

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

AURINKOPANEELIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU VESIVOIMALAN RINNALLE

TEKIJÄ Elias Luotinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Elias Luotinen	
Työn nimi Aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelu vesivoimalan rinnalle	
Päiväys 28.4.2023	Sivumäärä/Liitteet 52/7
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Muurikkalan sähkölaitos	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella Muurikkalan sähkölaitoksen vesivoimalaitoksen rinnalle toinen sähköntuotantomenetelmä. Vesivoimalaitoksella ei ole kesäisin sähköntuotantoa yhtä paljon verrattuna esimerkiksi talveen, joten toisen sähköntuotantojärjestelmän tehtävä olisi tukea sähköntuotannossa kuivina vuodenaikoina. Työn vaiheet olivat tutustua mahdollisiin vaihtoehtoihin, mitoittaa valittu sähköntuotantojärjestelmä vesivoimalan rinnalle, laskea investoinnin kaikki kulut, selvittää hankkeen kannattavuus, arvioida järjestelmän sähköntuotto ja selvittää paneeleille paras mahdollinen asennuspaikka. Aurinkovoimaa tai tuulivoimaa harkitaan kohteeseen etusijassa.</p> <p>Projektin raportoinnissa käydään myös läpi näiden kolmen uusiutuvan energianlähteen teoriaa ja mahdollisia vaikutuksia ilmastoon ja lähiympäristöön. Valitun sähköntuotantomenetelmän hiilijalanjälkeä käsitellään myös ja verrataan ei uusiutuviin sähköntuotantomenetelmiin. Laskelmien ja mitoituksen jälkeen työstä annettiin raportti toimeksiantajalle, joka tekee päätöksen hankinnasta raporttia hyödyksi käyttäen.</p> <p>Työn tuloksena selvisi, että kohteelle kannattavin vaihtoehto on aurinkopaneelijärjestelmä. Aurinkopaneelijärjestelmiä vertailtiin eri teholuokissa. Vertailun tuloksen avulla pystyttiin toteamaan, että suuremman järjestelmän avulla tuotantoerot saataisiin parhaiten tasattua ja se olisi myös investoinnin kannalta kannattavin.</p>	
Avainsanat Vesivoima, Aurinkovoima, Tuulivoima	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Elias Luotinen	
Title of Thesis Designing a Solar Panel System Alongside a Hydropower Plant	
Date 28 April 2023	Pages/Appendices 50/5
Client Organisation /Partners Muurikkalan sähkölaitos	
<p>Abstract</p> <p>This project's goal was to design a secondary electricity production system alongside a micro hydropower plant. The thesis was commissioned by Muurikkala electricity plant. The hydropower plant is small and during the dry seasons of the year there is little or no generation of electricity. Therefore, there is need for another electricity source to generate electricity in the dry seasons.</p> <p>The project's first part was to decide what type of electricity production system to use and how big the system should be. The cost of the investment and the payback time were also calculated. The options for the secondary electricity production were a small wind turbine system and a solar power system.</p> <p>This thesis also includes some theory on these three renewable energy sources and some information on how each of them impacts the climate and the surrounding environment. The carbon footprint of the secondary electricity production system was also calculated.</p> <p>As a result of this project, it was found that the solar panel system is the most suitable option for this site. This report contains a comparison of three different sized solar panel systems. The result of the comparison was that the largest system evens out the production fluctuations in the best way and it is also the most profitable investment.</p>	
<p>Keywords Solar panel, Hydropower, Wind turbine</p>	

SISÄLTÖ

LYHENTEITÄ	7
1 JOHDANTO	8
2 MUURIKKALAN SÄHKÖLAITOS	9
3 VESIVOIMA.....	11
3.1 Vesivoimalan tyypit	11
3.2 Vesivoimalan turbiini tyypit	12
3.3 Vesivoima Suomessa	13
4 AURINKOVOIMA.....	15
4.1 Aurinkopaneelien tyypit	17
4.2 Aurinkopaneelijärjestelmän komponentit	18
4.3 Aurinkopaneelien käyttö, huolto ja ylläpito	19
4.4 Aurinkosähkö Suomessa	20
5 TUULIVOIMA.....	22
5.1 Tuulivoiman tyypit	22
5.2 Tuulivoima Suomessa.....	24
6 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	25
6.1 Vesivoiman ympäristövaikutukset.....	25
6.2 Aurinkovoiman ympäristövaikutukset.....	26
6.3 Tuulivoiman ympäristövaikutukset.....	26
7 TYÖN TOTEUTUS	28
7.1 Työn merkitys.....	28
7.2 Lupa-asioiden selvitys	28
7.3 Sähköntuotantomenetelmän valinta	29
7.4 Aurinkopaneelijärjestelmän mitoitus	30
7.5 Hankkeen kustannuksien arviointi	33
7.6 Takaisinmaksuaika	34
7.7 Hankkeen kannattavuus	34
8 TULOKSET	35
8.1 Sähköntuotantomenetelmän valinta	35
8.2 Järjestelmien laiteluettelo	35
8.2.1 5,7 kWp järjestelmä.....	35

8.2.2	9,8 kWp järjestelmä.....	36
8.2.3	19,7 kWp järjestelmä.....	36
8.3	Aurinkopaneelijärjestelmien vertailu	37
8.4	Kannattavuus	38
8.5	Hiilijalanjälki	40
8.6	Yhteenveto.....	41
9	POHDINTA.....	42
	LÄHDELUETTELO.....	44
	LIITE 1: PV TUOTANNOT	47
	LIITE 2: PÄIVITTÄISEN SÄTEILYN MÄÄRÄT	48
	LIITE 3: KUSTANNUKSET	49
	LIITE 4: PÄÄSTÖVERTAILU	49
	LIITE 5: KANNATTAVUUS.....	50

KUVALUETTELO

KUVA 1.	Toinen voimalaitoksen generaattoreista (Taina 2023).....	9
KUVA 2.	Voimalaitoksen pato korjauksen aikana (Taina 2023)	10
KUVA 3.	Kaplan -turbiini (Hydropower's nature, Süßbrich 2023).....	12
KUVA 4.	Francis -turbiini (Tekniikan museo 2020)	13
KUVA 5.	Pelton -turbiini (Tekniikkatalous 2018).....	13
KUVA 6.	Suomen sähköntuotanto vesivoimalla (Energiateollisuus 2023, 17).....	14
KUVA 7.	P-N- liitos vaiheittain. (ST-käsikirja 40 2021, 11).....	16
KUVA 8.	Yksi- ja monikiteiset aurinkopaneelit (Sharp julkaisuaika tuntematon)	17
KUVA 9.	Ohutkalvopaneeli (TaloIT julkaisuaika tuntematon)	18
KUVA 10.	Paneelin sisäiset ohitusdiodit (ST- käsikirja 40 2021, 65)	19
KUVA 11.	Lämpökameran kuva viallisesta aurinkopaneelistä (ST-käsikirja 40 2021, 162)	20
Kuva 12.	Aurinkosähkön pientuotantokapasiteetti Suomessa (Energiavirasto 2022)	21
KUVA 13.	Vaaka-akselinen tuulivoimala (Motiva 2022).....	23
KUVA 14.	Pystyakselinen tuulivoimala (Vähämäki 2012)	24
KUVA 15.	Suomen tuulivoimalatuotanto (Suomen Tuulivoimalayhdistys 2023)	24
KUVA 16.	Kalaportaati (Honkanen 2013)	25
KUVA 17.	4 kW tuuliturbiinin tehontuotanto (Saaristotekniikka 2023)	30
KUVA 18.	Aurinkopaneelien asennuspaikka (Taina 2023)	31

KUVA 19. PVGIS-sovellus (European Commission 2022)	32
KUVA 20. PVGIS- sovelluksen tulokset (European Commission 2022)	33
KUVA 21. Kesäkuun päivittäisen aurinkosäteilyn määrä (European Commission 2022)	37
KUVA 22. Päivittäisen aurinkosäteilyn määrät.....	38
KUVA 23. Investointien rahavirrat vuoden 2023 sähkön hinnalla	39
KUVA 24. Rahavirrat sähkön hinnan ennusteella	40
KUVA 25. CO ₂ päästöt 25 vuoden aikana	41

LYHENTEITÄ

W	Watti
kW	Kilowatti
MW	Megawatti
TW	Terawatti
A	Ampeeri
V	Voltti
kVA	Kilovoltiampeeri
AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
CO ₂	Hiilidioksidi
kWh	Kilowattitunti
TWh	Terawattitunti
GWh	Gigawattitunti
kWp	Kilowattipiikki
PVGIS	Photovoltaic geographical information system
Alv	Arvolisävero
Csv	Comma- separated values- tiedosto
Json	JavaScript object notation- tiedosto

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on suunnitella Muurikkalassa sijaitsevaan mikrovesivoimalaitoksen rinnalle toisen sähköntuotantojärjestelmän. Toiseksi sähköntuotantomenetelmäksi harkitaan tuulivoimaa tai aurinkovoimaa. Järjestelmän suunnittelun lisäksi investoinnille määritetään kustannukset ja takaisinmaksuajat, joiden avulla pystytään selvittämään hankkeen kannattavuus. Opinnäytetyön raportoinnissa käsitellään myös näiden kolmen projektissa osana olevan uusiutuvan energialähteen teoriaa ja niiden ympäristövaikutuksia. Projekti aloitetaan tutustumalla vesivoimalaitokseen ja sen ympäristöön. Perehtymisestä vesivoimalaitoksen sähköntuotantoon eri vuodenaikoina selvisi, että voimalaitos tuottaa sähköä vähiten kesäisin, kun veden määrä vähenee kuivuuden vuoksi. Tämän jälkeen selvitetään, onko tuulivoima vai aurinkovoima kannattavampi ratkaisu tähän kohteeseen. Valintaprosessi alkaa molempien sähköntuotantomenetelmien etuihin ja haittoihin perehtymisellä. Molemmat vaihtoehdot luokitellaan uusiutuviksi energialähteiksi, mutta valintaprosessissa otetaan huomioon myös mahdolliset vaikutukset voimalaitoksen lähiympäristöön.

Työn aiheen sain kesätyöpaikaltani, missä myös toimeksiantaja työskenteli. Aihetta etsiessä yritin löytää opinnäytetyölleni aiheen, joka sopisi opinnoissani erikoistuneeseen alaan, mikä on uusiutuvat energialähteet. Tämä aihe sopii erinomaisesti erikoistumiseeni, sillä työssä käsitellään kolmea eri uusiutuvaa energianlähdeä.

Työssä vertaillaan kolmen eri teholuokan järjestelmää keskenään. Selvitetään myös, kannattaako investoida rahaa isompaan järjestelmään, ja mikä järjestelmästä tasaisi tuotantoeroja parhaiten. Hiilijalanjäljet lasketaan myös vertailussa käytetyille järjestelmille ja tuloksia vertaillaan erilaisiin fossiilisiin sähköntuotantomenetelmiin. Laskelmien avulla selviää, kuinka paljon uusiutuva sähköntuotantomenetelmä säästäisi hiilidioksidipäästöissä verrattuna fossiilisiin energialähteisiin.

2 MUURIKKALAN SÄHKÖLAITOS

Toimeksiantaja yritys on Muurikkalan sähkölaitos, joka on vuonna 1959 rakennettu mikrovesivoimalaitos. Voimalaitos sijaitsee Muurikkalan Urpalanjoessa. Käyttöpaikalla on historiaa jopa 1700-luvulle saakka, jolloin paikkaa käytettiin saha- ja myllytoiminnassa. Sähköä aloitettiin tuottamaan kohteessa vuonna 1921. Saha- ja myllytoiminta loppuivat kohteessa 1950-luvun lopulla laitoksen vanhan rakennuksen tulipalon myötä. Vanhan rakennuksen tilalle rakennettiin uuden sahan ja myllyn sijasta uusi voimalaitos, jonka jälkeen laitoksessa tuotettiin ainoastaan sähköä. Voimalaitoksen nimellisteho on 60 kVA, joka on toteutettu kahdella 30 kW sähkömoottorilla (kuva 1). Turbiineina voimalaitoksella on kaksi Francis -turbiinia, jotka ovat generaattorien koosta huolimatta eri kokoisia. (Taina, 2023.)



KUVA 1. Toinen voimalaitoksen generaattoreista (Taina 2023)

Vesivoimalaitos tuottaa sähköä suoraan jakeluverkkoon. Vesivoimalan pato on toteutettu neulapatonana. Padon rakenne koostuu neljästä betonipilarista ja niiden välissä olevista laudoista. Vedenkorkeutta laitoksella arvioidaan käyttämällä pilareita. Vedenkorkeus selviää pilareiden yläpuolelle jäävästä osuudesta. Veden määrän säätämiseen käytetään padon lautoja pilareiden välistä. Kuvassa 2 on esitelty voimalaitoksen patoa kesähuollon aikana. Veden määrän vähennettyä lautoja voidaan taas asettaa takaisin paikoilleen. Sähkölaitokseen on asennettu vuoden 2023 alussa

valvontajärjestelmä, joka lähettää viestillä varoituksia valvojalle esimerkiksi liian matalasta pinnan tasosta. (Taina 2023.)



KUVA 2. Voimalaitoksen pato korjauksen aikana (Taina 2023)

3 VESIVOIMA

Vesivoima on yksi ihmiskunnan vanhimmista energiantuotantomenetelmistä. Vesivoimassa hyödynnetään veden liike-energiaa ja maapallon painovoimaa, joiden avulla pyöritetään vesivoimalaitoksen turbiinia, joka pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä.

Suomessa vesivoiman avulla sähköä tuottaa noin 250 vesivoimalaitosta, joiden yhtenäinen sähkön-tuotanto on 3,19 TW (Motiva 2021.)

Veden virtauksesta saatava teho (W) lasketaan kaavalla:

$$P = \rho g \Delta h Q \quad (1)$$

Missä P on teho (W), ρ = veden tiheys (kg/m^3), g on putoamiskiintyvyys (m/s), Δh on korkeusero (m) ja Q on virtaama (m^3/s)

Virtaama (m^3/s) saadaan laskettua kaavalla:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Missä Q on virtaama (m^3/s), V on putken läpi virtaaman nesteen tilavuus (m^3) ja t on aika (s).

3.1 Vesivoimalan tyypit

Vesivoimalaitokset voidaan jakaa nimellistehon perusteella viiteen eri luokkaan, jotka ovat suurvesivoimala (> 10 MW), pienvesivoimala (1-10 MW), minivesivoimala (<1 MW), mikrovesivoimala (<100 kW) ja picovesivoimala (<5 kW). Tämän lisäksi laityypeille on neljä eri lajittelutapaa. Ensimmäinen tapa on säännöstely- ja käyttötavan mukaan. Eri käyttötapoja on jokilaitos, joka on Suomen yleisin pienvoimalaitostyyppi, säännöstelyvoimalaitos, pumppuvoimalaitos ja vuorovesivoimala. Toinen lajittelutapa on rakennustyyppin mukaan. Eri rakennetyyppeihin kuuluvat patolaitos, kanavavoimalaitos, paineputkilaitos ja tunnelilaitos. Voimalaitosten kolmas lajitteluperuste on putoamiskorkeus. Putoamiskorkeuden perusteella laitos voidaan jakaa neljään eri ryhmään, jotka ovat pienpainevoimalaitos ($H < 10$ m), keskipainevoimalaitokset ($H = 10-35$ m), keskikorkeapainevoimalaitokset ($H = 35-250$ m) ja korkeapainevoimalaitokset ($H = 250-1800$ m). Suomen suurimman vesivoimalaitoksen (Imatra) putoamiskorkeus on 25 m, kun taas maailman suurimman vesivoimalaitoksen (Kolmen rotkon pato) putoamiskorkeus on 181 m. Viimeinen lajittelukategoria on voimalaitteiston asennuksen mukaan. Märkäasennuksessa voimalan turbiini on asennettu veden alle, jossa generaattori voi olla kuivassa tilassa tai olla asennettuna suoraan turbiiniin uppogeneraattorina. Kuiva-asennuksessa turbiini, generaattori ja muut laitteet ovat asennettuna konesaliin. Voimalaitoksen turbiinin akseli voidaan asentaa myös kolmeen eri asentoon, jotka ovat vaaka-akseli, vinoakseli ja pystyakseli. (Pentinsaari 2022.)

3.2 Vesivoimalan turbiini tyypit

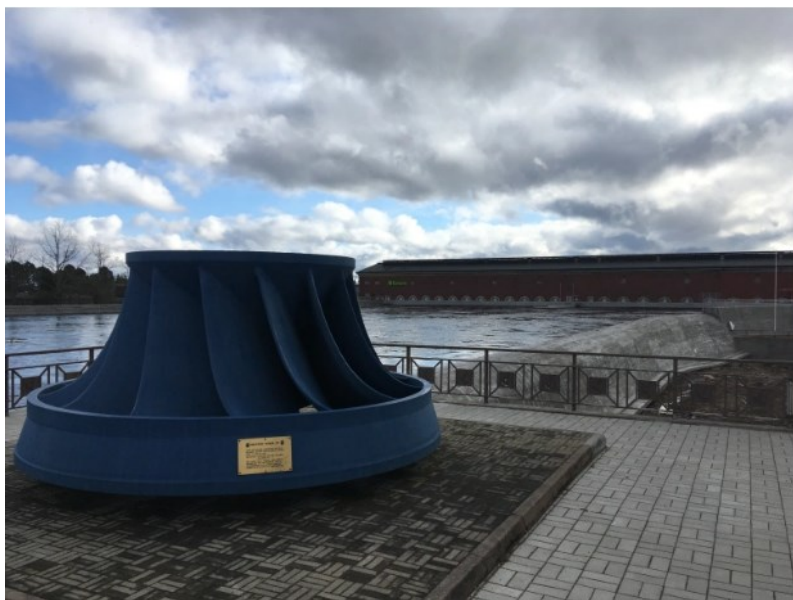
Vesivoimaloiden turbiineille on lukuisia eri sovelluksia, mutta ne kaikki voidaan jakaa kolmeen eri pääryhmään: Kaplan, Pelton ja Francis. Turbiinit voidaan jakaa reaktio- tai impulssiturbiineihin. Reaktioturbiinissa virtaava vesi muuttaa painettaan kulkiessaan turbiinin läpi ja samalla luovuttaa energiansa turbiinin siipien liikuttamiseen. Impulssiturbiineissa vesisuihku ohjataan suihkulla juoksupyörän siipiin, jolloin siipiin kohdistuu impulssivoima, joka luovuttaa energiansa turbiinille. (Pentinsaari 2022.)

Kaplan -turbiinit ovat yleisimpiä energiantuotantoon käytettyjä turbiineja. Kaplan on tyypiltään reaktioturbiini. Tämä turbiini sopii mataliin putouskorkeuksiin ja suuriin vesivirtauksiin. Turbiinissa on radiaalisuunnassa olevat potkurit, jossa on säädettävät siivet. Turbiini muistuttaa laivan potkureita (kuva 3). Turbiinin ympärille tulee kiertyvä putki, joka kapenee turbiinille mennessä. Putken läpi vesi ohjataan tangentialisesti johdesiipien läpi potkurinmuotoiselle juoksupyörälle saaden sen pyörimään. Turbiinin jälkeen vesi ohjataan imuputkeen. Tämän turbiini tyypin hyötysuhde on 91–95 %. (Pentinsaari 2022.)



KUVA 3. Kaplan -turbiini (Hydropower's nature, Süsbrich 2023)

Francis -turbiini (kuva 4) on maailman käytetyin turbiinityyppi. Se soveltuu parhaiten suurille vesivirroille ja suurille putoamiskorkeuksille. Francis -turbiinit ovat Kaplan -turbiinien tavoin reaktioturbiineita. Myös Francis -turbiineissa on spiraalin muotoinen tuloputki, jonka kautta tulovesi ohjataan turbiinin johdesiiville. Veden liike-energia muuttuu vääntömomentiksi, joka pyörittää juoksupyörää. Juoksupyörällä vesi kulkeutuu kehän keskiosaan, josta se poistuu imuputkea pitkin. Tämän turbiini tyypin hyötysuhde on 93–95 %. (Pentinsaari 2022; Vesivoiman luonto julkaisuaika tuntematon.)



KUVA 4. Francis -turbiini (Tekniikan museo 2020)

Pelton -turbiini (kuva 5) on impulssiturbiineihin kuuluva turbiinityyppi. Pelton -turbiinit sopivat parhaiten pienille vesivirtaamille, mutta suurille putoamiskorkeuksille. Muodoltaan turbiini on kuin pyörivä ratas, jossa on kauhamaiset siivet. Turbiinille vesi ohjataan suurella paineella yhden tai useamman suuttimen kautta suihkuna turbiinin siiville. Veden virtausta turbiinille voidaan säätää neula-venttiilin avulla. (Pentinsaari 2022; Vesivoiman luonto julkaisuaika tuntematon.)



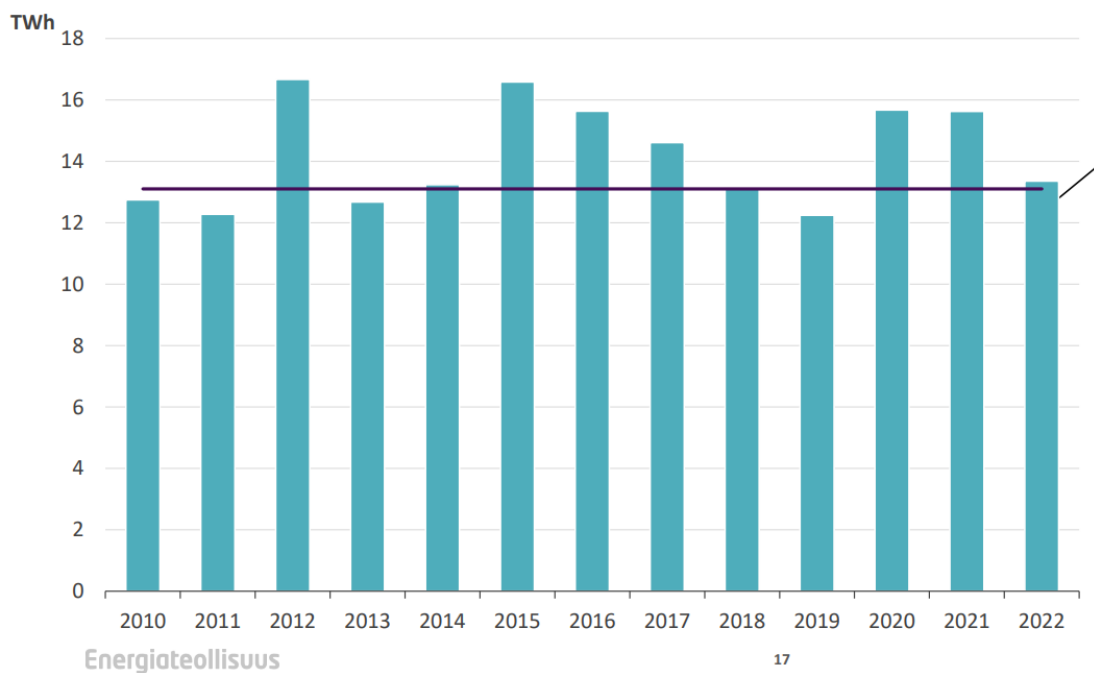
KUVA 5. Pelton -turbiini (Tekniikkatalous 2018)

3.3 Vesivoima Suomessa

Suomessa vesivoimalla tuotetaan sähköstä noin 15–25 %, mikä on riippuvainen vuosittaisesta vesitilanteesta. Suomessa on tällä hetkellä noin 220 vesivoimalaitosta, joiden yhtenäinen voimakapasiteetti on noin 3 100 MW. Vuonna 2022 vesivoimalla tuotettiin Suomen sähköntuotannosta 16,3 %. Vesivoimalla tuotettiin sähköä vuonna 2022 yhteensä noin 13 366 GWh. Suomessa on vielä potentiaalia lisätä vesivoimakapasiteettia, vaikka suurimmat kohteet onkin jo rakennettu. Mahdollisia

voimalaitoksien tehonlisäyskeinoja ovat mm. peruskorjauksien yhteydessä tehty päälaitteistojen tehonlisäys. Eniten sähköä tuotettiin vesivoimalla 1950–1960-luvulla. Vesivoimalla tuotettiin silloin noin 90 % sähköstä. (Energiateollisuus 2023, 9; Energiateollisuus julkaisuaika tuntematon.)

Vesivoiman tuotanto

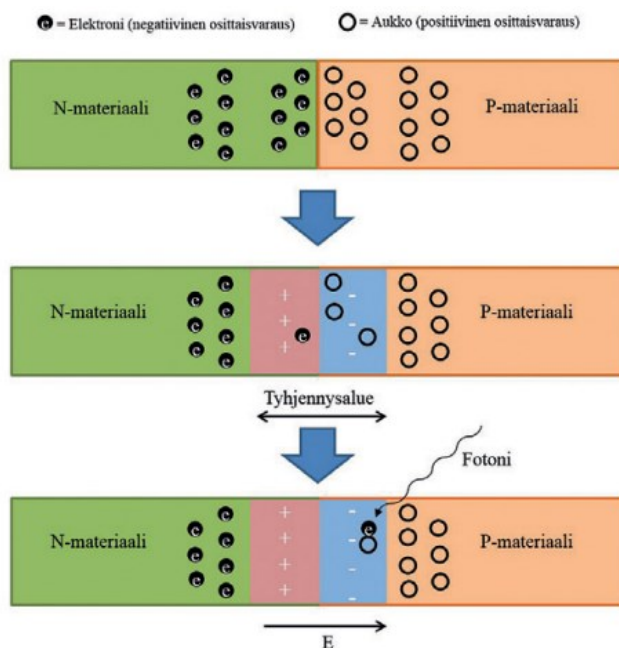


KUVA 6. Suomen sähköntuotanto vesivoimalla (Energiateollisuus 2023, 17)

4 AURINKOVOIMA

Aurinko tuottaa suurimman osan meidän käyttämästä energiasta. Aurinkoa voi verrata suureksi ydinvoimalaksi, jossa joka sekunti noin 600 miljoonaa kiloa vetyä muuttuu heliumiksi fuusioreaktion avulla. Tästä vety määrästä noin neljä miljoonaa kiloa ainetta vapautuu säteilyenergiana. Säteilyenergiaa osuu Suomen etäisyydellä maahan 1360 W/m^2 . Tästä energiasta kaikki ei yllä maahan asti, vaan osa energiasta heijastuu takaisin avaruuteen tai absorboituu ilmakehässä. Maan pinnalle säteilytehoa tulee kirkkaana aurinkoisena päivänä noin 1000 W/m^2 . Auringosta maahan osuvaa säteilyä kutsutaan insolaatioksi. Aurinkopaneeli on useasta aurinkokennosta koostuva paneeli. Aurinkopaneelissa olevat aurinkokennot ovat laitteita, jotka muuttavat auringon säteilyä sähköenergiaksi valosähköilmiön avulla. Valosähköilmiössä kennoon osunut auringon säteilyn fotonit absorboituu atomiin irrottaen tästä elektronin. Atomiin osunut fotonit luovuttaa kaiken energiansa irronneelle elektronille. Tämä synnyttää elektroni-aukko-pareja. Pn- liitosten lähellä syntyvistä pareista elektronit siirtyvät n -puolelle ja aukot p -puolelle. Kun napoihin kytketään vastus, kulkee siinä virta. (Perälä 2017, 7–8; 16.)

Aurinkopaneeleissa yleisesti käytetty pii on puolijohdemateriaali. Puolijohde on materiaali, joka johtaa virtaa huonommin kuin johteet, mutta eristeitä paremmin. Puolijohteiden johtavuus kasvaa esimerkiksi lämpötilan noustessa. Aurinkosähkössä tätä ominaisuutta ei käytetä sellaisenaan. Puolijohteista voidaan tehdä eri materiaaleja kyllästyksen ja saostuksen avulla. Esimerkiksi, kun puolijohdetta saostetaan fosforilla, muodostuu materiaaliin enemmän varauksenkuljettajia, mikä parantaa materiaalin johtavuutta. Materiaalista tulee näin negatiivinen ja sitä kutsutaan N-aineeksi. Kun materiaalia saostetaan esimerkiksi alumiinilla tai boorilla, muodostuu materiaaliin enemmän aukkoja. Näitä aukkoja voidaan käsitellä positiivisena varauksena. Syntyvää materiaalia kutsutaan P-aineeksi. P-N-liitos saadaan aikaiseksi, kun P- ja N-aineet asetetaan vierekkäin. Elektronit ja aukot voivat kulkea aineesta toiseen ja kohdatessaan elektroni ja aukko yhdistyvät. P-N-liitoksen lähellä on tyhjennysalue, jossa ei varauksenkantajia, koska ne yhdistyvät lähellä liitospintaa. P-N-liitoksen tyhjennysalueelle muodostuu materiaalin sisäinen sähkökenttä, kun N- aineen puolelle muodostuu positiivinen varaus ja taas P- aineen puolelle negatiivinen varaus. Auringon säteilystä tulevan fotonit virittää puolijohteen elektronin siihen osuessaan. Tämä saa elektronin liikkeelle ja näin muodostuu uusi elektroni-aukko-pari. Elektroni lähtee liikkumaan kohti N-ainetta ja aukko kohti P-ainetta sisäisen sähkökentän vuoksi. Kennossa syntyy sähkövirta, kun elektroni irtoaa aukosta, eikä se yhdisty aukkoon sisäisessä sähkökentässä. Elektroni ja aukko pystyvät yhdistymään sisäisessä sähkökentässä. Sitä tapahtuu varsinkin, jos elektronin viritys tapahtuu kaukana tyhjennysalueesta. Tämän vuoksi aurinkokennoja suunniteltaessa on tärkeää suunnitella kenno siten, että eniten auringon säteilystä saadaan tyhjennysalueelle. Sähkövirta saadaan luotua lisäämällä kontaktit kennoihin. (Perälä 2017, 29–35; ST- käsikirja 40 2021, 9–11.)



KUVA 7. P-N- liitos vaiheittain. (ST-käsikirja 40 2021, 11)

Aurinkopaneelin tuottama teho P (W):

$$P = U * I \quad (3)$$

Missä P on aurinkopaneelin teho (W), U on aurinkopaneelistä mitattu jännite (V) ja I on aurinkopaneelistä mitattu virta (A).

Aurinkopaneelin kuorman R (Ω) saadaan laskettua kaavalla:

$$R = \frac{U}{I} \quad (4)$$

Missä R on resistanssi (Ω), U on aurinkopaneelistä mitattu jännite (V) ja I on aurinkopaneelistä mitattu virta (A).

Valon intensiteetti saadaan laskemalla säteilytehon keskiarvo, jonka jälkeen tämä keskiarvo jaetaan diodin kalibrointiavulla (500 W/m^2).

Paneelille tuleva säteilyteho saadaan kertomalla valon intensiteetti kennon pinta-alalla.

$$P = I * A \quad (5)$$

Missä P on paneelille tuleva teho (W), I on valon intensiteetti (W/m^2) ja A on paneelin kennon pinta-ala.

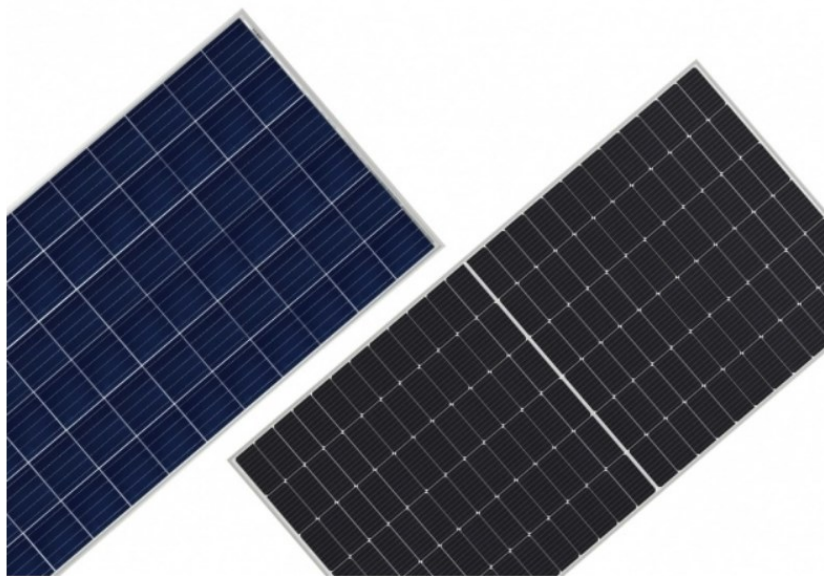
Aurinkopaneelin hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla:

$$\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}} \quad (6)$$

Missä η on hyötysuhde, P_{anto} paneelin tuottama teho (W) ja P_{otto} paneelille tuleva teho (W).

4.1 Aurinkopaneelien tyypit

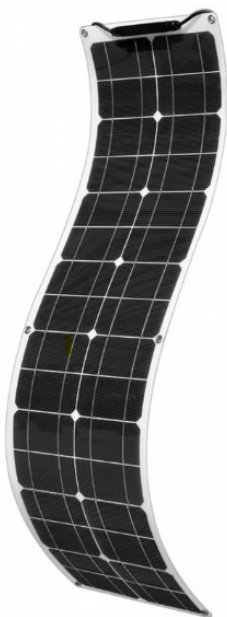
Yksikiteinen aurinkokenno on rakennettu kiekon muotoiseksi yhdestä piikiteestä, joka on monikiteiseen verrattuna puhtaampi. Yksikiteisen aurinkopaneelin voi tunnistaa sen pyöreistä kulmista ja se on monikiteistä aurinkopaneelia tummempi väriltään (kuva 8). Yksikidepaneelille käytetään myös nimitystä monokidepaneeli. Yksikidepaneelit ovat hyötysuhteeltaan tehokkaita, saavuttaen jopa yli 20 % hyötysuhteen. Tämän vuoksi tämä paneelityyppi vie vähemmän tilaa monikiteiseen verrattuna, mutta on myös hintavampi vaihtoehto. (Green Match 2023; ST- käsikirja 40 2021, 12–13.)



KUVA 8. Yksi- ja monikiteiset aurinkopaneelit (Sharp julkaisuaika tuntematon)

Monikiteisessä aurinkokennossa kenno on rakennettu useasta piikiteestä, jotka on sulatettu yhteen valmistuksen aikana. Nämä kennot voi tunnistaa niiden terävistä kulmista ja sinertävästä väristä (kuva 8). Monikiteiset kennot ovat yksikiteisiin verrattuna halvempia, mutta niiden hyötysuhde on huonompi. Teknologian kehitys on pienentänyt moni- ja yksikiteisten kennojen hyötysuhteiden eroa, mutta yksikiteiset ovat vieläkin tehokkaampi vaihtoehto. Monikiteisten kennojen hyötysuhde on parhaimmillaan 15 % luokkaa. Nämä kaksi aurinkopaneelityyppiä kuuluvat aurinkopaneelien ensimmäiseen sukupolveen. (Green Match 2023; ST- käsikirja 40 2021, 12–13.)

Toisen sukupolven aurinkopaneelisiin kuuluu ohutkalvopaneelit. Ohutkalvopaneelit on rakennettu ohuesta kerroksesta esimerkiksi piistä, jonka vuoksi ne ovat rakenteeltaan hyvin kevyitä ja taipuisia (kuva 9). Muita etuja tällä paneelityypillä on se, että ne pystyvät hyödyntämään valoa isommalta spektriltä verrattuna ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelisiin. Huonoja puolia tällä paneelityypillä on se, että se vaatii paljon tilaa ja niiden elinikä on ensimmäisen sukupolven paneelisiin verrattuna lyhyempi. Tämän paneelityypin hyötysuhde on 7–10 % luokkaa. (Green Match 2023; ST- käsikirja 40 2021, 12–13.)



KUVA 9. Ohutkalvopaneeli (TaloIT julkaisuaika tuntematon)

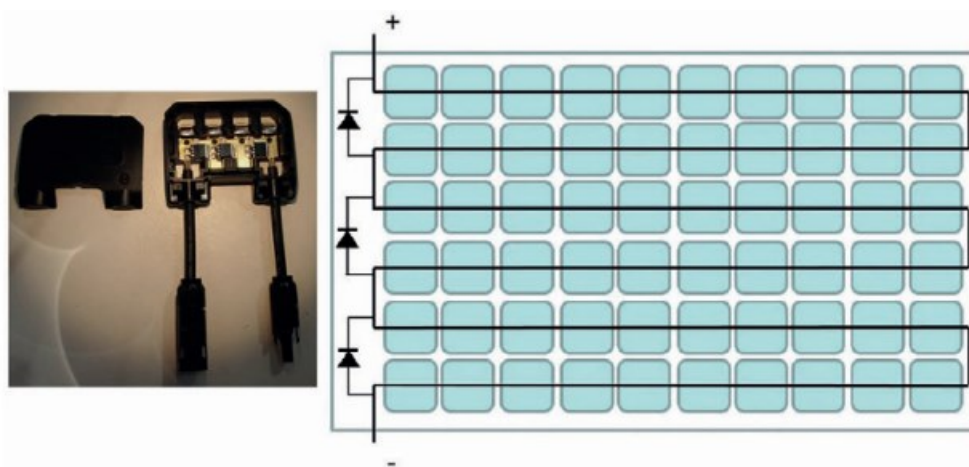
Aurinkopaneelien kolmannen sukupolven kennot ovat vasta tutkimusvaiheessa. Näihin paneelisiin kuuluvat mm. nanokidekennot. Nanokidekennot eivät käytä ensimmäisen ja toisen sukupolven kennojen tapaan pn-liitoksen luomaa sähkökenttää, vaan elektronien liike saadaan aikaan kemiallisella reaktiolla. Nanokidekennot on rakennettu nanokokoisista titaanidioksidhiukkasista, jotka on pinnoitettu säteilyä absorboivilla väriainehiukkasilla ja käsitelty elektrolyyttiliuoksella. Säteilyn saavuttaessa väriainehiukkaset, kennolla vapautuu elektroneja, jotka liikkuvat puolijohtavalta titaanidioksidikerrokselta ulkoiseen virtapiiriin. Toinen, kolmannen sukupolven kennotyyppi, on keskittäviin järjestelmiin kehitetyt aurinkokennot. Nämä kennot käyttävät perinteistä pn-liitosta elektronien liikuttamiseen. Eroavaisuus näillä kennoilla on se, että niihin on valmistuksessa lisätty auringon säteilyä keräävä peili, linssi tai jopa jäähdytysjärjestelmä. Tämän vuoksi kennomateriaalia tarvitaan vähemmän, mikä mahdollistaa kalliimpien ja tehokkaampien kennomateriaalien käyttämisen. Näiden kennojen hyötysuhde on saatu jopa 41 %:n. Nämä kennot vaativat täydellisen kulman auringon kanssa toimiakseen tarkoitetulla tavalla, joten paneelisiin on lisättävä aurinkoa seuraava järjestelmä, jotta kulma olisi päivän aikana sopiva tehokkaalle sähköntuotannolle. (Green Match 2023; ST- käsikirja 40 2021, 12–13.)

4.2 Aurinkopaneelijärjestelmän komponentit

Aurinkopaneelijärjestelmän komponenttien määrä vaihtelee järjestelmien mukaan. Isoimmat komponentit tulevat off-grid ja on-grid järjestelmille. Projektissa käsitellään verkkoon kytkettävää on-grid järjestelmää, joten tässä kappaleessa käsitellään ainoastaan siihen kuuluvia komponentteja. Yleisesti aurinkopaneelijärjestelmä koostuu aurinkopaneeleista, joiden määrä voi vaihdella muutamasta paneelista satoihin paneelisiin. Pienemmät järjestelmät pystytään helposti asentamaan rakennuksien katoille, mutta suuremmat paneelijärjestelmät vaativat enemmän tilaa, jonka vuoksi ne yleensä asennetaan maa-asennuksena asennustelineisiin. Maa-asennustelineiden avulla paneelit

voidaan paremmin suunnata optimaalisesti parhaan sähköntuotannon takaamiseksi. Aurinkopaneelien tuottama sähkö on tasavirtaa (DC), jonka jännitetaso vaihtelee 12–48 V välillä. Tämä tasavirta on muutettava vaihtovirraksi (AC), mikäli sitä halutaan syöttää jakeluverkkoon. Virranmuutos saadaan järjestelmässä aikaan vaihtosuuntaajalla, jolle käytetään myös nimitystä invertteri. Vaihtosuuntaajat voivat olla joko 1- tai 3-vaiheisia, joista yleisesti alle 3 kW vaihtosuuntaajat ovat 1-vaiheisia ja yli 3kW 3-vaiheisia. Invertterillä on myös muita toimintoja järjestelmässä. Invertteri toimii myös seuranta/valvontakeskuksena, jossa on myös omia suojaustoimintoja. Paneelijärjestelmä vaatii aina myös oman erillisen suojakytkimen, millä paneelijärjestelmä voidaan fyysisesti erottaa verkosta turvallisesti. Paneelit kytketään niille suunniteltujen kaapeleiden avulla invertteriin. Kaapeleiden virrankestävyys on tärkeä osa kaapeleita, jonka vuoksi mitä tahansa kaapelia ei saa käyttää asennuksessa. Katolle asennettujen paneelien kaapelit tulee olla myös mekaanisesti kestäviä, koska ne saavat enemmän mekaanista rasitusta muihin kaapeleihin verrattuna. (ST- käsikirja 40 2021, 49–57.)

Lähes kaikissa aurinkopaneeleista löytyy omat ohitusdiodit. Diodien tehtävä on parantaa paneelien tehontuotantoa ja varjostuksen sietoa. Diodit ovat yleisesti paneelien kytkentärasioissa ja ne jakavat paneelit kolmeen omaan osioon (kuva 10). Diodien puuttuminen vaatisi paneelien toiminnallista maadoitusta negatiivisesta potentiaalista.



KUVA 10. Paneelin sisäiset ohitusdiodit (ST- käsikirja 40 2021, 65)

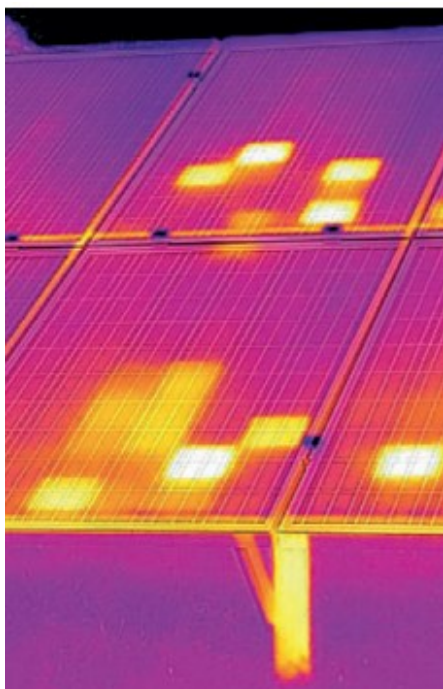
Diodeja voidaan lisätä järjestelmään halutessaan, mutta sillä voi olla vaikutusta laitteiston takuuseen. Väärin asennetut diodit voivat huonoimmassa tapauksessa aiheuttaa palovaaran. Tästä syystä ulkoisten diodien asennus ja suunnittelu tulisi tehdä huolellisesti. (ST- käsikirja 40 2021, 65–66).

4.3 Aurinkopaneelien käyttö, huolto ja ylläpito

Aurinkopaneelit ovat hyvin varmatoimisia, eivätkä ne vaadi juurikaan huoltoa tai komponenttien uusimista. Suurin huoltotoimenpide on invertterin tehoelektronikan vaihtaminen, joka tehdään vasta noin 15 vuoden jälkeen, mikä vaatii invertterin uusimista. Aurinkopaneeleita ei suositella

puhdistamaan, ellei paneelit ole likaantuneet suuresti esimerkiksi linnun jätöksistä. Tässä tilanteessa hellävarainen pesu kannattaa niin, ettei paneeleihin syntyisi mitään vauriota. Muissa tapauksissa sa-
devesi pitää paneelit tarpeeksi puhtaina. Tuulen tavoin aurinkopaneelit kestävät vain tietyn verran lumikuormaa, mikä on huomioitava paneelien käytössä. Aurinkopaneeli- ja kiinnitysjärjestelmäval-
mistaja ilmoittaa, millaista painoa laitteet kestävät. Lumikuorman kestävyys varmistetaan riittävällä
asennuskiskojen määrällä ja sijoituksella. On myös oltava huolellinen, ettei kiinnitysjärjestelmä ai-
heuta pistekuormia kattorakenteisiin. (ST-käsikirja 40 2021, 149).

Aurinkopaneelijärjestelmälle suositellaan tekemään kerran vuodessa perustarkastus, esimerkiksi kiin-
teistön vuositarkastuksen yhteydessä. Tarkastuksessa tulisi varmistaa aurinkopaneeleiden, invertte-
rin ja johtojen yleiskunto, ettei niissä ole mitään silminnähtävää vikaa. Liittimet tulisi tarkastaa myös
ylikuumenemisen tai kosteuden aiheuttamien vaurioiden varalta. Laitteiston suojalaitteiden toiminta-
varmuus tulisi myös tarkastaa. Laitteissa on yleisesti testinappula millä toiminnan voi testata. Tar-
kastusajankohdaksi suositellaan kevään alkua, kun lumikuormaa ei ole paneeleiden päällä. Tarkas-
tuskäyntiä suositellaan myös kovan ukkosen tai myrskyn jälkeen tai kun kohteen etävalvonnasta on
tullut hälytys invertterin toimintahäiriöstä tai etävalvonta ei toimi. Mahdollisen vian tullessa, panee-
leita voi joutua tarkastamaan paneelikohtaisesti. Mahdolliset viat voivat selvitä mittauksien, lämpö-
kuvauksen tai silmämääräisen tarkastuksen perusteella. Kuvassa 11 on esitelty lämpökuvaa vialli-
sesta aurinkopaneelista. Yleisesti järjestelmän keskuslaitteet kertovat mahdollisista vioista, jotka
käyttäjä pystyy selvittämään tarkemmin ohjeiden avulla. (ST- käsikirja 40 2021, 159–163.)

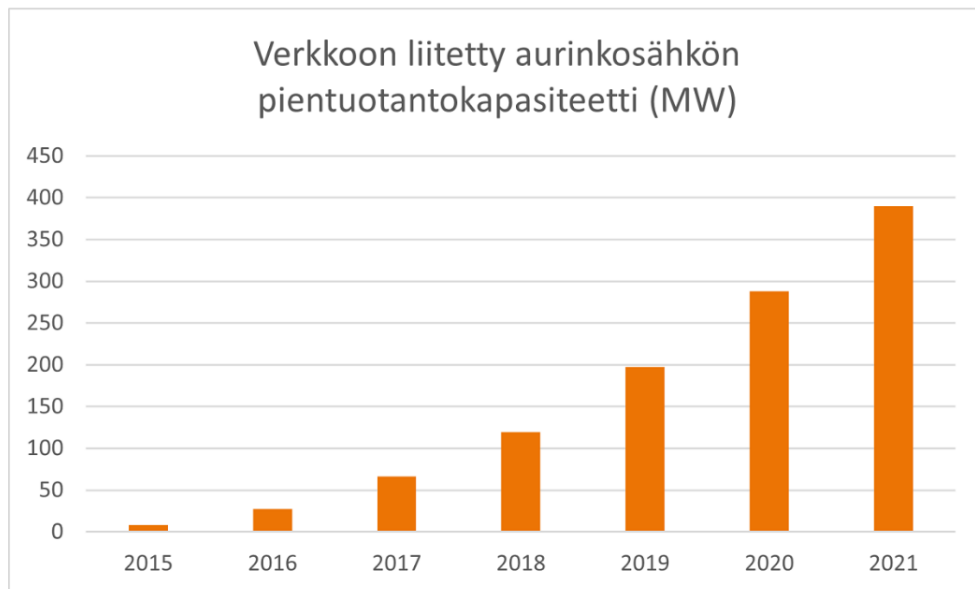


KUVA 11. Lämpökameran kuva viallisesta aurinkopaneelista (ST-käsikirja 40 2021, 162)

4.4 Aurinkosähkö Suomessa

Aurinkosähkön tuotannon määrä pientuotannossa on kasvanut suuresti viimeisten vuosien aikana. Vuoden 2021 lopussa sähköverkkoon oli liitetty 395 MW tuotantokapasiteettia. Tämä on 100 MW

kasvu edellisestä vuodesta. Aurinkosähkön kasvua Suomessa vuosien ajalta on esitelty kuvassa 12. Vuonna 2021 aurinkosähköllä tuotettiin silti vain 0,4 % Suomen sähköntuotannosta. Suurin osa sähköverkkoon liitetystä aurinkovoimasta on alle 1 MW:n paneelijärjestelmiä. Yli 1 MW:n aurinkovoimalaitoksien yhteisteho on Suomessa 4,6 MW. Sähköverkkoon kytkemättömiä aurinkovoimaloita on Suomessa arvion mukaan 22 MW, jotka ovat yleisimmin asennettuna vapaa-ajan asuntoihin (Energiavirasto 2022.)



Kuva 12. Aurinkosähkön pientuotantokapasiteetti Suomessa (Energiavirasto 2022)

5 TUULIVOIMA

Tuuli syntyy, kun aurinko lämmittää maapalloa epätasaisesti. Tämä aiheuttaa ilmassa lämpötila- ja ilmanpaine eroja. Ilmanvirtaukset tasaavat nämä erot, eli lämmin ilma nousee ylös, kun taas viileämpi ilma siirtyy tilalle. Ilmavirtauksesta saatava energia on peräisin ilmamolekyylien liikkeestä. Ilmamolekyylien törmätessä kappaleeseen, kuten tuulivoimalan lapaan, kohdistuu siihen sen seurauksena voima.

Tuuliturbiini on laite, jolla tuulen liike-energia muutetaan turbiinin akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Tämän akselin pyöriminen taas pyörittää siihen liitettyä generaattoria, joka tuottaa sähköä.

Yleisin tuuliturbiini rakennemalli on aksiaalinen, mikä tarkoittaa, että ilma virtaa turbiinin akselin-suuntaisesti. Radiaalisia turbiineja on myös valmistettu, mutta ne sopivat parhaiten pienille tehoille (alle 25 kW). (Korpela 2016, 36–39; Motiva 2022.)

Tuulesta saatava teho (W) saadaan laskettua kaavalla:

$$P = \frac{1}{2} * \rho A v^3 \quad (7)$$

Missä ρ on ilman tiheys (kg/m^3), A on roottorin ppyhkäisyala (m^2) ja v on tuulen nopeus (m/s).

Generaattorin teho saadaan laskettua kaavalla:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (8)$$

Missä U on navoista mitattu jännite (V) ja R on generaattorin napoihin kytketty vastus (Ω).

Tuuliturbiinin hyötysuhde saadaan määriteltyä kaavalla:

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} \quad (9)$$

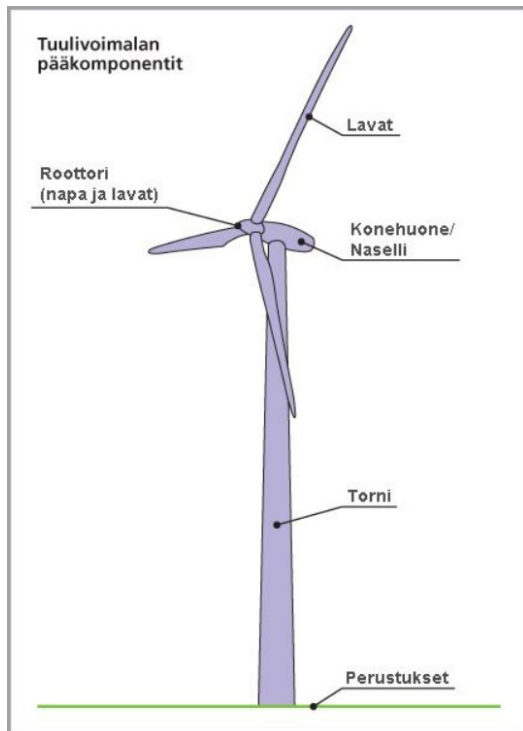
Missä P_{anto} on generaattorilta saatu teho (W) ja P_{otto} on tuulesta saatu teho (W).

5.1 Tuulivoiman tyypit

Tuulivoimaloita on useita erilaisia tyyppinä, joista yleisimmin käytetty tyyppi on kolme -lapainen vaaka-akselinen tuuliturbiini.

Suomen teollisen kokoluokan tuuliturbiinit ovat vaaka-akselisia (kuva 13). Näiden turbiinien ppyhkäisy-pinta-ala on lapojen kärkien piirtämä ympyrä, mikä on näiden turbiinien suurin etu. Vaaka-akseliset turbiinit on suunniteltu toimimaan tietyllä tuulen nopeus alueella. Näiden tuuliturbiinien etuna on myös se, että ne pystyvät keräämään eniten energiaa. Vaaka-akseliset tuuliturbiinit täytyy osoittaa tuulta kohti, jotta ne toimisivat. Teollisuus tason voimaloissa tämä säätö tapahtuu moottorin avulla, mikä kääntää voimalan oikeaan suuntaan. Pientuulivoimaloissa suunnan vaihto tapahtuu perässä olevan pyrstön avulla. Vaaka-akseliset tuuliturbiinit voidaan jakaa kahteen luokkaan, jotka ovat etutuuliset ja takatuuliset turbiinit. Etutuulityyppinen on näistä yleisemmin käytetty. Siinä roottori on

tornista katsottuna tuulen puolella ja akseli vaakatasossa. Takatuulityyppinen turbiini on lähes samanlainen, jossa akseli on myös vaakatasossa, mutta roottori on tornista katsoen tuulen alapuolella. Tämän tyyppiset turbiinit olivat ennen suosittuja, mutta nykyään niitä ei enää käytetä. Vaaka-akseliset tuulivoimalat ovat yleisimmin kolme lapaisia, joiden yleinen lapapituus on 65–80 m ja tornin korkeus 140–175 m. (Motiva 2022; Suomen tuulivoimayhdistys julkaisuaika tuntematon.)



KUVA 13. Vaaka-akselinen tuulivoimala (Motiva 2022)

Pystyakselisen tuulivoimalan akseli on nimensä mukaan pystytasossa (kuva 14). Pystyakselisen tuulivoimalan roottorin pyyhkäisyala on pyörivän roottorin suurin tuulta vastaan oleva kohtisuora pinta-ala. Napakorkeus on roottorin pyyhkäisyalan keskipisteen korkeus maanpinnasta. Pystyakselinen tuulivoimala ei tarvitse erillistä suunnansäätiä, vaan se toimii riippumatta tuulensuunnasta. Pystyakseliset tuulivoimalat sopivat parhaiten esim. kiinteistöjen tai kotitalouksien omaan sähköntuotantoon. (Motiva 2022; Suomen tuulivoimayhdistys julkaisuaika tuntematon.)



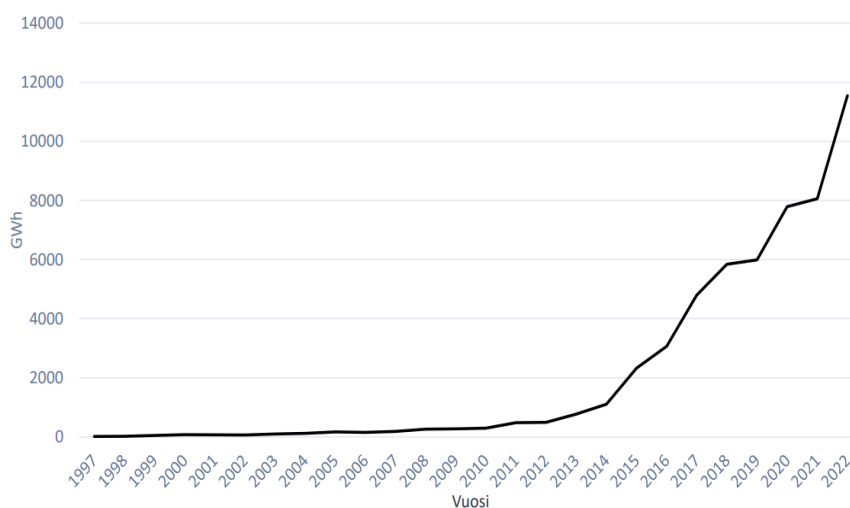
KUVA 14. Pysty akselinen tuulivoimala (Vähämäki 2012)

5.2 Tuulivoima Suomessa

Vuonna 2022 Suomessa oli 1393 tuulivoimalaa, joista 437 oli rakennettu vuoden 2022 aikana. Tuulivoimaloiden kokonaiskapasiteetti oli yhteensä 5677 MW. Vuoden 2022 tuulivoimaloilla tuotetun sähkön määrä oli 11,5 TWh (kuva 15). Suomeen on tällä hetkellä rakenteilla 505 uutta tuulivoimalaa, joista viimeisimmät valmistuvat vuoteen 2025 mennessä. Rakenteilla olevien tuulivoimaloiden yhteisteho on 3187,6 MW. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2023.)

Vuosittainen tuulivoimatuotanto (GWh)

Suomen
Tuulivoimayhdistys



KUVA 15. Suomen tuulivoimatuotanto (Suomen Tuulivoimayhdistys 2023)

6 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

6.1 Vesivoiman ympäristövaikutukset

Vesivoimasta ei synny pääsääntöisesti ilmastolle päästöjä ja se on yksi puhtaimmista sähköntuotantomenetelmistä. Suurimmat vaikutukset vesivoimalla on sen paikalliseen ympäristöön ja vesistöön. Motivan antaman tiedon mukaan vesivoimalaitos ja sen yhteyteen mahdollisesti rakennettava tekoal- las vaikuttavat valjastetun vesistön ja tekoaltaan alle jäävän maa-alueen ekologiseen tasapainoon. Alueiden alkuperäinen eliöstö joko tuhoutuu tai joutuu väistymään tieltä. Ympäristölle haitalliset ras- kasetallit ja muut aineet saattavat myös tekoaltaan alta liueta vesistön kautta kaloihin ja muihin elimistöihin. Suurin vaikutus vesistössä vesivoimalla on kalakantojen, varsinkin vaelluskalojen esteet- tömään liikkumiseen. Vesivoimalaitos voi estää vaelluskalojen liikkumista kutemispaikeille. Tähän voidaan vaikuttaa rakentamalla kalaportaat, joiden kautta kalat pääsevät kulkemaan vesivoimalai- toksen ohi (kuva 16). Tämä tapa ei kuitenkaan korjaa ongelmaa kokonaan, vaikka edesauttaakin kalojen pääsyä kutemispaikeille. (Motiva 2021.)



KUVA 16. Kalaportaat (Honkanen 2013)

Vesivoiman kautta voi syntyä myös ilmastolle päästöjä. Tekoaltaan alta voi ilmastoon päästä myös hiilidioksidi- ja metaanipäästöjä. Tämä pätee varsinkin, jos veden peittämiltä alueilta ei raivata puita pois. Tämä ei Suomessa ole iso ongelma meidän viileän ilmastomme vuoksi, vaan tämä on ongel- mana lämpimimmillä alueilla.

Vesivoiman ympäristövaikutukset ovat hyvin pieniä verrattuna esimerkiksi fossiilisiin energianlähte- siin. Intergovernmental Panel on Climate Change (2014, 1335) mukaan vesivoiman hiilijalanjälki on noin 24 gCO₂/kWh. Tämä on hyvin pieni määrä esim. kivihiiheen verrattuna, joka tuottaa arviolta 820 gCO₂/kWh. Tämä on merkittävä määrä sillä, jos kaikki maailman vesivoimalat korvattaisiin kivi- hiilellä, kertyisi vuoden aikana hiilidioksidipäästöjä lisää noin 4 miljardia tonnia. Raportin mukaan metaanipäästöjen määrä vesivoimalla on 88 g/kWh.

6.2 Aurinkovoiman ympäristövaikutukset

Aurinkovoima ei tuota energiantuotannossa mitään päästöjä ilmastoon ja se on täysin uusiutuva energiantuotantomenetelmä. Tämän takia aurinkoenergia on maailman nopeimmin kasvava energiantuotantomenetelmä. Moni- ja yksikiteiset aurinkopaneelit pystyvät tuottamaan sähköä jopa 25-vuoden ajan tehokkaasti, kunnes ne alkavat vähitellen menettämään sähköntuotantokykyään. Amorfiset aurinkopaneelit menettävät sähköntuotantokykyään paljon nopeammin, noin 10–15 % vuodessa. Aurinkopaneelien suurin ympäristöhaitta tällä hetkellä on niiden kierrätys siinä vaiheessa, kun ne eivät pysty tuottamaan sähköä enää tehokkaasti. Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö Irena on arvioinut, että vuoteen 2030 mennessä aurinkopaneelien maailmanlaajuisen jätteen määrä on yhteensä 1,7–8 miljoonaa tonnia. Vertailun vuoksi todettakoon, että vuonna 2018 Suomessa kerättiin 3,4 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätteitä. Vuoteen 2050 aurinkopaneelijätteen määrän ennustetaan kasvavan 60–78 miljoonaa tonniin. (IRENA 2016; Vakkuri 2020.)

Aurinkopaneelien kierrätystekniikoita on jo olemassa, minkä avulla paneelien materiaaleista pystytään kierrättämään suurin osa uudelleenkäyttöä varten. Piipohjaisten paneelien kierrätys alkaa lasi- ja metalliosien irrottamisella, jotka pystytään helposti hyödyntämään uudelleen sellaisenaan ilman mitään erillistä käsittelyä. Paneelin muut materiaalit käsitellään 500 °C lämpötilassa, jonka avulla muovi haihtuu pois ja jäljelle jäänyt pii voidaan ottaa jatkokäsittelyyn. Jäljelle jääneestä piistä noin 80 % voidaan käyttää uudelleen uusissa paneeleissa. Tällä menetelmällä piipohjaisten paneelien kierrätysaste on parhaillaan 85 %. Ohutkalvopaneeleita pystytään kierrättämään tehokkaammin. Noin 95 % ohutkalvopaneelien puolijohdemateriaaleista pystytään uudelleenkäyttämään. Ohutkalvopaneelien kierrätysprosessissa paneelit murskataan, jossa ne erottuvat kiinteiksi ja nestemäisiksi jätteiksi. Nestemäinen jäte käy läpi saostus- ja nesteenpoistoprosessin. Tämän jälkeen metallit poistetaan. Teknologia aurinkopaneelien kierrätykseen on jo olemassa. Suurin ongelma siinä on, että niiden prosessit ovat kustannuksellisesti kalliita. (IRENA 2016; Vakkuri 2020.)

Aurinkovoiman hiilijalanjälki on hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (2014, 1335) raportin mukaan 41 gCO₂/kWh katolle asennettuna ja 48 gCO₂/kWh maa-asennettuna. Suurimman vaikutuksen hiilijalanjälkeen tekee aurinkopaneelien valmistus, missä valmistusmateriaalit täytyy ensin louhia maasta. Myös paneelien kuljetus on otettu laskelmissa huomioon. Maa-asennetut paneelit vaativat omat asennustelineet, mitkä nostavat hiilijalanjäljen arvoa. Lukemaan ei olla otettu huomioon mahdollista kierrätyksestä aiheutuvaa päästöä. Huolimatta siitä, että aurinkovoiman hiilijalanjälki on hieman suurempi verrattuna esimerkiksi tuulivoimaan, on aurinkovoiman hiilijalanjälki noin 20 kertaa pienempi hiilivoimaan verrattuna. (IPCC 2014, 1335.)

6.3 Tuulivoiman ympäristövaikutukset

Tuulivoima, kuten aurinkovoimakaan, ei tuota ilmastoon mitään haitallisia päästöjä suoraan sähkön tuotannosta. Tuulivoima voi silti aiheuttaa sen lähiympäristölle erilaisia haittoja. Yksi suurimpia haittoja on suurempien tuulivoimaloiden ympäristömelu. Suurin osa tuulivoimaloiden tuottamasta äänestä syntyy turbiinin lavoissa aerodynaamisen vuorovaikutuksen seurauksena. Äänen aiheuttavat lapojen jättöreunan ja kärkien synnyttämät pyörteet, lapojen etureunan ja tulovirtauksen

kohtaaminen, sekä tornin ja lapojen vuorovaikutukset (Petri Välisuo 2020.) Tuulivoimaloista syntyvä ääni on laajakaistaista kohisevaa ääntä. Melusta on haittaa lähellä asuvien ihmisten unelle yleisemmin, mutta unen saamattomuudesta tuulivoimalan lähellä ei ole konkreettista näyttöä. ”Maailman terveysjärjestön WHO:n mukaan oleskelun häiriintymisen ja unihäiriöiden lisäksi muiden terveyshaittojen yhteydestä tuulivoimameluun ei ole näyttöä.” (THL 2022).

Tuulivoimalat voivat vaikuttaa myös lintujen elinympäristöön. Isot tuulivoimalat aiheuttavat linnuille törmäysriskin, vaikka sen mahdollisuus on hyvin pieni, noin 1/1000. Suurimmassa törmäysriskissä ovat suuremmat linnut, kuten petolinnut ja lokit. Pienemmät linnut ja muuttolinnut ovat pienemmässä riskissä törmäykseen. Motivan (2021) antaman tiedon mukaan voimalan koko, teho ja väri sekä voimalan sijainti maa- tai vesialueella ei vaikuta merkittävästi törmäysriskiin. Pienestä törmäysriskistä huolimatta tuulivoimalaa ja tuulipuistoa suunnitellessa suositellaan, että asennuspaikka ei ole muuttolintujen lepopaikoilla, pesimäpaikoilla tai muuttoreitillä. Tuulivoimalan ympäristön johdotuksen veto maihin pienentää myös törmäysriskiä.

Hiilijalanjälki tuulivoimalla on pienen kaikista sähköntuotantomuodoista IPCC:n raportin (2014, 1335) mukaan. Hiilijalanjälki vaihtelee tuulivoimalan asennuspaikan mukaan. Mantereelle asennetun tuulivoimalan hiilijalanjälki on 11 gCO₂/kWh, kun taas merituulivoiman hiilijalanjälki on hieman isompi 12 gCO₂/kWh. Lukemissa on otettu huomioon laitteiden materiaaleista ja laitteiston kuljetuksessa syntyvät päästöt.

7 TYÖN TOTEUTUS

Projektissa työskentely toteutetaan enimmäkseen itsenäisesti, mutta toimeksiantajalta saan tarpeellista materiaalia sekä tietoa työhön liittyen. Projekti on pääsääntöisesti investointiprojekti, mutta projektiin liittyy myös tutkivaa työtä ympäristövaikutuksiin liittyen. Tutkimusaineistoa työhön sain toimeksiantajalta esimerkiksi sähkön hinnoista ja tuotannoista viimeisten vuosien ajalta. Muuta tutkimusaineistoa kerätään internetistä, aihetta käsittelevästä kirjallisuudesta ja koulun kurssiaineistoista.

Työ aloitettiin työsuunnitelman ja projektin aikataulun suunnittelulla. Projektin valmistuminen on arvioitu toukokuulle 2023. Työ aloitettiin perehtymällä projektin kohteeseen. Perehtymällä kohteeseen selvisi, mitkä vaihtoehdot olisivat sopivia toiseksi energiatuotantomenetelmäksi. Mahdollisia asennuspaikkoja tuuli- tai aurinkovoimalle selvitettiin samalla.

Kohteen sähköliittymän sulakekoko on 3x125 A, joka tuli ottaa huomioon molempien sähköntuotantomenetelmien yhteistuotantoa arvioidessa. Mikäli yhteisteho ylittäisi sallitun rajan, sulakkeet eivät kestäisi tehoa.

7.1 Työn merkitys

Projektin aiheen sain kesätyöpaikkani kautta, jossa myös toimeksiantajani työskenteli. Aihe sopi täydellisesti opintojeni viimeistelemiseen, sillä erikoistun uusiutuviin energialähteisiin.

Projektilla on suuri merkitys oman oppini osoittamiseen. Projektin aihe sopii hyvin opinnoissani valitsemaani suuntautumiseen eli uusiutuviin energialähteisiin. Uusiutuvia energianlähteitä tässä työssä käsitellään laajasti, mikä antaa minulle mahdollisuuden osoittaa oppimani tieto aiheeseen liittyen. Projektin kautta toimeksiantaja saa myös hyvää tietoa mahdolliseen uuteen investointiin ja siihen liittyviin ympäristövaikutuksiin.

Uusiutuvien energiantuotantolähteiden suosiminen on nykyaikana erittäin tärkeää. Suomen tavoitteessa nousta Euroopan ensimmäisinä hiilineutraaliksi, tulevat uusiutuvat energianlähteet olemaan suuressa roolissa. Venäjän hyökkäyssodan alettua Ukrainassa vuonna 2022 alkoi moni Euroopan valtio, Suomi mukaan lukien, edistämään omavaraisuuttaan sähköntuotannossa. Uusiutuvia energiantuotantotapoja suosien, Suomi pystyy irtautumaan muiden valtioiden sähköntuotannosta entistä tehokkaammin, vaikka pelkäänsä uusiutuvilla energianmuodoilla omavaraisuutta tuskin pystytään saavuttamaan.

7.2 Lupa-asioiden selvitys

Ennen sähköntuotanto menetelmän valintaa perehdyttiin niiden asennukseen liittyviin lupa-asioihin. Molemmat sähköntuotantomenetelmät vaativat verkkoyhtiön luvan ennen asennusta. Verkkoyhtiöön suositellaan ottamaan yhteyttä hyvissä ajoin ennen järjestelmän hankintaa. Tällä tavalla voidaan varmistaa, että järjestelmä sopii varmasti kohteelle, eikä sen vuoksi jälkikäteen synny mitään ongelmia.

Aurinkopaneelijärjestelmän lupa-asiat pääsääntöisesti ovat riippuvaisia siitä, mihin järjestelmä asennetaan. Erillinen lupa saatetaan tarvita, mikäli aurinkopaneelijärjestelmä tekee muutoksia kaupunkikuvaan tai sen ympäristöön. Suojeltuihin rakennuksiin aurinkopaneelijärjestelmä vaatii myös erillisen lupakäsittelyn, mutta asennus suojeltuun rakennukseen ei ole automaattisesti poissuljettu mahdollisuus. Suuremmat aurinkopaneelijärjestelmät vaativat erillistä rakennuslupaa. (Motiva 2022.)

Aurinkopaneelien kiinnitykset voi asentaa omatoimisesti, eikä se vaadi välttämättä ammattilaisen asennusta, vaikka se on suositeltavaa. Sähkötyöt aurinkopaneelijärjestelmälle (230 VAC) saa tehdä vain yritys, jolla on sähköasennusoikeudet. Asennuksen tehnyt urakoitsija on velvollinen tekemään myös käyttöönottotarkastukset järjestelmälle ennen käyttöönottoa. Alle 50 V vaihtojännitteen tai alle 120 VDC tasajännitteen verkkoon kytkemättömät sähkötyöt saa tehdä omatoimisesti, jos on perehtynyt asennukseen liittyviin turvallisuusvaatimuksiin. Kyseiset asennus- tai korjaustyöt eivät vaadi käyttöönottotarkastusta. Sähkömarkkinalain mukaan sähköverkonhaltijan on pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan liitettävä sähköverkkoonsa tekniset vaatimukset täyttävät sähkökäyttöpaikat ja voimalaitokset toiminta-alueellaan (FINLEX 588/2013 & ST-käsikirja 40 2021, 31–33.)

Pientuulivoimalan lupa-asiat ovat kunnasta riippuvaisia. Tuulivoimalan hankintaa ennen suositellaan ottamaan selvää kunnan rakennustarkastajalta, minkälainen kunnan rakennusjärjestys on. Yleisesti kaava-alueella vaaditaan rakennus- tai toimenpidelupa riippuen siitä, kuinka korkea voimalan masto on. Kaava-alueen ulkopuolella tyypillisesti vaaditaan vain toimenpidelupa. Rakennus- tai toimenpidelupahakemukseen vaaditaan karttaote tai asemapiirustus, josta saa selville rakennuspaikan. Hakemukseen on liitettävä myös voimalan julkisivupiirros. Lupamenettely aloitetaan ottamalla yhteys kunnan rakennustarkastajaan. Aurinkopaneelijärjestelmän tavoin pientuulivoimala vaatii myös luvan verkkoyhtiöltä. Tuulivoimalalaitos vaatii myös erillisen luvan puolustusvoimilta, varsinkin rajojen läheltä. Lupa vaaditaan, mikäli tuulivoimalan maston pituus ylittää 50 metriä. (Metso 2023.)

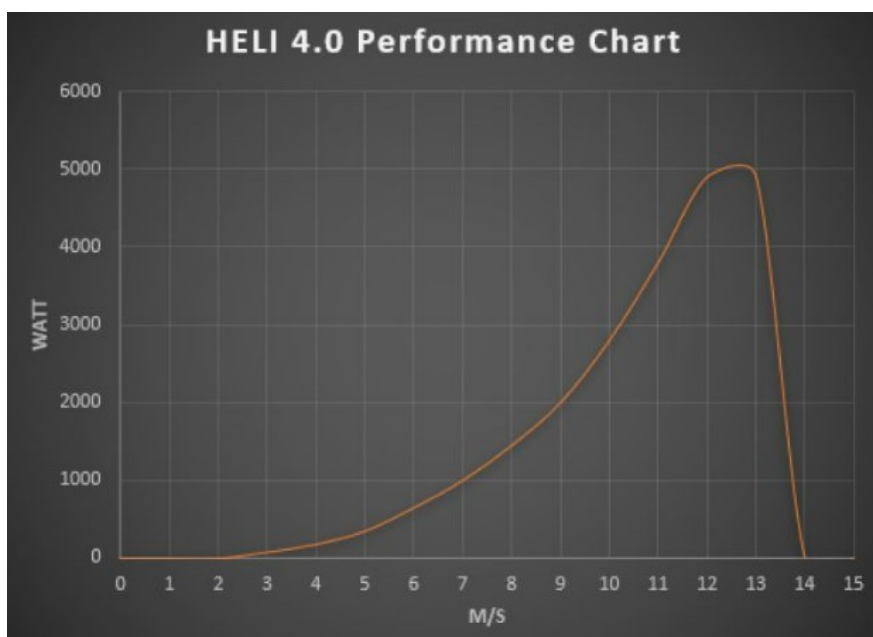
7.3 Sähköntuotantomenetelmän valinta

Sähköntuotantomenetelmä valitaan joko pienen tuulivoimalan tai aurinkopaneelijärjestelmän väliltä. Selvittäminen aloitettiin pohtimalla, onko kohteessa sopivat asennuspaikat molemmille vaihtoehdoille. Ympäristö sopii hyvin aurinkovoiman tuotantoon, mutta alueella on jonkin verran puustoa tuulen esteenä. Puusto ei näyttäisi vaikuttavan aurinkopaneelien toimintaan.

Seuraavana selvitettiin, onko vaihtoehtojen hinnoilla mitään merkittäviä eroja. Asennuskulut ovat samaa luokkaa molemmissa vaihtoehdoissa. Näiden hintaerojen perusteella sähköntuotanto aurinkovoimalla tulisi huomattavasti halvemmaksi. Isommissa teholuokissa, noin 20 kW teholuokassa aurinkopaneelijärjestelmä maksaisi ilman arvolisäveroa noin 16 000 € (Volttikauppa 2023). Vastaavan teholuokan tuulivoimala maksaisi noin 26 900 € (Saaristotekniikka 2023). Suuritehoisia tuulivoimaloita on haastava löytää kuluttajakäyttöön. Tämän vuoksi 20 kW tuulivoimala olisi rakennettava viidestä pienemmästä 4 kW tuuliturbiinista.

Tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotantoa vertailtiin käyttäen eri sovelluksia. Aurinkovoiman tuotantoon käytettiin PVGIS- sovellusta ja tuulivoiman arviointiin Ilmatieteenlaitoksen Tuuliatlas- sovellusta. PVGIS- sovelluksella voidaan laskea suoraan tuotantoarvio käyttäen kohteen sijaintia.

Tuuliatlas- sovelluksen avulla voidaan hakea kohteen paikkakunnan keskituulennopeuksia eri ajoilta. Valitettavasti tuulennopeuksien alhaisin mittauskorkeus on 50 m, kun taas 20 kW tuuliturbiinien mastojen korkeus olisi noin 10 m. Huolimatta siitä, luvun avulla voidaan saada karkeaa arviota tuuliturbiinin tehon tuotannosta käyttämällä kaavaa 7. Keskituulennopeudeksi saatiin noin 4,6 m/s. Tällä tuulen nopeudella tuulesta saatava maksimiteho olisi noin 2,25 kW. Merenrannan alueilla tuulen nopeus olisi joillain alueilla huomattavasti suurempi (7,5–9 m/s). Näillä tuulen nopeuksilla tuulen energia olisi jopa 11,1 kW, mikä olisi paljon kannattavampaa. Myös verkkokaupasta saadun kaavion mukaan (kuva 17) alle 5 m/s tuulen nopeuksilla tuotanto olisi erittäin vähäistä. Näiden tuloksien perusteella pystyttiin toteamaan, että aurinkopaneelijärjestelmä tulisi olemaan parempi vaihtoehto tälle kohteelle.



KUVA 17. 4 kW tuuliturbiinin tehontuotanto (Saaristotekniikka 2023)

Aurinkopaneelijärjestelmä valittiin sähköntuotantomenetelmäksi. Valintaan vaikuttivat suuresti aurinkovoiman halpa hinta ja toimintavarmuus. Aurinkopaneeleille löydettiin myös hyvä asennuspaikka, mikä vaikutti valintaan. Aurinkovoimalla saadaan parhaiten sähköntuotantoa kesäisin, milloin vesivoimalla on vähemmän tuotantoa.

7.4 Aurinkopaneelijärjestelmän mitoitus

Aurinkopaneelijärjestelmän tehtävä on tukea vesivoimalaitoksen sähköntuotantoa varsinkin kesäisin, kun veden määrä vähenee ja sähköntuotanto vesivoimalassa pienenee. Paneelijärjestelmä tuottaa sähköä myös talviaikaan, vaikka se on kesään verrattuna paljon vähäisempää. Mitoitus aloitettiin tutustumalla toimeksiantajalta saatuihin sähköntuotantolukemiin viime vuosien ajalta. Näiden lukemien perusteella saatiin selville, minä kuukausina sähköntuotantoa oli kaikista vähiten. Tuotantoerojen selvitykseen vuosien 2012–2021 tuotannot jaoteltiin neljän vuodenajan mukaan omiin luokkiin. Jokaisen vuoden tuotannot laskettiin eri vuodenaikojen mukaan, jonka jälkeen pystyttiin laskemaan

näiden vuosien tuotannon keskiarvot jokaiselle vuodenajalle. Jokaiselle kuukaudelle laskettiin myös keskituotantoarvot. Laskelmissa käytettiin Microsoftin Excel-sovellusta.

Työssä otettiin vertailuun useampi aurinkopaneelijärjestelmä, jotka olivat eri hintaisia ja eri teho-
luokkaa. Näistä jokaisesta tehtiin erilliset tuotanto- ja kuluarviot. Yleisesti suuremmat aurinkopanee-
lijärjestelmät maksavat itsensä nopeammin takaisin, mikäli ne saadaan asennettua sopivalle paikalle.
Isommat järjestelmät ovat taas huomattavasti kalliimpia, joka vaatisi isompaa investointia. Tämän
vertailun avulla toimeksiantaja saa tarkempaa tietoa ja valinnan varaa mahdolliseen investointiin.

Asennuspaikka aurinkopaneeleille oli valittu jo etukäteen. Vesivoimalaitoksen tontilla sijaitsee keski-
kokoinen rakennus, minkä katolle saataisiin ainakin pienikokoisin järjestelmä vertailusta asennettua.
Isommat järjestelmät tulisi asentaa maa-asennuksena tontin alueelle mahdollisimman valoisaan
paikkaan. Maa-asennustelineet nostavat investoinnin hintaa jonkin verran, mutta niiden hyötynä on
se, että paneelit voidaan suunnata asennuksessa optimaalisimpaan suuntaan. Rakennus on hyvällä
sijainnilla, eikä sen ympäristössä ole mitään auringonvaloa peittäviä puita tai rakenteita. Aurinkopa-
neelijärjestelmää valittaessa on varmistettava, että rakennuksen katolla on tarpeeksi tilaa järjestel-
mälle. Selvitys tehdään myös, kummalla puolella rakennusta paneelijärjestelmä tuottaa eniten ener-
giaa tai onko rakennuksen katon molemmat puolet sopivia aurinkosähkön tuotannossa. Asennus-
paikka on nähtävissä kuvassa 18.

Asennuspaikassa on otettava myös huomioon mahdollinen lumi- ja tuulikuorma aurinkopaneeleille.
"Tuulikuormaa laskettaessa sovelletaan standardia SFS1991-1-3/4. Tuulikuormaa laskettaessa tulee
huomioida muun muassa asennuskohteen maastoluokka, korkeus, katon kallistus ja katon rakentei-
den kestävyys. Kiinnitysjärjestelmille on usein suunnitteluohje, jota tulee noudattaa" (ST-käsikirja 40
2023, 149). Vertailussa käytettävät aurinkopaneelit kestävät jopa 550 kg kuormaa neliometriä kohti,
mikä on riittävä lumi- ja tuulikuormien kestävyys Suomen olosuhteissa.



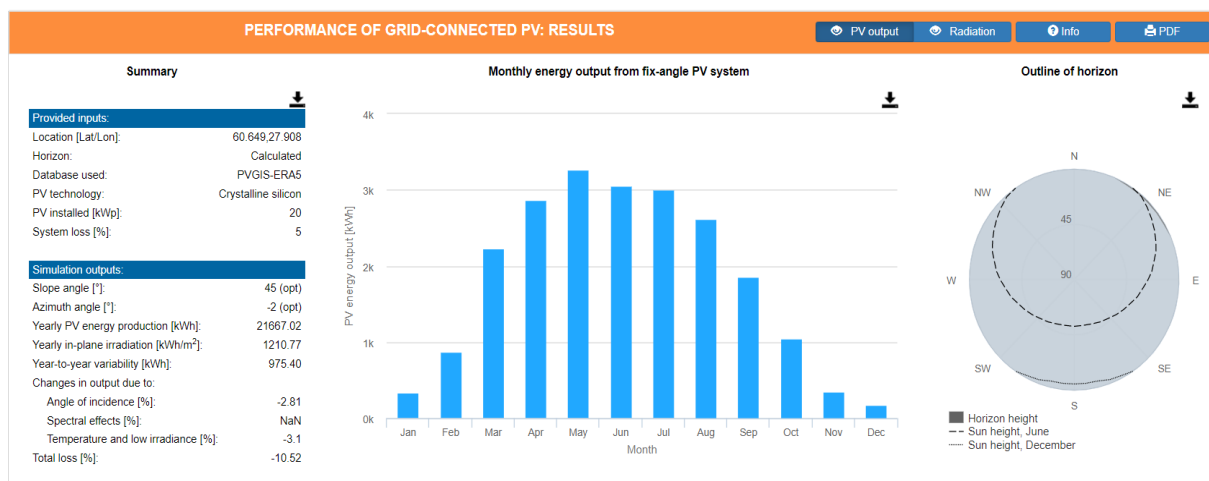
KUVA 18. Aurinkopaneelien asennuspaikka (Taina 2023)

Aurinkopaneelijärjestelmän arvioituun sähköntuottoon käytettiin työkaluna PVGIS- sovellusta. PVGIS on lyhenne sanoista photovoltaic geographical information system, mikä on suomeksi aurinkosähkö paikkatietojärjestelmä. Sovellus käyttää aurinkosähkön määrän arvioimiseksi satelliittidatan historia-tietoja. Sovellukseen lisätään asennuspaikan osoite tai koordinaatit, jonka jälkeen sovellus paikantaa kohteen. Seuraavaksi valitaan oikea järjestelmä (on/off grid, tracking pv). Sovellus tarvitsee tietoja paneelijärjestelmästä kuten sen tehon, hukatehon määrän prosenteissa, paneelitekniikan ja asennuspaikan. Paneelien asennuskulman ja suuntauksen voi myös lisätä tietoihin, mutta sovellus voi laskea myös optimaalisen kulman ja suuntauksen parhaalle sähköntuotannolle. Kohteen rakennuksen katolle asennettavassa järjestelmässä ei pysty vaikuttamaan, kuin asennuskulmasta, mutta maahan asennettavat isommat järjestelmät pystytään suuntaamaan optimaaliseen suuntaan. Sovellus pystyy myös laskemaan tuotetun aurinkosähkön hinnan tietojen perusteella, mutta tässä työssä laskin hinnat ja tuotannot itse. Tuloksissa pystyy näkemään paneelijärjestelmän arvioidun vuotuisen sähköntuotannon, joka on jaoteltu myös jokaiselle kuukaudelle. Arvio on suuntaa antava tieto, koska aurinkosähkön tuotanto on hyvin säästä riippuvainen, eikä sitä pysty ennakoimaan täydellisesti. Sovelluksen toimintaa ja ulkoasua on esitelty kuvissa 19 ja 20.

The screenshot shows the PVGIS web application interface. At the top, there is the European Commission logo and the title 'PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM'. Below this is a navigation bar with 'Home', 'Tools', 'Downloads', 'Documentation', and 'Contact us'. The main area is divided into a map on the left and a configuration panel on the right. The map shows Europe with a cursor over Italy. The configuration panel is titled 'PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV' and includes options for 'TRACKING PV' (OFF-GRID), 'MONTHLY DATA', 'DAILY DATA', and 'HOURLY DATA'. It also has a section for 'Fixed mounting options' with 'Mounting position' set to 'Free-standing'. The 'PV electricity price' section includes fields for 'PV system cost', 'Interest', and 'Lifetime'. At the bottom, there are buttons for 'Visualize results', 'csv', and 'json'.

KUVA 19. PVGIS-sovellus (European Commission 2022)

Sovelluksen tulokset voi ladata myös eri tiedostoina (csv, json). Tulokset voivat olla joko kuukausi-, päivä- tai tuntitarkkuudella. Tuloksia voi käsitellä tämän jälkeen esimerkiksi Excel-sovelluksen avulla.



KUVA 20. PVGIS- sovelluksen tulokset (European Commission 2022)

Sovelluksen avulla voi myös laskea päivittäisen arvon auringon säteilyenergialle. Sovelluksesta valitaan haluttu kuukausi, jolta tulokset halutaan. Tulokset voi halutessaan ladata esimerkiksi Excel-tiedostoksi, jossa dataa voi käsitellä tarkemmin.

7.5 Hankkeen kustannuksien arviointi

Aurinkopaneelijärjestelmän mitoituksen jälkeen pystyttiin laskemaan arvio kaikista kustannuksista, mitä hankkeeseen sisältyy. Aurinkopaneelijärjestelmän koko vaikuttaa kaikista eniten kustannusten määrään. Yleisesti ottaen mitä suurempi järjestelmä on, sitä halvemmaksi sen tuottama sähkö tulee. Tässä hankkeessa tulee ensimmäisenä asennuspaikan kokorajoitteet vastaan, mikä estää suurempien aurinkopaneelijärjestelmien asennuksen. Keskikokoisten aurinkopaneelijärjestelmien hintaluokkaa selvitettiin mm. eri verkkokaupoista, mutta myös aurinkosähkö urakoitsijoilta selvitettiin pakettien hintoja. Noin 10 kWp aurinkopaneelijärjestelmien pakettihinnat vaihtelivat verkkokaupoissa 8000–13000 € (alv24 %) välillä. Paneelijärjestelmää valittaessa on tärkeää ottaa laitteiston laatu huomioon, jotta järjestelmän elinikä olisi mahdollisimman pitkä. Tämä on tärkeää, sillä hankkeen kannattavuuden arvioinnissa otetaan huomioon järjestelmän käyttöikä. Muita mahdollisia kuluja hankkeella ovat suunnittelu- ja asennuskulut. Suunnittelusta ei tule tälle hankkeelle mitään ylimääräisiä kuluja, joten sitä ei tarvitse huomioida laskuissa. Asennuskulut vaihtelevat asennuspalveluiden mukaan, mutta suurin vaikuttaja asennuskuluihin on järjestelmän koko ja asennuspaikka. Asennushintoja selvitettiin ottamalla yhteyttä eri asennuspalveluihin. Maahan asentaessa kuluihin tulee huomioida myös asennuskehikot, mitkä paneelit tarvitsevat. Vaikka aurinkopaneelijärjestelmät ovat lähes huoltovapaita, tulee järjestelmän invertteri vaihtaa uuteen noin 15 vuoden käytön jälkeen. Tässä hankkeessa järjestelmän hankinta ja asennus maksetaan suoraan omalla pääomalla, joten kuluihin ei tulla ottamaan huomioon mitään lainojen korkoja. Sähköntuotanto menee suoraan sähkönjakeluverkkoon, eli järjestelmään ei kannata lisätä akkuja.

7.6 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajan selvitys investoinnille oli projektin yksi tärkein aihe, mutta sen avulla pelkästään ei voida arvioida hankkeen kannattavuutta. Tämä johtuu siitä, ettei takaisinmaksuaika laskelmassa oteta huomioon aurinkopaneelijärjestelmän koko elinikä. Takaisinmaksuaika kertoo, miten nopeasti aurinkopaneelijärjestelmä maksaisi sähköntuotannolla itsenä takaisin ja alkaisi tuottamaan voittoa investoijalle. Näin voidaan osittain selvittää, onko investointi kannattavaa. Takaisinmaksuajan laskemiseen selvitettiin investoinnin kaikki kulut, joihin kuuluivat aurinkopaneelijärjestelmän hinta, asennus ja muut mahdolliset kulut. Myös investoinnin maksutapa on oleellinen osa laskelmaa. Tämä tarkoittaa sitä, että maksetaanko investointi suoraan pääomalla, vai onko maksussa osana lainoja. Tässä tapauksessa koko hanke maksettaisiin omalla pääomalla, eli lainojen korkoja ja kuluja ei tarvitse ottaa huomioon laskelmissa.

PVGIS- sovelluksen avulla saatiin laskettua arvio aurinkopaneelijärjestelmien vuosituotannosta (liite 1). Aurinkosähkön ollen hyvin sääriippuvainen ja sen vuoksi tulos on pelkkä arvio, eikä se pysty kertomaan tarkalleen, kuinka paljon järjestelmä tulee tuottamaan. Tulokset ovat silti hyvin suuntaa antavia ja niitä käytettiin takaisinmaksu laskelmissa.

Kolmelle eri teholuokan järjestelmälle tehtiin omat tuotantoarviot, johon otettiin huomioon paneelien sähköntuotantotehon menetykset. Valittujen aurinkopaneelien tehontuotantotakuu (n.85 %) on 25 vuotta. Tätä aikaa käytettiin aurinkopaneelien elinikänä ja paneelijärjestelmien tuottaman sähköän arvio laskettiin koko järjestelmän eliniän ajalta. Tuotantolaskelmien perusteella laskettiin järjestelmille takaisinmaksuajat. Laskelmista tehtiin erilliset raportit, mitä toimeksiantaja pystyy vertailemaan valintaa tehdessään. Laskelmissa tehtiin myös taulukon rahavirroista jokaiselle järjestelmälle. Tämän avulla toimeksiantaja näkee vuosikohtaisesti investoinnin rahavirran ja myös, kuinka paljon investointi tekisi voittoa 25 vuoden jälkeen.

7.7 Hankkeen kannattavuus

Aurinkopaneelijärjestelmien takaisinmaksuajojen selvittyä seuraava vaihe oli määrittää jokaisen eri aurinkopaneelijärjestelmän kannattavuus. Kannattavuuden selvityksessä käytettiin investoinnin takaisinmaksuajan lisäksi paneelijärjestelmän koko eliniän arvioitua sähköntuotantoa. Aurinkopaneelit pystyvät tuottamaan tehokkaasti sähköä jopa 25 vuotta, joissain tapauksissa jopa pidempäänkin. Tuotantoa laskiessa on hyvä huomioida paneelien tehonmenetykset. Aurinkosähkö on tämän hankkeen tehotasolla yleisesti kannattavinta, kun tuotettu sähkö tulee käytetyksi tuotantopaikalla. Tämän projektin tilanteessa sähkö menee suoraan jakeluverkostoon, lukuun ottamatta sähkölaitoksen omaa sähkönkäyttöä. Kannattavuuden laskemiseen käytettiin tämänhetkistä sähköän hintaa ja myös Väreen raportista saamaa futuuri osoittamaa sähköän hinnalle loppuvuodeksi. Tämän avulla sain paremmin tutkittua, millä sähköän hinnalla aurinkosähköän tuotanto olisi kannattavinta. Molempien sähköän hintojen perusteella järjestelmille tehtiin rahavirrat kaaviona, mitkä kuvainnollistavat investointien rahavirtaa paremmin.

8 TULOKSET

8.1 Sähköntuotantomenetelmän valinta

Toiseksi sähköntuotantomenetelmäksi valittiin aurinkopaneelijärjestelmä. Valinta ei ollut vaikea, sillä projektin kohde ei sopisi tuulisähkön tuotantoon yhtä hyvin kuin aurinkosähkön. Huolimatta siitä, että kohde sijaitsee pellon läheisyydessä, ei alueella ole tarpeeksi avonaisuutta kannattavaan tuulisähkön tuotantoon. Tuuliatlas sovelluksen avulla saatiin myös selville, ettei alueella tuulta ole tarpeeksi edes 50 metrissä. Sovelluksen mukaan keskimääräinen tuulen nopeus kohteen alueella on noin 5.6 m/s 50 metrin korkeudessa. Etelä-Suomen rannikkoalueilla tuulivoima olisi ollut kannattavampi vaihtoehto, missä tuulen nopeudet vaihtelevat 7–9 m/s välillä keskiarvolta. Tähän on otettava huomioon myös, että suurimmat pientuulivoimalat ovat korkeudeltaan noin 20 metrin luokkaa, mikä vähentäisi tuulen määrää jo valmiiksi huonosta lukemasta. Tuulivoimajärjestelmä tulisi myös huomattavasti kalliimmaksi aurinkopaneelijärjestelmään verrattuna. 20 kW teholuokassa tuulivoimala maksaa noin 10 900 € enemmän. Tuulivoiman ainoat edut olivat sen kyky tuottaa paremmin sähköä syksyisin, joka on yksi vähätuottoisimmista vuodenajoista laskelmien mukaan ja parempi sähköntuotanto päivän pimeimmillä tunteilla.

Kolme eri teholuokan aurinkopaneelijärjestelmää valittiin vertailuun kannattavuuden ja tuotannon tasaamisen vertailussa. Teholuokiksi valittiin 5,7 kWp, 9,8 kWp ja 19,7 kWp. Vertailun avulla selvitetään, onko kalliimmat ja tehokkaammat järjestelmät kannattavampia investoinnin kohteita.

8.2 Järjestelmien laiteluettelo

Vertailussa käytettyjen järjestelmien laitteet ja tarvikkeet etsittiin eri myyjien verkkokaupoista. Valintoja tehtiin hinnan sekä luotettavuuden perusteella. Kaikki kolme vertailussa käytettyä järjestelmää löydettiin samalta myyjältä. Volttikauppa on suomalainen myyjä, joka myy aurinkopaneelijärjestelmiä oman etsinnän perusteella kaikista kilpailukykyisimpään hintaan. Tuotteilla on myös pitkät taquit ja tuotteet vaikuttivat laadukkailta. Aurinkopaneeleilla on 25 vuoden 84,2 % tehotakuu ja 12 vuoden perustakuu. Järjestelmien yhteenlasketut kustannukset löytyvät liitteestä 3.

8.2.1 5,7 kWp järjestelmä

Vertailun kaikista pienitehoisin järjestelmä asennettaisiin ennalta valittuun asennuspaikkaan rakennuksen katolle. Volttikaupan verkkokaupasta löytyy 5,7 kWp valmispaketti, mikä sisältää kaiken tarvittavan, lukuun ottamatta invertterin asennuslevy ja johtosarjaa. Paketin kokonaishinta on 5090 € (alv24 %). Asennustarvikkeiden hinnaksi tulee 186 € (alv24 %).

Järjestelmän laitteet:

- 14 kpl Astronergy 410 W aurinkopaneelit
- Aurinkovoimalan johtosarja 15 m
- Growatt 6 kW 3- vaiheinen verkkoinvertteri
- Invertterin taustalevy

- Turvakytkin 32 A/415 VAC
- Aurinkosähkön varoitusmerkintätarrat
- MC4 liittimet
- Voltti teräskiskot
- Hyppykaapelit

8.2.2 9,8 kWp järjestelmä

Tämän järjestelmän koon vuoksi paneelit tulisi asentaa maa-asennuksena. Järjestelmä löytyi Voltti-kaupasta valmiina pakettina, lukuun ottamatta kaapeleita ja maa-asennustelinettä. Järjestelmän pakettihinta on 7890 € (alv24 %). Asennustarvikkeiden hinta on 3606 € (alv24 %).

Järjestelmän laitteet:

- 24 kpl Astronergy 410 W aurinkopaneelit
- Aurinkovoimalan johtosarja 20 m
- Growatt 10 kW 3-vaiheinen verkkoinvertteri
- Invertterin taustalevy
- Turvakytkin 32 A/415 VAC
- Aurinkosähkön varoitusmerkintätarrat
- MC4 liittimet
- Orima Solar Beeta Double + Easy Rail maa-asennusteline
- Hyppykaapelit
- 7 kpl Japp20 alumiiniputki 3 m

8.2.3 19,7 kWp järjestelmä

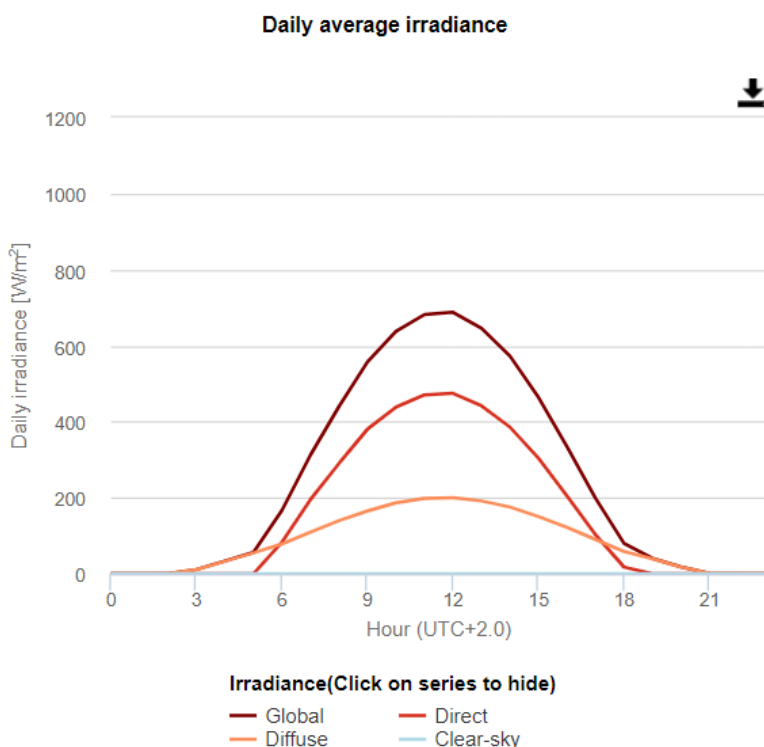
Tälle järjestelmälle ei Volttikaupan verkkokaupasta löytynyt valmista pakettia, joten järjestelmä kasattiin verkkokaupasta löytyvistä komponenteista. Järjestelmän laitteiden ja asennustarvikkeiden kokonaishinnaksi saatiin 17 836,4 € (alv24 %).

Järjestelmän laitteet:

- 48 kpl Astronergy 410 W aurinkopaneelit
- Johtosarja 30 m
- Solis 20 kW 3-vaiheinen verkkoinvertteri
- Turvakytkin 32 A/415 VAC
- Aurinkosähkön varoitusmerkintätarrat
- MC4 liittimet
- 2 kpl Orima Solar Beeta Double + Easy Rail maa-asennusteline
- 10 kpl Japp20 alumiiniputki 3m

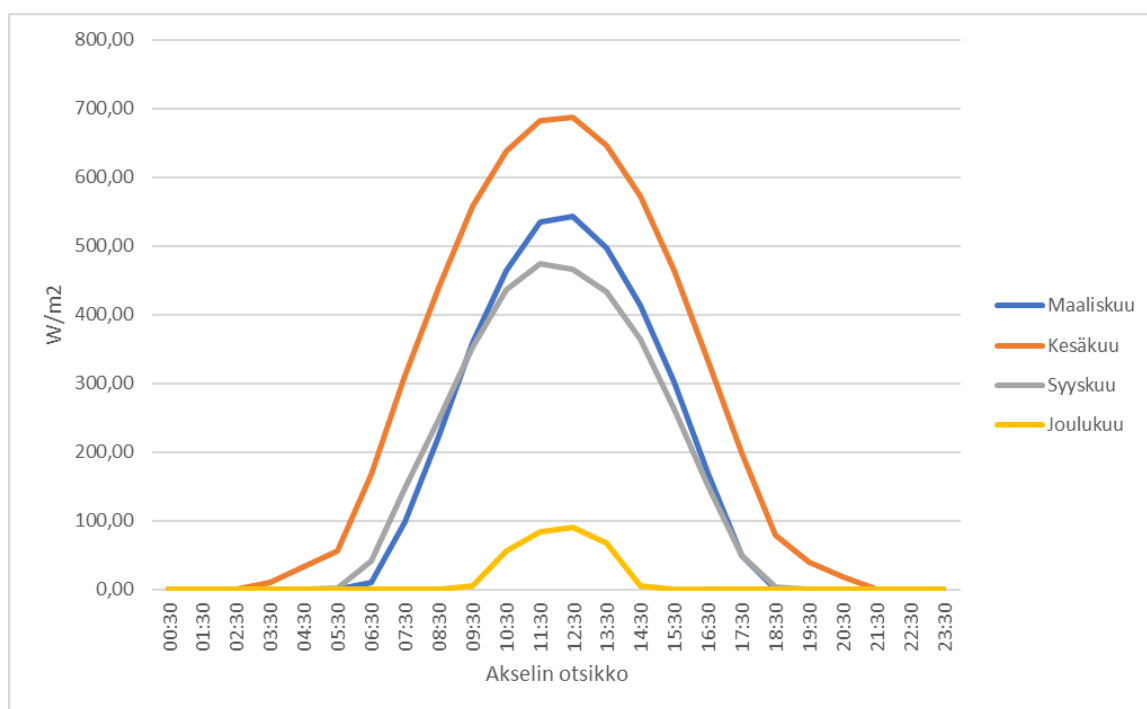
8.3 Aurinkopaneelijärjestelmien vertailu

Laskelmien perusteella huomattiin selvää eroa sähköntuotannossa eri vuodenaikojen välillä. Suurin sähköntuotanto on talvisin, kun taas kesäisin ja syksyisin sähköntuotanto on alhaisempaa (liite 7). Vesivoiman tuotantoa tutkittiin kuukausikohtaisesti viimeisen 10 vuoden ajalta ja sen perusteella selvisi, että tuotantomäärät vaihtelevat vuosikohtaisesti. Kesä- ja talvituotantojen ero on laskelmien perusteella keskiarvoltaan noin 7000 kWh. PVGIS- sovelluksen arvion mukaan parhaiten tämän tuotantoeron tasaisi 19,7 kWp aurinkopaneelijärjestelmä. Arvion mukaan järjestelmä tuottaisi kesän aikana noin 6200 kWh enemmän sähköä, kuin talvisin. Työssä selvitettiin myös neljän eri kuukauden päivittäisen aurinkosäteilyn määrän. Kuukausiksi valittiin maaliskuun, kesäkuun, syyskuun ja joulukuun. Heinäkuun tulokset on esitelty kuvassa 21. Kaavion arvot ovat jaoteltu kolmeen eri osioon: Yhteissäteily, suora säteily ja hajasäteilyyn. Kaavion perusteella selviää paremmin, miten sähköntuotanto jakautuu päivän tunneille eri vuodenaikoina.



KUVA 21. Kesäkuun päivittäisen aurinkosäteilyn määrä (European Commission 2022)

Sovelluksesta saadut tulokset käsiteltiin csv- tiedostoina Excel- sovelluksessa (liite 2). Kuukausien päivittäisen säteilymäärän lukemista tehtiin tuntikohtainen kaavio (kuva 22), minkä avulla voidaan helposti havainnollistamaan eri vuodenaikojen vaikutusta aurinkosäteilyn määrään. Kaavion avulla selviää myös, minä päivän aikana aurinkopaneelijärjestelmä pystyy tuottamaan sähköä. Tuloksissa näkyy ainoastaan kokonaissäteilyn määrät.



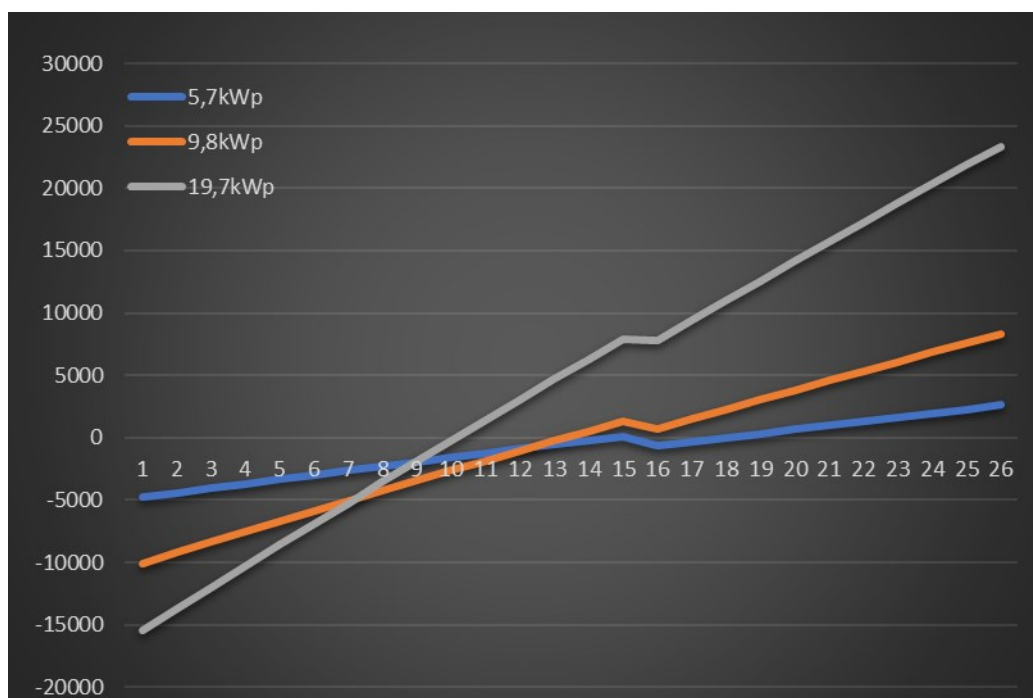
KUVA 22. Päivittäisen aurinkosäteilyn määrät

Aurinkopaneelijärjestelmistä tehtiin vertailu eri kokoluokissa. Järjestelmän asennuspaikan vuoksi kohteeseen ei pysty rakentamaan mitään suurikokoista järjestelmää. Vertailussa käytettiin 5,7kWp, 9,8 kWp ja 19,7 kWp aurinkopaneelijärjestelmiä. Aurinkopaneelityypiksi valittiin yksikiteisen teknologian, jolla rajallinen asennustila voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Asennuspaikan rakennuksen katon pinta-alaa on vain noin 35 m². Pienen asennustilan vuoksi siihen mahtuisi ainoastaan 5,7 kWp järjestelmä. 9,8 kWp ja 19,7 kWp järjestelmät tulisi asentaa maa-asennuksena. Maa-asennuksen vuoksi 9,8 kWp ja 19,7 kWp järjestelmät pystyvät tuottamaan huomattavasti tehokkaammin sähköä 5,7 kWp järjestelmään verrattuna. Tämä johtuu siitä, että maa-asennuksen kautta paneelit voidaan suunnata parhaaseen mahdolliseen suuntaan. PVGIS sovelluksen antaman tiedon mukaan optimaalisin suunta (azimuth) olisi -2° ja asennuskulma (slope) 45°.

8.4 Kannattavuus

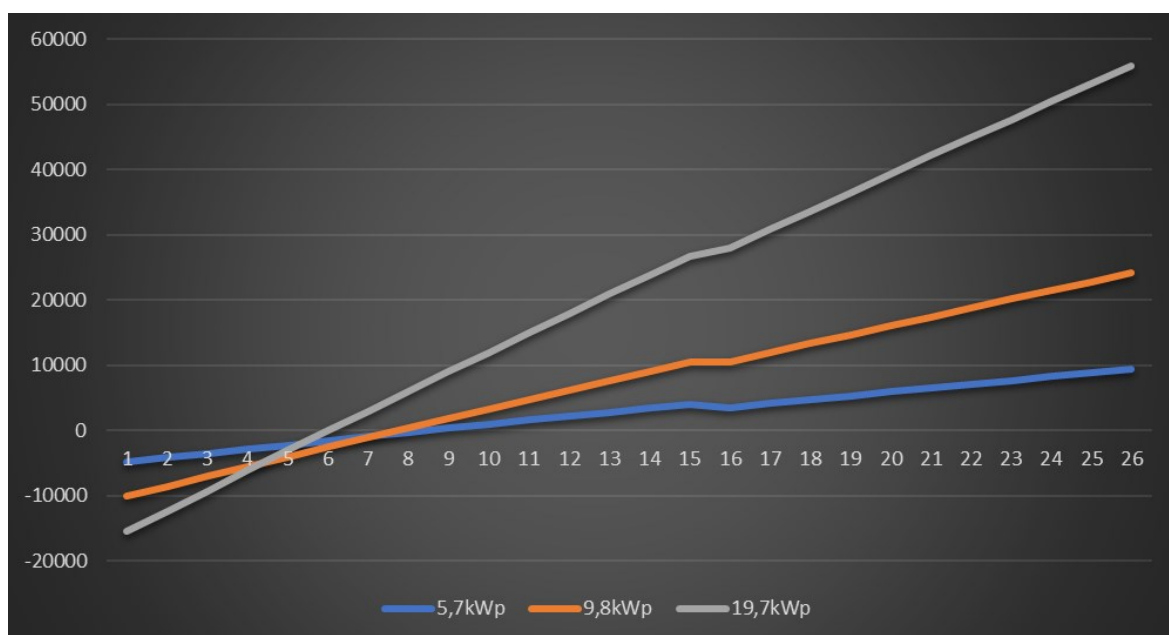
Hankkeen kannattavuutta tutkittiin kolmen eri aurinkopaneelijärjestelmän kohdalta. Kokoluokat olivat 5,7 kWp, 9,8 kWp ja 19,7 kWp. Tämänhetkisen sähköhinnan mukaan laskelmien perusteella kaikista kannattavin järjestelmä olisi 19,7 kWp järjestelmä, jonka takaisinmaksuajaksi saatiin 10,59 vuotta. Järjestelmä tekisi tällä sähköhinnalla (8,31 snt) voittoa 25 vuoden jälkeen noin 23 350 €, mikä tekisi sijoituksesta kannattavan. Takaisinmaksuaika ja investoinnin kannattavuus laskee, mitä pienemmäksi järjestelmä menee (liite 5). 9,8kWp järjestelmän takaisinmaksuajaksi saatiin 14,49 vuotta ja järjestelmä tekisi voittoa noin 8300 € elinikänsä aikana. Vähiten kannattavin järjestelmä on pienin 5,7 kWp järjestelmä. Takaisinmaksu sillä olisi jopa 17,36 vuotta, eikä se tekisi voittoa, kuin 2350 €. Järjestelmien hinnat nousevat tehon mukaan ja myös suurempien järjestelmien asennus maksaa enemmän. Tarkemmat rahavirrat näkyvät kuvassa 23. Kaavion perusteella voidaan todeta, että vaikka 19,7 kWp kulut ovat kolminkertaiset pienimpään 5,7 kWp järjestelmään verrattuna,

maksaa suurempi järjestelmä itsenä takaisin paljon nopeammin ja on investointina kannattavampi. Kuten kaaviosta saa selville, rahavirta on lähes koko paneelijärjestelmän eliniän ajan suhteellisen tasaista. Tästä ainut poikkeama ainut pakollinen huoltotoimenpide 15 käyttövuoden jälkeen, jolloin järjestelmän invertteri tulee vaihtaa uuteen.



KUVA 23. Investointien rahavirrat vuoden 2023 sähkön hinnalla

Kannattavuutta laskettiin myös käyttäen sähkön hinnan ennustetta. Väreen ennustuksen mukaan sähkön hinta tulisi nousemaan vuoden 2023 loppupuolella 15 snt/kWh (Väre 2022). Rahavirrat sekä takaisinmaksuajat laskettiin käyttäen tätä hintaa. 5,7 kWp takaisinmaksuajaksi saatiin 9,62 vuotta, 9,8 kWp 8 vuotta ja 19,7 kWp 5,87 vuotta. Investointina parhaiten tuottoa teki suurin 19,7 kWp järjestelmä, joka maksaisi itsenä takaisin noin kolminkertaisesti 25 vuoden jälkeen, eli voittoa investoinnilla olisi siinä ajassa kertynyt jopa 56 000 €. Kuvassa 24 on esitelty rahavirrat sähkön hinnan ennustetta käyttäen.

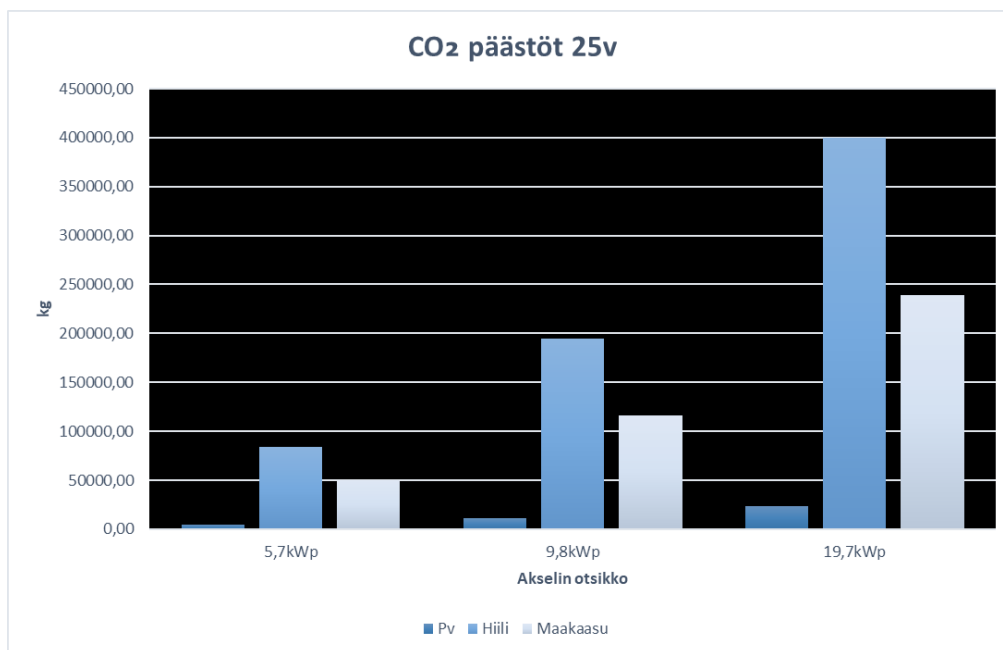


KUVA 24. Rahavirrat sähkön hinnan ennusteella

8.5 Hiilijalanjälki

Kolmelle vertailussa käytetylle aurinkopaneelijärjestelmälle laskettiin hiilijalanjäljet ja tuloksia vertailtiin fossiilisiin sähköntuotantomenetelmiin, jotka olivat hiili ja maakaasu (kuva 25). Laskelmissa käytettiin IPCC:n raportin (2014, 1335) mediaanilukemia päästöjen määrittämiseen. Laskuissa selvitettiin myös, kuinka kauan aurinkopaneelilla kestää kompensoidakseen niiden valmistuksessa syntyneet hiilidioksidipäästöt.

5,7 kWp aurinkopaneelijärjestelmä asennettaisiin rakennuksen katolle, joten sen hiilijalanjälki on isompia järjestelmiä pienempi. Valmistuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen kautta 5,7 kWp järjestelmän hiilijalanjälki on mediaani arvoltaan 41 gCO₂/kWh. Laskelmien perusteella (liite 4) 25 vuoden sähköntuotannon jälkeen tämä järjestelmä säästäisi hiilidioksidipäästöissä noin 79 760 kg kivihiileen verrattuna ja noin 46 000 kg maakaasuun verrattuna. Valmistuksessa syntyneet päästöt järjestelmä kompensoisi 1,15 vuoden jälkeen hiileen verrattuna ja 1,93 vuoden jälkeen maakaasuun verrattuna. 9,8 kWp ja 19,7 kWp järjestelmät asennettaisiin maa-asennuksina erilliselle asennustelineelle, mikä nostaa järjestelmien hiilijalanjälkeä hieman. IPCC:n raportin (2014, 1335) mukaan hiilijalanjälki on mediaani arvoltaan 48 gCO₂/kWh. 9,8 kWp järjestelmä säästäisi hiilidioksidipäästöissä 25 vuoden aikana noin 183 300 kg kivihiileen verrattuna ja 105 000 kg maakaasuun verrattuna. 19,7 kWp järjestelmä säästäisi päästöissä 376 400 kg kivihiileen verrattuna ja maakaasuun verrattuna 215 500 kg. Molemmat 9,8- ja 19,7 kWp järjestelmät kompensoisivat valmistusprosessissa syntyneet päästöt 1,35 vuodessa kivihiileen verrattuna ja 2,26 vuodessa maakaasuun verrattuna.



KUVA 25. CO₂ päästöt 25 vuoden aikana

8.6 Yhteenveto

Paras mahdollinen aurinkopaneelijärjestelmä tuotannon tasaamiseen on vertailun suurin 19,7 kWp järjestelmä. Sen lisäksi tällä järjestelmällä on myös paras takaisinmaksuaika ja se on myös investoinnin kannalta kaikista kannattavin. Mitä pienemmäksi tästä menee tehon suhteen, sitä vähemmän investoinnissa hyötyy niin kannattavuuden kuin tuotannon tasaamisen suhteen. Aurinkopaneelitekniikan hinnan laskun tasainen eteneminen tekee aurinkosähköstä kannattavan investoinnin. Investoinnin kannattavuus kasvaa, mitä isomman aurinkopaneelijärjestelmän hankkii. Sähkön hinta on laskenut reilusti vuoden 2022 korkeista hinnoista, mutta ennusteiden mukaan sen lasku ei tule olemaan pysyvää, vaan hinnassa tullaan näkemään pientä nousua. Tämä järjestelmä tasaa myös tuotantoeroja kaikista tehokkaimmin (liite 6).

Vertailussa käytettyjen järjestelmien valmistuksessa syntyneet hiilidioksidipäästöt kompensoituvat suhteellisen nopeasti, jos niitä verrataan sähkөөn, joka on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla. Mitä enemmän sähköä tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä, sitä isompi säästö tulee hiilidioksidipäästöissä.

9 POHDINTA

Projektin aikana tutustuttiin tarkemmin vesi-, tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoon. Kaikki tuotantomenetelmät näistä katsotaan uusiutuviksi energiamuodoiksi, mutta jokaisessa vaihtoehdossa on omat hyödyt ja haitat. Huolimatta siitä, että nämä luokitellaan ympäristöystävällisiksi vaihtoehdoiksi, on näillä jokaisella vaihtoehdolla omat haittavaikutuksensa lähiympäristöön ja myös ilmastoon. Energiovallankumouksen myötä myös Suomi alkaa siirtymään eturintamassa kohti uusiutuvia ja ympäristöystävällisempiä energiantuotantomuotoja, jotta valtiomme pystyisi saavuttamaan ympäristötavoitteen määräraikaan vuoteen 2035 mennessä. Nämä kolme mainittua energiantuotantomenetelmää tulevat olemaan vahvasti mukana tässä muutoksessa. Aurinkovoiman avulla pystytään suhteellisen edullisesti tuottamaan sähköä tuottamatta suuria päästöjä ilmastoon. IPCC:n raportissa (2014, 1335) on annettu aurinkovoimalle luku siitä syntyvästä päästöistä, joka oli keskiarvoltaan 41 gCO₂/kWh. Aurinkopaneelit eivät tuota suoraan sähköntuotannossa päästöjä, vaan luku on otettu paneelien valmistuksessa ja kuljetuksessa syntyvistä päästöistä. Tämä luku on siis laskettu paneelin eliniän tuotannon perusteella ja se on jaettu valmistuksessa syntyvien päästöjen kanssa. Mietin työtä tehdessä, voiko lukua käyttää tarkkoihin laskuihin. Aurinkovoiman tuotanto riippuu paljon säästä ja siitä, missä päin maapalloa sitä tuotetaan. Suomen korkeudella aurinkopaneelit eivät tuota elinaikanaan läheskään niin paljon sähköä kuin esimerkiksi päiväntasaajan alueilla. Tässä työssä käsiteltiin myös aurinkopaneelien kierrätystä ja mitä prosesseja se vaatii. Kierrätysprosessit vaativat energiaa ja lämpöä, mikä ei välttämättä pystytä tuottamaan ilmastoystävällisesti. On aiheellista pohdita, onko IPCC:n antamassa hiilijalanjäljessä otettu tällaisia asioita huomioon.

Aurinkosähkön hinta maailmanlaajuisesti on ollut vakituudessa laskussa sen yleistyessä, eikä sille näytä näkyvän loppua lähitulevaisuudessa. Teknologian kehittyessä markkinoille tulee uusia energiantuotantotuotteita, jotka ovat entistä teknologiaa tehokkaampia ja monikäyttöisempiä. Aurinkosähkön tuotanto on kannattavinta silloin, kun tuotettu sähkö käytetään tuotantopaikalla. Jakeluverkkoon tuotettuna aurinkosähkö ei ole yhtä kannattavaa varsinkaan pienissä tuotantomäärissä. Jakeluverkkoon tuotettaessa tuotannon kannattavuus kasvaa järjestelmän tehon noustessa. Sähkön hinnan nousu vuoden 2022 aikana sai monet harkitsemaan oman sähkön tuotantoa. Hinnan nousuun vaikuttivat esimerkiksi Venäjän hyökkäys Ukrainaan, mikä aloitti myös Suomen irtautumisen Venäjän tuottamasta energiasta. Noin 10 % Suomen sähköstä ostettiin Venäjältä ennen sen hyökkäystä Ukrainaan, joka on noin 9,1 TWh. Kantaverkkoyhtiön Fingridin antaman raportin (2022, 1) mukaan Suomesta voisi tulla omavarainen energiantuotannossa jo vuoden 2023 aikana, viimeistään vuonna 2024. Suomeen on rakenteilla paljon uutta tuulivoimaa. Vuosien 2023–2025 välillä Suomeen rakennetaan yhteensä tuulivoimaa 3200MW edestä. (Suomen tuulivoimayhdistys 2023). Hiilineutraaliuuden siirtyminen vuoteen 2035 mennessä tulee vaatimaan vielä isompia muutoksia Suomen sähköntuotannossa. Tällaiset muutokset eivät ole halpoja, joten voi olettaa, ettei se vaikuta sähkön hintaan myönteisesti. Ydinvoimala Olkiluoto 3:n valmistuminen ja koekäytön alkaminen vuoden 2022 lopussa vaikuttaa positiivisesti sähkön hintaan. Olkiluoto 3:n arvioidaan aloittavan säännöllinen sähköntuotanto 17.4.2023, mikä arvion mukaan laskisi verollista sähkön hintaa 5 snt/kWh (Väre 2023). Vesivoimalan tuotantoerot erottuivat selvästi tuotantolukemista, vaikka erot olivat oletettua pienemmät. Projektin alussa olin skeptinen siitä, että riittääkö aurinkovoimasta tarpeeksi tehoa

tasoittamaan tätä tuotantoeroa. Arvioiden ja laskelmien jälkeen tulin siihen johtopäätökseen, että 19,7 kWp aurinkopaneelijärjestelmällä tämä tuotantoero saataisiin ainakin kesän ja kevään kohdalta tasattua. Valitettavasti syksyn tuotantolukemiin aurinkovoimalla ei pysty tehokkaasti vaikuttamaan täällä meidän korkeudessamme.

LÄHDELUETTELO

Aurinkopaneelit elinkaaren lopussa-kiertotaloutta parhaillaan vai vuori vaarallista jätettä. (Vakkuri 2020). <https://www.korkia.fi/aurinkopaneelit-elinkaaren-lopussa-kiertotaloutta-parhaimmillaan-vai-vuori-vaarallista-jatetta/>. Viitattu 20.2.2023.

Energiateollisuus ry 2023. Energiavuosi 2022 sähkö. Julkaistu 12.1.2023. Raportit ja selvitykset. https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf. Viitattu 18.4.2023.

Energiateollisuus ry julkaisuaika tuntematon. Vesivoima. Verkkojulkaisu. <https://energia.fi/energia-asta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima>. Viitattu 18.4.2023.

Energiavirasto 2022. Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021. Julkaistu 20.6.2022. Verkkojulkaisu. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>. Viitattu 16.1.2023.

European commission 2022. Photovoltaic geographical information system. Muokattu 1.3.2022. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. Viitattu 20.3.2023.

Fingrid 2023. Venäjältä tuotu sähkö Suomessa. Julkaistu 5.4.2022. Päivitetty 14.5.2022. Verkkojulkaisu. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/ajan-kohtaista05042022_sahkontuonti.pdf. Viitattu 8.4.2023.

Green match 2023. Types of solar panels. Muokattu 24.2.2023. Verkkojulkaisu. <https://www.green-match.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>. Viitattu 5.1.2023.

Ilmatieteenlaitos. Tuuliatlas. <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/#>. Viitattu 20.3.2023.

Ippc 2014. Schlömer, steffen. Technology- specific cost and performance parameters. Raportit ja selvitykset. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf. Viitattu 5.3.2023.

Irena. End of life managment: solar photovoltaic panels. Iea-pvps. 2016. Verkkojulkaisu. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Viitattu 20.2.2023.

Korpela, Aki 2016. Tuulivoiman perusteet. Vantaa. Tammertekniikka. Hansaprint oy. 1. Painos. Viitattu 4.3.2023.

Metso, Jari. Rakennustarkastaja. Miehikkälä. Haastateltu 7.2.2023.

Motiva 07.2012. Omaa tuulienergiaa. Vähämäki, Jaakko. Valokuva. https://www.motiva.fi/files/6107/Omaa_tuulienergiaa.pdf. Viitattu 10.2.2023.

Motiva 2021. Tuulivoima ja linnut. Muokattu 29.7.2021. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoiman_ymparisto-_ja_muut_vaikutukset/tuulivoimat_ja_linnut. Viitattu 13.3.2023.

Motiva 2021. Vesivoima. Muokattu 16.9.2021. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima. Viitattu 5.3.2023.

Motiva 2022. Lupa-asiat. Muokattu 2.8.2022. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/lupa-asiat. Viitattu 5.3.2023.

Motiva 2022. Tuulivoima suomessa. Muokattu 26.4.2022. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa. Viitattu 20.1.2023.

Motiva 2022. Tuulivoimateknologia. Muokattu 27.4.2022. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia. Viitattu 10.3.2023.

Pentinsaari, Tanja 2022. Opetusmateriaali. Uusiutuvat energiajärjestelmät. Savonia- ammattikorkeakoulu. Viitattu 13.1.2023. https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1678475/mod_resource/content/1/Vesivoima_luento.pdf

Perälä, Rae 2017. Aurinkosähköä. Helsinki. Karisto oy. Viitattu 12.2.2023

Saaristotekniikka. Verkkokauppa. <https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/>. Viitattu 15.3.2023.

Sharp EU julkaisuaika tuntematon. Monocrystalline solar panels. Valokuva. <https://www.sharp.eu/learn-about-solar-panels/monocrystalline-solar-panels>. Viitattu 18.1.2023.

ST-käsikirja 40 aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelu ja toteutus. Sähkötieto ry. Sähköinfo oy. Matti Orrberg. E-kirja. Julkaistu 22.3.2021. <https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.savonia.fi/item/6682?search=Aurinkosahkojarjestelmien%20suunnittelu%20ja%20toteutus>. Viitattu 14.3.2023.

Suomen tuulivoimayhdistys 2023. Rakenteilla olevat hankkeet. Päivitetty 23.1.2023. Verkkojulkaisu. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/rakenteilla-olevat-hankkeet>. Viitattu 7.4.2023.

Suomen tuulivoimayhdistys 2023. Tuulivoima suomessa 2022. Julkaistu 23.1.2023. Verkkojulkaisu. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2022-1.pdf. Viitattu 4.2.2023.

Suomen tuulivoimayhdistys julkaisuaika tuntematon. Eri tuulivoimalatyyppejä. Verkkojulkaisu. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppaja>. Viitattu 10.3.2023.

Sähkömarkkinalaki FINLEX 588/2013. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>. Viitattu 15.2.2023.

Taina, maria. Haastateltu 4.1.2023. Viitattu 6.1.2023.

Talo it julkaisuaika tuntematon. Aurinkopaneeli 50w joustava. Valokuva. https://www.taloloit.fi/kauppa/index.php?id_product=78&rewrite=aurinopaneeli-80w-paneeli-444alaukkumalli-sispaneelin-kassin-saeatimen-ja-kaapelit&controller=product. Viitattu 19.1.2023.

Tekniikan museo 25.5.2020. Tekniikan – ja teollisuuden jälkiä: Imatra. Valokuva. <https://tekniikan-museo.wordpress.com/2020/05/25/tekniikan-ja-teollisuuden-jalkia-imatra/>. Viitattu 5.2.2023.

Tekniikkatalous 27.10.2018. Nykyaikainen turbiini korvasi perinteikkään vesipyörän- Suomi sovelsi, ei kehittänyt. Laatikainen, Tuula. Valokuva. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/nykyaikainen-turbiini-korvasi-perinteikkaan-vesipyoran-suomi-sovelsi-ei-kehittanyt/b5922c07-2a9d-3e3b-b4c4-00b3f9412787>. Viitattu 5.2.2023.

THI 2022. Tuulivoima ja melu. Päivitetty 4.5.2022. Verkkojulkaisu. <https://thi.fi/fi/web/ymparistoterveys/melu/tuulivoima-ja-melu>. Viitattu 13.3.2023.

Vesivoimanluonto julkaisuaika tuntematon. Vesivoiman toimintaperiaate. Verkkojulkaisu. <https://www.vesivoimanluonto.org/fi/vesivoima-suomessa/vesivoimalan-toimintaperiaate/>. Viitattu 5.2.2023.

Volttikauppa. Verkkokauppa. <https://volttikauppa.fi/>. Viitattu 15.3.2023.

Välisuo, Petri. Vaasan yliopisto 2020. Tuulivoiman melu ja sen vaikutukset. Julkaistu 08.2020. <https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/11290/978-952-476-914-3.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Viitattu 13.3.2023.

Väre 2022. Olkiluoto 3:n koekäytön vaikutus sähkön hintaan Suomessa. Kohvakka, Sami. Julkaistu 16.3.2023. Verkkojulkaisu. <https://vare.fi/olkiluoto-3n-koekayton-vaikutus-sahkon-hintaan-suomessa/>. Viitattu 7.4.2023.

Väre 2022. Sähkön hintakehitys tulevana talvena. Viljakainen, Santeri. Julkaistu 9.11.2022. Verkkojulkaisu. <https://vare.fi/talven-2023-sahkomarkkinakatsaus/>. Viitattu 2.4.2023.

Yle 16.8.2013. Lohiportaista lupaavia tuloksia- vaikeuksiakin riittää. Honkanen, Jarmo. Valokuva. <https://yle.fi/a/3-6778828>. Viitattu 15.1.2023.

LIITE 1: PV TUOTANNOT

Kk	Pv 5,7kWp	Pv 9,8kWp	Pv 19,7kWp				a	Pv 5,7kWp	Pv 9,8kWp	Pv 19,7kWp
1	39,27	162,95	328,86				1	4434,21	10286,31	21117,34
2	126,53	418,33	849,60				2	4345,526	10080,58	20694,99
3	369,63	1056,14	2168,34				3	4321,625	10025,14	20581,171
4	570,63	1355,10	2791,63				4	4297,856	9970,002	20467,974
5	749,36	1544,66	3187,11				5	4274,218	9915,167	20355,4
6	757,04	1446,54	2976,50				6	4250,71	9860,634	20243,446
7	722,75	1425,16	2931,85				7	4227,331	9806,4	20132,107
8	557,67	1238,49	2544,36				8	4204,081	9752,465	20021,38
9	331,19	885,64	1811,01				9	4180,958	9698,827	19911,263
10	151,66	500,08	1016,47				10	4157,963	9645,483	19801,751
11	41,68	170,32	344,44				11	4135,094	9592,433	19692,841
12	16,8	82,90	167,17				12	4112,351	9539,675	19584,53
a	4434,21	10286,31	21117,34				13	4089,733	9487,206	19476,815
							14	4067,24	9435,027	19369,693
							15	4044,87	9383,134	19263,16
							16	4022,623	9331,527	19157,212
							17	4000,499	9280,203	19051,848
							18	3978,496	9229,162	18947,062
							19	3956,614	9178,402	18842,854
							20	3934,853	9127,921	18739,218
							21	3913,211	9077,717	18636,152
							22	3891,689	9027,79	18533,653
							23	3870,284	8978,137	18431,718
							24	3848,998	8928,757	18330,344
							25	3827,828	8879,649	18229,527
							Yht. (kWh)	102388,9	237517,75	487613,45

LIITE 2: PÄIVITTÄISEN SÄTEILYN MÄÄRÄT

Klo.	Maaliskuu	Kesäkuu	Syyskuu	Joulukuu	W/m ²
00:30	0,00	0,00	0,00	0,00	
01:30	0,00	0,00	0,00	0,00	
02:30	0,00	0,00	0,00	0,00	
03:30	0,00	11,19	0,00	0,00	
04:30	0,00	33,57	0,00	0,00	
05:30	0,00	56,44	1,97	0,00	
06:30	11,14	166,92	41,00	0,00	
07:30	98,29	312,27	147,70	0,00	
08:30	223,84	439,88	247,61	0,00	
09:30	359,30	557,34	353,52	4,99	
10:30	464,37	637,70	436,70	56,11	
11:30	535,53	681,73	474,99	84,80	
12:30	543,29	687,49	466,60	91,14	
13:30	497,66	645,81	433,38	67,59	
14:30	414,16	572,32	363,87	5,46	
15:30	301,93	463,78	262,71	0,00	
16:30	169,14	333,99	151,04	0,00	
17:30	49,14	198,66	49,93	0,00	
18:30	1,27	79,65	3,87	0,00	
19:30	0,00	40,37	0,00	0,00	
20:30	0,00	17,84	0,00	0,00	
21:30	0,00	1,04	0,00	0,00	
22:30	0,00	0,00	0,00	0,00	
23:30	0,00	0,00	0,00	0,00	

LIITE 3: KUSTANNUKSET

€ (alv0%)	5,7kWp	9,8kWp	19,7kWp
Pakettihinta	4104,84	6362,9	8614,52
Asennutarvikkeet	183,23	2910,62	5769,68
Asennuskulut	500	800	1100
Huoltokulut	1120,97	1362,9	1685,48
Yhteensä	5909,04	11436,42	17169,68

LIITE 4: PÄÄSTÖVERTAILU

Pv	5,7kWp	9,8kWp	19,7kWp			Pv katto	Pv maa	Hiili	Maakaasu
Tuotanto 25v (kWh)	102388,86	237517,75	487613,45		gCO ₂ /kWh	41	48	820	490
Tuotanto a (kWh)	4434,21	10286,31	21117,34						
gCO ₂ /a	181802,61	493742,88	1013632,32						
kgCO ₂ /a	181,80	493,74	1013,63						
gCO ₂ /25v	4197943,42	11400852,13	23405445,75						
kgCO ₂ /25v	4197,94	11400,85	23405,45						
Hiili									
gCO ₂ /a	3636052,20	8434774,2	17316218,8						
kgCO ₂ /a	3636,05	8434,7742	17316,2188						
gCO ₂ /25v	83958868,36	194764557,20	399843031,60						
kgCO ₂ /25v	83958,87	194764,56	399843,03						
Kompensointiaika	1,15	1,35	1,35						
CO ₂ säästö (kg)	79760,92	183363,71	376437,59						
Maakaasu									
gCO ₂ /a	2172762,9	5040291,9	10347496,6						
kgCO ₂ /a	2172,7629	5040,2919	10347,4966						
gCO ₂ /25v	50170543,29	116383698,81	238930592,05						
kgCO ₂ /25v	50170,54	116383,70	238930,59						
Kompensointiaika	1,93	2,26	2,26						
CO ₂ säästö (kg)	45972,60	104982,85	215525,15						

LIITE 5: KANNATTAVUUS

			1)	a					
Sähkön hinta	snf/kWh	€/kWh		kWh	€	kWh	€	kWh	€
2023 ka (1)	8,31	0,0831							
Ennuste (2)	15	0,15							
5,7kWhp	2023 ka	Ennuste							
Kustannukset	5909,04	€	5909,04	€	5909,04	€	5909,04	€	5909,04
Vuosituotanto ka	4095,55	kWh/a	4095,55	kWh/a	4095,55	kWh/a	4095,55	kWh/a	4095,55
Tuotanto a	340,34	€	340,34	€	340,34	€	340,34	€	340,34
Takaisinmaksukaika	17,36	v	9,62	v	9,62	v	9,62	v	9,62
Zsv-sähkön tuotanto	102388,86	kWh	102388,86	kWh	102388,86	kWh	102388,86	kWh	102388,86
Zsv-rahan tuotanto	8508,51	€	15358,33	€	15358,33	€	15358,33	€	15358,33
9,8kWhp	2023 ka	Ennuste							
Kustannukset	11436,42	€	11436,42	€	11436,42	€	11436,42	€	11436,42
Vuosituotanto ka	9500,71	kWh/a	9500,71	kWh/a	9500,71	kWh/a	9500,71	kWh/a	9500,71
Tuotanto a	789,509	€	1425,11	€	1425,11	€	1425,11	€	1425,11
Takaisinmaksukaika	14,49	v	8,02	v	8,02	v	8,02	v	8,02
Zsv-sähkön tuotanto	237517,75	kWh	237517,75	kWh	237517,75	kWh	237517,75	kWh	237517,75
Zsv-rahan tuotanto	19737,73	€	35627,66	€	35627,66	€	35627,66	€	35627,66
19,7kWhp	2023 ka	Ennuste							
Kustannukset	17169,68	€	17169,68	€	17169,68	€	17169,68	€	17169,68
Vuosituotanto ka	19504,54	kWh/a	19504,54	kWh/a	19504,54	kWh/a	19504,54	kWh/a	19504,54
Tuotanto a	1620,827	€/a	2925,68	€/a	2925,68	€/a	2925,68	€/a	2925,68
Takaisinmaksukaika	10,59	v	5,87	v	5,87	v	5,87	v	5,87
Zsv-sähkön tuotanto	487613,45	kWh	487613,45	kWh	487613,45	kWh	487613,45	kWh	487613,45
Zsv-rahan tuotanto	40520,68	€	73142,02	€	73142,02	€	73142,02	€	73142,02
2)									
	Pv 5,7kWhp	-4788,07	Pv 9,8kWhp	-10073,52	Pv 19,7kWhp	-15484,2			
1	4434,21	-4122,94	10286,31	-8505,57	21117,34	-12316,6			
2	4345,526	-3471,11	10080,58	-7018,49	20694,99	-9212,35			
3	4321,625	-2822,87	10025,14	-5514,71	20581,17	-6125,17			
4	4297,856	-2178,19	9970,00	-4019,21	20467,97	-3054,98			
5	4274,218	-1537,05	9915,17	-2511,94	20355,40	-1,6682			
6	4250,71	-899,448	9860,63	-1052,84	20243,45	3034,849			
7	4227,331	-265,348	9806,40	418,12	20132,11	6054,665			
8	4204,081	365,2637	9752,47	1880,99	20021,38	9057,872			
9	4180,958	992,4075	9698,83	3335,81	19911,26	12044,56			
10	4157,963	1616,102	9645,48	4782,63	19801,75	15014,82			
11	4135,094	2236,366	9592,43	6221,50	19692,84	17968,75			
12	4112,351	2853,219	9539,67	7652,45	19584,53	20906,43			
13	4089,733	3466,679	9487,21	9075,53	19476,82	23827,95			
14	4067,24	4076,765	9435,03	10490,78	19369,69	26733,41			
15	4044,87	3562,525	9383,13	10535,35	19263,16	27937,4			
16	4022,623	4165,919	9331,53	11935,08	19157,21	30810,98			
17	4000,499	4765,994	9280,20	13327,11	19051,85	33668,76			
18	3978,496	5362,768	9229,16	14711,49	18947,06	36510,82			
19	3956,614	5956,26	9178,40	16088,25	18842,85	39337,25			
20	3934,853	6546,488	9127,92	17457,44	18739,22	42148,13			
21	3913,211	7133,47	9077,72	18819,09	18636,15	44943,55			
22	3891,689	7717,223	9027,79	20173,26	18533,65	47723,6			
23	3870,284	8297,766	8978,14	21519,98	18431,72	50488,36			
24	3848,998	8875,115	8928,76	22859,30	18330,34	53237,91			
25	3827,828	9449,29	8879,65	24191,24	18229,53	55972,34			