



Kari Liimatta

Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus elintarvikemyymälään

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

22.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Kari Liimatta
Otsikko: Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus elintarvikemyymälään
Sivumäärä: 37 sivua + 1 liite
Aika: 22.5.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Talotekniikka
Ammatillinen pääaine: LVI-suunnittelu
Ohjaaja: Jarmo Tapio

Tässä insinööriyössä tutkittiin aurinkosähköjärjestelmän suunnittelua ja mitoitusta Hyvinkäällä sijaitsevalle elintarvikemyymälälle. Työn lähtökohtana oli selvittää, millainen aurinkosähköjärjestelmä voidaan asentaa liiketilan katolle siten, että se on taloudellisesti kannattavaa ja teknisesti toteutettavissa. Työssä käytiin läpi aurinkoenergian teoriaa, aurinkosähköpaneelien ominaisuuksia ja järjestelmän suunnittelun käytännön näkökohtia, kuten inverttereitä, mitoituksia ja potentiaalisten varjostusten vaikutusta tuottoon.

Järjestelmän mitoitus perustui myymälän nykyiseen energiankulutukseen ja kohdeyrityksen ympäristöön, joka mahdollisti aurinkoenergian tehokkaan hyödyntämisen. Työssä vertailtiin erilaisia mitoitus tapoja, kuten omakäyttömitoitusta, katto täyteen -mitoitusta ja tasapainoista mitoitusta, joita kaikkia arvioitiin niiden taloudellisten ja ympäristöllisten hyötyjen perusteella.

Investointi aurinkosähköjärjestelmään osoittautui kannattavaksi, sillä tasapainoisesti mitoitettu järjestelmä vähentää ostosähkön vuotuista tarvetta arviolta 44,5 MWh ja tarjoaa merkittäviä säästöjä energiakustannuksissa. Arvioidulla hankintahinnalla investoinnin tuotto on 13,5 %, kun järjestelmän mitoituksessa optimoitiin sekä tekniset että taloudelliset tekijät.

Työn tulokset tarjoavat kohdeyritykselle tiedot optimaalisesta mitoituksesta ja kannattavuusarvion, joka auttaa yritystä tekemään perustellun investointipäätöksen. Lisäksi työ tukee yrityksen ympäristövastuullisuutta ja tarjoaa mallin, jota voidaan soveltaa vastaavissa kohteissa aurinkosähköjärjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen.

Avainsanat: aurinkosähkö, aurinkopaneeli, aurinkosähköjärjestelmä, kannattavuuslaskenta

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Kari Liimatta
Title: Sizing of Solar Power System for Grocery Store
Number of Pages: 37 pages + 1 appendix
Date: 22 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Specialisation option: HVAC Design
Supervisors: Jarmo Tapio, Senior Lecturer

This final year project aimed to design and size a photovoltaic system for a grocery store with the purpose of determining the most viable solar power solution. The goals were to reduce the store's dependence on purchased electricity, decrease energy costs, and explore the potential for solar power in a commercial setting.

The methods used involved analysing current energy consumption data of the store, evaluating the solar potential based on geographical location, and utilizing simulation tools to estimate the photovoltaic system's performance under different configurations. System sizing options considered included self-consumption, maximizing roof coverage, and a balanced approach combining the two strategies.

The results showed that the designed photovoltaic system could significantly reduce the annual electricity purchase by approximately 44,5 MWh, corresponding to substantial savings in energy costs. With the estimated acquisition cost, the investment return was calculated to be 13,5 %.

The conclusions drawn from the project highlight its importance in promoting renewable energy adoption in retail environments. The study proved that installing a solar power system is a financially sound and environmentally beneficial strategy. This project not only supports the commissioning company's sustainability goals but also serves as a model for similar commercial installations.

Keywords: photovoltaic

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkosähkö	2
2.1	Historia	2
2.2	Aurinkosähkö osana maailman energiantuotantoa	4
2.3	Aurinkovoima Suomessa	7
3	Aurinkosähkötekniikka	9
3.1	Invertterit	9
3.2	MPPT	11
3.3	Bifacial	12
3.4	Half cut -paneelit	13
4	Kohteen esittely	14
4.1	Paneelien sijoittelu	15
4.2	Varjostukset	16
4.3	Kattokulma	17
5	Järjestelmän mitoitus	17
5.1	PVGIS-tuotantoennuste	17
5.2	Lumen vaikutus tuotantoon	18
5.3	Tunnin sisäinen netotus	19
5.4	Omakäyttömitoitus	20
5.5	Katto täyteen -mitoitus	21
5.6	Tasapaino -mitoitus	22
5.7	Arvioitu tuotanto	23
6	Järjestelmän kustannukset	25
6.1	Paneeliluokat	25
6.1.1	Korkean hyötysuhteen luokka	26
6.1.2	Valtavirtaluokka	26
6.1.3	Budjettiluokka	27
6.2	Investoinnin kustannusarvio	27

7	Kannattavuusarviointi	29
7.1	Sähkön hinta	29
7.2	Uusiutuvien kannibalisaatio	30
7.3	Taloudellinen kannattavuus	31
7.4	Tulokset	32
8	Yhteenveto	34
	Lähteet	35
	Liite 1: Aurinkopaneelien odotettu tehontuotto ikääntymisen myötä	

Lyhenteet

- Albedo:** Heijastavuusaste, joka kuvaa maanpinnan tai muun materiaalin kykyä heijastaa auringonvaloa. Albedoa mitataan skaalalla 0–1, missä 1 tarkoittaa täydellistä heijastavuutta.
- Bifacial:** Kaksipuolinen aurinkopaneeli, joka pystyy tuottamaan sähköä molemmilta pinnoiltaan, parantaen näin paneelin tehokkuutta erityisesti lumisilla tai heijastavilla alustoilla.
- Half cut:** Kennot, jotka on halkaistu kahtia parantamaan paneelin suorituskykyä ja vähentämään varjostuksen vaikutusta.
- HTJ:** *Heterojunction Technology* tekniikassa piikentojen väliin sijoitetaan ohut amorfinen piikerros, joka parantaa kennojen suorituskykyä erityisesti heikoissa valo-olosuhteissa ja korkeissa lämpötiloissa.
- IBC:** *Integrated Back Contact*. Aurinkokennoteknologia, jossa kaikki sähköä johtavat kontaktit sijaitsevat kennoston takapinnalla, mikä mahdollistaa paremman valonkeruun ja tehokkuuden.
- MPPT:** *Maximum Power Point Tracking*. Tekniikka, joka optimoi aurinkopaneelien tehotuoton säätämällä sähkökuorman vastusta maksimaalisen energiantuoton saavuttamiseksi.
- PVGIS:** *Photovoltaic Geographical Information System*. Työkalu, joka tarjoaa arvioita aurinkosähköjärjestelmien tuotannosta eri geografisissa olosuhteissa.
- TOPCon:** *Tunnel Oxide Passivated Contact* tekniikassa käytetään ohutta oksidikerrosta ja polysilikonikerrosta, jotka sijoitetaan aurinkokennon n-tyyppin ja p-tyyppin piikerrosten väliin.

1 Johdanto

Nyky-yhteiskunnassa aurinkoenergia on tunnustettu yhdeksi merkittävimmistä kestäväen kehityksen voimavaroista. Se on puhdas, uusiutuva ja tehokas energiamuoto. Aurinkosähköjärjestelmät hyödyntävät auringon säteilyä, joka on ilmaista polttoainetta ja jota on saatavilla niin kauan kuin aurinko paistaa. Järjestelmien kyky ylläpitää yli 80 % alkuperäisestä tehostaan 25 vuoden käytön jälkeen korostaa niiden kestävyyttä ja vähäistä huollon tarvetta. PV-moduulien kierrätettävyys ja materiaalien uudelleenkäytön mahdollisuudet vähentävät valmistuksen ympäristövaikutuksia ja tuotantokustannuksia, mikä tekee teknologiasta entistä houkuttelevamman. (Fraile ym. 2023: 10.)

Kuitenkin aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus, erityisesti erikoiskohteissa, tuo esiin useita haasteita. Järjestelmän optimaalisen mitoituksen, komponenttien valinnan ja kannattavuuden selvittäminen muodostavatkin tämän insinööriyön tutkimusongelman. Tavoitteena on selvittää aurinkosähköjärjestelmän kannattavuutta ja optimaalista kokoa erityisesti elintarvikemyymälän tarpeisiin huomioiden sähkönkulutuksen tunti-, päivä- ja kuukausivaihtelut.

Kohdeyrityksenä on Hyvinkäällä sijaitseva elintarvikemyymälä, jossa on kaakon suuntainen pulpettikatto. Tämä optimoi auringonvalon saantia aamupäivisin. Myymälän vuotuinen sähkönkulutus on dokumentoitu tarkasti, ja nämä tiedot ovat perustana aurinkosähköjärjestelmän tarkan mitoituksen ja investoinnin kannattavuuden laskennalle.

Mitoituksessa sovelletaan erilaisia strategioita ja tuotannon arviointiin käytetään PVGIS-tuotantoennustetta aurinkopaneelien tuottojen arvioimiseen eri asennuskulmissa ja -suunnissa. Varjostuksen vaikutus otetaan huomioon niin horisontin, lumen kuin puuston osalta.

Kaikki tarvittava data kerätään luotettavista lähteistä, ja laskelmissa käytetään standardoituja menetelmiä investoinnin taloudellisen ja ympäristöllisen kannattavuuden arvioimiseksi. Tämän perusteella myymälä voi tehdä perustellun investointipäätöksen.

Työn tarkoituksena on tarjota kohdeyritykselle konkreettisia hyötyjä esittelemällä laskelmia, jotka auttavat arvioimaan aurinkosähköjärjestelmän investoinnin kannattavuutta. Lisäksi työ tukee yrityksen ympäristövastuullisuutta. Tutkimuksen tulokset hyödyttävät paitsi kohdeyritystä, myös tarjoavat arvokasta tietoa muille yrityksille, jotka harkitsevat aurinkosähköjärjestelmän käyttöönottoa.

Tavoitteena on, että työ tarjoaa systemaattisen lähestymistavan aurinkosähköjärjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen, joka on välttämätön niiden laajamittaiselle käyttöönotolle keskisuurissa kohteissa kuten elintarvikemyymälöissä.

2 Aurinkosähkö

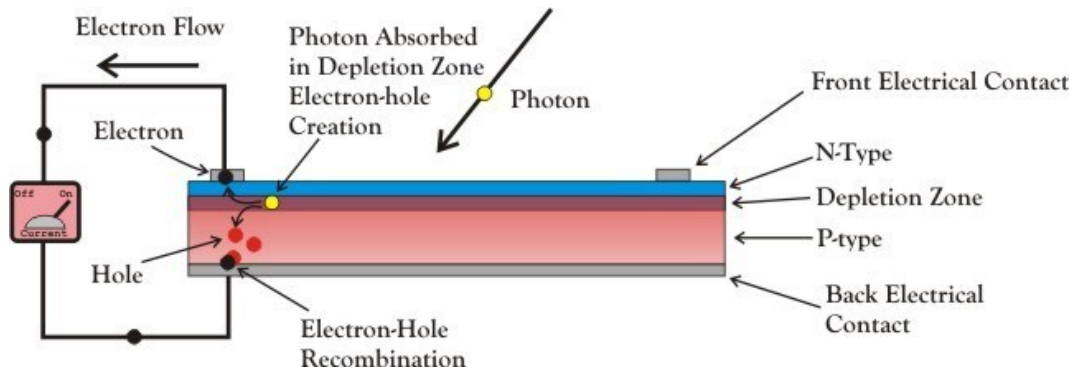
2.1 Historia

Albert Einsteinin työ valosähköisen ilmiön parissa oli ratkaiseva edistysaskel nykyaikaisen aurinkoenergiateknologian kehityksessä. Vuonna 1905 hän keksi, että kun valo osuu metalliin, se voi vapauttaa elektroneja aineen pinnalta.

Vaikka Einstein tunnetaan nykyään paremmin suhteellisuusteoriastaan eikä löydöksestä, joka tunnetaan valosähköisenä ilmiönä, se toi kuitenkin Einsteinille Nobelin palkinnon fysiikassa vuonna 1921. Einsteinin työ perustui aiempiin havaintoihin siitä, että valo saattoi vapauttaa materiaalista sähkövarauksia, mutta hän oli ensimmäinen, joka selitti ilmiön kvanttimekaniikan avulla. Hän osoitti, että valo koostuu hiukkasista, fotoneista, jotka voivat siirtää energiaa elektroneille. Tämä energia voi olla tarpeeksi suuri irrottamaan elektronit atomeista, mikä aiheuttaa sähkövirran. Einsteinin teoria tarjosi perustan ymmärtää, kuinka aurinkokennot muuttavat auringonvaloa sähköenergiaksi, mikä on aurinkopaneelien toiminnan ydin. (Looking Back at the History of Solar Energy.)

Kuvassa 1 on esitetty kuinka sähkövirtaa syntyy, kun fotonit, eli valon energiapaketit, absorboivat atomit N-tyyppin piissä ja irrottavat elektronin. Tämä tapahtuu PN-liitoksen tyhjenemisalueella, joka on se osa, missä N-tyyppin elektronit ovat sekoittuneet P-tyyppin aukkoihin. Vapautunut elektroni ja syntynyt aukko saavat tarpeeksi energiaa hypätäkseen pois tyhjenemisalueelta. Jos

katodin (N-tyyppin pii) ja anodin (P-tyyppin pii) välille kytketään johto, elektronit kulkevat johdon kautta. Elektronit vetäytyvät P-tyyppin materiaalin positiivisen varauksen puoleen ja kulkevat ulkoisen kuorman läpi, luoden sähkövirran. (Photovoltaic Cells – Generating electricity.)



Kuva 1. Aurinkokennon toimintaperiaate (Photovoltaic Cells – Generating electricity).

Nykyisin Nokian omistaman Bell Labsin tutkijat Chapin, Fuller ja Pearson kehittivät ensimmäisen käytännöllisen aurinkokennon vuonna 1954 ratkaistakseen Bellin puhelinjärjestelmän ongelmia trooppisissa olosuhteissa, joissa perinteiset paristot hajosivat nopeasti. Alkuperäiset kokeet seleenillä eivät olleet lupaavia, mutta kun Pearson kääntyi piin puoleen, jonka Fuller oli jalostanut puolijohtavuutta parantamaan, he havaitsivat merkittävän sähkövirran tuoton. Heidän kehittämä piikkeno ylitti kaikki aikaisemmat aurinkokennot tehokkuudessa, ja jatkokehitys johti lopulta aurinkokennoon, joka oli riittävän tehokas toimimaan itsenäisenä voimanlähteenä. Vaikka saavutettu 6 %:n hyötysuhde kalpenee nykyisten aurinkokennojen vieressä jo vuonna 1956 povattiin tekniikan mullistavan maailman energiantuotannon. (Perlin 2004: 1–4.)

Kuvassa 2 esitellään Bellin kehittämää aurinkoakkua vuonna 1956.

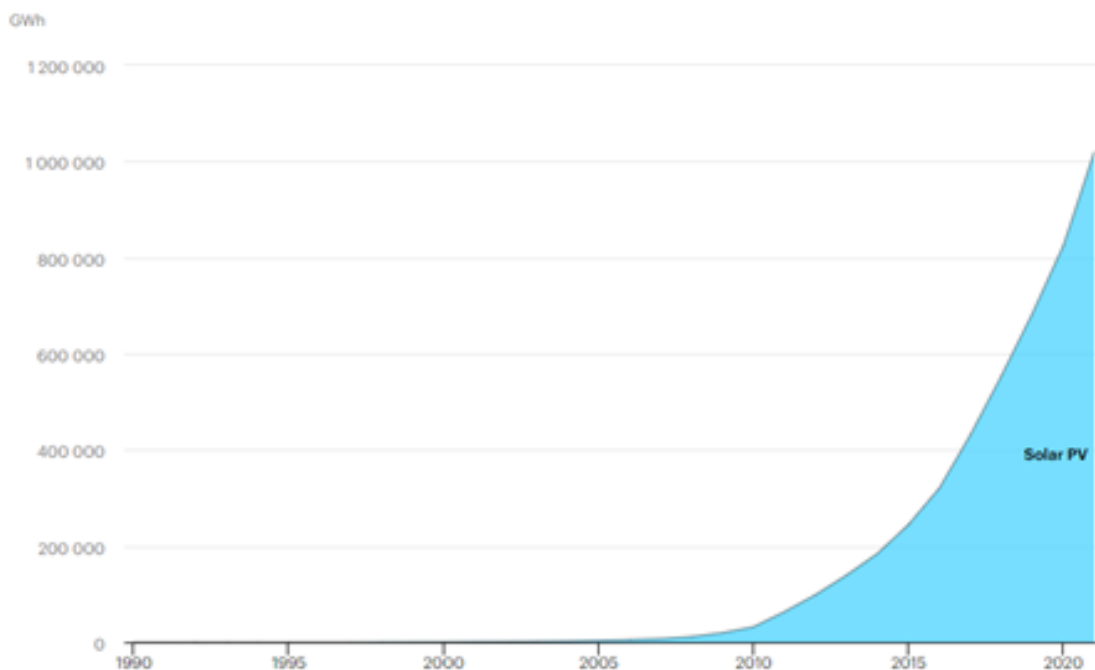


Kuva 2. Bellin aurinkoakkumainos (Perlin 2004: 4).

2.2 Aurinkosähkö osana maailman energiantuotantoa

Vuonna 2022 maailman kokonaissähköntuotantokapasiteetti kaikista lähteistä kasvoi 4,1 %, mikä oli samankaltainen kasvu kuin vuonna 2021. Energiasiirtymä uusiutuviin keskittyi pääasiassa tuuli- ja aurinkovoimaan. Aurinkovoima kattoi 18,1 % vuonna 2022 asennetusta tuotantokapasiteetista, ja sen kokonaiskapasiteetti kasvoi 243 gigawattia saavuttaen 1185 GW. Aurinkoenergian kokonaiskapasiteettia kasvatettiin noin 37 % enemmän kuin vuonna 2021. Kiina asensi tästä 44 %, kun taas Yhdysvallat ja Intia kumpikin 8 %. (Renewables 2023 Global Status Report 2023: 19.)

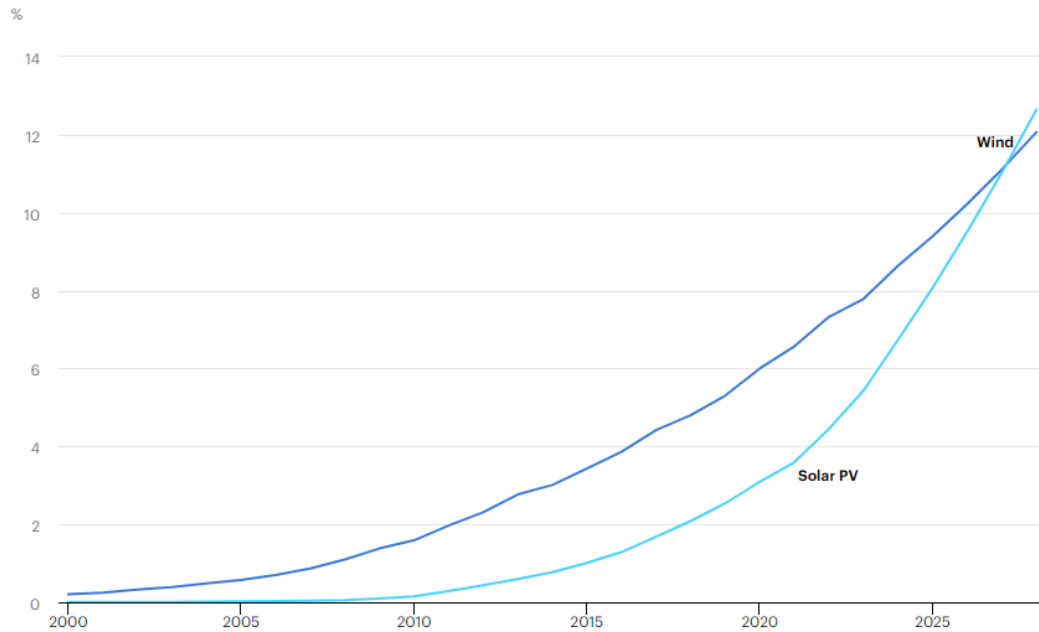
Kuvassa 3 näkyy aurinkosähkön tuotannon eksponentiaalinen kasvu vuoteen 2021 saakka.



Kuva 3. Aurinkosähkön tuotannon kehitys 1990–2021 (Energy Statistics Data Browser 2023).

Vuoteen 2028 mennessä aurinkoenergian osuus maailmanlaajuisessa sähkön-tuotannossa odotetaan kaksinkertaistuvan, ja aurinkosähkön asennettu kapasiteetti saattaa ohittaa tuulivoiman. Kiina on edelleen johtava mahti aurinkosähkön lisäyksessä, ja sen odotetaan saavuttavan kansalliset tavoitteensa kuusi vuotta etuajassa. Yhdysvalloissa, EU:ssa, Intiassa ja Brasiliassa aurinko- ja tuulivoiman kasvu kiihtyy, ja erityisesti Yhdysvalloissa Inflaationvähentämislaki kiihdyttää aurinkoenergian kasvua. Aurinkosähkön hintojen laskun ja ylituotannon vuoksi paneelien hinnat ovat laskeneet, mikä lisää aurinkosähkön houkuttelevuutta. Integraatio- ja infrastruktuurihaasteet kasvavat, kun aurinko- ja tuulivoiman osuus kasvaa. (Renewables 2023 Analysis and forecast to 2028 2023: 7–9.)

Kuvassa 4 ennustetaan aurinkosähkön tuotannon kasvavan 12,6 prosenttiin koko maailman sähkön tuotannosta vuoteen 2028 mennessä ohittaen samalla tuulivoiman osuudellaan.

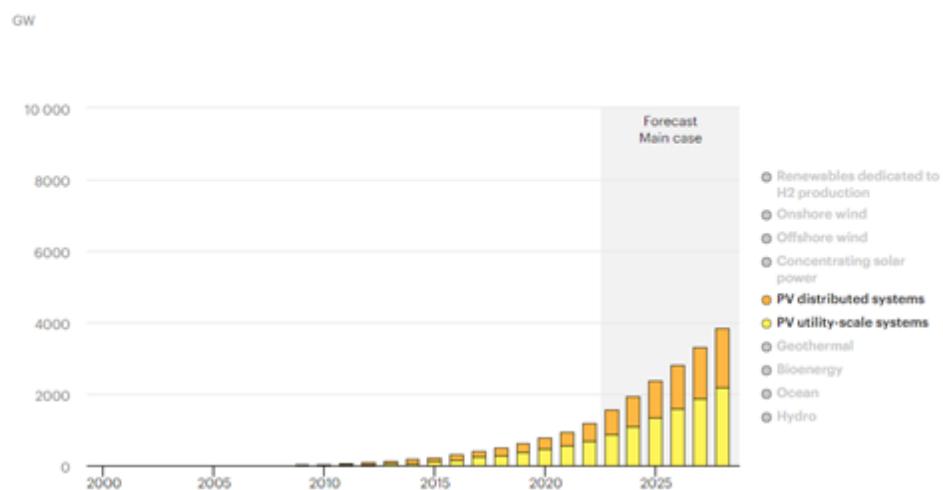


Kuva 4. Ennuste aurinko- ja tuulivoiman osuudesta maailman sähköntuotannossa (Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2028 2023).

Kuvassa 5 on ennuste asennetun aurinkosähkön määrälle maailmassa.

Historical data and forecasts

Main case Accelerated case Compare cases



Kuva 5. Aurinkosähkön asennettu kapasiteetti ja ennuste (Renewable Energy Progress Tracker 2023).

2.3 Aurinkovoima Suomessa

Vastoin yleistä käsitystä sen rajallisesta aurinkovoimapotentialista Suomi vertautuu tuotantopotentiaailtaan Keski-Euroopan maihin. Aurinkoenergian hyödyntämiseen Suomessa vaikuttavat maan pohjoinen sijainti ja vuodenaikojen vaihtelu, jotka tuovat omat erityispiirteensä aurinkopaneelien käyttöön ja tuottoon. Esimerkiksi, kylmät lämpötilat parantavat aurinkokennojen hyötysuhdetta ja lumipeitteiset maat heijastavat valoa lisäten paneelien tehokkuutta. Aurinkosähköä voidaan Suomessa hyödyntää tehokkaasti myös talvella, kun aurinko paistaa matalalta. Julkisivuasennukset ja seinäpaneelit ovat erityisen hyödyllisiä, sillä ne keräävät energiaa kirkkaina päivinä hyödyntäen myös lumen heijastamaa valoa. (Kosonen 2019.)

Kuvassa 6 Suomen suurin aurinkovoimala kuvattuna ilmasta käsin.



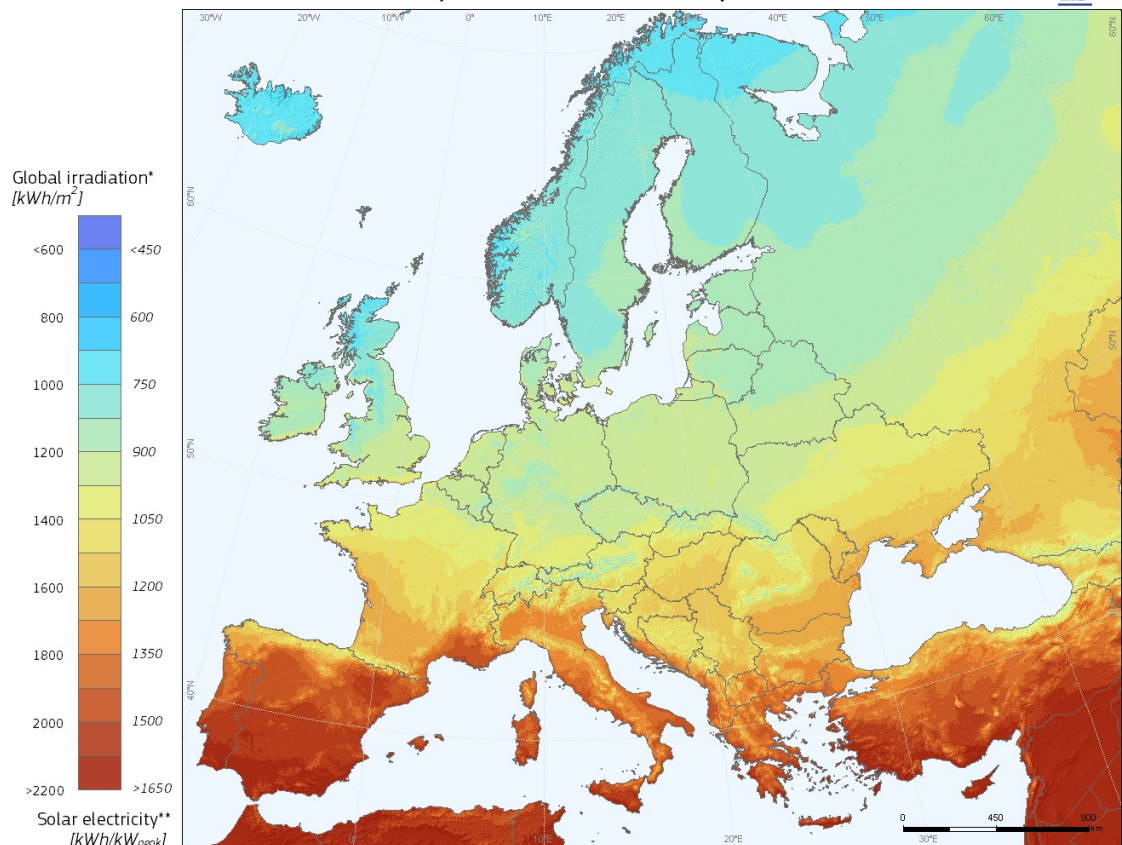
Kuva 6. Suomen suurin aurinkovoimala Kalajoella (Remes 2023).

Suomessa jopa puolet vuoden säteilystä on hajasäteilyä eli ilmakehän, pilvien ja maan heijastamaa valoa. Se tekee keskittävistä ja aurinkoa seuraavista järjestelmistä vähemmän houkuttelevia, sillä ne hyödyntävät vain suoraa säteilyä. Aurinkopaneelien sijoittelulla ja kallistuskulmalla on kuitenkin merkitystä. Esimerkiksi lumesta, vedestä ja kiiltävistä pinnoista heijastuva valo voi lisätä kallistetuille paneeleille tulevaa säteilyä jopa 20 %. Vuositasolla heijastunut valo tuo kuitenkin vain muutaman prosentin lisäyksen. (Auringonsäteilyn määrä Suomessa 2024.)

Vaikka eteläisen Suomen ja Pohjois-Saksan vuotuinen säteily määrä on lähes sama, keskittyy säteily meillä vahvemmin kesäkuukausille. Tämä tarkoittaa, että tuotanto vaihtelee enemmän vuodenaikojen mukaan. Helsingissä vuotuinen säteily määrä vaakasuoralle pinnalle on noin 980 kWh/m², kun taas Sodankylässä luku on noin 790 kWh/m². Suuntaamalla paneelit 45 asteen kulmaan etelään päin voidaan hyödynnettävän säteilyn määrää lisätä 20–30 % vuositasolla. (Auringonsäteilyn määrä Suomessa 2024.)

Kuvassa 7 on nähtävissä vuotuinen auringon säteily määrä Euroopassa.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



* Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

** Yearly sum of solar electricity generated by optimally-inclined 1kW_p system with a performance ratio of 0.75

© European Union, 2012
PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
EC - Joint Research Centre
In collaboration with: CM SAF, www.cmsaf.eu

Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication.

Kuva 7. Vuotuinen auringon säteily määrä optimaalisesti kallistetulle pinnalle (Photovoltaic solar electricity potential in European Countries 2012).

3 Aurinkosähkötekniikka

Tässä luvussa käsitellään muutamia aurinkosähkötekniikan keskeisiä tekniikoita ja komponentteja, jotka tulee ottaa huomioon järjestelmää suunnitellessa niiden vaikuttaessa aurinkosähkön tuotannon määrään.

3.1 Invertterit

Invertterit ovat laitteita, jotka muuntavat aurinkopaneeleista tulevan tasasähkön vaihtosähköksi, jota voidaan käyttää sähköverkossa tai kotitalouden laitteissa. On olemassa kahden tyyppisiä inverttereitä: string-inverttereitä ja mikroinvertte-
reitä. String-invertterit liitetään useisiin sarjaan ja/tai rinnan kytkettyihin aurinko-
paneeleihin ja ne muuntavat koko paneelijonon tuottaman sähkön kerralla. Tämä tarkoittaa, että jos yksi paneeli varjostuu, se voi vaikuttaa koko aurinkopa-
neelisarjan tehokkuuteen.

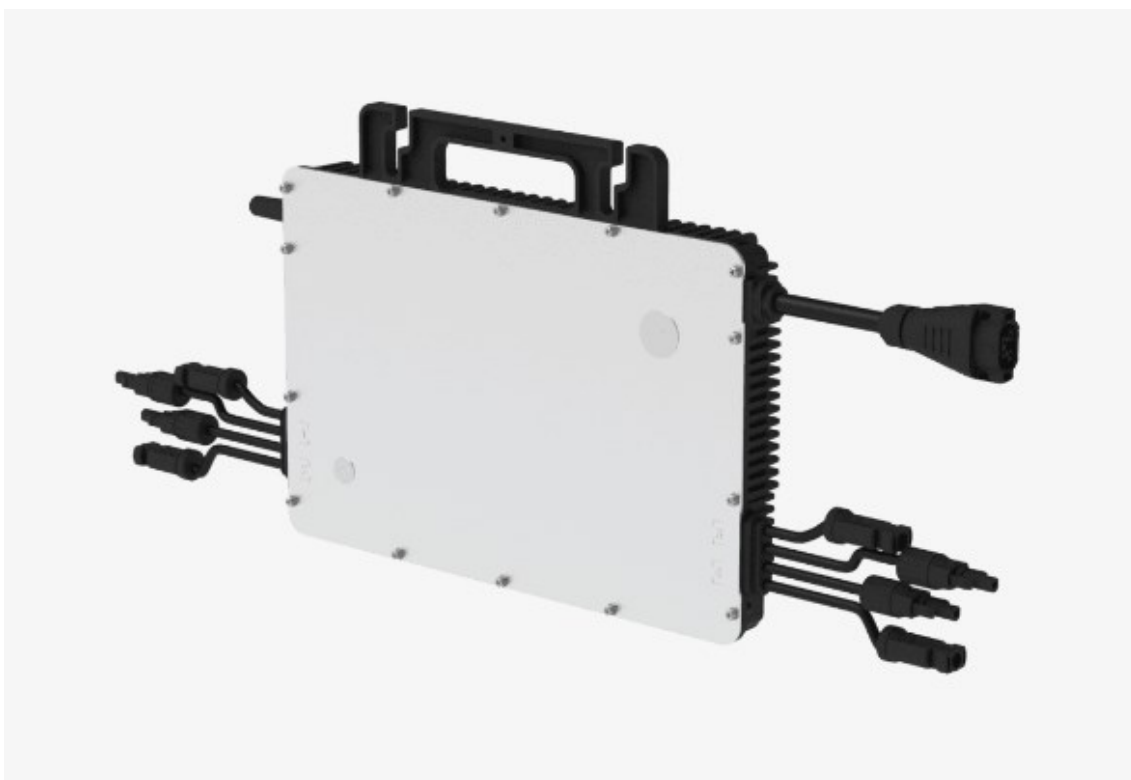
Kuvassa 8 on Froniuksen 100 kW:n invertteri johon pystyy liittämään kolme erillistä piiriä paneeleita.



Kuva 8. Fronius Tauro Eco 100 kW -invertteri (Fronius Tauro Eco 2024).

Mikroinvertterit asennetaan aurinkopaneelien yhteyteen, niin että yksi invertteri hoitaa 1–4 paneelia. Tämä mahdollistaa jopa jokaisen paneelin toimimisen itsenäisesti. Tämä parantaa järjestelmän suorituskykyä varjostuksen tai yksittäisen paneelin vian sattuessa ja mahdollistaa tarkemman seurannan ja hallinnan paneelikohtaisesti. Mikroinverttereiden käyttö on yleensä kalliimpaa perustamiskustannuksiltaan, mutta ne voivat tarjota paremman kokonaistehokkuuden etenkin haastavissa olosuhteissa, kuten epätasaisella katolla tai alueilla, joilla varjostus on yleistä.

Kuvassa 9 on Hoymiles 2000 W:n -mikroinvertteri, johon voi liittää neljä moduulia.



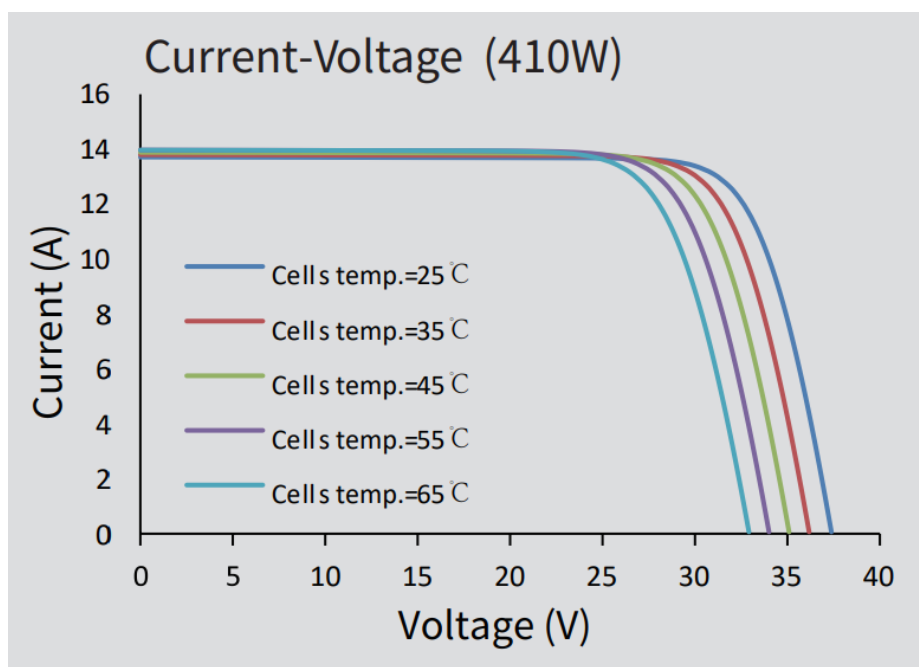
Kuva 9. Hoymiles HMS-1800B/2000B-4T -mikroinvertteri (HMS-1800B/2000B-4T).

3.2 MPPT

MPPT eli Maximum Power Point Tracking on tekniikka, jota käytetään aurinkosähköjärjestelmissä optimoimaan aurinkopaneelien tehotuotto. Se säätää sähkökuorman vastusta siten, että paneelit tuottavat mahdollisimman paljon energiaa muuttuvissa ympäristöolosuhteissa, kuten vaihtelevassa auringonvalossa ja erilaisissa lämpötiloissa. MPPT-järjestelmät tarkkailevat jatkuvasti paneelien jännitettä ja virtaa ja säätävät niitä dynaamisesti löytääkseen kunkin hetken maksimitehopisteen, mikä lisää energiantuottoa ja parantaa järjestelmän kokonaistehokkuutta.

MPPT on yleensä yhdistetty invertteriin, mutta ne saattavat myös sisältyä paneelikohtaisiin tasasähkökonverttereihin eli optimoijiin. String-inverttereissä on yleensä useampi MPPT-piiri, jotta esimerkiksi eri lappeille sijoitetut paneelit voidaan sijoittaa omiin piireihinsä.

Kuvassa 10 näkyy valmistajan ilmoittaman maksimitehopiste eri lämpötiloissa virta-jännitekuvaajana säteilyn ollessa 1000 W/m^2 .



Kuva 10. Astronergy CHSM54M-HC -aurinkokennon virta-jännitekäyrä eri lämpötiloissa (Astro 5s 2021).

3.3 Bifacial

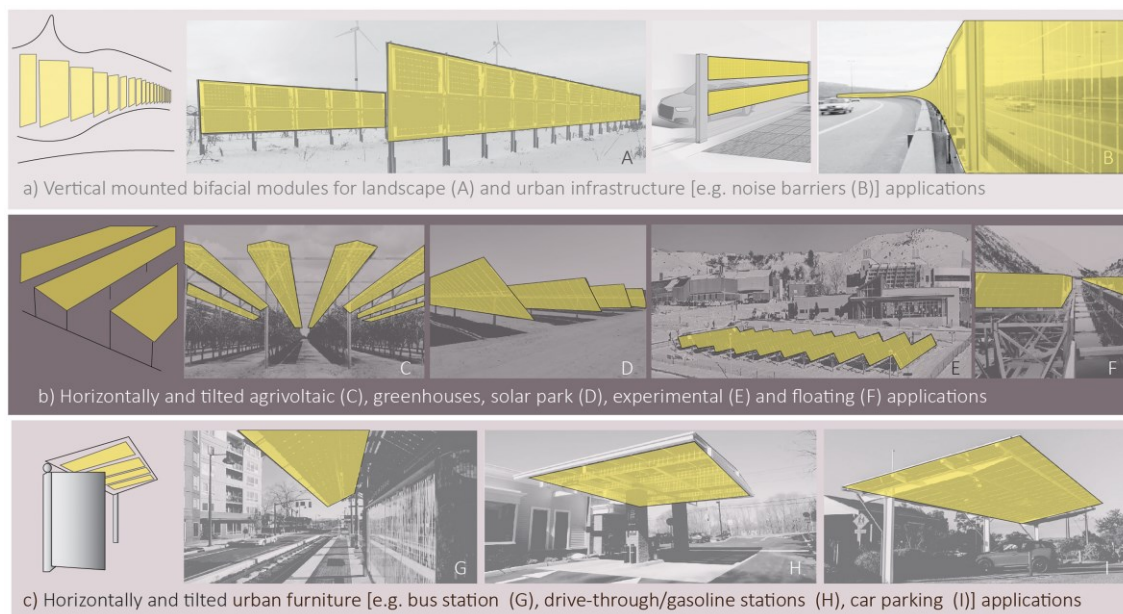
Bifacial eli kaksipuoliset aurinkopaneelit ovat lupaava teknologia, joka mahdollistaa sähköntuotannon sekä paneelin etu- että takapuolelta parantaen potentiaalia korkean leveysasteen alueilla, kuten Pohjoismaissa. Paneelien pystyasennus itä-länsi suunnassa mahdollistaa aamun ja illan auringonsäteilyn tehokkaan keräämisen, mikä vastaa paremmin sähkönkulutuksen huippuja ja mahdollistaa jopa tuotannon nousun lumisateen aikana. Kaksisuuntaisuudesta hyötyviä asennustapoja ovat mahdollisimmat ilmavat kohteet kuten meluvallit, aidat ja kelluvat asennukset. Paneelien tuotto riippuu paljon paneelien takana olevan pinnan heijastavuudesta eli albedosta. (Joutjärvi ym. 2022.)

Taulukossa 1 on esitelty eri materiaalien albedo arvoja.

Taulukko 1. Eri materiaalien albedoarvoja

Materiaali	Albedo
Kaupunkiympäristö	0,14–0,22
Ruoho	0,26
Tuore lumi	0,82
Märkä lumi	0,55–0,75
Kuiva asfaltti	0,09–0,15
Märkä asfaltti	0,18
Betoni	0,25–0,35
Punaiset tiilet	0,33
Alumiini	0,85

Kuva 11 havainnollistaa kaksipuoleisten paneelien monipuoliset ja luovat käyttökohteet paikoissa, joissa heijastavuus (albedo) on korkea tai lumisateen aikana tuotanto jopa kasvaa entisestään.

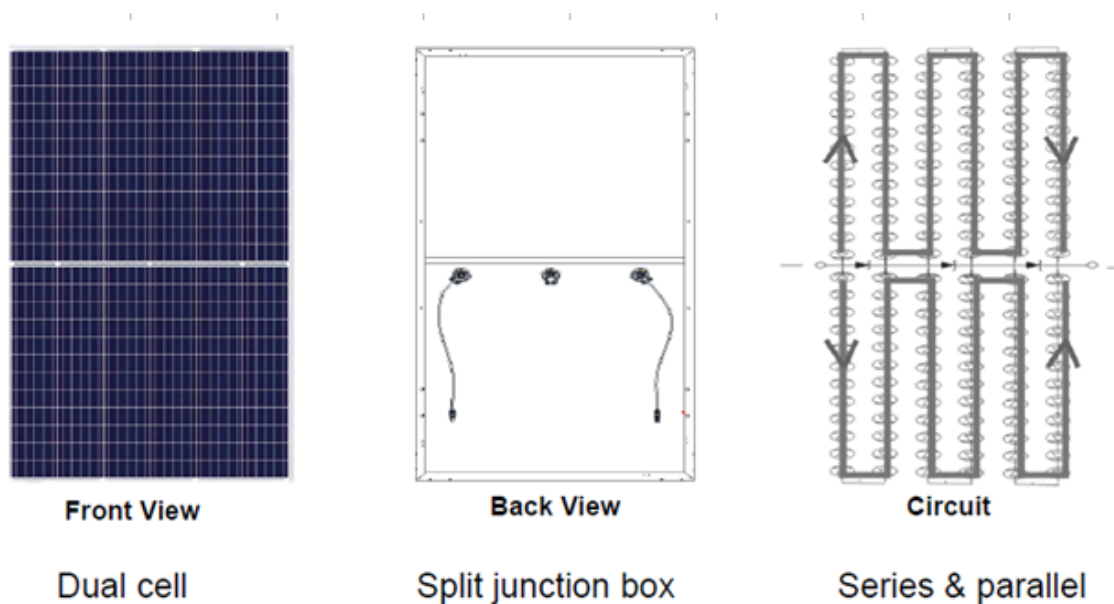


Kuva 11. Kaksipuoleisten paneelien mahdollisia asennuspaikkoja (Joutjärvi ym. 2022).

3.4 Half cut -paneelit

Half cut -paneelit ovat perinteisiä yksi- tai monikidekennoja, jotka on halkaistu laserilla kahtia. Tämä halkaisu pienentää kennon läpi kulkevan virran määrää, vähentäen resistanssihäviöitä ja nostamalla paneelin kokonaistehokkuutta. Halkaistut kennot mahdollistavat myös moduulien paremman suorituskyvyn alhaisen valon olosuhteissa, kun toinen puoli paneelista voi toimia täydellä teholla, vaikka toinen puoli olisi varjostuneena. Varjostunut puoli ohitetaan ohitusdiodia käyttäen mikä vähentää paneelia vahingoittavaa ”hot spot” -ilmiötä, jossa varjostunut kohta paneelista alkaa toimimaan vastuksena ja näin myös pidentää paneelin elinikää. (Half Cut Solar Panel: All You Need To Know.)

Kuvassa 12 näkyy half cut -paneelille ominainen ulkomuoto ja sen piirikaavio ohitusdiodeineen.

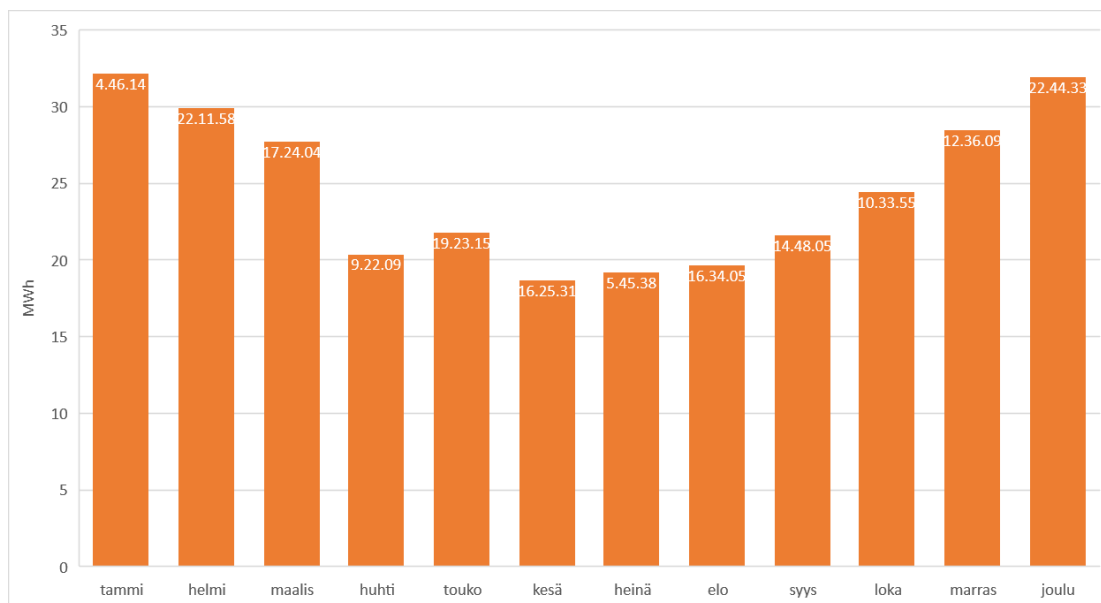


Kuva 12. Half cut -paneeli edestä, takaa ja virtapiiri, jossa näkyy myös ohitusdiodit (Mermoud 2017).

4 Kohteen esittely

Kohde on Hyvinkäällä, Uudellamaalla, sijaitseva elintarvikemyymälä, jonka kaakon suuntaiseen pulpettikattoon mitoitetaan aurinkosähköjärjestelmä. Kaakkoon suunnatut paneelit merkitsevät tuoton kannalta noin 7 %:n pudotusta etelään eli optimaalisesti suunnattuihin paneeleihin verrattuna, huipputeho saavutetaan vähän ennen kello kahtatoista. Rakennuksen konesaumakatto, joka on hyväkuntoinen, soveltuu erinomaisesti aurinkopaneelien kiinnitykseen, koska asennuskisko kiinnittyy saumoihin puristuskiinnikkeiden avulla ilman vesikattoon tehtäviä läpivientejä kiinnikkeille.

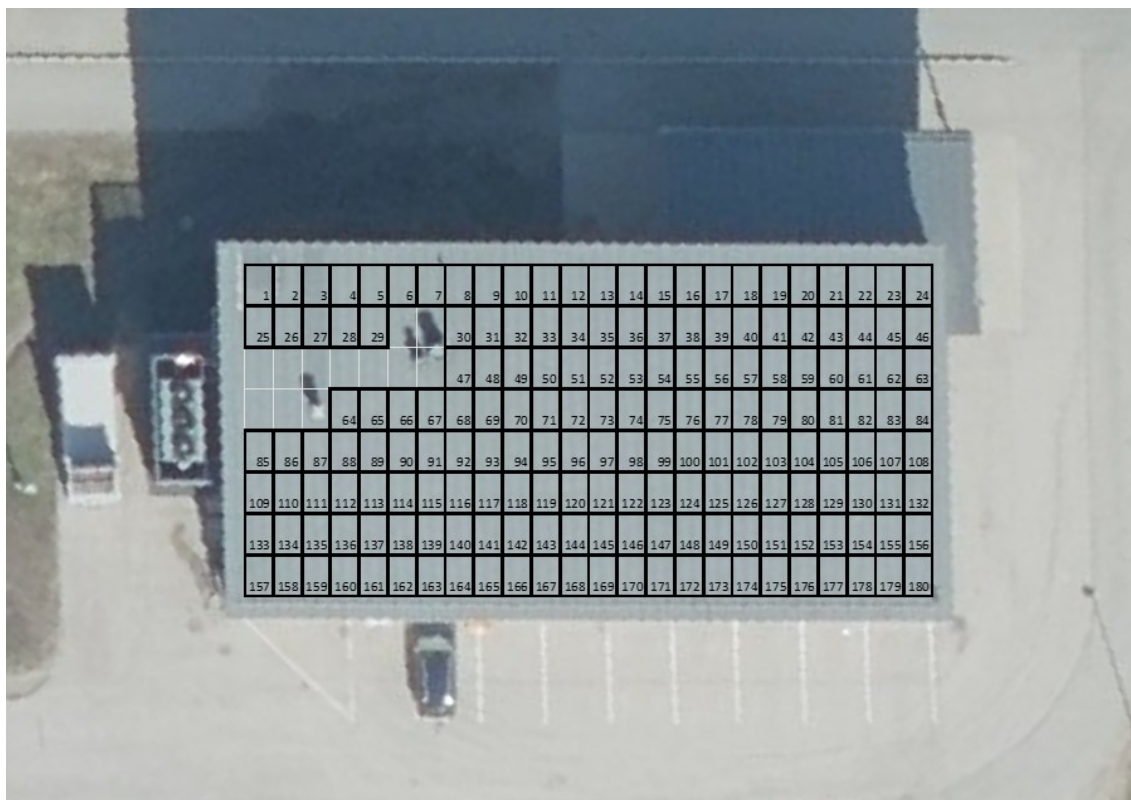
Kohteen vuotuinen sähkönkulutus oli 296 megawattituntia vuonna 2020, ja sen odotetaan pysyvän samana, sillä tekniikka on päivitetty äskettäin eikä kulutukseen vaikuttavia muutoksia ole suunnitteilla. Käytettävissä on tuntikohtainen kulutustieto, jota käytetään aurinkosähkön omakäytön ennusteeseen mitoituksessa. Kuvassa 13 on kohteen kuukausittainen sähkönkulutus vuonna 2020.



Kuva 13. Kohteen sähkönkulutus kuukausitasolla.

4.1 Paneelien sijoittelu

Paneelien sijoitteluprosessi aloitettiin hankkimalla tarkka ilmakehä Hyvinkään kaupungin karttapalvelun sivustolta, joka näyttää rakennuksen kattonäkymän. Rakennuksen katon pinta-ala, noin 450 neliometriä, määrittää perustan paneelien asettelulle. Paneelien sijoittelussa otettiin huomioon huoltoreitit teknisille laitteille, varmistaen, että laitteiden ympärille jää riittävästi tilaa huoltoon ja käyttöä varten eikä niitä saareta paneeleilla. Erityisesti lumiesteiden yläpuolelle jätettiin tarpeeksi tilaa, jotta ne toimivat suunnitellusti, ja estetään paneeleita pitkin valuvan lumen ja jään ylittämistä lumiesteet. Paneelien sijoittelussa myös minimoitiin potentiaaliset varjostukset, jotka voivat vaikuttaa haitallisesti aurinkopaneelien sähkön tuottoon. Kuva 14 esittää, kuinka katolle on sijoitettu yhteensä 180 aurinkopaneelia maksimoiden aurinkopaneelien määrän ottaen huomioon esteet.



Kuva 14. Ilmakuva Hyvinkään kaupungin nettisivuilta. Myymälän katolle sijoitettuna 180 aurinkopaneelia. (Hyvinkään karttapalvelu.)

4.2 Varjostukset

Kohteen aurinkosähkön tuoton arvioinnissa on keskeistä huomioida varjostavat elementit, kuten tässä tapauksessa kaakossa sijaitseva kerrostalo, joka yltää horisontissa 10 asteen korkeuteen. PVGIS-laskurin avulla, joka mahdollistaa horisontin muodon huomioimisen säteilyennusteessa, pystyi laskemaan, että mainitun kerrostalon aiheuttama varjostus vähentää kohteen vuosituotantoa vain noin 0,2 prosentin verran, mikä osoittaa varjostuksen vaikutuksen olevan merkittävästi vähäisempi kuin alustavasti voisi olettaa (PVGIS 2022). Alueella ei ole korkeita puita, joista voisi pudota lehtiä tai oksia paneelien päälle heikentämään säteilyn perille kulkeutumista.

4.3 Kattokulma

Katon lappeen 10 asteen kulma mahdollistaa vuosituotannon saavuttamisen 90-prosenttisesti verrattuna optimaaliseen 40 asteen kulmaan (Finnwind 2013). Loivalla katolla voidaan lisätelineillä optimoida paneelien asennuskulma paremmaksi, mutta se kasvattaa kustannuksia ja vaatii paneelien välille jätettävän raon varjostuksen välttämiseksi, mikä vähentää asennettavien paneelien määrää käytettävissä olevalle alueelle. Asennus suurempaan kulmaan tehostaa paneelien puhdistumista roskista, mutta alueen olemattoman puuston ei voi olettaa aiheuttavan ongelmia tämän kanssa. Kuva 15 esittää asennuskulman vaikutusta vuosituotantoon.

Asennuskulman vaikutus tuottoon

- optimaalinen asennuskulma Suomessa on maantieteellisestä alueesta riippuen n. 40 - 45 astetta
- sähköpaneeli ei ole kovin tarkka asennuskulmasta

KULMA ASTETTA	TUOTTO (HELSINKI)
10	90,0 %
20	95,7 %
30	99,1 %
40	100,0 %
50	98,4 %
60	94,4 %

Esimerkit on laskettu Helsingin korkeudelle siten että paneelit on suunnattu etelään. Luvut ovat suuntaa-antavia.
Lisätietoa: www.finnwind.fi

Kuva 15. Asennuskulman vaikutus tuottoon (Finnwind 2013).

5 Järjestelmän mitoitus

5.1 PVGIS-tuotantoennuste

Aurinkosähköjärjestelmän mitoitusprosessi aloitetaan hankkimalla kohteen tunti-kohtaiset auringon säteilytiedot PVGIS-tietokannasta. Sivustolla on tuottotietolaskuri, johon syötetään kohteen koordinaatit, laskentavuosi ja aurinkopaneelien maksimiteho. Laskennassa otetaan huomioon myös katon kaltevuus ja atsimuuttikulma; aurinkopaneelin akselin suunta etelään on 0°, itään -90° ja länteen +90°. Lisäksi laskuriin syötetään horisonttitiedosto, jossa huomioidaan

mahdolliset varjostavat esteet, kuten muut rakennukset tai puut. Lopuksi tiedot ladataan Excelliin, jossa ne ovat helpompi käsitellä jatkossa. Kuvassa 16 näkymä PVGIS-tuottotietolaskurista.

Cursor:
 Selected: 60.633, 24.867
 Elevation (m): 113
 PVGIS ver. 5.2

Use terrain shadows:
 Calculated horizon
 Upload horizon file
 Valitse tiedosto muokattu_...rhorizon.txt

[Switch to version 5.1](#)

HOURLY RADIATION DATA

Solar radiation database* PVGIS-SARAH2

Start year:* 2020 End year:* 2020

Mounting type:*
 Fixed Vertical axis Inclined axis Two axis

Slope [°] 10 Optimize slope
 Azimuth [°] -45 Optimize slope and azimuth

PV power

PV technology* Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]* 1
 System loss [%]* 5

Radiation components

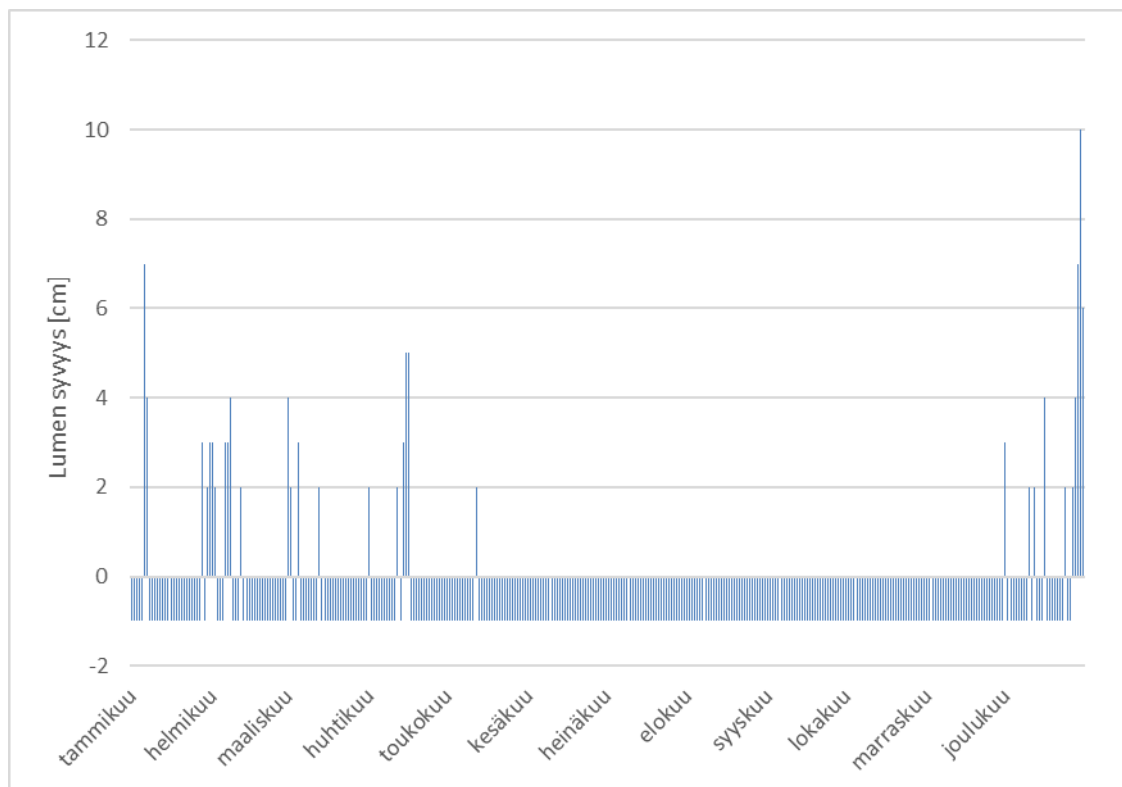
Kuva 16. Näkymä PVGIS-laskurista (PVGIS 2022).

Laskuri käyttää oletuksena 14 % häviötä, joka sisältää kaapeleiden ja invertterin häviöt sekä paneelien likaisuuden, kuten lumen ja pölyn aiheuttamat häviöt. Häviöön on laskettu myös mukaan paneelien luonnollinen käyttöikä myötä ilmenevä tehon heikkeneminen (PVGIS 2022). Tämä arvo muutettiin 5 prosenttiin, koska lumen ja ikääntymisen vaikutukset otetaan myöhemmin huomioon.

5.2 Lumen vaikutus tuotantoon

Lumen paneeleita varjostavan vaikutuksen huomioon ottamiseksi ladattiin Ilmiantieteen laitoksen sivustolta Hyvinkään lumensyvyystiedot vuodelta 2020. Päiviltä, joina lumen syvyys oli enemmän kuin 0 cm, muutettiin tuotantomäärä 0

wattituntiin jokaiselta tunnilta. Koko vuoden 2020 tuotantoennusteeseen lumen vaikutus oli 3,2 %. Kuvasta 17 on nähtävissä vuoden 2020 lumen syvyys Hyvinkäällä.



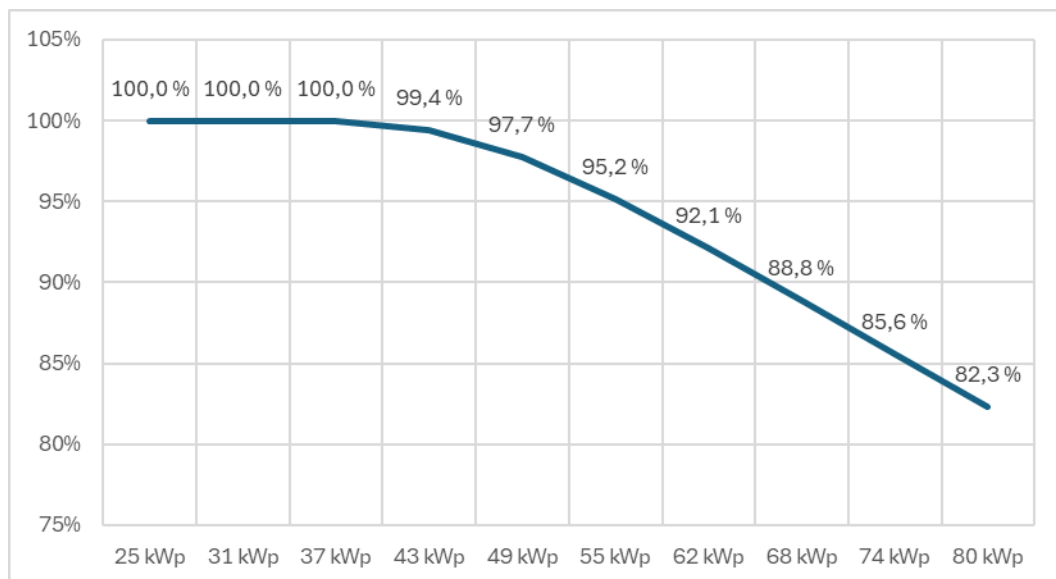
Kuva 17. Lumen syvyys Hyvinkään Hyvinkäänkylän havaintoasemalla vuonna 2020 (Havaintojen lataus).

5.3 Tunnin sisäinen netotus

Vuodesta 2025 lähtien tunnin sisäinen netotus korvataan varttitaseella, mikä tarkoittaa, että tunnin sisäiset muutokset tuotannossa ja kulutuksessa vaikuttavat enenevässä määrin myyntiin menevään sähkön osuuteen, kun tuotanto ja kulutus ovat lähellä toisiaan määrällisesti. Tämän vaikutuksen määrää tuotannossa on haastava arvioida käyttäen PVGIS-laskuria, koska se tarjoaa tiedot vain tunnin välein. Samoin, ylituotannon määrän arviointi on haasteellista, sillä käytössä on ainoastaan tunnin tarkkuudella olevat kulutustiedot. Tämä muutos netotuskäytännössä vaatii tarkempaa datan analysointia ja mahdollisesti uusien seuranta- ja hallintamenetelmien kehittämistä tuotannon optimointiin.

5.4 Omakäyttömitoitus

Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa aurinkopaneelien tuottaman sähkön käyttö itse eli omakäytön maksimointi on taloudellisesti kannattavinta. Tuotannon omalla käytöllä vältetään ostamasta sähköä, joten se minimoi veroihin ja siirtokustannuksiin menevän rahan. Excel taulukkolaskentaohjelmassa yhdistettiin arvioitu tuntikohtainen tuotantomäärä sekä kohteen tuntikohtainen sähkön kulutus. Vuoden jokaiselta tunnilta laskettiin näiden tietojen perusteella aurinkosähkön tuotannosta oma käyttö eli osuus tuotannosta, joka käytettiin kohteen sähkölaskun pienentämiseen välttämällä sähkön ostaminen. Kuva 18 esittää kuinka oman käytön osuus alkaa pienentyä järjestelmän koon kasvaessa yli 37 kW_p .



Kuva 18. Kohteen vuotuinen oman käytön osuus tuotetusta aurinkosähköstä eri tehoisilla järjestelmillä.

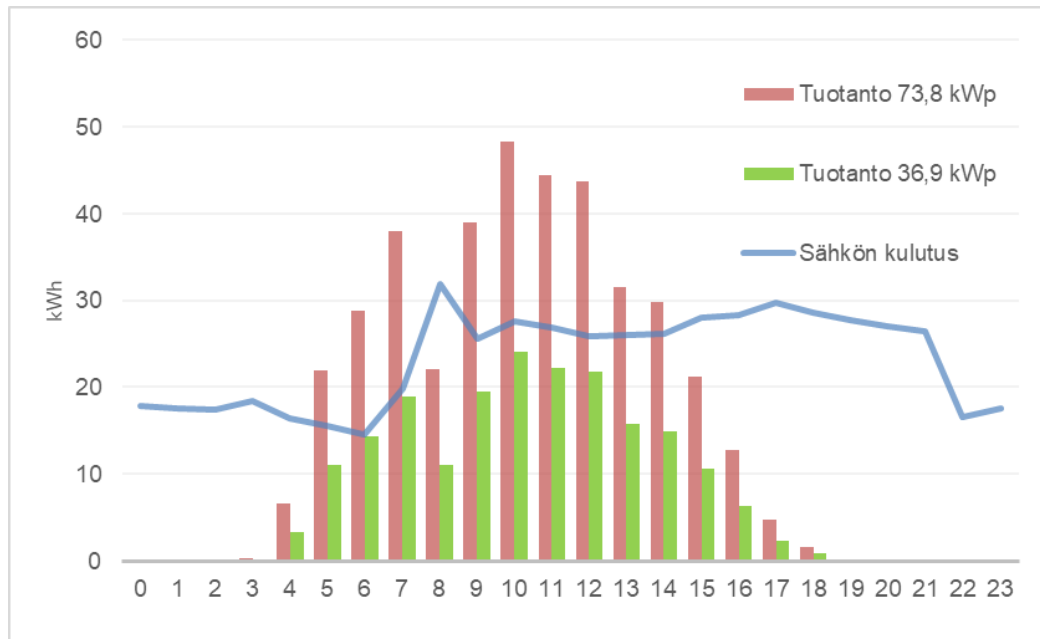
Mitoitusprosessissa keskityttiin kolmeen erikokoiseen järjestelmään, jotka huomioivat kohteen sähkön kulutuksen sekä kohteen asettamat rajoitteet järjestelmän koolle. Kun aurinkosähköjärjestelmä mitoitetaan omakäyttö mitoituksella, ylituotantoa ei synny edes tuotantohuippujen aikana, mikä eliminoi tarpeen myydä ylimääräistä sähköä pelkällä energian markkinahinnalla. Tuntikohtaisesta tuotantoennusteesta ja sähkölaskutiedoista yhdistetystä datasta pystyi

laskemaan $36,9 \text{ kW}_p$ järjestelmän olevan optimaalinen, kun halutaan maksimoida aurinkosähkön tuotannosta oman käytön osuus. $36,9 \text{ kW}_p$ järjestelmä koostuu esimerkiksi 90 kappaleesta 410 W_p paneeleita ja koko vuoden noin $31,1 \text{ MWh}$:n aurinkosähkön tuotannosta vain $13,5 \text{ kWh}$ päätyy myyntiin.

5.5 Katto täyteen -mitoitus

Katto täyteen mitoitustavan ajatus on käyttää kaikki järkevästi käytettävissä oleva tila aurinkopaneelien sijoitteluun ja näin maksimoida aurinkosähkön tuotantomäärä. Katon 450 m^2 :n pinta-alasta aurinkopaneelille on käytettävissä enintään 370 m^2 , kun huomioidaan katolla sijaitsevat kulkureitit, esteet ja turvaväisyydet. Esimerkkilaskennassa käytetään tässä työssä kokonsa ja tehokkuuden osalta tyypillistä Astronergyn CHSM54M-HC paneelia. Paneelin pituus on 1722 mm ja leveys 1134 mm (Astro 5s 2021: 2). Kiinnikkeineen aurinkopaneeli vaatii asennustilaa $1,75 \text{ m}$ pituussuunnassa ja $1,15 \text{ m}$ leveysuunnassa. Näillä tiedoilla kohteen katolle pystyy mahduttamaan 180 aurinkopaneelia, joiden tehon ollessa 410 W_p järjestelmän kooksi tulee $73,8 \text{ kW}_p$ (Astro 5s 2021: 2). Koko vuoden noin $62,3 \text{ MWh}$:n aurinkosähkön tuotannosta 9 MWh ei pystytä käyttämään kohteessa pienentämään ostosähköön kuluvaan rahaa vaan se päätyy myyntiin markkinahinnalla.

Kuvasta 19 näkee, että omakäyttömitoitettun $36,9 \text{ kW}_p$:n järjestelmän tuotto pysyy aurinkoisenaikin päivänä kohteen sähkön kulutusta pienempänä, kun taas katto täyteen mitoituksella eli $73,8 \text{ kW}_p$:n tehoisella järjestelmällä osa sähköstä jää käyttämättä ja päätyy myyntiin markkinahinnalla.



Kuva 19. Aurinkoisen päivän 2.7.2020 sähkön kulutus ja aurinkosähkön tuotanto omakäyttö sekä katto täyteen mitoituksella.

5.6 Tasapaino -mitoitus

Kohteeseen mahtuvan enimmäismäärän ja maksimaalisen omakäyttö osuuden välistä valittiin vielä yksi järjestelmän koko, joka on 55,4 kW_p ja 135 kpl 410 W_p :n paneeleita. Tämä mitoitus hakee tasapainoa aurinkosähkön määrän kasvattamisen ja toisaalta tuotetulle sähkölle saatavan hyödyn välillä. Vuoden tuotto on arvioitu olevan tällä järjestelmän teholla 46,8 MWh, josta päättyy myyntiin noin 5 % eli 2,3 MWh.

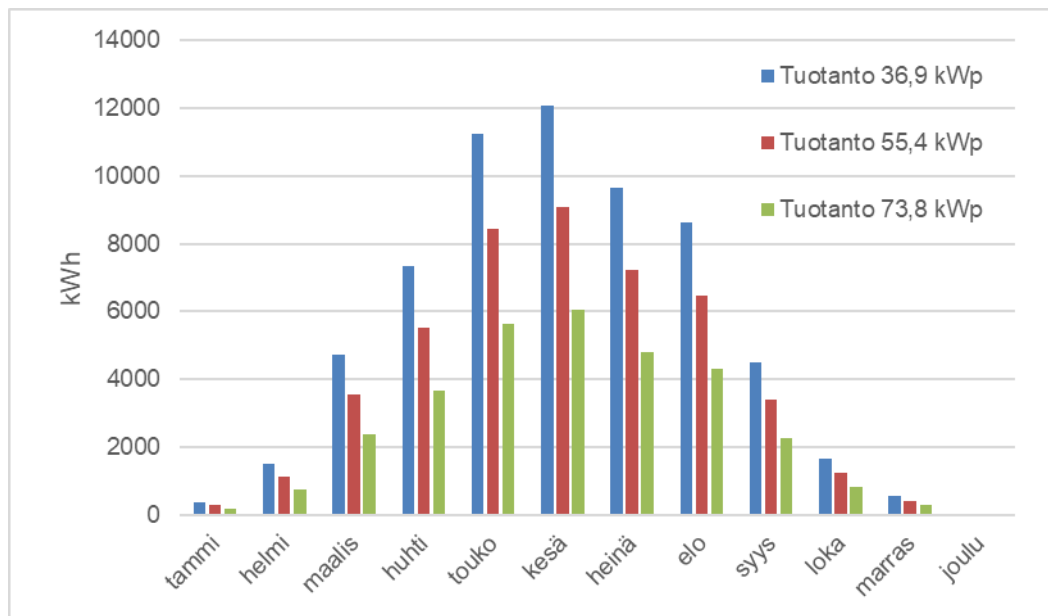
Taulukko 1. Järjestelmät eri mitoituksella ja niiden vuosituotanto, omakäyttö sekä myyty tuotanto kilowattitunneissa.

Järjestelmän koko [kW_p]	36,9	55,4	73,8
Vuosituotanto [kWh]	31145	46760	62291
Omakäyttö [kWh]	31132	44485	53299
Myyty tuotanto [kWh]	13	2275	8992

Kuten taulukosta 1 nähdään, aurinkovoimalan huipputehon kasvaessa myyntiin päätyvä ylituotanto kasvaa suhteessa voimakkaammin.

5.7 Arvioitu tuotanto

Aurinkosähkön tuotanto painottuu voimakkaasti kesäaikaan. Joulukuussa tuotanto on vain 0,3 % kesäkuun lukemista. Kuvassa 20 näkyy mitoitettujen järjestelmien kuukausittaisia tuotantomääriä. Tuotantomäärät on laskettu vuodelle 2020 joka oli hyvin vähäluminen. Esimerkiksi vuonna 2021 lumi sulii vasta maaliskuun lopussa (Havaintojen lataus).



Kuva 20. Mitoitettujen järjestelmien kuukausituotanto.

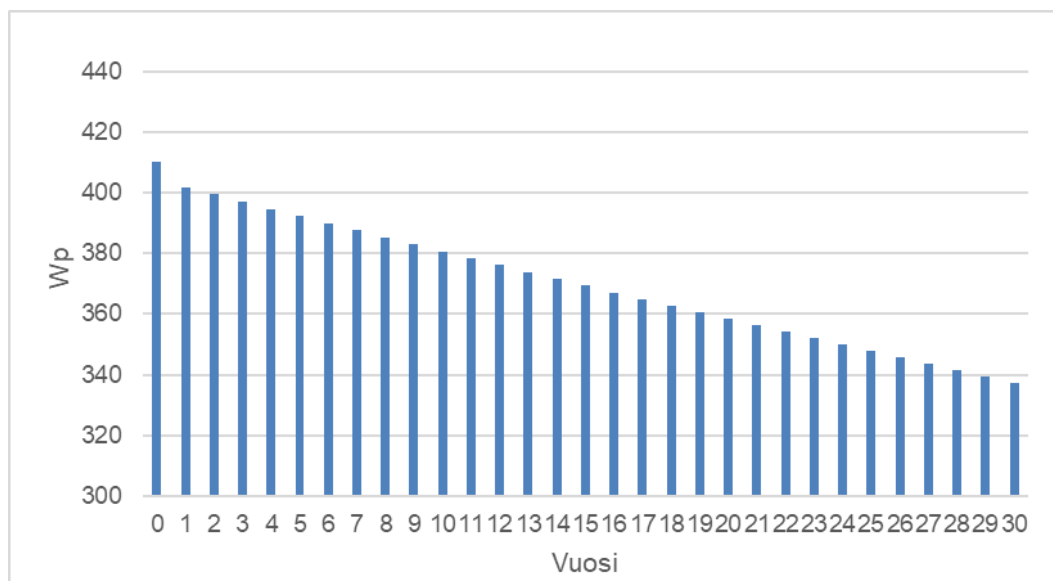
Aurinkopaneelien teho heikkenee keskimäärin 0,4 % vuodessa, mikä johtaa 12–15 %:n kokonaistehon laskuun 25–30 vuoden käyttöiän aikana. Paneelien hajoamiseen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- LID (Light Induced Degradation) johtuu valon aiheuttamista kemiallisista ja mekaanisista vaikutuksista.
- BO-LID (Boron-Oxygen Light Induced Degradation) johtuu booriyhdisteiden hajoamisesta valon vaikutuksesta erityisesti ensikäytön yhteydessä.

- PID (Potential Induced Degradation) syntyy potentiaalierosta paneelin ja maan välillä.
- Mikrohalkeamat aiheutuvat kuljetuksessa tai esimerkiksi lumen aiheuttamasta mekaanisesta rasituksesta.
- Kuumat kohdat syntyvät paneelin esimerkiksi varjostuneella alueella, kun maksimitehopisteen arvojen muuttuessa alue alkaa vastustamaan sähköä siirtymistä.

Erityisesti valon aiheuttama heikentyminen tapahtuu nopeasti paneelien ensikäytössä ja vakiintuu muutamassa päivässä tai viikossa. (2023 Opas aurinkopaneelien hajoamisen ymmärtämisestä 2023.)

Kuvassa 21 näkyy valmistajan lupaama tehontuottotakuu yhdelle paneelille, joka otetaan huomioon investoinnin kannattavuutta laskiessa.



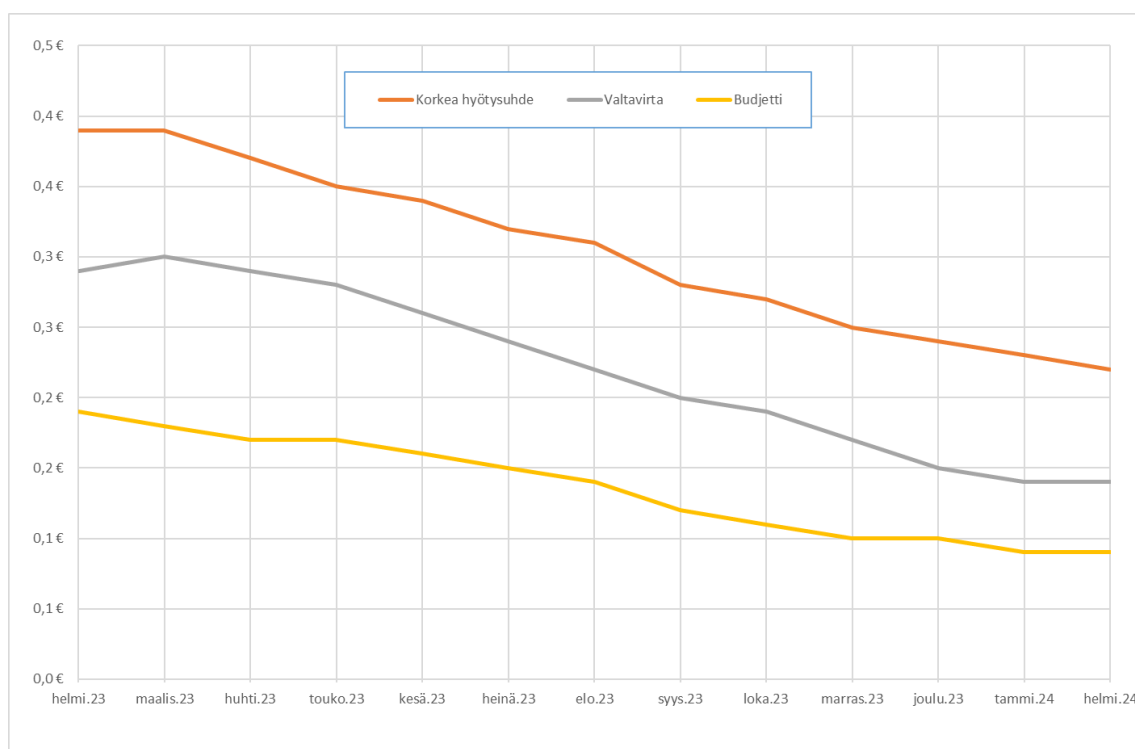
Kuva 21. Astronergy CHSM54M-HC 410 W_p aurinkopaneelin odotettu tehontuotto iän myötä (Astro 5s 2021: 1–2).

6 Järjestelmän kustannukset

6.1 Paneeliluokat

Aurinkopaneelit voidaan luokitella hinnan mukaan kolmeen luokkaan: korkean hyötysuhteen luokkaan, valtavirtaluokkaan ja budjettiluokkaan. Aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet keväällä 2024, erityisesti valtavirtaluokassa johtuen korkeasta varastotasosta, joka on syntynyt alkuvuoden kysynnän vähenemisen myötä. Korkean hyötysuhteen moduulit, kuten TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), HJT (Heterojunction Technology) tai IBC (Integrated Back Contact), eivät ole kokeneet samanlaista hintojen laskua. (Schachinger 2024.)

Kuvassa 22 näkyy verovapaiden aurinkopaneelien hintakehitys viimeisen vuoden aikana.



Kuva 22. Aurinkokennojen hintakehitystä viimeisen vuoden aikana Euroopan markkinoilla. Hinnat ovat verovapaita tukkuhintoja (Price Index | February 2024).

6.1.1 Korkean hyötysuhteen luokka

Korkean hyötysuhteen kiteinen pii (c-Si) aurinkokennot voivat olla yksi tai kaksi-suuntaisia, ja ne sisältävät edistyneitä HTJ, n-tyypin tai TOPCon -kennoja, sekä IBC-kennoja. Nämä teknologiat mahdollistavat korkean yli 22 prosentin hyötysuhteen. Ne ovat siis ihanteellisia tilanteisiin, joissa tila on rajallinen ja suuri teho on tarpeen. (Bellini 2024.)

Kuvassa 23 näkyy valmistajan varastossa suuri määrä aurinkopaneeleita valmiina toimitettavaksi.



Kuva 23. Aurinkopaneeleita valmistajan varastossa (Hunter 2022).

6.1.2 Valtavirtaluokka

Vakio yksikiteisiä moduuleja käytetään laajasti kaupallisissa sovelluksissa. Usein nämä moduulit sisältävät myös TOPCon-teknologiaa, joka parantaa energian tuottoa vähentämällä kennon takapinnan heijastuksia ja lisäämällä

hyötysuhdetta. Ne tarjoavat vakaata suorituskykyä ja ovat luotettava valinta useimpiin voimaloihin, joihin tarvitaan vakiintunut ja tunnettu teknologia. (Bellini 2024.)

6.1.3 Budjettiluokka

Tehtaan kakkoslaatuisia, konkurssimyynnistä peräisin olevia tai käytettyjä ja vähätehoisia. Ne ovat taloudellinen vaihtoehto, mutta niissä voi olla rajoitettu tai olematon takuu eivätkä ne yleensä kelpaa rahoituksen saamiseen. Tyypillinen käyttökohde on aurinkopuisto, jolla on mittakaavaetu (Cathcart 2024).

6.2 Investoinnin kustannusarvio

Investoinnin kustannusarviossa suositaan kustannustehokkuutta ja laatua. Alueen varjostusolosuhteet ovat vähäiset, mikä mahdollistaa edullisemmän stringinvertterin käytön kalliimpien mikroinverttereiden tai optimoijien käytön sijasta. Stringinvertteriin yhdistetään tunnetun valmistajan yksikiteiset ohitusdiodeilla varustetun half cut -aurinkopaneelit. Half cut -aurinkopaneelit optimoivat tehontuoton myös yksittäisten aurinkopaneelien ollessa varjostuneena tai vikaantumisen yhteydessä. Osittaisia varjostuksia syntyy väistämättä lumen, jään tai roskien seurauksena. Half cut -paneelien hinta on kilpailukykyinen, niiden tarjonnan kasvun ja teknologian kehittymisen ansiosta. Lisäksi näiden paneelien tehohäviö ikääntymisen myötä on minimissä, minkä vuoksi ne ovat erittäin pitkäikäisiä ja taloudellisesti järkevä valinta. Asennuksessa käytetään saumakattolle tarkoitettuja puristuskiinnikkeitä ja alumiiniprofiileja, joilla aurinkopaneelit tulevat katolle lappeen myötäisesti. Kohteen ympäristössä ei ole korkeita puita, joista saattaisi tippua oksia tai lehtiä aurinkopaneelien päälle, joten asennuskulman säätämiseen ja puhdistumista tehostamaan tarkoitettuja telineitä ei ole tarvetta asentaa.

Investoinnin kannattavuuden arviointi edellyttää investointikustannusten tuntemista. Tässä työssä pyrittiin mitoittamaan taloudellisesti optimaalinen järjestelmä ilman sitoutumista tiettyjen toimittajien tarjoamiin standardikokoihin ja

komponenttivalintoihin. Kustannuslaskelma vaati laskukaavan, joka määrittelee eri kokoisille järjestelmille niiden arvioidut investointikustannukset. Julkisten kilpailukykyisimpien "avaimet käteen" tarjousten avulla kehitettiin likimääräinen laskukaava, joka mahdollistaa aurinkosähköjärjestelmän arvioidun arvonlisäverottoman hinnan määrittämisen edellä mainituilla komponenteilla:

$$\text{Investointikustannus} = 500 \frac{\text{€}}{\text{kW}_p} \cdot P + 3000 \text{ €}$$

P on aurinkosähköjärjestelmän teho kilowattipiikeissä

Arvioitu investointikustannus sisältää järjestelmän koon mukaan muuttuvan komponentin ja lisäksi 3000 euroa perustamiskustannuksia. Taulukossa 2 on esitetty arvioitu investointikustannus kohteeseen eri mitoitusavoilla.

Taulukko 2. Arvioidut investointikustannukset kolmelle eri tehoiselle järjestelmälle.

Mitoitustapa	Järjestelmän teho [kW_p]	Investointikustannus [€ alv. 0 %]	Investointikustannus [€/kW _p alv. 0 %]
Omakäyttö	36,9	23368	581
Tasapaino	55,4	33996	554
Katto täyteen	73,8	39474	541

Järjestelmän koon kasvaessa investointikustannus suhteessa tehoon pienenee. Kuvassa 24 on julkisia "avaimet käteen" -pakettien tarjoushintoja, joita käytettiin laskukaavan kehittämiseen.

7 paneelia - 3,01kWp / 6kW alk.	3700€
Full Black 2,9kWp / 6kW alk.	3800€
10 paneelia - 4,3kWp / 6kW alk.	4250€
Full Black 4,15kWp / 6kW alk.	4400€
12 paneelia - 5,16kWp / 6kW alk.	4650€
Full Black 4,98kWp / 6kW alk.	4800€
14 paneelia - 6,02kWp / 6kW alk.	5100€
Full Black 5,81kWp / 6kW alk.	5250€
16 paneelia - 6,88kWp / 10kW alk.	5550€
Full Black 6,64kWp / 10kW alk.	5650€
18 paneelia - 7,74kWp / 10kW alk.	5850€
Full Black 7,47kWp / 10kW alk.	5950€
20 paneelia - 8,6kWp / 10kW alk.	6300€
Full Black 8,3kWp / 10kW alk.	6400€
24 paneelia - 10,32kWp / 10kW alk.	6950€
Full Black 9,96kWp / 10kW alk.	7050€
30 paneelia - 12,9kWp / 15kW alk.	8550€
Full Black 12,45kWp / 15kW alk.	8650€
34 paneelia - 14,62kWp / 15kW alk.	9050€
Full Black 14,11kWp / 15kW alk.	9100€

Kuva 24. Julkisia "avaimet käteen" -pakettien alv 24 % tarjoushintoja (Aurinkopaneelit asennettuna).

7 Kannattavuusarviointi

Investoinnin kannattavuus aurinkosähköjärjestelmässä perustuu kustannus-hyötyanalyyysiin, joka ottaa huomioon sähkön hinnat, investointikustannukset, sähkön tuotantomäärät sekä järjestelmän odotetun elinkaaren. Tässä osiossa käsitellään aurinkosähköjärjestelmän taloudellista kannattavuutta kolmella eri mitoitustrategialla: omakäyttö, katto täyteen ja tasapainoinen mitoitus.

7.1 Sähkön hinta

Sähkön hinta koostuu kolmesta noin yhtä suuresta osasta: Sähköenergian hinnasta, sähkönsiirrosta ja veroista. Ylijäämä tuotannon voi myydä, kun myyntisopimus on tehty sähkönmyyjän kanssa. Myynti perustuu markkinahintaan, usein sähköpörssin Spot-hintaan. Myyntihinta ei sisällä sähkönsiirron ja verojen

osuutta, jolloin sähköstä saatava hyöty on suurin, kun tuotettu sähkö korvaa ostosähköä. (Ylijäämäsiähkön myynti 2024.)

Kuva 25 havainnollistaa ylijäämän myynnistä saatavan hyödyn olevan huomattavasti pienempää suhteessa tuotannon omakäyttöön.



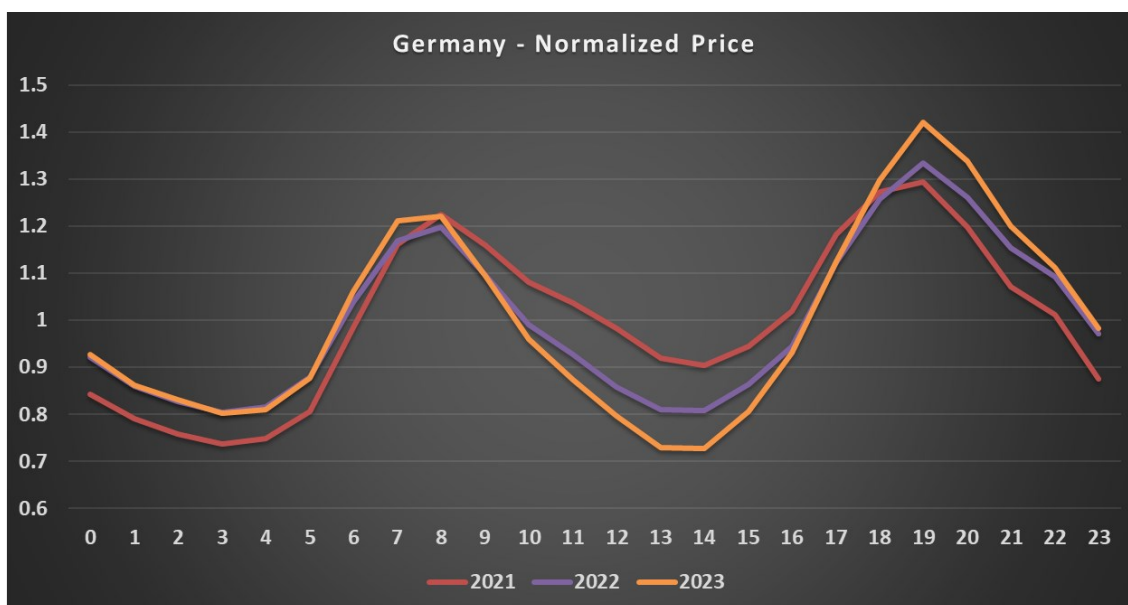
Kuva 25. Sähkön osto- ja myyntihinnan rakenne ja mittakaava hyödyistä (Ylijäämäsiähkön myynti 2024).

7.2 Uusiutuvien kannibalisaatio

Uusiutuvien energialähteiden, erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman, integrointi Saksan energiamarkkinoille on vaikuttanut merkittävästi sähkön tukkuhintojen laskuun vuosina 2014–2018. Tämä ilmiö johtuu siitä, että uusiutuvat energiamuodot syöttävät sähköä verkkoon nolamarginaalikustannuksella, mikä työntää kalliimmat fossiiliset ja ydinvoimalat pois markkinoiden hinnanmuodostuksesta alimmalle tasolle. Esimerkiksi vuonna 2014 sähkön hinnan lasku oli Saksassa 2,89 senttiä kilowattitunnilta ja vuonna 2017 jopa 8,89 senttiä. (Kolb ym. 2020.)

Aurinkoenergian nopea kasvu Euroopassa tulee alentamaan sähkön hintoja päiväsaikaan, kun aurinkopaneelien tuotanto on huipussaan. Tämä ilmiö ilmenee ankkakäyränä, joka kuvastaa sähkömarkkinoiden hintakäyrän muutoksia aurinkoenergian kasvavan osuuden myötä. Käyrässä näkyy selkeä hintojen lasku keskipäivällä, jolloin aurinkoenergian tuotanto on suurimmillaan ja sähkön hinta voi jopa muuttua negatiiviseksi. Illan tullen, kun aurinkoenergian tuotanto hiipuu mutta kulutus pysyy korkeana, hinnat nousevat. Tämä korostaa joustavien markkinoiden ja energian varastointiratkaisujen tarvetta. (Jomaux 2024.)

Kuva 26 esittää Saksan vuosien 2021–2023 keskimääräisiä seuraavan päivän sähkön hintoja osoittaen selkeän hintojen laskemisen keskipäivällä ja hinnan nousun ilta-aikaan. Kuvaajasta näkee ilmiön voimistuneen 2021–2023 välisenä ajanjaksona.



Kuva 26. Saksan vuosien 2021–2023 keskimääräisistä seuraavan päivän sähkön hintoja (Jomaux 2024).

Voidaan todeta uusiutuvien energiamuotojen kannibalisoivan omalla tuotannollaan markkinahintoja mikä puolestaan vähentää tuotannosta saatavia tuloja. On todennäköistä, että samanlainen ilmiö nähdään myös Suomessa aurinkovoiman yleistyessä. Tämä tulee ottaa huomioon arvioitaessa ylituotannon myynnistä saatavan hyödyn potentiaalinen väheneminen. Tämä vaikuttaa aurinkosähköjärjestelmien taloudellisesti optimaalisen mitoituksen laskentaan, missä tulee ottaa huomioon mahdollisesti alentu0vat sähkön myyntihinnat.

7.3 Taloudellinen kannattavuus

Kolmelle eri mitoitusavalla luodulle järjestelmälle suoritettiin taloudellinen kannattavuusarviointi käyttäen nettonykyarvon laskentamenetelmää ja 7 % diskonttokorkoa. Nettonykyarvon laskennassa tulevaisuuden kassavirrat diskontataan

nykyhetkeen. Diskonttaus tarkoittaa tulevaisuuden rahavirtojen muuttamista vertailukelpoisiksi ja nettonykyarvoa laskettaessa tulevaisuuden rahavirrat muutetaan vastaamaan nykyistä rahanarvoa. Diskonttaus on välttämätöntä koska euro on tänään arvokkaampi kuin esimerkiksi 30 vuoden päästä saadun euron.

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida myös tuotolla, jonka mittarina tässä työssä käytetään sisäistä korkoa. Sisäinen korko tarkoittaa diskonttokorkoa, jolla nettonykyarvon voidaan todeta olevan nolla. Tuoton ollessa suurempi kuin tuottovaade voidaan investointia pitää kannattavana. Tuottovaatimus pitää sisällään pääomakustannuksen, kuten rahoituskulut sekä investoinnin tuottoihin liittyvän epävarmuuden.

Laskelmissa hyödynnettiin varovaisia arvioita sähkön hinnoista: ostosähkön hinta asetettiin 10 senttiin per kilowattitunti (alv 0 %) ja ylituotetun sähkön myyntihinta 2 senttiin per kilowattitunti (alv 0 %). Paneelien ikääntymisestä johtuvana tehon alenemana käytettiin liitteen 1 mukaisia arvoja. Järjestelmän oletettu käyttöikä on 30 vuotta.

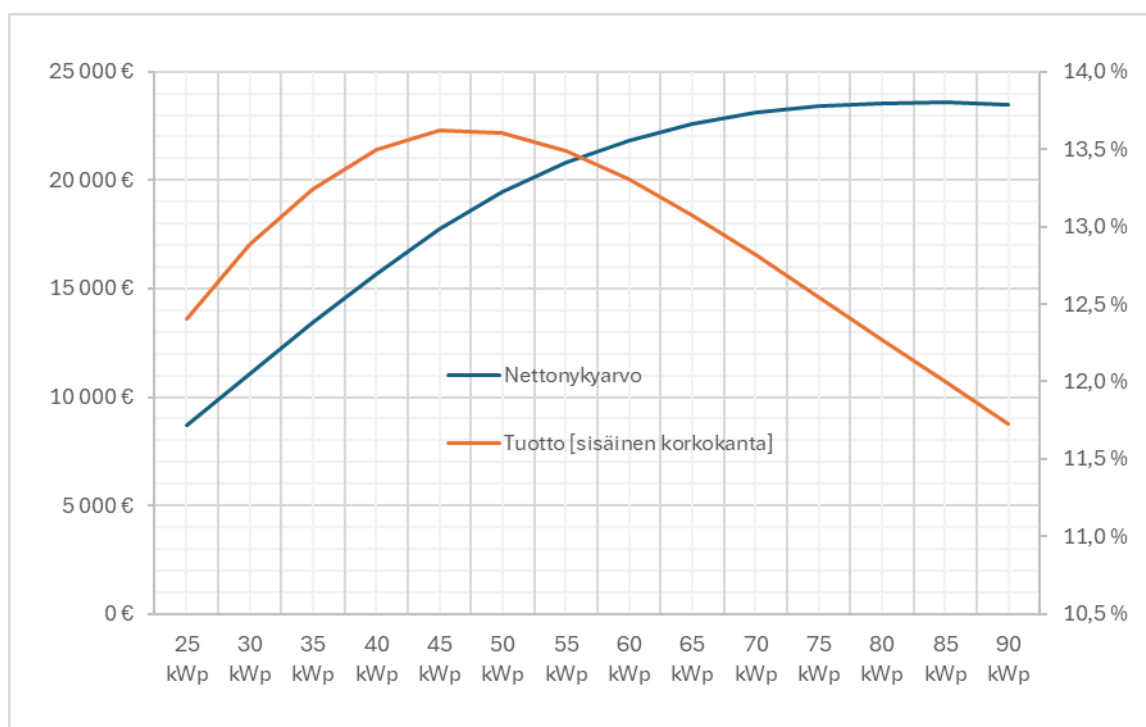
7.4 Tulokset

Kohteena olevan elintarvikekaupan tasainen sähkönkulutus on oivallinen pohja aurinkosähkövoimalan asennukselle. Katon lappeen suunta tai kallistus eivät ole täysin optimaaliset, mutta toisaalta ne eivät nostaneet investointikustannusta. Kulutus on kesäisinkin riittävä järjestelmän asennukseen, jossa mitta-kaava etu alentaa investointikustannusta per asennettu kW_p . Vaikka kannattavuuslaskennassa käytettävät arvot valittiin varovaisiksi, nettonykyarvo on positiivinen kaikilla kolmella mitoitustavalla. Aurinkosähkövoimalan investointi on siis kannattava kaikissa mitoitustapa esimerkeissä. Tasapainoista mitoitusta eli 55,4 kW_p järjestelmää voi vertailluista suositella kuitenkin kannattavimpana sen korkeimman tuoton (13,5 %) perusteella eikä lisäinvestoinnit suurempaan aurinkovoimalaan ole enää niin kannattavia kuten taulukosta 3 on nähtävissä.

Taulukko 3. Taloudellisen kannattavuuslaskelman tulokset eri kokoisille järjestelmille.

Järjestelmän teho [kW_p]	36,9	55,4	73,8
Mitoitustapa	Omakäyttö	Tasapaino	Katto täyteen
Nettonykyarvo	14 295 €	20 895 €	23 355 €
Sisäinen korko	13,3 %	13,5 %	12,6 %

Kuva 27 havainnollistaa kuinka nettonykyarvo ja tuotto muuttuvat aurinkovoimailan kokoa kasvatettaessa.



Kuva 27. Taloudellisen kannattavuuden tulokset havainnollistettuna kuvaajalle.

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin aurinkosähköjärjestelmän suunnittelua ja mitoitusta elintarvikemyymälään Hyvinkäällä. Työn päätavoitteena oli selvittää aurinkosähköjärjestelmän taloudellinen ja tekninen kannattavuus liiketilan katolle asennettuna. Työssä käytiin läpi aurinkoenergian perusteita, aurinkopaneelien ominaisuuksia järjestelmän kannattavuuden ja mitoituksen näkökannalta.

Järjestelmän mitoitus perustui kohdeyrityksen toteutuneeseen sähkönkulutukseen ja aurinkosähkön tuottoennusteeseen. Työssä vertailtiin erilaisia mitoitus- tapoja esimerkkien kautta. Näitä esimerkkejä olivat omakäyttö, katto täyteen ja tasapainoinen mitoitus. Taloudellinen kannattavuusarviointi tehtiin investointi- päätöksen tueksi laskemalla järjestelmien nettonykyarvo ja lisäksi tuotto sisäistä korkoa käyttäen. Investoinnin kannattavuuden laskemiseen käytettiin varovaisia arvioita sähkön hinnasta.

Tuloksena investointi aurinkosähköjärjestelmään kohteessa osoittautui kannattavaksi. Tasapainoisesti mitoitettu järjestelmä ja kustannustehokkaasti valitut komponentit yhdessä tuovat merkittäviä säästöjä. Ottaen huomioon viimeaikaisen aurinkopaneelien hintojen alenemisen ja kannustavat tulokset voidaan insinööriyön perusteella suositella siirtymään hankkeessa toteutusvaiheeseen. Tämä työ loi hyvän perustan järjestelmän suunnittelulle ja sitä kannattaa hyödyntää tarjouspyyntöä tehdessä.

Tämä insinööriyö tarjosi analyysin aurinkosähköjärjestelmän mitoittamiseksi elintarvikemyymälään ja sitä voidaan hyödyntää esimerkkinä myös vastaavissa projekteissa. Uudet tekniikat, kuten kaksipuoliset paneelit, mahdollistavat uusia sovellutuksia samalla kun aurinkopaneelien tuotantomäärät kasvavat. Aurinkovoiman tulevaisuus näyttää tämän työn perusteella erittäin valoisalta. On todennäköistä, että aurinkopaneelit löytyvätkin tulevaisuudessa lähes jokaiselta katalta myös Suomessa.

Lähteet

2023 Opas aurinkopaneelien hajoamisen ymmärtämisestä. 2023. Verkkoaineisto. Maysun Solar. <<https://www.solarpanelsfi.com/blog/2023-opas-aurinkopaneelien-hajoamisen-ymmartamisesta>>. 20.10.2023. Luettu 3.3.2024.

Astro 5s. 2021. Verkkoaineisto. Chint solar. <https://eroaverkosta.my-cashflow.fi/files/ladattavat_tiedostot/aurinkopaneelit/ASTRO_5s_CHSM54M-HC_1722x1134x30_.pdf>. 1.12.2021. Luettu 3.3.2024.

Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Päivitetty 31.1.2024. Luettu 3.3.2024.

Aurinkopaneelit asennettuna. Verkkoaineisto. Jm-sähköistys. <<https://www.jm-sahkoistys.fi/hinnasto>>. Luettu 19.4.2024.

Bellini, Emiliano. 2024. PV modules now selling in Europe for €0.10/W to €0.115/W. Verkkoaineisto. Pv-magazine. <<https://www.pv-magazine.com/2024/02/27/pv-modules-now-selling-in-europe-for-e0-10-w-to-e0-115-w/>>. 27.2.2024. Luettu 3.3.2024.

Cathcart, Robert Polly. 2024. Second Hand Solar Panels: Pros and Cons. Verkkoaineisto. Solar Fast. <<https://solarfast.co.uk/blog/second-hand-solar-panels/>>. 6.3.2024. Luettu 3.3.2024.

Energy Statistics Data Browser. 2023. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Renewables%20and%20waste&indicator=RenewGenBySource>>. 21.12.2023. Luettu 3.3.2024.

Fraile, Daniel; Latour, Marie; El Gammal, Adel & Annett, Michael. 2023. Photovoltaic energy electricity from the sun. Verkkoaineisto. European Photovoltaic Industry Association. <https://www.motiva.fi/files/9179/Photovoltaic_Energy_Electricity_from_the_Sun_EPIA.pdf>. 9.12.2023. Luettu 3.3.2024.

Fronius Tauro Eco. 2024. Verkkoaineisto. Fronius. <<https://www.fronius.com/en/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/inverters/fronius-tauro-eco/tauro-eco-100-3-d>>. Luettu 3.3.2024.

Half Cut Solar Panel: All You Need To Know. Verkkoaineisto. Vokek. <<https://www.vokek.com/half-cut-solar-panel/>>. Luettu 3.3.2024.

Havaintojen lataus. Verkkoaineisto. Ilmatieteen Laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>>. Luettu 3.3.2024.

HMS-1800B/2000B-4T. Verkkoaineisto. Hoymiles. <<https://www.hoymiles.com/product/microinverter/hms-1800b-2000b-4t/>>. Luettu 3.3.2024.

Hunter, Brian. 2022. 40 Megawatts (MW) of Qcells Now Available to Keep Your Solar Projects Moving Forward. Verkkoaineisto. Kinect Solar. <<https://kinect-solar.com/40-megawatts-mw-of-q-cells-now-available-to-keep-your-solar-projects-moving-forward/>>. 4.4.2024. Luettu 3.3.2024.

Hyvinkään karttapalvelu. Verkkoaineisto. Hyvinkään kaupunki. <<https://kartta.hyvinkaa.fi/#>>. Luettu 3.3.2024.

Jomaux, Julien. 2024. The Emergence of Duck Curves in Europe. Verkkoaineisto. GEM Energy Analytics. <<https://gemenergyanalytics.substack.com/p/the-emergence-of-duck-curves-in-europe>>. 26.2.2024. Luettu 3.3.2024.

Jouttijärvi, Sami; Lobaccaro, Gabriele; Kamppinen, Alekski & Miettunen, Kati. 2022. Benefits of bifacial solar cells combined with low voltage power grids at high latitudes. Verkkoaineisto. Sciencedirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122002659>>. 21.3.2022. Luettu 3.3.2024.

Kolb, Sebastian; Dillig, Marius; Plankenbühler, Thomas & Karl, Jürgen. 2020. The impact of renewables on electricity prices in Germany - An update for the years 2014–2018. Verkkoaineisto. Sciencedirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120305955>>. 12.9.2020. Luettu 3.3.2024.

Kosonen, Antti & Breyer, Christian. 2019. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Verkkoaineisto. LUT. <<https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>>. Päivitetty 27.6.2023. Luettu 3.3.2024.

Looking Back at the History of Solar Energy. Verkkoaineisto. Chariot Energy. <<https://chariotenergy.com/chariot-university/history-solar-energy/>>. Luettu 3.3.2024.

Mermoud, André. 2017. How are managed the new "twin modules" with half-cells ? Verkkoaineisto. PVsyst. <<https://forum.pvsyst.com/topic/1294-how-are-managed-the-new-quottwin-modulesquot-with-half-cells/>>. 29.4.2017. Luettu 3.3.2024.

Perlin, John. 2004. The Silicon Solar Cell Turns 50. Verkkoaineisto. National Renewable Energy Laboratory. <<https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf>>. 1.8.2004. Luettu 3.3.2024.

Photovoltaic Cells – Generating electricity. Verkkoaineisto. Images SI. <<https://www.imagesco.com/articles/photovoltaic/photovoltaic-pg4.html>>. Luettu 3.3.2024.

Photovoltaic solar electricity potential in European Countries. 2012. Verkkoaineisto. PVGIS. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_down-load/map_pdfs/PVGIS_EU_2012_presentation.png>. Päivitetty 11.5.2017. Luettu 3.3.2024.

Price Index | February. 2024. Verkkoaineisto. Pvxchange. <<https://www.pvx-change.com/Preisindex>>. Luettu 28.2.2024.

PVGIS. 2022. Verkkoaineisto. PVGIS. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/>. Päivitetty 1.3.2022. Luettu 3.3.2024.

Remes, Matti & Pentikäinen, Markus. 2023. Suomen suurin aurinkovoimala Kälajoelle. Verkkoaineisto. Onninen. <<https://www.onninen.fi/artikkelit/suomen-suurin-aurinkovoimala>>. 1.3.2023. Luettu 3.3.2024.

Renewable Energy Progress Tracker. 2024. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>>. 11.1.2024. Luettu 3.3.2024.

Renewables 2023 Analysis and forecast to 2028. 2024. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf>. 1.1.2024. Luettu 3.3.2024.

Renewables 2023 Global Status Report. 2023. Verkkoaineisto. REN21. <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf>. Luettu 3.3.2024.

Schachinger, Martin. 2024. Market Analysis March 2024 - One for all, one for one. Verkkoaineisto. Pvxchange. <<https://www.pvxchange.com/Market-Analysis-March-2024-One-for-all-one-for-one>>. 21.3.2024. Luettu 3.4.2024.

Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2028. 2023. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2028>>. 18.12.2023. Luettu 3.3.2024.

Tuota omaa aurinkosähköä - perustietoa aurinkovoimalan tuottoon, hankintaan ja asentamiseen liittyen. 2013. Verkkoaineisto. Finnwind. <<https://www.sli-deshare.net/finnwind/tuota-omaa-aurinkoshk-perustietoa-aurinkovoimalan-tuottoon-hankintaan-ja-asentamiseen-liittyen>>. 27.2.2013. Luettu 3.3.2024.

Ylijäämäsähkön myynti. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti>. Päivitetty 25.1.2024. Luettu 3.3.2024.

Aurinkopaneelien odotettu tehontuotto ikääntymisen myötä

Arvioitu ikääntymisen vaikutus tehon tuottoon				
Vuosi	Yksi paneeli [Wp]	Omakäyttö- mitoitus [kWp]	Tasapaino - mitoitus [kWp]	Katto täyteen - mitoitus [kWp]
0	410	36,9	55,4	73,8
1	402	36,2	54,3	72,3
2	399	35,9	54,0	71,9
3	397	35,7	53,6	71,5
4	395	35,5	53,3	71,0
5	392	35,3	53,0	70,6
6	390	35,1	52,7	70,2
7	388	34,9	52,4	69,8
8	385	34,7	52,1	69,3
9	383	34,5	51,7	68,9
10	381	34,3	51,4	68,5
11	378	34,0	51,1	68,1
12	376	33,8	50,8	67,7
13	374	33,6	50,5	67,3
14	372	33,4	50,2	66,9
15	369	33,2	49,9	66,5
16	367	33,0	49,6	66,1
17	365	32,8	49,3	65,7
18	363	32,6	49,0	65,3
19	361	32,4	48,7	64,9
20	358	32,3	48,4	64,5
21	356	32,1	48,1	64,1
22	354	31,9	47,8	63,7
23	352	31,7	47,6	63,4
24	350	31,5	47,3	63,0
25	348	31,3	47,0	62,6
26	346	31,1	46,7	62,2
27	344	30,9	46,4	61,8
28	342	30,7	46,1	61,5
29	339	30,6	45,9	61,1
30	337	30,4	45,6	60,7

Kuva 1. Aurinkopaneelien odotettu tehontuotto ikääntymisen myötä.