



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **Aurinkolämmön ja -sähkön vertailu**

## **Comparison between solar thermal and photovoltaic**

Sami Piironen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sami Piironen

**Aurinkolämmön ja -sähkön vertailu**

2017

Kandidaatintyö.

30 s.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Antti Kosonen

Työssä tutkitaan aurinkosähköenergian tilannetta maailmalla ja esitellään aurinkoenergian tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Pääpaino työssä on aurinkolämpökeräimen tuotannon analysoinnissa sekä aurinkolämpökeräimen ja aurinkosähköpaneelin tuotannon vertailussa. Aurinkokeräimistä on saatavilla vähän toteutuneita tuotantolukemia ja työn tarkoitus on tutkia tuotannon käyttäytymistä. Aurinkosähköpaneelien tuotantoa on tutkittu Euroopan tasolla vuodelta 2015.

Aurinkosähkön tilannekatsaus tehdään tutkimalla asennettua aurinkosähkökapasiteettia maailmalla sekä tarkastelemalla motivaatiota aurinkosähkön lisäämiselle. Aurinkosähköpaneelien toteutuneita tuotantoja on tutkittu SMA:n sunny portal -palvelulla. Aurinkolämpökeräimen tuotantolukemat saatiin tutkittavan laitoksen omistajalta. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa aurinkolämpökeräimen tuotannon olevan vuositasolla tasaista ja tuotannon käyttäytyvän samankaltaisesti kuin aurinkosähköpaneelilla. Aurinkokeräimen tuotannon ja säätilastojen välille löydettiin yhtäläisyyksiä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Electrical Engineering

Sami Piironen

### **Comparison between solar thermal and photovoltaic**

2017

Bachelor's Thesis.

30 p.

Examiner: Associate professor, D.Sc. Antti Kosonen

This bachelor's thesis studies status of global solar energy and introduces main factors which effects to production of solar energy. Focus of this thesis is to analyze solar thermal collector's energy production and compare it to energy production of photovoltaic. There is low amount of information available about solar thermal collector's actual energy production and purpose of this thesis is to study it. Energy production of photovoltaic is studied in Europe scale from year 2015.

Review about photovoltaics is done by studying installed photovoltaic capacity globally and examining main policy drivers for photovoltaic. Production of photovoltaic is studied using SMA's sunny portal. Production data of solar thermal collector was received from owner of the plant. The conclusion of this thesis is that energy production of solar thermal collector is stable at annual level and production behaves like production of photovoltaic. Some links between weather statistics and energy production of solar thermal collector were found.

# SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	1
1. Johdanto.....	2
2. Tekijät, jotka vaikuttavat tuotettuun aurinkoenergiaan.....	5
2.1 Sijainti.....	5
2.2 Lämpötila.....	6
2.3 Varjostuminen.....	7
2.4 Paneelin asennus.....	7
2.5 Ikääntyminen.....	8
3. Aurinkosähköpaneelien toteutunut tuotanto.....	9
3.1 Suomi ja muut pohjoismaat.....	9
3.2 Suomi ja Saksa.....	10
3.3 Etelä-Eurooppa.....	11
3.4 Simulointi.....	13
4. Aurinkolämpökeräinanalyysi.....	15
4.1 Tuotannon vaihtelu.....	16
4.1.1 Vuosituotanto.....	17
4.1.2 Kuukausituotanto.....	21
4.1.3 Päivätuotanto.....	26
5. Yhteenveto.....	28
LÄHTEET.....	29

## Liitteet

Liite 1      Aurinkolämpökeräimen tuotanto vuosilta 2006–2015.

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

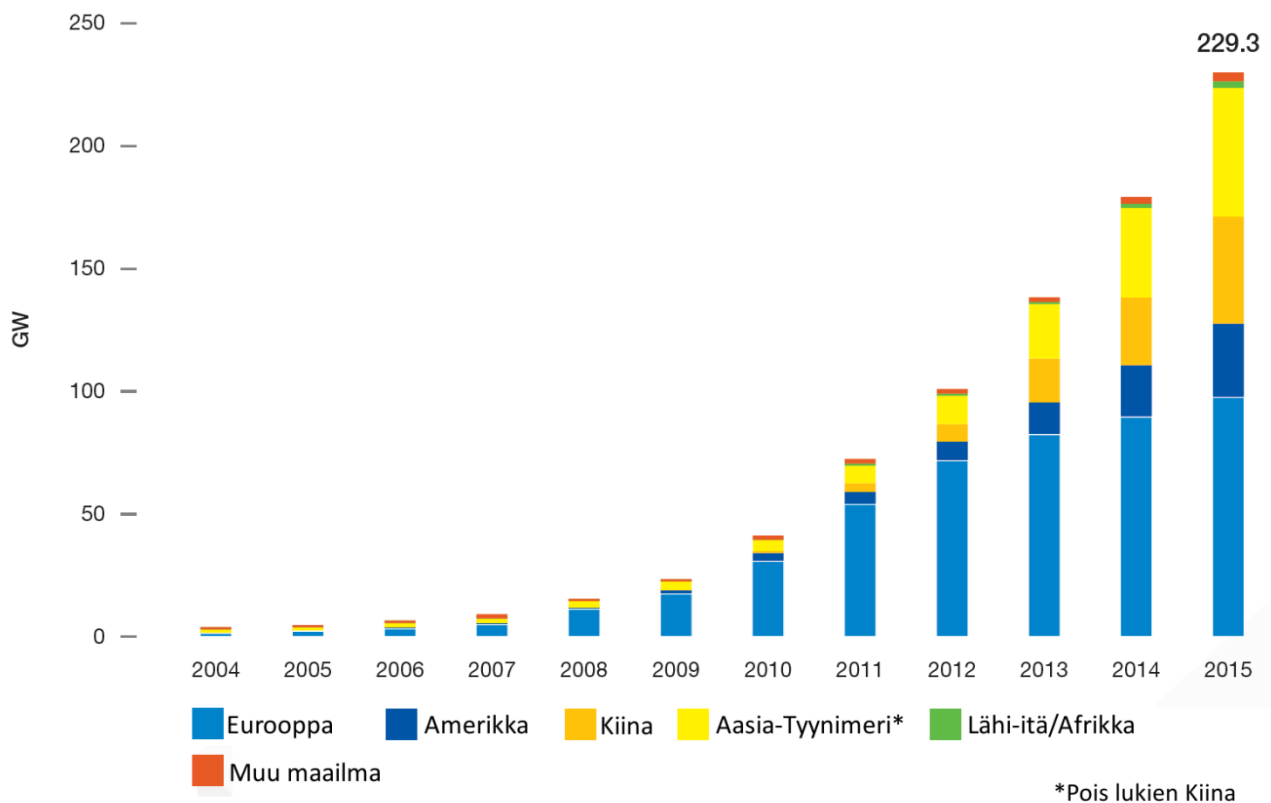
COP	Coefficient of performance
PR	Performance ratio
PV	Photovoltaic

### Alaindeksit

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

## 1. JOHDANTO

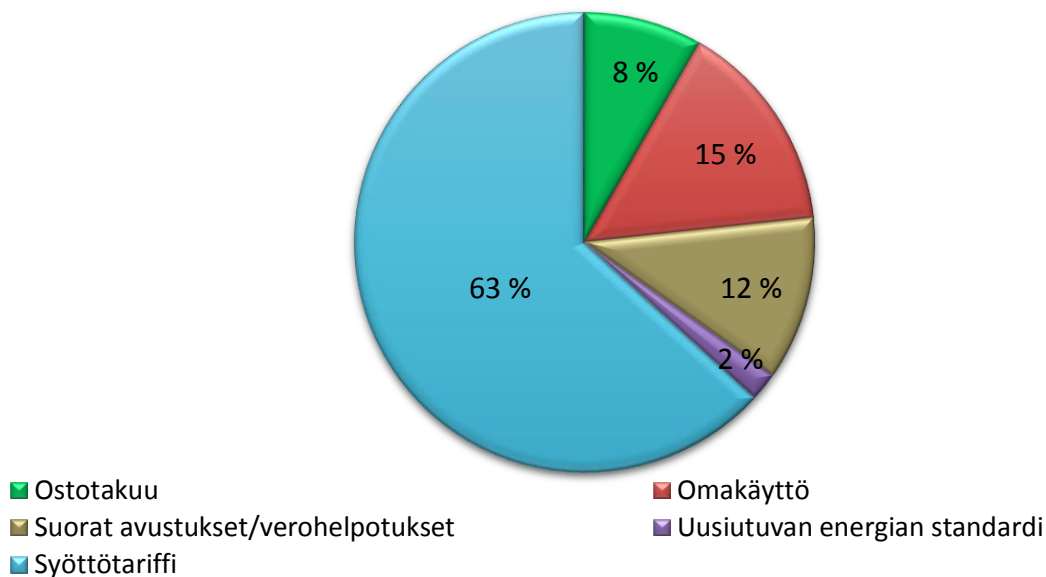
Aurinkoenergia yhdessä tuulienergian kanssa on nopeasti kasvava vaihtoehto fossiilienergialle. Aurinkosähkön kasvu maailmassa on tällä hetkellä eksponentiaalista. Vuoden 2015 loppuun mennessä aurinkosähköpaneeleita oli asennettu maailmanlaajuisesti 229.3 GW, joilla arviolta tuotettiin 330 TWh energiaa. Euroopassa 100 GW:n raja rikottiin vuoden 2016 alkupuolella. Voimakkain aurinkosähkön kasvu tapahtuu tällä hetkellä APAC-alueella (Asia-Tyynimeri). Kiina (18,9 %) ohitti Saksan (17,3 %) yhteensä asennetussa aurinkosähkötehosta vuoden 2015 loppuun mennessä. Kuvasta 1.1 nähdään maailmanlaajuisesti asennettu aurinkosähkötehon kasvu vuodesta 2004 vuoden 2015 loppuun. 300 GW:n rajan ennustetaan rikkoontuvan vuonna 2017 ja 500 GW:n rajan vuonna 2020. (SolarPower Europe 2016)



Kuva 1.1 Asennettu aurinkosähköteho maailmanlaajuisesti. (Solarpower Europe 2016)

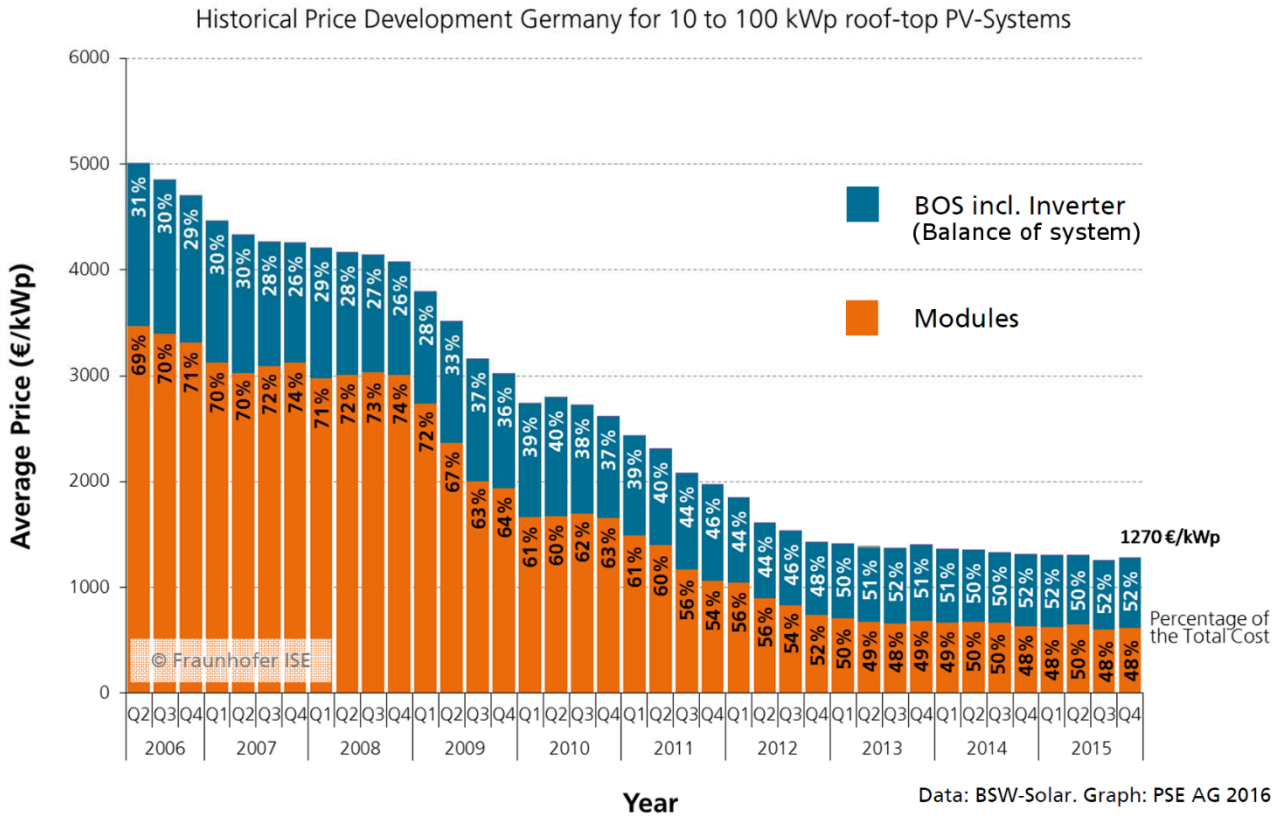
Suomessa on arviolta 14,7 MW asennettua aurinkosähkötehoa, joka tuottaa noin 12 GWh energiaa vuodessa. Aurinkosähköpaneelin tuottama energia on noin 0,014 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Perussyynä alhaiseen aurinkoenergian hyödyntämiseen pohjoismaissa näyttäisi olevan alhainen tai puuttuva rahallinen tuki ja uskomus siitä, että Pohjois-Eurooppa ei sovellu aurinkoenergian hyödyntämiseen (Haukkala). Suomessa on myös verrattain alhainen sähkönhintaa, joka ei motivoi sijoittamaan omaan tuotantolaitokseen.

Kuvassa 1.2 näkyvät eri motivaattoreiden osuudet aurinkosähkön lisäämiselle. Suurin motivaattori aurinkosähköenergian lisäämiseen maailmalla on vieläkin syöttötariffi, jota ei ole käytössä Suomessa aurinkosähköenergialle. Syöttötariffi takaa takuuhinnan, jolla tuotettu sähkö myydään verkkoon. Syöttötariffilla pyritään kompensoimaan energialaitoksen ostokustannuksia ja täten tekemään siitä rahallisesti kannattavampi hankkijalle. Tällä hetkellä aurinkosähkön kasvu johtuu pitkälti siitä saatavasta rahallisesta hyödystä. Aurinkosähköpaneelien jatkuva hinnan aleneminen mahdollistaa myös aurinkosähköenergian kyvyn kilpailla perinteisesti tuotetun energian kanssa maailmanlaajuisesti. Aurinkosähköenergian hinta on jo alittanut osassa maailmaa perinteisesti tuotetun energian. Poliittisten määräysten vaikutus aurinkoenergian lisäämiseen on toistaiseksi pieni. (SolarPower Europe 2016)



Kuva 1.2 Aurinkosähköenergian tuotannon motivaattorit maailmassa. (SolarPower Europe 2016)

Aurinkosähkön hinta riippuu pitkälti hankintakustannuksista yksityiskäytössä, koska polttoaine on ilmaista sekä huoltokustannukset verrattain pienet. Isommissa kaupallisissa asennuksissa hintaa nostaa mahdollisen rahoituksen korko sekä vakuutus. (SolarPower Europe 2016). Kuvassa 1.3 on esitetty kokoluokassa 10–100 kWp olevien aurinkosähkölaitosten kustannus Saksassa vuosina 2006–2015. Kahden vuoden kuluttua Suomen Nurmoon valmistuvan 6 MW:n aurinkosähkövoimalan budjetti on noin 6,8 milj. €, joka on noin  $1130 \frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ . Aurinkosähköpaneelin hinta on tippunut pitkälti monikidepiin hinnan laskun myötä. Muita tekijöitä paneelin hinnan tippumiselle ovat paneelin hyötysuhteen paraneminen, useamman valmistajan tulo markkinoille sekä valmistusteknologian kehittyminen. (Solar cell central).



Kuva 1.3 Aurinkovoimalan kustannus vuosina 2006–2015 Saksassa (Fraunhofer).

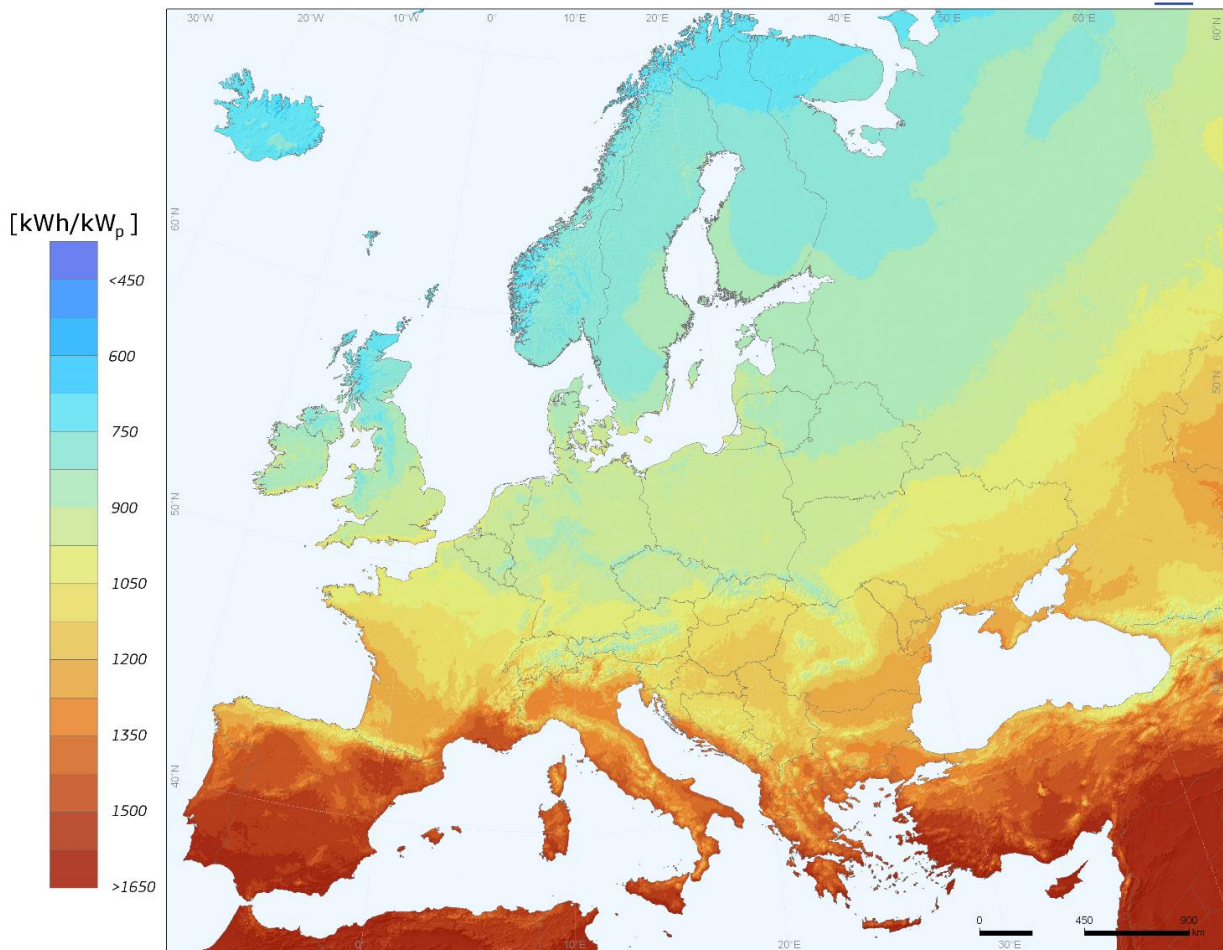
## **2. TEKIJÄT, JOTKA VAIKUTTAVAT TUOTETTUUN AURINKOENERGIAAN**

Kappaleessa keskitytään lämpötilan, sijainnin sekä asennussuunnan ja –kulman vaikutuksiin aurinkosähköpaneelilla ja aurinkolämpökeräimellä. Paneelien jälkeen tulevat komponentit jätetään käsittelemättä. Paneelin hyötysuhteeseen ja täten tuotettuun aurinkoenergiaan vaikuttaa paneelin laatu sekä siinä käytetty teknologia. Eri aurinkosähköpaneeli tyyppejä on esitelty Montosen kandidaatintyössä (Montonen 2011) ja eri aurinkolämpökeräin tyyppejä Takalan kandidaatintyössä (Takala 2011).

### **2.1 Sijainti**

Eniten aurinkosähköpaneelin ja aurinkolämpökeräimen tuotantoon vaikuttaa ulkoisista tekijöistä sijainti pohjoinen–etelä-akselilla. Kuvassa 2.1 nähdään aurinkosähköenergian potentiaali Euroopassa. Myös kappaleen 3 kuvassa 3.5 nähdään toteutuneita tuotantolukemia eri leveyspiireiltä. Auringon säteilyteho riippuu säteilyn tulokulmasta, koska säteily hajoaa sitä suuremmalle alueelle mitä lähempänä horisonttia aurinko paistaa. Paras keskimääräinen säteilyteho on siis päiväntasaajalla, josta se heikkenee kohti napoja. Myös sijainti vaaka-akselilla vaikuttaa hieman auringon säteilytehoon maanpinnalla, koska alueen pilvisuus tai ilmansaasteet heikentävät ja heijastavat auringonsäteilyä, jolloin pienempi osa säteilystä päätyy lopulta aurinkopaneelille.

## Aurinkoenergian potentiaali Euroopassa



Vuotuinen ominaistuotanto optimikulmaan asennetulla  
1 kWp aurinkosähköpaneelilla (PR=0.75)

Kuva 2.1 Auringonsäteilyteho Euroopassa. (PVGIS © European Union, 2001-2012)

## 2.2 Lämpötila

Koska aurinkosähköpaneelien toiminta perustuu puolijohde tekniikkaan, vaikuttaa lämpötila sen toimintaan. Lämpötilan noustessa aurinkosähköpaneelin tyhjäkäyntijännite laskee, mutta paneelista saatava virta kuitenkin kasvaa. Virran kasvun vaikutus on kuitenkin paljon pienempi kuin jännitteen alenema, jolloin aurinkosähköpaneelista saatava teho laskee lämpötilan noustessa. Aurinkosähköpaneelien antama teho ilmoitetaan yleensä 25 °C:n lämpötilassa. Piikidekennoilla vaikutus on noin  $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ja parhaimmillakin kennoilla teho laskee noin  $-0.35 \text{ }^\circ\text{C}$ . On syytä huomata, että paneelin lämpötila ei ole sama kuin ulkoilmanlämpötila, sillä auringon säteily kuumentaa paneelia, jolloin lämpötila voi kuumina kesäpäivinä nousta yli 50 °C:seen. Paneelien asennuksessa kannattaa siis ottaa huomioon se, että paneeli pääsee tuulettumaan kunnolla, jolloin saadaan parempi energiantuotanto paneelista.

Aurinkolämpökeräimellä lämpötilan vaikutus on päinvastainen aurinkosähköpaneeliin. Aurinkolämpökeräimen hyötysuhde on riippuvainen keräinnesteen ja ulkolämpötilan erosta. Paras käyttökohde aurinkolämpökeräimelle hyötysuhteen näkökulmalta on tällöin matalalämpöinen kohde esimerkiksi nestekiertoinen lattialämmitys. Aurinkolämpökeräimen riippuvuutta lämpötilasta on käsitelty tarkemmin Takalan kandidaatin työssä (Takala 2011).

## 2.3 Varjostuminen

Koska aurinkosähköpaneelit ja aurinkosähköpaneelien solut kytketään sarjaan, voi pienikin varjo paneelilla heikentää koko systeemin toimintaa. Varjottomat solut/paneelit joutuvat tällöin toimimaan samassa pisteessä kuin varjostunut solu/paneeli. (PulSolar). Aurinkolämpökeräimellä tuleva varjostus ei heikennä sen toimintaa yhtä radikaalisti, koska neste kiertää paneelissa, eikä altistu täten jatkuvasti varjo kohdalle.

Korkeiden rakennusten katolla ongelmaa ei yleensä ole, mutta omakotitalojen pihassa tulee huomioida puiden ja muun kasvillisuuden aiheuttama varjostus. Isompia asennuksia tehdessä on myös huomioitava paneelien aiheuttama varjostus, jottei se heikennä muiden paneelien toimintaa.

## 2.4 Paneelin asennus

Mitä enemmän aurinkosähköpaneeliin ja aurinkolämpökeräimeen kohdistuu auringon säteilyä, sitä enemmän se tuottaa energiaa. Aurinko paistaa eri kulmasta maanpinnalle eri leveyspiireillä ja paneelin tasokulma kannattaa säätää siten, että säteily tulee mahdollisimman kohtisuorasti paneelia kohden. Tämä kulma vaihtelee vuodenajan ja päivän mittaan. Talvella aurinko paistaa Suomessa alle 5 astetta horisontin yläpuolella, kun kesällä se on hieman yli 50 astetta. Koska aurinko paistaa enemmän ja suuremmalla säteilyteholla kesällä kuin talvella, kannattaa paneeli suunnata kesäauringon suuntaan.

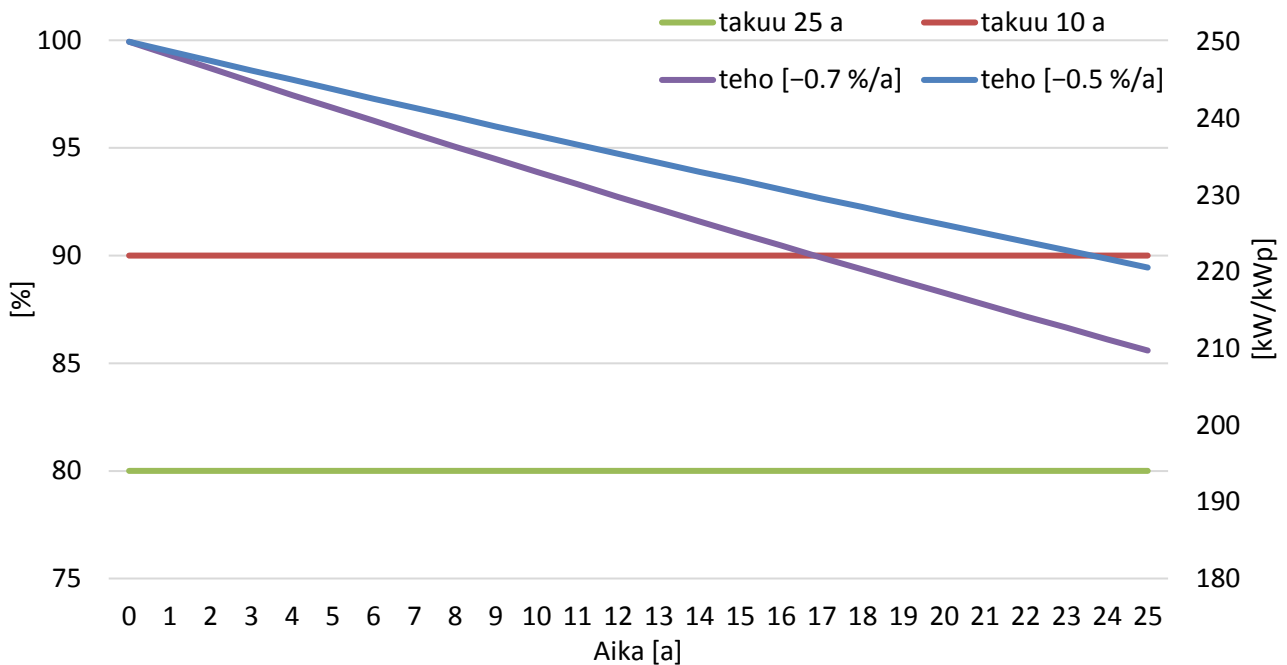
Monesti kuitenkin optimikulmaan ja suuntaan asennus ei ole mahdollisista, sillä paneeleita asennetaan useasti valmiiseen struktuuriin. Esimerkiksi omakotitaloissa kallistuskulman määrää usein katon harjakulma ja asennussuunnan määrää talon asento suhteessa ilmansuuntiin. Tulevaisuudessa aurinkoenergian voisi ottaa huomioon jo taloa suunnitellessa. Tuulikuorma on otettava myös huomioon, mikäli paneelien asennus suoritetaan tavalla, jossa tuuli pääsee nostamaan paneelia. Myös aurinkosähköpaneelien asennus pystysuoralle seinälle on mahdollista esimerkiksi Suomessa, kun aurinko paistaa matalalta talvikuukausina. Tällöin paneeleille ei kerry lunta, mutta tuotanto pilvisillä päivillä jää erittäin vähäiseksi. Taulukossa 2.1 on simuloitu Lappeenrannan ominaistuotantoja eri ilmansuunnissa sekä eri asennuskulmilla. Simuloinnin suorittamisesta tarkemmin kappaleessa 3.4.

Taulukko 2.1 Aurinkosähkövoimalan simuloituja ominaistuotantoja eri ilmansuunnissa ja tasokulmissa Lappeenrannassa.

Tasokulma [°]	15	30	45	60	75	90
Ominaistuotanto [kWh/kWp]						
Etelä	892	963	984	963	900	801
Länsi	768	751	726	690	640	580
Itä	774	761	738	702	653	592
Pohjoinen	643	517	412	356	334	315

## 2.5 Ikääntyminen

Aurinkosähköpaneelille annetaan yleisesti tehontuotanto takuu 10 vuodelle sekä 25 vuodelle, jonka aikana paneelin teho ei saa laskea 90 %:n ja 80 %:n alle. Vuoden 2000 jälkeen tehdyillä paneeleilla odotetaan tapahtuvan 0,5–0,7 %:n tehohäviö per vuosi. Kuvassa 2.2 on esitetty teoreettinen tehon heikkeneminen aurinkosähköpaneelin ikääntyessä. Ikääntymisen syitä on käsitelty tarkemmin NREL:n tutkimuksessa (NREL 2016).



Kuva 2.2 Aurinkosähköpaneelin teoreettinen tehon heikkeneminen 0,5 ja 0,7 %:n vuosivauhdilla.

### 3. AURINKOSÄHKÖPANEELIEN TOTEUTUNUT TUOTANTO

Kappaleessa vertaillaan aurinkosähköpaneelien tuotantoa vuonna 2015. Vertailuun valittiin maita, joista oli saatavilla riittävästi dataa. Data kerättiin invertteri-valmistaja SMA:n sivustolta (Sunny Portal) löytyvällä palvelulla, jonne invertterit lataavat dataa tuotetusta energiasta. Data on valikoitu yksitellen, jolla on pyritty minimoimaan virheellisen datan pääsy tuloksiin. Simulointi suoritettiin Homer-ohjelmistolla. Aurinkosähköpaneelien toteutunutta tuotantoa on käsitelty myös Huostilan kandidaatintyössä (Huostila 2015).

Vertailuun valittiin sattumanvaraisesti voimaloita eri kokoluokista, jonka jälkeen selvästi muita huonommat tuotantolukemat jätettiin huomioimatta. Vertailussa otetaan huomioon vain tuotettu energiamäärä, jolloin mahdollisesti paneelien asennussuunnasta johtuva tuottamatta jäänyt energia jää huomioimatta. Tästä syystä huonoimmat tuotantomäärät jätettiin huomioimatta, koska voidaan olettaa niiden johtuvan epäoptimaalisesta tai käyttäjän kulutusta palvelevasta asennuksesta.

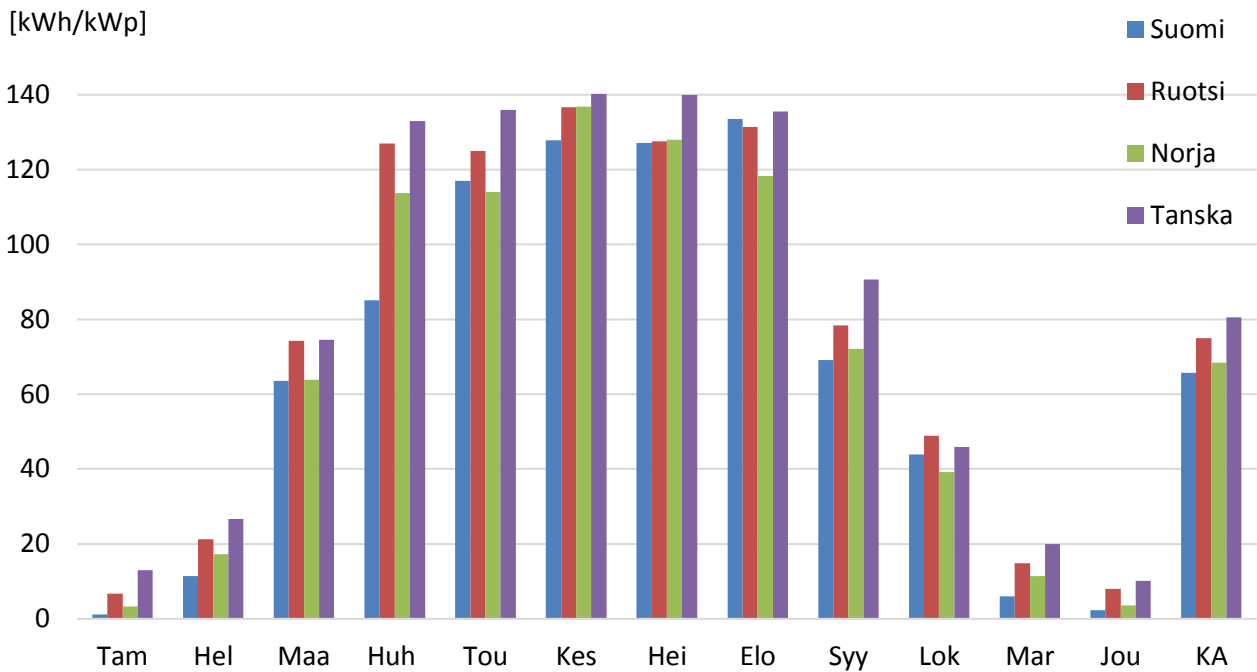
#### 3.1 Suomi ja muut pohjoismaat

Taulukosta 3.1 nähdään maakohtaiset ominaistuotannot sekä otannan minimi, maksimi, hajonta ja otosmäärä. Islanti jätettiin pois vertailusta datan vähäisyyden takia.

Taulukko 3.1 Ominaisuotanto (Sunny Portal).

Ominaisuotanto	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Hajonta	Otosmäärä
Suomi	787,9	616,9	977,1	89,3	18
Ruotsi	899,6	704,6	1020,6	89,1	18
Norja	821,5	623,7	1095,7	149,3	8
Tanska	965,7	752,5	1348,8	149,1	18

Suomi jää neljän pohjoismaan vertailussa viimeiselle sijalle. Tämä johtuu todennäköisesti voimaloiden keskimääräisestä sijainnista kaikkein pohjoisimpana noin Lappeenrannan tasolla leveyspiirillä. Paras tuotanto löytyy Tanskasta eteläisimmän sijaintinsa ansiosta. Suomessa kuitenkin voidaan päästä lähelle  $1000 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$  ominaisuotantoa. Kuvassa 3.1 on Suomen, Ruotsin, Norjan sekä Tanskan ominaisuotannot kuukausikohtaisesti. Suurin ero Suomen ja Tanskan välillä on alku- ja loppuvuoden tuotannossa, sillä kesällä tuotanto on melkein sama maiden välillä. Alku- ja loppuvuoden huono tuotanto selittyy pitkälti paneelien väärästä kulmasta talviauringolle, sekä lumen kertymisestä paneeleille.



Kuva 3.1 Pohjoismaiden ominaistuotanto kuukausittain ja ominaistuoton keskiarvo.

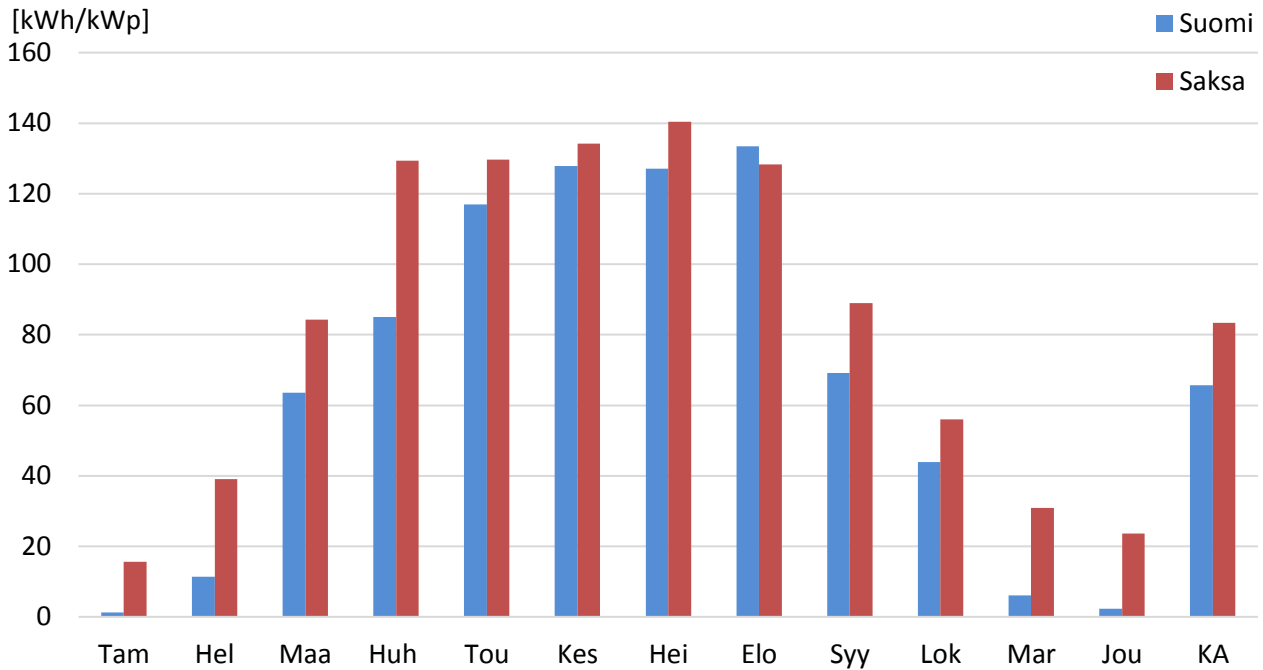
### 3.2 Suomi ja Saksa

Taulukosta 3.2 nähdään Suomen ja Saksan ominaistuotannot sekä otannan minimi, maksimi, hajonta ja otosmäärä.

Taulukko 3.2 Ominaisuotanto (Sunny Portal).

Ominaisuotanto	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Hajonta	Otosmäärä
Suomi	787,9	616,9	977,1	89,3	18
Saksa	1000,1	826,1	1154,1	102,6	18

Kuvasta 3.2 nähdään Suomen ja Saksan välinen ero aurinkosähkön ominaistuotannossa. Kesäkuukausina (toukokuu–elokuu) tuotannossa ollaan samalla tasolla, mutta niiden ulkopuolella tuotannossa jäädyään noin 40 %. Vuositasolla tuotannossa jäädyään kuitenkin vain 21 %, joka on vähän huomioon ottaen asennuskapasiteetin määrän Suomessa. Suurin ongelma Suomen aurinkosähkön tuotannossa on talvikuukausien lähes nollatuotanto, jolloin Suomen energiankulutus on suurimmillaan.



Kuva 3.2 Suomen ja Saksan ominaistuotanto kuukausittain ja ominaistuotannon keskiarvo.

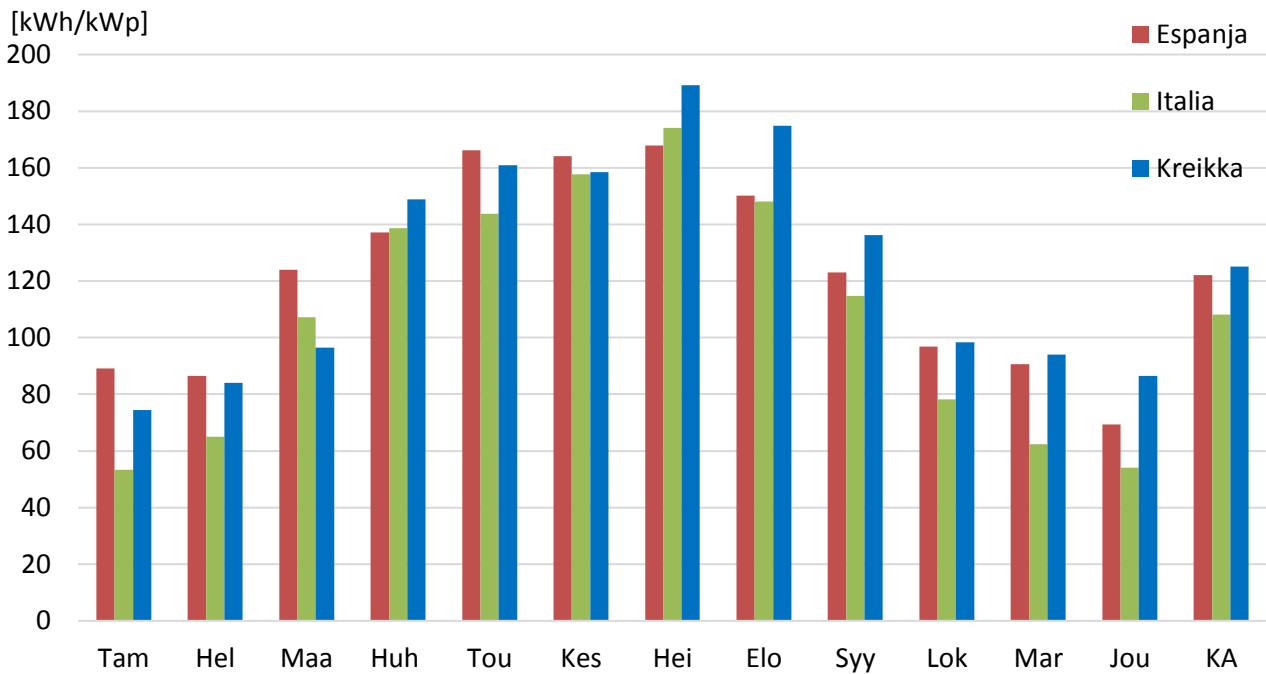
### 3.3 Etelä-Eurooppa

Taulukosta 3.3 nähdään Espanjan, Italian ja Kreikan ominaistuotannot sekä otannan minimi, maksimi, hajonta ja otosmäärä.

Taulukko 3.3 Ominaisuotanto (Sunny Portal).

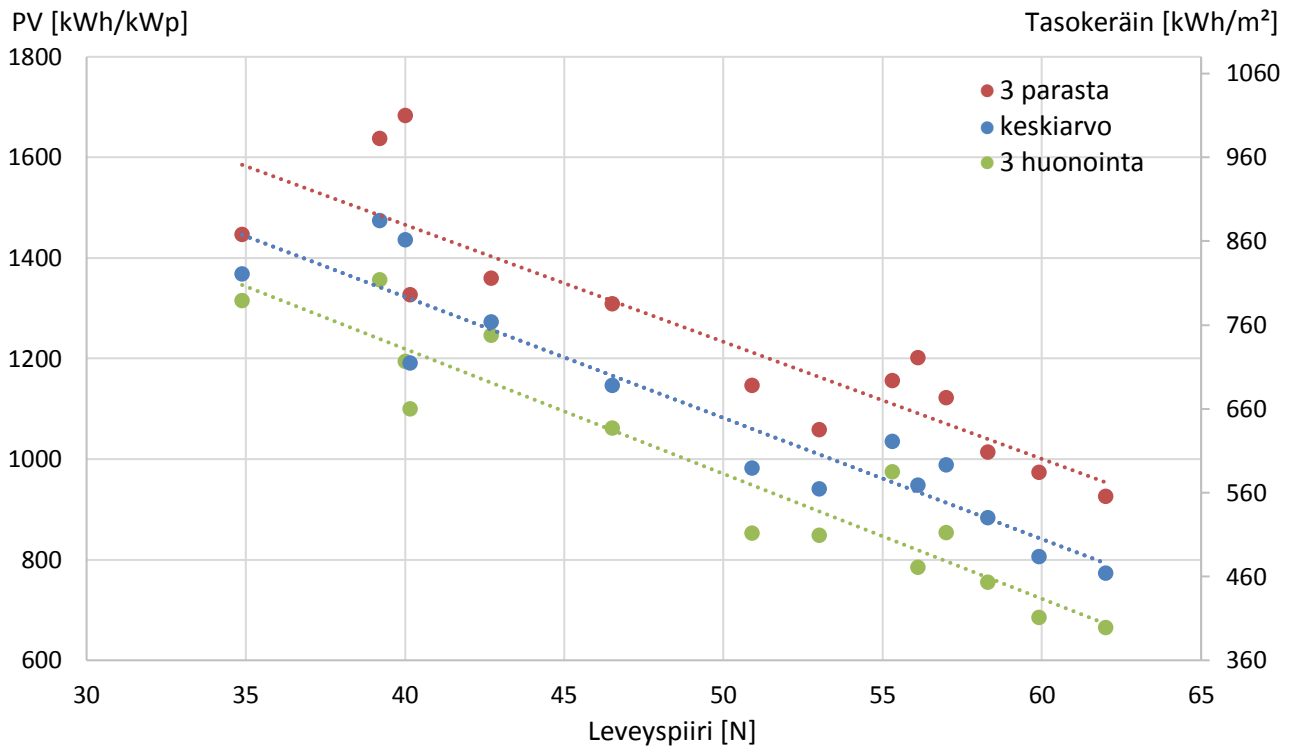
Ominaisuotanto	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Hajonta	Otosmäärä
Espanja	1463,2	1189,9	1774,9	171,6	19
Italia	1297,2	1224,9	1389,1	49,7	10
Kreikka	1502,1	1318,4	1701,9	129,4	9

Euroopan eteläisimmissä valtioissa ominaistuotanto on selvästi korkeampi kuin pohjoismaissa. Italiassa noin  $1300 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$ , Espanjassa  $1450 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$  ja Kreikassa noin  $1500 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$ . Saksan vuosituotanto jää 32 % ja Suomen 46 % Espanjan vuosituotannolle. Tuotanto on myös tasaisempaa Etelä-Euroopassa kuin Pohjois-Euroopassa vuositason mitattuna, kuten kuvasta 3.3 nähdään. Italian alhaisempi lukema johtuu luultavasti paneelien huonosta asennuksesta.



Kuva 3.3 Espanjan, Italian ja Kreikan ominaistuotanto kuukausittain ja ominaistuotannon keskiarvo.

Kuvassa 3.4 nähdään vuosittainen keskimääräinen aurinkosähköpaneelien toteutunut ominaistuotanto eri leveyspiireillä. Kuvaajan lukemat asettuvat hyvin linjaan kappaleen 2 kuvan 2.1 kanssa. Kuvaajan data sisältää noin 170 voimalaa eri maista ja leveyspiireiltä. Tuotannon keskiarvo laskettiin maakohtaisesti pois lukien Yhdysvallat, joka jaettiin kahteen osaan. Leveyspiiri valittiin voimaloiden keskimääräisestä sijainnista. Kuvaajaan on piirretty myös kolme korkeinta ja matalinta ominaistuotantoa, joiden väliin ominaistuotanto oletettavasti asettuu. Keskiarvo tuotannoista voidaan laskea aurinkosähköpaneelien ominaistuotannon nousevan noin  $245 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}}$  per 10 astetta leveyspiirillä. Kuvaajaan on myös arvioitu aurinkolämpökeräimen mahdollista tuotantoa eri leveyspiireillä. Tasokeräimen kohdalla arvioitu muutos on noin  $150 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  per 10 astetta leveyspiirillä. Tasokeräimen tuotanto arvioitiin myöhemmin tarkastelussa olevan aurinkolämpökeräimen tuotannon sekä aiemmin tarkastelussa olleiden 18 Suomessa sijaitsevan aurinkosähkövoimalan tuotannon suhteesta vuonna 2015. Tuotannon kasvu aurinkolämpökeräimellä voi olla hieman arvioitua suurempi positiivisen lämpötilakertoimen vaikutuksesta. Aurinkolämpökeräimen tuotannossa tulee myös huomioida käyttökohde, koska tuotanto riippuu nesteen loppulämpötilasta.

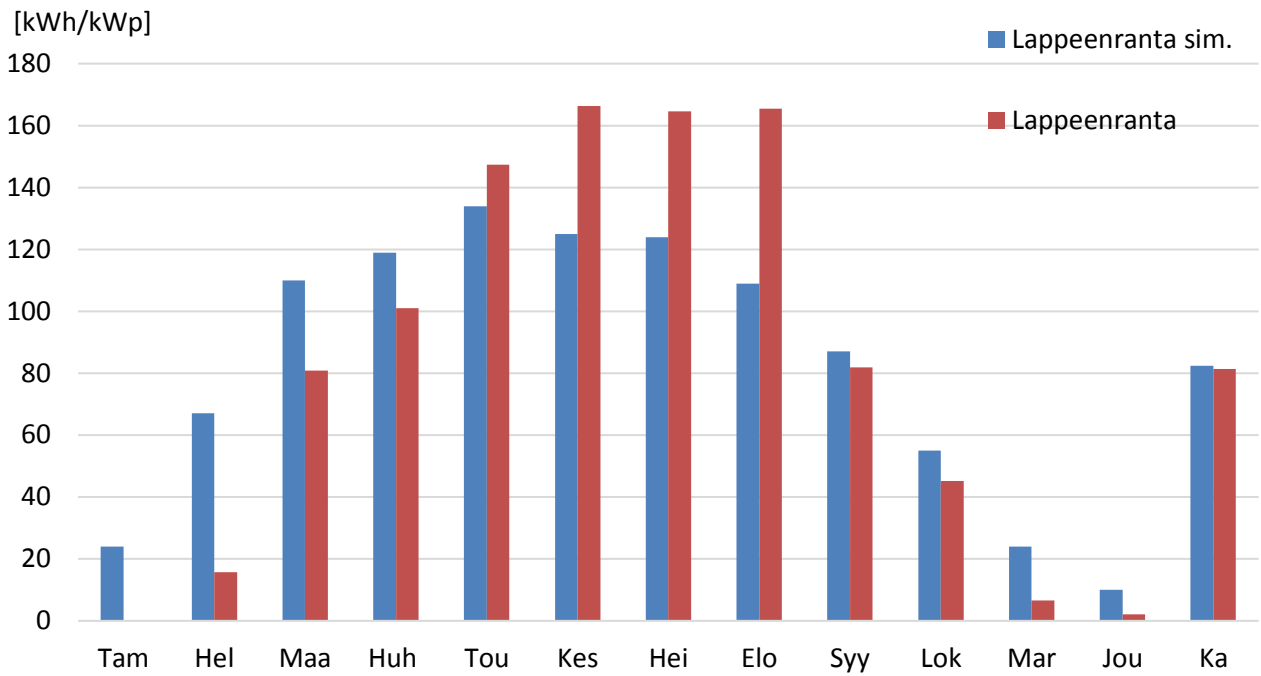


Kuva 3.4 Eri leveyspiirien ominaistuotantojen keskiarvoja, minimeitä ja maksimeita. (Sunny Portal)

### 3.4 Simulointi

Simulointi suoritettiin HOMER 2.68 beta -ohjelmalla. Simuloinnissa käytettiin 1 kW:n aurinkosähköpaneelia ja invertteriä, josta saatiin suoraan ominaistuotanto kyseisellä alueella. Vaihtosuuntaajan hyötysuhde oli 96 % ja paneelin kulmaksi valittiin kulma, jolla saatiin maksimituotanto. Aurinkosähköpaneelin lämpötilakertoimena käytettiin  $-0.5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  ja paneelin lämpötilan nimellispisteenä  $47 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ . Ohjelma huomioi auringon säteilytehon sekä ilman selkeyden (clearness index) valitussa kohteessa.

Simulointi arvioi tuotannon alku- ja loppuvuodesta selvästi liian korkeaksi kuten kuvasta 3.4 nähdään. Simuloinnin vertailu kohdaksi valittiin voimala Suomen otannasta, jolla oli korkein ominaistuotanto vuonna 2015. Suurin virhe simuloinnissa aiheutuu todennäköisesti paneeleille kertyvän lumen takia. Vuositasolla tuotanto on kuitenkin hyvin lähellä simulointia.



Kuva 3.4 Lappeenrannassa sijaitsevan voimalan tuotanto vuonna 2015 ja Lappeenrannan simuloitu ominaistuotanto.

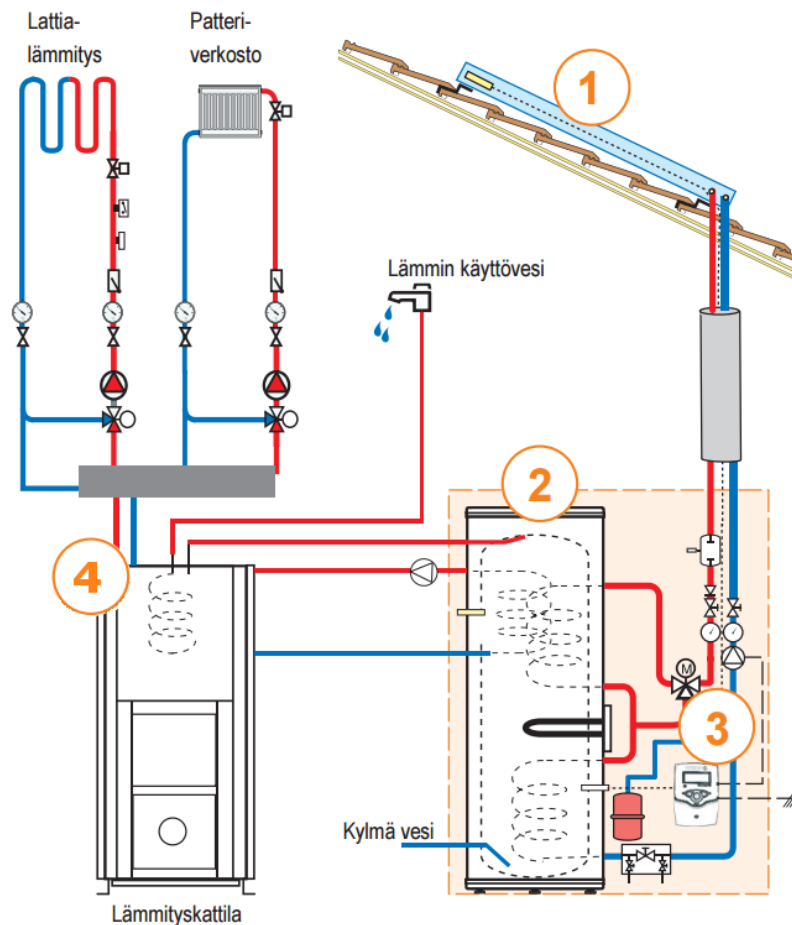
#### 4. AURINKOLÄMPÖKERÄINANALYYSI

Analysin aineistona käytettiin käsin kerättyä dataa aurinkolämpökeräimellä tuotetusta energiasta. Dataa on kerätty vuoden 2005 syyskuusta vuoden 2016 lokakuuhun. Laitos sijaitsee Porvoossa ja on ollut vuoden 2009 kesästä muuttumaton, joten analyysissä keskitytään ensisijaisesti vuosiin 2009–2015. Laitos koostuu kolmesta kuvassa 4.1 näkyvästä omakotitalon katolle asennetusta 2,7 m<sup>2</sup>:n De Dietrich PRO 2,5 - aurinkolämpökeräimestä, jotka ovat suunnattuna länteen 40–45 asteen kulmassa maahan nähden. Länteen asennus huonontaa vuosituotantoa verrattuna eteläasennukseen. Keräimien keskimääräinen vuosituotanto oli  $432 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  vuosina 2009–2015. Lukema on hyvin tyypillinen aurinkolämpökeräimelle, jolloin voidaan olettaa tarkasteltavan laitoksen toimivan oikein.



Kuva 4.1 Aurinkolämpökeräimien sijainti katolla.

Laitoksen periaatteellinen toiminta on esitetty kuvassa 4.2. Aurinkolämpökeräin (1, 3 kpl De Dietrich PRO 2,5) vastaanottaa auringon säteilyä ja muuntaa sen lämmöksi. Lämmönsiirtoneste kuljettaa lämmön käyttövesivaraajaan (2, De Dietrich B500/2B). Ohjausjärjestelmä (3, De Dietrich Diemasol B) hoitaa lämmönsiirtoa keräimen ja varaajan välillä. Lämmityskattila (4, De Dietrich GTU 120, kaasua) kytkeytyy automaattisesti päälle vasta, kun aurinkolämpökeräinten teho ei enää riitä veden lämmittämiseen. (Callidus)



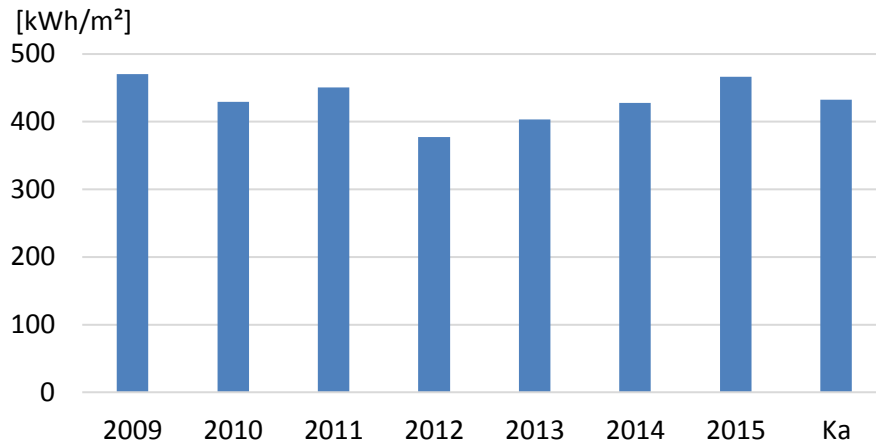
Kuva 4.2 Aurinkolämpökeräimen periaatteellinen toiminta. (Callidus)

#### 4.1 Tuotannon vaihtelu

Tuotantoa tarkasteltiin vuosina 2009–2015, koska ennen vuonna 2009 toimivan laitoksen tuotantolukemia ei saatu vertailukelpoiseksi nykyisen laitoksen kanssa. Kappaleessa tutkitaan vuosituotantoa, kuukausituotantoa sekä päivätuotantoa. Kappaleessa vertaillaan myös aurinkolämpökeräimen ja aurinkosähköpaneelin tuotantoa.

### 4.1.1 Vuosituotanto

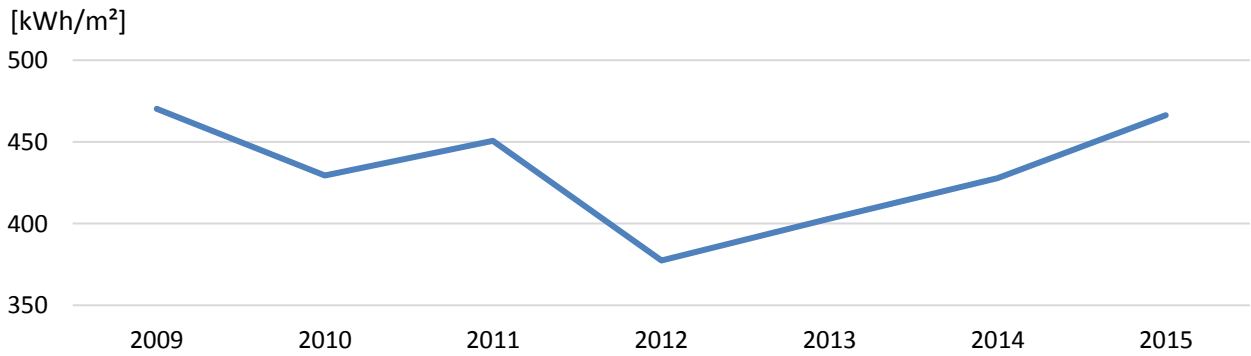
Tarkastelujaksolla keräimen vähiten tuottanut vuosi, tuotti 20 % vähemmän kuin eniten tuottanut vuosi. Tuotanto voi vaihdella eri vuosien kuukausien välillä yli 40 %, mutta vuositasolla tuotantoa voidaan pitää tasaisena. Kuvassa 4.3 on tuotettu energia eri vuosina.



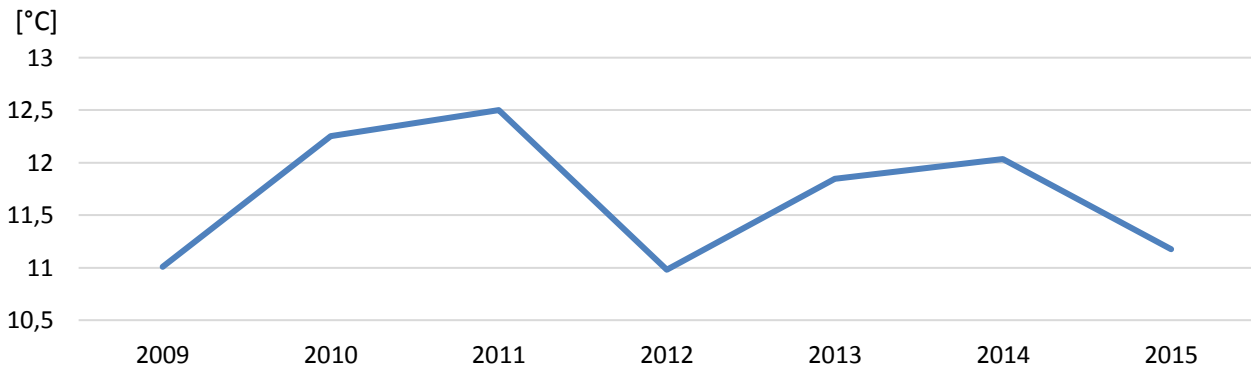
Kuva 4.3 Aurinkolämpökeräimen tuottama energia vuosina 2009–2015 sekä aikajakson keskiarvo.

Vuosien välinen vaihtelu tuotetussa energiassa johtuu pitkälti lämpötilan sekä pilvisyyden vaihtelusta. Pilvisyysdataa ei ollut käytettävissä, joten se on korvattu alueen sademäärällä. Sademäärä ei suoraan kerro alueen pilvisyydestä, sillä sama sademäärä voi sataa päivän tai viikon aikana. Datasta voidaan kuitenkin nähdä runsas sateisten ajanjaksojen vaikutus tuotettuun energiaan. Vuosikohtaiset sademäärät ja lämpötilat saatiin sivustolta, joka käyttää Ilmatieteenlaitoksen Avoin data -palvelua. Sademäärä sekä lämpötila laskettiin painotetusti jokaiselle kuukaudelle tarkastelujakson keskiarvotuotannon perusteella. Tällöin talven keskiarvosta poikkeavat sademäärät tai lämpötilat eivät pääse vääristämään tuloksia, koska tuotanto on silloin hyvin vähäistä, eikä säällä ole suurta vaikutusta.

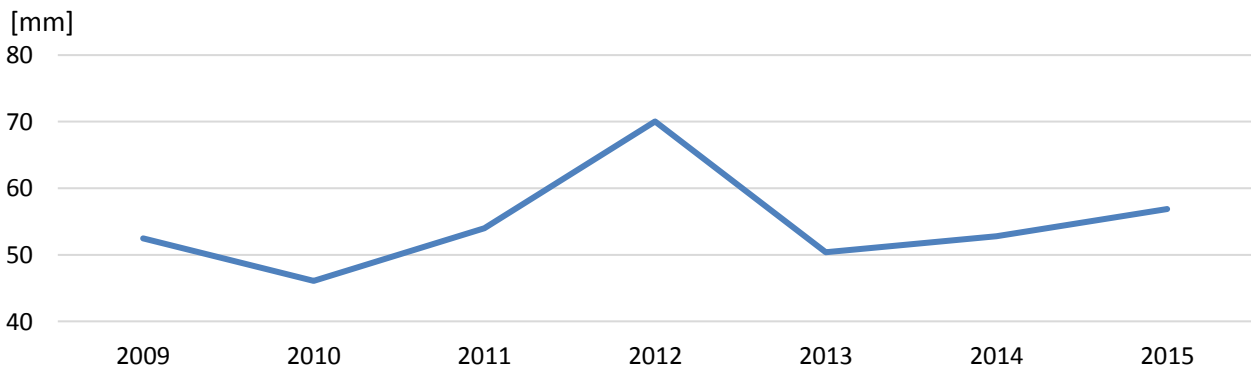
Tuotanto näyttäisi pääosin mukailevan vuosittaista lämpötilan vaihtelua, kuten kuvasta 4.4 nähdään. Myös vuoden 2012 selvästi keskiarvoa korkeampi sateisuus ja oletettavasti korkea pilvisyys on laskenut selvästi tuotantoa. Lämpötilan pieni muutos ei siis itsessään aiheuta suuria tuotannon muutoksia vaan se on suuntaa antava tieto siitä, että kuinka paljon keräin on saanut suoraa auringonsäteilyä tarkastelujaksolla. Kuten kuvasta 4.4 kuitenkin nähdään vuodet 2009 ja 2015 olivat parhaiten tuottaneet vuodet, mutta kuitenkin keskilämpötilaltaan alhaiset. Ainakin vuoden 2015 hyvän tuotannon selittää syksyn keskiarvoa selvästi vähempi sateisuus.



a) Aurinkolämpökeräimen vuosituotanto 2009-2015.



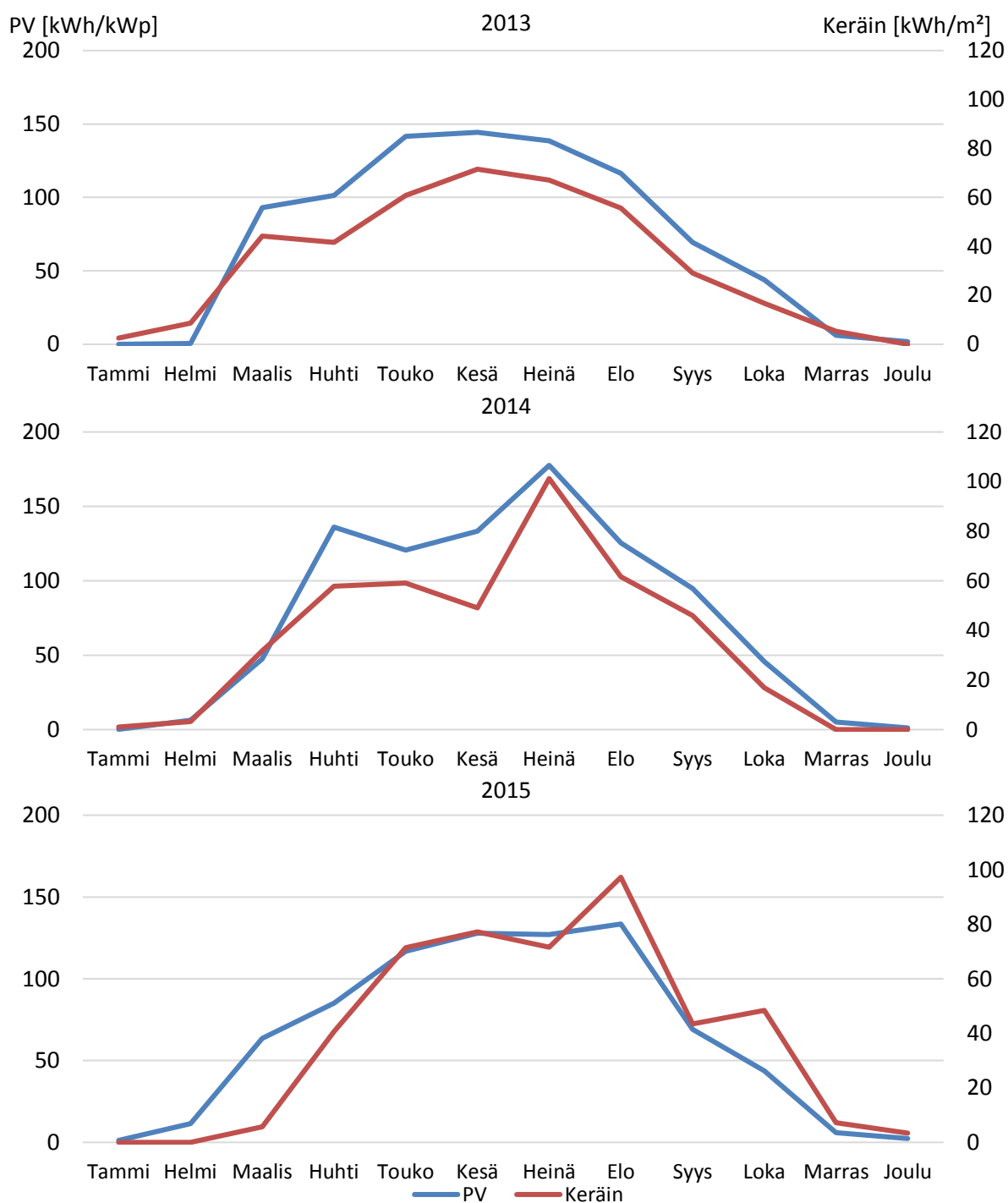
b) Porvoon lämpötila vuosina 2009-2015 (Säädata).



c) Porvoon sademäärä vuosina 2009-2015 (Säädata).

Kuva 4.4 Tilastotietoa aurinkolämpökeräimen vuosituotannosta sekä Porvoon lämpötilasta ja sademäärästä vuosina 2009–2015, a) tuotanto b) lämpötila c) sademäärä.

Kuvassa 4.5 on esitetty tarkasteltavan aurinkolämpökeräimen sekä Lappeenrannassa sijaitsevan aurinkosähkövoimalan vuosien 2013 ja 2014 tuotantokäyrät. Vuoden 2015 kuvaajassa on 18 Suomessa sijaitsevan aurinkosähkövoimalan tuotannon keskiarvo sekä tarkasteltavan aurinkolämpökeräimen tuotanto. Tuotantokäyrät ovat muodoltaan hyvin samanlaiset ja vuoden paras kuukausi osuu kummassakin tuotantomuodossa samaan kuukauteen. Kuvaajista nähdään myös, että vuoden eniten tuottanut kuukausi oli eri vuosina 2013–2015. Teoriassa aurinkolämpökeräimen käyrämuoto pitäisi olla jyrkempi kuin aurinkosähköpaneelin, koska lämpötilan noustessa keräimen hyötysuhde nousee ja aurinkosähköpaneelin laskee.

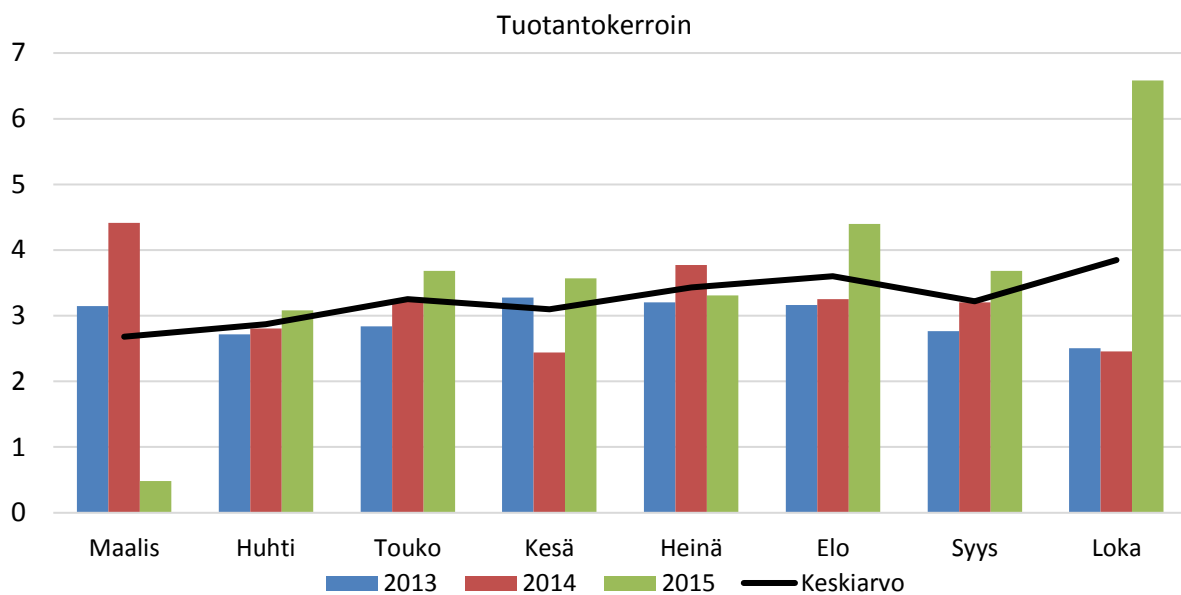


Kuva 4.5 Aurinkosähköpaneelin ja -keräimen tuotantokäyrät vuosina 2013–2015.

Kuvassa 4.6 on laskettu tuotantokerroin (aurinkolämpökeräimen tuotanto jaetaan aurinkosähköpaneelin tuotannolla) paneelineliöltä tuotetusta energiasta. Vertailussa on käytetty samaa aurinkosähkövoimalaa Lappeenrannasta, jonka tuotantolukemat on esitetty edellisessä kuvassa 4.5. Talvikuukaudet jätettiin huomioimatta, koska vaihtelu tuotannossa on erittäin suuri mahdollisen lumen takia. Kerroin näyttäisi liikkuvan kolmen ja neljän välillä ja vuosien 2013–2015 tuotannon keskiarvo on 3,23. Aurinkolämpökeräin

sijaitsee Porvoossa ja aurinkosähkövoimala Lappeenrannassa, jolloin tarkkaa vertailua ei voida tehdä eri sääolojen takia.

Ilma-vesilämpöpumpun suorituskerroin (COP) on myös riippuvainen ulkolämpötilan ja sisälämpötilan erosta. Suorituskerroin on kesällä yli kolme eli ilma-vesilämpöpumppu muuntaa syötetyn sähkötehon kolminkertaisesti lämpötehoksi. Aurinkosähköpaneelin ja ilmavesilämpöpumpun yhdistelmällä päästään tällöin samoihin lukemiin kuin aurinkolämpökeräimellä paneelineliöltä tuotetussa energiassa. Kyseinen systeemi vaatii siis investoinnin ilmavesilämpöpumppuun aurinkosähköpaneelien rinnalle. Myös aurinkolämpökeräin tarvitsee rinnalleen laitteen, jolla vettä voidaan lämmittää, mikäli aurinkolämpökeräin ei tuota riittävästi tehoa.

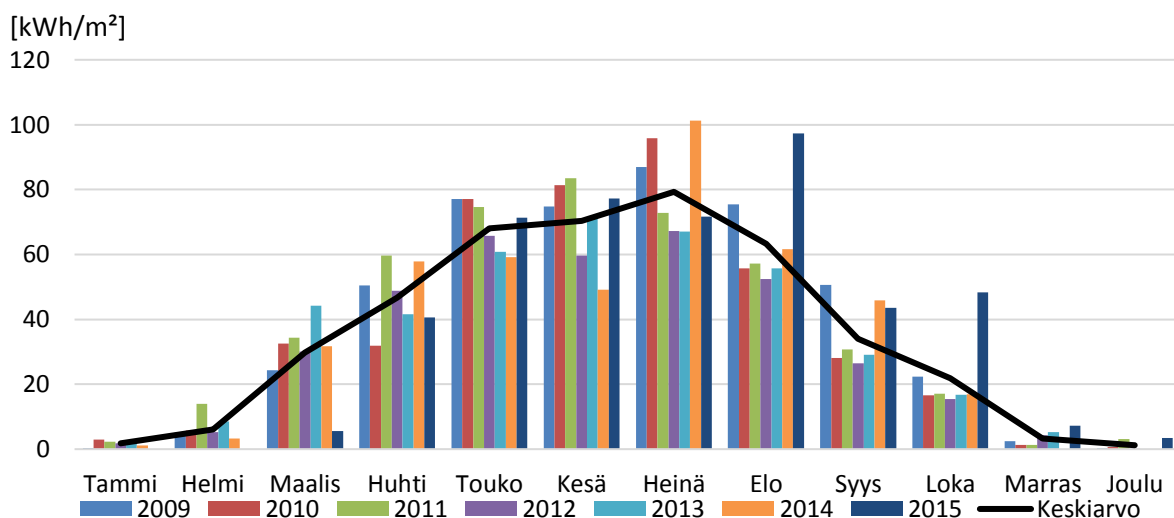


Kuva 4.6 Tuotantokerroin aurinkosähköpaneelin ja aurinkolämpökeräimen välillä.

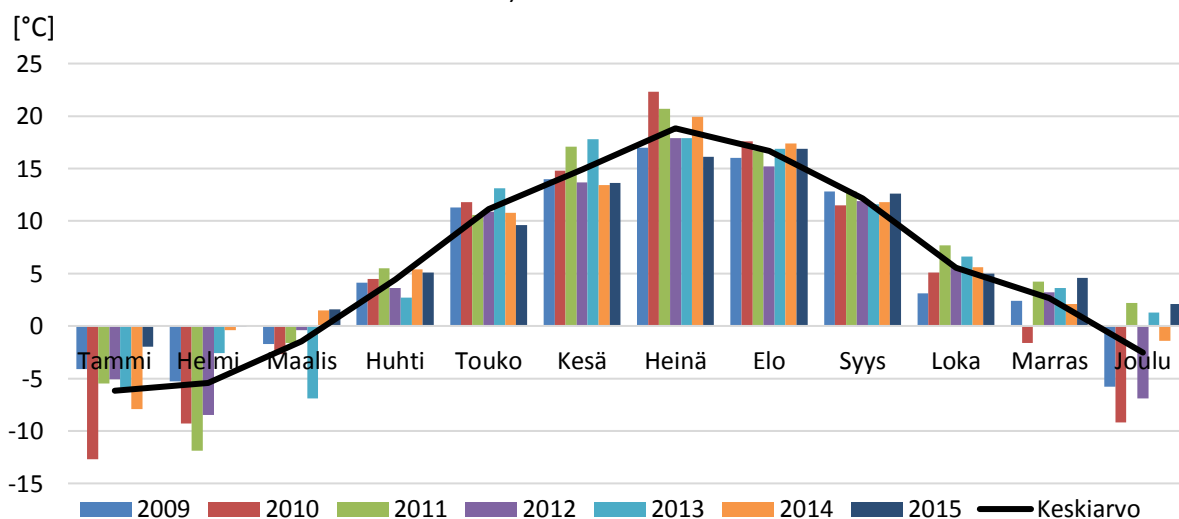
Mikäli aurinkosähköpaneelit tuottavat energiaa enemmän kuin sitä käytetään, voidaan ylimääräinen energia syöttää takaisin verkkoon. Mikäli aurinkosähköpaneelit eivät ole yhteydessä verkkoon, voidaan yhteys akustoon katkaista niiden ollessa täyteen ladatut. Mikäli aurinkolämpökeräimellä on ylituotantoa, neste alkaa kaasuuntua, jolloin kaasu työntää tieltään nestettä paisuntasäiliöön. Ilman viilennettyä neste palaa takaisin kiertoon. Tällöin tuotettavissa ollut energia hukkaantuu. Verkkoon kytketyt aurinkosähköpaneelit mahdollistavat siis paremman energian varastoinnin kuin aurinkolämpökeräimet. Aurinkolämpökeräimen oikea mitoittaminen kulutukselle on tällöin tärkeässä osassa. Kohde jossa käytetään sähköä muuhunkin kuin veden lämmitykseen, näyttäisi aurinkosähköpaneelin ja ilma-vesilämpöpumpun yhdistelmä paremmalta vaihtoehdolta kuin aurinkolämpökeräin. Pelkän aurinkosähköpaneelin ja aurinkokeräimen vertailussa, keräimen etuna on selvästi pienempi paneelien asennuspinta-ala.

### 4.1.2 Kuukausituotanto

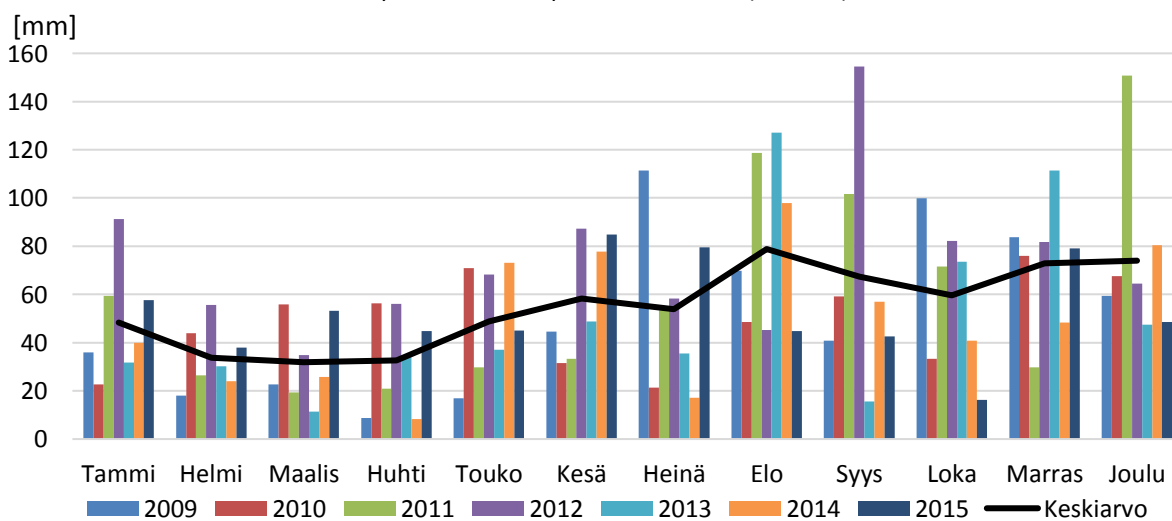
Kuvassa 4.7 on esitetty tarkastelujakson tuotanto, lämpötila sekä sademäärä. Paras tuotanto on ollut heinäkuussa noin  $80 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ . Heinäkuu on ollut vuoden lämpimin kuukausi Porvoossa lukuun ottamatta vuotta 2015, jolloin lämpimin kuukausi oli elokuu. Toukokuu on ollut keskimäärin 4 astetta kylmempi kuin kesäkuu, mutta noin 10 % vähempi sateinen, jolloin tuotanto on hyvin lähellä toisiaan. Elokuu on toukokuuta noin 5,5 astetta lämpimämpi mutta 48 % sateisempi, joka pudottaa tuotannon toukokuun alapuolelle. Syyskuu on ollut noin asteen verran keskiarvoltaan toukokuuta lämpimämpi, mutta sateinen ja pilvinen sää pudottaa tuotannon noin puoleen toukokuun tuotannosta. Talvikuukausina tuotanto on erittäin vähäistä.



a) Tuotanto 2009–2015



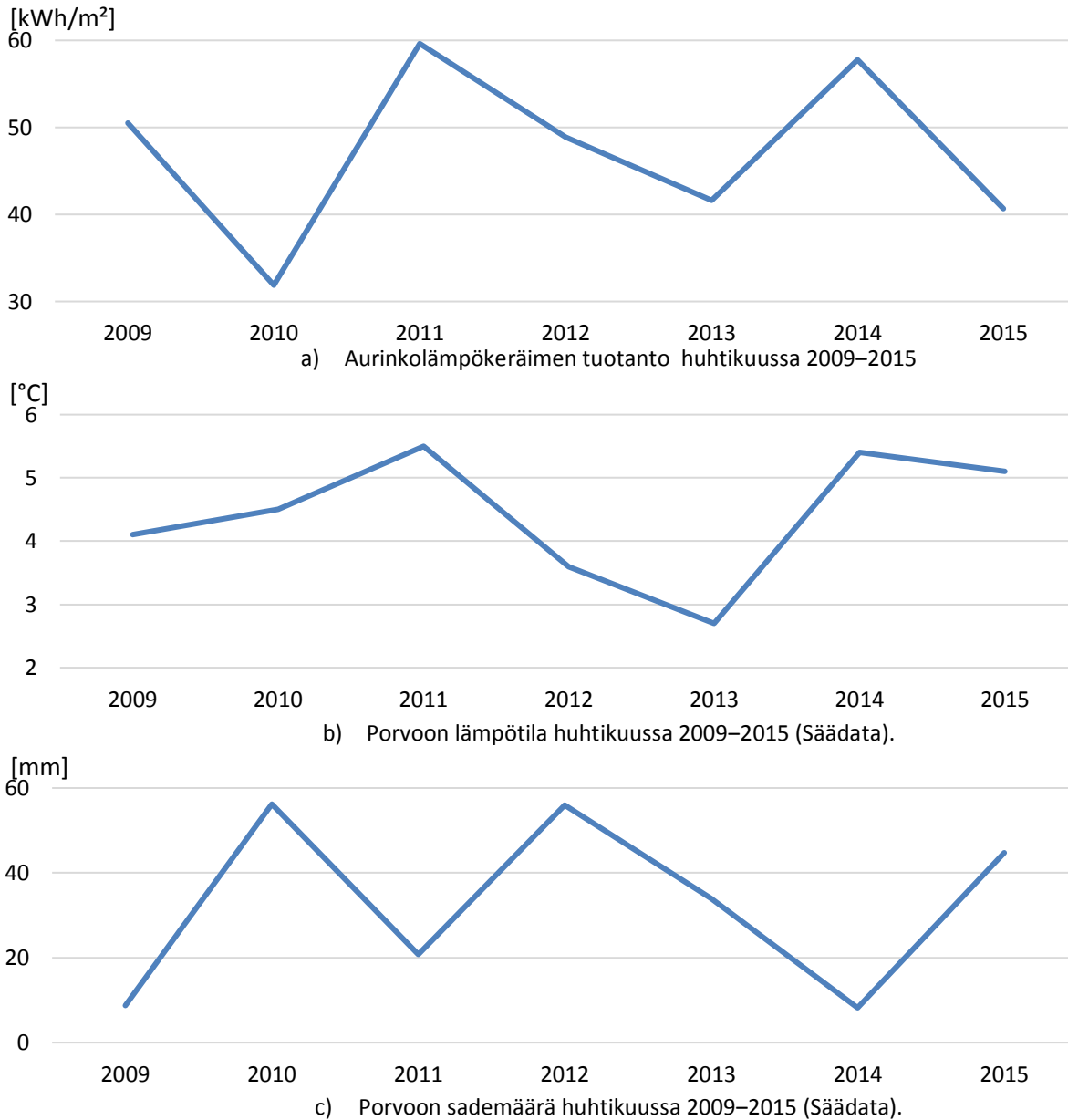
b) Porvoon lämpötila 2009–2015 (Säädata)



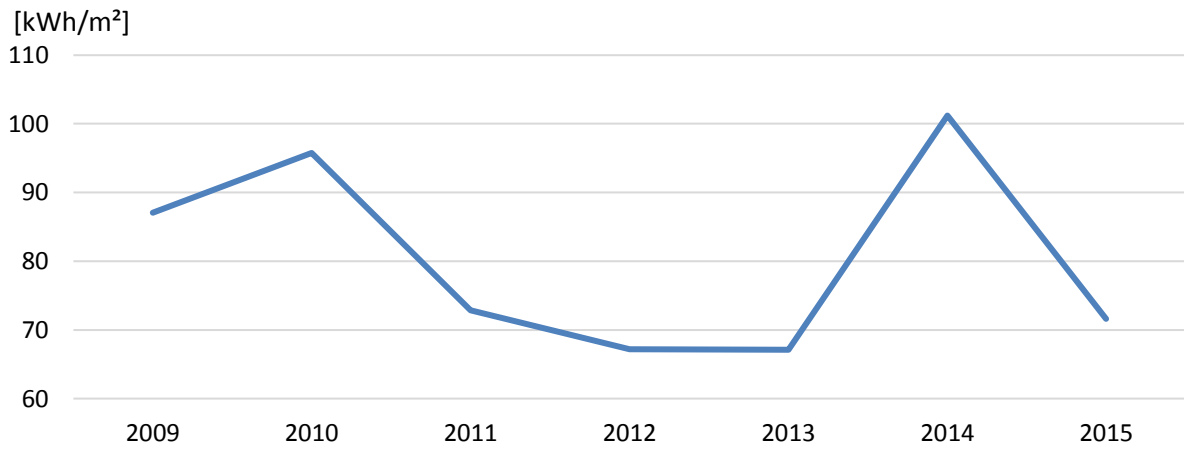
c) Porvoon sademäärä 2009–2015 (Säädata)

Kuva 4.7 Tilastotietoa tuotannosta, lämpötilasta ja sademäärästä. a) tuotettu energia b) Porvoon lämpötila c) Porvoon sademäärä.

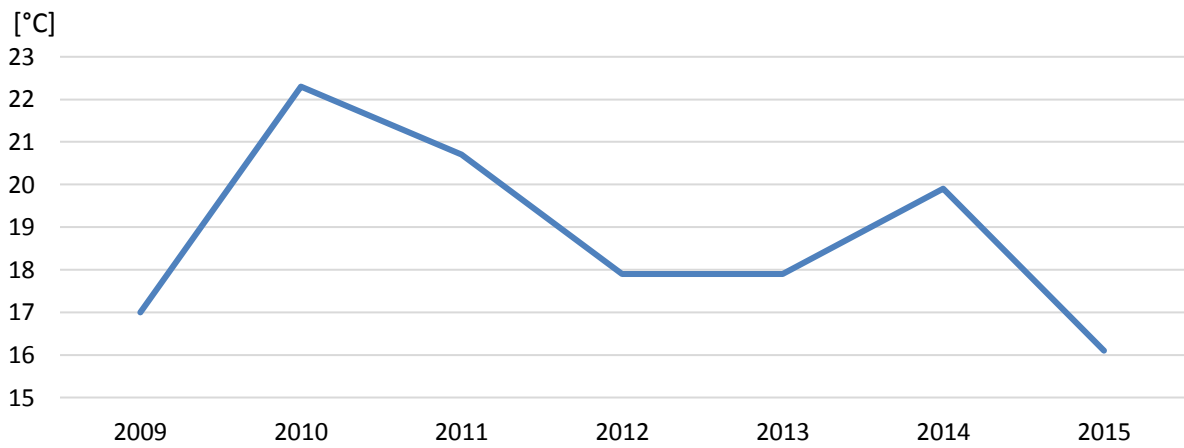
Kuvissa 4.8, 4.9 ja 4.10 on esitetty eri kuukausien tuotanto, lämpötila ja sademäärä. Vuositasolla oli jossain määrin nähtävissä lämpötilan ja sateen suhde tuotettuun energiaan. Kuukausitasolla suhde tuotannon ja sään välillä on ehkä vielä selvemmin nähtävissä, erityisesti heinäkuun osalta kuvassa 4.9. Heinäkuun ja huhtikuun parhaat tuotannot ovat vuosina jolloin on satanut vähiten. Syyskuussa ei yhtä selviä huippuja ole nähtävissä, mutta parhaiten tuottaneet vuodet asettuivat vähäsateisille vuosille.



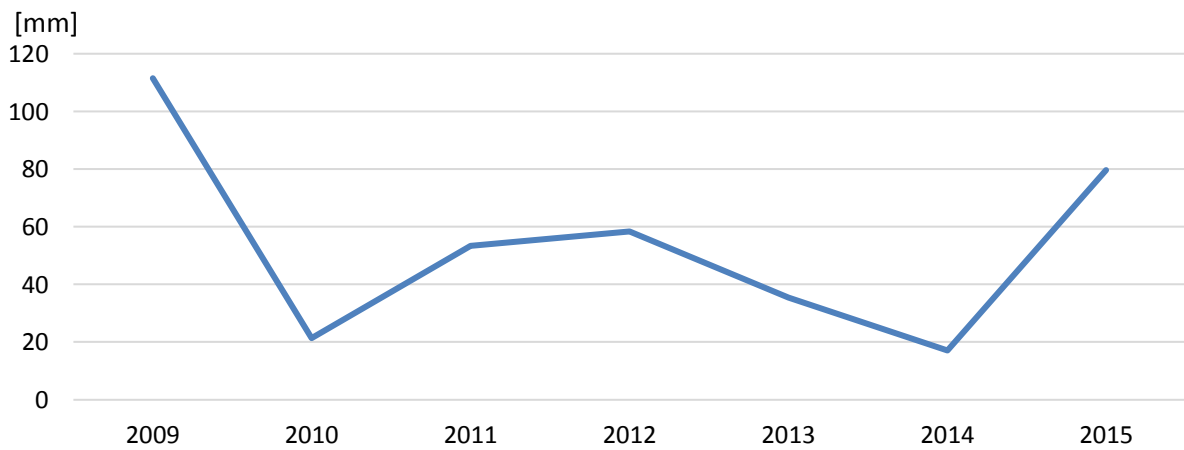
Kuva 4.8 Tilastotietoa aurinkolämpökeräimen tuotannosta sekä Porvoon lämpötilasta ja sademäärästä huhtikuussa 2009–2015, a) tuotanto b) lämpötila c) sademäärä.



a) Aurinkolämpökeräimen tuotanto heinäkuussa 2009–2015

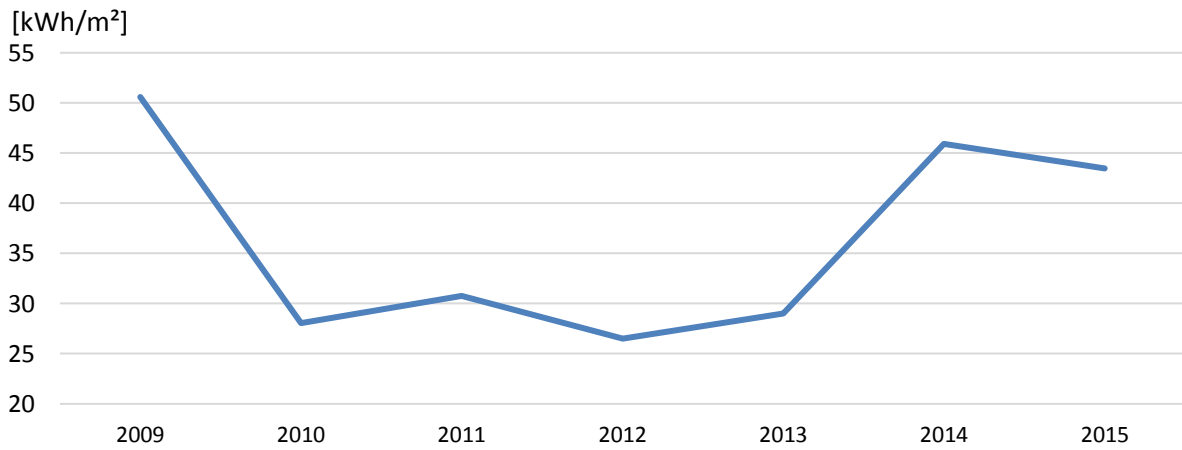


b) Porvoon lämpötila heinäkuussa 2009–2015 (Säädata).



c) Porvoon sademäärä heinäkuussa 2009–2015 (Säädata).

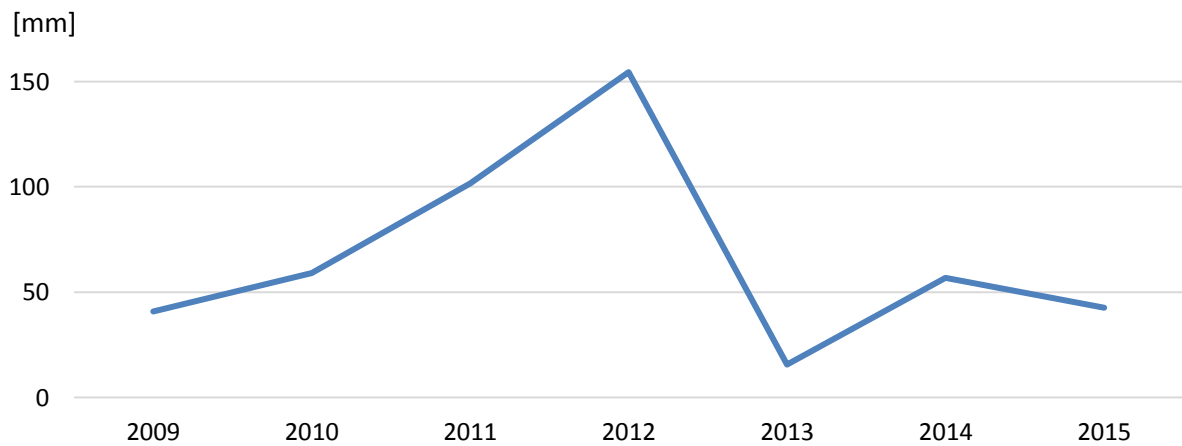
Kuva 4.9 Tilastotietoa aurinkolämpökeräimen tuotannosta sekä Porvoon lämpötilasta ja sademäärästä heinäkuussa 2009–2015, a) tuotanto b) lämpötila c) sademäärä.



a) Aurinkolämpökeräimen tuotanto syyskuussa 2009–2015.



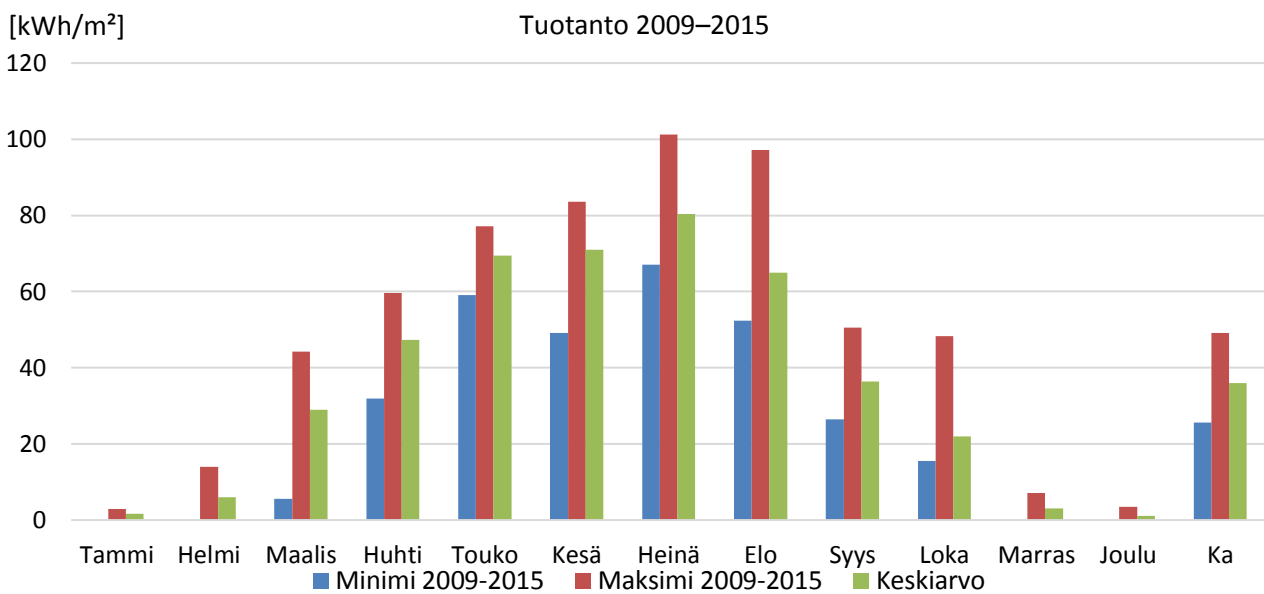
b) Porvoon lämpötila syyskuussa 2009–2015 (Säädata).



c) Porvoon sademäärä syyskuussa 2009–2015 (Säädata).

Kuva 4.10 Tilastotietoa aurinkolämpökeräimen tuotannosta sekä Porvoon lämpötilasta ja sademäärästä syyskuussa 2009-2015, a) tuotanto b) lämpötila c) sademäärä.

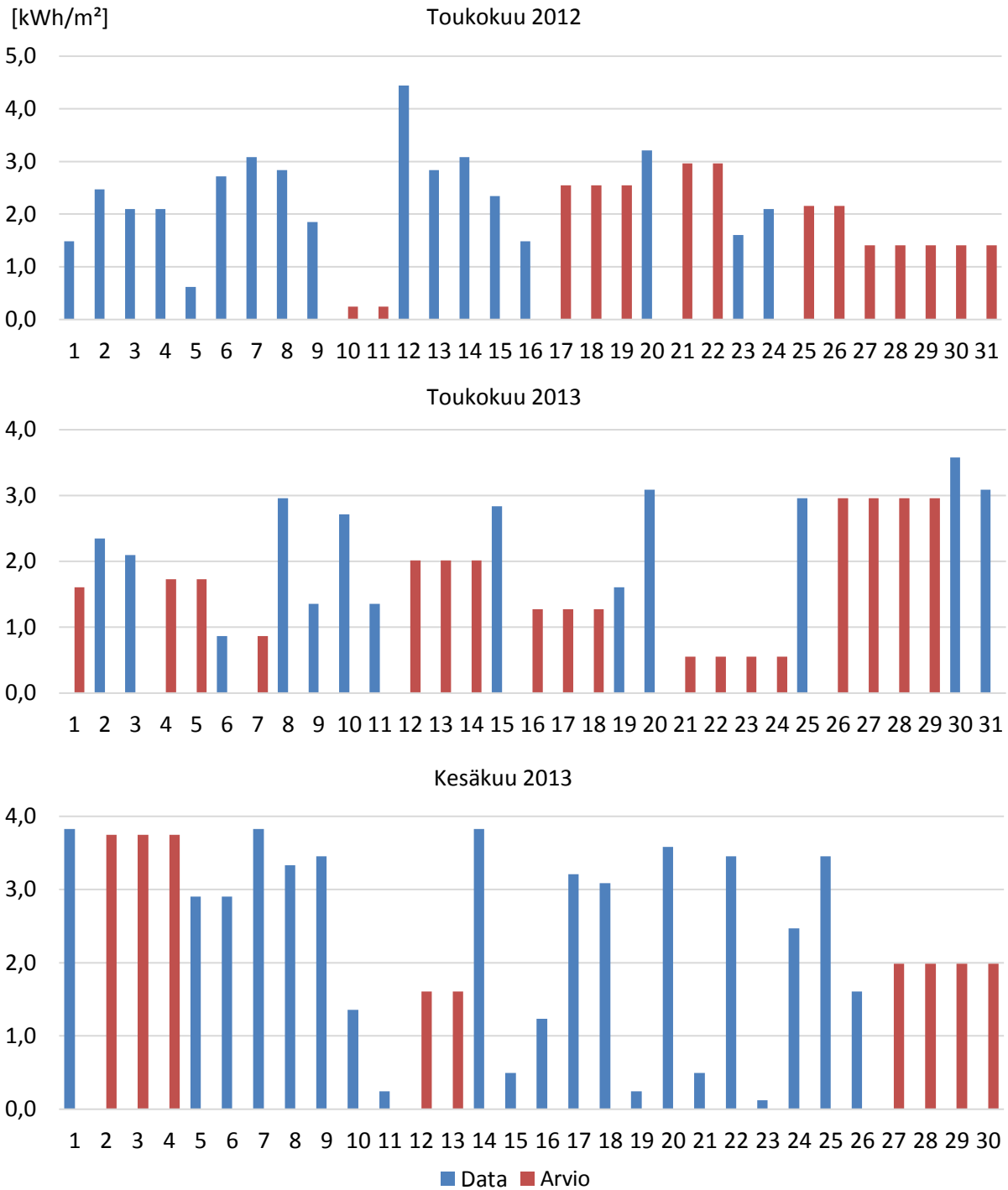
Kuvassa 4.11 on vuosien 2009–2015 minimi, maksimi sekä keskimääräinen tuotanto kuukausittain. Tuotannon vaihtelu on pienintä toukokuussa ja suurinta lokakuussa. Mikäli kaikki parhaiten ja huonoiten tuottaneet kuukaudet olisivat samana vuonna, tuottaisi paras vuosi 92 % enemmän kuin huonoiten tuottanut vuosi. Tarkastelujakson paras vuosi tuotti kuitenkin vain 25 % enemmän kuin huonoin vuosi. Täten alkuvuoden huono tuotanto yleensä korvaantuu loppuvuoden paremmalla tuotannolla ja päinvastoin. Maalis–lokakuun maksimituoton suurin poikkeama keskiarvosta oli lokakuussa 2015, joka tuotti 120 % enemmän kuin keskiarvo. Minimituoton suurin poikkeama oli maaliskuussa 2015, joka tuotti 81 % keskiarvoa vähemmän. Keskimäärin maalis–lokakuun kuukausikohtainen maksimituotanto oli 43 % enemmän kuin keskiarvotuotanto.



Kuva 4.11 Vuosien 2009–2015 kuukausien minimi, maksimi ja keskiarvo tuotanto.

### 4.1.3 Päivätuotanto

Kuvassa 4.12 on esitetty päivätuotantoja toukokuulta 2012 ja 2013 sekä kesäkuulta 2013. Kuukaudet valittiin tarkasteluun, koska ne sisälsivät eniten päiväkohtaisia lukemia. Mikäli päiväkohtaista lukemaa ei ollut saatavilla, oletettiin tuotannon jakaantuneen tasaisesti aikavälille. Tuotantolukemia ei myöskään ole kirjattu joka päivä samaan aikaan, jolloin päivän tuotantolukema voi olla kertynyt eri pituisilta aikajaksoilta. Esimerkiksi 12.5.2012 muita korkeampi lukema johtuu siitä, että seuraavan päivän lukema on kirjattu vasta kello 21. Tuotantolukeman kirjauksen kellonaikoja oli kirjattu vaihtelevasti, jolloin niistä ei pystynyt laskemaan tarkkoja päiväkohtaisia tuotantolukemia. Toukokuun päiväkohtainen maksimituotanto vuosina 2012–2013 oli noin  $3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$  ja kesäkuun päiväkohtainen maksimituotantoa vuonna 2013 oli noin  $3,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ .



Kuva 4.12 Päiväkohtaiset tuotantolukemat toukokuulta 2012 ja 2013 sekä kesäkuulta 2013.

## 5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli analysoida aurinkolämpökeräimen tuotantoa pitkältä aikaväliltä ja verrata sitä aurinkosähköpaneelin tuotantoon. Analyysin pohjalta saatiin hyvä kuva siitä, kuinka vuosituotanto, kuukausituotanto sekä päivätuotanto käyttäytyvät. Vuosituotantoa voidaan pitää tasaisena, vaikka eri vuosien saman kuukauden tuotanto voi vaihdella huomattavasti. Aurinkolämpökeräimen tuotannon suhde lämpötilaan ja sateeseen oli ajoittain yllättävänkin selvä. Aurinkolämmön ja aurinkosähkön tarkka vertailu vaatisi useamman aurinkolämpövoimalan tuotantolukemia.

Ihmisten ekologisella ajattelulla näyttäisin olevan vielä minimaalinen vaikutus aurinkoenergian kasvulle. Hinnanlaskun myötä aurinkosähkö pystyy jo kilpailemaan perinteisesti tuotetun energian kanssa osassa päin maailmaa ja täten varmistamaan asemaansa tulevaisuuden energiantuotannossa.

## LÄHTEET

- (Callidus) Callidus. Aurinkolämmön yleisesite. [verkkodokumentti]. viitattu [20.12.2016]. Saatavilla: [http://callidus.fi/sites/default/files/aurinkolampo\\_yleisesite2012.pdf](http://callidus.fi/sites/default/files/aurinkolampo_yleisesite2012.pdf)
- (Fraunhofer) Fraunhofer, 2017. Recent facts about photovoltaics in Germany. [verkkodokumentti]. viitattu [15.3.2017]. Saatavilla: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>
- (Haukkala) Haukkala T., 2015. Solar energy and Finland – do they match? Pv-magazine. [verkkodokumentti]. viitattu [2015].
- (Huostila 2015) Huostila A., 2015. Aurinkosähköntuottaminen pohjoismaissa ja muualla. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015090711451>
- (Montonen 2011) Montonen J., 2011. Aurinkosähkötekniikan tilannekatsaus. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201107261930>
- (NREL 2016) National renewable energy laboratory. Dirk C. Jordan, Sarah R. Kurtz. Photovoltaic degradation rates – an analytic review. [verkkodokumentti]. viitattu [10.1.2017]. saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/230551090\\_Photovoltaic\\_Degradation\\_Rates-an\\_Analytical\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/230551090_Photovoltaic_Degradation_Rates-an_Analytical_Review)
- (PurSolar) PurSolar. Getting the best solar panel efficiency and factors that affect it. [verkkodokumentti]. viitattu [12.12.2016]. Saatavilla: <http://www.pursolaraz.com/learn-about-solar/what-affects-solar-panel-efficiency-2/>
- (PVGIS © European Union, 2001-2012)
- Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, 1295–1305. Huld T., Müller R., Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar Energy, 86, 1803-1815. [verkkodokumentti]. viitattu [11.10.2016]. Saatavilla: <http://re.irc.ec.europa.eu/pvgis/>.

- (Solar cell central) Solar cell central, 2017. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.9.2016]. Saatavilla: [http://solarcellcentral.com/cost\\_page.html](http://solarcellcentral.com/cost_page.html)
- (SolarPower Europe 2016) SolarPower Europe, 2016. Global market outlook 2016–2020. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.9.2016]. Saatavilla: <http://www.solarpowereurope.org/insights/global-market-outlook/>
- (Sunny Portal) SMA. Publicly available PV systems. [Sunny Portal -verkkosivusto]. Saatavilla: <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPagesPlantList.aspx>
- (Säädata) <http://suja.kapsi.fi/asema-taulukko.php?asema=101028>
- (Takala 2011) Takala A., 2011. Aurinkolämmitys. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201209208126>

## LIITTEET

Taulukko liite 1 Aurinkolämpökeräimen tuotanto vuosilta 2006–2015.

Tuotanto [kWh]										
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Tammi	27	5	25	3	24	19	15	21	9	0
Helmi	85	47	109	41	47	113	42	70	26	0
Maalis	351	429	268	197	263	278	244	358	257	46
Huhti	524	619	617	409	258	483	396	337	468	329
Touko	752	789	982	624	625	604	533	492	479	578
Kesä	786	921	699	606	659	677	483	579	398	626
Heinä	838	670	764	705	776	590	544	544	820	580
Elo	545	809	626	611	451	464	424	451	499	788
Syys	293	376	295	410	227	249	215	235	372	352
Loka	196	167	430	182	134	138	125	135	137	392
Marras	39	37	36	20	10	10	35	43	0	58
Joulu	10	6	1	2	5	25	1	0	0	28
Summa	4445	4875	4852	3809	3479	3650	3057	3265	3465	3776