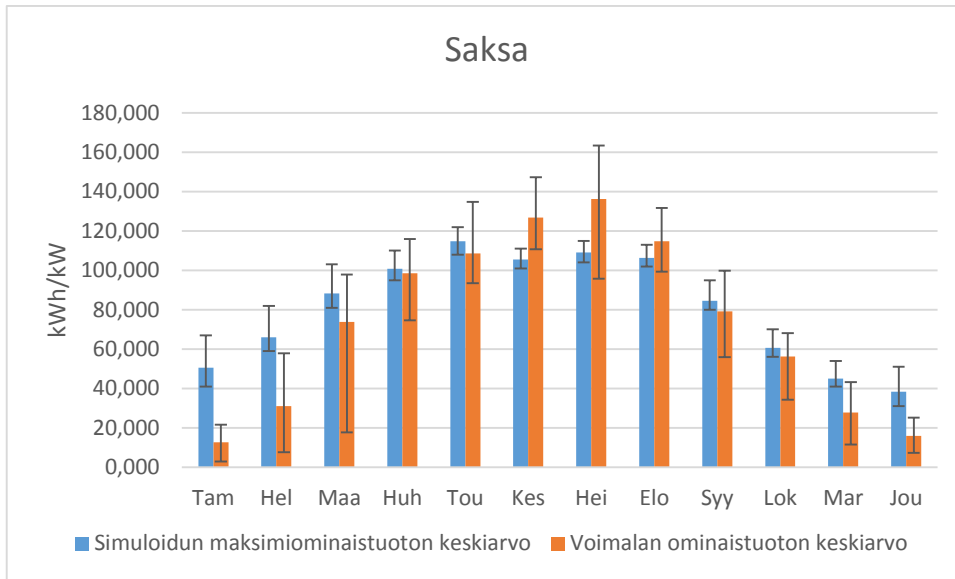
Kuva 7. Ruotsin voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



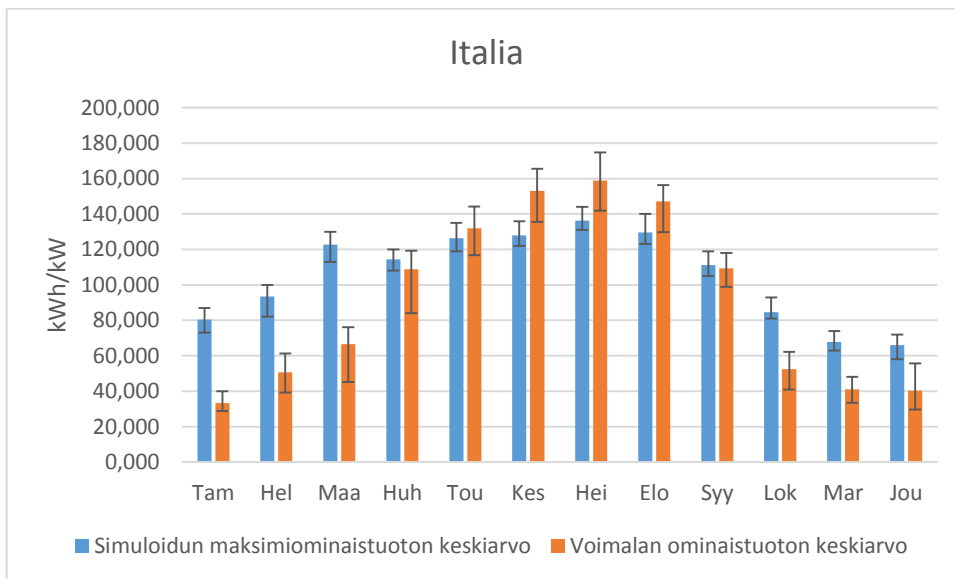
Kuva 8. Tanskan voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



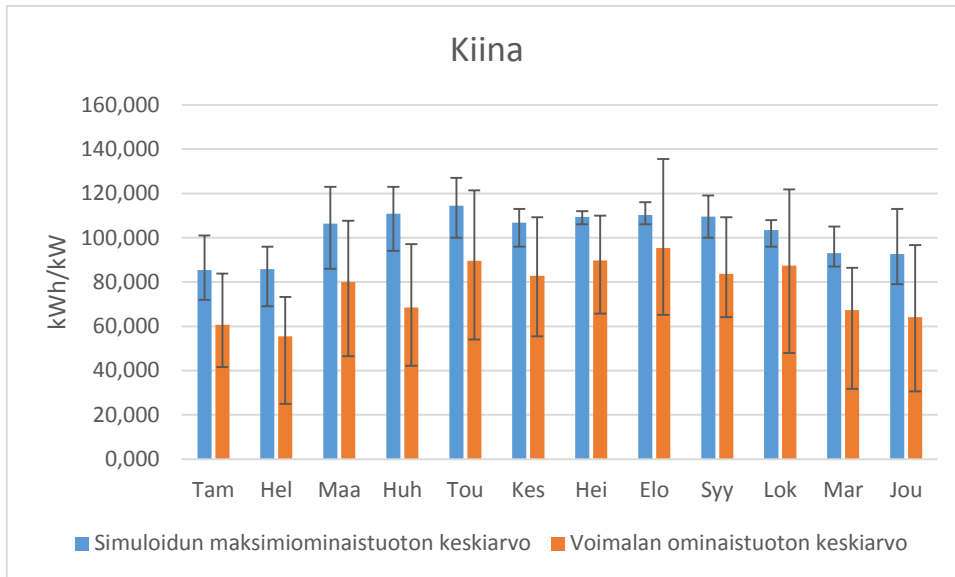
Kuva 9. Norjan voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



Kuva 10. Saksan voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



Kuva 11. Italian voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.



Kuva 12. Kiinan voimaloiden kuukausittaiset ominaistuottojen keskiarvot verrattuna simuloitujen maksimiominaistuottojen keskiarvoihin.

7.3 Vertailua maiden välillä Pohjoismaissa ja muualla

Kuva 13 kuvaa maittain voimaloiden ominaistuottojen suhdetta niille simuloituihin maksimiominaistuottoihin vuositasolla. Pylvään oranssi osa kuvaa maan voimaloiden ominaistuoton mediaania. Oranssi ja keltainen osa yhdessä kuvaavat maan voimaloille simuloitujen maksimiominaistuottojen mediaania. Keltainen osa kuvaa ominaistuoton ja simuloidun maksimiominaistuoton välistä eroa. Kuvassa 14 on esitetty kunkin maan mediaanin keskimääräinen ominaistuotto sekä simuloitu maksimiominaistuotto kuukausitasolla. Oranssi pylväs kuvaa voimalan keskimääräistä ominaistuottoa, ja keltainen simuloidun maksimiominaistuoton keskiarvoa. Koska kuvan mediaanit perustuvat tutkimukseen kuuluvien voimaloiden tuloksiin, antavat selvityksen tulokset vain suuntaa siitä, millä tasolla aurinkopaneelien toiminta on eri maissa. Jotta tulokset olisivat tieteellisesti varteenotettavia, tulisi selvitystä varten kerätä suurempi otanta voimaloista, ja suorittaa niistä simuloiteja, jotta yksittäisten voimalaitosten poikkeamat eivät vaikuttaisi tutkimuksen tuloksiin. Lisäksi otannan voimaloista tulisi saada selville paneelien suunta- ja tasokulmat.

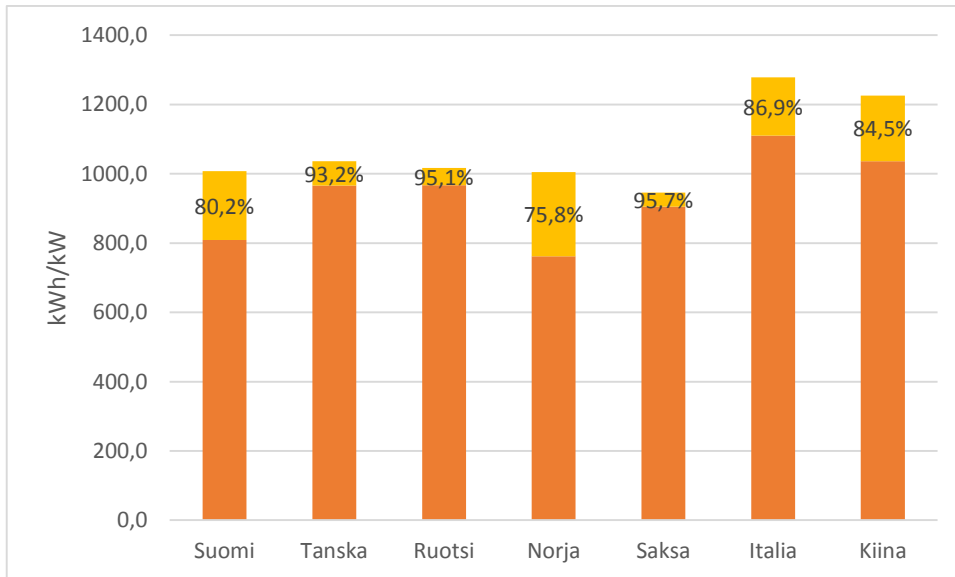
7.3.1 Tarkastelua vuositasolla

Kun tarkastellaan simuloituja maksimiominaistuottoja kuvasta 13, huomataan että Pohjoismaissa maksimiominaistuotot ovat lähes yhtä suuria, noin 1000 kWh/kW. Italiassa ja Kiinassa simuloitujen maksimiominaistuotot ovat suurimpia; Italiassa noin 1275 kWh/kW ja Kiinassa reilu 1200 kWh/kW. Maailman johtavimman aurinkosähkön tuottajan, Saksan simuloitu maksimiominaistuotto on pienin, noin 950 kWh/kW. Simuloinnit kuvaavat paikan aurinkosähkön tuotanto-olosuhteita.

Kuvan 13 perusteella Pohjoismaille simuloitujen maksimiominaistuotot ovat keskenään lähes samalla tasolla. Tätä voi selittää samantyyppisillä ilmasto-olosuhteilla. Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa säteilyn määrä on lähes samalla tasolla. Tanskassa säteily on hieman muita maita voimakkaampaa, kuten taulukoista 1–4 voi huomata. Toisaalta Tanskan vuoden keskilämpötilat ovat korkeampia, kuin Suomessa ja Ruotsissa. Matalammat keskilämpötilat lisäävät aurinkopaneelien sähköntuotantoa Ruotsissa ja Suomessa. Suomen säätyyppi on selkeyskertoimien perusteella muihin Pohjoismaista selvitykseen osallistuviin maihin nähden selkeintä, mikä takaa Suomessa auringonsäteilyä pääsee enemmän maan pinnalle.

Italiassa ja Kiinassa olosuhteet tuottaa aurinkosähköä ovat parhaimmat, sillä niiden simuloitujen maksimiominaistuotot ovat reilusti suurempia kuin muissa tutkittavissa maissa. Tämä selittyy suurilla säteilymäärillä. Toisaalta kun verrataan Italian ja Kiinan olosuhteita keskenään taulukoista 6 ja 7, huomataan että Kiinassa säteilyn määrä on suurempi Italiassa, mutta Italian simuloitu maksimiominaistuotto on kuitenkin suurempi kuin Kiinan. Tätä saattaa selittää Italian tutkimuskohteiden matalammat keskilämpötilat, sekä selkeyskertoimien perusteella selkeämpi sää.

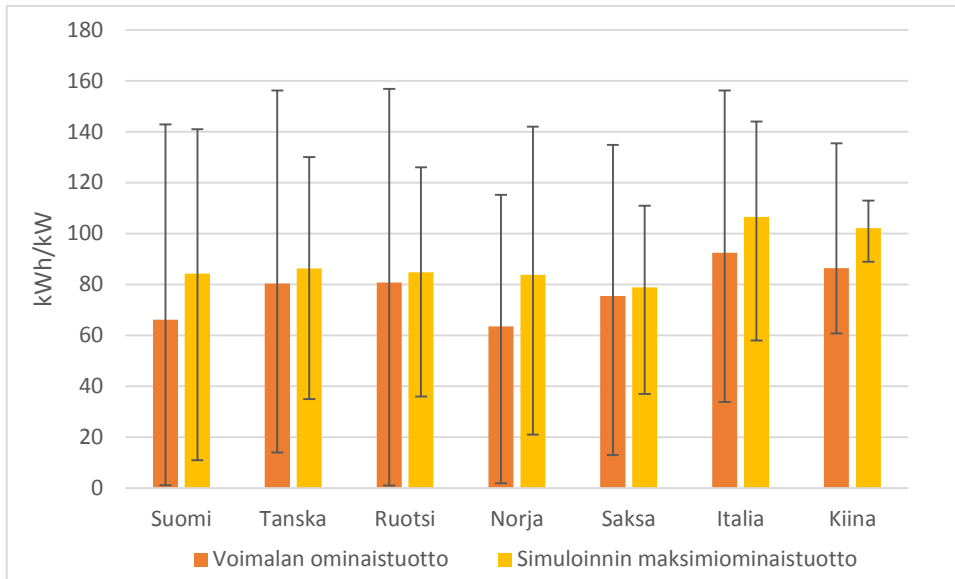
Saksassa on simuloinnin perusteella huonoimmat olosuhteet selvitykseen osallistuvista maista tuottaa aurinkosähköä. Tämä on myös huomattavissa taulukoista 1–7. Saksassa säteilymäärä on lähes samaa tasoa Pohjoismaiden säteilymäärien kanssa. Toisaalta selkeyskertoimien perusteella Saksan säätyyppi on pilvisempää kuin esimerkiksi Suomessa. Lisäksi Saksassa vuoden keskilämpötilat ovat korkeampia kuin Pohjoismaissa.



Kuva 13. Simuloitujen maksimiominaistuottojen ja todellisten ominaistuottojen mediaanien suhde vuositasolla.

7.3.2 Kuukausitason tarkastelua

Kuukausitasolla maille simuloitujen maksimituottojen väliset erot säilyvät samanlaisina kuin vuositasolla, kuten kuvia 13 ja 14 vertaillen voi huomata. Suurin simuloitu maksimiominaistuotto on Italiassa ja pienin Saksassa. Suurin ominaistuotto puolestaan on Italiassa ja pienin Norjassa. Viivapalkit kuvaavat vuoden suurimman ja pienimmän ominaistuoton sekä maksimiominaistuoton vaihtelua suhteessa kuukausittaiseen keskiarvoon. Vaihtelut Pohjoismaissa kuukausien välillä ovat suurempia kuin Saksassa, Italiassa tai Kiinassa, riippumatta siitä tarkastellaanko simulointien tai maan mediaanien kuukausikeskiarvoa. Tämä johtunee Pohjoismaissa vuodenaikojen selkeästä vaihtelusta, sillä talvikuukausina ominaistuotot ovat pieniä ja kesällä suuria.



Kuva 14. Voimaloiden kuukausituoton vertailua simuloituun kuukausituottoon maakohtaisen mediaanin perusteella.

7.3.3 Ominaistuottojen ja maksimiominaistuottojen välisen eron tarkastelua

Vaikka Kiinassa ja Italiassa on simulointien perusteella parhaimmat olosuhteet tuottaa aurinkosähköä, ei näissä maissa pystytä käyttämään tätä potentiaalia hyväksi, kuten kuvat 13 ja 14 osoittavat. Vuositasolla ominaistuotot jäävät simuloituista maksimiominaistuotoista 86,9 prosenttia Italiassa ja 84,5 prosenttia. Nämä arvot kertovat siitä, ettei aurinkopaneelien asennuksien taso ole kyseisissä maissa hyvällä tasolla. Voidaankin sanoa, että jos asennusten tasoa saataisiin nostettua, voisivat Italia ja Kiina tuottaa entistäkin enemmän aurinkosähköä.

Saksassa olosuhteet tuottaa aurinkosähköä eivät ole samalla tasolla verrattuna muihin selvitykseen osallistuviin maihin. Saksassa asennukset ovat kuitenkin paremmalla tasolla, sillä ominaistuotannot eivät jää kovin kauaksi simuloituista maksimiominaistuotoista, kuten kuvista 13 ja 14 on huomattavissa. Vuositasolla voimaloiden ominaistuotanto jää 95,7 prosenttia simuloitusta maksimiominaistuotosta. Hyvä aurinkopaneelien asennustaso on varmastikin yksi syy siihen, minkä takia Saksa on yksi maailman johtavimmista aurinkosähkön tuottajista.

Pohjoismaiden välillä olosuhteet tuottaa aurinkosähköä ovat lähes yhtä hyvät, kuten simuloinnit osoittavat. Ruotsin ja Tanskan voimaloissa tuotetaan kuitenkin enemmän

aurinkosähköä suhteessa Suomen ja Norjan voimaloihin. Tätä kuvaavat ominaistuottojen väliset erot, jotka näkyvät kuvissa 13 ja 14. Kuvien perusteella voidaankin tehdä johtopäätös siitä, että aurinkopaneelien asennusvarmuus on paremmalla tasolla Tanskassa ja Ruotsissa, kuin Suomessa ja Norjassa. Tämä johtuu varmastikin siitä, ettei aurinkosähkön tuotanto ole Suomessa ja Norjassa vielä yhtä yleistä kuin Tanskassa ja Ruotsissa. Toisaalta Norjan tuloksiin saattaa vaikuttaa se, ettei maan otantaan kuulu kuin kolmen voimalan tiedot. Suomessa esimerkiksi suurin osa aurinkosähkön tuotannosta tapahtuu yksityisten henkilöiden toimesta.

8 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä perehdytään aurinkosähkön tuotantoon ja siihen vaikuttaviin tekijöihin Pohjoismaissa ja muualla. Aurinkosähkön tuotantoon vaikuttavat tekijät voidaan jakaa joko teknisiin tekijöihin tai ympäristön olosuhteisiin. Ympäristöstä peräisin olevia sähköntuotantoon vaikuttavia tekijöitä ovat auringonsäteilyn määrä, ympäristön lämpötila sekä paneelin pinnan peittyminen varjostuksilla tai lialla. Näiden lisäksi sähköntuotantoon vaikuttavia tekijöitä ovat paneelien suunta- ja asennuskulma, invertterin tehohäviöt, paneelien väliset erot sekä häviöt siirtojohtimissa.

Työssä vertaillaan voimaloiden ominaistuottoja Suomessa, Ruotsissa, Tanskassa, Norjassa, Saksassa, Italiassa ja Kiinassa, niille simuloituihin maksimiominaistuottoihin. Voimaloiden ominaistuotot laskettiin Sunny Portalista peräisin olevien vuosituottojen ja voimalaitoksen nimellistehojen perusteella. Maksimiominaistuotot puolestaan saatiin simuloimalla HOMER-ohjelmalla voimalaitokselle optimaalisilla taso- ja suuntakulmilla ominaistuotanto, joka perustuu voimalaitoksen sijaintiin. Maksimiominaistuoton ja ominaistuoton vertailun perusteella päätellään toimivatko voimalaitokset niiden sijainnin edellyttämällä tavalla. Lisäksi työssä pohditaan voimalaitoksista saatavien tietojen perusteella minkälaisia tekijöitä ominaistuoton ja maksimiominaistuoton eroavuuden takana on.

Simulointien perusteella suurimmat maksimiominaistuotot, eli parhaimmat olosuhteet tuottaa aurinkosähköä ovat Italiassa ja Kiinassa, mikä johtuu suuresta säteilyn määrästä. Asennusten taso ei kuitenkaan ole vielä simulointien edellyttämällä tasolla, mistä kertoo

ominaistuottojen reilu jääminen simuloituista maksimiominaistuoista. Pienin maksimiominaistuotto eli huonoimmat olosuhteet tuottaa aurinkosähköä on puolestaan Saksassa. Toisaalta Saksassa maksimiominaistuoton ja ominaistuoton välinen ero on pieni, mikä kertoo siitä, että aurinkopaneelien asennus on hyvällä tasolla Saksassa. Suurin ero maksimiominaistuoton ja ominaistuoton välillä on Norjassa ja Suomessa, mikä saattaa selittyä aurinkosähkön tuotannon marginaaliasemasta kyseisissä maissa. Suomessa ja Norjassa ominaistuotot jäävät selkeästi myös Tanskan ja Ruotsin ominaistuoista, vaikka olosuhteet tuottaa aurinkosähköä ovat maissa yhtä hyvät. Tanskassa ja Ruotsissa aurinkopaneelien asennusten taso lähestyykin jo Saksan tasoa.

LÄHTEET

Ahm Peter. 2014. National Survey Report of PV Power Applications in DENMARK 2013. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.11.2014]. s. 4, 7–8. Saatavissa: National Surney Report of PV Power Applications in Denmark - 2013

Ahola Jero. 2012. Aurinkosähköä Suomeen. [luentomateriaali]. [viitattu 30.1.2015]. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/SitraEkologia/jero-ahola-31102012-aurinkoshk-suomeen>

Andrews Roger. 2014. Estimating Global PV Load Factors. [Energy Matters verkkosivulla]. [viitattu 18.1.2015]. Saatavissa: <http://euanmearns.com/estimating-global-solar-pv-load-factors/>

Aurinkoenergia.fi. 2015. Suomen suurimmat aurinkovoimalat. [Aurinkoenergian verkkosivulla]. [viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <http://www.aurinkoenergia.fi/Info/184/aurinkovoimaa-suomessa>

Aurinkovirta a. Aurinkosähkövoimala. [Aurinkosähköä Suomeen verkkosivulla]. [viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/>

Aurinkovirta b. Aurinkopaneelit. [Aurinkosähköä Suomeen verkkosivulla]. [viitattu 1.2.2015]. Saatavissa: <http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/aurinkopaneelit/>

Aurinkovirta c. Verkkoinverterti. [Aurinkosähköä Suomeen verkkosivulla]. [viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/verkkoinverterti/>

Boyle Godfrey. 2004. Renewable Energy, Power for a sustainable future. 2.painos. Oxford. s. 69–71, 95–96. ISBN 0-19-926178-4.

Castello Salvatore, Tilli Francesca, Guastella Salvatore. 2014. National Survey Report of PV Power Applications in ITALY 2013. [verkkojulkaisu]. [viitattu 15.11.2014]. s. 4–7. Saatavissa: National Surney Report of PV Power Applications in Italy - 2013

Clean Energy Council. How solar PV works? [Clean Energy Council:n verkkosivulla]. [viitattu 7.1.2015]. Saatavissa: <http://www.solaraccreditation.com.au/consumers/purchasing-your-solar-pv-system/how-solar-pv-works.html>

Energiateollisuus. Aurinkoenergia. [Energiateollisuuden verkkosivulla]. [viitattu 1.2.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/aurinkoenergia>

Fortum. 2014. Tiesitkö tämän aurinkosähköstä?. [Fortumin verkkosivulla]. [viitattu 15.11.2014]. Saatavissa: <http://www.fortum.com/countries/fi/yksityisasiakkaat/energiansaasto/aurinkoenergiaratkaisut/aurinkopaneeli/info/pages/default.aspx>

Gevorgian Peter. 2011. Large-Scale Solar Power System Design, An Engineering guide for grid-connected solar power generation. RR Donneley. s. 118. ISBN 978-0-07-176327-1

Helen. Tietoa aurinkosähkön tuotannosta. [Helsingin energian verkkosivulla]. [viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Palvelumme/Tuotasaahkoa/Aurinkosahkon-pientuotanto/>

Hellgren Matti, Heikkinen Lauri, Suomalainen Lauri. 1996. Energia ja Ympäristö. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus. s.28. ISBN 951-719-674-1

Holm Øystein. 2014. National Survey Report of PV Power Applications in Norway 2013. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 11.11. 2014]. s. 4–5. Saatavissa: National Survey Report of PV Power Applications in Norway- 2013

HOMER Energy a. The HOMER Software. [HOMER Energy:n verkkosivulla]. [viitattu 7.12.2014]. Saatavissa: <http://www.homerenergy.com/software.html>

HOMER Energy b. HOMER Tip: Solar Resouce Data. [uutiskirje]. [viitattu 7.12.2014].
Saatavissa: http://www.homerenergy.com/email/homer_news_June2011.html

Ikkala Tapio. 2014. 550 MW – Maailman tehokkain aurinkovoimala valmistui.
[verkkolehti]. [viitattu 7.1.2015]. Saatavissa:
<http://summa.talentum.fi/article/tt/uusimmat/113689>

Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio a. Miten Aurinkokenno toimii? [Helsingin
yliopiston verkkosivulla]. [viitattu 22.11.2014]. Saatavissa:
<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>

Kehittyneiden energiajärjestelmien laboratorio b. Aurinkosähköteknologiat. [Helsingin
yliopiston verkkosivulla]. [viitattu 9.11.2014].
Saatavissa: <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-tekno.html>

Kekkonen Alpo. 2014. Aurinkoenergian saatavuus ja aurinkosähköntuotannon taloudellinen
kannattavuus Pohjois-Pohjanmaalla, koulutustilaisuudet 24.2.2014 ja 25.2.2014. Oulun
Ammattikorkeakoulu. [luentomateriaali]. [viitattu 24.11.2014]. Saatavissa:
http://www.oamk.fi/hankkeet/bioologia/docs/materiaalit/aur_saataav_0214.pdf

Kosonen Antti. 2014. Aurinkosähkövoimaloiden sijoittuminen kartalla.

Lindahl Johan. 2014. National Survey Report of PV Power Applications in SWEDEN 2013.
[verkkajulkaisu]. [viitattu 11.11.2014]. s. 4. Saatavissa: National Survey Report of PV
Power Applications in Sweden - 2013

Lv Fang, Xu Honghua, Wang Sicheng. 2014. National Survey Report of PV Power
Applications in China – 2013. [verkkajulkaisu]. [viitattu 15.11.2014]. s. 1–4, 19. Saatavissa:
National Survey Report of PV Power Applications in China - 2013

Motiva. Auringosta sähköä. [Motivan verkkosivulla]. [viitattu 9.11.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa

NRPIF. Aurinko. [NRPIF:n verkkosivulla]. [viitattu 7.11.2014]. Saatavissa: <http://www oulu.fi/nrpif/planets/aurinko.html>

Photon laboratory. Solar module yield measurement. [verkkojulkaisu]. [viitattu 18.1.2015]. s. 3–5, 7. Saatavissa: http://www.photon.info/upload/Lab_Yield_Measurement_Brochure_EN_2014_4191.pdf

plug in to the sun. Factors affecting output. [plug in to the sun:n verkkosivulla]. [viitattu 23.11.2014]. s. 2–3. Saatavissa: http://www.plugintothsun.co.uk/downloads/factors_affecting_output.pdf

REN 21. 2014. Renewables 2014 Global Status Report. [verkkojulkaisu]. [viitattu 22.11.2014]. s. 47, 49. ISBN 978-3-9815934-2-6. Saatavissa: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/e-paper/GSR2014/index.html#/4>

SMA. About SMA. [SMA:n verkkosivulla]. [viitattu 7.12.2014]. Saatavissa: <http://www.sma-uk.com/company/about-sma.html>

Sunny Portal. Publicly Available PV System. [Sunny Portal:n verkkosivulla]. [viitattu 7.3.2015]. Saatavissa: <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPagesPlantList.aspx>

Suntekno. 2010. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.11.2014]. Saatavissa: <http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>

Tähtiakatemia. Auringon koko ja etäisyys. [Tähtiakatemian verkkosivulla]. [viitattu 7.11.2014]. Saatavissa: <http://www.sarkanniemi.fi/akatemat/tahtiakatemia/aurinkokunta/aurkoko.htm>

Wissing Lothar. 2014. National Survey Report of PV Power Applications in GERMANY 2013. [verkkajulkaisu]. [viitattu: 11.11.2014]. s. 7, 9. Saatavissa: National Survey Report of PV Power Applications in Germany - 2013

Aurinkosähkövoimaloiden sijoittuminen kartalla (Kosonen 2014)

