

Aurinkosähkön tekninen potentiaali Jyväskylässä

Pro gradu -tutkielma, 11. joulukuuta 2014

Tekijä:

JASMIN LUOSTARINEN

Ohjaaja:

JUSSI MAUNUKSELA



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

Tiivistelmä

Luostarinen, Jasmin

Aurinkosähkön tekninen potentiaali Jyväskylässä

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2014, 73 sivua

Tutkielman tavoitteena on selvittää Jyväskylän asuinrakennusten aurinkosähköistä potentiaalia simuloimalla katolle asennettavan aurinkosähköjärjestelmän tuottoja ja vertaamalla niitä rakennuksen sähkönkulutukseen. Tarkastelu tehtiin tätä tarkoitusta varten suunnitellun MATLAB-ohjelman avulla. Laskennan pohjana käytettiin Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen sääasemalta saatuja säteily-, lämpötila- ja tuulennopeusaineistoja vuosilta 2010 ja 2011.

Tutkimuskohteina käytettiin viittä kerrostaloa, jotka sijaitsevat alle 1,5 kilometrin etäisyydellä sääasemasta. Tasakatolle sijoitettavat aurinkosähköpaneelit suunnattiin etelään 47 asteen kallistuskulmassa. Harjakatoille paneelit sijoitettiin lappeen suuntaisesti. Paneeliksi valittiin monikiteinen aurinkosähköpaneeli, jonka nimellisteho on 305 W. Kullekin kohteelle laskettiin kuukausi-, kausi- ja vuosikohtainen tuotto vuodelle 2010. Kunkin kohteen tuottoa verrattiin rakennuksen arvioituun laitesähkönkulutukseen, jonka oletettiin olevan 2400 kWh asuntoa kohti vuodessa. Lisäksi tarkasteltiin vuosien 2010 ja 2011 vuosituottojen välistä eroa sekä eri paneelityyppien vaikutusta saataviin tuottoihin.

Esimerkkitapauksissa katolle asennetulla aurinkosähköjärjestelmällä voidaan mallinnuksen tulosten perusteella parhaassa tapauksessa kattaa noin 35% rakennuksen laitesähkönkulutuksesta. Tämä 35 prosentin osuus voidaan saavuttaa korkeintaan neljä- tai viisikerroksisissa rakennuksissa, sillä tätä korkeammilla rakennuksilla aurinkopaneelien asennukseen käytettävän kattopinta-alan suhde asuntojen määrään on liian pieni. Neliömetrikohtaisia tuottoja voitaisiin parantaa tehokkaammalla 345 W:n yksikidepaneelilla noin 14%, mikä vastaa noin paria prosenttiyksikköä kulutuksesta. Vuosien 2010 ja 2011 vuosituottojen välillä ei havaittu merkittävää eroa vuosikulutuksen kannalta.

Avainsanat: aurinkoenergia, aurinkosähkö, sähkön pientuotanto

Abstract

Luostarinen, Jasmin

Photovoltaic potential in Jyväskylä

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2014, 73 pages

The aim of this thesis is to look into the photovoltaic potential of residential buildings in Jyväskylä by simulating the yield of a rooftop photovoltaic solar system and by comparing the yield with the electricity consumption of the building. A MATLAB program was developed for calculation purposes. Radiation, temperature and wind speed data for the years 2010 and 2011 were used for the calculations. The data were collected by the weather station of the Department of Chemistry of the University of Jyväskylä.

Five apartment buildings, situated within a 1.5 km radius from the weather station, were used as case study samples. PV panels placed on flat roofs were directed to the south with a tilt angle of 47 degrees. The panels placed on pitched roofs were positioned in the direction of and with the tilt angle of the rooftop. The PV panel used was a polycrystalline silicon solar panel with a nominal power of 305 W. Monthly, seasonal and annual yields for the year 2010 were calculated for each of the case study buildings. The yield of each building was compared with the building's approximate annual energy consumption of household appliances, which was assumed to be 2400 kWh per household per year. Yield differences between the years 2010 and 2011 were also studied, as well as the effects of selecting a different type of solar panel.

Based on the calculations performed for the case study buildings, up to 35% of the annual energy consumption of household appliances could be covered with a rooftop PV system. This holds true for buildings up to 4 or 5 floors, since higher buildings have markedly less surface area for PV panels per household. If a monocrystalline solar panel with a nominal power rating of 345 W was used, yields per square meter could be increased by approximately 14%, which is equivalent to approximately two percentage points of the annual consumption. There was no significant difference between the annual yields of the years 2010 and 2011.

Keywords: solar energy, solar power, small-scale electricity generation

Alkusanat

Haluan kiittää ohjaajaani FT Jussi Maunukselaa, joka antoi minulle vapaat kädet tämän työn tekoon, mutta oli tarvittaessa aina valmis antamaan asiantuntevia neuvoja.

Lisäksi haluan kiittää Keski-Suomen opiskelija-asuntosäätiötä (KOAS) tutkimuksessa tarvittavien tietojen antamisesta.

Kiitokset myös Antille kaikesta rakkaudesta ja tuesta.

Jyväskylässä 11. joulukuuta 2014

Jasmin Luostarinen

Sisältö

1	Johdanto	11
2	Ilmakehän ulkopuolinen auringon säteily	14
2.1	Auringon ja maan välinen geometria	14
2.2	Aurinkoaika	15
2.3	Säteily horisontaaliselle pinnalle	16
3	Maanpinnalle tuleva säteily	18
3.1	Absorptio ja Rayleigh'n sironta ilmakehässä	18
3.2	Auringon säteilyn mittaaminen	18
3.3	Aineiston valinnasta ja käsittelystä	20
4	Keräintasoon tuleva säteily	22
4.1	Kirkkausaste	22
4.2	Hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuudet	23
4.3	Säteily kaltevalle pinnalle	24
5	Aurinkosähkön tuotanto	28
5.1	Aurinkokennojen toiminta	28
5.2	Olosuhteiden vaikutus paneelien tuottoon	33
5.2.1	Optiset häviöt ja pöly	33
5.2.2	Säteilyn intensiteetti ja lämpötila	35
5.2.3	Varjostukset	37
6	Tutkittavat aurinkosähköjärjestelmät	41
6.1	Tutkimuskohteet	42
6.1.1	Ainolankaari	42
6.1.2	Hospa	43
6.1.3	Jyvänen	45
6.1.4	Konsa	46
6.1.5	Tango	48
6.2	Tarkasteltavat aurinkopaneelit	50
6.3	Aurinkopaneelien sijoittelu valituille kattopinnoille	52
7	Tulokset	54
7.1	Kattopinnoille sijoitetut aurinkosähköpaneelit	54
7.2	Aurinkosähkön tuotto kohteittain	54
7.3	Vuosittainen vaihtelu ja paneelityypin vaikutus	58
7.4	Tuoton riippuvuus paneelin suunnasta ja kallistuskulmasta	61
7.5	Ideaalisuuden vaikutus ja vaihtosuuntaushäviöt	63

7.5.1	Teoreettisen mallin vaikutus tuloksiin	63
7.5.2	Vaihtosuuntaushäviöt	65
7.5.3	Mallinnettujen tulosten vertailu mitattuihin arvoihin .	66
8	Johtopäätökset	68

Käytetyt merkinnät ja symbolit

δ	dekliinaatiokulma [°]
n	päiväluku [ei yksikköä]
L_{loc}	pituuspiiri [°]
L_{tz}	aikavyöhyke [min]
E	aurinkoaajan korjaustermi [min]
ω	tuntikulma [°]
θ	säteilyn tulokulma [°]
ϕ	leveyspiiri [°]
β	keräimen kallistuskulma [°]
γ	keräimen atsimuuttikulma [°]
θ_z	zeniittikulma [°]
α_s	auringon korkeuskulma [°]
G_{sc}	aurinkovakio [W/m ²]
G_b	suoran säteilyn säteilytiheys [W/m ²]
G_d	hajasäteilyn säteilytiheys [W/m ²]
$G_{\text{g-r}}$	maasta heijastuneen säteilyn säteilytiheys [W/m ²]
G_{eff}	keräinlasin läpäisevä säteily [W/m ²]
k_T	kirkkausaste [ei yksikköä]
I	mitattu säteilyenergia horisontaaliselle pinnalle [J/m ²]
I_0	teoreettinen säteilyenergia horisontaaliselle pinnalle [J/m ²]
I_b	suoran säteilyn energia [J/m ²]
I_d	hajasäteilyenergia [J/m ²]
$I_{\text{g-r}}$	maasta heijastunut säteilyenergia [J/m ²]
I_T	säteilyenergia kaltevalle pinnalle [J/m ²]
m	ilmamassa [ei yksikköä]
h	korkeus merenpinnasta [m]
ρ_g	maan heijastuskerroin [ei yksikköä]
α_p	profiilikulma [°]
α	varjostuskulma [°]
γ_s	auringon atsimuuttikulma [°]
V_{oc}	avoimen piirin jännite [V]
I_{sc}	oikosulkuvirta [A]
I_{MPP}	maksimitehon jännite [V]
V_{MPP}	maksimitehon virta [A]
T_a	ympäristön lämpötila [°C]
T_c	aurinkokennon lämpötila [°C]
v_w	tuulennopeus [m/s]
η_{euro}	eurooppalainen hyötysuhde [ei yksikköä]

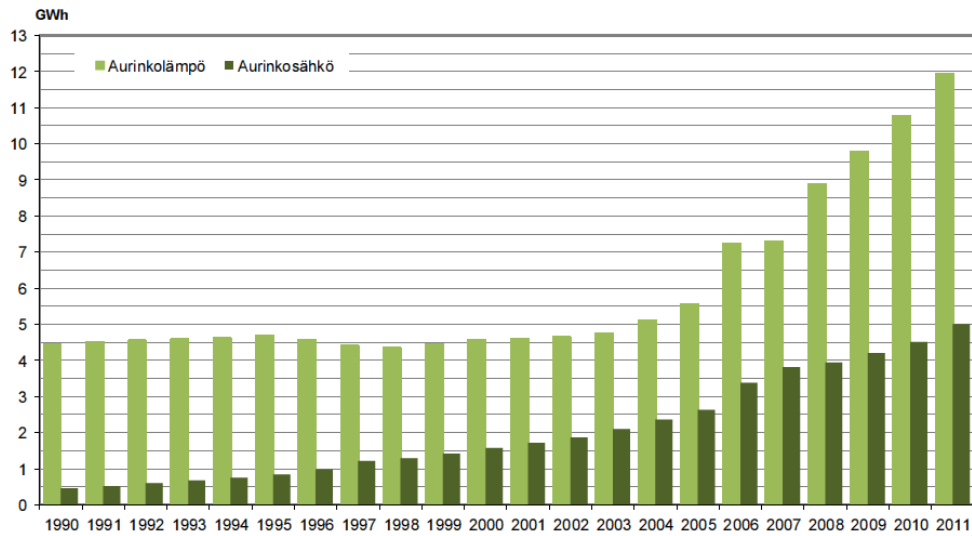
1 Johdanto

EU:n ilmasto- ja energiapaketissa [1] on asetettu tavoitteeksi, että 20 prosenttia EU:n sisällä tuotetusta energiasta on peräisin uusiutuvista energialähteistä vuoteen 2020 mennessä. Direktiivissä asetetut maakohtaiset tavoitteet vaihtelevat riippuen maan lähtötasosta ja uusiutuvan energian potentiaalista. Suomen tavoitteena on nostaa uusiutuvan energian osuus 38 prosenttiin energiankulutuksesta [1]. Vuonna 2011 uusiutuvilla energiamuodoilla tuotettiin 28% energian kokonaiskulutuksesta [2]. Osuus on kasvanut noin prosentin vuosivauhtia vuodesta 2009 lähtien, joten vuoden 2020 tavoitteeseen on paljon kirittävää.

Noin puolet Suomessa energiantuotantoon käytetystä uusiutuvasta energiasta on peräisin metsäteollisuuden jäteliemistä ja puun pienkäytöstä [2]. Myös vesivoimalla on ollut Suomessa pitkään vakaa asema; sen osuus uusiutuvan energian tuotannosta on noin 11% [2]. Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2011 marginaalinen 0,4%:n osuus uusiutuvasta energiasta [2], mutta vuoden 2020 tavoitteiden saavuttamisessa tuulivoimalle on suunniteltu keskeistä osaa. Aurinkoenergian hyödyntäminen on sen sijaan jäänyt vähemmälle: vuonna 2011 aurinkoenergian osuus uusiutuvan energian kulutuksesta oli vajaat 0,2% [2], josta vajaat 30% koostui aurinkosähköstä [3]. Kustannusten lisäksi aurinkoenergian yleistymistä hidastaa uskomus siitä, ettei Suomen leveyspiirialueella saada tarpeeksi auringon säteilyä, jotta energiantuotanto aurinkoteknologialla olisi kannattavaa. Suomen säteilyolosuhteet ovat kuitenkin vain noin viidenneksen heikommät kuin Keski-Euroopassa, jossa aurinkoenergiaa käytetään paljon [3].

Kuvasta 1 voidaan havaita, että aurinkolämmön ja -sähkön suosio on 2000-luvun alusta lähtien ollut tasaisessa kasvussa. Aurinkoenergia on löytänyt jalansijan erityisesti suomalaisessa mökkikulttuurissa: kesämökit sijaitsevat usein asutusalueiden ulkopuolella, saarissa ja syrjäisillä rannikoilla, missä sähköverkkoon liittyminen on huomattavasti kalliimpaa kuin omavarainen lämmön ja sähkön tuottaminen aurinkoenergialla. Sama pätee haja-asutusalueisiin. Teoriassa ei kuitenkaan ole mitään estettä sille, etteikö energiantuotanto aurinkoteknologialla voitaisi lisätä myös sähköverkoston kattamilla alueilla.

Yhdeksi aurinkoenergian heikkouksista on mainittu paneelien tilantarve: Suomen oloissa jokainen neliömetri vastaanottaa auringonsäteilyä keskimäärin noin 1000 kWh vuodessa ja tyypillisen aurinkopaneelin hyötysuhde on noin 15%, joten aurinkoenergian tilantarve Suomen oloissa on noin 150 kWh/m² vuodessa, eli keskimäärin noin 0,41 kWh/m² päivässä. Mikäli esimerkiksi 860 MW:n teholla ympäri vuorokauden toimiva Olkiluoto 1 -ydinvoimala haluttaisiin korvata aurinkopaneelilla, tarvitsisi aurinkosähkövoimala pinta-alaa noin $(860 \cdot 10^3 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h}) / 0,41 \text{ kWh/m}^2 \approx 50 \text{ km}^2$. Tämä on noin 500-



Kuva 1: Aurinkoteknologialla tuotettu energia Suomessa vuosina 1990–2011 [3]

kertainen alue ydinvoimalan tarvitsemaan pinta-alaan verrattuna, mikäli ydinvoimalan vaatiman polttoaineen kaivospinta-alaa ei oteta huomioon. Urbaani ympäristö tarjoaa kuitenkin paljon aurinkoteknistä potentiaalia, sillä rakennusten katoilla tuotettu energia ei vaatisi uutta pinta-alaa ja energiantuotanto tapahtuisi lähellä kuluttajaa. Aurinkoenergiaa on jo hieman hyödynnettykin myös urbaanissa ympäristössä, muun muassa viime vuosina rakennetuissa passiivi- ja nollaenergiataloissa. Tämän tutkielman tarkoituksena on kuitenkin tarkastella aurinkoenergian teknistä potentiaalia jo rakennetussa ympäristössä, jossa kattopintoja ei ole suunniteltu aurinkoenergian tuotantoa ajatellen.

Tavoitteena on selvittää keskimääräisen kotitalouden energiankulutukseen verraten, millaisissa rakennuksissa ja millaisella teknologialla aurinkoenergian käyttö olisi kannattavaa jo rakennetussa ympäristössä, ja voidaanko katolle asennetulla aurinkosähköjärjestelmällä saavuttaa rakennuksen omavaraisuus kausi- tai vuositasolla. Tutkielmassa on hyödynnetty Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen katolla sijaitsevan sääaseman tallentamaa säteily-, tuuli- ja lämpötila-aineistoa ja tarkastelun kohteeksi on valittu viisi alle 1,5 kilometrin etäisyydellä sääasemasta sijaitsevaa rakennusta. Rakennukset edustavat erityyppisiä kattoratkaisuja perinteisistä tasa- ja harjakatoista pulpettikattoihin.

Tarkastelun kohteena on suurin mahdollinen tuotto, joka tietynmalliselta ja -kokoiselta kattopinnalta on saatavissa, ja siten tarkastelussa ei ole otettu huomioon rakennuskohtaisia ilmaputkistojen ja muiden rakennusteknisten kattoesteiden vaikutusta paneelien sijoitteluun tai kokonaistuottoon.

Aurinkosähköistä potentiaalia tarkastellaan kussakin kohteessa kuukausi-, vuosineljännes- ja vuositasolla kolmella eri paneeliratkaisulla. Eri paneeliratkaisut on valittu siten, että ne edustavat suurinta mahdollista energia-tuottoa, kustannustehokkainta ratkaisua ja halvinta vaihtoehtoa. Kunkin kohteen tuottoa verrataan kyseisen kohteen laitesähkönkulutukseen. Laite-sähkönkulutukseen lasketaan sähkö, jonka käyttökohteena on valaistus sekä talouden sähköllä toimivat laitteet. Asuntokohtaisen laitesähkönkulutuksen perustana käytetään kolmen hengen tavallisen varustelutason taloutta, jonka laitesähkönkulutus oli vuonna 2011 noin 2400 kWh vuodessa [4]. Tavalliseen varustelutasoon kuuluu jääkaappipakastin, sähköliesi, astianpesukone, keit-tiön pienkoneet, pyykinpesukone, LCD-televisio sekä laajakaistayhteydellä varustettu tietokone [4]. Sen sijaan sauna, kuivauskone ja lattialämmitys eivät kuulu tavalliseen varustelutasoon kerrostaloasunnossa [4]. Laitesähkönkulu-tuksen voidaan olettaa pysyvän likimain vakiona ympäri vuoden, ja se sopii siten hyvin aurinkosähkön tuoton vertailukohteeksi.

Lämmitykseen vaadittavaa energiaa ei ole sisällytetty kohteiden kulutuk-seen, sillä noin 77% asuinkerrostalojen lämmityksestä tuotettiin kaukoläm-möllä vuonna 2012 [2]. Useimpien kerrostaloasuntojen sähkönkäyttö koostuu siten lähes kokonaan laitteiden sähkönkäytöstä. Vuonna 2013 kaukolämmön tuotannosta noin 73% oli yhteistuotantoa ja noin 29% kaukolämmöstä tu-otettiin uusiutuvilla polttoaineilla [5]. Uusiutuvien polttoaineiden osuus on kasvanut keskimäärin noin 2,5 prosentin vuosivauhtia viimeisten kymmenen vuoden ajan [5], joten kaukolämpö on energiatehokas ja kasvavissa määrin uusiutuvilla polttoaineilla tuotettu lämmitysmuoto.

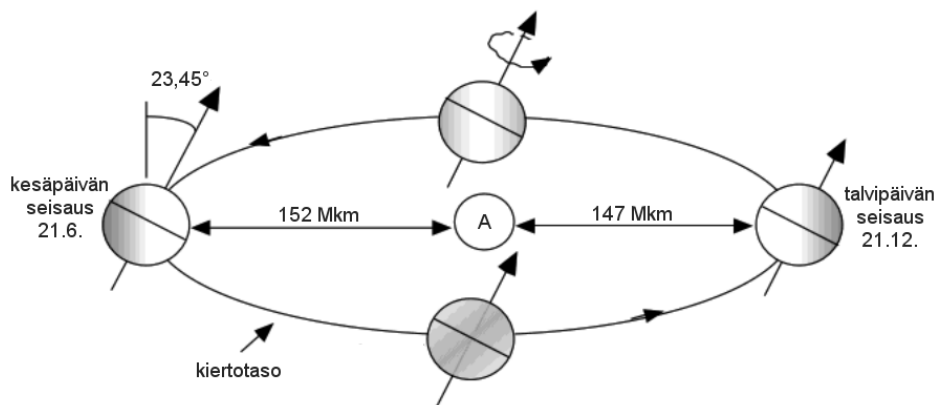
Tarkastelu etenee vaiheittain aurinkosähkön teoreettisen taustan esitte-lystä tutkimuskohteiden esittelyyn ja tuloksiin. Luvuissa 2–4 tarkastellaan maanpinnalle ja keräintasoon saapuvan säteilyn määrää. Laskennassa hyödyn-nytn aineiston mittaukseen liittyviä tekijöitä käsitellään luvussa 3. Luvussa 5 tarkastellaan aurinkosähkön tuotantoon vaikuttavia tekijöitä, kuten aurinko-sähköpaneelin toimintaa ja olosuhteiden vaikutusta paneelin suorituskykyyn. Tutkimuksen kohteena olevat rakennukset ja paneelit esitellään luvussa 6. Tuloksia päästään tarkastelemaan luvussa 7, jossa esitetään ensin kustannus-tehokkaimmalla paneeliratkaisulla ja vuoden 2010 säteilyaineistolla saatavat tuotot, jonka jälkeen tarkastellaan tuoton vuosittaista vaihtelua ja paneeli-valinnan vaikutuksia. Lopuksi tarkastellaan yleisemmin tuoton riippuvuutta kattopinnan suunnasta ja kulmasta, sekä arvioidaan laskennan tarkkuutta mal-lintamalla olemassaolevan aurinkosähköjärjestelmän tuottoja ja vertaamalla niitä mitattuihin arvoihin.

2 Ilmakehän ulkopuolinen auringon säteily

Kun puhutaan auringon säteilystä, tarkoitetaan tyypillisesti sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on välillä $0,25\text{--}3,0\ \mu\text{m}$, sillä tämä alue sisältää 98% säteilyn sisältämästä energiasta [6]. Säteilyn sisältämä energia on keskittynyt voimakkaimmin näkyvän valon alueelle; peräti 65,6% säteilyn sisältämästä energiasta sisältyy aallonpituusvälille $0,38\text{--}0,75\ \mu\text{m}$ [6]. Auringon säteilemä energia on lähestulkoon vakio. Maahan kulkeutuvan säteily määrään vaikuttaa kuitenkin esimerkiksi maan ja auringon välinen etäisyys, joka muuttuu vuodenaajan mukaan.

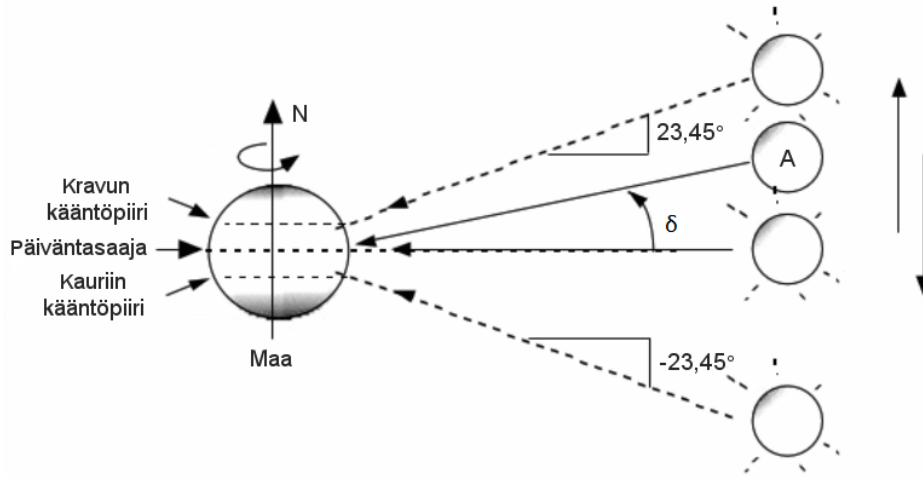
2.1 Auringon ja maan välinen geometria

Maa kiertää aurinkoa $23,45$ asteen kulmassa kiertotasoonsa nähden. Tämä kallistuskulma aiheuttaa maapallolle vuodenaikojen vaihtelut, sillä kallistuskulmasta johtuen maasta havaittu auringon kulku taivaankannen yli vaihtelee vuodenaajan mukaan: Kesäpäivän seisauksen aikaan, 21.–22. kesäkuuta, maan pohjoispuoli on kallistuneena aurinkoon päin ja pohjoispuolelta havaittuna aurinko saavuttaa suurimman mahdollisen korkeuskulmansa taivaalla. Kesäpäivän seisauksen jälkeen auringon saavuttama korkeuskulma hiljalleen pienenee ja aurinko kulkee nopeammin taivaankannen yli, lyhentäen päiviä ja pidentäen öitä. Vuoden lyhin päivä saavutetaan maan pohjoispuolella eteläpuolen ollessa kallistuneena aurinkoon päin talvipäivän seisauksen aikaan, 21.–22. joulukuuta, jonka jälkeen päivä alkaa taas pidentyä. Maan liikkeitä auringon ympäri on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Maan kiertorata auringon ympäri [7]

Maan ja auringon välistä geometriaa voidaan kuvata myös maasta tehtyjen havaintojen kannalta yhtäpitävällä liikemallilla, jonka geometriaa on



Kuva 3: Deklinaatiomalli auringon ja maan väliselle geometrialle [7]

havainnollistettu kuvassa 3. Malli kuvaa maapallon akselinsa ympäri pyörivänä, liikkumattomana kappaleena, jonka suhteen aurinko liikkuu hitaasti ylös ja alas vuodenaikojen mukaan. Aurinko saavuttaa korkeimman kohtansa, $23,45^\circ$:n kulman päiväntasaajaan nähden, kesäpäivän seisauksen aikaan, jolloin auringon ja maan keskipisteet yhdistävä jana leikkaa Kravun kääntopiirin. Vastaavasti matalimman kohtansa, $-23,45^\circ$:n kulman, aurinko saavuttaa talvipäivän seisauksen aikaan keskipisteitä yhdistävän janan leikatessa Kauriin kääntopiirin. Auringon kulmaa päiväntasaajaan nähden kutsutaan deklinaatioksi, ja sille on määritelty lauseke [6]

$$\delta = \frac{180^\circ}{\pi} (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B), \quad (1)$$

missä B kuvaa maan sijaintia auringon ympäri kiertävällä radalla ja se voidaan ilmaista päiväluvun $1 \leq n \leq 365$ avulla muodossa [6]

$$B = (n - 81) \frac{360^\circ}{365}. \quad (2)$$

2.2 Aurinkoaika

Auringon säteilyyn liittyvät suureet perustuvat aurinkoaikaan tuntikulman ω avulla, joka kuvaa auringon poikkeamaa paikalliselta pituuspiiriltä. Koska aurinko on havaitsijan pituuspiirillä aurinkoaikaan keskipäivällä ja maa pyörähtää akselinsa ympäri 15° tunnissa,

$$\omega = (\text{aurinkoaika} - 12) \cdot 15 \frac{^\circ}{\text{h}}. \quad (3)$$

Tuntikulma on siten negatiivinen aamupäivällä, positiivinen iltapäivällä ja voi saada arvot väliltä $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$.

Aurinkoaika perustuu maapallolla havainnoidulle auringon liikkeelle taivaankannen ylitse. Aurinkoajan keskipäivä on se ajankohta, jolloin aurinko on havaitsijan pituuspiirillä. Aurinkoajan suhde kelloaikaan muuttuu päivittäin auringon ja maan välisen suhteellisen liikkeen johdosta. Mikäli kelloajassa ei huomioida kesäaikaan siirtymistä, aurinkoajan ja kelloajan ero minuutteina on [8]

$$\text{Aurinkoaika} - \text{kelloaika} = 4 \frac{\text{min}}{\circ} L_{\text{loc}} - L_{\text{tz}} + E, \quad (4)$$

missä L_{loc} on havaitsijan pituuspiiri, L_{tz} on havaitsijan aikavyöhyke (2·60 min) ja E on maan pyörimisnopeuden vaihtelun huomioon ottava tekijä, joka voidaan ilmaista B :n avulla muodossa [6]

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B)(\text{min}). \quad (5)$$

2.3 Säteily horisontaaliselle pinnalle

Maanpinnalle saapuvan säteilyn määrään vaikuttaa maapallon kiertoradan elliptisyys: maan ja auringon välinen etäisyys vaihtelee vuoden aikana noin 1,7% keskiarvostaan, mikä aiheuttaa säteilytiheyden $\pm 3,3\%$:n vaihtelun vuodessa [6]. Säteilyn riippuvuutta vuodenajasta voidaan kuvata yhtälöllä [9]

$$G_{\text{on}} = G_{\text{sc}}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B), \quad (6)$$

missä aurinkovakio G_{sc} kuvaa keskimääräisellä aurinko-maa etäisyydellä auringosta tulevaa säteilyenergiaa säteilyä vastaan kohtisuoralle tasolle. Aurinkovakiolle on esitetty muutamia toisistaan eriäviä arvoja, jotka asettuvat välille 1353 – 1373 W/m². World Radiation Center (WRC) on hyväksynyt arvoksi 1367 W/m² [6], joten tässä työssä käytetään samaa arvoa.

Maan pinnalla sijaitseva taso ei kuitenkaan aina ole kohtisuorassa auringon säteilyä vastaan, vaan säteilyn tulokulma riippuu tason asennosta ja paikasta maan pinnalla, sekä maan asennosta aurinkoon nähden. Maanpinnalla sijaitsevaa tasoa voidaan kuvata kahdella keskeisellä muuttujalla: tason ja maanpinnan välisellä kallistuskulmalla sekä tason atsimuuttikulmalla, eli tason normaalin horisontaaliprojektion poikkeamalla paikallisesta pituuspiiristä. Tason atsimuuttikulma on negatiivinen etelästä itään päin ja positiivinen etelästä länteen, ja voi siten saada arvot väliltä $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Säteilyn tulokulma maan pinnalla sijaitsevalle tasolle voidaan ilmaista kallistuskulman

β , atsimuuttikulman γ , deklinaatiokulman δ , tuntikulman ω ja havaitsijan leveyspiirin ϕ avulla muodossa [6]

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Jos tarkastellaan säteilyä maanpinnalla sijaitsevalle horisontaaliselle tasolle, niin säteilyn tulokulma ilmoitetaan zenittikulmalla θ_z , joka voidaan ratkaista yhtälöstä 7 asettamalla $\beta = 0$, jolloin

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (8)$$

Zenittikulman arvo lasketaan pinnan normaalin suhteen, ja siten zenittikulma voi saada arvot $0^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$ auringon ollessa horisontin yläpuolella.

Nyt säteily maanpinnalla sijaitsevalle horisontaaliselle pinnalle voidaan ilmaista yhtälön 6 ja zenittikulman avulla muodossa [6]

$$G_0 = G_{0n} \cos \theta_z. \quad (9)$$

Tämä yhtälö antaa suurimman mahdollisen säteilyn, joka maanpinnalla sijaitsevalle horisontaaliselle tasolle voisi saapua ilman ilmakehän vaimentavaa vaikutusta.

3 Maanpinnalle tuleva säteily

Kaikki teoreettisesti mahdollinen säteily ei saavu maanpinnalle asti, sillä säteily vaimenee ilmakehän läpi kulkiessaan. Kaksi merkittävintä syytä säteilyn vaimenemiseen ovat säteilyn siroaminen ja absorptio ilmakehässä [6].

3.1 Absorptio ja Rayleigh'n sironna ilmakehässä

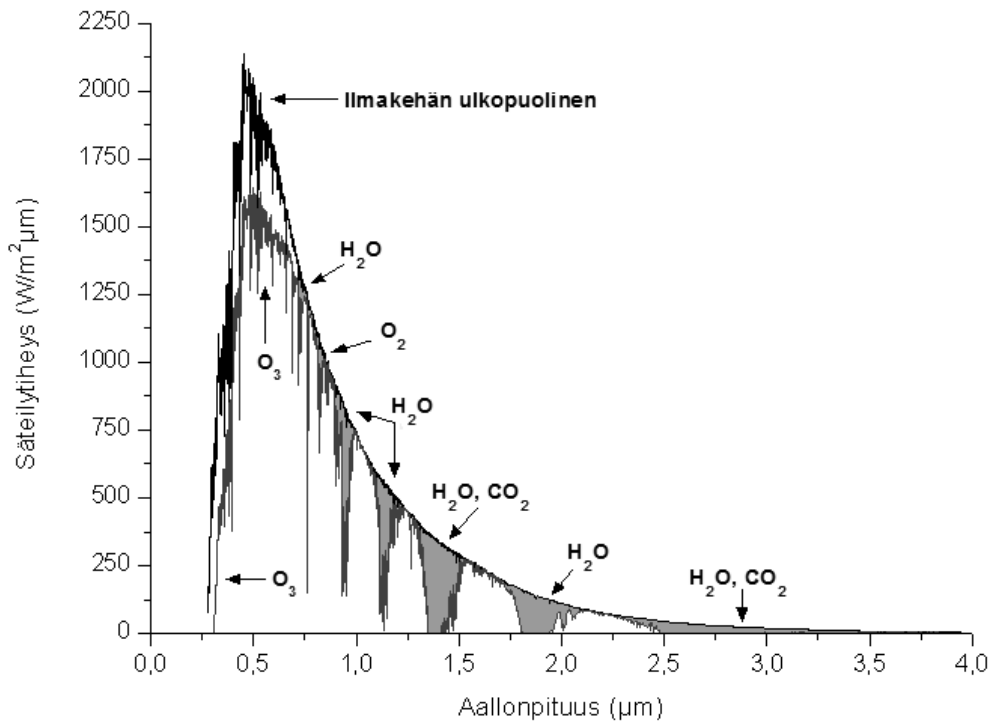
Säteilyn siroaminen ilmakehässä johtuu säteilyn vuorovaikutuksesta ilmakehän kaasumolekyylien, pölyn sekä vesihöyryn ja -pisaroiden kanssa. Siroamisen määrä riippuu paitsi hiukkasmäärästä, jonka läpi säteilyn täytyy kulkea, myös hiukkasten suhteellisesta koosta verrattuna säteilyn aallonpituuteen. Siroaminen kaasumolekyyleistä on Rayleigh'n siroamisteorian mukaan kääntäen verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin, ja on näin ollen vastuussa vaimenemisesta lyhyillä, $\lambda < 0,6 \mu\text{m}$, aallonpituuksilla [6].

Säteilyä myös absorboituu ilmakehään. Ultravioletialueen ($\lambda < 0,35 \mu\text{m}$) absorptiosta on pääasiassa vastuussa otsonikerros, kun taas infrapuna-alueen säteilystä suuri osa absorboituu ilmakehän vesihöyryyn ja hiilidioksidiin; yli $2,5 \mu\text{m}$:n aallonpituusalue absorboituu lähes kokonaan ilmakehään [6]. Säteilyn vaimenemista ilmakehässä Rayleigh'n sironnan ja absorption johdosta on havainnollistettu kuvassa 4.

Siinä missä Rayleigh'n sironna on hyvin tunnettu ja sen vaikutukset ilmakehässä kulkevaan säteilyyn voidaan suhteellisen tarkasti määrittää, pölyn ja veden vaikutuksia säteilyyn on huomattavasti vaikeampi mallintaa, sillä pölyhiukkasten ja vesimolekyylien koko ja määrä ilmakehässä vaihtelee sijainnista ja ajankohdasta riippuen. Maanpinnalle saapuvan säteilyn määrä saadaankin parhaiten selville mittaamalla.

3.2 Auringon säteilyn mittaaminen

Maanpinnalle saapuva auringon säteily voidaan jakaa karkeasti suoraan säteilyyn ja hajasäteilyyn. Suora säteily on nimensä mukaisesti suoraan ilmakehän läpi saapunutta säteilyä. Ilmakehässä sironnutta säteilyn osaa kutsutaan hajasäteilyksi. Tyypillisimmin mittauksen kohteena on kuitenkin kokonaissäteily, joka sisältää sekä suoran että hajasäteilyn komponentit. Kokonaissäteilyn mittaukseen soveltuvaa mittalaitetta kutsutaan pyranometriksi. Tarkkuusmittauksiin ja tutkimuskäyttöön tarkoitettujen pyranometrien toiminta perustuu termopareilla mitattuun jännite-eroon säteilytetyn ja varjostetun detektorin osan välillä. Pyranometrin detektorilevy on asetettu puolipallon muotoisen lasikuvun sisään, joka suojaa levyä lämpötilan vaihteluilta ja tuulelta. Sää-tutkimuslaitteissa käytetään tyypillisesti halvempaa valodiodia, jonka virta



Kuva 4: Säteilyn absorptio ilmakehässä [6, 10]

on suoraan verrannollinen säteilyn intensiteettiin.

Tässä tutkielmassa käytetyt säteilyarvot ovat peräisin Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen katolla (noin 108 m mpy) sijaitsevalta Davis Vantage Pro 2TM -sääasemalta. Sääasema mittaa säteilyn lisäksi myös tuulennopeutta ja ulkolämpötilaa, joita on myös hyödynnetty tässä työssä. Mitatut arvot tallentuvat sääaseman konsolille minuutin välein, josta ne voidaan siirtää tietokoneelle ja tallentaa tekstitiedostona.

Kokonaissäteilyä mittaa sääaseman valodiodipyranometri, jonka spektrivaste on alueella 0,4 – 1,1 µm. Tämä ei kata koko auringon spektriä, joka pääasiassa sijoittuu alueelle 0,3 – 3,0 µm, mutta kattaa lähes koko silikoniau-rinkokennon spektrivastealueen [6], mikä on tämän tutkielman tarkoituksellisesti kannalta oleellista. Pyranometrin kosinivasteen aiheuttamaksi epätarkkuudeksi on laitteen esitteessä ilmoitettu $\pm 3\%$ lukemasta tulokulmilla $0 \pm 70^\circ$ ja $\pm 10\%$ lukemasta tulokulmilla, jotka ovat välillä $\pm 70^\circ - \pm 85^\circ$. Tallennetut arvot ovat yhden yksikön tarkkuudella ilmoitettuja minuutin keskiarvoja.

Piipohjaisten valodiodien virta tyypillisesti pienenee lämpötilan kasvaessa, mikä aiheuttaa systemaattista virhettä pyranometrin lukemaan. Tämä virhe voidaan korjata, mikäli valodiodin ominaisuudet tiedetään. Käytetyn

pyranometrin esitteessä on annettu näyttämän lämpötilakorjauskertoimeksi 0,12 %/°C. Korjaus on negatiivinen lämpötiloille jotka ylittävät 25 asteen viitelämpötilan ja positiivinen viitelämpötilaa alhaisemmille lämpötiloille.

Ulkolämpötilaa mittaa platinasta valmistettu vastuslämpötila-anturi, jonka tarkkuudeksi ilmoitetaan esitteessä $\pm 0,5$ °C. Tallentuvat lämpötila-arvot ovat minuutin keskiarvoja ja ne ilmoitetaan asteen kymmenesosan tarkkuudella.

Sääaseman kuppianemometri mittaa tuulennopeutta maileina tunnissa ja muuntaa mitatut arvot metreiksi sekunnissa, pyöristäen lähimpään kymmenesosaan. Mittausalueen alaraja on $\pm 0,5$ m/s ja anemometrin tarkkuudeksi ilmoitetaan esitteessä ± 1 m/s tai $\pm 5\%$ lukemasta, riippuen siitä kumpi antaa suuremmat virherajat.

Aurinkosähköpaneelin tehontuottolaskuissa (luku 5.2.2) esiintyvä tuulennopeus on määritelty tuulennopeudeksi viitekorkeudessa (10 m). Maanpinnan aiheuttamasta kitkasta johtuen tuulennopeus kasvaa maanpinnan yläpuolella, joten laitoksen katolla mitatut tuulennopeudet tuli muuttaa viitekorkeudelle. Tähän käytettiin tuulen logaritmiyhtälöä [7]

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)}, \quad (10)$$

missä v ja H ovat mitattu tuulennopeus ja mittauskorkeus, v_0 on tuulennopeus standardikorkeudessa H_0 ja z on maaston rosoisuutta kuvaava vakio. Tässä tutkielmassa rosoisuusvakiolle on käytetty arvoa $z = 1,5$, joka vastaa tiivisti rakennettua asuinalueita [11] ja kuvaa siten hyvin tutkielman kohteena olevaa urbaania ympäristöä.

3.3 Aineiston valinnasta ja käsittelystä

Sääasema on tallentanut mittausaineistoa muutamien vuosien ajan. Vertailemalla vuosikohtaisia aineistoja havaittiin, että vuosikohtaiset säteilysummat eivät juurikaan eroa toisistaan; vuosien 2009–2013 keskihajonta on noin 20 kWh. Vuosien välillä oli kuitenkin havaittavissa selkeitä kausikohtaisia vaihteluita. Näiden havaintojen perusteella tutkielmassa käytettäväksi tausta-aineistoksi valittiin kaksi vuotta, joiden vuosikohtaisten säteilysummien ero on lähellä vuosien 2009–2013 keskihajontaa, ja joiden kausikohtaiset vaihtelut ovat selkeitä. Näin voidaan tarkastella sekä pidemmän aikavälin vuosikohtaista hajontaa että kausikohtaisten vaihteluiden vaikutuksia.

Valituilta vuosilta puuttui muutaman päivän verran aineistoa laitteiston seisokkiaikojen ja huoltotöiden vuoksi. Koska aineiston puuttuminen erityisesti kesäaikaan voi vaikuttaa merkittävästi lopputuloksiin, on puuttuvaa aineistoa

täydennetty keskiarvoistamalla seisokkiväliä edeltävän ja seuraavan kokonaisen mittauspäivän aineistot.

Sääasema on voinut tallentaa positiivisia säteilyarvoja myös juuri ennen auringonnousua ja jonkin aikaa auringonlaskun jälkeen, sillä horisontin alapuolelta tuleva suora säteily voi sirota ilmakehässä horisontin yläpuolelle. Horisontin takaa tulevan säteilyn käsittely on kuitenkin ongelmallista, sillä pyranometrillä kosinivasteen aiheuttama virhe kasvaa merkittävästi jo auringon laskiessa lähelle horisonttia. Siten tarkastelussa käytetty aineisto rajattiin auringon nousu- ja laskuaikojen väliin, eli välille $-90^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$.

Valittujen vuosien kausi- ja vuosikohtaiset säteilysummat horisontaaliselle pinnalle on esitetty taulukossa 1. Kaudet on jaoteltu säteilyolosuhteiden suhteen symmetrisesti siten, että talvipäivänseisaus sijoittuu jotakuinkin talvikauden keskelle ja vastaavasti kesäpäivänseisaus kesäkauden keskelle. Säteilyaineistolle on tehty tarvittavat lämpötilakorjaukset, puuttuvan aineiston täydennykset ja rajaukset ennen summausta.

Taulukko 1: Tarkasteltavien vuosien säteilysummat horisontaaliselle pinnalle

Kausi	Säteily (kWh)	
	2010	2011
Talvi (tammi, marras–joulu)	9	10
Kevät (helmi–huhti)	300	366
Kesä (touko–heinä)	486	427
Syksy (elo–loka)	90	99
Summa	885	902

4 Keräintasoon tuleva säteily

Suora säteily saapuu maanpinnalle hyvin kapealta taivaankannen alueelta, kun taas hajasäteilyä siroaa maanpinnalle koko taivaankannelta. Auringon säteilyn jakaminen komponentteihinsa on tärkeää tarkasteltaessa kaltevalle pinnalle saapuvaa säteilyä, sillä pinnan kallistuskulma määrää sen, kuinka suurelta osalta taivaankantta pinta tulee vastaanottamaan säteilyä.

4.1 Kirkkausaste

Kokonaissäteilyn jakaminen suoraan säteilyyn ja hajasäteilyyn tehdään yleensä määrittämällä hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä. Osuutta voidaan arvioida kirkkausasteen k_T avulla, joka ilmaisee kuinka suuri osa säteilystä on vaimentunut sirotessaan ilmakehässä. Säteilyn siroaminen on sitä voimakkaampaa, mitä suuremman ilmamassan läpi säteilyn täytyy kulkea ja mitä enemmän ilmakehässä on pilviä, kosteutta ja pölyä. Tunnin tarkastelujaksolle määriteltynä

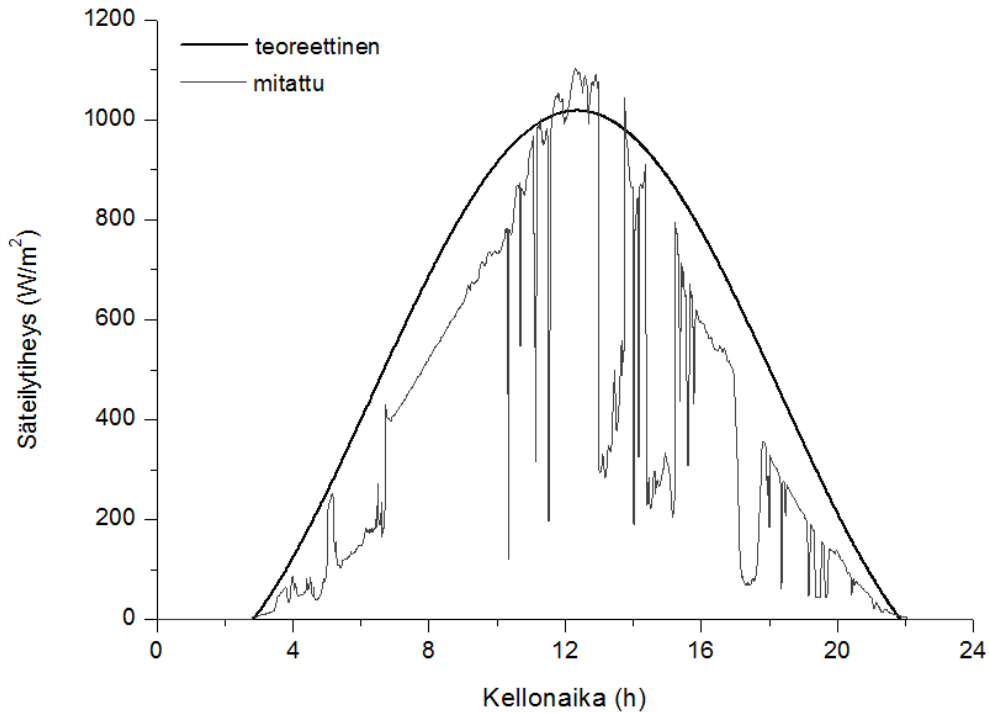
$$k_T = \frac{I}{I_0}, \quad (11)$$

missä I on mitattu, horisontaalitasolle tunnin aikana saapuva säteilyenergia ja I_0 on teoreettinen, suurin mahdollinen säteilyenergia horisontaalitasolle saman ajanjakson aikana. Koska sääasemasta saatu säteilydata koostuu minuutin aikaväleihin tallennetuista keskimääräisistä säteilyarvoista, saadaan tunnin mitattu säteilyenergia I kertomalla mitatut arvot 60 sekunnilla ja lasquemalla saadut arvot yhteen tunnin ajalta. I_0 saadaan integroimalla yhtälöä 9 tuntikulmien ω_1 ja ω_2 määräämän ajanjakson yli, jolloin saadaan

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{0n} \left(\frac{\pi \Delta \omega}{180} \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi \Delta \omega}{180} \sin \phi \sin \delta \right). \quad (12)$$

Muutamina päivinä esiintyi hetkiä, jolloin mitattu säteilytiheys ylitti teoreettisen, ilmakehään saapuvan säteilytiheyden arvon. Kuvassa 5 on esitetty vuoden 2011 erään heinäkuun päivän teoreettinen ja mitattu säteilytiheys. Teoreettisen säteilytiheyden ylittävä mitattu säteilytiheys on havaittavissa kuvasta keskipäivän tunteina. Mittaustuloksissa voi ilmetä kuvatulnainen ilmiö kirkkaana päivänä, kun säteilyä heijastuu pyranometrille ympäröivistä pilvistä. Mikäli pilviheijastusta tapahtuu riittävän kauan, myös tunnin säteilyenergia I voi ylittää teoreettisen säteilyenergian I_0 ja kirkkausaste voi saada arvon, joka on suurempi kuin 1. Koska määritelmän mukaan kirkkausasteen tulisi saada arvo väliltä $0 \leq k_T \leq 1$, yhden ylittävät kirkkausasteen arvot korjattiin ykkösiksi. Korjauksen aiheuttamalla virheellä ei ole käytännön merkitystä

tulosten kannalta, sillä ilmiötä esiintyy mittaustuloksissa harvoin ja se on mahdollinen ainoastaan kirkkaana päivänä auringon sijaitessa tyypillisesti korkealla taivaalla.



Kuva 5: Pilviheijastusten aiheuttama säteilytiheyden voimistuminen

4.2 Hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuudet

Hajasäteilyn määrän laskemiseen on kehitetty useita eri malleja. Mallien pohjina on käytetty eri tausta-aineistoja ja ne perustuvat eri syöttöparametreille. Useissa malleissa hajasäteilyn osuus perustuu ainoastaan kirkkausasteen arvoon, mutta on olemassa myös muutamia useamman parametrin malleja. Tässä tarkastelussa käytettiin Reindlin kahden parametrin hajasäteilymallia [12], sillä se on yksi harvoja hajasäteilymalleja, joiden tausta-aineisto ulottuu Suomen leveyspiirialueelle asti. Mallin tausta-aineisto on kerätty viidestä eri sijainnista eri puolilta Yhdysvaltoja ja Eurooppaa, leveyspiirialueelta $28 - 60^{\circ}\text{N}$. Tämä on merkittävää, sillä mitatulle aineistolle perustuvat säteilymallit antavat tarkkoja tuloksia ainoastaan sijaintikohtaisesti.

Reindlin kahden parametrin hajasäteilymallin mukaan hajasäteilyn osuus

voidaan laskea kirkkausasteen k_T avulla siten, että

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,02 - 0,254k_T + 0,0123 \sin \alpha_s & \text{kun } k_T < 0,3 \\ 1,4 - 1,749k_T + 0,177 \sin \alpha_s & \text{kun } 0,3 < k_T < 0,78, \\ 0,486k_T - 0,182 \sin \alpha_s & \text{kun } k_T > 0,78 \end{cases} \quad (13)$$

missä α_s on auringon korkeuskulma, eli auringon ja horisontaalitason välinen kulma. Koska zeniittikulma on määritelty auringon ja horisontaalitason normaalin väliseksi kulmaksi, on korkeuskulma siten zeniittikulman komplementti, eli $\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$.

Koska ilmamassa voidaan zeniittikulmavälillä $0^\circ \leq \theta_z \leq 70^\circ$ likimäärin ilmoittaa muodossa

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} = \frac{1}{\sin(90^\circ - \theta_z)} = \frac{1}{\sin \alpha_s} \quad (14)$$

ja kulmavälillä $70^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ muodossa

$$m = \frac{\exp(-0,0001184h)}{\cos \theta_z + 0,5057(96,080 - \theta_z)^{-1,634}}, \quad (15)$$

missä h on havainnoijan korkeus merenpinnasta, tarkastelemalla yhtälöitä 13-15 huomataan Reindlin mallin ottavan huomioon myös ilmamassan vaikutuksen. Tämä on merkittävää, sillä ilmamassa vaikuttaa hajasäteilyosuuteen erityisesti kirkkaalla säällä [13]. Mallit, jotka eivät ota ilmamassan vaikutusta huomioon, voivat yliarvioida säteilyä huomattavan paljon suurilla zeniittikulman arvoilla [14]. Suomessa aurinko pysyttelee suuren osan vuodesta matalalla, joten mallin luotettavuus suurilla zeniittikulmilla on tärkeää. Reindlin malli on hajasäteilymalleja vertailevissa tutkimuksissa useasti tunnustettu yhdeksi parhaista hajasäteilymalleista [14, 15], mikä kertonee osaltaan mallin soveltuvan käytettäväksi laajalla maantieteellisellä alueella ja erilaisissa ilmasto-olosuhteissa.

4.3 Säteily kaltevalle pinnalle

Säteily huolella valittuun kulmaan asetetulle kaltevalle pinnalle voi olla huomattavastikin suurempi kuin säteily horisontaaliselle pinnalle. Tämä johtuu siitä, että vaikka hajasäteilyä saapuu keräinpinnalle koko taivaankannelta, säteily ei ole isotrooppista, eli suunnasta riippumatonta, vaan merkittävä osa säteilystä saadaan horisontin läheisyydestä. Hajasäteilyä voidaankin kuvata paljon todellisemmassa valossa hajottamalla se kolmeen eri komponenttiin: isotrooppiseen, aurinkoa ympäröivään ja horisontin kirkastumisesta aiheutuvaan hajasäteilyyn. Isotrooppista hajasäteilyä voidaan ajatella tietynlaisena

”pohjasäteilynä”, joka siroaa samalla intensiteetillä koko taivaankannelta. Aurinkoa ympäröivä hajasäteily on ilmakehässä satunnaisen suunnan sijaan eteenpäin sironnutta säteilyä, joka saapuu nimensä mukaisesti keräinpinnalle kapealta, aurinkoa ympäröivältä taivaankannen alueelta. Aurinkoa ympäröivän hajasäteilyn intensiteetti heikentyy siirryttäessä kauemmas suoran säteilyn valokeilasta. Horisontin kirkastuminen johtuu maanpinnalta kertaalleen takaisin horisonttiin heijastuneesta säteilystä. Horisontin kirkastumisen vaikutus hajasäteilymäärään on merkittävä lähinnä selkeillä sääolosuhteilla eli silloin, kun kirkkausindeksi on korkea [6]. Pilvisellä säällä horisontin kirkastumisesta aiheutuva hajasäteilyn komponentti voi olla myös negatiivinen, koska tällöin säteilyn intensiteetti heikentymisen sijaan kasvaa siirryttäessä kauemmas horisontista. Tällöin voidaan puhua myös horisontin tummumisesta.

Suoran säteilyn ja hajasäteilyn lisäksi keräimelle saapuvan säteilyn intensiteettiin vaikuttaa myös maasta heijastunut säteily. Mikäli keräin on asetettu sellaiseen kulmaan että se ”näkee” suuren osan keräimen edessä olevasta pinnasta, voi maasta heijastuneella säteilyllä olla merkittäväkin vaikutus kokonaissäteilyn intensiteettiin. Esimerkiksi lumella on korkea heijastuskertoimen, joten pohjoisilla leveyspiireillä maasta heijastuneen säteilyn rooli on tyypillisesti merkittävin talvella.

Taivaan anisotrooppisuuden huomioon ottavia, kaltevalle pinnalle tulevan säteilyn laskemiseen tarkoitettuja malleja on kehitetty useita. Niistä tunnetuimpiin ja tunnistetuimpiin kuuluvat HDKR- (Hay, Davies, Klutcher, Reindl) [16] ja Perez-malli [17]. HDKR- ja Perez-mallit käsittelevät suoran ja maasta heijastuneen säteilyn komponentteja identtisesti, mutta Perez-malli tarkastelee hajasäteilykomponentteja HDKR-mallia yksityiskohtaisemmin ja ottaa suoraan huomioon esimerkiksi ilmamassan vaikutuksen. Tästä huolimatta Perez-mallin ei voida yksiselitteisesti sanoa olevan HDKR-mallia parempi, vaan mallien keskinäinen paremmuus on tapauskohtaista. Perez-mallia kuitenkin suositellaan käytettävän keräimille, joiden atsimuuttikulma eroaa merkittävästi etelästä [6]. Koska harjakatoille asetettujen keräimien atsimuuttikulman määrää katon lappeen suunta, sopii Perez-malli paremmin tämän tutkielman tarkoituksiin. Myös Suomessa tehty säteilymalleja vertaileva tutkimus on nostanut Perez-mallin parhaaksi mielivaltaisesti suunnatun kaltevan pinnan säteilymalliksi [18], joten mallin voidaan olettaa toimivan hyvin myös Suomen oloissa.

Perez-mallin mukaan kaltevalle pinnalle saapuva säteily voidaan ilmaista muodossa

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right). \quad (16)$$

Yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa suoran säteilyn osuutta,

keskimmäiset termit hajasäteilyn komponentteja ja viimeinen termi maasta heijastuneen säteilyn osuutta. Suoran säteilyn termissä kerroin R_b on geometrinen vakio

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}, \quad (17)$$

joka määrittää kaltevalle pinnalle saapuvan suoran säteilyn osuuden. Mikäli $\cos \theta < 0$ ($\theta > 90^\circ$), on myös R_b :n arvo negatiivinen ja aurinko on tällöin pinnan takana. Tällöin pinnalle ei saavu suoraa säteilyä, eli pinnan suhteen aurinko on laskenut. Pinnalle voi kuitenkin saapua hajasäteilyä ja maasta heijastunutta säteilyä, vaikka aurinko olisikin pinnan takana.

Taulukko 2: Perez-mallin kirkkaukertoimissa esiintyvät vakiot [6]

ϵ	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1,000–1,065	–0,008	0,588	–0,062	–0,060	0,072	–0,022
1,065–1,230	0,130	0,683	–0,151	–0,019	0,066	–0,029
1,230–1,500	0,330	0,487	–0,221	0,055	–0,064	–0,026
1,500–1,950	0,568	0,187	–0,295	0,109	–0,152	0,014
1,950–2,800	0,873	–0,392	–0,362	0,226	–0,462	0,001
2,800–4,500	1,132	–1,237	–0,412	0,288	–0,823	0,056
4,500–6,200	1,060	–1,600	–0,359	0,264	–1,127	0,131
6,200– ∞	0,678	–0,327	–0,250	0,156	–1,377	0,251

Hajasäteilyä kuvaavan osuuden ensimmäinen komponentti kuvaa isotrooppista säteilyä, toinen aurinkoa ympäröivää säteilyä ja kolmas horisontin kirkastumista. Isotrooppisen säteilyn komponentissa esiintyvä näkyvyyskerroin $(1 + \cos \theta)/2$ määrittelee, kuinka suuren osan isotrooppisesta taivaasta kalteva pinta ”näkee”. Aurinkoa ympäröivän säteilyn ja horisontin kirkastumisen komponenteissa esiintyvät kirkkaukertoimet F_1 ja F_2 määräytyvät siten, että

$$F_1 = \max \left[0, \left(f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180}f_{13} \right) \right] \quad (18)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180}f_{23},$$

joissa kirkkausparametri

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_0} \quad (19)$$

ja vakiot f_{11} , f_{12} , f_{13} , f_{21} , f_{22} ja f_{23} määräytyvät taulukosta 2 kirkkauskertoimen

$$\epsilon = \frac{\frac{I}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} \quad (20)$$

avulla. Aurinkoa ympäröivän säteilyn komponentissa a ja b valikoituvat siten, että

$$\begin{aligned} a &= \max(0, \cos \theta) \\ b &= \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z), \end{aligned} \quad (21)$$

jolloin suuren osan ajasta $a/b = R_b$.

Viimeinen osa yhtälöstä 16 kuvaa maasta heijastuvaa säteilyä. Näkyvyyskerroin $(1 - \cos \theta)/2$ määrittelee, kuinka suuren osan maasta kalteva pinta ”näkee”. Maasta heijastuvan säteilyn määrään vaikuttaa lisäksi maan heijastuskerroin ρ_g . Asutusalueiden katoilla sijaitsevat paneelit ”näkevät” lähinnä rakennusten kattoja, jotka rakennetaan nykyään pääosin värjätystä teräksestä, sekä melu- ja viihtyvyssyistä alueelle istutettuja lehtipuita. Olen siten käyttänyt tässä työssä heijastuskertoimen arvona kesällä spektripainotettua keskiarvoa tummanharmaan teräksen [19] ja lehtipuiden [20] heijastuskertoimista ($\rho_g \approx 0,24$) ja talvella spektripainotettua lumen heijastuskertoimen arvoa ($\rho_g \approx 0,58$) [20]. Pysyvä lumi saapuu keskimäärin 21.11. ja lähtee keskimäärin 25.4. [21], joten olen käyttänyt lumen heijastuskerrointa tällä aikavälillä.

5 Aurinkosähkön tuotanto

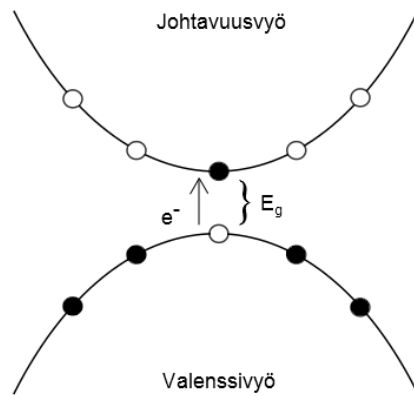
Aurinkosähkön tuottaminen perustuu auringon säteilyenergian hyödyntämiseen aurinkosähköpaneeliksi kutsutuilla laitteilla. Aurinkosähköpaneelit koostuvat aurinkokennoista, joihin osuessaan auringon säteily saa aikaan sähkövirran. Aurinkosähköpaneelien tuottama sähköteho riippuu paitsi paneelin ominaisuuksista ja paneelin pinnalle saapuvan säteilyenergian määrästä, myös sääolosuhteista. Lisäksi paneelien osittaisellakin varjostumisella voi olla suuri vaikutus paneeleista saataviin tuottoihin.

5.1 Aurinkokennojen toiminta

Aurinkosähköpaneelien toiminta perustuu puolijohteille. Puolijohteet saavat nimensä siitä, että niiden sähkönjohtavuus on huoneenlämpötilassa johteiden ja eristeiden välillä: absoluuttisessa nollapisteessä puolijohde on täydellinen eriste, mutta lämpötilan kasvaessa puolijohteen sähkönjohtavuus kasvaa. Tämä johtuu siitä, että puolijohteen johtavuusvyö on absoluuttisessa nollapisteessä tyhjä. Valenssi- ja johtavuusvyöiden välissä on energia-aukko, joka johtuu energiatiilojen kvantittumisesta; energia-aukon energiatiilat ovat ”kiellettyjä” tiloja. Johtavuusvyölle päästäkseen valenssivyöllä sijaitsevan elektronin on siten saatava tarpeeksi energiaa irrottautuakseen ytimeistään ja virittyäkseen johtavuusvyöllä sijaitsevaan energiatiilaan. Tämä energia voi tulla esimerkiksi lämmöstä, mutta aurinkosähkösovelluksissa virityksen lähteenä on pääosin aurinko. Yleisimmän aurinkokennojen raaka-aineen, piin, energia-aukko on noin 1,12 eV, mikä vastaa aallonpituutta 1,11 μm . Vain tätä lyhyemmät aallonpituudet auringon spektristä pystyvät siten virittämään piin elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle.

Johtavuusvyölle siirtynyt elektroni jättää valenssivyölle yhden elektronin vajeen, eli aukon, jota voidaan ajatella positiivisena alkeisvarauksena. Valenssivyön sidoksissa sijaitsevat elektronit voivat siirtyä täyttämään aukon, jolloin aukon täyttänyt elektroni jättää taakseen uuden aukon. Näin aukon voidaan ajatella liikkuvan valenssivyöllä paikasta toiseen samalla tavoin kuin elektronin johtavuusvyöllä, ja siten sekä elektronit että aukot toimivat varauksenkuljettajina puolijohteessa. Virittynyt elektroni kuitenkin pudottautuu lopulta johtavuusvyöltä takaisin valenssivyölle, hakeutuakseen takaisin pienimpään mahdolliseen energiatiilaan. Tällöin aukko ja elektroni yhdistyvät, eli rekombinoituvat, ja kumpikin lakkaa toimimasta varauksenkuljettajana. Elektronin virittymistä valenssivyöltä johtavuusvyölle on havainnollistettu kuvassa 6.

Puolijohdetta voidaan myös seostaa muilla aineilla johtavuuden parantamiseksi. Mikäli esimerkiksi piitä, joka on ryhmän IV alkuaine, seostetaan

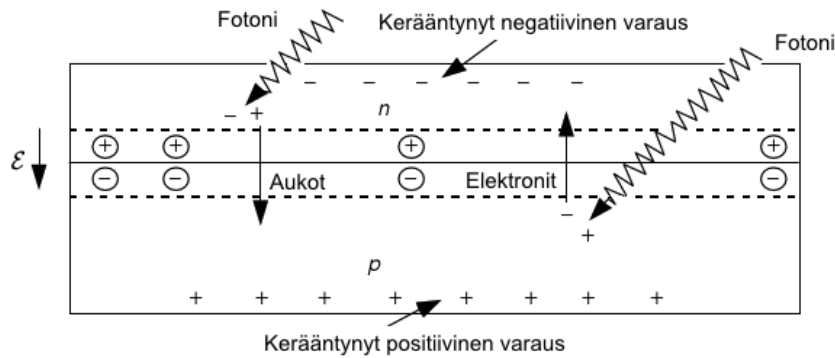


Kuva 6: Elektronin virittyminen valenssivyöltä johtavuusvyölle

jollakin ryhmän V alkuaineella, jää jokaisesta muodostuneesta sidoksesta yksi elektroni ylimääräiseksi. Yli jääneet elektronit ionisoituvat helposti alhaisissa-kin lämpötiloissa ja pystyvät liikkumaan vapaasti seostetussa puolijohdteessa. Vaihtoehtoisesti seostamiseen voidaan käyttää ryhmän III alkuainetta, jolloin syntyneisiin sidoksiin jää aukkoja. Aukot voivat liikkua paikasta toiseen virittyneen elektronin jälkeensä jättämän aukon tavoin, toimien siten positiivisina varauksenkuljettajina. Seostuksen tuloksena ylimääräisiä elektroneja sisältävää puolijohdetta kutsutaan n-tyyppin puolijohdeeksi; vastaavasti aukkoja sisältävää puolijohdetta kutsutaan p-tyyppin puolijohdeeksi. Piin seostamiseen käytetään tyypillisesti booria (V) tai fosforia (III) [7].

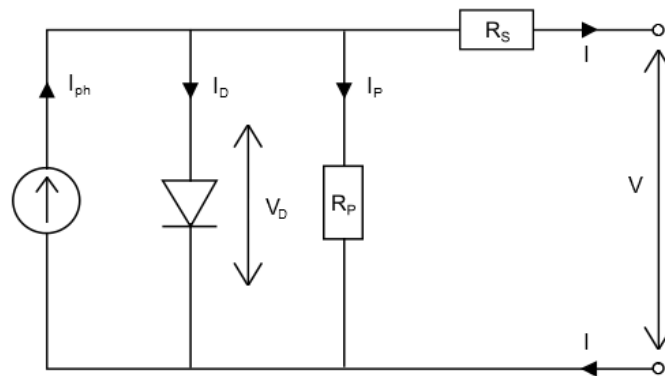
p- ja n-tyyppin puolijohdeiden liitoksella on luontainen kyky estää virittyneen elektronin rekombinaatio valenssivyölle syntyneen aukon kanssa. Varausetasapainon vuoksi elektroneja siirtyy liitoksen n-puolelta p-puolelle. p-puolelle siirtyneitä elektroneja kutsutaan p-tyyppin puolijohdeiden vähemmistövarauksenkuljettajiksi, sillä niitä on huomattavasti vähemmän kuin enemmistövarauksenkuljettajina toimivia aukkoja. Vastaavasti aukkoja siirtyy p-puolelta n-puolelle vähemmistövarauksenkuljettajiksi. Diffuusion johdosta liitoskohtaan syntyy voimakas sähkökenttä, joka vetää siirtyneitä varauksenkuljettajia diffuusiosuuntaa vastaan, kunnes tasapaino saavutetaan. Sähkökenttä vetää myös säteilyenergian johdosta syntyneiden varauksenkuljettajaparien osapuolet eri puolille liitosta, estäen rekombinaation. Eri puolille liitosta kertyvät vastakkaismerkkiset varaukset aiheuttavat p- ja n-puolten välille jännitteen. Jos p- ja n-puoli yhdistetään toisiinsa johtimella, elektronit kulkevat johdinta pitkin n-puolelta kuorman läpi p-puolelle, jossa ne rekombinoituvat aukkojen kanssa. Sähkökentän vaikutusta vähemmistövarauksenkuljettajien liikkeisiin on havainnollistettu kuvassa 7.

Koska diodi on pn-liitos, voidaan aurinkokennoa kuvata yksinkertaisella



Kuva 7: Vähemmistövarauksenkuljettajien ajautuminen eri puolille liitosta sähkökentän vaikutuksesta [7]

piirillä, jossa diodi ja virtalähde on kytketty rinnan. Tällöin virtalähteen piiriin syöttämä virta on verrannollinen kennolle tulevan säteilyn tiheyteen. Kun kennolle ei tule säteilyä, kennon käytös on hyvin samankaltainen kuin diodilla. Mallin todenmukaisuutta voidaan parantaa lisäämällä malliin sarjavastus R_s ja rinnakkaisvastus R_p . Sarjavastus kuvaa varauksenkuljettajien kokemaa jännitehäviötä niiden siirtyessä liitokselta johtimeen; rinnakkaisvastus kuvaa kennon reunoilta tapahtuvia vuotovirtoja. Mallin mukainen ekvivalenttipiiri on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Aurinkosähkökennon ekvivalenttipiiri

Kirchoffin ensimmäisestä laista piirille saadaan

$$I = I_{ph} - I_p - I_D, \quad (22)$$

missä I_{ph} on virtalähteen piiriin syöttämä virta, I_p on rinnakkaisvastuksen R_p läpi kulkeva virta ja I_D on diodin läpi kulkeva virta, jolle pätee Shockleyn

diodiyhtälö [7]

$$I_D = I_s \left(\exp \left(\frac{V_D}{m_D V_t} \right) - 1 \right), \quad (23)$$

missä I_s on diodin saturaatiovirta, V_D on diodin yli vaikuttava jännite, m_D on diodikerroin ja V_t on terminen jännite. Diodikerroin m_D kuvaa diodin ominaisuuksia ja ideaaliselle diodille $m_D = 1$. Terminen jännite V_t on muotoa [22]

$$V_t = \frac{kT}{e} \quad (24)$$

missä k on Boltzmannin vakio, T on lämpötila kelvineinä ja e on alkeisvaraus. Sijoittamalla yhtälö 23 yhtälöön 22 olettaen että $m_D = 1$, saadaan

$$I = I_{ph} - I_p - I_s \left(\exp \left(\frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right). \quad (25)$$

Yhtälöä 25 voidaan muokata laskennan kannalta yksinkertaisemmaksi tekemällä muutamia lisäoletuksia ja havaintoja. Esimerkiksi aurinkokennon sarjavastuksen resistanssi on milliohmin luokkaa, kun taas rinnakkaisvastuksen resistanssi on tyypillisesti $> 10 \Omega$. Rinnakkaisvastuksen läpi kulkee siten todellisuudessa hyvin pieni osa kokonaisvirrasta, joten rinnakkaisvastusta voidaan kohdella avoimena piirikytkentänä, jolloin $V_D = V + IR_s$. Lisäksi virtalähteen virta I_{ph} on käytännössä sama kuin piirin oikosulkuvirta I_{sc} ja riippumatta olosuhteista $\exp((V + IR_s)/V_t) \gg 1$, jolloin yhtälö 25 saadaan muotoon

$$I = I_{sc} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{V_t} \right) \right). \quad (26)$$

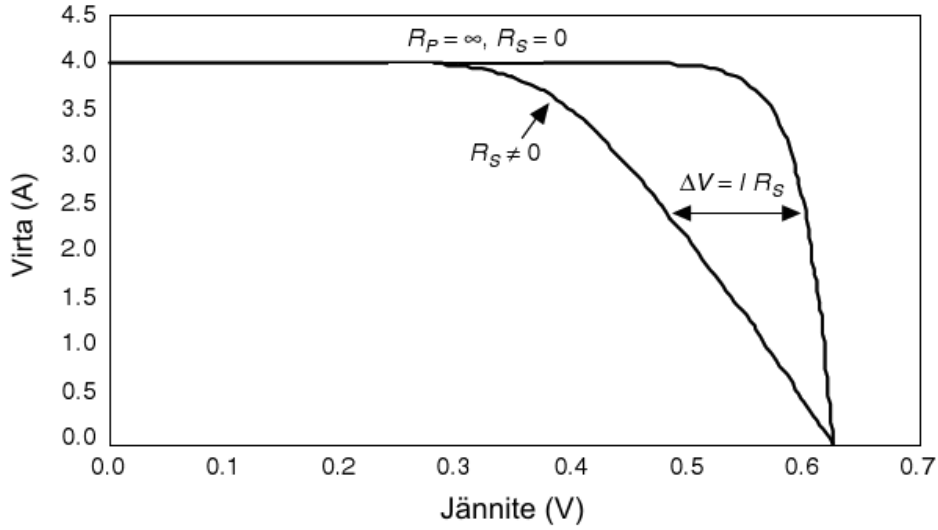
Kun piirissä ei kulje virtaa, eli $I = 0$, saadaan yhtälöstä 26 avoimen piirin jännitteelle

$$V_{oc} = V_t \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right). \quad (27)$$

Ratkaisemalla yhtälöstä 27 saturaatiovirta I_s ja sijoittamalla se yhtälöön 26, saadaan

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t} \right) \right]. \quad (28)$$

Tämä yhtälö on kuitenkin implisiittinen ja sen ratkaisu on mahdollista ainoastaan iteratiivisesti. Aurinkosähköpaneelin tuottama teho voidaan kuitenkin määrittää myös paneelin esitteestä löytyvillä tiedoilla täyttökertoimen FF avulla. Täyttökerroin kuvaa kennon olosuhteista riippuvan IV-käyrän



Kuva 9: Kennon IV-käyrän riippuvuus sarjaresistanssista [7]

”neliömäisyyttä”: paneelin sisäiset resistanssit loiventavat käyrälle ominaista kulmakohtaa, kuten kuvassa 9 on havainnollistettu. Koska teho riippuu sekä virrasta että jännitteestä yhtälön $P = VI$ mukaisesti, paneeli tuottaa sitä suuremman tehon mitä suurempi suorakulmio IV-käyrän alle mahtuu, ja maksimitehon tuottava toimintapiste on suorakulmion kulmapisteen sijainti IV-käyrällä. Tehon riippuvuus toimintapisteen sijainnista IV-käyrällä on esitetty kuvassa 10. Täyttökerroin on siten paneelin laadun mittari: paneeli jolla on suurempi täyttökertoimen arvo, pystyy tuottamaan samoissa olosuhteissa suuremman tehon. Täyttökerroin on määritelty standardiolosuhteissa $T^* = 25^\circ\text{C}$, $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ ja $m^* = 1,5$ siten, että [23]

$$\text{FF} = \frac{P_{\text{MPP}}}{V_{\text{oc}}I_{\text{sc}}} = \frac{V_{\text{MPP}}I_{\text{MPP}}}{V_{\text{oc}}I_{\text{sc}}} = (1 - r_s)\text{FF}_0, \quad (29)$$

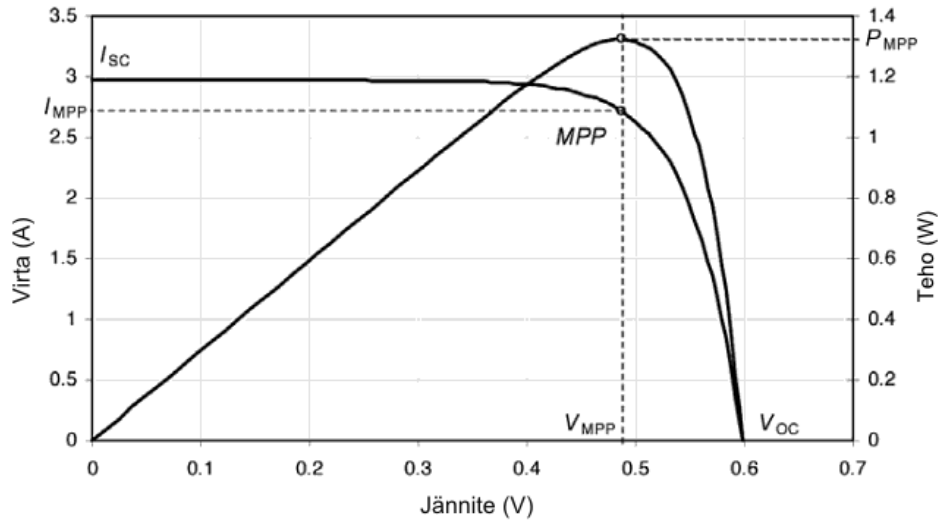
missä $r_s = R_s/(V_{\text{oc}}/I_{\text{sc}})$ on normalisoitu resistanssi ja

$$\text{FF}_0 = \frac{v_{\text{oc}} - \ln(v_{\text{oc}} + 0,72)}{v_{\text{oc}} + 1}, \quad (30)$$

missä $v_{\text{oc}} = V_{\text{oc}}/V_t$ on normalisoitu jännite. Paneelille ominainen sarjaresistanssi R_s voidaan ilmaista muodossa [22]

$$R_s = \left(1 - \frac{\text{FF}}{\text{FF}_0}\right) \frac{V_{\text{oc}}}{I_{\text{sc}}}. \quad (31)$$

Sarjaresistanssin voidaan olettaa pysyvän olosuhteista riippumatta likimain vakiona ja siten se voidaan ratkaista mielivaltaisille olosuhteille yhtälöiden 29–31 avulla käyttämällä valmistajan esitteestä löytyviä, standardiolosuhteille ominaisia arvoja V_{oc}^* ja I_{sc}^* . Yhtälöiden 29–31 tarkkuus on tyypillisesti



Kuva 10: Maksimitehon toimintapiste IV-käyrällä [8]

parempi kuin 1%, kun $v_{oc} > 15$ ja $r_s < 0,4$ [22]. Mikäli esitteessä on ilmoitettu myös maksimitehon toimintapisteen arvot V_{MPP}^* ja I_{MPP}^* , voidaan R_s arvioida suoraan yhtälöstä 28 muodossa [22]

$$R_s = \frac{V_{oc}^* - V_{MPP}^* + V_t \ln \left(1 - \frac{I_{MPP}^*}{V_{sc}^*} \right)}{I_{MPP}^*}. \quad (32)$$

5.2 Olosuhteiden vaikutus paneelien tuottoon

Paneelin tuottama sähköteho riippuu paneelin sisäisten ominaisuuksien lisäksi ympäristön olosuhteista, kuten keräinpinnalle saapuvan säteilyn voimakkuudesta ja suunnasta, paneelin pinnan pölyisyydestä, lämpötilasta ja tuulioloista.

5.2.1 Optiset häviöt ja pöly

Paneelin pintamateriaalin heijastus- ja läpäisykertoimien arvot riippuvat paitsi säteilyn tulokulmasta, myös keräinpinnan puhtaudesta; suuri tulokulma ja likainen keräinpinta pienentävät keräimen sisälle päätyvän säteilyn intensiteettiä. Keräinpinnan sisäpuolelle päätyvää säteilyä voidaan kuvata suhteellisen läpäisykerroimen avulla. Suhteellinen läpäisykerroin on normalisoitu kohtisuoran tulokulman läpäisyarvoon, ja se voidaan esittää suoralle säteilylle,

hajasäteilylle ja maasta heijastuneelle säteilylle vastaavasti muodossa [24]

$$\text{FT}_b(\theta) = 1 - \frac{\exp\left(-\frac{\cos\theta}{a_r}\right) - \exp\left(-\frac{1}{a_r}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{1}{a_r}\right)} \quad (33)$$

$$\text{FT}_d(\theta) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{a_r} (c_1 g_d + c_2 g_d^2)\right] \quad (34)$$

$$\text{FT}_{g_r}(\theta) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{a_r} (c_1 g_r + c_2 g_r^2)\right], \quad (35)$$

joissa

$$g_d = \sin\beta + \frac{\pi - \beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 + \cos\beta}, \quad (36)$$

$$g_r = \sin\beta + \frac{\beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 - \cos\beta} \quad (37)$$

ja suositellut arvot likaisuusparametreille a_r , c_1 ja c_2 on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Suositellut arvot optisten häviöiden laskemiseen [22]

likaisuusaste	$T_{\text{likainen}}(0)/T_{\text{puhdas}}(0)$	a_r	c_1	c_2
puhdas	1,00	0,17	$4/3\pi$	-0,069
alhainen	0,98	0,20	$4/3\pi$	-0,054
keskiverto	0,97	0,21	$4/3\pi$	-0,049
korkea	0,92	0,27	$4/3\pi$	-0,023

Yhtälöt 33–35 eivät ota huomioon likaisuuden vaikutusta pienellä tulokulmalla, vaan normalisoinnista johtuen $\text{FT}_b(0) = 1$. Pieni tulokulma voidaan kuitenkin huomioida erikseen pienen tulokulman suhteellisen läpäisykertoimen $T_{\text{likainen}}(0)/T_{\text{puhdas}}(0)$ avulla, jonka arvot eri likaisuusasteille löytyvät myös taulukosta 3. Näiden suhteellisten läpäisykertoimien avulla keräimen sisälle päätyvä suora säteily voidaan laskea muodossa [22]

$$G_{b,\text{eff}} = G_b \cdot \frac{T_{\text{likainen}}(0)}{T_{\text{puhdas}}(0)} \cdot \text{FT}_b(\theta). \quad (38)$$

Samoin hajasäteilyn ja maasta heijastuvan säteilyn komponenteille

$$G_{d,\text{eff}} = G_d \cdot \frac{T_{\text{likainen}}(0)}{T_{\text{puhdas}}(0)} \cdot \text{FT}_d(\theta) \quad (39)$$

ja

$$G_{g-r,\text{eff}} = G_{g-r} \cdot \frac{T_{\text{likainen}}(0)}{T_{\text{puhdas}}(0)} \cdot \text{FT}_{g-r}(\theta). \quad (40)$$

Paneelin tuottoon vaikuttaa myös aurinkokennon spektrivaste, jonka vaikutus eri säteilykomponentteihin voidaan ilmaista parametrien f_b , f_d ja f_{g-r} avulla siten, että [25]

$$G_{\text{eff}} = G_{b,\text{eff}}f_b + G_{d,\text{eff}}f_d + G_{g-r,\text{eff}}f_{g-r}. \quad (41)$$

Parametrit f_b , f_d ja f_{g-r} voidaan laskea käyttämällä yhtälöä

$$f_i = c_i \exp[a_i(k_T - 0,74) + b_i(m - 1,5)], \quad (42)$$

missä alaindeksi i viittaa säteilykomponenttiin ja paneelin valmistusmateriaalista riipuvat vakiot a_i , b_i ja c_i on esitetty yksikiteiselle, monikiteiselle ja amorfiselle piille taulukossa 4.

Taulukko 4: Vakiot spektriparametrien laskemiseen yksikiteiselle (mc-Si), monikiteiselle (pc-Si) ja amorfiselle (a-Si) piille [25]

		G_b	G_d	G_{g-r}
mc-Si	a	-0,313	-0,882	-0,244
	b	$5,24 \cdot 10^{-3}$	$-2,04 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^{-2}$
	c	1,029	0,764	0,970
pc-Si	a	-0,311	-0,929	-0,270
	b	$6,26 \cdot 10^{-3}$	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$
	c	1,029	0,764	0,970
a-Si	a	-0,222	-0,728	-0,219
	b	$9,20 \cdot 10^{-3}$	$-1,83 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$
	c	1,024	0,840	0,989

5.2.2 Säteilyn intensiteetti ja lämpötila

Merkittävin paneelin tuottoon vaikuttava ulkoinen tekijä on keräinpinnalle saapuva säteily. Tuotettu teho ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen säteilyn intensiteettiin, sillä virta ja jännite riippuvat säteilyn intensiteetistä eri

tavoin. Oikosulkuvirralle riippuvuus on lineaarinen, eli [22]

$$I_{sc}(G) = I_{sc}^* \frac{G_{eff}}{G^*}, \quad (43)$$

missä I_{sc}^* on standardiolosuhteissa mitattu, paneelikohtainen oikosulkuvirta, jonka arvo löytyy paneelin esitteestä.

Avoimen piirin jännitteen riippuvuus säteilyn intensiteetistä on logaritminen, eli [22]

$$V_{oc}(G) = V_{oc}^* + V_t \cdot \ln \left(\frac{G_{eff}}{G^*} \right), \quad (44)$$

missä V_{oc}^* on paneelille ominainen avoimen piirin jännite standardiolosuhteissa. Yhtälö 44 kuvaa hyvin avoimen piirin jännitteen riippuvuutta säteilyn intensiteetistä korkeilla säteilytiheyksillä, mutta se ei ota huomioon jännitteelle tyypillistä nopeaa pudotusta alhaisilla, alle 200 W/m^2 :n säteilyarvoilla. Käytöksen huomioon ottamiseksi voidaan yhtälöön 44 sisällyttää toinen logaritmitermi, jolloin [26]

$$V_{oc}(G) = V_{oc}^* \left[1 + \rho_{oc} \ln \left(\frac{G_{eff}}{G_{oc}} \right) \ln \left(\frac{G_{eff}}{G^*} \right) \right], \quad (45)$$

missä ρ_{oc} ja G_{oc} ovat empiirisesti määritettäviä vakioita; $\rho_{oc} = -0,04$ ja $G_{oc} = G^*$ pätevät useimmille piistä valmistetuille aurinkosähköpaneelille [22].

Piin termisten ominaisuuksien vuoksi myös lämpötilalla on merkittävä vaikutus paneelin suorituskykyyn. Oikosulkuvirran arvoon lämpötila vaikuttaa lineaarisesti. Lisäämällä yhtälöön 43 lineaarinen lämpötilatermi, saadaan [22]

$$I_{sc}(G, T_c) = I_{sc}^* \frac{G_{eff}}{G^*} \left[1 + (T_c - T^*) \frac{dI_{sc}}{dT_c} \right], \quad (46)$$

missä T_c on kennon lämpötila ja dI_{sc}/dT_c on paneelille ominainen lämpötilavakio, joka on tyypillisesti ilmoitettu paneelin esitteessä. Lämpötilavakion arvo on oikosulkuvirralla positiivinen, eli oikosulkuvirran arvo kasvaa lämpötilan kasvaessa. Lämpötilan vaikutus oikosulkuvirran arvoon on kuitenkin suhteellisen heikko.

Yhtälössä 46 esiintyvä kennon lämpötila T_c riippuu paitsi ympäröivän ilman lämpötilasta T_a , myös tuulennopeudesta v_w . Kennon lämpötila voidaan ilmoittaa muodossa [27]

$$T_c = T_m + \frac{G_{eff}}{G^*} \Delta T, \quad (47)$$

missä T_m on paneelin takapinnan lämpötila [27]

$$T_m = T_a + \frac{G_{\text{eff}}}{G^*} [T_1 \exp(b \cdot v_w) + T_2]. \quad (48)$$

Vakiot ΔT , T_1 , T_2 ja b ovat empiirisesti määritettyjä vakioita: ΔT kuvaa paneelin seinämien välistä lämpötilaeroa, T_1 määrittää lämpötilan ylärajan alhaisilla tuulennopeuksilla, T_2 määrittää lämpötilan alarajan korkeilla tuulennopeuksilla ja b kuvaa nopeutta, jolla paneelin lämpötila laskee tuulennopeuden noustessa. Vakioden arvot on esitetty taulukossa 5 kahdelle eri pintamateriaaliyhdistelmälle.

Taulukko 5: Lämpötilavakiot kahdelle eri paneelityypille [22]

etu-/takapinta	T_1	T_2	b	ΔT
lasi/lasi	25,0	8,2	-0,112	2,0
lasi/edlar	19,6	11,6	-0,223	3,0

Myös avoimen piirin jännite riippuu lineaarisesti lämpötilasta. Lisäämällä yhtälöön 45 lineaarinen lämpötilatermi, saadaan [22]

$$V_{oc}(G, T_c) = \left[V_{oc}^* + (T_c - T^*) \frac{dV_{oc}}{dT_c} \right] \left[1 + \rho_{oc} \ln \left(\frac{G_{\text{eff}}}{G_{oc}} \right) \ln \left(\frac{G_{\text{eff}}}{G^*} \right) \right], \quad (49)$$

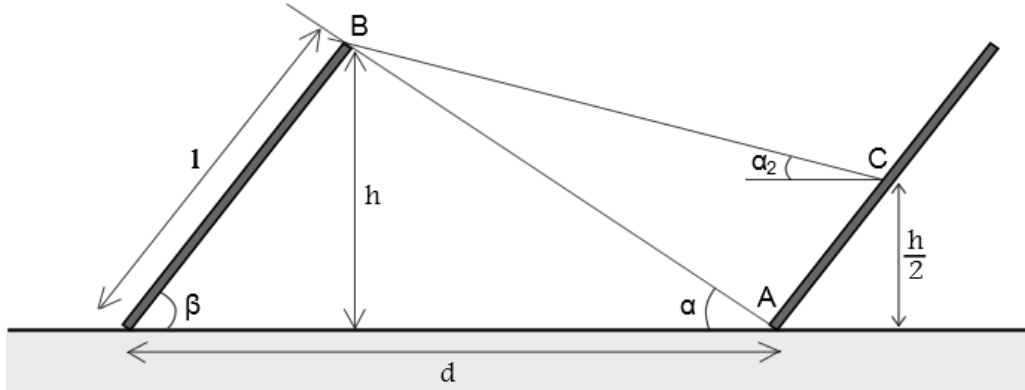
missä dV_{oc}/dT_c on paneelille ominainen lämpötilavakio, joka on tyypillisesti ilmoitettu paneelin esitteessä. Toisin kuin oikosulkuvirran tapauksessa, avoimen piirin jännitteen lämpötilavakio on negatiivinen, eli jännite pienenee lämpötilan kasvaessa. Lisäksi avoimen piirin jännitteen lämpötilavakion arvo on tyypillisesti itseisarvoltaan suurempi kuin oikosulkuvirran vastaava, eli jännite kärsii lämpötilan kasvamisesta enemmän kuin oikosulkuvirta hyötyy. Siten lämpötilan kasvulla on kaiken kaikkiaan tehontuottoa heikentävä vaikutus.

5.2.3 Varjostukset

Tasakatolle asennettujen paneelirivien keskinäinen varjostus vaikuttaa merkittävästi paneelipinta-alan tuottoon. Varjostuksen määrä riippuu paneelien sijoittelusta; lähekkäin asetetut paneelirivit varjostavat toisiaan enemmän.

Varjostusten laskemisessa hyödyllinen apuväline on profiilikulma, joka on auringon korkeuskulman projektio keräinpintaa vastaan kohtisuoralle tasolle. Profiilikulma voidaan ilmaista muodossa [6]

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(90^\circ - \theta_z)}{\cos(\gamma_s - \gamma)} \right), \quad (50)$$



Kuva 11: Paneelirivien keskinäisen varjostuksen geometria

missä γ_s on auringon atsimuuttikulma, joka puolestaan voidaan ilmaista muodossa [6]

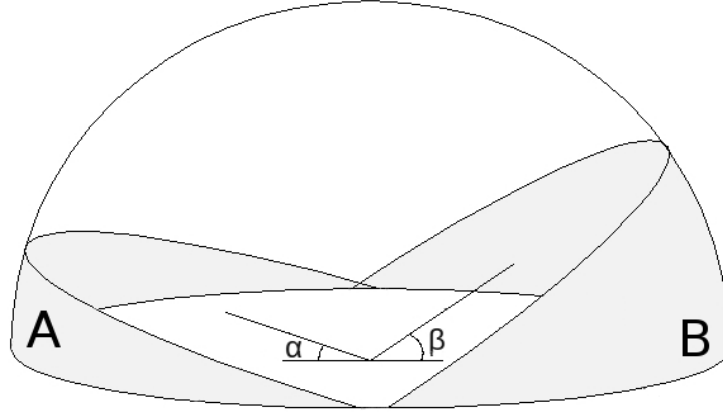
$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|, \quad (51)$$

missä $\text{sign}(\omega)$ ilmaisee auringon atsimuuttikulman olevan negatiivinen tuntikulman ollessa negatiivinen ja vastaavasti positiivinen tuntikulman ollessa positiivinen.

Niin kauan kun auringon profiilikulma α_p on suurempi kuin varjostusgeometriaa havainnollistavassa kuvassa 11 esiintyvä varjostuskulma α , ei eturivi varjosta takariviä lainkaan. Kun varjostuskulma α ylittää profiilikulman α_p arvon, on takarivin varjostunut osuus sama kuin varjostuneen korkeuden AC osuus paneelin korkeudesta l . Varjostunut osuus voidaan laskea kuvan 11 geometriasta, kun paneelin korkeus l , rivietäisyys d , kallistuskulma β ja atsimuuttikulma γ tiedetään.

Varjostus voi käyttäytyä monimutkaisemmin paneelirivin päädyissä, sillä varjon muoto riippuu auringon sijainnista. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä paneelin tuoton kannalta, sillä varjostunut alue ei suoraan määrää vaikutusta paneelin tuottoon. Koska paneelin kennot on kytketty sarjaan toistensa kanssa, yksikin varjostunut aurinkokenno toimii paneelissa virtuaalisena oikosulkuna. Tästä syystä kennojen kytkennässä on käytetty apuna ohitusdiodeja, jotka aktivoituvat varjostuneen kennon vastabiasoitussa ja mahdollistavat muiden kennojen tuottaman virran kulkeutumisen varjostuneen kennon ohitse. Ohitusdiodit ovat kuitenkin kalliita, joten kaikkia paneelin kennoja ei ole yhdistetty toisiinsa ohitusdiodeilla. Yhdessä paneelissa on tyypillisesti noin kolme ohitusdiodia; yksi diodi yhtä tai useampaa kennoriviä kohti. Sitä todenmukaisempi arvio varjostuksen vaikutuksesta paneelirivin tuottoon

saadaankin pyöristämällä varjostunut korkeus AC lähimpään kolmasosaan paneelin korkeudesta l .



Kuva 12: Paneelirivin näkemä osa taivaankannesta [28]

Varjostuksen lisäksi paneelirivit vähentävät toistensa ”näkemää” osaa ympäröstään, heikentäen paneelille saapuvan säteilyn intensiteettiä. Esimerkiksi isotrooppisen hajasäteilykomponentin tapauksessa eturivi estää takarivin näkyvyyden osaan taivaasta. Paneelirivin alareunan näkemää osaa taivaasta on havainnollistettu kuvassa 12: paneelirivin kaltevuuskulma β estää paneelia näkemästä rivin takana sijaitsevaa taivaankannen osaa B. Toisaalta eturivi rajoittaa rivin näkemää osaa taivaasta alueen A verran. Eturivin rajoittama osa näkyvyydestä pienenee, kun paneelin pinnalla liikutaan ylöspäin. Keskimääräinen näkyvyyden rajoittuneisuus saavutetaan siten paneelin puolivälissä, jossa alueen A suuruutta kuvaa kulma α_2 . Siten yhtälössä 16 esiintyvä isotrooppisen hajasäteilyn komponentti voidaan eturivin varjostamille riveille ilmaista muodossa [28]

$$G_{d,i,v} = I_d(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(\beta + \alpha_2)}{2} \right), \quad (52)$$

Lisäämällä yhtälöön 52 aurinkoa ympäröivän hajasäteilyn komponentti, saadaan eturivin varjostamille riveille saapuva hajasäteily muotoon

$$G_{d,v} = I_d(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(\beta + \alpha_2)}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b}, \quad (53)$$

Kuvan 11 geometriasta kulmalle α_2 saadaan

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{l}{d} \sin \beta}{2 - \frac{l}{d} \cos \beta} \right). \quad (54)$$

Eturivin vuoksi takarivi ei näe taivaan horisonttia ollenkaan. Lisäksi eturivi varjostaa takarivin edessä olevan maan niin tehokkaasti, ettei takariville heijastu säteilyä maasta juuri ollenkaan. Horisontin kirkastuminen ja maasta heijastunut säteily voidaan siten jättää kokonaan huomiotta laskettaessa säteilyn intensiteettiä eturivin varjostamille riveille.

Mikäli paneelirivejä ei ole asennettu kummankaan talon julkisivun suuntaisesti, voi takarivi todellisuudessa olla eturiviä pidempi (kuten kuvassa 25), jolloin rivin päädyt ”näkevät” hieman suuremman osan ympäristöstään kuin eturivin varjostama keskiosa. Esitetyillä näkyvyyskorjauksilla on kuitenkin sellaisenaankin vain pieni vaikutus kokonaissäteilyyn, joten päätyjen vaikutus kokonaisuuteen on merkityksettömän pieni.

Ensimmäisen rivin säteilykomponentteihin muilla riveillä ei luonnollisesti ole vaikutusta, eikä ensimmäisen rivin oleteta myöskään varjostuvan mistään syystä. Yllä esitettyjen näkyvyyskorjausten nojalla kokonaissäteilylle pätee siis

$$G = \begin{cases} G_b + G_d + G_{g-r} & \text{eturiville} \\ G_b + G_{d,v} & \text{takariveille} \end{cases} \quad (55)$$

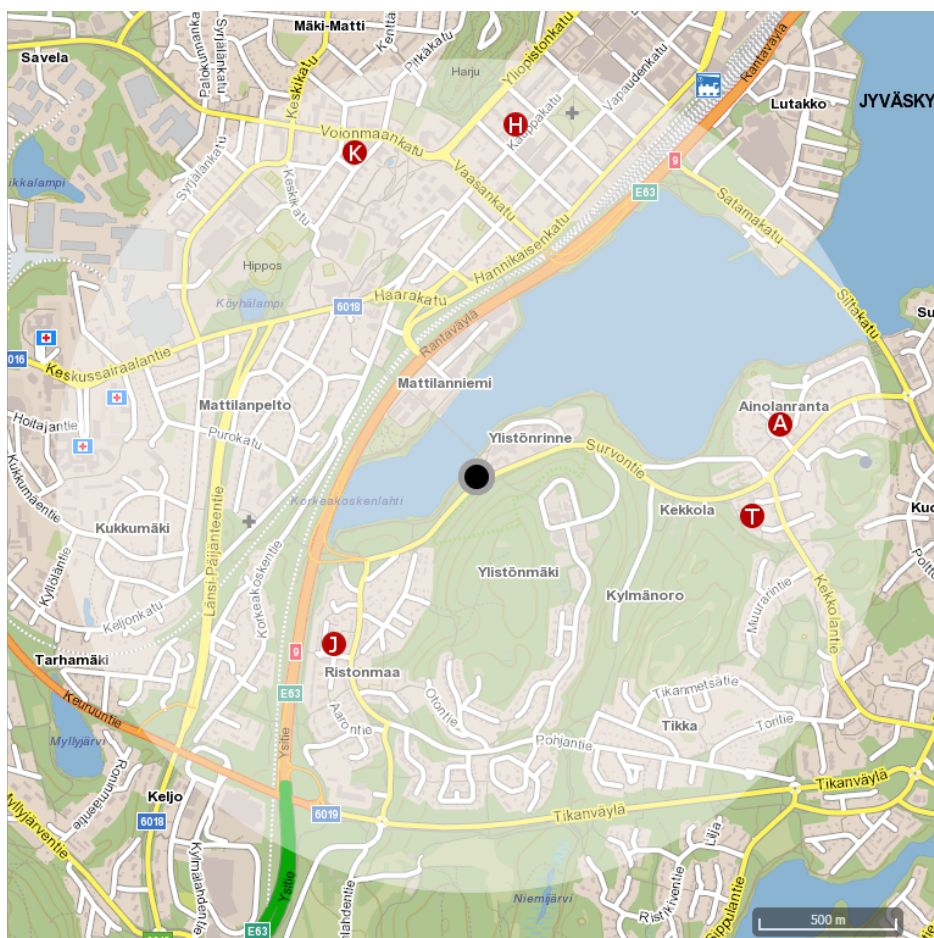
Yhtälön 55 kokonaissäteily G on taivaankannelta keräimelle saapuva kokonaissäteily. Keräinpinnan sisälle päätyvä efektiivinen säteily G_{eff} lasketaan yhtälön 55 säteilykomponenttejä käyttäen, kuten luvussa 5.2.1 on esitetty. Jos eturivin paneelin tuottoa merkitään P_m ja takarivin paneelin tuottoa P_v , paneelien tuottamalle teholle pätee

$$P = \begin{cases} P_m \cdot A_e & \text{eturiville} \\ P_v \cdot (1 - x)A_t & \text{takariveille,} \end{cases} \quad (56)$$

missä A_e on eturivin paneelipinta-ala, A_t takarivien yhteenlaskettu paneelipinta-ala ja $x = AC/l$ pyöristettynä ylöspäin lähimpään kolmannekseen.

6 Tutkittavat aurinkosähköjärjestelmät

Kattopintojen aurinkosähköistä potentiaalia tarkastellaan viidessä eri kohteessa. Paneelin valinta ja sijoittelu ovat tärkeässä osassa järjestelmän suunnittelussa, sillä paneelien määrän lisääminen kasvattaa tuottoa, mutta liian lähellä asetetut paneelit voivat varjostaa toisiaan. Rajallisesta asennuspinta-alasta johtuen tilankäytön täytyy olla tehokasta, kuitenkin huomioon ottaen voimassa olevat rakennusmääräykset ja huoltomahdollisuudet.



Kuva 13: Tutkimuskohteiden sijainti Jyväskylässä: Ainolankaari (A), Hospa (H), Jyvänen (J), Konsa (K) ja Tango (T). Sääaseman sijainti on merkitty kuvaan harmaalla ympyrällä. Valkoisella korostetun alueen säde on 1,5 kilometriä. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu

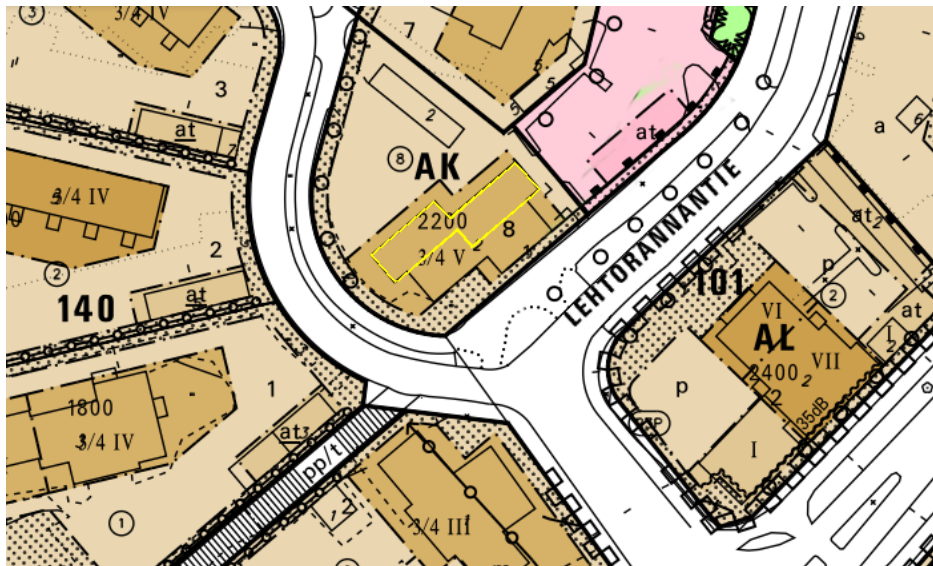
6.1 Tutkimuskohteet

Tarkasteltavat kohteet on valittu siten, että niiden etäisyys laitoksen katolla sijaitsevasta sääasemasta on alle 1,5 kilometriä. Näin voidaan olettaa, että sääolosuhteet kohteissa ovat olleet suunnilleen samat kuin mittauspaikalla. Kohteiden sijainnit on merkitty kuvaan 13. Kattopintojen tiedot selvitetiin kunkin kohteen asemakaava- ja läpyleikkauspiirustuksista. Seuraavassa esitetään tutkielman kannalta keskeisimmät tiedot kustakin kohteesta.

6.1.1 Ainolankaari

Ainolankaari sijaitsee Kuokkalan asutusalueella ja sisältää 51 asuntoa. Kuten kohteen asemakaavasta (kuva 14) ja valokuvasta (kuva 15) voi päätellä, alue on melko väljään rakennettua: rakennuksen ympäristö koostuu muutamasta rakennuksesta ja lehtipuusta sekä asfaltoidusta parkkipaikasta ja tieverkostosta.

Ainolankaaren katto koostuu useasta eri osasta, joista tarkastelun kohteiksi valittiin kaksi korkeinta, kaltevaa kattopintaa. Rakennusteknisistä syistä paneelien asennus muille pinnoille ei olisi käytännössä mahdollista, joten ne jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Tarkastelun kohteeksi valitut pinnat on merkitty kuvaan 14 keltaisella värillä ja pintojen tiedot löytyvät taulukosta 6. Taulukossa esitetty atsimuuttikulma on katon lappeen poikkeama etelästä, atsimuuttikulman merkkisääntöjä noudattaen.



Kuva 14: Ainolankaaren asemakaava, johon on merkitty keltaisella tarkasteltavat kattopinnat. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu



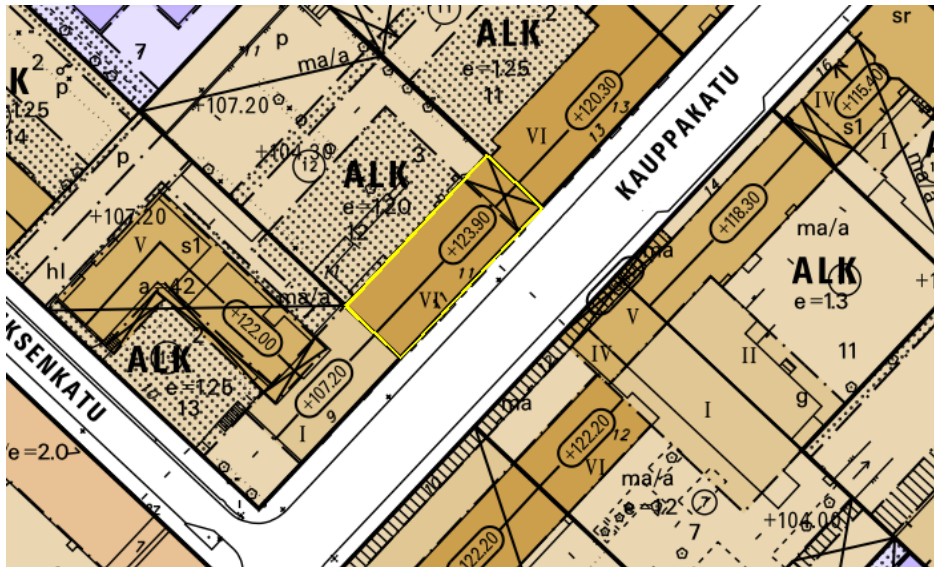
Kuva 15: Ainolankaari ja rakennuksen lähiympäristö Lehtorannantieltä kuvattuna

Taulukko 6: Ainolankaaren tarkasteltavien kattopintojen tiedot

Kattopinta	1	2
Pituuspiiri (°N)	25,84	
Leveyspiiri (°E)	62,35	
Atsimuuttikulma (°)	-38,00	
Kallistuskulma (°)	7,13	
Pituus (m)	15,70	16,36
Leveys (m)	6,79	
Korkeus mpy (m)	120,75	

6.1.2 Hospa

Hospa on pitkä, harjakattoinen talo kaupungin keskustassa, joka sisältää 24 asuntoa. Kuten asemakaavasta (kuva 16) ja valokuvasta (kuva 17) voidaan havaita, alue on tiiviisti rakennettua ja urbaania, eikä rakennuksen ympärillä juurikaan sijaitse lehtipuita tai viheralueita. Katon kummankin lappeen tiedot on esitetty erikseen taulukossa 7.



Kuva 16: Hospan asemakaava, johon on merkitty keltaisella tarkasteltavat kattopinnot. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu



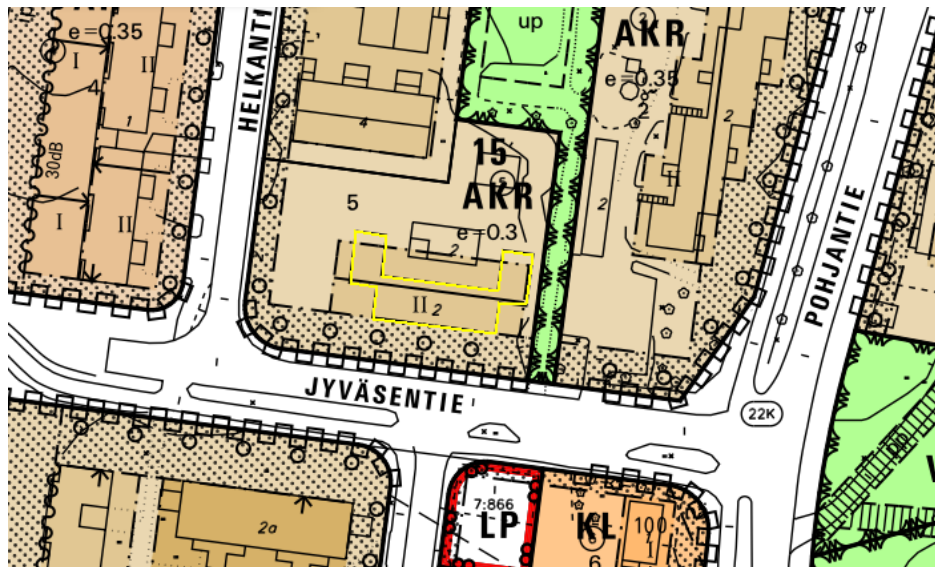
Kuva 17: Hospa ja rakennuksen lähiympäristö Kauppakadulta kuvattuna

Taulukko 7: Hospan kattopintojen tiedot

Kattopinta	1	2
Pituuspiiri (°N)	25,81	
Leveyspiiri (°E)	62,30	
Atsimuuttikulma (°)	-45,00	135,00
Kallistuskulma (°)	23,86	
Pituus (m)	37,75	
Leveys (m)	7,31	
Korkeus mpy (m)	123,90	

6.1.3 Jyvänen

Jyvänen sijaitsee Ristonmaan asutusalueella ja sisältää 19 asuntoa. Asemakaavasta (kuva 18) ja valokuvasta (kuva 19) voidaan havaita, että alue on vehreää ja väljään rakennettua. Rakennus jakautuu päärakennukseen ja kahteen päärakennuksen kanssa yhtenevään, keskenään identtiseen sivurakennukseen, joiden harjat ovat samansuuntaiset kuin päärakennuksen. Taulukossa 8 on esitetty ainoastaan päärakennuksen ja yhden sivurakennuksen kummankin lappeen tiedot. Sivurakennusten pintanumeron viereen on merkitty $\times 2$ merkiksi siitä, että kuvatuolaisia lappeita on todellisessa rakennuksessa kaksi kappaletta.



Kuva 18: Jyväsän asemakaava, johon on merkitty keltaisella tarkasteltavat kattopinnat. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu



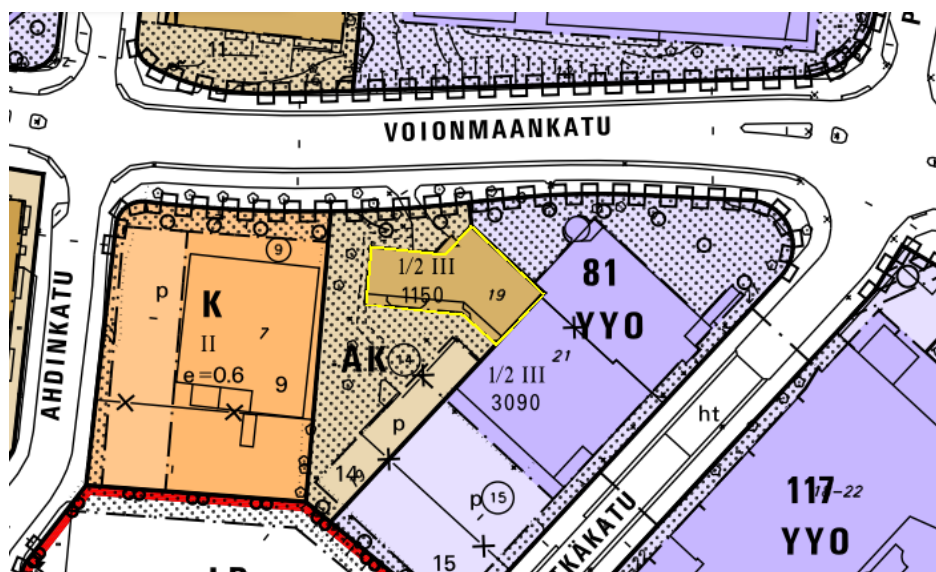
Kuva 19: Jyvänen ja rakennuksen lähiympäristö Jyväsentieltä kuvattuna

Taulukko 8: Jyvänen kattopintojen tiedot: kattopinnot 1 ja 2 ovat päärakennuksen lappeita ja kattopinnot 3 ja 4 sivurakennusten lappeita.

Kattopinta	1	2	3 (×2)	4 (×2)
Pituuspiiri (°N)	25,83		25,83	
Leveyspiiri (°E)	62,28		62,28	
Atsimuuttikulma (°)	8,50	-171,50	8,50	-171,50
Kallistuskulma (°)	18,43		18,43	
Pituus (m)	23,38		5,25	
Leveys (m)	4,22		5,27	
Korkeus mpy (m)	105,96		105,96	

6.1.4 Konsa

Konsa on tarkasteltavista kohteista ainoa tasakattoinen rakennus. Se sijaitsee hieman keskusta-alueen ulkopuolella, Seminaarinmäen kyljessä, ja sisältää 20 asuntoa. Asemakaavasta (kuva 20) ja valokuvasta (kuva 21) voidaan havaita, että rakennus on tiivisti muiden rakennusten ja lehtipuiden ympäröimä. Kattopinta jakautuu kahteen erisuuntaiseen osaan, joiden tiedot on esitetty erikseen taulukossa 9. Taulukossa esitetty atsimuuttikulma on kunkin kattopinnan pidemmän sivun poikkeama etelästä, atsimuuttikulman merkkisääntöjen mukaisesti.



Kuva 20: Konsan asemakaava, johon on merkitty keltaisella tarkasteltavat kattopinnot. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu



Kuva 21: Kansa ja rakennuksen lähiympäristö Voionmaankadulta kuvattuna

Taulukko 9: Konsan kattopintojen tiedot

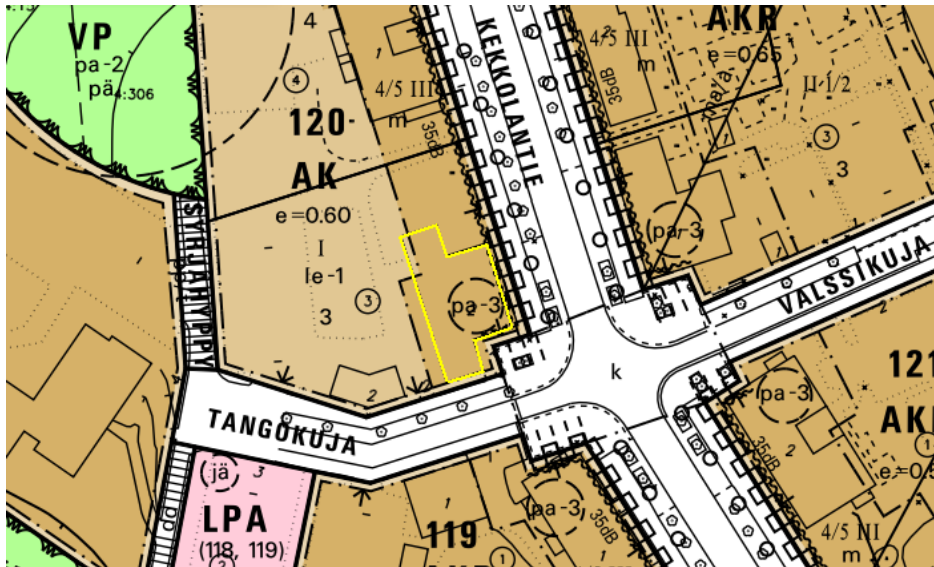
Kattopinta	1	2
Pituuspiiri (°N)		25,85
Leveyspiiri (°E)		62,30
Atsimuuttikulma (°)	132,00	94,14
Kallistuskulma (°)		0,00
Pituus (m)	18,48	11,53
Leveys (m)	11,34	8,68
Korkeus mpy (m)		126,60

6.1.5 Tango

Tango sijaitsee Kuokkalan asutusalueella, lähellä Yrttisuota, ja sisältää 23 asuntoa. Asemakaavasta (kuva 22) ja valokuvasta (kuva 23) on havaittavissa, että kaikki kohdetta ympäröivät rakennukset sijaitsevat vähintään tien leveyden päässä. Aluetta on somistettu pienillä viheralueilla, lehtipuilla ja pensailla. Rakennuksen katto on kalteva ja katon harja on keskeltä pidempi kuin sivuilta. Tästä syystä kattopinta on tarkastelun kannalta jaettu kolmeen osaan: pidempään keskiosaan ja keskenään identtisiin sivuosiin. Taulukossa 10 on esitetty keskiosan ja yhden sivuosan tiedot. Pintanumeron viereen merkitty $\times 2$ ilmaisee, että kuvatulnaisia pintoja on todellisuudessa kaksi.

Taulukko 10: Tangon kattopintojen tiedot

Kattopinta	1	2 ($\times 2$)
Pituuspiiri (°N)		25,84
Leveyspiiri (°E)		62,32
Atsimuuttikulma (°)		-107,00
Kallistuskulma (°)		7,13
Pituus (m)	18,50	6,00
Leveys (m)	10,16	7,19
Korkeus mpy (m)		118,69



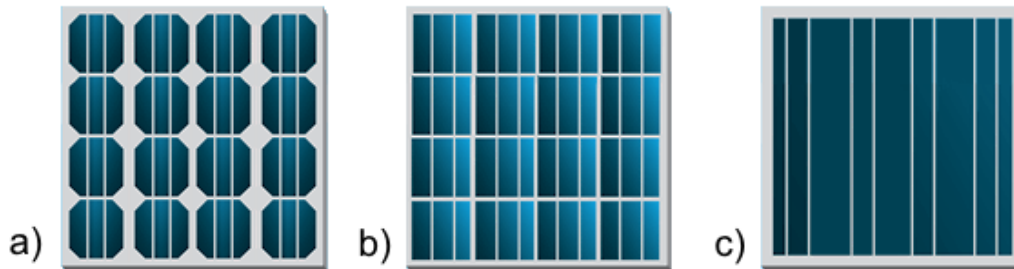
Kuva 22: Tangon asemakaava, johon on merkitty keltaisella tarkasteltavat kattopinnot. Kuva: Jyväskylän karttapalvelu



Kuva 23: Tango ja rakennuksen lähiympäristö Kekkolan tien ja Tangokujan risteyksestä kuvattuna

6.2 Tarkasteltavat aurinkopaneelit

Piistä valmistetut aurinkosähköpaneelit voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri tyyppiin: yksikiteisiin, monikiteisiin ja ohutfilmeihin. Paneelityyppien keskeisin ero on niissä käytetyn piin puhtaus, joka on verrannollinen paneelin suorituskykyyn.



Kuva 24: Aurinkokennotyypit: a) yksikiteinen b) monikiteinen c) ohufilmi

Yksikiteisten paneelien pii on valmistettu kasvattamalla yksittäisiä piikiteitä sylinterimäisiksi tangoiksi Czochralski-menetelmällä. Kennot muotoillaan kulumista pyöristetyiksi neliöiksi, jotta paneelipinta-alan täyttöaste saadaan mahdollisimman suureksi, tuhlaten mahdollisimman vähän kallista materiaalia. Tämä antaa yksikiteisille paneelille niille tyypillisen ulkonäön (kuva 24a). Piin puhtaudesta johtuen yksikiteisestä piistä valmistettu paneeli on hyötysuhteeltaan paras: yksikiteisten paneelien hyötysuhde on tyypillisesti välillä 15 – 20 % [29]. Korkean hyötysuhteen ansiosta tietyn energiamäärän tuottamiseen tarvitaan vähemmän paneelialaa kuin monikiteisillä ja ohutfilmipaneeleilla. Yksikiteiset paneelit ovat kuitenkin kalliita ja ne kärsivät eniten pölyn tai lumen vaikutuksista [29].

Monikiteisten paneelien piin valmistukseen ei käytetä Czochralski-menetelmää, vaan kennot valmistetaan kaatamalla sulatettua piitä neliön muotoisiin muotteihin. Valmistustavastaan johtuen monikiteiset paneelit eroavat ulkonäöltään yksikiteisistä paneeleista huomattavasti: monikiteiset paneelit tunnustaa erityisesti sinisestä väristään (kuva 24b). Koska monikiteisten kennojen valmistustapa on yksinkertaisempi ja halvempi verrattuna yksikiteisiin kennoihin, on myös monikiteisen paneelin hinta yksikiteistä halvempi. Piin puhtaus on kuitenkin alhaisempi, mistä johtuen monikiteisten paneelien hyötysuhde jää tyypillisesti välille 13 – 16 % [29] ja siten tietyn energiamäärän tuottamiseen tarvitaan enemmän paneelipinta-alaa kuin yksikiteisillä paneeleilla.

Ohutfilmit (kuva 24c) valmistetaan nimensä mukaisesti kerrostamalla piitä ohuelti kasvatusalustalle. Ohutfilmipaneeli on paneelityypeistä halvin, mutta

myös hyötysuhteeltaan heikoin; paneelin hyötysuhde on tyypillisesti vain noin 9 % [29]. Ohutfilmipaneeleilla tuotettu energia vaatii siten paljon pinta-alaa, eikä se tyypillisesti sovellu pienen mittakaavan energiantuottoon.

Taulukko 11: Valitut paneelityypit

Paneeli	Sunpower	Eopllly	SunGen
Tyyppi	X21-345	156PF/72	HN105-GG
	mc-Si	pc-Si	a-Si
Leveys (m)	1,953	1,559	1,400
Korkeus (m)	0,997	1,046	1,100
Maksimiteho P_{\max} (W)	345	305	105
Maksimitehon jännite V_{mpp} (V)	57,30	37,87	71,00
Maksimitehon virta I_{mpp} (A)	6,02	8,10	1,48
Avoimen piirin jännite V_{oc} (V)	68,20	45,22	92,50
Oikosulkuvirta I_{sc} (A)	6,39	8,93	1,81
Jännitteen lämpötilakerroin ($\%/^{\circ}\text{C}$)	-0,25	-0,34	-0,36
Virran lämpötilakerroin ($\%/^{\circ}\text{C}$)	0,06	0,06	0,13

Paneelin valintaan vaikuttaa moni asia, joista tärkeimmät lienevät toivottu energiatuotto ja hinta. Vaikeissa ilmasto-olosuhteissa myös paneelin kestävyydellä voi olla suuri merkitys. Myös esteettisyydellä voi olla painoarvoa paneelin valinnassa: tummat ja väritykseltään homogeeniset yksikide- ja ohutfilmipaneelit koetaan yleensä esteettisesti miellyttävämmiksi kuin sinisenkirjavat monikidepaneelit. Monikidepaneeleja pidetään kuitenkin hinta-hyötysuhteeltaan parhaimpina, ja ne hallitsevatkin nykyään aurinkopaneelimarkkinoita.

Jotta saadaan tarkasteltua sekä suurinta mahdollista potentiaalia, todennäköisintä tuottoa että halvinta ratkaisua, valittiin tarkastelun kohteeksi kolme eri paneelia. Valitut paneelit keskeisine ominaisuuksineen on esitetty taulukossa 11. Yksikiteinen *Sunpower*-paneeli on hyötysuhteeltaan tämänhetkisten markkinoiden paras (21,5%) ja edustaa siten suurinta mahdollista energiatuottoa, joka valitulta pinnalta on mahdollista saada. Ohutfilmipaneeli *SunGen* on hyötysuhteeltaan ohutfilmipaneelien parhaimmistoa, ja edustaa halvinta mahdollista ratkaisua. Monikidepaneeli *Eopllly* sen sijaan valittiin siten, että se edustaa hinta-hyötysuhteen parhaimmistoa [29] ja siten tyypillistä paneeliratkaisua, joskin tehokasta sellaista.

6.3 Aurinkopaneelien sijoittelu valituille kattopinnoille

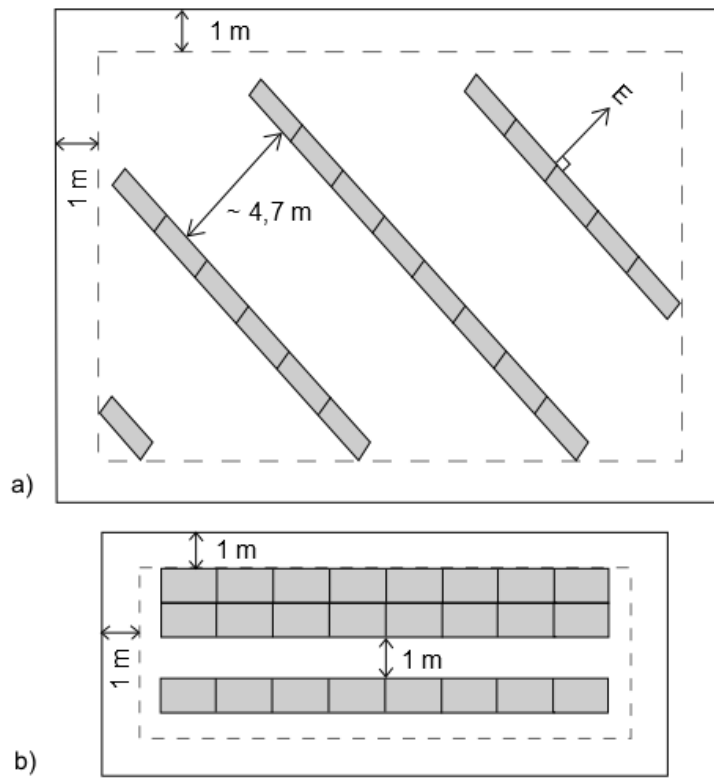
Aurinkopaneelien sijoittelu on tärkeä osa aurinkosähköjärjestelmän suunnittelua, sillä rajallisesta kattopinta-alasta johtuen tuoton maksimointi vaatii tehokasta tilankäyttöä: paneelien määrän lisääminen kasvattaa tuottoja, mutta toisaalta liian lähekkäin asetetut paneelirivit voivat varjostaa toisiaan. Paneelirivien välinen etäisyys täytyy siis optimoida siten, että paneeleista saadaan maksimituotto. Optimaalinen riviväli selvitettiin manuaalisesti haarucoimalla. Optimivälin pituus riippuu paitsi paneelin korkeudesta, myös katon muodosta, ja on siten katto- ja paneelikohtainen. Tavallisesti optimivälin pituudeksi saatiin kuitenkin noin 4,7 m.

MATLAB-ohjelma asettaa paneelit kattopinnoille automaattisesti katon pituuden, leveyden, ilmansuunnan ja harjakulman perusteella. Tasakatoille sijoitettavat paneelirivit suunnataan etelään optimikallistuskulmassa. Koska paneelien kallistuskulman säätäminen tasaisin aikaväleillä ei ole kovinkaan yleistä sen aiheuttamien kustannusten vuoksi, valittiin paneeliriveille kiinteä kallistuskulma siten, että valittu kulma maksimoi tuoton koko vuodelle. Optimaaliseksi kallistuskulmaksi saatiin 47° .

Jyväskylän rakennusvalvonta [30] on säätänyt, että harjakatoille asennettavien paneelien tulee olla kattopinnan suuntaisia, ja määräystä on noudatettu paneelien sijoittelussa. Harjakaton paneelirivit eivät siten varjosta toisiaan. Harjakatolle asennettaville paneeliriveillekin täytyy kuitenkin jättää huollon ja kunnossapidon mahdollistava huoltoväli. Aurinkosähköpaneelien asennuksessa käytettävälle huoltovälille ei kuitenkaan ole olemassa yksiselitteisiä määräyksiä. Koska harjakatolla sijaitsevien paneelien huolto ja kunnossapito tehdään tavallisesti valjaita tai tikkaita apuna käyttäen, on huoltoväliksi valittu 1 m, joka mahdollistaa vaivattoman liikkumisen rivien välissä. Huoltoväli jätetään kahden rivin välein. Myös tasakaton reunoille on jätetty metrin huoltoväli, jotta välistä toiseen siirtyminen olisi mahdollista.

Esimerkki paneelirivien sijoittelusta tasa- ja harjakatolle on nähtävissä kuvassa 25. Tasakaton tapauksessa kuvassa näkyvät suorakulmiot kuvaavat kallistuskulmaan asennettujen paneelirivien alle jäävä pinta-alaa.

Koska sadeveden täytyy poistua katolta tehokkaasti kosteusvaurioiden estämiseksi, varsinaista tasakattoa ei todellisuudessa ole olemassa; loivana kattona voidaan pitää kattoa jonka kaltevuus on alle 1:10 [31]. Siten paneelien sijoittelun kannalta tasakatoksi lasketaan katto, jonka kaltevuuskulma on vähemmän kuin $\tan^{-1}(1/10) \approx 5,7^\circ$.



Kuva 25: Esimerkki MATLAB-ohjelman sijoittamista paneeliriveistä a) tasakatolle b) harjakatolle

7 Tulokset

Tarkastelun kohteena ovat pääsääntöisesti *Eopllly*-paneelilla saatavat tuotot, jotka pohjautuvat vuoden 2010 säteilyaineistoon. *Eopllly*-paneeli on valittu tulosten edustavaksi paneeliratkaisuksi, koska se on kustannustehokkuudeltaan paneelikolmikön paras ja edustaa siten todennäköisintä paneeliratkaisua. Lopuksi kuitenkin vertaillaan vuosien 2010 ja 2011 sekä eri paneelityyppien välisiä eroja, sekä tarkastellaan myös lyhyesti tuoton riippuvuutta paneelin atsimuutti- ja kallistuskulmasta.

7.1 Kattopinnoille sijoitetut aurinkosähköpaneelit

Taulukossa 12 on esitetty kunkin tutkimuskohteen katolle sijoitettu paneelipinta-ala. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös kunkin kohteen valittujen kattopintojen kokonaispinta-ala.

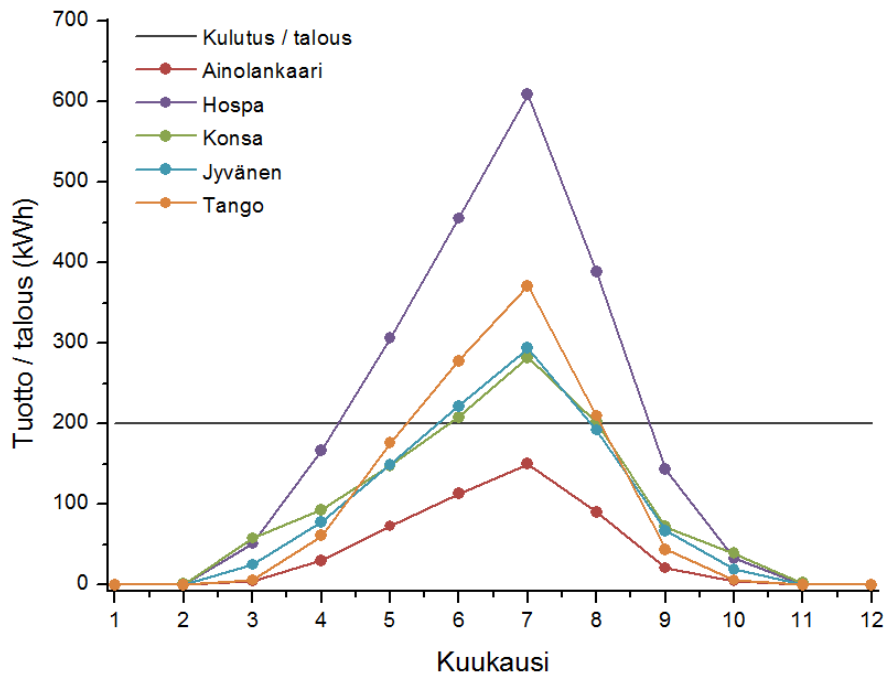
Taulukko 12: Tutkimuskohteiden kattopinta-ala ja katolle sijoitettu aurinkopaneeliala

Kohde	Kattopinta-ala (m ²)	Paneelipinta-ala (m ²)
Ainolankaari	217,7	83,2
Hospa	552,1	287,0
Jyvänen	307,8	110,9
Konsa	309,6	57,0
Tango	274,2	101,1

7.2 Aurinkosähkön tuotto kohteittain

Kuvassa 26 on esitetty kunkin kohteen kuukausittainen aurinkosähkön tuotto *Eopllly*-paneelilla vuonna 2010. Kuvan harmaa viiva kuvastaa yhden asunnon kuukausittaista laitesähkönkulutusta. Jotta kohteiden tuottoja olisi helpompi verrata kunkin talon tavoitteeseen, on myös kohteiden kuukausituotot esitetty asuntoa kohden, eli talon kokonaistuotto on jaettu taloon kuuluvien asuntojen lukumäärällä.

Kuvasta voidaan havaita, että kesäkuun alusta elokuun loppuun Hospan ja Tangon tuotot ylittävät kulutuksen. Konsan ja Jyväsän tuotot jäävät elokuussa aavistuksen kulutusta pienemmiksi. Ainolankaari on kohteista ainoa, joka ei saavuta tavoitetta kesälläkään, mikä johtuu suureksi osaksi Ainolankaaren suuresta asuntomäärästä. Tammi-helmikuussa ja marras-joulukuussa tuotto on kaikissa kohteissa likimain nolla.



Kuva 26: Kohteiden asuntokohtainen tuotto, sekä laitesähkönkulutus asuntoa kohti

Kohteiden tiedot löytyvät taulukkomuotoisena taulukosta 13. Taulukossa on esitetty kunkin kohteen kuukausittainen kokonaistuotto, sekä tuoton prosentuaalinen osuus talon laitesähkönkulutuksesta. Taulukon tietojen perusteella Hospa tuottaa heinäkuussa jopa kolminkertaisesti tarvittavan määrän sähköä. Tämä on jokseenkin liioiteltu prosenttiosuus, sillä Hospan katon alla sijaitsee asuinhuoneistojen lisäksi myös erilaista liiketoimintaa, joiden kulutusta ei prosenttiosuuden laskemisessa ole huomioitu. Mikäli talo olisi puhtaasti asuinkerrostalo, taloon mahtuisi todellisuudessa vähintään kaksinkertainen määrä asuinhuoneistoja. Tästä huolimatta Hospan tuotto kuvastaa katon suurta kokoa, sillä tuotto on kaikista kohteista ehdottomasti suurin myös megawattitunneissa tarkasteltuna. Ainolankaaren prosenttiosuudet ovat sen sijaan muihin kohteisiin verrattuna hyvin vaatimaattomia, vaikka Ainolankaaren tuotto on megawattitunneissa mitattuna huomattavasti korkeampi kuin Konsan ja Jyväsän vastaavat. Tämä johtuu siitä, että Ainolankaaren asuntomäärä on muihin kohteisiin verrattuna lähes kaksinkertainen, mutta Ainolankaaren katosta soveltuu paneelien asennusalaaksi vain noin puolet. Ainolankaari kuvastaa siten tarkasteltujen kohteiden urbaaneinta vaihtoehtoa, korkeaa 6-kerroksista taloa, joka sisältää runsaan määrän asuinhuoneistoja.

Konsa, Jyvänen ja Tango ovat puolestaan huomattavasti matalampia, 2-4 kerroksisia taloja, jotka kuvastavat enemmän kaupungin keskustan läheistä taajama-asutusta.

Taulukko 13: Kohteiden kuukausittainen kokonaistuotto ja tuoton prosentuaalinen osuus talon laitesähkökulutuksesta

	Ainolankaari		Hospa		Jyvänen		Konsa		Tango	
kk	tuotto (MWh)	%	tuotto (MWh)	%	tuotto (MWh)	%	tuotto (MWh)	%	tuotto (MWh)	%
1	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
2	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,03	0,7	0,00	0,0
3	0,27	2,7	1,23	25,6	0,48	12,5	1,17	29,2	0,15	3,2
4	1,52	14,9	4,00	83,3	1,48	38,9	1,86	46,4	1,40	30,5
5	3,74	36,7	7,34	153,0	2,83	74,4	2,96	73,9	4,05	88,1
6	5,76	56,5	10,91	227,3	4,21	110,9	4,16	104,0	6,39	138,9
7	7,65	75,0	14,61	304,3	5,58	146,8	5,64	140,9	8,54	185,5
8	4,58	44,9	9,33	194,4	3,65	96,0	4,04	100,9	4,83	105,0
9	1,09	10,6	3,44	71,6	1,27	33,5	1,44	36,1	1,01	22,0
10	0,23	2,3	0,80	16,7	0,36	9,5	0,77	19,3	0,14	3,0
11	0,00	0,0	0,01	0,2	0,01	0,2	0,04	0,9	0,00	0,0
12	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0

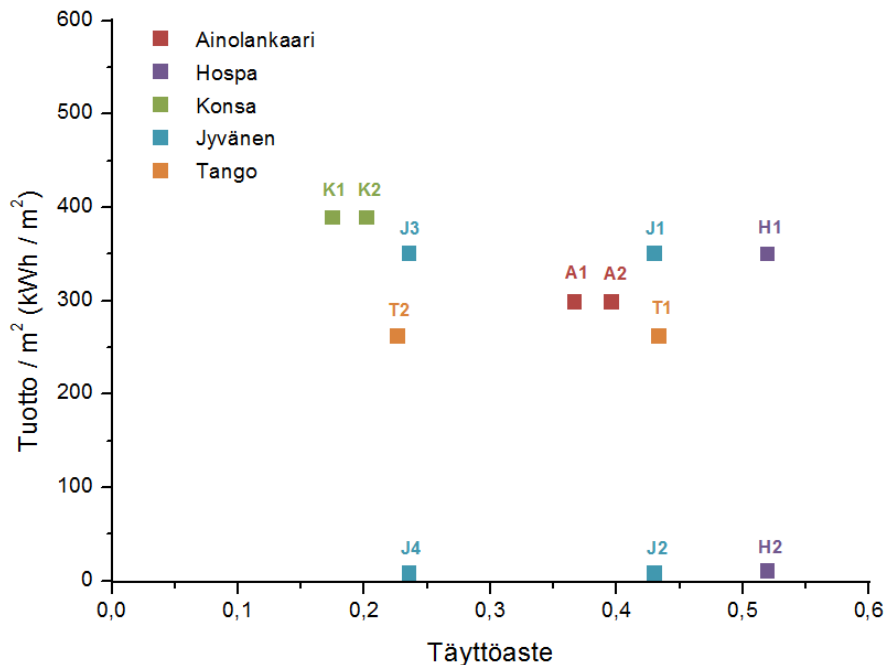
Taulukko 14: Kausittaisen tuoton prosentuaalinen osuus talon laitesähkökulutuksesta

kausi	Ainolankaari (%)	Hospa (%)	Jyvänen (%)	Konsa (%)	Tango (%)
talvi	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0
kevät	18,1	87,3	41,9	50,1	40,6
kesä	58,8	242,0	117,9	115,3	143,1
syksy	4,3	29,5	14,4	18,8	8,3

Taulukossa 14 kunkin kohteen tuotot on esitetty tiiviimmin, kausikohtaisesti. Kesäkauden (touko–heinäkuu) tuotto on odotetusti suurin, ja ylittää keskimäärin kulutuksen kaikissa muissa kohteissa, paitsi Ainolankaareissa. Kevätkauden (helmi–huhtikuu) tuotto on kaikissa kohteissa huomattavasti syksyn (elo–lokakuu) vastaavaa suurempi, vaikka kevään ja syksyn vuosineljännekset sijoittuvat symmetrisesti kesä- ja talvipäivänseisausten suhteen. Tähän vaikuttanee erityisesti kevään ja syksyn väliset sääerot: kevät ovat tyypillisesti kirkkaita ja aurinkoisia, syksyt pilvisiä ja sateisia [32]. Lisäksi keväällä paneelipinnalle saapuvan säteilyn määrään vaikuttaa myönteisesti ympäristön lumipeite. Talvikautena (tammikuu, marras–joulukuu) yksikään

kohde ei tuota käytännössä mitään, mikä oli odotettavissa kuukausitietojen perusteella.

Tarkempi tarkastelu kunkin kohteen yksittäisten kattopintojen potentiaalista samana vuonna ja samalla paneelityypillä on esitetty kuvassa 27, jossa kunkin kattopinnan paneelien tuotto neliometriä kohti on esitetty kattopinnan täyttöasteen funktiona. Täyttöaste on kattopinnalle sijoitetun paneelipinta-alan suhde kattopinnan kokonaispinta-alaan. Täyttöaste kuvaa, kuinka suuri osa kattopinnasta on saatu hyödynnettyä. Sen arvo on aina pienempi kuin yksi, sillä huoltoväleistä johtuen katolla on aina tyhjää tilaa. Kattopinnan potentiaali aurinkosähkön tuottoon on sitä parempi, mitä korkeammalla pintaa kuvaava piste kuvassa 27 sijaitsee.



Kuva 27: Kohteiden tuotto neliometriä kohti kattopinnan täyttöasteen funktiona. Kukin kattopinta on nimetty kohteen alkukirjaimen ja luvun 6.1 taulukoissa käytettyjen kattopintanumerointien mukaan.

Konsan kattopinnat sijaitsevat kuvassa 27 odotetusti kaikkein korkeimmalla, tasakaton mahdollistamasta optimaalisesta sijoittelusta johtuen, mutta Konsan täyttökertoimet ovat samalla kaikkein huonoimmat. Tämä johtuu siitä, että vaikka pystyyn tuetut paneelirivit vievät vähemmän kattopinta-alaa kuin katon suuntaisesti asennetut, pystyyn asetettujen paneelirivien riviväli

on varjostusten vuoksi noin nelinkertainen harjakattojen huoltoväliin verrattuna. Hospan lappeita kuvaavista pisteistä on havaittavissa, että vaikka lappeet on täytetty muihin kohteisiin verrattuna varsin tehokkaasti, toinen lape ei tuota käytännössä mitään. Kyseinen lape osoittaa luoteeseen, eikä suhteellisen korkeasta kallistuskulmastaan johtuen saa juurikaan osakseen suoraa auringonpaistetta. Jyväsän katosta on havaittavissa sama ilmiö: lähestulkoon etelään osoittavien lappeiden tuotto on korkea, mutta vastakkaiset lappeet eivät tuota mitään. Sekä Hospa että Jyväsän tuottavat siten todellisuudessa kaiken sähkönsä puolella kattopinta-alastaan. Jyväsän keskirakennuksen lappeiden täyttöaste on lisäksi selvästi parempi kuin sivurakennusten lappeiden. Myös Tangon katon keskiosan täyttöaste on sivuosia parempi. Tämä kieli siitä, että pienten alojen täyttö paneeleilla on tehotonta, sillä paneelien, ja huoltovälien, koko on suuri suhteessa käytettävissä olevaan kattopinta-alaan. Ainolankaari edustaa tässä joukossa kultaista keskitietä; sen kummatkin lappeet edustavat sekä keskinkertaista tuottoa että täyttöastetta.

Mikäli kunkin kohteen neliömetrikohtaista tuottoa verrataan Konsan ideaalituottoon, saadaan taulukon 15 mukaiset arvot, jotka kertovat kussakin kohteessa saman kokonaistuoton saavuttamiseksi tarvittavan suhteellisen paneelipinta-alan. Suhteellinen paneelipinta-ala kertoo osaltaan myös järjestelmän kustannustehokkuudesta: esimerkiksi Hospan ja Jyväsän paneelikustannukset ovat tuoton kannalta noin 11% kalliimpia kuin Konsan. Paneelien hintatasosta ja järjestelmän tarkoituksesta riippuen tämä voi olla hyväksyttävä hinta suuremman täyttöasteen mahdollistamasta suuremmasta kokonaistuotosta, joskin aurinkosähköjärjestelmän kokonaiskustannukset eivät ole suoraan vertailtavissa paneelikustannusten perusteella. Sen sijaan Tango on jo 48% Konsaa kalliimpi, eli vaikka Tango saavuttaa suuren kattopinta-alan vuoksi yllättävän suuret tuotot, on se kustannustehokkuudeltaan kannattamaton kohde verrattuna muihin tutkimuskohteisiin.

Taulukko 15: Konsan neliömetrikohtaisen tuoton suhde muiden kohteiden tuottoihin

Kohde	Ainolankaari	Hospa	Jyväsän	Konsa	Tango
Tuottosuhte	1,30	1,11	1,11	1,00	1,48

7.3 Vuosittainen vaihtelu ja paneelityypin vaikutus

Taulukossa 16 on esitetty kunkin kohteen vuosittainen säteilymäärä, aurinkosähkön tuotto neliometriä kohti, sekä kokonaistuotto *Eopllly*-paneelilla vuosina

2010 ja 2011. Hospan ja Jyväsän katoista on esitetty ainoastaan tuottavien lappeiden tiedot. Muutos vuodesta 2010 vuoteen 2011 on ilmoitettu prosentteina kullekin suurelle. Kokonaistuotolle on lisäksi laskettu eron prosentuaalinen osuus talon kokonaiskulutuksesta, eli kuinka paljon enemmän tai vähemmän vuosittaisesta kokonaiskulutuksesta olisi voitu kattaa aurinkosähköllä vuonna 2011 verrattuna vuoteen 2010.

Taulukko 16: Säteily ja aurinkosähkön tuotto vuonna 2011 verrattuna vuoteen 2010, sekä muutoksen prosentuaalinen osuus talon kokonaiskulutuksesta

		Ainolankaari	Hospa	Jyväsän	Konsa	Tango
säteily (kWh)	2010	943	591	584	1192	870
	2011	970	622	611	1279	889
	muutos (%)	+2,9	+5,3	+4,6	+7,2	+2,1
tuotto/m ² (kWh)	2010	299	350	351	389	262
	2011	296	353	351	398	259
	muutos (%)	-0,9	+1,0	+0,0	+2,5	-1,3
tuotto (MWh)	2010	24,84	51,67	19,87	22,13	26,50
	2011	24,63	52,32	19,94	22,69	26,15
	muutos (%)	-0,9	+1,3	+0,4	+2,5	-1,3
	% kulutuksesta	-0,2	+1,1	+0,2	+1,2	-0,6

Taulukosta on nähtävissä, että keräimelle saapuvan säteilyn määrä on jokaisessa kohteessa suurempi vuonna 2011 kuin vuonna 2010. Tämä on sopusoinnussa taulukossa 1 esitettyjen horisontaaliselle pinnalle saapuvien säteilymäärien kanssa. Säteilymäärän kasvu on verrannollinen paneelipinnan asentoon: Eniten säteilymäärä on kasvanut Konsan katolle asennetuille paneeleille, sillä tasakatolle asennetut paneelit on suunnattu etelään päin, optimaalisella kallistuskulmalla. Hospan säteilymäärän muutos on Jyväsän vastaavaa suurempi, vaikka Hospan tuottava lape osoittaa kaakkoon, kun taas Jyväsän tuottavat lapheet osoittavat lähes etelään. Tämä johtune Hospan lappeiden suuremmasta kallistuskulmasta. Vähiten säteilymäärä on kasvanut Ainolankaarelle ja Tangolle, sillä niiden katot ovat kaikkein loivimmat.

Aurinkosähkön tuotto ei kuitenkaan kasva kaikille kohteille, vaan Ainolankaaren ja Tangon tuotot ovat vuonna 2011 vuoden 2010 tuottoja pienempiä. Tämä kertoo siitä, kuinka pieni kyseisten vuosien välinen säteilyero todellisuudessa on: vaikka säteilyä saadaan enemmän, kasvaa tuotto ainoastaan mikäli katolle asennetut paneelit pystyvät säteilyn varmasti hyödyntämään. Konsan tuotto on kasvanut eniten, sillä sen paneelit pystyvät optimaalisesta asennostaan johtuen hyödyntämään saapuvaa säteilyä mahdollisimman te-

hokkaasti koko päivän ajan. Myös Hospa ja Jyvänen hyötyvät säteily määrän kasvusta, sillä niiden tuottavat lapheet osoittavat lähestulkoon etelään ja kallistuskulmat ovat suhteellisen korkeita. Ainolankaaren ja Tangon tapauksessa paneelien kallistuskulma, ja Tangolle myös paneelien suunta, on heikko ja satunnaisuus, kuten päivän myötä muuttuvat sääolosuhteet tai heikosta kallistuskulmasta johtuva kykenemättömyys hyödyntää horisontista ja maasta heijastunutta säteilyä, merkitsevät koko vuoden säteilysummaa enemmän. Vuosien 2010 ja 2011 väliset tuottoerot ovat kuitenkin kaikissa kohteissa hyvin pieniä, kulutuksessa mitattuna korkeintaan prosenttien verran, eikä niillä siten ole käytännön kannalta mitään merkitystä.

Taulukko 17: Paneelien väliset erot aurinkosähkön tuotossa ja kattopinnan täyttöasteessa

		SunPower	Eoplly	SunGen
Ainolankaari	täyttöaste	0,38	0,38	0,40
	tuotto/m ² (kWh)	342	299	160
	tuotto (MWh)	27,93	24,84	14,04
	% kulutuksesta	22,8	20,3	11,5
Hospa	täyttöaste	0,51	0,52	0,42
	tuotto/m ² (kWh)	404	350	194
	tuotto (MWh)	58,10	51,67	22,64
	% kulutuksesta	100,9	89,7	39,3
Jyvänen	täyttöaste	0,23	0,30	0,30
	tuotto/m ² (kWh)	404	351	194
	tuotto (MWh)	19,28	19,87	11,42
	% kulutuksesta	42,3	43,6	25,0
Konsa	täyttöaste	0,17	0,19	0,18
	tuotto/m ² (kWh)	451	389	218
	tuotto (MWh)	23,15	22,13	12,25
	% kulutuksesta	48,2	46,1	25,5
Tango	täyttöaste	0,35	0,30	0,29
	tuotto/m ² (kWh)	298	262	136
	tuotto (MWh)	34,76	26,50	14,00
	% kulutuksesta	63,0	48,0	25,4

Paneelien välisiä eroja on vertailtu taulukossa 17, jossa on esitetty kunkin kohteen vuoden 2010 keskimääräinen aurinkosähkön vuosituotto neliometriä kohti, kokonaisvuosituotto sekä vuosituoton prosenttiosuus kokonaiskulutuksesta kullekin paneelityypille. Koska eri paneelityypit ovat erikokoisia, on taulukossa esitetty myös kattojen keskimääräiset täyttöasteet kullakin paneelityypillä. Tämä mahdollistaa kokonaistuottojen vertailun ottaen huomioon

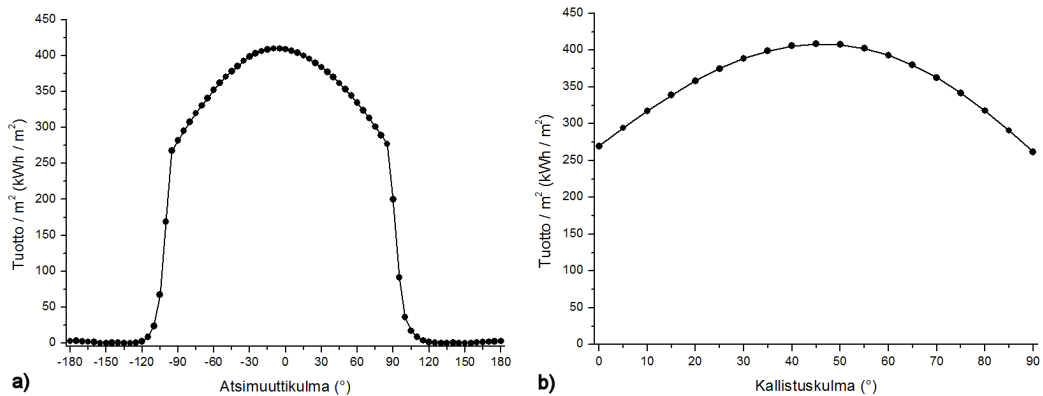
erot katolle mahtuvassa paneelipinta-alassa.

Tuottoerot neliometriä kohti ovat varsin systemaattisesti linjassa paneelien maksimitehoerojen kanssa: *Eoplly*-paneelin tuotto on noin 87% ja *SunGen*-paneelin noin 47% *SunPowerin* vastaavasta, kaikissa kohteissa. Kulutuksen prosentiosuuksissa mitattuna *SunPower*- ja *Eoplly*-paneelien välinen ero on suurin Tangolle, joka tuottaa *SunPower*-paneeleilla 15% enemmän kuin *Eoplly*-paneeleilla. Ero johtuu kuitenkin osaksi *SunPower*-paneelilla saavutetusta suuremmasta täyttöasteesta. Jyväsän tapauksessa *Eoplly*-paneelilla on saatu parempi kokonaistuotto kuin *SunPower*-paneelilla, mikä johtuu myös merkittävästä täyttöaste-erosta, *Eoplly*-paneelien hyväksi. Hospalle kummankin paneelin täyttöasteet ovat likimain samat, ja *SunPower*- ja *Eoplly*-paneelien välinen ero on 11,2% kokonaiskulutuksesta. Myös Ainolankaassa täyttöasteet ovat *SunPower*- ja *Eoplly*-paneeleille samat, mutta paneelien välinen ero kokonaiskulutuksessa mitattuna on vain 2,5%. Hospa ja Ainolankaari edustavat siten jälleen tarkasteltujen kohteiden ääripäitä, kattopinta-alaa vastaavien asukasmääriensä johdosta.

7.4 Tuoton riippuvuus paneelin suunnasta ja kallistuskulmasta

Koska niin monet eri tekijät riippuvat puhtaasti siitä, mihin kulmaan paneeli on sijoitettu, lienee tarpeen tarkastella tuoton kulmariippuvuutta hieman tarkemmin. Kuvassa 28a on esitetty neliometrikohtainen vuosituotto *Eoplly*-paneelilla vuonna 2010, kun atsimuuttikulmaa on muutettu viiden asteen välein, pitäen samalla kallistuskulma vakiona 47 asteessa. Kuvassa 28b on esitetty päinvastainen järjestely: kallistuskulmaa on muutettu viiden asteen välein, pitäen atsimuuttikulma nollassa.

Kumpikin kuvaaja on symmetrinen optimaaliarvonsa suhteen. Atsimuuttikulman tapauksessa on havaittavissa leveä maksimi nollan kohdalla. Tarkasti katsottuna maksimi ei kuitenkaan sijaitse nollan, vaan -10 asteen tietämällä. Ero -10:n ja 0 asteen välillä on kuitenkin vain noin 1,3 kWh/m², ja voi johtua esimerkiksi Suomelle tyypillisistä sääolosuhteista; aamulla on usein selkeämpää kuin illalla, ja mikäli paneeli on suunnattu aavistuksen itään päin, pystyy se paremmin hyödyntämään aamun säteilyä. Kirkkausasteen tuntikohtaiset arvot vaikuttaisivat tukevan tätä oletusta: vuoden keskiarvo aurinkoajan keskipäivää edeltäville tunneille on noin 0,380, keskipäivän jälkeisille tunneille 0,360. Kesäneljännekselle, jolloin suurin osa säteilystä saadaan, ero on merkittävämpi: ennen keskipäivää kirkkausaste on noin 0,487, keskipäivän jälkeen vain 0,443. Keskiarvojen keskivirheet ovat 0,002 aamupäivän keskiarvoille ja 0,001 iltapäivän keskiarvoille. Maksimituoton sijoittuminen -10:n asteen



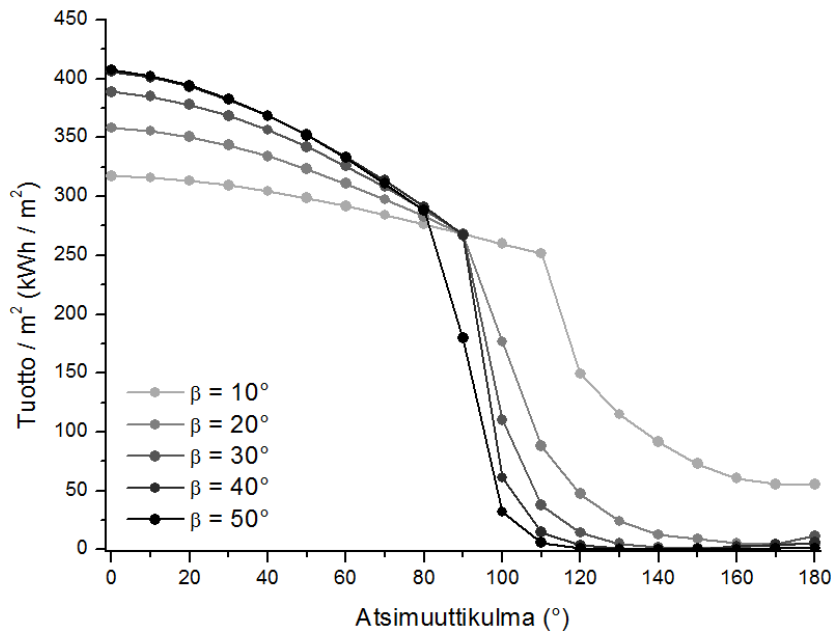
Kuva 28: Vuosituoton riippuvuus a) atsimuuttikulmasta optimaalisella kallistuskulmalla ja b) kallistuskulmasta optimaalisella atsimuuttikulmalla

atsimuuttikulmalle tapahtuu myös vuoden 2011 säteilydatalla ja aamu- ja iltapäivien väliset kirkkausaste-erot ovat vuodelle 2011 samankaltaiset vuoden 2010 vastaavien kanssa.

Kuvan 28a kuvaajan merkittävin käytös sijoittuu kuitenkin ± 90 :n asteen ympäristöön, jossa tuotto putoaa rajusti. Tämä on odotettavissa oleva tulos, sillä suurilla atsimuuttikulmilla paneeli ei enää ”näe” aurinkoa, eikä saa osakseen suoraa säteilyä. Itseisarvoltaan 110 astetta suuremmilla atsimuuttikulmilla tuotto on likimain nolla. Välillä $0 - \pm 90$ tuotto käyttäytyy alaspäin aukeavan paraabelin tavoin. Sama parabolinen käytös on havaittavissa kuvassa 28b, kaikilla mahdollisilla kallistuskulmilla.

Kuvassa 29 on esitetty tuoton riippuvuus sekä atsimuuttikulmasta että kallistuskulmasta kymmenen asteen välein: jokainen käyrä kuvaa neliömetrikohtaista tuottoa atsimuuttikulman funktiona, tietyllä kallistuskulmalla. Koska tuotto on likimain symmetrinen optimaalisten kulmien suhteen, on käyrät selvyuden vuoksi esitetty vain positiivisille atsimuuttikulmille ja kallistuskulmille väliltä 10–50 astetta.

Kuvaajasta voidaan karkeasti päätellä, millainen atsimuutti- ja kallistuskulma halutulle tuotolle *Eopllly*-paneelilla vähintään vaaditaan. Lisäksi kuvaajasta on havaittavissa, että vaikka tuotto pienenee kallistuskulman pienentyessä, kuvaajalle ominainen jyrkkä pudotus siirtyy samalla suuremmille atsimuuttikulmille. Tämä on odotettavissa, sillä pienellä kallistuskulmalla paneeli ”näkee” suuremman osan taivaasta, eikä aurinko jää suurillakaan atsimuuttikulmilla paneelin taakse. Tämä selittää, miksi Tangon tuotot ovat samaa luokkaa muiden kohteiden kanssa, vaikka Tangon katon ja sille asennettujen paneelien atsimuuttikulma on -107° , keskellä muille kallistuskulmille tyypillistä jyrkkää pudotuskohtaa: Tangon katon hyvin loiva, noin $7,1$ asteen



Kuva 29: Tuoton riippuvuus atsimuuttikulmasta ja kallistuskulmasta

kallistuskulma, kompensoi katon heikkoa atsimuuttikulmaa. Huonoa atsimuuttikulmaa voi siten tiettyyn rajaan asti korjata pienentämällä paneelien kallistuskulmaa.

7.5 Ideaalisuuden vaikutus ja vaihtosuuntaushäviöt

Koska esitetyt tulokset ovat simuloituja, ja siten ideaalisia, on tarpeen selvittää kuinka paljon ne eroavat todellisuudesta ja mitkä tekijät aiheuttavat tuloksiin epätarkkuutta.

7.5.1 Teoreettisen mallin vaikutus tuloksiin

Paneelipinnalle saapuvan säteilyn määrä vaikuttaa paneelien tuottoon kaikkein eniten. Säteilymalleja kehitetään usein mitatun säteilyaineiston pohjalta tilastomenetelmiä hyödyntäen, joten mallit ovat käytetyn säteilyaineiston vuoksi sijaintiriippuvaisia. Tyypillisesti säteilymallit ali- tai yliarvioivat keräinpinnalle saapuvan säteilyn määrää. Säteilymallien epätarkkuutta on yritetty määrittää useissa tutkimuksissa, mutta epätarkkuus riippuu mallinnukseen käytetystä aineistosta, ollen siten myös sijaintikohtainen.

Säteilymallien epätarkkuudesta on olemassa useita, keskenään ristiriidasakin olevia tuloksia. Padovan ja De Col [14] ovat esittäneet, että Reindlin hajasäteilymalli yliarvioisi hajasäteilytiheyttä keskimäärin $+20 \text{ W/m}^2$. Mikäli Reindlin hajasäteilymallia käytetään pohjana Perezin kaltevan pinnan säteilymallille, on etelään suunnatulle keräimelle saapuvan säteilyn keskimääräinen poikkeama mitatusta arvosta noin $+12 \text{ W/m}^2$ [14]. Mikäli Perezin säteilymallin pohjana käytetään mitattua hajasäteilyaineistoa, on Perezin mallin poikkeama mitatusta arvosta vain $+9 \text{ W/m}^2$ [14]. Poikkeamat ovat riippuvaisia keräimen kallistuskulmasta ja suunnasta. Vartiainen [18] on puolestaan esittänyt, että Perezin säteilymallin antamat tulokset eroavat mitatuista keskimäärin -4% etelään sunnatuille keräimille. Suomessa ei ole Vartiaisen tutkimuksen lisäksi tehty muita säteilymalleja vertailevia tutkimuksia, joten on vaikea sanoa johtuuko Vartiaisen eroava näkemys Suomen säteilyoloista, aineistosta vai laskentatavasta. Siten on myös vaikea sanoa yli- vai aliarvioiko Reindlin hajasäteilymallin ja Perezin kaltevan pinnan säteilymallin yhdistelmä keräimelle saapuvaa säteilyä ja kuinka paljon säteilymallien epätarkkuus vaikuttaa laskettuihin tuottoihin.

Säteilymallien lisäksi laskettuihin säteilymääriin vaikuttaa käytettyjen kokonaissäteilyarvojen mittausrvirheet. Tässä työssä käytetyt säteilytiedot on saatu sääasemalta, jossa on tarkkuuspyranometreihin verrattuna varsin epäluotettava säteilymittari; oikein kalibroituinkin mittauksen epätarkkuus on $3 - 10\%$, säteilyn tulokulmasta riippuen. Tämä virhe voi kertaantua keräinpinnalle saapuvaa säteilyä laskettaessa.

Paneelien sijoittelussa ei ole huomioitu rakennusteknisiä kattoesteitä, kuten katolla sijaitsevia ilmastointiputkia. Nämä voivat todellisuudessa vaikuttaa katolle mahtuvien paneelien määrään ja siten rakennuksen kokonaistuottoon. Parhaassa tapauksessa esimerkiksi ilmastointiputket ja lumiesteet jäävät reunahuoltoväleille varatulle alueelle eivätkä hankaloita paneelien huoltamista tai varjosta paneeleita. Huonoimmassa tapauksessa kattopinta-alan käyttöä rajoittaa esimerkiksi hissikuilu, joten katolle mahtuu merkittävästi vähemmän paneeleja kuin ideaalitapauksessa. Neliömetrikohtaisiin tuottoihin katolle mahtuvien paneelien määrällä ei kuitenkaan ole vaikutusta.

Malli ei myöskään ota huomioon kohteen ympäristöä. Todellisuudessa myös ympäröivät puut ja rakennukset voivat varjostaa paneeleita osan päivästä tai vähentää paneelien ”näkemän” taivasalan suuruutta, ja siten paneelille saapuvan säteilyn määrää. Lisäksi lumipeite voi estää paneelien toiminnan pahimmillaan koko talven ajan. Suurilla kallistuskulmilla säteily voi lämmittää paneelin pintaa tarpeeksi, jotta lumi valuu paneelin pinnalta pois. Pienemmällä kallistuskulmilla näin ei kuitenkaan käy ja paneelit tuottavat sähköä vasta kun ne kaivetaan lumen alta esiin tai lumi sulaa kevään tullen itsestään. Koska paneelit eivät tammikuussa ja joulukuussa tuottaisi lumi-

peitteestä riippumattakaan mitään, koskisi lumipeitteen vaikutus lähinnä marraskuussa ja helmi-huhtikuussa saatavia tuottoja, riippuen lumipeitteen tulo- ja lähtöajankohdista.

7.5.2 Vaihtosuuntaushäviöt

Tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että esitetyt tulokset ovat paneelista saatuja tasavirran arvoja. Mikäli paneelien tuottoa halutaan käyttää osana rakennuksen verkkosähkökulutusta, täytyy paneeleista saatu tuotto ensin vaihtosuunnata. Vaihtosuuntaajan maksimihyötysuhde on tyypillisesti 95–98%, mutta hetkittäinen hyötysuhde riippuu olosuhteista. Paras hyötysuhde saavutetaan, kun aurinkosähköjärjestelmän tuottaman tehon suhde vaihtosuuntaajan nimellistehoon on noin 0,5–0,8 [33]. Vaihtosuuntaajat on optimoitu tälle tehoalueelle, koska vaihtosuuntaajan täytyy pystyä käsittelemään järjestelmän maksimikapasiteettia, mutta suurin osa aurinkopaneelien tehotuotosta tapahtuu paneelin keskitehoalueella. Suuremmilla tehosuhteilla hyötysuhde laskee hitaasti; tehosuhteen 1,0 hyötysuhde on tavallisesti 1–2 prosenttiyksikköä ideaalista hyötysuhdetta pienempi [34]. Hyötysuhteen lasku korkeilla tehosuhteilla johtuu vaihtosuuntaajan kuumenemisestä sen käsitellessä suuritehoisia tuottoja. Hyötysuhde putoaa rajusti, mikäli tehosuhde on vähemmän kuin 0,2 [34]. Mikäli vaihtosuuntaaja on mitoitettu oikein, näin tapahtuu tyypillisesti silloin kun paneelille saapuva säteily on alle 200 W/m², jolloin paneelin tuotto putoaa rajusti. Vaihtosuuntaajan hyötysuhde on hyvin heikoilla tehosuhteilla yleensä 10%–30% maksimihyötysuhdetta heikompi [34, 33].

Koska vaihtosuuntaajan maksimihyötysuhde saavutetaan hyvin kapealla tehosuhtealueella, on vaihtosuuntaajan suorituskykyä kuvaamaan kehitetty myös niin kutsuttu eurooppalainen hyötysuhde. Hyötysuhde on painotettu Keski-Euroopan säteilyolosuhteiden mukaan ja voidaan ilmaista muodossa [33]

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,1\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,2\eta_{100\%}, \quad (57)$$

eli Eurooppalainen hyötysuhde olettaa vaihtosuuntaajan toimivan 20% vuodesta tehosuhteella 1,0, 48% vuodesta tehosuhteella 0,5 ja niin edelleen. Eurooppalainen hyötysuhde on yleensä muutaman prosenttiyksikön maksimihyötysuhdetta pienempi, yleensä 92–96% [33]. Eurooppalaista hyötysuhdetta tarkastellessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että painotus on tehty Keski-Eurooppalaisten säteilyolosuhteiden mukaisesti; Suomen säteilyolosuhteet ovat noin viidenneksen Keski-Eurooppaa heikommat [3], ja siten myös vaihtosuuntaajan keskiarvoinen hyötysuhde on eurooppalaista hyötysuhdetta heikompi.

7.5.3 Mallinnettujen tulosten vertailu mitattuihin arvoihin

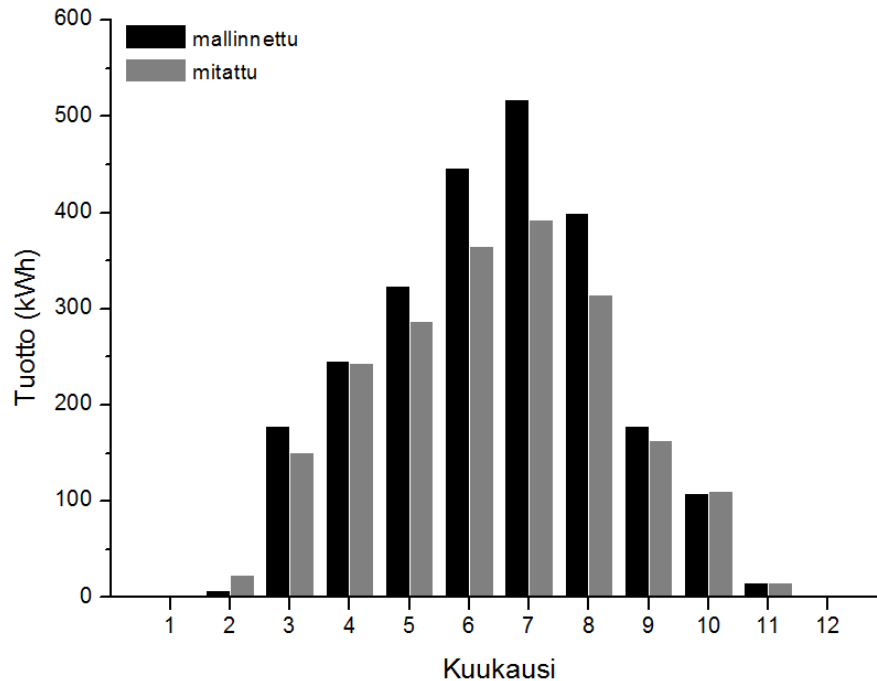
Tulosten realistisuutta voidaan parhaiten arvioida laskemalla tuotto todellisille kohteille. Paras kohde tähän tarkoitukseen lienee Jyväskylän yliopiston Agora-rakennuksen katolle asennettu aurinkosähköjärjestelmä, sillä se sijaitsee alle puolen kilometrin päässä sääasemasta. Aurinkosähköjärjestelmään kuuluu 20 paneelia, jotka on suunnattu etelään 40 asteen kulmassa [35]. Käytetyn paneelin tiedot löytyvät taulukosta 18. Paneelin esitteessä ei ole mainittu paneelille tyypillisiä jännitteen ja virran lämpötilakertoimia, joten laskennassa käytettiin saman valmistajan 210G PWB -paneelin lämpötilakertoimia; nämä arvot on esitetty lämpötilakertoimien arvoina taulukossa 18. Monikidepaneelien lämpötilakertoimet ovat usein keskenään samankaltaisia, eivätkä taulukossa 18 esitetyt arvot juurikaan eroa esimerkiksi tässä tutkielmassa käytetyn *Eopply*-paneelin vastaavista arvoista.

Taulukko 18: Agoran aurinkosähköjärjestelmän paneelitiedot

Paneeli	NAPS NP130GK
Tyyppi	pc-Si
Leveys	1,480 m
Korkeus	0,670 m
Maksimiteho P_{\max}	130 W
Maksimitehon jännite V_{mpp}	16,9 V
Maksimitehon virta I_{mpp}	7,68 A
Avoimen piirin jännite V_{oc}	22,0 V
Oikosulkuvirta I_{sc}	8,45 A
Jännitteen lämpötilakerroin	-0,36 %/°C
Virran lämpötilakerroin	0,04 %/°C

MATLAB-ohjelmalla laskettu kokonaistuotto vuodelle 2010 on 2613 kWh, joka vastaa neliömetrikohtaista tuottoa 132 kWh/m². Mitattu kokonaistuotto vuodelle 2010 on 2069 kWh [35], joka vastaa neliömetrikohtaista tuottoa 104 kWh/m². Mitatut arvot ovat vaihtovirran arvoja ja siten laskettujen ja mitattujen tuottojen vertailussa tulee ottaa huomioon vaihtosuuntaushäviö. Agoran aurinkosähköjärjestelmässä on käytetty SunnyBoy 2500 -vaihtosuuntaajaa, jonka eurooppalainen hyötysuhde on 93,2%. Siten vaihtosuuntaushäviöt huomioon ottava laskettu neliömetrikohtainen tuotto on 123 kWh/m², mikä on 18,7% mitattua tuottoa suurempi. Laskettujen ja mitattujen tuottojen välinen ero johtunee suurimmaksi osaksi säteilyaineiston ja säteilymallien epä-

tarkkuudesta. Lisäksi Keski-Euroopan säteilyolosuhteet eivät täysin vastaa Pohjois-Euroopan olosuhteita, joten eurooppalainen hyötysuhde voi antaa liian optimistisen arvion vaihtosuuntaushäviöistä.



Kuva 30: Agoran aurinkosähköjärjestelmän mallinnetut ja mitatut kuukausituotot vuodelle 2010

Kuvassa 30 on esitetty vuoden 2010 laskettu ja mitattu kokonaistuotto kuukausikohtaisesti. Lasketuista arvoista on vähennetty vaihtosuuntaushäviöt. Kuvasta 30 voidaan havaita, että mitatut tuotot ovat laskettuja suuremmat helmi-, loka- ja marraskuussa. Muina kuukausina laskettu tuotto on mitattua suurempi. Lasketun ja mitatun tuoton ero näyttäisi olevan suurimmillaan kesäkuukausina, kun säteilyä saadaan eniten. Tämä viittaa siihen, että malli aliarvioi paneelien suorituskykyä alhaisilla säteilytiheyksillä ja yliarvioi sitä suurilla säteilytiheyksillä.

8 Johtopäätökset

Tutkimuskohteille lasketut tuotot osoittavat, että rakennuksen katolle asennettuna, 305 W:n paneeleista koostuvalla aurinkosähköjärjestelmällä voidaan tuottaa merkittävä osa koko rakennuksen laitesähköstä; mikäli ylijäämätuotot varastoidaan ja rakennuksen keskimääräinen asuntokohtainen laitesähkönkulutus on noin 2400 kWh vuodessa, kohde voi kesällä olla jopa täysin omavarainen ja vuositason aurinkosähköllä voidaan kattaa noin 45% kulutuksesta. Vaihtosuuntaus aiheuttaa tuottoihin noin 4–8% häviön. Ideaalisuudesta ja säteilymallista johtuen tulokset voivat yliarvioida todellista tuottoa noin 18,7%. Todellisempi arvio vuositason tuotoista lienee siten lähempänä 34 prosenttia laitesähkönkulutuksesta. Valitsemalla tehokkaampi, 345 W:n yksikidepaneeli, neliömetrikohtaisia tuottoja voitaisiin parantaa noin 14%. 105 W:n ohutfilmi-paneelilla voidaan tuottaa vain noin 54% 305 W:n paneelilla saavutetusta neliömetrikohtaisesta tuotosta.

Aurinkosähköjärjestelmän teknisessä potentiaalissa suurin tekijä on kattopinta-alan suhde talon asukasmäärään. Harjakatto voi soveltua aurinkosähkön paikallistuotantoon lähes yhtä hyvin kuin tasakatto, kunhan lappeen suunta ja kulma ovat otolliset. Tasakattelolle asennettavaa paneelimäärää rajoittaa paneelien keskinäinen varjostus, jonka johdosta paneelirivit tulee asettaa suhteellisen kauas toisistaan. Harjakatoilla paneelien määrää rajoittavat ainoastaan tarvittavat huollon ja ylläpidon mahdollistavat välit, mutta lappeen kallistuskulma on yleensä ideaalista kulmaa loivempi ja toinen lape on usein suuntautunut liian pohjoiseen tuottaakseen mitään. Pulpettikatoilla koko kattopinta voi olla otollisesti suuntautunut, mutta katon kallistuskulma on tyypillisesti hyvin loiva. Esimerkiksi Konsalla ja Jyväsellä on kattopinta-alaa lähes saman verran, mutta Jyväsän katolle mahtuu kaksinkertainen määrä paneelipinta-alaa. Jyväsän pohjoispuolen lappeet eivät kuitenkaan käytännössä tuota mitään, joten Konsan ja Jyväsän kokonaistuotot ovat lähes samat. Hospan taas on oiva esimerkki siitä, kuinka kallistuskulma voi kompensoida lappeen suuntaa: Hospan ja Jyväsän neliömetrikohtaiset tuotot ovat lähes identtiset, vaikka Jyväsän tuottavat lappeet osoittavat lähes etelään ja Hospan tuottava lape kaakkoon. Hospan ja Jyväsän neliömetrikohtaisten tuottojen samankaltaisuus selittyy kattojen kallistuskulmaerolla: Jyväsän lappeet ovat noin 18 asteen kulmassa, kun taas Hospan lappeet ovat aavistuksen paremmassa, lähes 24 asteen kulmassa. Hospan kokonaistuottojen suhde kulutukseen on kuitenkin paljon suurempi kuin Jyväsän, mikä johtuu Hospan näennäisen alhaisesta asuntomäärästä. Todellisuudessa Hospan kokoisen rakennuksen sisälle mahtuisi jopa kaksinkertainen määrä asuntoja, mikä pudottaisi Hospan tuoton suhteen kulutukseen samalle tasolle Jyväsän kanssa.

Eri vuosien väliset tuottoerot ovat rakennuksen kulutukseen verrattuna

mitättömiä. Kuukausi- ja kausikohtaisesti eri vuosien välillä on luonnollisesti enemmän vaihtelua. Mikäli järjestelmän mahdollisesti tuottama ylijäämä sähkö voidaan varastoida, voidaan asennetulta aurinkosähköjärjestelmältä kuitenkin odottaa lisäsähkön vuosikustannusten kannalta lähes vakiotuottoja.

Laskettujen ja mitattujen tuottojen välisestä erosta suurin osa johtunee säteilyaineiston ja säteilymallien epätarkkuudesta. MATLAB-ohjelman antamat tulokset tarkentuisivat huomattavasti, mikäli käytössä olisi pyranometri, jonka kosinivaste ei riippuisi yhtä vahvasti säteilyn tulokulmasta kuin sääaseman pyranometrin vaste, ja mikäli käytettävissä olisi kokonaissäteilyaineiston sijaan suoran säteilyn ja hajasäteilyn aineisto. Tämä pienentäisi aineistossa ilmenevää virhettä ja poistaisi hajasäteilymallin käytön tarpeen kokonaan, pienentäen myös säteilymallien käytöstä johtuvaa virhettä.

Olisi myös tarpeellista tutkia, kuinka paljon Suomen säteily- ja sääolot eroavat esimerkiksi Keski-Euroopan vastaavista, sillä Suomessa tuotettu tutkimustieto vaikuttaisi joiltain osin olevan jopa ristiriidassa alhaisemmilla leveyspiireillä tuotetun tutkimustiedon kanssa. Esimerkiksi Vartiaisen [18] tulkinat Perezin säteilymallin tarkkuudesta ovat täysin vastakkaiset kuin Padovanin ja De Colin[14]: Padovanin ja De Colin mukaan malli liioittelee kaltevalle pinnalle saapuvaa säteilyä, Vartiaisen mukaan vähättelee sitä. Myös tämän tutkielman luvussa 7.4 esitetty tuoton riippuvuus keräimen suunnasta herätti kysymyksiä: tuoton vuosimaksimi saavutettiin -10 asteen atsimuuttikulmalla sekä vuoden 2010 että vuoden 2011 säteilyaineistolla. Olisi tarpeellista selvittää, onko tämä jostakin tehdystä oletuksesta tai käytetyistä säteilymalleista johtuva ominaisuus, vai Suomen säteilyaineistoilla systemaattisesti tapahtuva ilmiö. Suoranaisesta virheestä ei voi olla kyse, sillä teoreettisella säteilyjakaumalla tuoton vuosimaksimi saavutetaan odotetusti atsimuuttikulman arvolla 0. Mikäli sama tulos saadaan tarkemmalla ja laajemmalla säteilyaineistolla käytetyistä laskentamalleista riippumatta, voi tuloksella olla merkitystä paneelien asennuskäytäntöjen kannalta.

Viitteet

- [1] Euroopan unioni, *Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2009/28/EY*, Euroopan unionin virallinen lehti L 140, **52**, 16–62, 2009
- [2] Tilastokeskus: Suomen tilastollinen vuosikirja 2013
http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/vuosikirja2013 [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [3] Motiva: uusiutuva energia
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [4] Työ- ja elinkeinoministeriö, *Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011*
https://www.tem.fi/files/35856/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_raportti.pdf [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [5] Energiateollisuus: kaukolämpötilastot
<http://energia.fi/tilastot/kaukolammitys>
[viittauspäivä: 17.11.2014]
- [6] J.A Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edition*, John Wiley & Sons, inc., 2013
- [7] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Power Systems, 1st edition*, John Wiley & Sons Inc., 2004
- [8] V. Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems, 1st edition*, Earthscan, 2005
- [9] J. Spencer, *Fourier Series Representation of the Position of the Sun*, *Search* **2**, 172, 1971
- [10] PV Education: standard solar spectra
<http://pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra> [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [11] Tuuliatlas: maaston rosoisuus
http://www.tuuliatlas.fi/mallinnus/mallinnus_3 [viittauspäivä: 17.11.2014]

- [12] D.T. Reindl, W.A. Beckman, J.A. Duffie, *Diffuse fraction corrections*, Solar Energy **45**, 1-7, 1990
- [13] G. Vijayakumar, M. Kummert, S. A. Klein, W. A. Beckman *Analysis of short-term solar radiation data*, Solar Energy **79**, 495–504, 2005
- [14] A. Padovan, D. De Col, *Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes*, Solar energy **84**, 2068–2084, 2010
- [15] S. Dervishi, A. Mahdavi, *Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: A model comparison*, Solar Energy **86**, 1796–1802, 2012
- [16] D.T. Reindl, W.A. Beckman, J.A. Duffie, *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*, Solar Energy **45**, 9–15, 1990
- [17] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, Solar Energy **44**, 271–289, 1990
- [18] E. Vartiainen, *A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces*, Renewable energy **20**, 45–64, 2000
- [19] R. Prado, F. Ferreira *Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials*, Energy and Buildings **37**, 295–300, 2005
- [20] J.A. Coakley, *Reflectance and albedo, surface*, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 1914–1923, 2003
- [21] Ilmatieteen laitos: lumitilastot
<http://ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot>
 [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [22] A. Luque, S. Hegedus *Handbook of photovoltaic science and engineering, 1st edition*, John Wiley & Sons Inc., 2003

- [23] M. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, 1st edition, Prentice-Hall, 1982
- [24] N. Martin, J. Ruiz, *Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **70**, 25–38, 2001
- [25] N. Martin, J. Ruiz, *A New Method for the Spectral Characterisation of PV Modules*, *Progress In Photovoltaics: Research and Applications* **7**, 299–310, 1999
- [26] E. Smiley, L. Stamenic, J. Jones, M. Stojanovic, *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2002–2004, 2000
- [27] L. King, J. Kratochvil, E. Boyson, W. Bower, *2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 1947–1952, 1998
- [28] T. Toikka, *Effects of non-tracking solar collector orientation on energy production: Photovoltaic systems*, pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, fysiikan laitos, 2012
- [29] Energy Informative: solar basics
<http://energyinformative.org/solar-basics>
 [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [30] Jyväskylän rakennusvalvonta: aurinkopaneelit, tuuli-voimalat ja lautasantennit
<http://www.jyvaskyla.fi/rakennus/ohjeet/lautasantenni> [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [31] Kattoliitto, *Toimivat katot 2013*
http://www.kattoliitto.fi/files/504/Toimivat_Katot_2013_reduced_size_.pdf
 [viittauspäivä: 17.11.2014]
- [32] Ilmatieteen laitos: vuositilastot
<http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>
 [viittauspäivä: 17.11.2014]

- [33] Deutsche Gesellschaft Für Sonnenenergie, *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*, 1st edition, Earthscan, 2008
- [34] C. Demoulias, *A new simple analytical method for calculating the optimum inverter size in grid-connected PV plants*, Electric Power Systems Research **80**, 1197–1204, 2010
- [35] Motiva: seurantakohteita
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/kokemuksia_aurinkosahkosta/seurantakohteita,
[viittauspäivä: 17.11.2014]