

Aki Eronen

Aurinkosähköjärjestelmä kerrostalossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

5.5.2016

Tekijä(t) Otsikko	Aki Eronen Aurinkosähköjärjestelmä kerrostalossa
Sivumäärä Aika	29 sivua + 2 liitettä 5.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Osmo Massinen
<p>Suomen aurinkoenergian potentiaali on lähes sama kuin Pohjois-Saksassa, mutta auringon energian hyödyntäminen on edelleen vähäistä. Aurinkopaneelit ovat läpimurron kynnyksellä, ja tämän työn on tarkoitus jatkaa läpimurtoa. Tämän insinööriyön tarkoituksena on antaa mahdollisimman selkeä käsitys aurinkoenergian hyödyistä ja mahdollisuuksista tulevaisuuden energianlähteenä.</p> <p>Työssä käsitellään aurinkoenergiaan liittyviä osa-alueita, kuten mistä energia tulee ja miten sitä voidaan hyödyntää valosähköisellä ilmiöllä. Työ sisältää aurinkosähköjärjestelmän teoriaa niin aurinkokennojen valmistuksesta kuin aurinkopaneelien rakenteesta ja sähköntuotosta. Tämän jälkeen käydään läpi järjestelmän suunnittelemista, jossa pääpaino on aurinkopaneelien mitoituksella, suuntauksella ja sijoittamisella.</p> <p>Työssä tehtiin myös esimerkkisuunnitelma Savonlinnassa sijaitsevalle kerrostaloyhtiölle, jossa tutkittiin aurinkosähköjärjestelmän asentamista kerrostalon katolle. Työn aikana selvitettiin, onko järjestelmän hankkiminen kannattavaa taloudellisesti ja kuinka suuri järjestelmä olisi optimaalinen.</p> <p>Aurinkosähköjärjestelmä on taloudellisesti kannattava hankinta, jos suurin osa energiasta tulee omaan käyttöön. Aurinkopaneelien hinnan laskiessa ja sähkön hinnan noustessa muuttuu tuotannon myyminenkin kannattavaksi.</p>	
Avainsanat	aurinkoenergia, aurinkopaneeli, uusiutuva energia

Author(s) Title	Aki Eronen Photovoltaic System in multi-story building
Number of Pages Date	29 pages + 2 appendices 5 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor(s)	Osmo Massinen, Senior Lecture
<p>Solar energy potential in Finland is similar to northern Germany, but the utilization of solar energy is still low. Solar panels are making a breakthrough and the purpose of this study is to continue that breakthrough and to provide a clear understanding of the benefits and the potential of solar energy as a future energy source.</p> <p>This work explains some of the aspects of solar energy, such as where it comes from and how it can be used with photoelectric effect. The project includes theory of solar power systems and also of the manufacturing process of solar cells. In the work, the theory of designing a solar power system is also explained but with an emphasis on solar panel orientation, location and sizing.</p> <p>This work also includes an example design of solar power system in a multi-story building in Savonlinna city. Also the economy of the system and the optimal sizing of the system were considered.</p> <p>Solar power system is economically viable solution if most of the produced energy will be in own use. The falling costs of solar panels and rising electricity prices makes selling solar energy to network profitable.</p>	
Keywords	solar energy, solar panel, renewable energy

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Aurinko energianlähteenä	2
2.1	Auringon säteily	2
2.2	Auringonsäteily Suomessa	3
3	Aurinkokennojen toimintaperiaate	5
3.1	Aurinkokennot	5
3.2	Piikiekkojen valmistaminen	8
3.3	Yksikiteinen aurinkokenno	8
3.4	Monikiteinen aurinkokenno	9
3.5	Ohutkalvo aurinkokenno	10
3.6	Orgaaniset aurinkokennot	11
4	Aurinkopaneelit	11
4.1	Rakenne ja modulaarisuus	11
4.2	Säteilyn ja lämpötilan vaikutus huipputehoon	13
4.3	Sähköntuoton arviointi	15
5	Järjestelmän suunnitteleminen	16
5.1	Mitoitus	16
5.2	Sijoittaminen ja suuntaus	17
5.3	Vaihtosuuntaaja	20
5.4	Toimenpidelupa ja energiatuki	21
6	Esimerkkisuunnitelma	21
6.1	Energiankulutus kiinteistössä	21
6.2	Aurinkopaneelien määrä	23
6.3	Invertterin valinta	23
6.4	Aurinkopaneelien sijoittaminen	24
6.5	Kaapelointi, maadoitus ja johdonsuojakatkaisin	25
6.6	Takaisinmaksuaika	26
7	Järjestelmän liittäminen sähköverkkoon	28

7.1	Turvakytkin	28
7.2	Kaapelointi sähköpääkeskukselle	28
8	Yhteenveto	30
	Lähteet	32
	Liitteet	
	Liite 1: Takaisinmaksuaika ilman energiatukea	
	Liite 2: Takaisinmaksuaika energiatuen kanssa	

1 Johdanto

Ihmiskunnan energiankulutus kasvaa jatkuvasti väestönmäärän ja kehittyvien maiden tekniikan kehittyessä. Tällä hetkellä maapalloa saastutetaan jatkuvasti fossiileilla polttoaineilla, vaikka puhtaampikin tapa tuottaa energiaa löytyy. Aurinko on lähes ehtymätön luonnonvara, josta muodostuu kaikki ihmiskunnan käyttämä energia, ydinenergiaa lukuun ottamatta. Tuuli, öljy ja kivihiili ovat kaikki auringon tuottamia.

Suomessa aurinkoenergiaa on tutkittu jo paljon, mutta järjestelmiä on asennettu varsin vähän verrattuna muihin kehittyneisiin maihin. Potentiaalia aurinkoenergian käyttöön on enemmän kuin mitä annetaan ymmärtää, ja se on myös halvempaa kuin yleisesti uskotaan. Tekniikan kehittyessä ja paneelien halventuessa aurinkoenergiasta tulee tärkein energianlähde ihmiskunnalle.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi, mitä on aurinkoenergia ja miten sitä voidaan hyödyntää käyttämällä aurinkokennoja. Työssä tarkastellaan, miten aurinkokennot valmistetaan ja esitellään eri kennotekniikoita. Myös aurinkopaneeleita tarkastellaan ja esitellään, kuinka ne muodostuvat.

Työn pääasiallisena tarkoituksena on tehdä laskelmat aurinkosähköjärjestelmän kannattavuudesta Asunto Oy Savontie 1:lle. Opinnäytetyössä tehdään kiinteistölle aurinkosähköjärjestelmän mitoittaminen, jossa etsitään optimaalinen järjestelmä käyttäen sähkönkulutustietoja. Tarkastelun alla on myös paneelien järkevä sijoittaminen talon katolle.

2 Aurinko energianlähteenä

Aurinko on jättimäinen kaasupallo, joka muodostuu suurimmaksi osaksi vedystä ja heliumista. Aurinko lämmittää ja tämä johtuu sähkömagneettisesta säteilystä, joka vapautuu fuusioreaktiossa. Auringon säteilyenergian määrä on massiivinen ja sen kokonaisteho onkin $3,8 \times 10^{23}$ kilowattia, josta maahan asti päätyy $1,7 \times 10^{14}$ kilowattia. Mainittakoon, että kyseinen määrä on noin 10 000 kertaa suurempi kuin koko maailman vuotuinen energiankäyttö vuonna 2013. [1; 2; 3, s. 10.]

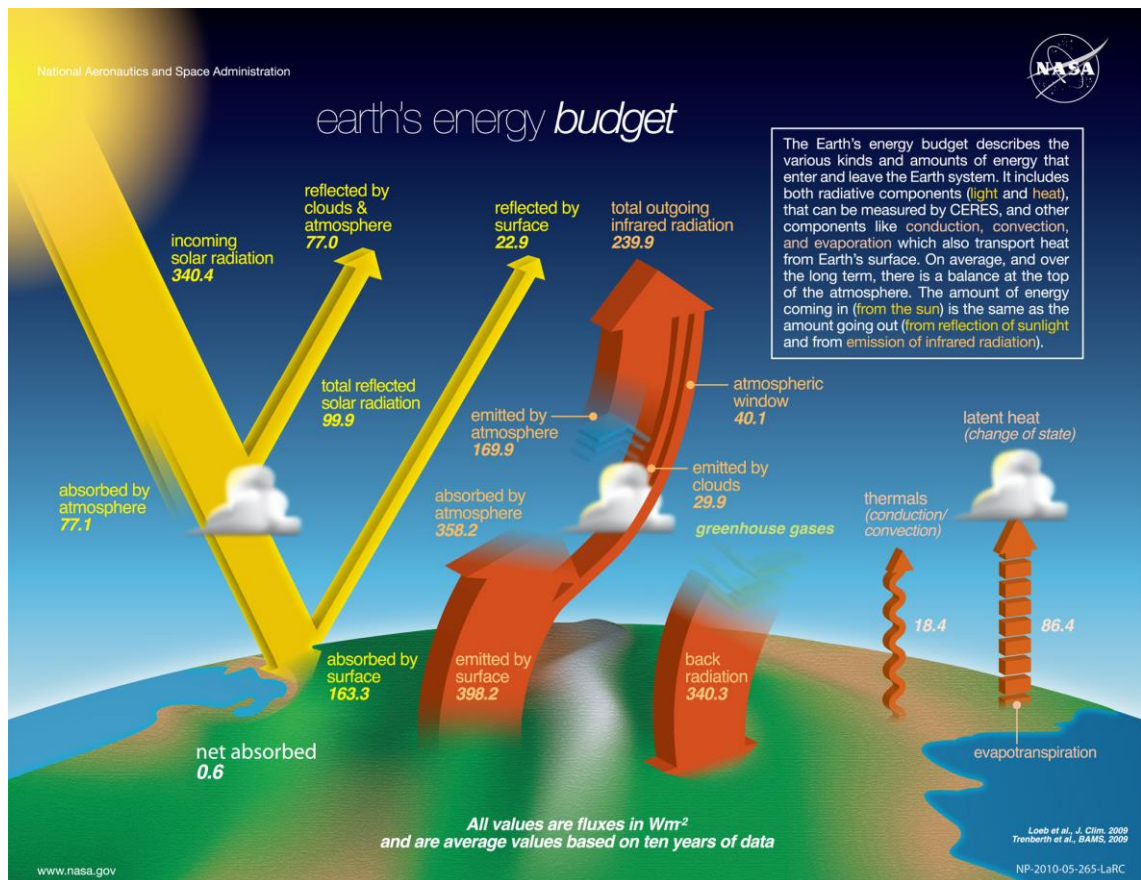
Fissio, johon nykyiset ydinvoimalat perustuvat, on ilmiö jossa raskaan atomin ydin hajoaa kahdeksi tai useammaksi ytimeksi ja vapauttaa energiaa. Energian määrä, joka vapautuu, vastaa ytimien välistä massavajetta. Energian määrä, jota yhdestä kilosta uraania saadaan, vastaa 2500 tonnia kivihiltä, joka energiana on noin 19 miljoonaa kilowattituntia. [4.]

Fuusio, joka tapahtuu auringossa, on päinvastainen reaktio kuin fissio, jossa kaksi vetyatomia ydintä, kaksi protonia ja kaksi neutronia yhtyy heliumatomiksi ja vapauttaa suuren määrän energiaa. Energia, joka fuusiossa vapautuu, on noin kymmenkertainen verrattuna fissioon. [3, s. 10.]

2.1 Auringon säteily

Auringossa tapahtuvan reaktion takia maahan kohdistuu säteily, jonka suuruus on 1,35-1,39 kilowattia per neliometri. Se on nimeltään myös aurinkovakio. Ilmakehän takia kaikki energia ei tule maanpinnalle, vaan osa siitä imeytyy ilmakehään ja osa heijastuu ilmakehästä, jolloin jäljelle jää noin yksi kilowattitunti kuvan 1 mukaisesti. [5, s. 488.]

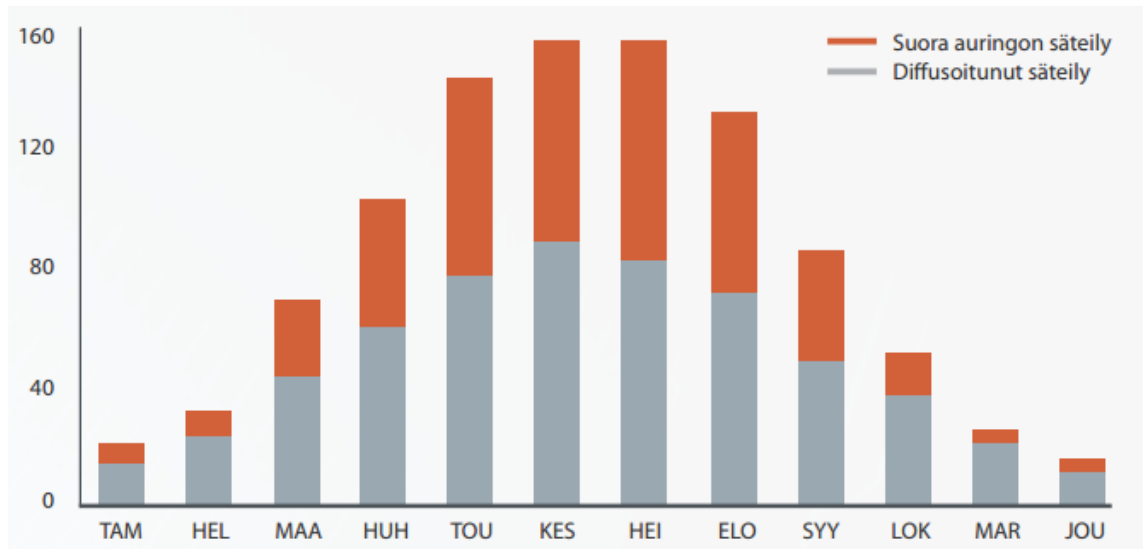
Auringonsäteilyn voi jakaa kolmeen osaan: suoraan auringonsäteilyyn, hajasäteilyyn ja vastasäteilyyn. Suora auringonsäteily on ilmakehän läpi tullutta säteilyä, kun taas hajasäteily on ilmakehän molekyylien ja pilvien heijastamaa säteilyä sekä maasta heijastunutta säteilyä. Vastasäteily johtuu ilmakehän vesihöyrystä, hiilidioksidista ja otsonista, joka säteilee lämpöä takaisin maanpinnalle. [3, s.12.]



Kuva 1. Auringon säteilyn imeytyminen ja heijastuminen [6.]

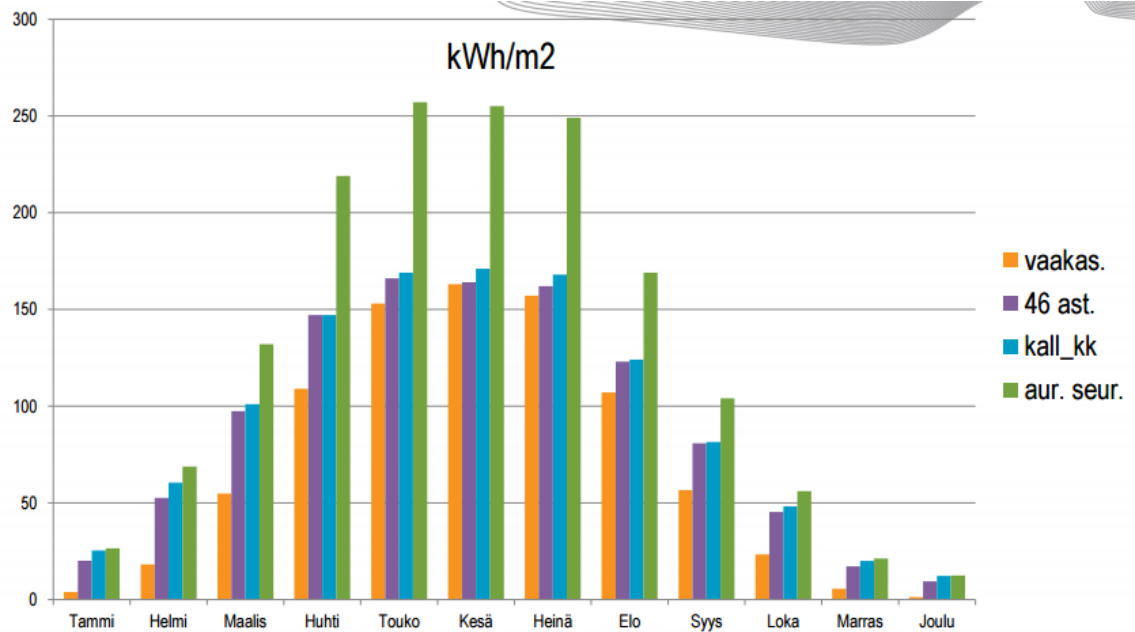
2.2 Auringonsäteily Suomessa

Merkittävä osuus kokonaissäteilystä Suomessa on hajasäteilyä, Etelä-Suomessa jopa puolet vuoden säteilystä. Suuri hajasäteily aiheuttaa sen, että aurinkoa seuraavat ja keskittävät aurinkosähköjärjestelmät eivät ole taloudellisesti järkeviä, sillä ne perustuvat suoran säteilyn hyödyntämiseen. Kuva 2 selventää, kuinka Pohjoismaissa jopa 60 % on hajasäteilyä.



Kuva 2. Hajasäteily Pohjoismaissa [7.]

Vuotuinen kokonaissäteilyn määrä Etelä-Suomessa on samaa luokkaa Pohjois-Saksan kanssa. Suomessa vuodenaikojen takia säteily keskittyy eteläistä Eurooppaa enemmän kesäkuukausille, joten tuotanto vaihtelee enemmän. Ilmatieteen laitoksen testivuoden mukaan vuotuinen säteily määrä Helsingissä on noin 980 kWh/m² ja Sodankylässä vastaavasti noin 790 kWh/m². Kuva 3 havainnollistaa, kuinka säteily jakautuu Raahessa vuodenaikojen mukaan. [8.]



Kuva 3. Auringon kuukausittaiset säteilymäärät Raahessa [9.]

3 Aurinkokennojen toimintaperiaate

Puolijohdetekniikalla valmistetut aurinkokennot perustuvat valosähköiseen ilmiöön, joka on sähkömagneettisen säteilyn fotonien ja aineen elektronien välistä vuorovaikutusta. Puolijohdemateriaalit ovat normaalisti eristäviä, mutta muuttuvat sähköä johtavaksi, kun niihin osuu energiaa. Valosähköisessä ilmiössä aineen elektronit saavat niin paljon energiaa säteilystä, että ne irtautuvat atomiytimen vetovoimasta. [10.]

Ensimmäisen kerran ilmiön havaitsi ranskalainen Edmond Becquerel 1839. Hän huomasi kokeessaan, että elektrolyyttiin upotettujen elektrodien välinen jännite riippui valon määrästä. Asiaa ei tuohon aikaan oikein ymmärretty, ja vasta 1905 Albert Einstein julkaisi teoriansa ”valosähköinen ilmiö” yhdessä suhteellisuusteorian kanssa. [11.]

3.1 Aurinkokennot

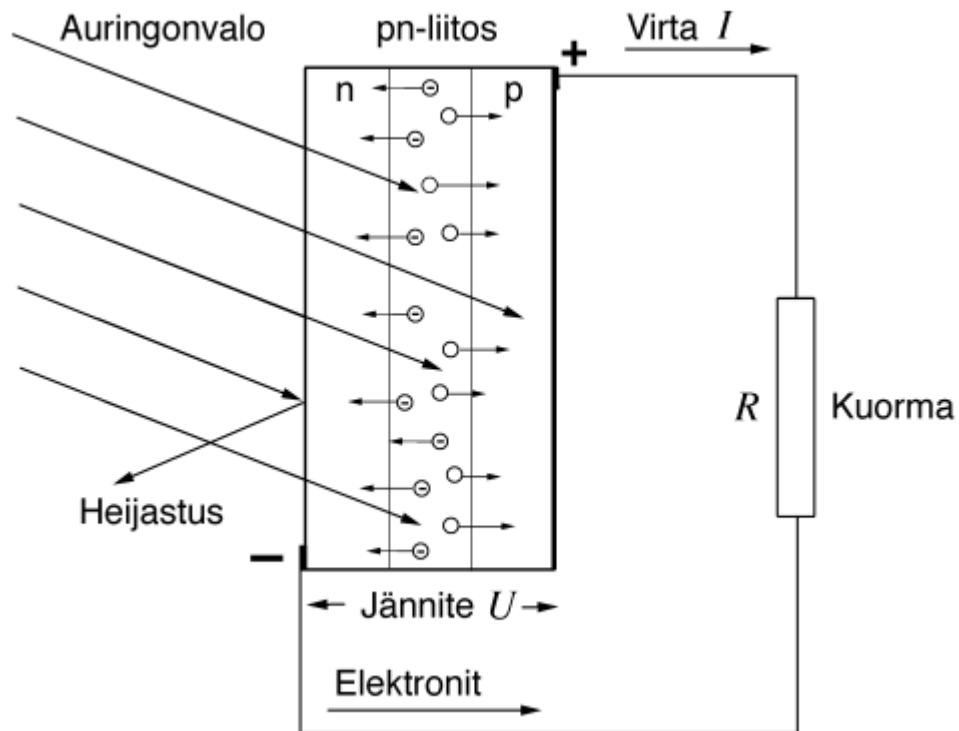
Aurinkokennojen materiaalina käytetään yleisimmin piitä, sen hyvän hyötysuhteen ja saatavuuden takia. Piin muokkaaminen vie kuitenkin paljon energiaa, jonka takia

tutkitaan myös monenlaisia muita vaihtoehtoja, kuten orgaanisista aineista valmistettavia kennoja.

Piipohjaisen aurinkokennon toiminta perustuu p- ja n-tyyppin puolijohdeiden liitokseen. Normaalisti puhdas pii on eriste, mutta sen johtavuutta kasvatetaan lisäämällä siihen atomeja. N-tyyppin puolijohde muodostetaan lisäämällä piihin arseenia tai fosforia. Näin saadaan muodostettua yksi ylimääräinen elektroni. Ylimääräinen elektroni muodostuu, koska piillä on neljä ulkoelektronia ja arseenilla ja fosforilla viisi. P-tyyppin puolijohde saadaan, kun piihin lisätään booria tai alumiinia. Nyt syntyy elektroniaukkoja, kun boorilla ja alumiinilla molemmilla on kolme ulkoelektronia. [12.]

Pn-liitoksen lähellä muodostuvista pareista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle (kuva 4, ks. seur. s.). N-puolelle syntyy positiivisesti varautunut alue, kun aukot siirtyvät p-puolelle ja jättävät jälkeensä positiivisesti varautuneita ioneja. Vastaavasti p-puolelle syntyy negatiivisesti varautunut alue, kun elektronit siirtyvät n-puolelle ja jättävät jälkeensä negatiivisesti varautuneita ioneja. Näin pn-liitokseen syntyy rajakerros, jonka sähkökenttä estää varauksia kulkemasta liitoksen yli.

Kun auringonvalon fotonit osuvat p- ja n-tyyppin puolijohdeiden liitokseen, osa fotonien energioista on niin suuria, että ne läpäisevät ohuen pintakerroksen ja muodostavat elektroni-aukkopareja. Sisäisen sähkökentän avulla nämä parit voidaan erottaa toisistaan ja tuottaa sähkövirtaa ulkoiseen kuormaan. [3, s.121.]

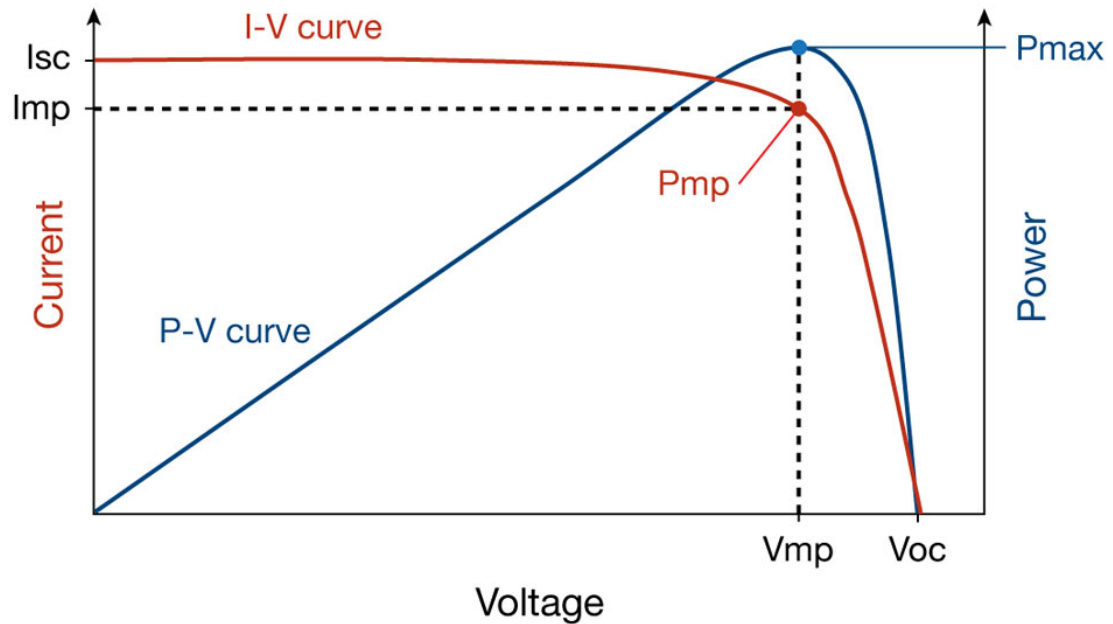


Kuva 4. Aurinkokennon toimintaperiaate [13.]

Aurinkokennon koko on yleensä 10 cm x 10 cm ja paksuus 0,1 – 0,4 mm. Yhden kennon jännite on noin 0,5 V tasajännitettä. Kennon tuottama teho riippuu sen pinta-alasta ja auringon säteilytehosta. Kennoja yhdistämällä rinnan ja sarjaan saadaan tuotettua haluttu jännite ja virta. Tällöin saadaan valmistettua aurinkopaneeli. [3, s. 121.]

Jotta saataisiin selville, millä jännitteen ja virran arvoilla kenno toimisi tehokkaimmin, käytetään apuna ominaiskäyrää tai IU-käyrää. Kuvasta 5 selviää erään aurinkokennon ominaiskäyrän, jota tutkimalla selviää kennon tuottama suurin jännite, tyhjäkäyntijännite (V_{oc}). Tyhjäkäyntijännite saavutetaan vain, jos virta on 0 A, eli sitä ei ole kytketty mihinkään. Suurin virta saadaan kennosta, jos kennon molemmat puolet kytketään yhteen ja oikosuljetaan se. Tätä kutsutaan nimellä oikosulkuvirta (I_{sc}).

Kumpikaan edelläolevista ei ole hyödyllisiä tehontuoton kannalta ja käyrää käyttämällä yleensä etsitäänkin maksimitehopiste (MPP). Maksimitehopiste on paikka käyrällä, jossa suurin virta ja suurin jännite kohtaavat ja saadaan paras mahdollinen ulostuloteho (P_{max}). [3, s.122.]



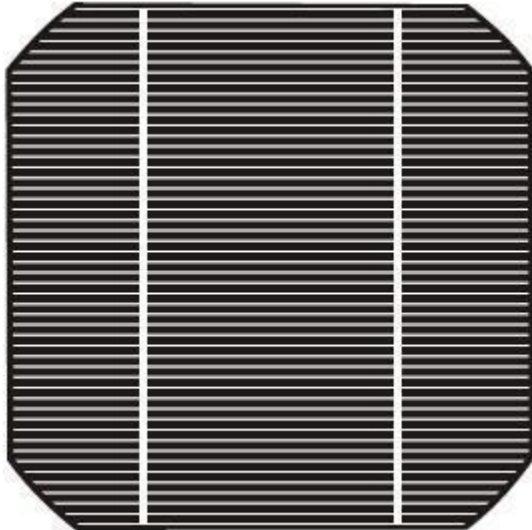
Kuva 5. IU-käyrä [14.]

3.2 Piikiekkojen valmistaminen

Pii on yksi alkuaineista, jota on maapallolla toiseksi eniten. Vain happea on enemmän. Pii on aine, jota on lähes aina hiekassa, kivissä ja kallioissa. Piiharkkoja, joista tehdään aurinkokennot, saadaan kun satoja kiloja kiveä tai hiekkaa laitetaan sulatusastiaan, johon lisätään vielä booria muuttaakseen piin polariteetin positiiviseksi. Kaikki sulatetaan noin $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteessa, josta jäljelle jää piiharkko. Piiharkosta leikataan paksuhkon paperin kokoisia piikiekkoja, jotka ovat paksuudeltaan noin $0,2\text{ mm}$. Kaikki syntyneet piikiekkot tarkastetaan ja käsitellään, jotta pinta ei heijastaisi niin paljon. [15.]

3.3 Yksikiteinen aurinkokenno

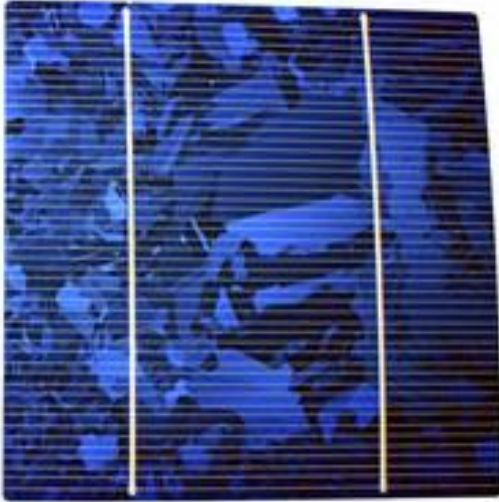
Yksikiteinen aurinkokenno valmistetaan suoraan piikiekosta, jossa atomit ovat tietyssä järjestyksessä. Valmistustapa on kallis, hidas ja vaatii paljon energiaa, mutta samalla hyötysuhde on korkeampi. Yksikiteinen aurinkokenno on yleensä väritykseltään musta ja kulmat on pyöristettyjä, piikennon pyöreiden takia (kuva 6). [3, s.124.]



Kuva 6. Yksikiteinen aurinkokenno [16.]

3.4 Monikiteinen aurinkokenno

Monikiteinen aurinkokenno valmistetaan yhdistämällä sulaa piitä sen kiinteään olomuotoon, eli valamalla. Valamisessa muodostuu hilavirheitä, jotka huonontavat hyötysuhdetta, jonka takia ei päästä yksikiteisen hyötysuhteisiin. Monikiteisen erityisominaisuus, matala lämpötilakerroin, tekee siitä useammin paremman vaihtoehdon kuin yksikiteinen. Monikiteisen aurinkokennon tunnistaa suorakulmaisesta muotoilusta ja sinertävästä väristä (kuva 7). [17.]



Kuva 7. Monikiteinen aurinkokenno [18.]

3.5 Ohutkalvo aurinkokenno

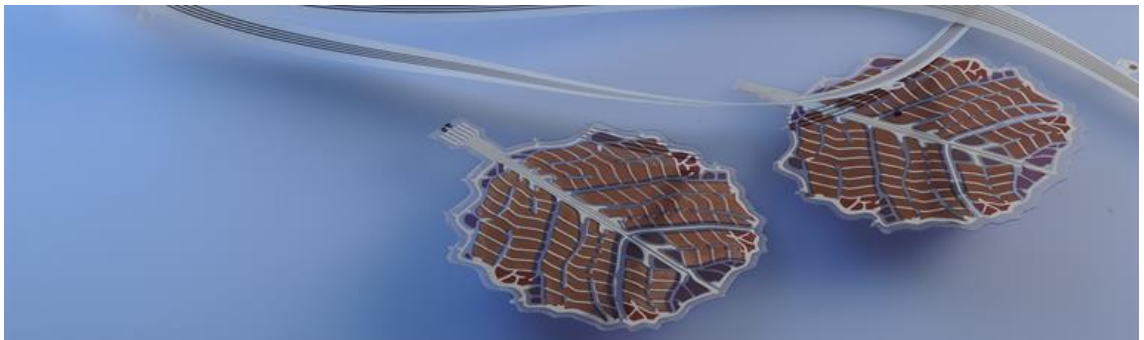
Ohutkalvokennot valmistetaan eri aineista ja eri tavalla kuin piipohjaiset kennot. Useimmissa ohutkalvoisissa kennoissa käytetään kuparia, indiumia ja seleeniä valmistusmateriaalina. Verrattuna yksi- ja monikiteisiin kennoihin, ohutkalvoiset kennot ovat kestävämpiä ja halvempia valmistaa. Hyötysuhde jää alhaisemmaksi kuin piipohjaisilla, mutta halvempi hinta ja parempi sähköntuotto aamulla ja illalla tasoittaa eroa. Niitä voidaan myös valmistaa, erimuotoisina ja taipuisina. (kuva 8). [19.]



Kuva 8. Ohutkalvopaneelia voi muotoilla [20.]

3.6 Orgaaniset aurinkokennot

Orgaaniset aurinkokennot ovat uusin saavutus aurinkoenergiatekniikassa ja niiden etuna voidaan pitää massavalmistusta ja luonnonmukaisuutta. Orgaaniset kennot ovat taipuisia ja kevyitä, mutta hyötysuhde on huomattavasti huonompi kuin muissa. Elinikä on vain muutamia vuosia, mutta ne voidaan kierrättää. [21.]



Kuva 9. Orgaanisia kennoja voidaan tulostaa melkein mihin tahansa muotoon [22.]

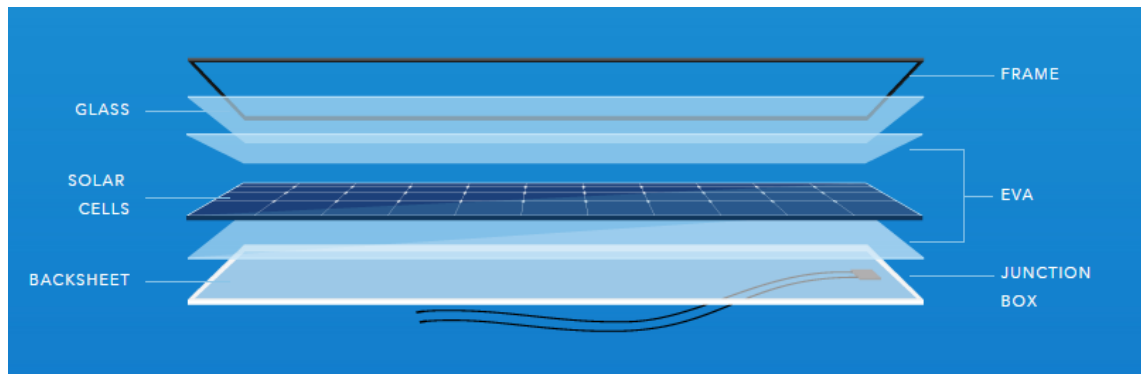
4 Aurinkopaneelit

4.1 Rakenne ja modulaarisuus

Yksi aurinkokenno ei pysty tuottamaan riittävää jännitettä, jotta nykyaikaiset laitteet toimisivat kunnolla, joten kennoja yhdistetäänkin toisiinsa sarjakytkenän avulla aurinkopaneeliksi. Sarjakytkenässä kennojen jännitteet summautuvat, ja saadaan korkeampi toimintajännite ilman, että virta kasvaa. Paneelissa on kennoja parillinen ja vaihteleva määrä riippuen tarvittavasta jännitteestä yleensä kuitenkin 36, 48, 60 tai 72 kappaletta.

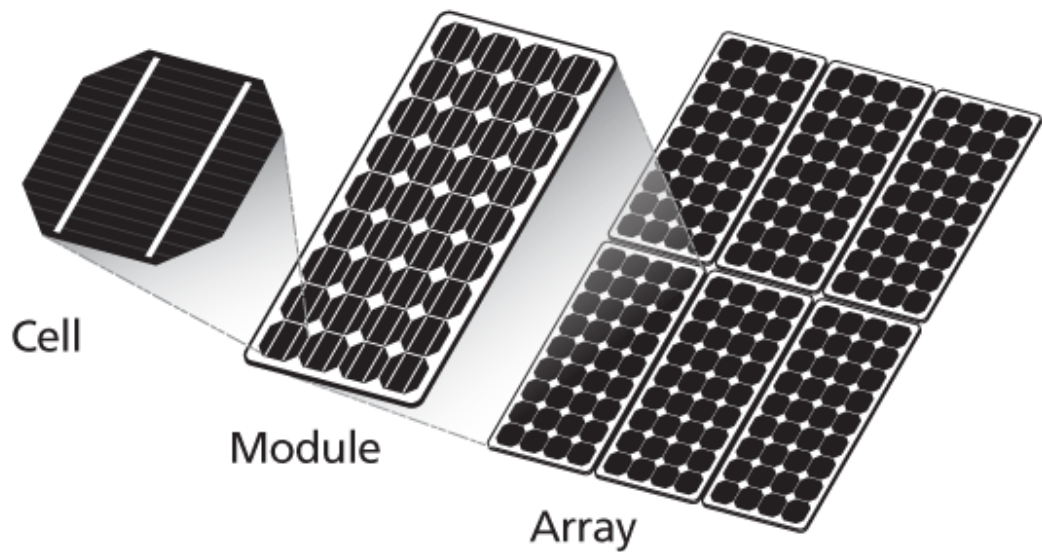
Aurinkopaneeli on muutakin kuin vain kennoja yhdessä. Jollakin tavalla ne pitää suojata ja liittää muihin laitteisiin (kuva 11). Aurinkokennot suojataan luonnolta ja oikosuilulta käyttämällä molemmin puolin kennoja etyleeni-vinyyli-asetatti, eli EVA-kerrosta. Kennojen etupuolelle tulee vähärautainen lasi ja vesitiivis alumiininen kehys. Takapuolta

suojaa polymeerinen suojakalvo, johon yleensä kiinnitetään vesitiivis kytkentäkotelo. [23.]



Kuva 11. Aurinkopaneelin rakenne [24.]

Aurinkoenergian yksi huomattava ominaisuus on niiden modulaarisuus. Aurinkokennoista pystytään muodostamaan aurinkopaneeli, joka tuottaa yksinkin jo riittävästi energiaa pieniin kohteisiin. Yleensä yhden paneelin nimellisteho on noin 250 wattia, joten mitään suuria laitteita sillä ei sähköistetä. Mikään ei estä yhdistämästä aurinkopaneeleita toisiinsa samalla tavalla kuin kennoja, joista paneeli on muodostettu (kuva 12). Yhdistämällä paneeleja rinnan ja sarjaan voidaan muodostaa aurinkopaneelisto, jolla saadaan jänniteitä ja tehoja, joita erilaisissa kohteissa vaaditaan. Suuremman jännitteen hyöty on se, kun saadaan siirrettyä energiaa pidemmälle pienemmillä jännitehäviöillä, jonka takia on kannattavaa miettiä tarkkaan, millaisia ovat kaapelien pituudet. [3, s.126-127.]

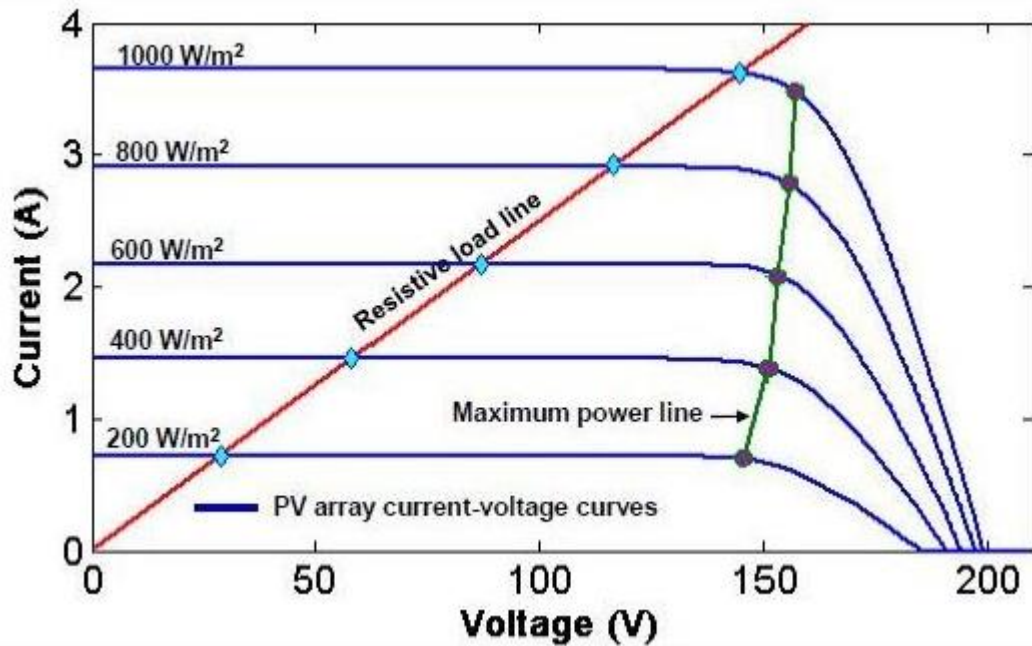


Kuva 12. Kenno, paneeli ja paneelisto [25.]

Paneelistoja on monenlaisia pienistä mökkiin sopivista järjestelmistä jättimäisiin verkkoon liitettäviin voimalaitoksiin. Hyvänä esimerkkinä mainittakoon maailman suuritehoisin aurinkovoimalaitos Solar Star Yhdysvalloissa. Kyseisessä laitoksessa on yhdistetty noin 1,7 miljoonaa aurinkopaneelia jättiläismäiseksi pelloksi, ja alueen pinta-ala on noin 13 neliökilometriä, joka on lähes yhtä suuri kuin Helsingin Vuosaari. [26.]

4.2 Säteilyn ja lämpötilan vaikutus huipputehoon

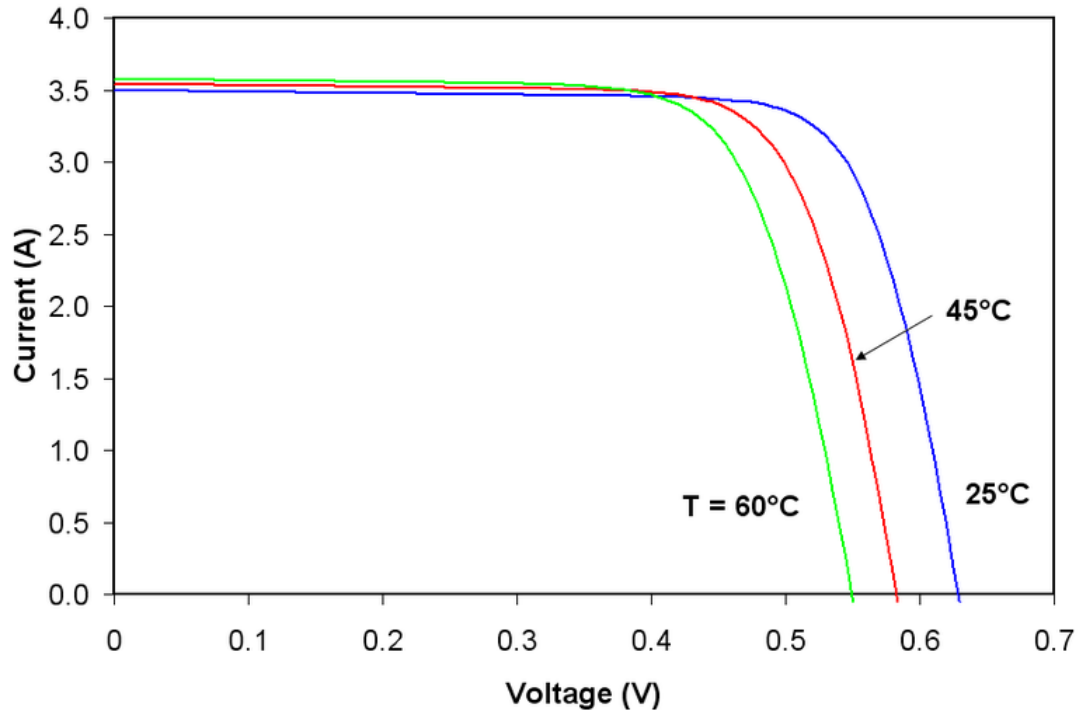
Aurinkopaneelillakin on kennojen tapaan ominaiskäyrä, joka ilmoittaa, millä virran ja jännitteen arvoilla paneeli toimii. Ominaiskäyrästä selviää kennon tavoin maksimitehopiste, tyhjäkäyntijännite ja oikosulkuvirta (kuva 13). Kaikille paneeleille on kirjattu huipputeho, joka mitataan standardiolosuhteissa. Standardiolosuhteet ovat määritelty ja ne ovat auringon säteilyn voimakkuus 1000 W/m^2 , paneelin lämpötila $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ ja viimeisenä auringon spektri on normitettu ilmassalle 1,5. Kyseinen arvo tarkoittaa, että aurinko on $41,81^\circ$ horisontin yläpuolella.



Kuva 13. Aurinkopaneelin ominaiskäyrän muutos [27.]

Kuvasta 13 näemme myös, kuinka auringon säteilyteho vaikuttaa aurinkopaneelin tehon tuottoon, ja se pieneneekin lähes lineaarisesti säteilytehon muutoksen mukana. Vaikka maksimitehopiste kertoo suurimman mahdollisen tehon, on sitä vaikea saavuttaa juuri valaistusolosuhteiden muutoksen takia. Myös paneelin kuumeneminen vaikuttaa negatiivisesti tehontuottoon ja vastaavasti kylmällä säällä paneelin tehontuotto kasvaa, kun paneelien lämpötila laskee. [3, s. 127.]

Standarditestissä lämpötila oli asetettu 25 °C asteeseen, ja poikkeamat tästä muuttavat tehontuottoa noin 0,5 % per aste. Ulkolämpötila ei kerro koko totuutta paneelin lämpötilasta. Aurinkoisena päivänä paneelin todellinen lämpötila saattaa olla 20 – 30 °C astetta ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Kuvassa 14 näkyy, kuinka lämpötila vaikuttaa kennon jännitteeseen. Jännite on noin 0,63 V, kun lämpötila on 25 °C astetta. Kennon lämpötila nousee 60 °C asteeseen ja jännite muuttuu pienemmäksi. Tässä kohtaa se on noin 0,55 V. Ero tuntuu vähäiseltä, vain 0,08 V, mutta prosentuaalinen muutos on kuitenkin noin 13 %. [3, s.128.]

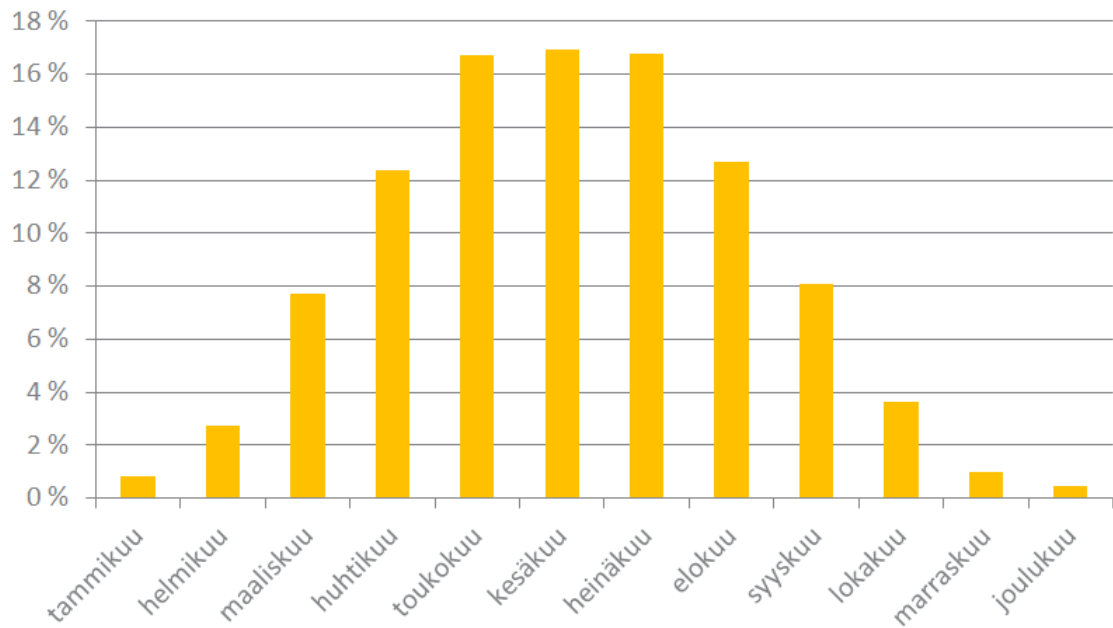


Kuva 14. Lämpötilan vaikutus jännitteeseen [28.]

4.3 Sähköntuoton arviointi

Aurinkopaneelien sähköntuottoa arvioitaessa pitää ottaa huomioon maantieteellinen sijainti ja ilmasto, koska säätilat ja vuodenajat vaikuttavat merkittävästi, miten hyvin paneelit tuottavat. Kuvasta 15 näkyy, kuinka auringonsäteily jakautuu Helsingissä suurimmaksi osaksi maaliskuusta syyskuuhun. Aurinkoisina kesäpäivinä paneeli tuottaa sähköä noin 6,5 kertaisesti oman nimellistehonsa (W_p) verran ja puolipilvisenä päivänä nelinkertaisesti. Syksyllä ja talvella tuotto on vähäistä tai tuottoa ei ole ollenkaan.

Aurinkopaneeleille voidaan antaa huipunkäyttöaika (t_h), josta selviää, kuinka monta tuntia vuodessa paneeli tuottaa energiaa nimellistehonsa ajan. Etelä-Suomessa huipunkäyttöaika on noin 800 tuntia, jolla saadaan karkea arvio vuoden tuotannosta. [29.]



Kuva 15. Aurinkoenergian jakautuminen Helsingissä [30.]

5 Järjestelmän suunnitteleminen

Aurinkopaneeleita yhdistelemällä saadaan muodostettua järjestelmiä, joiden suunnittelussa on huomioitava monta eri asiaa ennen kuin aurinkosähköjärjestelmä on käyttökelpoinen. Laadukkaassa suunnitelmassa on otettava huomioon niin aurinkopaneelien sijoituspaikat ja niiden varjostukset kuin optimaalinen mitoittaminen. Suunnitelmaa tehtäessä on otettava huomioon myös sähköturvallisuusmääräykset ja mahdolliset toimenpideluvat.

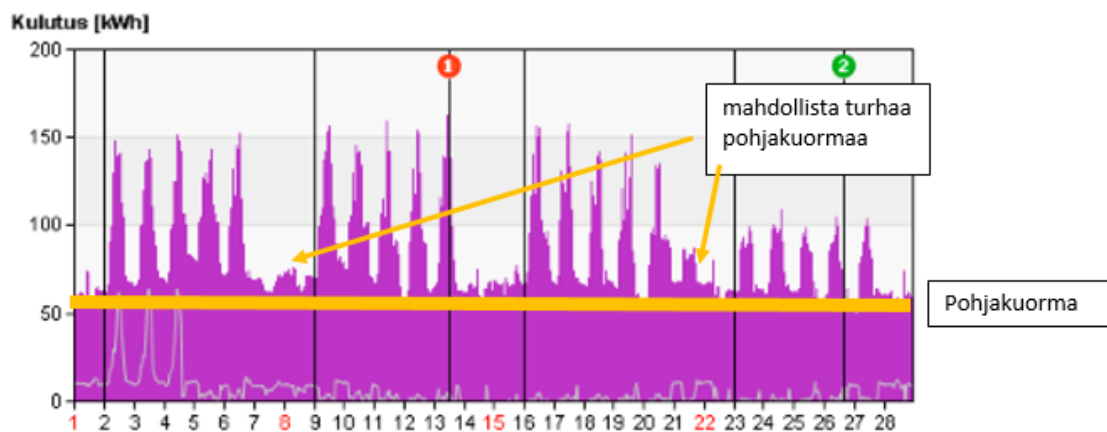
Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus koostuu muistakin osista kuin pelkistä paneeleista. Siihen kuuluu myös kaapeloinnit ja vaihtosuuntaajat, joiden oikea mitoitus on tärkeää. [31.]

5.1 Mitoitus

Jotta aurinkosähköjärjestelmä olisi taloudellisesti kannattava sijoitus, on aurinkopaneelien, vaihtosuuntaajien ja kaapelien mitoitukset tehtävä huolellisesti. Suurin

hyöty aurinkoenergiasta saadaan, kun kaikki tai suurin osa tulee käytettyä omana kulutuksena. Ylituotanto voidaan myydä sähköverkkoon markkinahintaan, mutta kannattavaa se ei ole. Markkinahintaan ei kuulu sähkövero eikä sähkönsiirtomaksut, joten omalla käytöllä saavutetaan nopeampi takaisinmaksuaika. [32.]

Jotta ylituotantoa ei syntyisi, on tiedettävä kiinteistön pohjakuorma. Pohjakuorma tarkoittaa kulutusta, joka löytyy kiinteistöstä, vaikka sitä ei käytettäisi. Kuorman selvittämiseen tarvitaan kulutustiedot, jotka saadaan yleensä sähköyhtiöltä. Tämä antaa suuntaa mistä aurinkopaneelien mitoittaminen kannattaa aloittaa, koska pohjakuorma ei yleensä muutu. Kuvassa 16 on esimerkki, jossa pohjakuorma on paksulla keltaisella viivalla esitetty. [33.]



Kuva 16. Pohjakuorma [34.]

5.2 Sijoittaminen ja suuntaus

Koko järjestelmän tehokkuuden kannalta tärkein asia on aurinkopaneelin oikea asennuspaikka. Energiantuottoon vaikuttavat hyvin vahvasti suuntaus, sijainti ja asennuskulma.

Aurinkopaneelin suuntauksella tarkoitetaan yksinkertaisesti sitä, mihin ilmansuuntaan paneeli osoittaa. Pääsääntöisesti paneelit kannattavat suunnata etelään suurimman tuoton takaamiseksi, jos mahdollista. Jos etelään ei ole mahdollista suunnata, myös kaakon ja lounaan suunnat tuottavat lähes yhtä paljon. Eroa on vain 7 % verrattuna

etelään suunnattuun paneeliin. Tärkeintä on, että paneeli sijoitetaan paikkaan, johon tulee eniten auringonvaloa. [35.]

Aurinkopaneelin optimaalinen asennuskulma on noin 40 astetta, jos suurinta tuottoa haetaan kesäajalle. Huonoon kulmaan asennetut paneelit tuottavat jopa 30 % vähemmän kuin oikeaan kulmaan asennetut. Alle 15 asteen kulmaa tulisi välttää, jotta lumi, pöly tai lika ei kerääntyisi paneelin pinnalle. [3, s.145.]

Paneelin sijoittamisessa pitää ottaa huomioon mahdolliset varjostukset, niin puista, rakennuksista kuin toisista aurinkopaneeleista. Sopivia asennuspaikkoja ovat esimerkiksi talon katto, seinä tai ranta. Jos katto on suunnattu hyvin, kannattaa kattoa käyttää asennuspaikkana varjostuksien minimoimiseksi. Kuvan 17 tapauksessa ei ole huomioitu paneelien muodostamaa varjoa. Vastaavaa ongelmaa ei ole, jos katto on jo valmiiksi optimaalisessa kulmassa, jolloin paneelit voivat olla kiinni toisissaan.

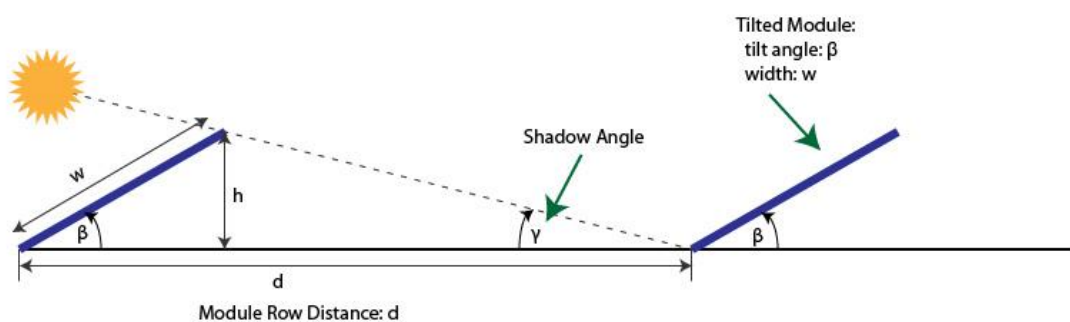


Kuva 17. Aurinkopaneelien välinen varjostaminen [36.]

Aurinkopaneelien välisiä etäisyyksiä huomioidessa on hyvä käyttää joko etäisyyslaskuria tai laskukaavaa. Laskukaavaa käyttäessä tärkeitä tietoja ovat aurinkopaneelin pituus, asennuskulma ja auringon korkeus. Paneelien tehokas toiminta-aika on maaliskuusta syyskuuhun, joten etäisyydet on hyvä mitoittaa maaliskuun auringonkulmien avulla (kuva 18). [37.]

	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
03:00							0					
03:30						2	3					
04:00						4	5	0				
04:30					1	7	8	3				
05:00					4	10	11	6				
05:30					7	14	14	10	2			
06:00				1	11	17	17	13	5			
06:30				4	14	21	21	16	9			
07:00				8	18	24	25	20	12	3		
07:30				11	22	28	28	24	16	7		
08:00			3	15	25	31	32	27	19	10	0	
08:30			6	18	28	35	35	30	23	13	3	
09:00		0	9	21	32	38	38	34	26	16	6	
09:30		3	12	24	35	41	42	37	29	19	8	1
10:00	0	5	14	26	37	44	44	40	31	21	10	3
10:30	2	7	16	29	39	46	47	42	33	23	12	4
11:00	4	9	18	30	41	48	49	44	35	24	13	6
11:30	5	10	19	32	42	49	50	46	36	25	14	6
12:00	5	11	20	32	43	50	51	46	37	25	14	7
12:30	5	11	20	32	43	50	52	47	37	25	14	7
13:00	5	11	20	32	43	50	51	46	36	25	13	6
13:30	4	10	19	31	41	48	50	45	35	24	12	5
14:00	3	9	18	30	40	47	48	44	34	22	11	4
14:30	2	8	17	28	38	44	46	42	32	20	9	2
15:00		6	15	26	35	42	43	39	29	18	7	
15:30		3	12	23	32	39	40	36	27	15	4	
16:00			10	20	29	35	37	33	24	12		
16:30			7	17	26	32	34	30	20	9		
17:00			4	13	22	28	30	26	17	6		
17:30			0	10	19	25	27	23	14	2		
18:00				6	15	21	23	19	10			
18:30				3	11	18	20	16	6			
19:00					8	14	16	12				
19:30					5	11	13	9				
20:00						8	10	6				
20:30						5	7	3				
21:00						2	4					
21:30						0	2					

Kuva 18. Auringon kulma asteina [38.]



Kuva 19. Aurinkopaneelin välien laskeminen [39.]

Kuvassa 19 on esitetty yksi tapa laskea paneelien välinen etäisyys. Niiden välinen etäisyys d lasketaan kaavalla

$$d = \frac{w \cdot \sin(\gamma + \beta)}{\sin(\gamma)}. \quad (1)$$

Kaavassa d tarkoittaa minimietäisyyttä toiseen paneeliin ja w paneelin pituutta. Auringon kulma on γ , joka saadaan katsottua kuvasta 18. Asennuskulma on β , joka on noin 40. [40.]

5.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tai invertterin tarkoitus on muuntaa aurinkopaneelien tuottama tasasähkö vaihtosähköksi. Se myös sovittaa taajuuden ja vaiheen sähköverkkoon sopivaksi. Inverttereitä on kolme eri tyyppiä, joiden lisäksi löytyy vielä maksimitehopisteen löytämiseen tarkoitettu Maximum Power Point Tracker (MPPT) -säädin. Säädin on yleensä vaihtosuuntaajaan liitetty.

1. Keskusinvertteri

Keskusinvertteriä käytetään suurissa järjestelmissä, joissa kaikki paneelit tuottavat lähes samanlailla energiaa. Kaikki paneelit yhdistetään jakorasian kautta keskusinvertteriin.

2. Stringi-invertteri

Stringi-invertterissä paneeleita kytketään yhteen sen virran- ja jännitteenkeston mukaan. Isommissa järjestelmissä paneelit jaetaan eri inverttereille, ettei virrankestoisuus ylittyisi. Tämän vaihtosuuntaajan etuja ovat halpa hinta ja vähemmän hajoavia komponentteja. Huonoina puolina on, jos yksikin paneeli varjostuu, niin koko järjestelmän teho heikkenee. [41.]

3. Mikroinvertteri

Mikroinvertteri on melko uusi keksintö verrattuna muihin, ja toimintatapa on erilainen. Muissa inverttereissä paneeleja yhdistettiin toisiinsa, niin mikroinvertteri laitetaan jokaiseen paneeliin erikseen. Hyötynä saadaan normaali tuotto muille paneeleille, vaikka yksi tai useampi olisi varjostettu. Huonona puolena voidaan pitää hintaa, koska jokaiselle paneelille pitää olla oma invertteri. [42.]

5.4 Toimenpidelupa ja energiatuki

Aurinkopaneelien asentamiseen saattaa tarvita toimenpideluvan. Käytäntö vaihtelee kunnittain, ja on hyvä tarkastaa asia kunnan rakennusvalvonnasta. [43.]

Aurinkosähköjärjestelmän rakentamiseen voi hakea Työ- ja elinkeinoministeriöstä energiatukea järjestelmän kustannuksiin. Maksimissaan tukea voi saada 25 % järjestelmän hankintahinnasta. [44.]

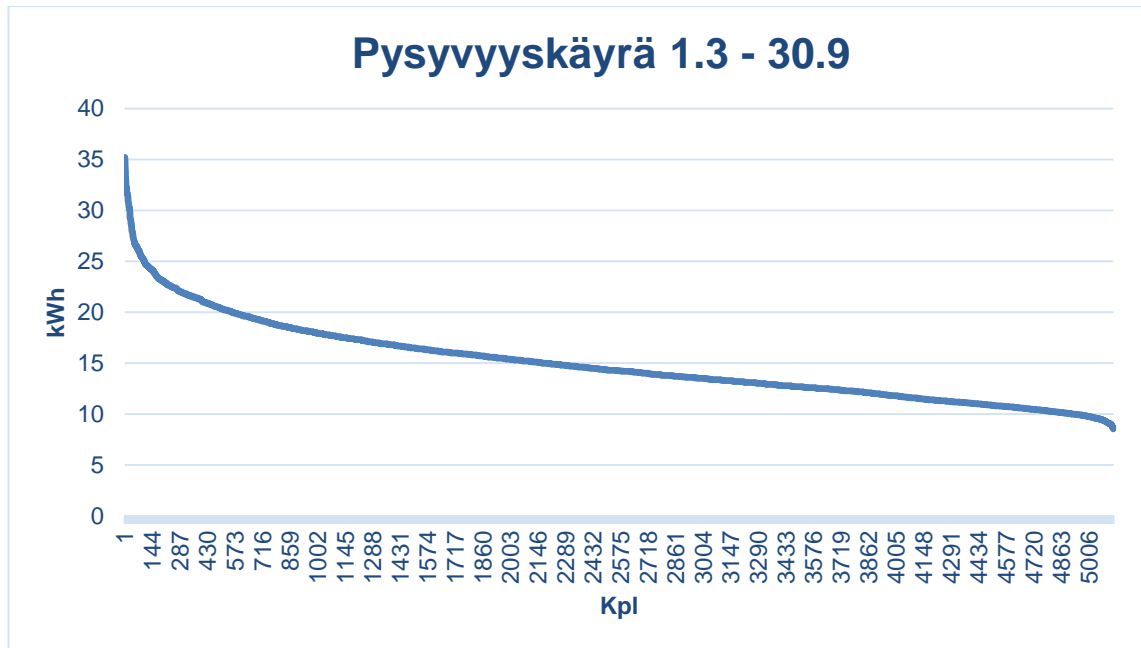
6 Esimerkkisuunnitelma

Esimerkkikohteena on Asunto Oy Savontie 1, Savonlinna. Kiinteistö koostuu kolmesta kerrostalosta, jotka ovat A, B ja C. Rakennuksiin tehdään laskelmat aurinkosähköjärjestelmän taloudellisuudesta ja teknisestä suunnittelusta. Suunnitelma on aloitettava energiankulutuksesta, jotta saadaan selville, mikä on kiinteistön pohjakuorma. Ilman pohjakuormatietoa on lähes mahdotonta päätellä, kuinka suuri aurinkosähköjärjestelmä voi olla.

6.1 Energiankulutus kiinteistössä

Aurinkopaneelien määrään vaikuttaa kiinteistön energiankulutus, joka saadaan sähköyhtiöltä. Kiinteistöllä on kulutusta vuodessa noin 142 000 kilowattituntia, ja osa on tarkoitus korvata aurinkoenergialla. Pohjakuormaa selvittäessä käytetään apuna pysyvyyskäyrää. Sitä käytettäessä nähdään nopeasti pohjakuorma, huippukuorma ja normaali käyttökuorma.

Aurinkopaneelit eivät tuota paljoa energiaa talvella, joten on turha ottaa talven aikana tapahtuvaa kuormitusta huomioon. Maaliskuun alusta syyskuun loppuun tapahtuvaa energiankulutusta on noin 100 000 kilowattituntia. Kuvassa 20 on pysyvyyskäyrä aurinkopaneeleille sopivalla aikavälillä. Kuvasta näkee helposti huipputehon, joka on noin 35 kilowattituntia ja vain hetken aikaa. Normaalista käyttöä on kaikki 25 kilowattitunnin ja 15 kilowattitunnin välillä. Pienin kuorma on noin 10 kilowattituntia, joten pohjakuorma on vähän sen yläpuolella. Pysyvyyskäyrän avulla voi olettaa, että aurinkopaneelien mitoitus on hyvä aloittaa 10 kilowatin järjestelmästä.



Kuva 20. Pysyvyyskäyrä

Pysyvyyskäyrä ei yksistään riitä järjestelmän mitoittamiseen, vaan on huomioitava myös tunneittainen keskiarvokulutus. Kuvassa 21 on hahmoteltu kulutusprofiili kiinteistölle jokaista päivän tuntia kohti. Kyseessä on keskiarvovuorokausi maaliskuusta syyskuuhun, joten eroa päivien välillä voi olla. Kulutusprofiili ja pysyvyyskäyrä yhdessä antavat hyvän kuvan, kuinka suuri järjestelmä voi olla. Pohjakuorma on noin 10 kilowattituntia, mutta aurinkopaneelien tuottoaikana kuorma on suurempi, jolloin paneeleita voi olla enemmän.



Kuva 21. Tunneittainen kulutusprofiili

6.2 Aurinkopaneelien määrä

Aurinkopaneelien määrä perustuu pohjakuormaan 10 kilowattituntia, jotta ylivoimista ei tapahtuisi. Pohjakuorma saadaan tuotettua, kun valitaan taulukon 1 mukaisia paneeleita 40 kappaletta.

Paneeliston huipputehoksi P_{\max} saadaan:

$$P_{\max} = 40 \cdot 250 \text{ W} = 10\,000 \text{ W}$$

Ja paneeliston vaatima pinta-ala on:

$$A = 1,61 \text{ m}^2 \cdot 40 = 64,4 \text{ m}^2$$

Taulukko 1. Aurinkopaneelin ominaisuudet

Bisol BMU250	
P_{\max}	250 W
Pinta-ala	1,61 m ²
Kennojen määrä	60
Hyötysuhde	15,3 %
Oikosulkuvirta	8,75 A
Tyhjäkäyntijännite	38,4 V

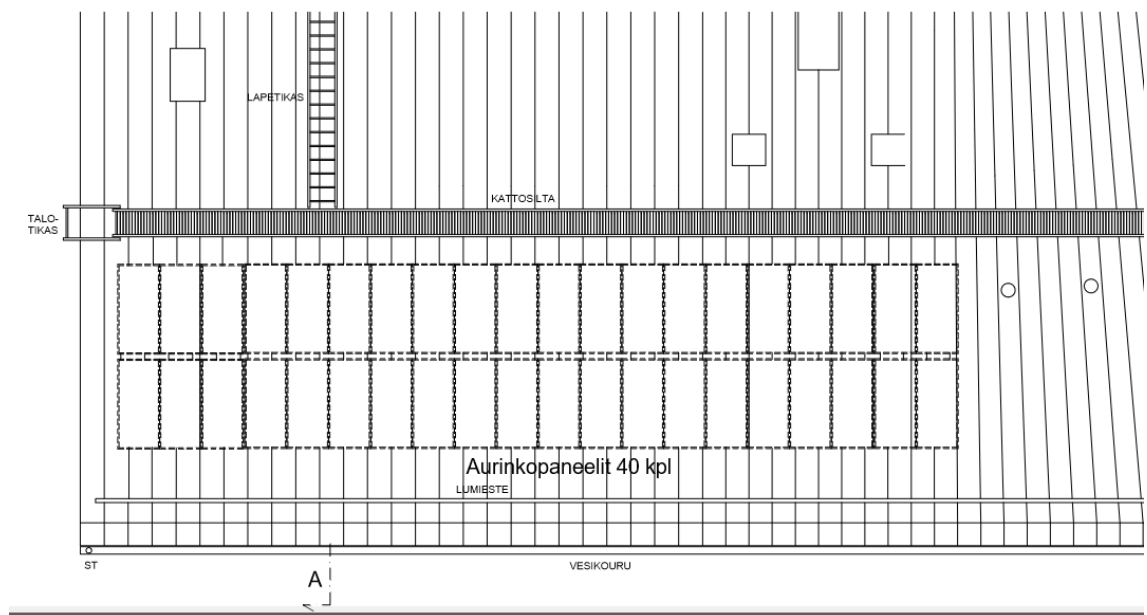
6.3 Invertterin valinta

Suunnitelmaan valitaan yksi invertteri SMA Sunny Tripower 12000TL, joka on teholtaan 12 kW. Kyseisessä invertterissä on kaksi erillistä maksimitehopistetuloa, joka mahdollistaa eri kaltevuuksilla tai ilmansuunnilla olevien paneelien lisäämisen samaan invertteriin. Invertteri huolehtii siitä, että aurinkopaneelit toimivat aina jännitteellä, joka antaa mahdollisimman suuren maksimitehon. Paneelit liitetään yhteen kytkentäryhmään muodostaen noin 618 voltin jännitteen ja noin 16,5 ampeerin virran. Sunny Tripower on kolmivaiheinen invertteri, joten se kytketään jokaiseen vaiheeseen. Tuotettu sähköteho jakautuu tasaisesti kaikille vaiheille ja on käytössä kiinteistön kaikissa laitteissa. [45.]

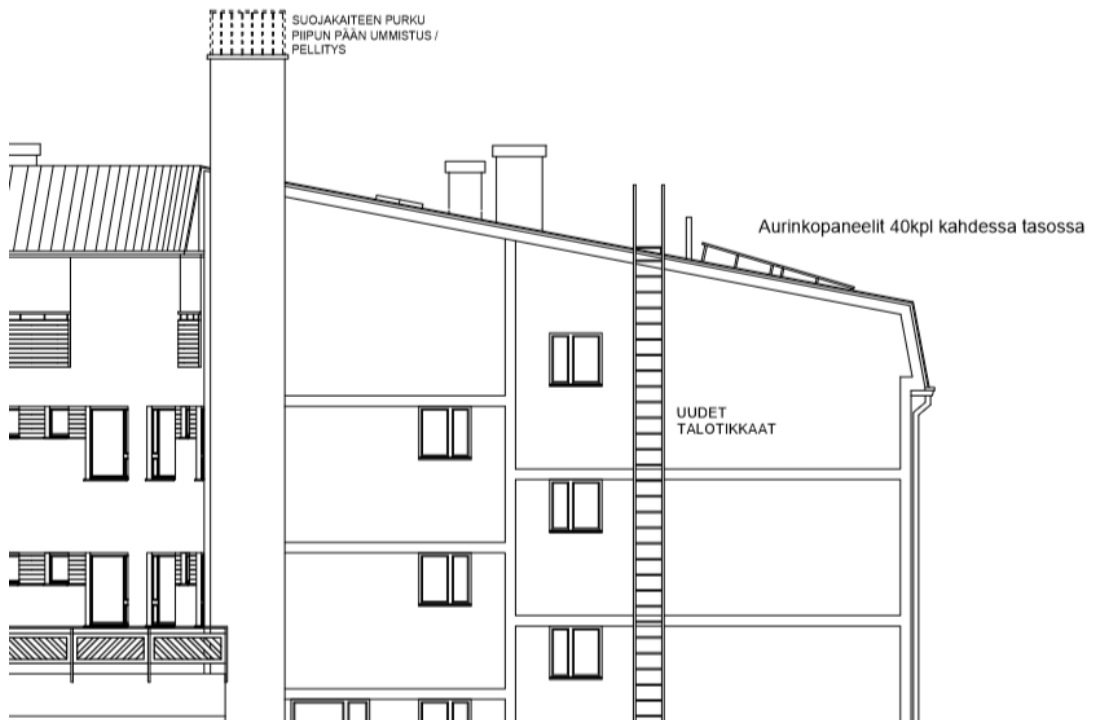
6.4 Aurinkopaneelien sijoittaminen

Paneeleita yhdistetään toisiinsa sarjan- ja rinnankytkennöillä tasaisesti, yhteensä 20 kappaletta molempia (kuva 22).

Kuvassa 23 on esitetty paneelien sivuprofiili ja asennustapa. Paneelit asennetaan kahteen riviin kiinni toisiinsa, jottei paneeleista syntyisi varjostuksia.



Kuva 22. Aurinkopaneelit katolla



Kuva 23. Aurinkopaneelien sivuprofiili

6.5 Kaapelointi, maadoitus ja johdonsuojakatkaisin

Aurinkopaneelit yhdistetään toisiinsa johtimilla, joiden pituus riippuu paneelin oikosulkuvirrasta ja johtimen pituudesta. On hyvä käyttää liitäntäkoteloa, jolla voidaan yhdistää paneeleita ja säästää kaapeloinnissa. Kaapelina käytetään 1000 V:n kaksoiseristettyä aurinkosähkökaapelia PV1-F, jolla paneelit liitetään inverteriin.

Tasajännitepuolen johdonsuojakatkaisin saadaan, kun otetaan aurinkopaneeliryhmän oikosulkuvirta ja kerrotaan se luvulla 1,56, jonka jälkeen etsitään sopiva suurempi katkaisin. Esimerkkisuunnitelmassa oikosulkuvirta on rinnankytkennän takia kaksinkertainen verrattuna yhteen aurinkopaneeliin, jolloin se on 17,5 A. Kertomalla

arvot keskenään saadaan $1,56 * 17,5 A = 27,3 A$. Johdonsuojakatkaisimeksi valitaan seuraava sopiva, joka on 32 A. Vaihtojännitepuolen johdonsuojakatkaisimessa noudatetaan Ohmin lakia, jossa $I = P / U$. Virta on I, jännite U ja teho on P. Sijoittamalla arvot Ohmin lain kaavaan saadaan arvo 43,3 A, jonka perusteella johdonsuojakatkaisin on 50 A.

Aurinkopaneeleilta tulee pääpotentiaalintasauskiskoon joko kelta-vihreä 6 mm² kaapeli tai 16 mm² potentiaalintasauskaapeli. [46.]

6.6 Kustannukset

Aurinkosähköjärjestelmän todellisia kustannuksia on vaikea arvioida ilman sähköurakoitsijan tarjouksia. Kustannuksia on mahdollista kuitenkin arvioida käyttämällä laitteiden yksikköhintoja, jotka ovat korkeampia kuin suuremmissa erissä ostettuina.

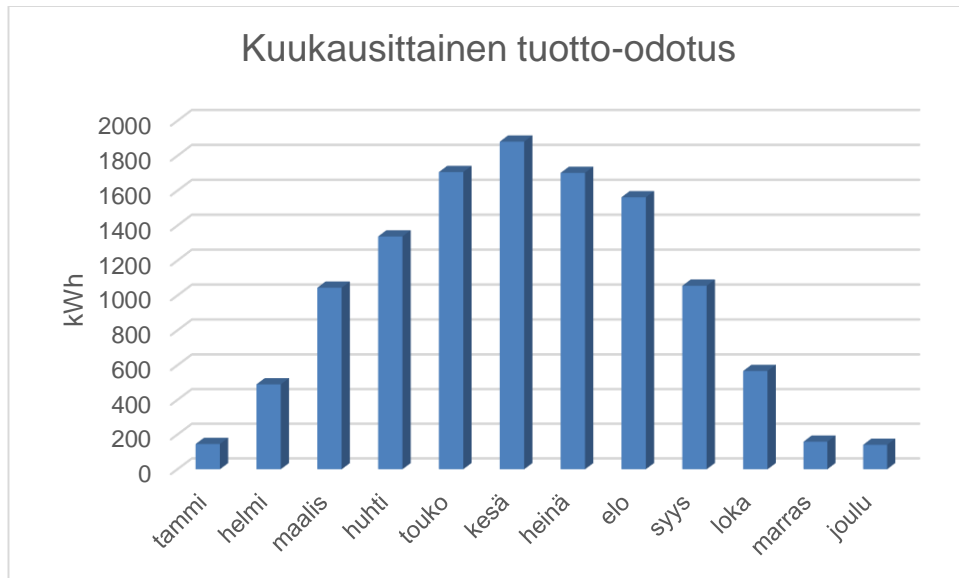
Esimerkkisuunnitelmassa käytetään aurinkopaneelina Bisol BMU250, jonka yksikköhinta on 259 €. Järjestelmässä on 40 kappaletta kyseisiä paneeleita, jolloin aurinkopaneeleiden hinnaksi tulee $40 * 259 € = 10\,360 €$. Suunnitelmassa invertterinä käytetään Sunny Tripower 12000TL:ää, jonka yksikköhinta on 3118,66€.

Aurinkopaneeleiden telineet ovat yksi suurimpia kustannuksia, ja yhden neljän paneelin teline yksikköhinnaltaan maksaa 340 €, jolloin niitä tarvitaan 10 kappaletta. Telineiden kokonaishinnaksi muodostuu 3400 €.

Yhteissummaksi yksikköhinnoille saadaan noin 16 880 €, ilman asennuksia. Aurinkopaneeleiden ja telineiden yksikköhinnoista saa todennäköisesti suuriakin alennuksia, joten koko järjestelmän kokonaiskustannus on hyvin todennäköisesti alle 15 000 €. Kokonaishintaa on hyvä verrata Fortum-nimisen yrityksen tarjoamaan aurinkosähköpakettiin. Heidän tarjoama paketti 36 aurinkopaneelilla asennuksineen maksaisi noin 21 600 €. [47; 48]

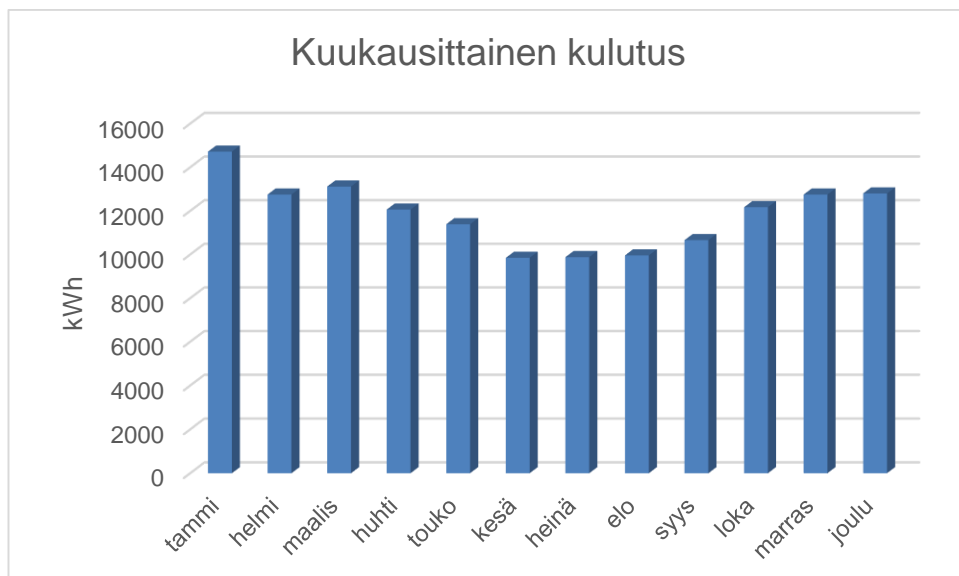
6.7 Takaisinmaksuaika

Käyttäen hyväksi kuukausittaisia säteilysummia on mahdollista arvioida, kuinka paljon sähköenergiaa aurinkosähköjärjestelmä tuottaa (kuva 24). [3, s.154.]



Kuva 24. Kuukausittainen tuotto-odotus

Kiinteistön kuukausittainen kulutus kertoo, kuinka Suomessa aurinkoenergia ja kulutus eivät kohtaa (kuva 25). Kulutusta on lämmityksen takia talvisin enemmän, mutta se ei tarkoita, etteikö aurinkoenergia olisi taloudellisesti kannattavaa.



Kuva 25. Kiinteistön kuukausittainen energiankulutus

Takaisinmaksuajan karkea arvio selviää käyttämällä Aalto-yliopiston opiskelijoiden valmistamaa kannattavuuslaskuria. Laskuriin sijoitetaan kiinteistön energiankulutus vuodessa, aurinkosähköjärjestelmän kokonaishinta ja järjestelmän huipputeho. Kannattavuuslaskurissa on monia muita toimintoja, esimerkiksi kuinka monta prosenttia sähköntuotosta kuluu kiinteistön omassa käytössä. Siinä on myös mahdollista ottaa huomioon energiatuki, jolloin takaisinmaksuaika on lyhyempi. [49.]

Kannattavuuslaskurin tulokset löytyvät liitteestä 1 ja liitteestä 2. Ensimmäisessä liitteessä ei ole otettu huomioon energiatukea, jolloin takaisinmaksuaika on noin 15 vuotta. Jos energiatuki otetaan huomioon, joka on 25 %, niin takaisinmaksuaika on noin 10 vuotta.

7 Järjestelmän liittäminen sähköverkkoon

Aurinkosähköjärjestelmän liittäminen yleiseen sähköverkkoon vaatii sähköalan ammattilaisen riittäväillä asennusoikeuksilla. Sähköverkonhaltijalta kannattaa varmistaa jo ennen järjestelmän hankintaa soveltuuko se liittämispaiikkaan. Verkonhaltijalle tulee toimittaa tiedot laitteista ja verkonhaltijan vaatimat muut tekniset dokumentaatiot. Järjestelmän tulee täyttää tekniset turvallisuusvaatimukset, eikä se saa aiheuttaa häiriöitä muille käyttäjille. [50.]

7.1 Turvakytkin

Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän on katkaistava automaattisesti sähkönsyöttö verkkoon, jos siihen tulee sähkökatko. Verkkoon ei voi syöttää sähköä, jotta korjaustyöt onnistuisivat turvallisesti. VDE-AR-N-4105-standardin laitteet täyttävät vaatimukset automaattisesta tuotannon katkaisusta. Verkonhaltija yleensä vaatii, että on myös manuaalinen turvakytkin, jotta järjestelmästä voidaan sähköntuotanto kytkeä pois päältä huollon tai muun toiminnan ajaksi. [51.]

7.2 Kaapelointi sähköpääkeskukselle

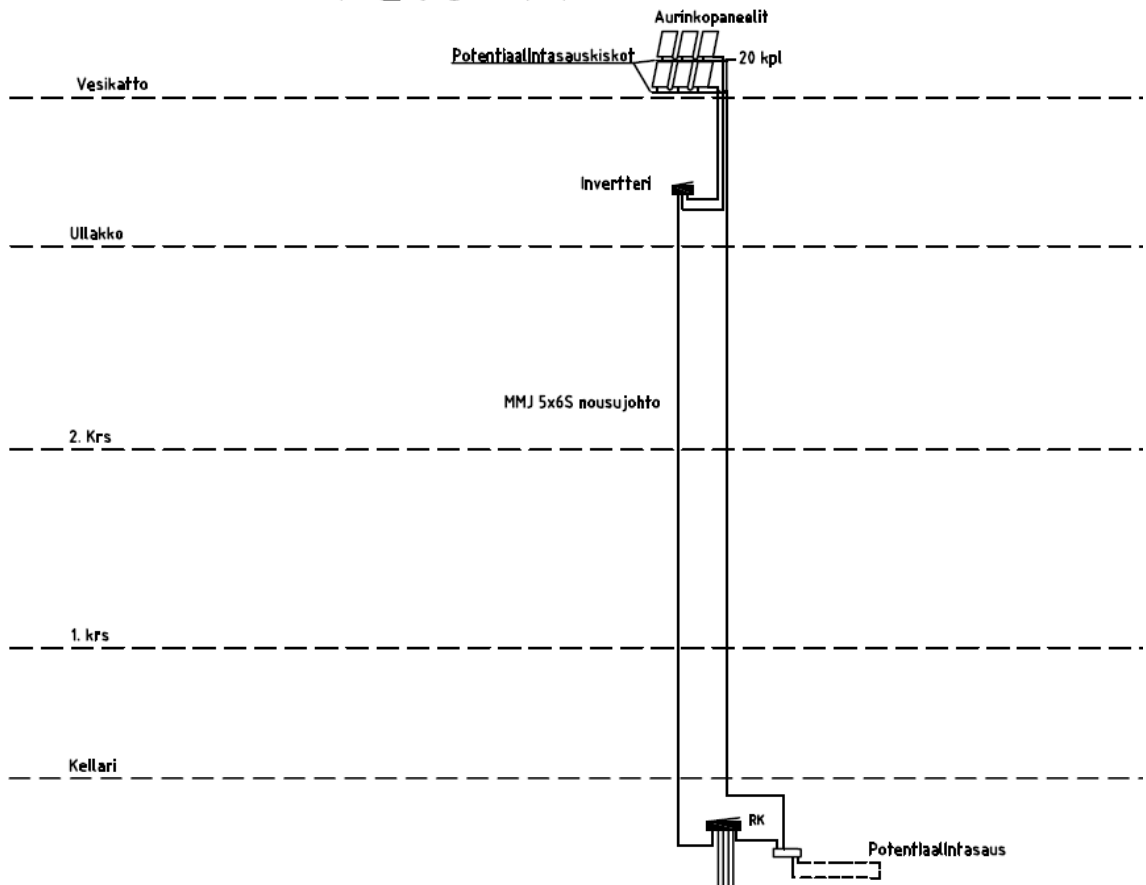
Invertteriltä sähköpääkeskukselle kaapelina voidaan käyttää esimerkiksi MMJ 5x6S. Sähköurakoitsija tekee päätöksen, mitä kaapeleita käytetään. Kuvassa 26 on

yksinkertainen kytkentäkaavio aurinkopaneeleilta invertterille ja siitä pääkeskukselle.
Kuvassa 27 on nousujohtokaavio kiinteistön talolle A.



Kuva 26. Kytcentäkaavio [52.]

Talo-A



Kuva 27. Nousujohtokaavio

8 Yhteenveto

Sananlasku hyvin suunniteltu on puoliaksi tehty sopii aurinkosähköjärjestelmään täydellisesti. Järjestelmän hyötysuhde ja takaisinmaksuaika pitenee jo melko pienistäkin virheistä mitoituksissa, joten suunnitteluvaiheessa on oltava tarkkana.

Suunnittelussa tärkeimpinä asioina pidän paneelien suuntausta, sijoitusta ja optimaalista mitoitusta. Huonoon ilmansuuntaan sijoitettu paneeli huonontaa hyötysuhdetta ja väärään paikkaan sijoitettu paneeli voi altistua varjostuksille. Jos järjestelmä taas ylimitoitetaan, niin kaikkea tuotantoa ei saada käytettyä tehokkaasti, vaan osa joudutaan myymään sähköverkkoon, joka pidentää takaisinmaksuaikaa.

Työn perusteella voin todeta, että vaikka aurinkosähköjärjestelmällä on korkea alkuinvestointi, on se kannattava sijoitus, jos lähes kaikki tuotettu energia saadaan

omaan käyttöön. Järjestelmä sopii erinomaisesti kerrostaloihin, jäähalleihin, kauppoihin ja muihin vastaaviin, missä kulutus on jatkuvaa ja tasaista myös kesällä.

Uskon että vastaavat järjestelmät kasvattavat suosiotaan nopeasti hintojen halventuessa ja alkuinvestoinnin pienentyessä.

Lähteet

- 1 Auringon säteily. 2016 Verkkodokumentti Wikipedia.
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Auringon_säteily> Luettu 22.4.2016.
- 2 Energiankulutus. 2016 Verkkodokumentti Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption> Luettu 22.4.2016.
- 3 Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin 2008. Bruno Erat, Vesa Erkkilä, Christen Nyman, Kimmo Peippo, Seppo Peltola, Hannu Suokivi. Julkaisija Aurinkoteknillinen Yhdistys ry. Julkaistu 2008.
- 4 Fissio. 2016 Verkkodokumentti Wikipedia.
<<https://fi.wikipedia.org/wiki/Fissio>> Luettu 22.4.2016.
- 5 Fundamentals of Renewable Energy Processes 2013. Aldo Vieira da Rosa, Stanford University, Elsevier.
- 6 Solar absorption. Kuva. Verkkodokumentti Wikipedia.
< <https://en.wikipedia.org/wiki/File:The-NASA-Earth%27s-Energy-Budget-Poster-Radiant-Energy-System-satellite-infrared-radiation-fluxes.jpg>> Luettu 22.4.2016.
- 7 Hajasäteily. Verkkodokumentti YTMPumput.
< http://www.ytmpumput.fi/pdf/aurinkopaneelit/YTM-Industrial_CIS-ohutkalvoaurinkopaneelit.pdf> Luettu 22.4.2016.
- 8 Auringon säteily. Verkkodokumentti Motiva 2015.
<http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa> Luettu 25.4.2016.
- 9 Kuukausittainen säteily. Kuva. Verkkodokumentti OAMK 2014.
<http://www.oamk.fi/hankkeet/bioologia/docs/materiaalit/aur_saataav_0214.pdf> Luettu 25.4.2016.
- 10 DEE-53010 Luento 2 SMG <<https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-53010/luennot2013/luento2.pdf>> Luettu 25.4.2016.
- 11 Historia. Verkkodokumentti PVHistory 2013
<<http://www.sunlightelectric.com/pvhistory.php>> Luettu 26.4.2016.
- 12 Toimintaperiaate. Verkkodokumentti Kati Kolehmainen 2011.
<<http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/ont/kolehmainen-k-2011.pdf>> Luettu 26.4.2016.

- 13 Pn-liitos. Verkkodokumentti Suntekno.
<<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>> Luettu 27.4.2016.
- 14 IU-käyrä. Kuva Solarprofessional.com.
<http://solarprofessional.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/2_SP4_5_pg76_Hernday-3_0.jpg> Luettu 27.4.2016.
- 15 Valmistus. Verkkodokumentti Yinglisolar. < http://www.yinglisolar.com/en/solar-basics/#panel_section> Luettu 27.4.2016.
- 16 Yksikiteinen kenno. Kuva.
< http://img.diytrade.com/cdimg/686885/7028829/0/1222935142/Mono-crystalline_Solar_Cell_Catalog.jpg> Luettu 27.4.2016.
- 17 Monikiteinen kenno. Verkkodokumentti Yinglisolar
<<http://blog.yinglisolar.com/great-debate-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>> Luettu 27.4.2016.
- 18 Monikiteinen kenno. Kuva.
< <http://www.tindosolar.com.au/poly-vs-mono-crystalline/>> Luettu 27.4.2016.
- 19 Ohutkalvo. Verkkodokumentti YTM-industrial
<http://www.ytmpumpu.fi/pdf/aurinkopaneelit/YTM-Industrial_CIS-ohutkalvoaurinkopaneelit.pdf> Luettu 27.4.2016.
- 20 Ohutkalvopaneeli. Kuva Asmac.
< <http://www.asmac.com.hk/thin-film-solar-cell.php>> Luettu 27.4.2016.
- 21 Orgaaninen. Verkkodokumentti VTT 2015
<<http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/kuvioidut-taipuisat-aurinkopaneelit-osaksisustusta-ja-esineiden-ulkonäköä>> Luettu 27.4.2016.
- 22 Orgaaninen kenno lehti. Kuva.
< <http://www.hexapolis.com/2015/01/28/finnish-scientists-design-ornate-organic-solar-panels/>> Luettu 27.4.2016.
- 23 Rakenne. Verkkodokumentti Solar Innova.
<<http://www.solarpower.fi/Pic/ErikoisAle/t090208112223.pdf>> Luettu 29.4.2016.
- 24 Aurinkopaneelin rakenne. Kuva.
<<http://etap.com/renewable-energy/renewable-energy-images/solar-panel-breakdown-large.jpg>> Luettu 29.4.2016.
- 25 Kennosta paneelistoon. Kuva.
< <http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>> Luettu 29.4.2016.

- 26 Solar star aurinkovoimala. Verkkodokumentti Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Star> Luettu 29.4.2016.
- 27 Aurinkopaneeli tehontuotto. Kuva Mouser.
< <http://www.mouser.com/images/microsites/sophisticated-management-solar-energy-fig-2.jpg>> Luettu 29.4.2016.
- 28 Aurinkopaneelin jännite lämpötilan mukaan. Kuva Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells> Luettu 29.4.2016.
- 29 DEE-53010 luento 6. Aurinkosähköenergia. Verkkodokumentti.
< <https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4450/2012/luento6.pdf>> Luettu 29.4.2016.
- 30 Energian jakautuminen. Kuva. < <http://blogi.helen.fi/auringosta-energiaa-kesalla-ja-talvella/>> Luettu 29.4.2016.
- 31 DEE-53010 luento 7. Aurinkosähköenergia. Verkkodokumentti.
<<https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-53010/luennot2013/luento7.pdf>> Luettu 2.5.2016.
- 32 Suunnittelu. Verkkodokumentti Aurinkovirta
<<http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/>> Luettu 2.5.2016.
- 33 Mitoitus. Verkkodokumentti Areva solar.
<<http://arevasolar.fi/fi/aurinkoenergia>> Luettu 2.5.2016.
- 34 Pohjakuora. Verkkodokumentti.
<<http://www.enegia.com/fi/blogi/pohjakuormaa/>> Luettu 2.5.2016.
- 35 Suuntaus. Verkkodokumentti Ilmastoinfo.
<<http://ilmastoinfo.fi/aurinkosahkoakotiin/miten/huomioitavaa/>> Luettu 2.5.2016.
- 36 Aurinkopaneelin varjostus. Kuva.
< <http://blogs.scientificamerican.com/solar-at-home/invert-your-thinking-squeezing-more-power-out-of-your-solar-panels/>> Luettu 2.5.2016.
- 37 Tuoton tekijät. Verkkodokumentti Ouka.fi
<http://www.ouka.fi/c/document_library/get_file?uuid=f603ac16-5d63-4f51-ac3e-64534df5a18a&groupId=486338> Luettu 2.5.2016.
- 38 Auringon kulma. Kuva.
<<https://sites.google.com/site/eiverkkosahkoa/auringonkulma>> Luettu 2.5.2016.

- 39 Paneelien välinen etäisyys. Kuva.
<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/performance/images/solar_park-01.jpg> Luettu 3.5.2016.
- 40 Paneelien etäisyyden laskeminen. Verkkodokumentti.
<<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/performance/shading.php>> Luettu 3.5.2016.
- 41 Invertterit. Verkkodokumentti.
<<http://cenerypower.com/blog/string-vs-central-inverters-choosing-right-inverter/>> Luettu 3.5.2016.
- 42 Mikroinvertteri. Verkkodokumentti.
<<http://energyinformative.org/are-solar-micro-inverters-better-than-central-inverters/>> Luettu 3.5.2016.
- 43 Toimenpidelupa. Verkkodokumentti Motiva.
<http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/lupa-asiat> Luettu 3.5.2016.
- 44 Energiatuki. Verkkodokumentti TEM.
<https://www.tem.fi/energia/energiatuki/tuen_maara> Luettu 3.5.2016.
- 45 Vaihtosuuntaaja. Verkkodokumentti.
<<http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/verkkoinvertteri/>> Luettu 4.5.2016.
- 46 Kaapelointi ja maadoitus. Verkkodokumentti Aurinkovirta.
<<http://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkosahkovoimala/verkkoinvertteri/>> Luettu 5.5.2016.
- 47 Hinnasto. Verkkodokumentti.
<<http://www.aurinkosahko.net/>> Luettu 5.5.2016.
- 48 Fortum aurinkosähköpaketti. Verkkodokumentti.
< https://www.fortum.fi/countries/fi/energiansaasto-ja-ratkaisut/aurinkopaneelit-aurinkopaketti/pages/default.aspx?ad=search&gclid=CjwKEAjwgbG5BRDp3oW3qdPiuCwSJAAQmoSDII9qv2Lk2HcjPIQ1CivwzOJ8tD-z_L2ACaafRz02pxoCvzfw_wcB> Luettu 5.5.2016.
- 49 Kannattavuuslaskuri. Verkkodokumentti Finsolar.
<http://www.finsolar.net/?page_id=2571> Luettu 5.5.2016.
- 50 Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon. Verkkodokumentti Energiateollisuus
<<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/pientuotanto>> Luettu 5.5.2016.

- 51 Turvakytkin. Verkkodokumentti OAMK.
<<http://www.oamk.fi/cdn/fileuploads/asennusopas.pdf>> Luettu 5.5.2016.

- 52 Kytkenäkaavio. Verkkodokumentti Ruukki.
<http://www1.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Katot/Solar/FI_RuukkiAurinkosahkopaketti_TekninenEsite.ashx> Luettu 5.5.2016.

Takaisinmaksuaika ilman energiatukea

Järjestelmän elinikä vuosina	Oman sähköntuotannon arvo ja myyntituotot €	Investointi- ja ylläpito- kustannukset €	Kassavirta €/v	Investoinnin sisäisiä korkokantoja % (IRRI)	Investoinnin kumulatiivinen tuotto €/v (5% korko)	Investoinnin nettonykykyarvo (NPV) valitulla laskeentakorolla	Takaisinmaksu- aika valitulla investoinnin laskeentakorolla	Ostosähkön hinta [eur/kWh]	Myyntin menevän ylijäämäsähkön hinta	Aurinkosähkön tuotanto kWh/v	Aurinkosähkön tuotantohinta [eur/kWh]																				
												0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0,0 €	-15 000,0 €	-15 000,0 €	-15 000,0 €	-15 000,0 €	-13 601,0 €	1	0,15 €	0,06 €	0	0	0,00 €																			
1	1164,0 €	-15,0 €	€1149	-92,3%	-12 696,0 €	-12 513,0 €	1	0,15 €	0,06 €	8000	0,94 €																				
2	1169,8 €	-15,0 €	€1155	-68,2%	-11 536,0 €	-11 441,0 €	1	0,15 €	0,06 €	7960	0,63 €																				
3	1175,6 €	-15,0 €	€1161	-48,4%	-10 389,0 €	-10 385,0 €	1	0,15 €	0,06 €	7920	0,47 €																				
4	1181,4 €	-15,0 €	€1166	-34,6%	-9 197,0 €	-9 344,0 €	1	0,16 €	0,06 €	7881	0,38 €																				
5	1187,2 €	-15,0 €	€1172	-25,1%	-8 019,0 €	-8 318,0 €	1	0,16 €	0,06 €	7802	0,32 €																				
6	1193,1 €	-15,0 €	€1178	-18,2%	-6 835,0 €	-7 308,0 €	1	0,16 €	0,06 €	7763	0,27 €																				
7	1199,0 €	-15,0 €	€1184	-13,2%	-5 645,0 €	-6 312,0 €	1	0,16 €	0,06 €	7724	0,24 €																				
8	1204,9 €	-15,0 €	€1190	-9,4%	-4 449,0 €	-5 331,0 €	1	0,16 €	0,06 €	7686	0,21 €																				
9	1210,9 €	-15,0 €	€1196	-6,5%	-3 247,0 €	-4 364,0 €	1	0,16 €	0,07 €	7647	0,19 €																				
10	1216,9 €	-15,0 €	€1202	-4,2%	-2 039,0 €	-3 412,0 €	1	0,17 €	0,07 €	7609	0,18 €																				
11	1222,9 €	-15,0 €	€1208	-2,3%	-825,0 €	-2 473,0 €	1	0,17 €	0,07 €	7571	0,16 €																				
12	1229,0 €	-15,0 €	€1214	-0,9%	395,0 €	-1 549,0 €	1	0,17 €	0,07 €	7533	0,15 €																				
13	1235,1 €	-15,0 €	€1220	0,4%	1 621,0 €	-638,0 €	1	0,17 €	0,07 €	7495	0,14 €																				
14	1241,2 €	-15,0 €	€1226	1,4%	2 592,0 €	-833,0 €	1	0,17 €	0,07 €	7458	0,14 €																				
15	1247,3 €	-15,0 €	€1238	1,2%	3 836,0 €	923,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7383	0,13 €																				
16	1253,5 €	-15,0 €	€1245	2,8%	5 087,0 €	1 782,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7347	0,12 €																				
17	1259,7 €	-15,0 €	€1251	3,4%	6 344,0 €	2 628,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7310	0,12 €																				
18	1265,9 €	-15,0 €	€1257	3,9%	7 608,0 €	3 462,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7273	0,11 €																				
19	1272,2 €	-15,0 €	€1263	4,3%	8 878,0 €	4 283,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7237	0,11 €																				
20	1278,5 €	-15,0 €	€1270	4,7%	10 154,0 €	5 092,0 €	0	0,18 €	0,07 €	7201	0,10 €																				
21	1284,8 €	-15,0 €	€1276	5,1%	11 457,0 €	5 890,0 €	0	0,19 €	0,07 €	7165	0,10 €																				
22	1291,2 €	-15,0 €	€1283	5,3%	12 726,0 €	6 675,0 €	0	0,19 €	0,08 €	7129	0,09 €																				
23	1297,6 €	-15,0 €	€1289	5,6%	14 021,0 €	7 449,0 €	0	0,19 €	0,08 €	7093	0,09 €																				
24	1304,0 €	-15,0 €	€1295	5,8%	15 323,0 €	8 212,0 €	0	0,19 €	0,08 €	7058	0,09 €																				
25	1310,4 €	-15,0 €	€1302	6,0%	16 631,0 €	8 964,0 €	0	0,20 €	0,08 €	7022	0,08 €																				
26	1316,9 €	-15,0 €	€1308	6,2%	17 946,0 €	9 704,0 €	0	0,20 €	0,08 €	6987	0,08 €																				
27	1323,5 €	-15,0 €	€1315	6,5%	19 268,0 €	10 434,0 €	0	0,20 €	0,08 €	6952	0,08 €																				
28	1330,0 €	-15,0 €	€1322	6,5%	20 596,0 €	11 153,0 €	0	0,20 €	0,08 €	6918	0,08 €																				
29	1336,6 €	-15,0 €	€1328	6,5%			0																								
30	1343,2 €	-15,0 €					15																								
YHTEENSÄ	27 280,0 €	-16 950,0 €								22385																					

Vhseenneto: investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat

Investoinnin nettonykyarvo eli kokonaisluotto tai - tappio

30 vuoden käyttöiällä

Takaisinmaksuaika

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

11 153 €
15 vuotta

Takaisinmaksuaika energiatuen kanssa

Aurinkosähkön tuotto- ja talouslaskelmat elinkaaren aikana:												
Järjestelmän elinka vuosina	Oman sähkentuotannon arvo ja myyntituotot €	Investointi- ja ylläpito- kustannukset €	Kassavirta €/v	Investoinnin sisäisiä korokantoja % (IRR)	Investoinnin kumulatiivinen tuotto €/v (0% korko)	Investoinnin nettonykyarvo (NPV) valitulla laskentakorolla	Takaisinmaksu- aika valitulla investoinnin laskentakorolla	Ostosähkön hinta [eur/kWh]	Myyntiin menevän ylijäämäsähkön hinta	Aurinkosähkön tuotanto kWh/v	Aurinkosähkön tuotantohinta LCOE [eur/kWh]	
0	0,0€	-11 250,0€	-€11 250		-11 250€			0,15€		0		
1	1 164,0€	-11,3€	€1 153	-89,8%	-10 097€	-9 211€	1	0,15€	0,06€	8000	0,71€	
2	1 169,8€	-11,3€	€1 159	-62,4%	-8 939€	-8 830€	1	0,15€	0,06€	7960	0,71€	
3	1 175,6€	-11,3€	€1 164	-41,7%	-7 774€	-7 754€	1	0,15€	0,06€	7920	0,47€	
4	1 181,4€	-11,3€	€1 170	-27,9%	-6 604€	-6 694€	1	0,15€	0,06€	7881	0,36€	
5	1 187,2€	-11,3€	€1 176	-18,5%	-5 428€	-5 650€	1	0,16€	0,06€	7841	0,29€	
6	1 193,1€	-11,3€	€1 182	-12,0%	-4 247€	-4 621€	1	0,16€	0,06€	7802	0,24€	
7	1 199,0€	-11,3€	€1 188	-7,3%	-3 059€	-3 607€	1	0,16€	0,06€	7763	0,21€	
8	1 204,9€	-11,3€	€1 194	-3,8%	-1 865€	-2 609€	1	0,16€	0,06€	7724	0,18€	
9	1 210,9€	-11,3€	€1 200	-1,2%	-665€	-1 624€	1	0,16€	0,06€	7686	0,16€	
10	1 216,9€	-11,3€	€1 206	0,9%	540€	-655€	1	0,16€	0,07€	7647	0,15€	
11	1 222,9€	-11,3€	€1 212	2,5%	1 752€	301€	0	0,17€	0,07€	7609	0,13€	
12	1 229,0€	-11,3€	€1 218	3,8%	2 970€	1 242€	0	0,17€	0,07€	7571	0,12€	
13	1 235,1€	-11,3€	€1 224	4,8%	4 193€	2 169€	0	0,17€	0,07€	7533	0,11€	
14	1 241,2€	-11,3€	€1 230	5,7%	5 423€	3 083€	0	0,17€	0,07€	7495	0,11€	
15	1 247,3€	-11,3€	€1 236	6,2%	6 640€	3 778€	0	0,17€	0,07€	7458	0,11€	
16	1 253,5€	-11,3€	€1 242	6,8%	7 850€	4 452€	0	0,18€	0,07€	7421	0,10€	
17	1 259,7€	-11,3€	€1 248	7,3%	8 905€	5 113€	0	0,18€	0,07€	7383	0,10€	
18	1 265,9€	-11,3€	€1 255	7,7%	9 905€	5 753€	0	0,18€	0,07€	7347	0,09€	
19	1 272,2€	-11,3€	€1 261	8,0%	10 866€	6 362€	0	0,18€	0,07€	7310	0,09€	
20	1 278,5€	-11,3€	€1 267	8,3%	11 793€	7 158€	0	0,18€	0,07€	7273	0,09€	
21	1 284,8€	-11,3€	€1 274	8,6%	12 707€	8 022€	0	0,18€	0,07€	7237	0,08€	
22	1 291,2€	-11,3€	€1 280	8,8%	13 598€	8 834€	0	0,18€	0,07€	7201	0,08€	
23	1 297,6€	-11,3€	€1 286	9,0%	14 473€	9 633€	0	0,19€	0,07€	7165	0,07€	
24	1 304,0€	-11,3€	€1 293	9,1%	15 333€	10 421€	0	0,19€	0,08€	7129	0,07€	
25	1 310,4€	-11,3€	€1 299	9,3%	16 178€	11 198€	0	0,19€	0,08€	7093	0,07€	
26	1 316,9€	-11,3€	€1 306	9,4%	17 008€	11 963€	0	0,19€	0,08€	7058	0,07€	
27	1 323,5€	-11,3€	€1 312	9,5%	17 823€	12 716€	0	0,20€	0,08€	7022	0,06€	
28	1 330,0€	-11,3€	€1 319	9,6%	18 623€	13 459€	0	0,20€	0,08€	6987	0,06€	
29	1 336,6€	-11,3€	€1 325	9,7%	19 408€	14 191€	0	0,20€	0,08€	6952	0,06€	
30	1 343,2€	-11,3€	€1 332	9,7%	20 178€	14 912€	0	0,20€	0,08€	6918	0,06€	
YHTIENSÄ	27 280,6€	-13 087,5€					10			223385		

Yhteenveto: investoinnin tuotto- ja kannattavuuslaskelmat

Investoinnin nettonykyarvo eli kokonaisluotto tai -tappio

30 vuoden käyttöiällä

Takaisinmaksuaika

10

14 912 €

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10

10