



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tom Strandvall

Aurinkoenergian hyödyntäminen Raja- vartiolaitoksen aluksissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

01.03.2020

Tekijä Otsikko	Tom Strandvall Aurinkoenergian hyödyntäminen Rajavartiolaitoksen aluksissa
Sivumäärä Aika	46 sivua + 4 liitettä 01.03.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	komentaja Marko Aheristo insinöörikapteeniluutnantti Riku Ojala lehtori Jukka Karppinen
<p>Maailmalla energiankulutus on erittäin voimakkaassa kasvussa ja päästövähennystavoitteiden sekä kustannuskysymysten seurauksena uusiutuvia sähköntuotantomuotoja suositaan laajalti uusissa maa-asennuksissa. Merellisissä olosuhteissa tarvitaan suuria tehoja pienistä tiloista, mikä osittain rajoittaa tällä hetkellä käytössä olevien uusiutuvien energiamuotojen mahdollisuutta syrjäyttää fossiiliset polttoaineet pääasiallisena energianlähteenä.</p> <p>Tämä insinöörityö on tutkimus aurinkoenergian hyödyntämisestä osana Rajavartiolaitoksen alusten sähköntuotantoa. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään ratkaisu vähentämään aluksen hiilijalanjälkeä elinkaarensa aikana. Tavoitteena oli selvittää, onko ylipäänsä mahdollista asentaa aurinkopaneeleita laivan ulkokuorelle ja, jos on, mitkä ovat hyödyt ja miten välttää mahdolliset piilevät vaarat. Lisäksi työssä on selvitys aurinkopaneelijärjestelmäinvestoinnin kannattavuudesta sekä taloudellisesta että ympäristön näkökulmasta.</p> <p>Työ alkoi selonteolla, mihin aurinkopaneelien sähköntuotto perustuu ja minkälainen tuottopotentiaali niistä on odotettavissa. Työssä on analysoitu vuotuisen säteilyenergian määrää Suomenlahdella, minkä avulla pystyy tarkemmin hahmottamaan sähkötehontuottoa vuositasona. Lisäksi esillä on katsaus erilaisista yleisesti käytössä olevista tekniikoista, joilla auringonvalo muunnetaan sähköksi. Työssä tarkastellaan myös eri tekniikoiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia sekä sitä, mikä tekniikka voisi soveltua merellisiin olosuhteisiin.</p> <p>Insinöörityössä on useita laskelmia, jotka ovat tapauskohtaisesti hyödynnettävissä uutta aurinkosähköjärjestelmää suunniteltaessa. Laskelmia on sovellettu Rajavartiolaitoksen vartiolaiva Turvan esimerkissä analysoiden aurinkosähköjärjestelmän tehontuottoa, kustannuksia sekä, kuinka aurinkoenergia vertautuu fossiilisiin polttoaineisiin. Suunnittelun tukena toimi kaksi referenssialusta, joille on asennettu omat aurinkosähköjärjestelmät. Työssä on myös esimerkkejä, minkälaisia laadukkaat aurinkopaneelit ovat nykyisin.</p> <p>Lopputuloksena todettiin aurinkosähköjärjestelmän olevan laivassa ympäristön kannalta lähes aina kannattava, mutta taloudellinen kannattavuus ei ole yksiselitteinen, sillä rahalliseen kannattavuuteen vaikuttaa monet tekijät, joiden suuruus määrää lopputuloksen.</p>	
Avainsanat	turva, rajavartiolaitos, aurinkopaneeli, laiva, LNG, energia

Author Title	Tom Strandvall Utilization of Solar Energy on Border Guard's Fleet
Number of Pages Date	46 pages + 4 appendices 01 March 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electric Power Engineering
Instructors	Marko Aheristo, Commander Riku Ojala, Lieutenant, Senior Grade, Engineering Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The global demand for energy is dramatically increasing, and as means to reduce greenhouse gas emissions and the impact of them on our environment, renewable energy applications have become the new global trend. Ships that sail the oceans require a large amount of power from a small volume, and therefore there are still some challenges to be solved with renewable energy replacing fossil fuels as the primary energy source.</p> <p>This thesis work is a study about the possibility of utilizing solar energy as part of generating electricity for Border Guard's ships. The idea was to strive to reduce the carbon footprint of a vessel over its lifecycle, and the main goal was to examine whether it's possible and beneficial to install solar panels on a vessel, or would it be impracticable. Additionally, this work includes analysis of the profitability of the investment taking in consideration also the benefits for the environment.</p> <p>Firstly, the research began by introducing the photovoltaic phenomenon, and what kind of power production it can generate. To reliably be able to calculate and estimate solar power production, solar insolation is studied over the sea area of Gulf of Finland. As a part of the research different types of techniques to collect solar energy are also presented, and their pros and cons that are typical for them.</p> <p>Secondly, there are a lot of calculations related to solar energy, that the reader can exploit case-by-case, when exploring and designing new systems. The calculations are also applied to Border Guard's vessel Turva to analyze what kind of electricity production can be achieved, and at what cost. Additionally, there are two ships with large solar arrays as reference, that supports planning of a possible system for Turva. There is also an overview of durable, efficient and reliable solar panels that are currently out on the market.</p> <p>Finally, as conclusions to the study it seemed to be beneficial for the environment to install solar arrays on a ship in almost every case, but the financial return on investment is very dependent on several factors that determine the outcome.</p>	
Keywords	Turva, Coast Guard, Solar Panel, Ship, LNG, Energy

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkoenergian hyödyntäminen	2
2.1	Aurinko energialähteenä	2
2.2	Auringon säteily Suomenlahdella	4
3	PV-aurinkokennot	7
3.1	PV-aurinkokennon teoria	8
3.2	Yksikidepiikkenno	10
3.3	Monikidepiikkenno	11
3.4	Ohutkalvkennot	12
3.5	Moniliitoskennot	14
3.6	Aurinkopaneelien ympäristövaikutukset	15
4	Aurinkopaneelisiin liittyviä laskelmia	17
4.1	Sähköteho	17
4.2	Tehohäviöt	17
4.3	Hyötysuhde	18
4.4	Aurinkoenergiajärjestelmän hyötysuhde	18
4.5	Ilmansuunnan ja paneelikulman muunnoskerroin	19
4.6	Aurinkopaneeliston hinta	20
4.7	Aurinkoenergiajärjestelmän karkea takaisinmaksuaika	21
4.8	Aurinkoenergiajärjestelmällä tuotetun sähkön hinta (LCOE)	21
5	Rajavartiolaitoksen vartiolaiva Turva (IMO 9650377)	22
5.1	Tekniset tiedot:	22
5.2	Yleisesittely	23
5.3	Aluksen moottorit	24
5.4	Helikopterikansi	26
5.4.1	Helikopterikannen pinta-alan tuottopotentiaali	27
5.4.2	Helikopterikannen haasteet	27

5.4.3	Ohutkalvokennorulla	28
5.4.4	Erikoisvalmisteiset yksikidepiiaurinkopaneelit	30
5.5	Laivan kyljet	31
5.6	Laivan peräkansi	34
5.7	Aurinkoenergian kannattavuus	36
5.7.1	Energiakulutuksen osuus	36
5.7.2	Rahallinen kannattavuus	37
6	Referenssialukset	39
6.1	Finferries Elektra (IMO 9806328)	39
6.1.1	Tekniset tiedot	39
6.1.2	Aurinkosähköjärjestelmä	40
6.2	K-Line Drive Green Highway (IMO 9728069)	42
6.2.1	Tekniset tiedot	42
6.2.2	Aurinkosähköjärjestelmä	43
7	Laitevalmistajat	43
8	Yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Vartiolaiva Turvan keula-/helikopterikansi	
	Liite 2. Vartiolaiva Turvan kyljet	
	Liite 3. Ilmatieteenlaitoksen mittaamat muunnoskertoimet	
	Liite 4. Kuvia ohutkalvopaneelirullista	

Lyhenteet

CIGS	Kupari-Indium-Gallium-Selenidi. Aurinkopaneelityyppi.
CIS	Kupari-Indium-Selenidi. Aurinkopaneelityyppi.
c-Si	Monocrystalline silicon. Yksikidepii, on aurinkopaneelityyppi.
DC	Direct current on tasavirta. Sähköä, jolla ei ole taajuutta.
DP2	Dynamic Positioning. Tietokonejärjestelmä, joka lukitsee laivan sijainnin tarkasti paikoilleen.
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.
IMO	International Maritime Organization. Kansainvälinen merenkulunjärjestö.
kWp	Aurinkopaneelien nimellisteho ilmoitetaan yleensä ”peak”-alaindeksillä.
LCOE	Levelized Cost of Energy. Kuvastaa energian hintaa yhtä kilowattituntia kohden.
LED	Light Emitting diode. Hohtodiodi.
LNG	Liquefied Natural Gas. Nesteytetty maakaasu.
mc-Si	Multicrystalline silicon, eli monikidepii. Aurinkopaneelityyppi.
PV	Photovoltaic. Fotovoltaiset järjestelmät on valon muuntaminen sähköksi puolijohde materiaaleilla.

1 Johdanto

Tässä työssä esitän tutkimus- ja selvitystyön muodossa havaintojani haasteista sekä mahdollisuuksista aurinkopaneeliston hyödyntämisestä Rajavartiolaitoksen laivoissa. Tapausesimerkkinä työssäni toimii vartiolaiva Turva. Siitä huolimatta, että Turva on jo valmiiksi ympäristöystävällinen verrattuna lähes kaikkiin muihin laivoihin, koska se käyttää pääasiallisena polttoaineena nesteytettyä maakaasua, on tämän työn tavoitteena ja motiivina ollut vähentää Turvan polttoainekulutusta entisestään ja sen myötä hiilijalanjälkeä. Turvalle rakennetaan mahdollisesti tulevaisuudessa sisaraluksia, joten teen selvityksen myös niitä silmällä pitäen hyödyntäen myös Turvalta saatuja havaintoja ja kokemuksia. Rakennusvaiheessa on merkittävästi helpompi ottaa huomioon aurinkopaneelien asettamat vaatimukset kuin valmiissa laivassa.

Perehdyn yleisellä tasolla aurinkoenergiaan sekä sen sähköntuottopotentiaaliin ja sen pohjalta esitän mallinnuksia aurinkosähkötuottopotentiaalista Turvalla. Tavoitteenani on selvittää Ilmatieteenlaitoksen mittauksiin perustuen kokonaissäteilyn tehotiheys Suomenlahdella ja se, miten tehotiheys muuttuu, kun aurinkopaneeleita kallistetaan tai suunnataan eri ilmansuuntiin. Tutustun nykyisten kaupallisten aurinkokennojen hyviin ja huonoihin ominaisuuksiin ja siihen, mitkä kennotyypit voisivat soveltua laiva-asennukseen. Käyn työssäni läpi myös laskelmia, joilla voi arvioida aurinkosähkön tehontuottoa ja kannattavuutta. Peilaan aurinkopaneelien tuottopotentiaalia vartiolaiva Turvan vuotuisen kokonaisenergiakulutukseen ja arvioin sen perusteella rahallista säästöä sekä ilmasto-vaikutusta.

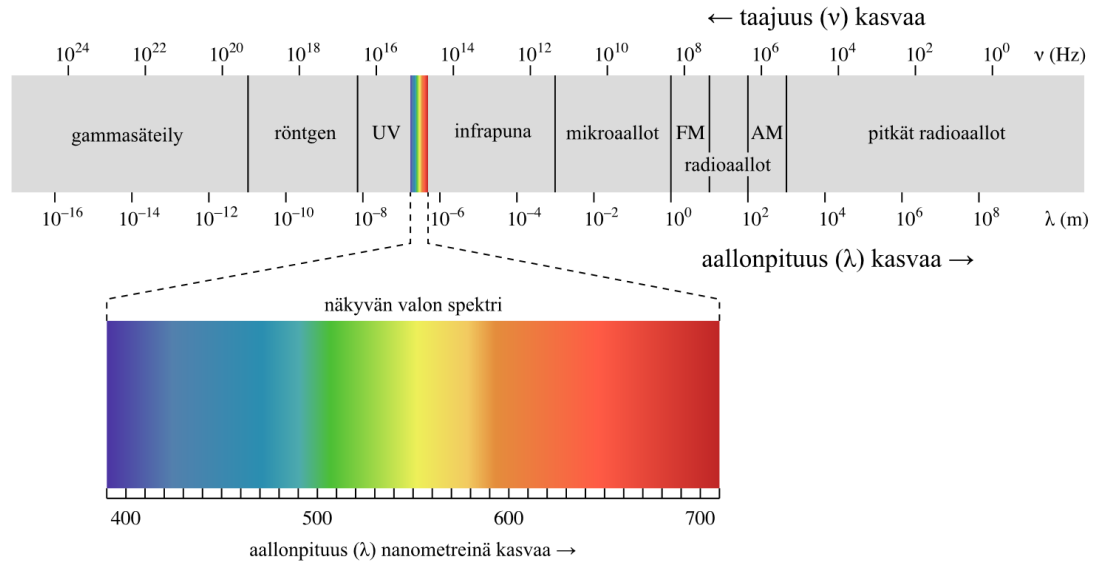
Suunnittelun apuna käytän kahta referenssialusta, joilla on molemmilla aurinkopaneeli-järjestelmä sähköntuoton tukena. Referenssialuksista yksi on suomalainen autolautta Elektra, joka liikennöi Saaristomerellä, ja toinen on noin tuplasti Turvan kokoinen autolautta Drive Green Highway, joka liikennöi maailman meriä Panaman lipun alla. Referenssialukset toimivat tukena suunnittelussa, minkätyyppisiä ja mihin aurinkopaneeleita voi mahdollisesti sijoittaa Turvan kansille.

2 Aurinkoenergian hyödyntäminen

2.1 Aurinko energialähteenä

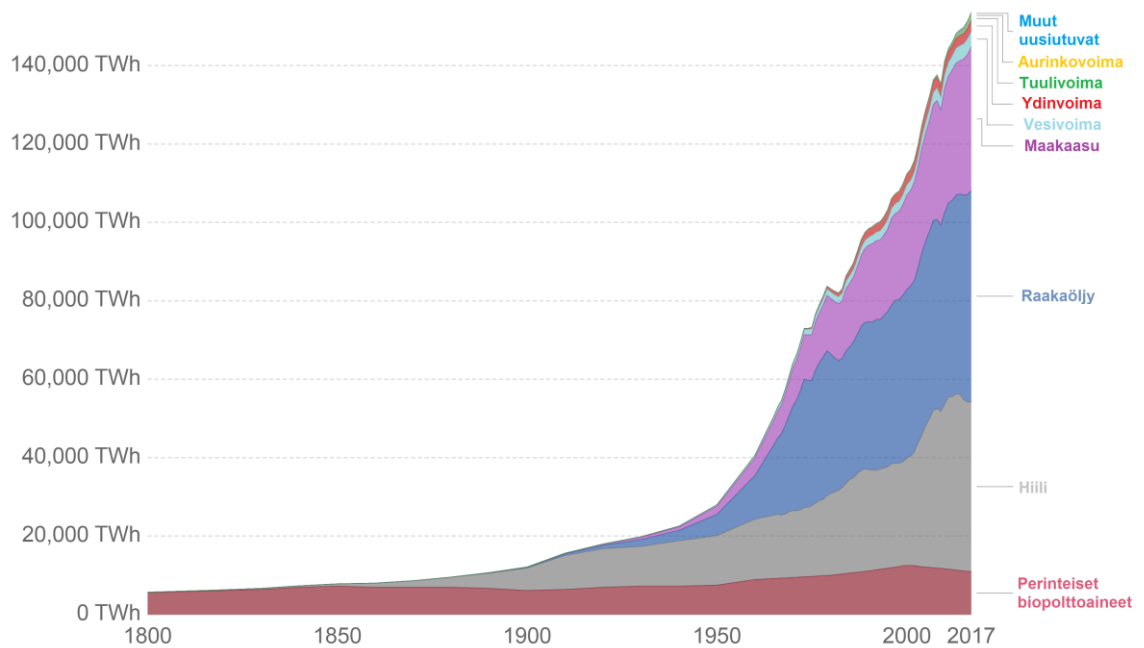
Aurinko on meille tuttu jokapäiväisestä elämästä lämmön ja valon lähteenä, mutta myös sääilmiöiden ja vuodenaikojen luojana. Tarkemmin tarkasteltuna Aurinko on kaasupallo, joka koostuu etupäässä vedystä ja heliumista. Massaltaan Aurinko vastaa 99,8 % koko aurinkokuntamme massasta, ja kaasupallon säde on yli sata kertaa suurempi kuin maapallon. Massansa ansiosta gravitaatio pitää aurinkokuntamme yhdessä ja siinä olevat kappaleet Auringon kiertoradalla. Valtavan painovoimansa seurauksena Auringon ytimen muodostuu suunnaton paine ja jopa 15 miljoonan celsiusasteen lämpötila. Ydin on tarpeeksi kuuma ylläpitämään fuusioreaktiota, jossa joka sekunti fuusioituu satoja miljoonia tonneja vetyä heliumiksi. Fuusioreaktio on myös tuttavallisemmin Aurinkomme lämmön ja valon lähde. Ytimessä vapautuva energia säteilee ulospäin ja ajallisesti sillä kestää noin 170 tuhatta vuotta edetä ytimestä konvektioalueelle, jonka pinnasta energia säteilee lopulta avaruutta ja maapalloa kohti. Auringon pinnasta fotonit, jotka on sähkömagneettisensäteilyn välittäjähiukkanen välittää auringosta säteilyn eteenpäin tasaisesti kaikkiin suuntiin. Fotonin energia on verrannollinen säteilyn taajuuteen. [1; 2.]

Aurinko on energialähteenä uusiutuva luonnonvara, puhdas ja ympäristöystävällinen, josta suurin osa energiasta saadaan sähkömagneettisen säteilyn muodossa. Auringon säteilemästä kokonaisenergiasta noin puolet on sähkömagneettisella spektrillä näkyvän valon alueella. Karkeasti toinen puolikas on infrapunasäteiden alueella, jonka me tunemme ihollamme lämpönä. Toiseen puolikkaaseen mahtuu myös pieni osuus ultraviolettisäteitä ja hyvin pieni osuus röntgen-, gamma- ja radiosäteilyä. Sähkömagneettisen säteilyn spektri on nähtävissä kuvassa 1, joka auttaa havainnollistamaan eri tyyppiset aallonpituudet. [2.]



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri [3].

Auringon tehotiheys on ilmakehän ulkorajalla keskimäärin 1365 wattia neliometriä kohden W/m^2 , jota kutsutaan aurinkovakioksi. Maapallon ilmakehä absorboi ja heijastaa osan säteilystä, jonka lisäksi sijainti maapallolla vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa säteilystä lopulta saavuttaa maanpinnan. Edellä mainittujen tekijöiden takia säteilyn hetkellinen tehotiheys on maanpinnalla enimmillään noin tuhat wattia neliometriä kohden. Aurinkoenergiaa voi hyödyntää joko passiivisesti valon, lämmön ja ilmanvaihdon lähteenä tai aktiivisesti sähköntuotantoon sekä lämpimän veden tuotantoon. Aurinkoenergian potentiaalin hahmottamiseksi mainittakoon, että maapalloon kohdistuva säteilyn teho on noin 170 000 TW, joka yhden tunnin ajalta vastaa suurempaa energiamäärää kuin ihmiskunnan kuluttama kokonaismäärä yhden vuoden aikana. Kuvassa 2 on kuvattuna ihmiskunnan vuotuinen energiakulutus, jota voi verrata aurinkoenergian potentiaaliin ja siihen, kuinka kiireellinen tarve meillä on aloittaa toden teolla hyödyntämään sitä. [4, s. 10; 2.]

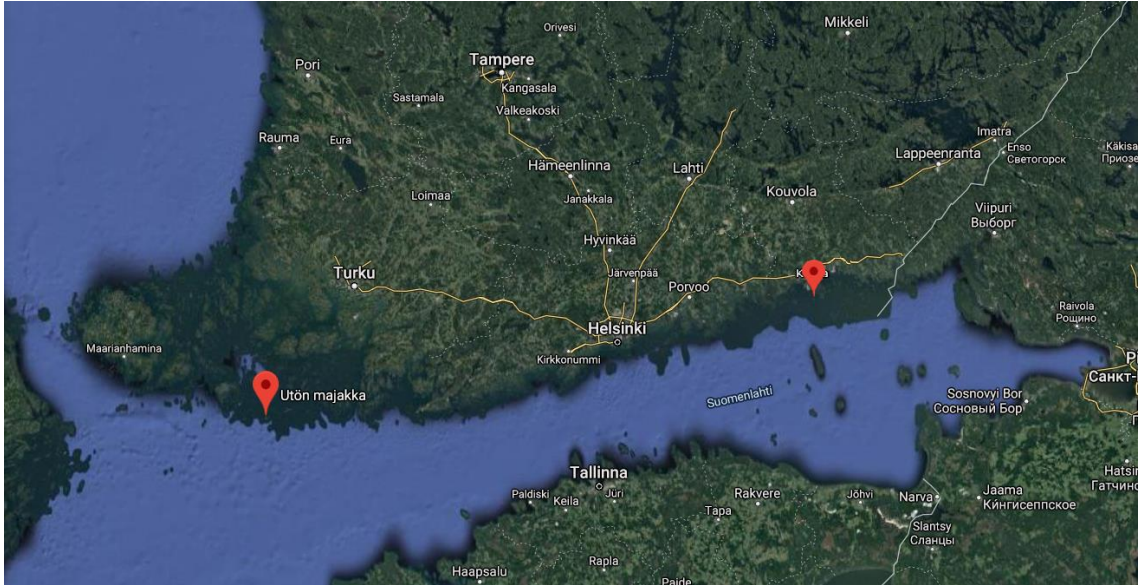


Kuva 2. Ihmiskunnan vuotuinen energiakulutus terawattitunneissa. Muokattu lähteestä [5].

2.2 Auringon säteily Suomenlahdella

Koska tämän insinööriyön tarkoitus on tukea tulevaisuudessa aurinkoenergian hyödyntämistä laivoissa Suomen meriolosuhteissa, tuli minun osata arvioida, kuinka voimakkaasti Aurinko säteilee Suomenlahdella. Jotta pystyin mahdollisimman luotettavasti arvioimaan tulevaa, käytin hyödyksi Ilmatieteenlaitoksen mittaamaa raakadataa Auringon kokonaissäteilyn voimakkuudesta, joka ottaa huomioon sekä suoran että hajasäteilyn. Saadakseni tarkemman kuvan koko Suomenlahden tilanteesta tarkastelen kahdesta eri mittausasemasta saatuja havaintoja. Suomenlahden länsipäätä edustaa viiden vuoden mittausajalta Utön havaintoasema ja itäpäästä neljän vuoden mittausajalta Kotkan edustalla sijaitseva Rankin havaintoasema. Havaintoasemien tarkka sijainti on nähtävissä kuvassa 3.

Käsittelin ilmatieteenlaitoksen raakadataa ja loin havainnollistavat kuvaajat ja taulukon, jotka ovat nähtävissä seuraavilla sivuilla taulukkoina 1, 2 ja 3. Käytän tämän insinööriyön aurinkoenergia laskelmissa edellä mainittujen kahden aseman Auringon kokonaissäteilyn tehottiheyden keskiarvoa vuosien ajalta. [6.]



Kuva 3. Auringon kokonaissäteilyn mittausasemien sijainti [7].

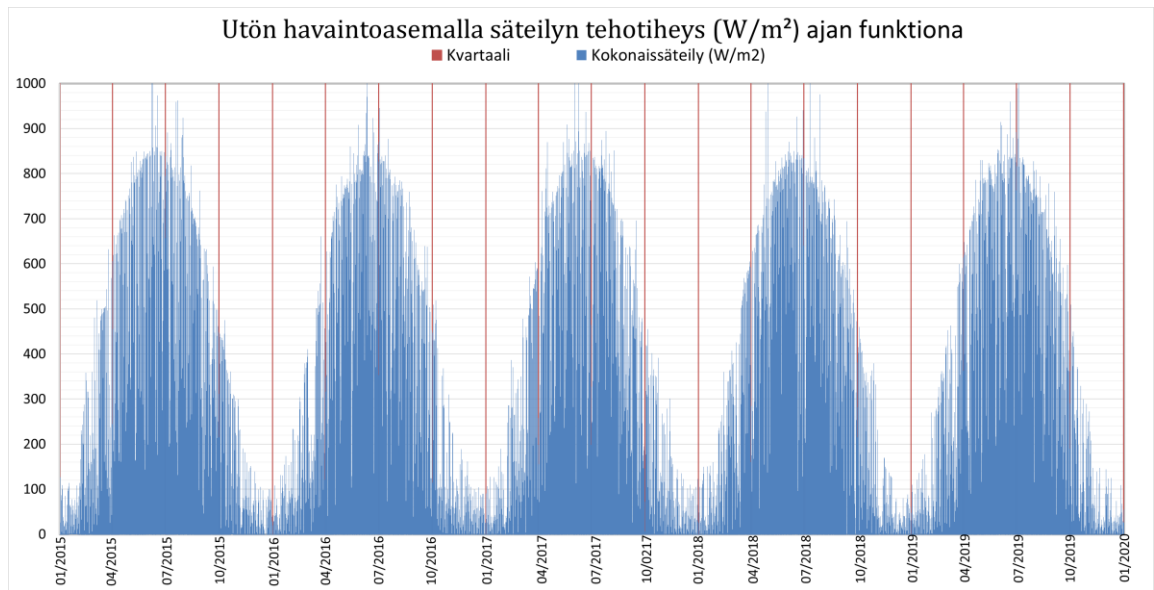
Ilmatieteenlaitoksen mitaama kokonaissäteily on mitattu vaakasuoralta pinnalta, jolloin se olisi vuodenajan mukaan noin 15–25 % suurempi, jos antureita kallistaisi 45° ja suunnitaisi niitä etelän suuntaan. Anturin ollessa pystypinnalla ja suunnattuna etelän suuntaan, kohdistuu pintaan yhden vuoden aikana noin 10 % vähemmän säteilyä kuin vaaka-asennossa. [8.]

Taulukko 1. Ilmatieteenlaitoksen usean vuoden mitaama insolaatio raakadatatista jatkokäsittelyjä tuloksia yhden vuoden keskiarvoiksi [6].

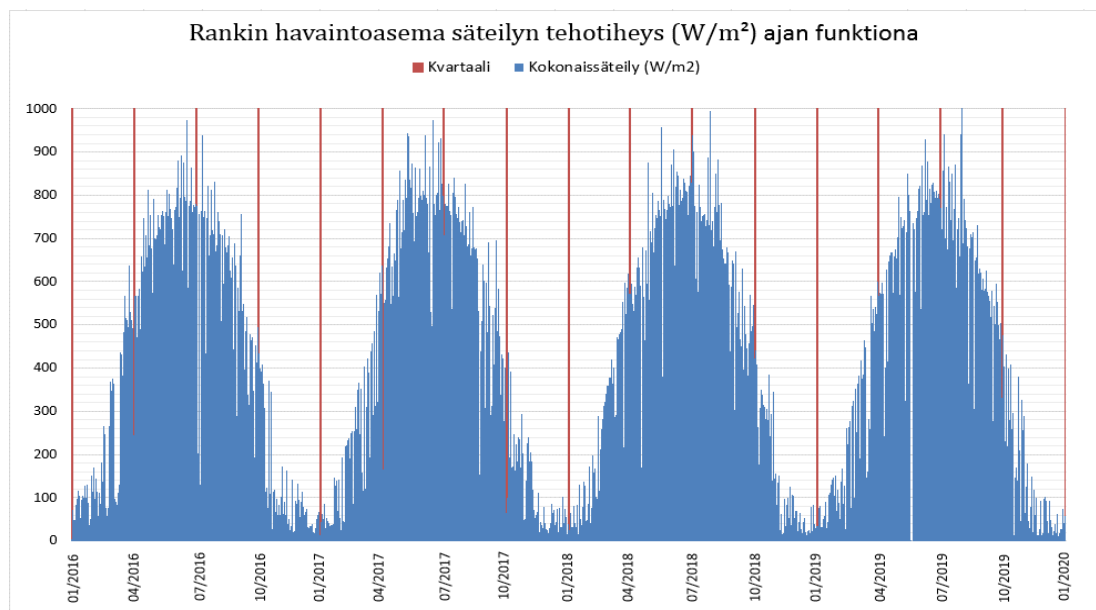
	Auringon kokonaissäteilyn tehitiheyden keskiarvo [S_{AVE}]	Auringon säteilyenergian vuotuinen keskiarvo [I_{AVE}]
Utö	124 W/m ²	1082 kWh/m ²
Rankki	113 W/m ²	986 kWh/m ²
Havaintoasemien keskiarvo	118 W/m ²	1034 kWh/m ²

Insinööriyössä käytän Auringon säteilyn tehotiheyttä S_{AVE} ja insolaatiota I_{AVE} , joiden arvoiksi totean vuoden keskimääräisen tehotiheyden olevan 118 W/m^2 sekä insolaation 1034 kWh/m^2 . Arvot perustuvat edellä mainittuihin mittauksiin ja ne pätevät Suomenlahdella vaakasuoralla pinnalla vuoden jokaisena hetkenä.

Taulukko 2. Kuvaajan olen luonnut ilmatieteenlaitoksen raakadatasta. Data on kokonaissäteilyn tehotiheys tunneittain viiden vuoden ajalta [6].



Taulukko 3. Kuvaajan olen luonnut ilmatieteenlaitoksen raakadatasta. Data on kokonaissäteilyn tehotiheys tunneittain neljän vuoden ajalta Kotkan Rankilta [6].

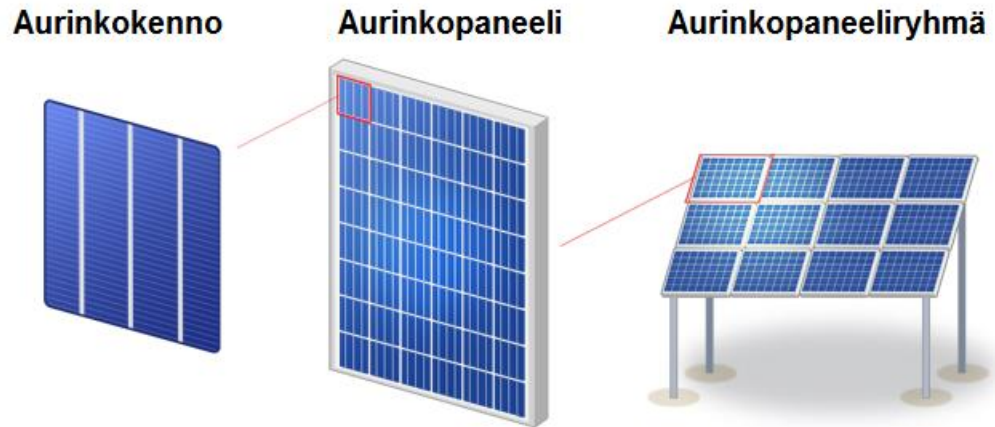


Huomionarvoista molempien havaintoasemien tuloksista on, kuinka merkittävä ero kokonaissäteilyssä on huhtikuun–syyskuun välisenä aikana verrattuna vuoden toiseen puoliskoon. Käytännössä marras–helmikuun välisenä aikana säteily on lähes olematonta. Lisäksi on mielenkiintoista havaita, että Suomenlahden länsipäässä Auringon säteily on voimakkaampaa kuin itäpäässä.

3 PV-aurinkokennot

Photovoltaic (PV) kenno, jota tuttavallisemmin kutsutaan aurinkokennoksi, on laite, joka muuntaa suoraan auringonsäteilyn tasavirraksi (DC). Yksittäinen aurinkokenno tuottaa pienen (noin 0,6 V) sähköisen potentiaalieron, jonka takia aurinkokennot tyypillisesti kytketään sarjaan, jotta saadaan aikaan korkeampi jännite. Aurinkopaneeleiksi tai moduuliksi kutsutaan laitteita, joissa on useita kennoja sarjaan kytkettynä ja kehys jäykistämässä sekä kantamassa kokonaisuutta. Aurinkopaneelin päällä on tyypillisesti lasi tai laminointi suojaamassa kennoja ja kehys on usein valmistettu alumiinista. Jos asentaa useamman aurinkopaneelin samaan kokonaisuuteen, siitä muodostuu aurinkopaneeliryhmä tai toisin sanoen aurinkopaneelisto. Kuva 4 auttaa havainnollistamaan, mitkä osat kuuluvat aurinkopaneelistöön. Aurinkopaneelijärjestelmästä voidaan puhua, kun ryhmään lisätään esimerkiksi kaapeloinnit, liitännät, erotuskytkimet ja suojalaitteet sekä mahdolliset vaihtosuuntaajat, akustot tai lataussäätimet. [9, s. 17–21; 10, s. 317–319.]

Aurinkopaneelit ovat uusien sähköntuotanto inventointien parissa nopeinten kasvava, johtuen niiden vähäisten ympäristövaikutusten takia ja ne ovat hiljattain kehittyneet maailmanlaajuisesti yhdeksi halvimmaksi sähköntuotantomuodoista verrattuna useimpiin muihin teknologioihin. Aurinkopaneelien hinta on pudonnut sitten 2000-luvun peräti 96 %. Aurinkokennoissa ei ole mekaanisesti liikkuvia osia eivätkä ne tarvitse toimiakseen muuta polttoainetta kuin auringonpaistetta. Niistä ei aiheudu melua, eikä kaasupäästöjä, jotka myötävaikuttaisivat ilmaston lämpenemiseen. Pv-aurinkokennojen elinkaari on keskimäärin noin 30 vuotta, joiden aikana ne kaipaavat hyvin vähän huoltoa ja ylläpitoa.

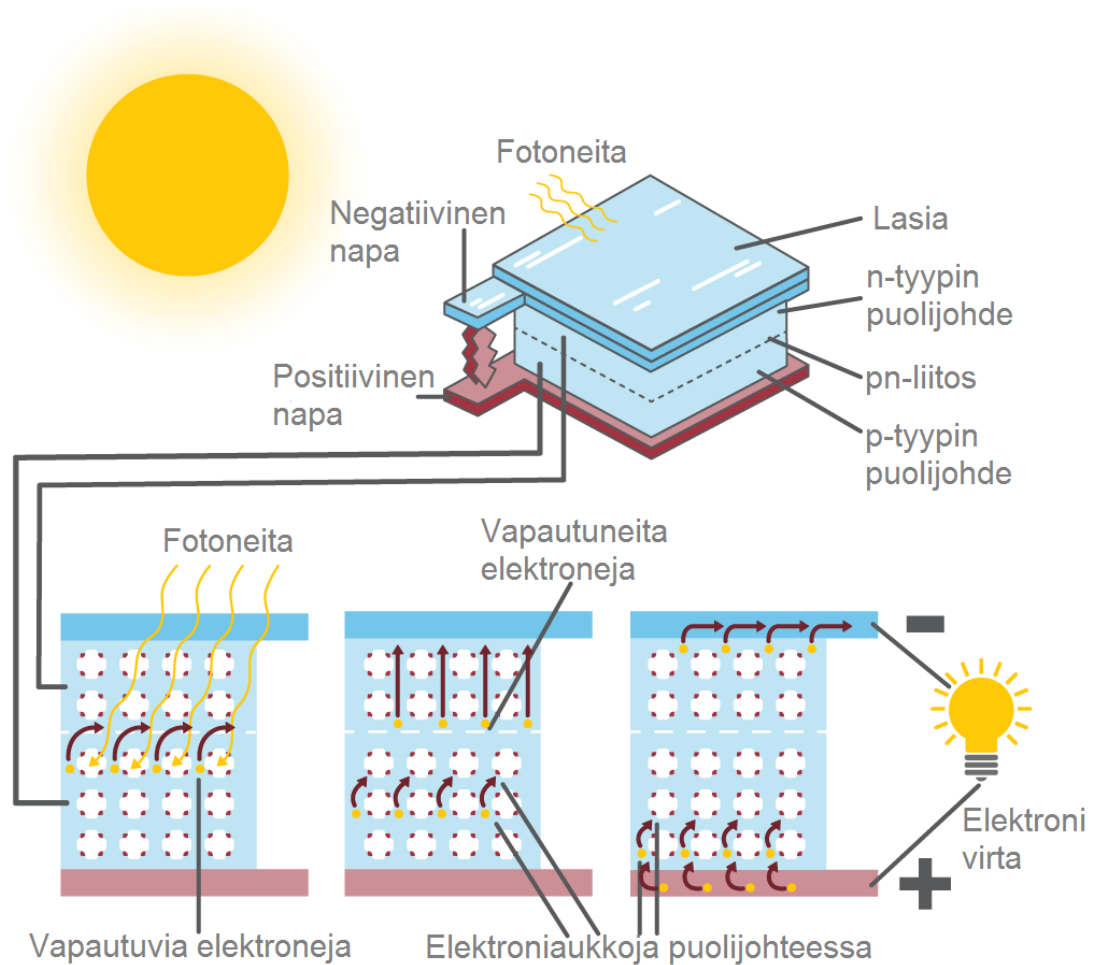


Kuva 4. Aurinkopaneelien rakenne. Muokattu lähteestä [11].

3.1 PV-aurinkokennon teoria

Aurinkokennossa on kaksi puolijohdetta liitetty yhteen, joista toinen on p-tyyppiä ja toinen n-tyyppiä. Kyseiset puolijohteet on tyypillisesti tehty silikonista, joihin p-tyypin osalta on lisätty esimerkiksi booria ja n-tyypin osalta esimerkiksi fosforia. Liitettäessä nämä kaksi tyyppiä yhteen koostumusten eroavaisuudella saadaan aikaiseksi liitosalueelle p-tyyppiin enemmän elektroneja kuin n-tyyppiin, joka aiheuttaa rajapinnan molemmiin puolin vastakkaismerkkiset sähkövarausten kerrokset ja sen myötä muodostuu sähkökenttä. Pn-liitoksen liitosvyöhykkeellä p-tyypistä tulee negatiivisesti varattu ja n-tyypistä positiivisesti varattu.

Aurinkokennojen sähköntuotto perustuu valosähköiseen ilmiöön, jonka Becquerel havaitsi vuonna 1839. Ilmiössä Auringosta saapuvat massattomat hiukkaset (fotonit) läpäisevät ohuen n-tyypin ja osuvat elektroneihin pn-liitoksen liitosvyöhykkeellä. Elektronit absorboivat säteilyenergian vapauttaen ne liikkumaan vapaasti aurinkokennossa. Vapautuneet elektronit siirtyvät sähkökentän vaikuttamana n-tyypin puolijohteeseen. N-tyyppiin muodostuu valosähköisen ilmiön seurauksena elektronien keskittymä, joka aiheuttaa kennojännitteen p-tyypin ja n-tyypin välille. Näin muodostuu aurinkosähkö, ja kyseistä ilmiötä on valaistu kuvassa 5. [9, s. 17–21; 10, s. 317–319; 12, s. 23.]



Kuva 5. Aurinkokennon toimintaperiaate. Muokattu lähteestä [13].

Aurinkopaneeli valmistajien ilmoittamat tehontuottoarvot perustuvat standardiin *IEC CLC/TS 61683*, jossa määritellään testausten mittausolosuhteet. Mittaus suoritetaan 25 °C:n lämpötilassa ja samalla aurinkopaneeliin kohdistetaan 1000 W/m² säteilyn tehoteho. Jos yhden neliömetrin aurinkopaneeli kykenee muuntamaan testitilanteen säteilystä sähkötehoksi 200 W, silloin aurinkopaneelin hyötysuhde olisi 20 % ja ilmoitettu tehontuotto 200 W_p.

3.2 Yksikidepiikkenno



Kuva 6. Yksikidepiikkenno. Muokattu lähteestä [16, 17].

Yksikiteisen piikennon (mono-crystalline, c-Si) tunnistaa helposti niiden muodosta, jossa kulmat ovat hieman pyöristetyt, kuten kuvasta 6 on nähtävissä. Ensimmäiset kaupalliseen käyttöön tarkoitetut aurinkopaneelit olivat yksikiteisillä piikkennoilla varustettuja. Yksikiteisten piikkennojen teoreettinen maksimaalinen hyötysuhde on 33 % ja verrattuna muihin aurinkopaneelityyppeihin, niillä on tällä hetkellä saavutettu erittäin hyvä hyötysuhde (kaupallisissa noin 19–24 % ja laboratorioissa 27–28 %). Edellä mainitut hyötysuhteet pätevät, kun kennoihin ei olla keskitetty esimerkiksi peilien avulla auringonsäteilyä. Yksikidepiikkennojen kompastuskivi on valmistuksessa, joka on työlästä ja hidasta, jonka takia ne ovat myös kalliimpia kuin ohutkalvokennot tai monikiteiset piikennot. Valmistusprosessi on kuitenkin kehittynyt vuosi vuodelta, jonka seurauksena hinta on myös laskenut. Ohutkalvokennojen valmistus on edelleen edullisempää kuin yksi- tai monikidepiikkennojen, mutta valmistuskustannusten välinen kuilu on tasaisesti kaventunut. Yksikidepiikkennoja käytetään korkeammista valmistuskustannuksista huolimatta keskikoisissa ja suurissa aurinkovoimaloissa, jossa maan arvo on kallista ja aurinkopaneelilta toivotaan hintavan maan johdosta korkeampaa hyötysuhdetta. [9, s. 22; 10, s. 321–322; 18.]

3.3 Monikidepiikkenno



Kuva 7. Monikidepiikkenno. Muokattu lähteestä [16, 17].

Monikiteisen piikennon (multi-crystalline, mc-Si) valtti on sen kustannuksen ja sähkön- tuoton välinen suhde. Sen hyötysuhde on hieman heikompi kuin yksikiteisellä piiken- nolla, mutta valmistukseen kelpaa hieman epäpuhtaampia raaka-aineita ja prosessi on siksi yksinkertaisempaa sekä halvempaa. Monikidepiikennot ovat myös fyysiseltä muo- doltaan sopivampia aurinkopaneeleihin, sillä verrattuna yksikiteiseen piikennoon, moni- kiteisten piikentöjen kulmat ovat suorat, kuten kuvasta 7 on nähtävissä. Tämä mahdol- listaa aurinkopaneelin pinta-alan tehokkaamman hyödyntämisen. Kun aurinkokennot peittävät suuremman pinta-alan, osuvat myös auringonsäteet suuremmalle alueelle. Tämä pinta-ala eroavaisuus kompensoi hieman eroavaisuuksia kennojen hyötysuh- teessa. Laboratoriossa on saavutettu noin 23 %:n hyötysuhde, kun kaupallisissa versi- oissa se on tällä hetkellä tyypillisesti noin 16–19 %. [9, s. 22; 10, s. 321–322; 18.]

3.4 Ohutkalvokennot



Kuva 8. Ohutkalvokenno [14].

Ohutkalvokennoiksi (thin film, TFPV) luetellaan seuraavat kennotyypit:

- Amorfinen pii (a-Si)
- Kadmiun-telluri (CdTe)
- Kupari-indium-gallium-selenidi (CIGS/CIS)

Ohutkalvokennot ovat nimensä mukaisesti ohuempia kuin perinteiset yksi- tai monikiteisestä piistä valmistetut kennot. Yhden ohutkalvokennon ollessa vain noin 1–2 μm paksu, niiden tuottamiseen kuluu merkittävästi vähemmän raaka-ainetta verrattuna yksikidepiikennoon, jonka paksuus on tyypillisesti noin 300–350 μm . Ohuen rakenteensa seurauksena niiden valmistus on yksinkertaisempaa, ja siitä aiheutuvat kustannukset ovat myös halvempia kuin yksi- tai monikiteisestä piistä valmistetut kennot. Kuvassa 8 näkee, kuinka ohuessa rakenteessa on myös hyvänä puolena kevyt paino ja taittuva rakenne, joka mahdollistaa asentamisen kaareville pinnoille. Ohutkalvokennot eivät ole vielä saaneet suurta markkinaosuutta, sillä niiden hyötysuhteen ollessa heikompi, ne vaativat suuremman pinta-alan saavuttaakseen vastaavanlaisen tehon kuin kilpailevat tekniikat. Toinen heikko puoli ohutkalvokennoissa on, että osa niiden raaka-aineista ovat ihmisille ja ympäristölle haitallisia.

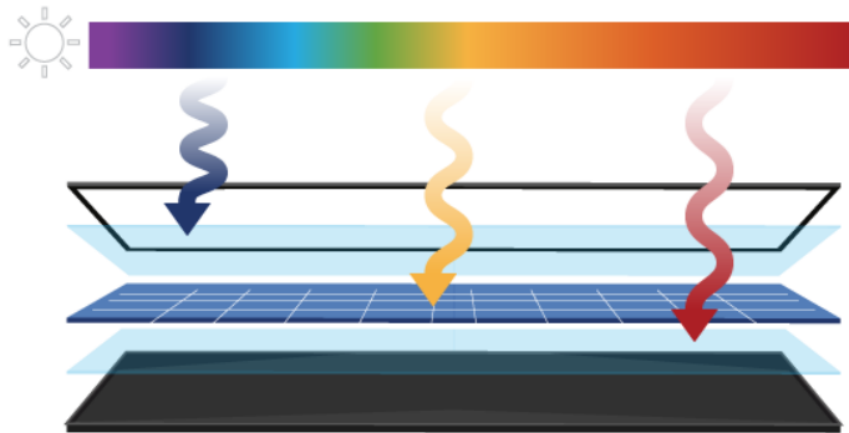
Kaupallisissa ohutkalvokennoissa sähköntuotannon hyötysuhde on tyypillisesti noin 7–14 %, joka ei ole yhtä hyvä kuin kilpailevilla paneelityypeillä. Laboratorio olosuhteissa ohutkalvokennoilla on saavutettu jopa 23–24 % hyötysuhde. Sähköntuotto heikkenee myös vuosien aikana enemmän ohutkalvokennoissa kuin yksi- tai monikidepiikkennoissa, eli toisin sanoin paneeli vanhenee nopeammin. Ohutkalvokennot pystyvät hyödyntämään kohtalaisen hyvin hajasäteilyä, jolloin ne eivät ole yhtä alttiita varjolle kuin yksi- tai monikidepiikennot. Ohutkalvokennoista on myös kehitetty versioita, jotka hyödyntävät pelkästään ultravioletti- ja infrapunasäteilyä, eivätkä näkyvän valon spektriä. Se tarkoittaa, että ne päästävät näkyvän valon läpi, jolloin olisi mahdollista asentaa niitä ikkunoihin. Niiden hyötysuhde on kuitenkin toistaiseksi erittäin heikko sen ollessa vain parin prosentin suuruusluokkaa. Kuvassa 9 on esitetty maailmanlaajuisia aurinkopaneelimarkkinoita, josta näkee, kuinka yksi- ja monikidepiikennot dominoivat markkinoita. Ohutkalvokennojen osuus on noin 7 %. [9, s. 23–24; 10, s. 323.]

Global Solar Power Market Share, By Solar Photovoltaic Technology, 2019



Kuva 9. Markkinaosuudet kennotyypeittäin. Yksi- ja monikidepiikennot dominoivat markkinoita [15].

3.5 Moniliitoskennot



Kuva 10. Moniliitoskennot hyödyntävät eri säteilytaajuuksia tehokkaasti [19].

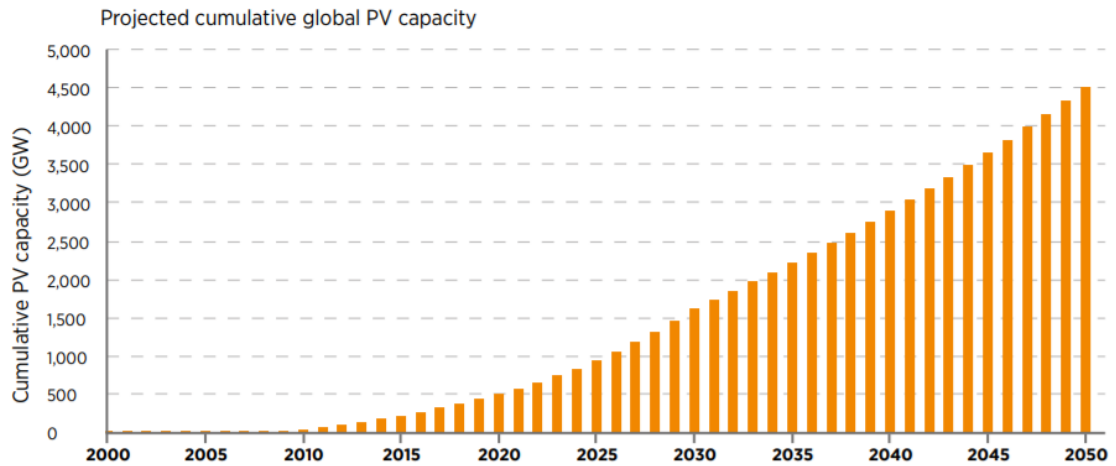
Moniliitoskennot (multijunction cell) ovat hyötysuhteeltaan ylivoimaisesti parhaiten suoriutuvat aurinkokennotyypit. Useimmat moniliitoskennot koostuvat useista CIGS tai CIS kerroksista, joista jokainen on suunniteltu hyödyntämään tiettyjä aallonpituuksia sähkömagneettisella spektrillä. Kuvassa 10 on havainnollistettu toimintaperiaatetta, jossa eri kerrokset hyödyntävät eri aallonpituuksia, esimerkiksi ensimmäinen kerros hyödyntää ultraviolettisäteilyä, kun seuraava kerros hyödyntää näkyvää valoa ja viimeinen hyödyntää matalataajuisempaa infrapunasäteilyä. Koska moniliitoskennot kykenevät hyödyntämään suurempaa osaa sähkömagneettisesta spektristä kuin perinteiset yksi- tai moniki-depiikennot, tuottavat ne suuremman jännitteen, jolloin niiden hyötysuhde on merkittävästi parempi. Laboratorio olosuhteissa on mitattu jopa 46 %:n hyötysuhde, kun moniliitoskennoon on samalla keskitetty säteilyä. Jos kerroksia lisättäisiin loputtoman monta, teoriassa voitaisiin saavuttaa 86 %:n hyötysuhde. Moniliitoskennojen rakenne on usean puolijohdekerroksen takia erittäin monimutkainen, jonka takia sen valmistaminen on kallista ja tekniikka käytetään tällä hetkellä pääsääntöisesti tieteellisiin tarkoituksiin sekä avaruusteollisuudessa. [9, s. 23–24; 10, s. 323–324; 18; 19.]

3.6 Aurinkopaneelien ympäristövaikutukset



Kuva 11. Aurinkopaneelien pystytään nykyään kierrättämään tehokkaasti [20].

Tyypillisestä aurinkopaneelistä noin 70 % on lasia, 10 % on muovia, 15 % on alumiinia ja jäljellejäävä osuus on piitä. Kuva 11 demonstroi aurinkopaneelien kierrätyksen mahdollisuutta ja tärkeyttä. Aurinkopaneelien on käytetty aurinkovoimalaitos mittakaavassa melko lyhyen ajan. Koska niiden elinikä on tyypillisesti noin kolmekymmentä vuotta, niin kierrätettävää ei ole juurikaan vielä ollut, jonka seurauksena myöskään tehokasta infrastruktuuria ei ole aiemmin kehitetty. Asiaan ollaan kuitenkin heräämässä, sillä kuten kuvasta 12 on nähtävissä, aurinkopaneelimarkkinoiden räjähdysmäisen kasvun seurauksena kierrätettävää on pian erittäin paljon. Hyvä uutinen on kuitenkin se, että Ranskaan on äskettäin avattu aurinkopaneelien kierrätyslaitos, joka tavoittelee kierrättävänsä jopa 65 % Euroopan aurinkopaneelista saaden 95 % materiaalista uusiokäyttöön. Euroopassa olemme kierrätyksen edelläkävijä, mutta huomioiden aurinkopaneelien pitkän eliniän ja globaali kehitys sinä aikana, tulee kierrätyslaitoksia todennäköisesti myös muuallekin, ennen kuin niistä muodostuu jäteongelma. [20; 21; 22.]



Kuva 12. Maailmanlaajuisen aurinkosähkötuotannon ennustettu nimellisteho [21].

Suomenlahden olosuhteissa vaakatasoon suunnatun aurinkopaneelin ”energian takaisinmaksuaika”, eli tuotantoon käytetty energia palautuu takaisin noin kahdessa vuodessa. Kuluneen ajan jälkeen aurinkopaneelin tuottama sähköenergia on suoraan pois laivan polttoainekulutuksesta, ilmastopäästöistä ja hiilijalanjäljestä. Aurinkopaneelien elinkaari on lähes sama kuin uuden laivan, joten 30 vuoden aikana aurinkopaneelit tuottaisivat noin 14 kertaa enemmän sähköenergiaa kuin niiden tekemiseen on kulunut. Tämä vertauskuva pätee vain nykytilanteessa, sillä tuotantomenetelmät kehittyvät vauhdilla ja tulevaisuudessa aurinkopaneelien tuotanto kuluttaa entistä vähemmän energiaa, jolloin energian takaisinmaksuaika on vielä lyhyempi kuin nyt. [23; 24.]

4 Aurinkopaneeliin liittyviä laskelmia

4.1 Sähköteho

Aurinkopaneelien tuottama sähköteho saadaan laskettua kaavasta 1: [10, s. 332.]

$$P = UI = \eta * S * A \quad (1)$$

P on aurinkopaneelin tuottama teho watteina (W)

U on aurinkopaneelissa syntyvä tasajännite volteissa (V)

I on johtimissa kulkeva sähkövirta ampeereina (A)

η on aurinkopaneelin hyötysuhde (0,00–1,00 välillä)

S on Auringon hetkellinen säteilyvoimakkuus (W/m²)

A on aurinkopaneelin pinta-ala (m²).

4.2 Tehohäviöt

Aurinkopaneelien ja sähkönsiirtojohtimen tehohäviö saadaan laskettua kaavasta 2:

$$P_H = I^2 R \quad (2)$$

P_H on johtimissa syntyvä lämpöhäviö watteina (W)

I on johtimissa kulkeva sähkövirta ampeereina (A)

R on johtimen vastus ohmeina (Ω).

4.3 Hyötysuhde

Aurinkopaneelien hyötysuhde prosenteissa saadaan laskettua auringonsäteilyn tehokkuuden ja aurinkopaneelien tehotuoton suhteesta kaavalla 3: [10, s. 332.]

$$\eta = \frac{P}{S \cdot A} * 100 \% \quad (3)$$

η on hyötysuhde (0–100 % välillä)

P on aurinkopaneelin tuottama sähköteho watteina (W)

S on Auringon hetkellinen säteilyvoimakkuus (W/m²)

A on aurinkopaneelin pinta-ala (m²).

4.4 Aurinkoenergiajärjestelmän hyötysuhde

Hyötysuhde saadaan suhteuttamalla invertterin syöttämää sähkötehoa aurinkopaneelisiin kohdistuvaan säteilytehoon (kaava 4). Toinen vaihtoehto on, että kaavaan lisätään ajallisesti vuotuisat arvot. Kuten aiemmin osoitin, Suomenlahdella Auringon kokonaisenergiämäärä on vuodessa 1034 kWh/m². Osoittajaan pitäisi tässä tapauksessa sijoittaa totetunut päteho yhden vuoden aikana (kWh).

$$\begin{aligned} \text{Järjestelmän hyötysuhde } \eta_{\text{järjestelmä}} &= \frac{3 \sim \text{Invertterin verkkoon syöttämä päteho}}{\text{Säteilyvoimakkuus} \cdot \text{paneelien pinta-ala}} = \\ \frac{\sqrt{3} \cdot I_v \cdot U \cdot \cos \varphi}{S \cdot A} &= \eta_{\text{paneeli}} + \eta_{\text{sähkönsiirto}} + \eta_{\text{invertteri}} \end{aligned} \quad (4)$$

I_v on invertterin syöttämän yhden vaiheen sähkövirta (A)

U on pääjännite (tyypillisesti 400 V, mutta laivoissa voi myös olla 690 V, 3300 V tai 6600 V)

$\cos \varphi$ on tehokerroin, joka kuvastaa päte- ja näennäistehon suhdetta

S on säteilyn hetkellinen tehoiheys (W/m²)

A on aurinkopaneelien pinta-ala (m²)

η_{paneeli} on aurinkopaneelin hyötysuhde (tyypillisesti 15–22 %)

$\eta_{\text{sähkönsiirto}}$ on johtimien, erotuskytkimien ja suojalaitteiden hyötysuhde

$\eta_{\text{invertteri}}$ on vaihtosuuntaajan hyötysuhde (tyypillisesti 97–98 %).

4.5 Ilmansuunnan ja paneelikulman muunnoskerroin

Huomioin eri pintojen kaltevuuksien ja ilmansuunnan vaikutuksen Ilmatieteenlaitoksen mittauksiin perustuvalla muunnoskertoimella F_{kulma} , joka muuntaa Auringon kokonaissäteilyenergian vaakasuoralta pinnalta sekä 90°:n että 45°:n kulmassa olevaan pintaan. Ilmatieteenlaitoksen tekemä muunnoskerroin huomioi lisäksi kaikkien kahdeksan ilmansuuntien (360°, 045°, 090°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) vaikutuksen kiinteissä asennuksissa. Paneelien sähköntuotto heikkenee merkittävästi, niiden ollessa suunnattuna luoteen ja koillisen välisille suunnille. Koska laiva liikkuu jokaiseen suuntaan ja siihen asennetut aurinkopaneelit sen mukana, niin tässä työssä käytin jokaisen suunnan vaikutuksen yhteenlaskettua keskiarvoa. Toisin sanoin muokkaamani muunnoskerroin kuvastaa, kuinka säteilyn voimakkuus heikkenee esimerkiksi, jos paneelit asennetaan pystysuoraan laivan kyljelle suhteessa vaakasuoraan laivan katolle. Kerroin F_0 kuvastaa tilannetta, jossa paneelit ovat vaakasuorassa asennossa ja sen suuruus on yksi, joten taulukon F_{45° ja F_{90° kertoimet ovat suhteutettuna vaakasuoraan asentoon. Ilmatieteenlaitoksen alkuperäiset mittaukset ovat myös tarkasteltavissa liitteessä 3. [25.]

Taulukko 4. Muunnoskertoimet F_{45° ja F_{90° , jotka koostuvat kaikkien ilmansuuntien vaikutuksen keskiarvosta. Raakadata on ilmatieteenlaitoksen mittaamaa, josta olen muokannut laivalle paremmin soveltuvan kertoimen.

Kuukausi	Muunnoskerroin F_{45°	Muunnoskerroin F_{90°
Tammikuu	1,260	1,265
Helmikuu	1,181	1,105
Maaliskuu	1,062	0,983
Huhtikuu	0,899	0,683
Toukokuu	0,837	0,623
Kesäkuu	0,839	0,610
Heinäkuu	0,832	0,618
Elokuu	0,891	0,667
Syyskuu	0,970	0,783
Lokakuu	1,081	0,861
Marraskuu	1,228	1,134
Joulukuu	1,343	1,354
Koko vuoden keskiarvo	1,035	0,891
Maalis-Lokakuun keskiarvo	0,926	0,729

Kuten taulukosta 4 käy ilmi, niin marras–helmikuun välisenä aikana kallistettuihin aurinkopaneelisiin kohdistuu laiva-asennuksissa suurempi määrä säteilyä kuin vaakasuoraan. Eroavaisuus on seuraus siitä, että Aurinko paistaa matalalta tuona aikana. Kuten taulukosta 2 ja 3 käy ilmi, suurin osa vuoden säteilystä ajoittuu kuitenkin maaliskokuun väliselle ajalle ja vuodenvaihteen tienoilla säteily on lähes olematonta, jonka takia laiva-asennuksissa kannattaa asentaa paneelit mahdollisuuksien mukaan vaakasuoraan. Kallistetut paneelit saattavat olla parempi vaihtoehto, jos laiva ajaa aina samaa menopuoleita. Silloin pystyy huomioimaan, mistä suunnasta aurinko paistaa laivan päälle. Jos laivalla ei ole säännöllistä reittiä, vaan laiva ajaa jokaiseen ilmansuuntaan, aurinkopaneelit kannattaa asentaa vaakasuoraan.

4.6 Aurinkopaneeliston hinta

Aurinkopaneelit eivät ole suoraan verrattavissa keskenään, sillä eri valmistajien tuotteilla on eri hyötysuhde, tehontuotto ja pinta-ala. Niitä voidaan kuitenkin verrata helposti keskenään ottamalla edellä mainitut seikat huomioon kaavalla 5: [9, s. 40–41; 26.]

$$\frac{\text{€}}{P_p} = \frac{\text{€/A}}{\eta * S_{test}} \quad (5)$$

€ on aurinkopaneelistosta maksettu hinta

P_p on aurinkopaneeliston tuottama huipputeho (W_p)

S_{test} on testiolosuhteissa säteilyvoimakkuus (1000 W/m^2)

A on aurinkopaneeliston pinta-ala (m^2)

η on aurinkopaneelin hyötysuhde (0,00–1,00).

Vuonna 2010 c-Si aurinkopaneelien hinta oli noin $3 \text{ €/}W_p$, kun se tänä päivänä on melkein kymmenesosa siitä $0,33 \text{ €/}W_p$, alv 0 %. Ennustetaan, että paneelien hinnanlasku on tasautumassa, mutta tulevaisuudessa paneelien hyötysuhde kehittyy edelleen noin 5 % vuosittain, joka puolestaan laskee $\text{€/}W_p$ suhdetta. [9, s. 40; 27.]

4.7 Aurinkoenergiajärjestelmän karkea takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika on riippuvainen aurinkoenergiajärjestelmästä maksetusta hinnasta, sen hyötysuhteesta, auringonsäteilyenergiasta vuotuisella tasolla ja sähköhinnasta. Kaava 6 antaa karkean takaisinmaksuajan, mutta laskelma ei huomioi annuiteettia, mikäli hankinta rahoitetaan esimerkiksi lainarahalla, eikä käyttö- ja ylläpitokuluja sekä noin 0,5 % vuotuista tehotuoton heikkenemistä. [26.]

$$\text{Arvioitu takaisinmaksuaika vuosissa} = \frac{\text{Järjestelmän hinta}}{\text{Vuotuinen säästö}} \quad (6)$$

Osoittajaan sijoitetaan järjestelmästä maksettu hinta (€)

Nimittäjään sijoitetaan vuotuinen säästö, jonka järjestelmä tuottaa (€).

4.8 Aurinkoenergiajärjestelmällä tuotetun sähkön hinta (LCOE)

LCOE (Levelized Cost of Energy, kaava 7) on yleinen tapa mitata sähkötuotannon kannattavuutta ja verrata eri tuotantomenetelmiä keskenään. Sillä lasketaan elinkaarikustannukset, jotka jaetaan elinaikana tuotetulla sähkön määrällä. Eri toimijoiden laskemat LCOE luvut eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään ilman, että näkee jakolaskun tekijät. [28.]

$$\begin{aligned} LCOE \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) &= \frac{\text{Elinkaarikustannukset}}{\text{Elinaikana tuotetun sähkön määrä}} \quad (7) \\ &= \frac{I_t + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \end{aligned}$$

n on projektin elinkaari vuosissa (esimerkiksi 30 vuotta)

I_t on investointikustannus (hankitakulut €)

O&M (Operation and maintenance) on vuoden käyttö- ja ylläpitokulut (€)

F_t on vuoden polttoainekulut (aurinkopaneeleilla 0 €)

E_t on aurinkopaneeleille vuodessa tuotetun sähkön määrä (kWh)

r on korkokanta, joka huomioi vuosien aikana inflaation sekä tehotuoton heikkenemisen. (0–1 välillä).

5 Rajavartiolaitoksen vartiolaiva Turva (IMO 9650377)



Kuva 13. Rajavartiolaitoksen vartiolaiva Turva [29].

5.1 Tekniset tiedot:

Alla esitän Turvan avainlukuja, jotka auttavat lukijaa hahmottamaan aluksen kokoluokkaa sekä suorituskykyä.

- Rakennusvuosi: 2014
- Uppouma: 4000 t
- Pituus: 95,9 m
- Nopeus: 18 solmua
- Leveys: 17,4 m
- Koneteho: 11 600 kW
- Syväys: 5,5 m
- LNG tankki: 216 m³
- Peräkansi: 350 m²
- Helikopterikansi 334 m²

5.2 Yleisesittely

Vartiolaiva Turva on Rajavartiolaitoksen suurin monitoimialus (kuva 13), jonka pääasialliset tehtävät ovat meripelastus, rajavalvonta, ympäristövahinkojen torjunta ja alueellisen koskemattomuuden turvaaminen, jonka lisäksi tehtäväkenttään kuuluu myös yleisen järjestyksen ja turvallisuuden ylläpito, kalastuksen- ja vesiliikenteenvalvonta sekä viranomaisyhteistyötehtävät Ympäristökeskuksen, Poliisin, Pelastuslaitoksen ja muiden toimijoiden kanssa. Turva kykenee hinaamaan suurimpiakin Itämerellä liikennöiviä aluksia ja evakuoimaan onnettomuustilanteessa risteilyaluksen verran ihmisiä. Suuronnettomuustilanteessa Turvalla on hyvät valmiudet toimia onnettomuuspaikan johtajana osallistuen myös itse pelastustoimiin. Ympäristövahinkojen torjuntaan Turvalla on tehokas öljynkeräysjärjestelmä, jonka avulla merenpinnasta voidaan nostaa tuhat kuutiometriä öljyä Turvan keräystankkeihin.

Turvan suunnitteluvaiheessa on huomioitu merkittävällä painoarvolla ympäristö, oma vaurionsietokyky ja toiminnan tehokkuus. Aluksella on myös DP 2 (Dynamic positioning) -luokitus, jolla alus kykenee pysymään merellä tarkasti paikoillaan tiettyyn rajaan asti tuulesta ja aallokosta riippumatta. Järjestelmä asettaa toimintavarmuudelle merkittäviä vaatimuksia ja kahdennettuja järjestelmiä on paljon päällekkäin, sillä seuraukset voivat olla kohtalokkaat esimerkiksi yhden tietokoneen pettäessä, jos oletusarvona pidetään, että alus pysyy paikoillaan ja yhtäkkiä se lähtisikin tuuliajolle. Turva on myös yksi ensimmäisistä aluksista Itämerellä, joka käyttää pääasiallisena polttoaineena LNG:tä (nesteytettyä maakaasua). LNG on meriteollisuudessa erittäin ympäristöystävällinen verrattuna öljyyn, sillä se tuottaa noin 25 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä ja 85 % vähemmän typpioksidipäästöjä eikä lainkaan rikkioksi- tai hiukkaspäästöjä. Kansainvälinen merenkulunjärjestö IMO asetti voimaan tammikuun alusta uudet päästörajoitukset, jotka vähentävät kaasupäästöjen pienhiukkasten määrää noin 75 %. Alukset, jotka käyttävät polttoaineena LNG:tä alittavat nämä vaatimukset ilman erillisiä pakokaasun puhdistusjärjestelmiä. On myös todennäköistä, että tulevaisuudessa päästörajoitukset tiukentuvat entisestään, jolloin muut fossiiliset polttoaineet joutuvat entistä ahtaampaan rakoon. LNG:ssäkin on kuitenkin omat kompastuskivensä. On tärkeää pitää huoli, ettei sitä vuoda ilmaan missään vaiheessa prosessia, jossa se otetaan talteen, käsitellään ja käytetään loppukuluttajan toimesta. Kaasuuntuessa LNG:stä muodostuu jopa kolmekymmentäkertaa potentiaalisempi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. [30.]

LNG:n ominaisuudet (EU:n kesiarvo) ovat seuraavat [31]:

- Tiheys: 450 kg/m³ (todellisuudessa vaihtelee hieman)
- Energia: 49,5 MJ/kg
- Energia: 13,75 kWh/kg
- Energia: 6 188 kWh/m³
- Päästökerroin 55,1 g CO₂/MJ

5.3 Aluksen moottorit

Turvalla on viisi polttomoottoria, joista kolme on pääkoneita, neljäs on satamakone ja viides on hätägeneraattori. Pääkoneina toimii Wärtsilän ympäristöystävälliset 34DF-sarjan moottorit, joista suurin on V-mallinen kahdellatoista sylinterillä ja kahdella jäljellejäävällä on kullakin kuusi sylinteriä ja ovat malliltaan rivimoottoreita. Jokaisen pääkoneen sylinteri tuottaa tehoa 450 kW, eli yhteensä 10 800 kW, jolla syötetään aluksen 690-voltista, 3-vaiheista 50 Hz:n verkkoa. Moottorit toimivat sekä dieselillä että nesteytettyllä maakaasulla (LNG), mutta kuluttavat pääsääntöisesti LNG:tä. V-12 malliseen pääkoneeseen on kytketty akseligenaattori, jonka teho on 4 000 kW. Kaksi pienempää pääkoneetta pyörittävät 2 700 kW:n tehoisia generaattoreita. Kuusisylinteriset moottorit kuluttavat 75 %:n kuormalla energiaa 7 850 kJ/kWh ja kaksitoistasylinterinen moottori vastavassa tilanteessa 7 810 kJ/kWh. Satamakone kuluttaa energiaa 50 %:n kuormalla noin 9 100 kJ/kWh. [32; 33.]

Esitän hypoteettisen esimerkin, jossa vartiolaiva Turva olisi kulussa vuoden jokaisena päivänä keskimäärin kuusi tuntia 4 000 kW teholla. Joka toinen päivä alus käyttäisi suurempaa pääkoneetta ja toisena päivänä kahta pienempää. Loput vuorokaudesta laiva olisi kiinnitettynä satamaan tai ankkurissa, jolloin sähköä tuotettaisiin satamakoneella 400 kW teholla yhteensä kahdeksantoista tuntia päivässä. Yksinkertaistan myös malliani, jossa energiakulutus katetaan pelkästään LNG:llä, eikä lainkaan dieselillä. Tällöin laskennallinen vuotuinen energiakulutus olisi kaavan 8 mukaan noin [32; 33.]:

$$\begin{aligned}
 & 365 \text{ päivää} * [(Satamakoneen energiakulutus) + (Pääkoneiden energiakulutus)] \quad (8) \\
 & = 365 \text{ päivää} * \left[\left(18 \text{ h} * 400 \text{ kW} * 9\,100 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right) + \left(6 \text{ h} * 4\,000 \text{ kW} * \frac{7850 + 7810}{2} \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right) \right] \\
 & = 92\,505\,600 \text{ MJ} = 25\,696\,000 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Josta satamakoneen osuus olisi kaavan 9 mukaisesti:

$$365 \text{ päivää} * 18 \text{ h} * 400 \text{ kW} * 9\,100 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 23\,914\,800 \text{ MJ} = 6\,643\,000 \text{ kWh} \quad (9)$$

Turvan LNG polttoainetankki on tilavuudeltaan 216 m³. Tankkeihin jätetään aina pieni paisuntavara, joten oletetaan, että yksi täysi tankillinen on 200 m³ LNG:tä. Polttoainetankin energiamääräksi saadaan kaavan 10 mukaisesti:

$$\text{Polttoainetankin energiamäärä} = 200 \text{ m}^3 * 6\,188 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} * 3,6 = 4\,455\,360 \text{ MJ} \quad (10)$$

Hypoteettisessa esimerkissäni Turvan vuotuiset energiatarpeet katetaan noin kahdella-kymmenelläyhdeellä tankkauksella (kaava 11).

$$\text{Tankkausten määrä} = \frac{\text{Vuoden energiakulutus}}{\text{Tankillisen energiamäärä}} = \frac{92\,505\,600 \text{ MJ}}{4\,455\,360 \text{ MJ}} = 20,8 \quad (11)$$

Gasumilta saamani tiedon mukaan tämän päivän hinnoilla yksi tonni LNG:tä toimitettuna tankkiautolla maksaa karkeasti noin 400 €/t [34]. Hinta on pelkästään suuntaa antava, sillä siihen vaikuttaa todellisuudessa moni tekijä, kuten tilauksen määrä, sijainti, toimitusehdot ja pitkäaikaiset sopimukset.

Kuten aiemmin totesin, mahtuu Turvan polttoainetankkiin noin 200 m³ LNG:tä, ja nesteytetyn maakaasun keskimääräinen tiheys EU:ssa on 450 kg/m³. Tällöin tankkiin mahtuisi 90 tonnia nesteytettyä maakaasua, jonka hinnaksi tulisi toimitettuna karkeasti 36 000 €.

Seuraavaksi esitän aurinkosähkön potentiaalin hahmottamiseksi laskelmia, joissa käy ilmi, kuinka suuren osuuden vartiolaiva Turvan energiakulutuksesta aurinkopaneeleilla voisi kattaa.

5.4 Helikopterikansi



Kuva 14. Vartiolaiva Turvan helikopterikansi [29].

Turvan helikopterikannen pinta-ala on 334 m^2 , ja sijainniltaan se on aluksen yksi potentiaalisimmista kohdista asentaa aurinkopaneeleita. Kuten kuvassa 14 näkee, kansi on pinta-alaltaan melko suuri, tasainen ja vapaa, joten paneeleihin ei kohdistuisi merkittäviä varjohaittoja. Esimerkissäni, joka on nähtävissä liitteessä 1, on helikopterikannen päällä 192 kappaletta tyypillistä yksikiteistä aurinkopaneelia, pinta-alaltaan $1,6 \text{ m}^2$, jotka tuottavat kukin 300 W_p :n tehon 19 %:n hyötysuhteella. Järjestelmän tehontuotto on $57,6 \text{ kW}_p$. Aurinkopaneelien pinta-ala yhteensä (192 paneelia) on näin ollen $307,2 \text{ m}^2$.

5.4.1 Helikopterikannen pinta-alan tuottopotentiali

Aurinkopaneelien vuotuinen tehontuotto olisi kaavan 12 mukaan noin

$$I * \eta * A = 1034 \frac{kWh}{m^2} * 0,19 * 307,2 m^2 = 60\,352 kWh \quad (12)$$

Missä I on insolaatio, eli Suomenlahdella vuotuinen Auringon säteilyenergian määrä vaakasuoralla pinnalla

η on aurinkopaneelin hyötysuhde

A on aurinkosähköpaneeliston pinta-ala.

Jos suhteutetaan helikopterikannen aurinkosähköpotentialia aluksen vuotuiseseen energiakulutukseen (hypoteettisen esimerkkini mukaisesti), niin kaavan 13 jakolaskun mukaisesti:

$$\begin{aligned} \text{Aurinkosähkön osuus kokonaiskulutuksesta} &= \frac{\text{Aurinkopaneeleilla tuotettu teho}}{\text{Aluksen vuoden energiakulutus}} \quad (13) \\ &= \frac{60\,352 kWh}{25\,696\,000 kWh} * 100 \% = 0,23 \% \end{aligned}$$

ja vastaavasti kaavan 14 mukaisesti satamakoneen:

$$\frac{60\,352 kWh}{6\,643\,000 kWh} * 100 \% = 0,91 \% \quad (14)$$

5.4.2 Helikopterikannen haasteet

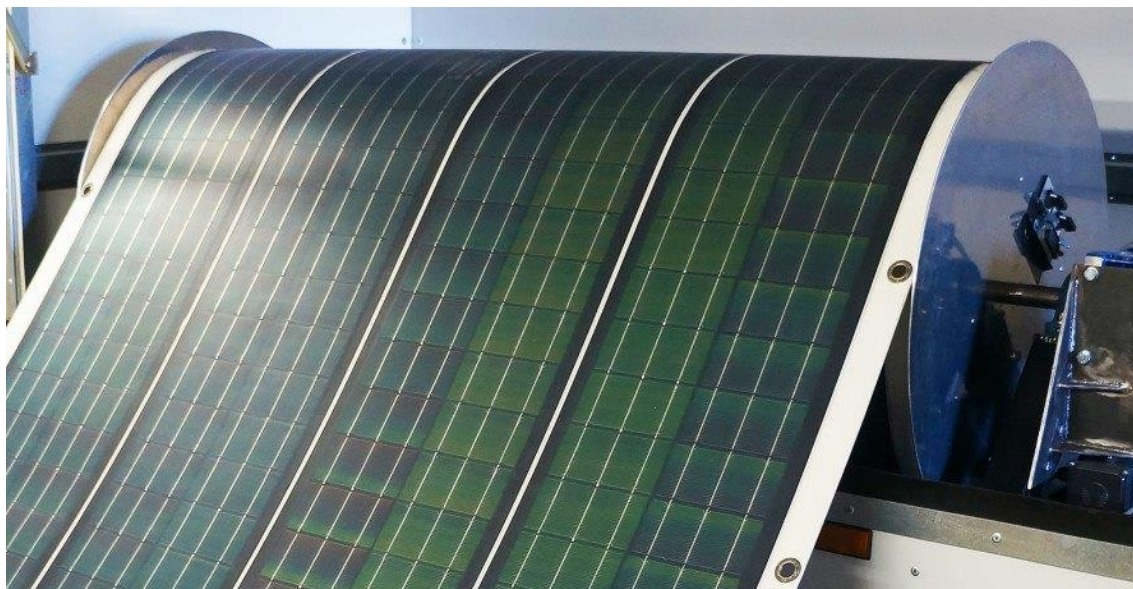
Helikopterikantta ei voi kuitenkaan täysin peittää kiinteillä aurinkopaneeleilla, sillä kannessa on kiinnityspisteitä helikopterille ja muulle lastille, joita ei voi peittää. Kannella on myös valoja, joiden avulla lentäjä pystyy turvallisesti laskeutumaan. Kannen tulee lisäksi olla mekaanisesti niin kestävä, että helikopteri pystyy laskeutumaan huonossakin kelissä väkisin aiheuttaen iskun kanteen. Kannessa tulee myös olla riittävä kitka, jotta kannella toimivat henkilöt, lasti ja helikopteri eivät liu'u alas laivan keinuessa. Helikopterikansi taittuu myös osittain sisään, jolloin taitosten kohdalla ei voi myöskään olla kiinteitä aurinkopaneeleita. Talvisin kantta myös lämmitetään tehokkailla sähkövastuksilla, jotka pitävät

kannen sulana. Lämpö heikentää aurinkopaneelien tuottoa ja on myös yleisesti tiedossa, että lämpö lyhentää sähkökomponenttien elinkaarta.

Vartiolaiva Turva torjuu myös öljy- ja kemikaalivahinkoja, joissa voi pahimmissa tapauksissa esiintyä räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamia vaaroja. Sähkölaitteiden räjähdyssuojusrakenteet tulevat olla mahdollisesti esiintyviin tilanteisiin sopivia, esimerkiksi varmennettu rakenne *Exe*, jossa ei saa esiintyä kipinöintiä, valokaaria eikä kuumia pintoja. Toinen mahdollinen vaihtoehto on luonnostaan vaaraton rakenne *Exi*, jossa virtapiirissä oleva energia on rajoitettu semmoiseen arvoon, ettei se pysty sytyttämään räjähtävää kaasuseosta. Räjähdysvaara on huomioitava, sillä aurinkopaneelit tuottavat aina tyhjäkäyntijännitteen, kun Aurinko paistaa niihin riippumatta siitä, onko virtapiiri avattu erotinkatkaisijasta. Paneelien tuottama jännite voi mahdollisesti aiheuttaa kipinän jonnekin, jos kyseistä asiaa ei huomioida suunnittelussa.

5.4.3 Ohutkalvokennorulla

Kuvan 15 ja 16 kaltainen ohutkalvokennorulla voisi mahdollisesti ratkaista edellä mainitut pulmat.



Kuva 15. Ohutkalvoaurinkojärjestelmä rullalla [35].



Kuva 16. Renova Genin ohutkalvopaneelirulla vedetään auki autolla [35].

Tulevaisuudessa kun ohutkalvokennojen hyötysuhde paranee entisestään tai vaihtoehtoisesti, kun moniliitoskennojen volyymi kasvaa ja hinta laskee sellaiselle tasolle, että suurempi kaupallinen toiminta on kannattavaa, jonkinlainen aurinkopaneelirulla voisi tällöin olla varteenotettava vaihtoehto Turva-luokan aluksille. Rullapaneeli voisi olla vedettynä auki suurimman osan ajasta, kun helikopteri ei ole laskeutumassa tai laiva torjumassa ympäristövahinkoja. Lisäksi etuna on, rullatessa paneelin suojaan, se ei tuota enää jännitettä, sillä se on varjossa. Rullapaneeli olisi myös suojattu paremmin mekaanisilta rasitteilta.

Rullat perustuvat ohutkalvokenno tekniikkaan, jonka hyötysuhde on tällä hetkellä edelleen heikko verrattuna yksikide- ja monikidepiikennopaneeleihin. Esimerkiksi kuvien 15 ja 16 aurinkopaneelirullien hyötysuhteet jäävät alle kymmenen prosenttia, kun se yksikidepiikennopaneeleilla on parhaimmillaan yli kaksikymmentä prosenttia. [35.]

5.4.4 Erikoisvalmisteiset yksikidepiiaurinkopaneelit

Toinen mahdollinen ratkaisu esittämiini haasteisiin voisi olla kustomoitu yksikidepiiaurinkopaneeli. Suomalaiselta aurinkopaneelivalmistajalta Valoelta saamani tiedon mukaan nykyään pystytään valmistamaan ohuita yksikiteisiä aurinkopaneeleita, jotka päällystetään lasin sijaan kestäväillä polymeereillä. Tämän tyyppisiä aurinkopaneeleita liimataan kuvan 17 mukaisesti esimerkiksi autoteihin ja niiden kitka vastaa tyypillistä autotietä. Mekaanisesti ne sietävät raskaita kuormituksia ja iskuja. Polymeerit ovat myös korroosion kestäviä, joten ne soveltuisivat sen puolesta hyvin merellisiin olosuhteisiin. Valonläpäisy on polymeeripinnalla hieman heikompi kuin lasilla, mutta testien perusteella merkittävää tehon alenemaa ei esiinny. Valoelta sanottiin myös, että todennäköisesti kyettäisiin tekemään kustomoituja aurinkopaneeleita, joissa olisi ratkaisu EX-tilojen asettamiin vaatimuksiin. [49.]



Kuva 17. Autotie päällystettynä aurinkopaneeleilla [50].

Tiedustelin luokituslaitos DNV GL:n suhtautumista tämän sortin asennukseen Turvan kaltaisessa monitoimialuksessa, jossa esiintyy aiemmin esittämäni haasteet. Vastauksesi sanoivat, että erikoistapaukset hoidetaan tapauskohtaisesti. Prosessin aluksi valmistaja lähettää yksityiskohtaiset piirustukset ja perustelut luokituslaitoksen asianomaiselle päätäntäelimelle, jonka mahdollisen piirustushyväksynnän jälkeen seuraa tyypillisesti valmistajalle vielä tarkentavia kysymyksiä. Jos vastaukset hyväksytään, voidaan edetä kohti laiva-asennusta. [51.]

5.5 Laivan kyljet



Kuva 18. Tyypillisesti kun yksi kylki on Auringossa, toinen on varjossa [29].

Turvan kylki (kuva 18) on erittäin suuri ja melko tasainen pystysuora pinta. Liitteessä 2 on esimerkki, miten asennuksia voisi mahdollisesti toteuttaa. Ajatellen aurinkopaneeli-asennuksia kylkeen, huomioonotettavia seikkoja on, että kylkeen kohdistuu mekaanisia iskuja esimerkiksi laiturikiinnityksessä sekä kylkikiinnityksessä toisen laivan kanssa. Turvan veneresessit sijaitsevat myös molemmilla kyljillä. Resessit ovat peitetty luukuilla, jotka suojaavat veneitä. Luukut laitetaan tyypillisesti kiinni, kun Turva on kulussa. Resessiluukut ovat tasaisia ja pinnansa puolesta soveltuisivat melko hyvin aurinkopaneeli-asennuksiin. Sähkökaapelointiin kohdistuu kuitenkin haasteita, sillä ne liikkuisivat luukkujen mukana ja vuosien varrella niiden eristeet kuluisivat. Aurinkopaneelien tulee myös olla yhteensopivia räjähdysvaarallisten kaasuseosten kanssa.

Liitteen 2 esimerkin mukaisesti veneresessi luukkujen (molemmat kyljet) pinta-alalle mahtuisi yhteensä 75 aurinkopaneelia, jotka ovat ominaisuudeltaan samoja kuin helikopterikannen esimerkissä (1,6 m², 300 W_p, hyötysuhde 19 %). Tällöin aurinkopaneelijärjestelmän pinta-alaksi tulisi 120 m² ja tehoksi 22,5 kW_p. Koska paneelit ovat pystypinnalla ja alus liikkuu jokaiseen suuntaan, on tässä tapauksessa myös huomioitava, että paneelit ovat harvoin optimaalisessa asennossa aurinkoon nähden.

Kylkien pinta-alan tuottopotentiaalia voidaan hahmotella laskennallisesti.

Aurinkopaneelien vuotuinen tehontuotto on kaavan 15 mukaan noin:

$$I * \eta * A * F_{90^\circ} = 1034 \frac{kWh}{m^2} * 0,19 * 120 m^2 * 0,729 = 17\ 186 kWh \quad (15)$$

Missä I on insolaatio, eli Suomenlahdella vuotuinen Auringon säteilyenergian määrä vaakasuoralla pinnalla (kWh/m²)

η on aurinkopaneelin hyötysuhde (19 %)

A on aurinkosähköpaneeliston pinta-ala (m²)

F_{90° on kerroin, joka perustuu ilmatieteenlaitoksen mittauksiin ja se koostuu paneelikulmasta aurinkoon nähden sekä ilmansuunnasta, johon se osoittaa.

Jos suhteutetaan veneressessialueen aurinkosähköpotentiaalia aluksen vuotuiseseen energiakulutukseen (hypoteettisen esimerkkinä mukaisesti), tulokseksi saadaan kaavan 16 mukaisesti:

$$\begin{aligned} \text{Aurinkosähkön osuus kokonaiskulutuksesta} &= \frac{\text{Aurinkopaneeleilla tuotettu teho}}{\text{Aluksen vuoden energiakulutus}} \quad (16) \\ &= \frac{17\ 186 kWh}{25\ 696\ 000 kWh} * 100 \% = 0,07 \% \end{aligned}$$

ja vastaavasti (kaava 17) satamakoneen vuotuisesta energiakulutuksesta:

$$\frac{17\ 186 kWh}{6\ 643\ 000 kWh} * 100 \% = 0,26 \% \quad (17)$$

Toinen vaihtoehto, joka myös näkyy liitteessä 2, voisi olla hyödyntää ohutkalvokennoja, joilla voisi peittää tummansinisiet, merivartiostolle tunnusomaiset vinoviivat laivan kyljessä ja tummansinisiet alueet sillan tuntumassa. Siniseksi maalatun alueen pinta-ala on yhdellä kyljellä 54 m², eli molemmat kyljet yhteensä tuplaavat pinta-alan. Tässä tapauksessa on kuitenkin huomioitava jäävyöhyke, jottei talviaikaan jää rouhi paneeleita rikki.

Tällöin ohutkalvopaneelien vuotuinen tehontuotto olisi kaavan 18 mukaisesti noin:

$$I * \eta * A * F_{90^\circ} = 1034 \frac{kWh}{m^2} * 0,12 * (2 * 54 m^2) * 0,729 = 9\,769 kWh \quad (18)$$

Missä I on insolaatio, eli Suomenlahdella vuotuinen Auringon säteilyenergian määrä vaakasuoralla pinnalla (kWh/m²)

η on ohutkalvopaneelin hyötysuhde (12 %)

A on aurinkosähköpaneeliston pinta-ala (m²)

F_{90° on kerroin, joka perustuu ilmatieteenlaitoksen mittauksiin ja se koostuu paneelikulmasta aurinkoon nähden sekä ilmansuunnasta, johon se osoittaa.

Jos suhteutetaan liitteen 2 mukaisen tummansinisten maalien pinta-alan aurinkosähköpotentiaalia aluksen vuotuisen energiakulutukseen (hypoteettisen esimerkkinä mukaisesti), niin kaavan 19 mukaisesti:

$$\begin{aligned} \text{Aurinkosähkön osuus kokonaiskulutuksesta} &= \frac{\text{Aurinkopaneeleilla tuotettu teho}}{\text{Aluksen vuoden energiakulutus}} \quad (19) \\ &= \frac{9\,769 kWh}{25\,696\,000 kWh} * 100 \% = 0,04 \% \end{aligned}$$

ja vastaavasti (kaava 20) satamakoneen vuotuisesta energiakulutuksesta:

$$\frac{9\,769 kWh}{6\,643\,000 kWh} * 100 \% = 0,15 \% \quad (20)$$

5.6 Laivan peräkansi



Kuva 19. Peräkannen alueella on merkittävästi varjostavia rakenteita [29].

Kuvassa 19 on nähtävissä, kuinka peräkannella on suuri pinta-ala, mutta sitä ympäröi useat pystyrakenteet, jotka aiheuttavat lähes jatkuvan varjohaitan. Peräkannelle laskeaan myös nosturilla usein painavia esineitä, joka asettavat peräkannelle mekaanisen kestävyysvaatimuksen. Lisäksi kannella on paljon suuria luukkuja, joiden saumoja ei voi peittää. Samoin kuin helikopterikannella ja laivan kyljillä peräkannen alueella voi myös esiintyä ympäristövahinkojentorjuntatehtävissä räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Johtuen edellä mainituista syistä ei ole järkevää asentaa aurinkopaneeleita suoraan kannelle.

Yksi mahdollinen vaihtoehto voisi kuitenkin olla vastaavanlaisesti kuin helikopterikannella, esimerkiksi kuvan 20 kaltainen pinta-alaltaan suuri ohutkalvokennorulla, jonka voi vetää auki ja tarvittaessa rullata takaisin kiinni. Rulla voisi mahdollisesti sijaita 5. kannella ja tilan puolesta olla jopa kymmenen metriä leveä. Ohutkalvokennorulla avattaisiin vetämällä se auki perän suuntaan, jossa tilaa olisi peräti kolmekymmentä metriä. Rulla vaatisi

todennäköisesti jonkinlaisen kiskon tai rakenteen, jonka varaan rulla kiinnittyisi ollessa auki.



Kuva 20. Suurikokoinen ohutkalvokennorulla [36].

Ohutkalvopaneelirullan pinta-ala voisi olla peräkannella noin 300 m^2 ja esimerkinomaisesti, jos sen hyötysuhde olisi 12 %, tuottaisi se kaavan 21 mukaisesti sähkötehoa vuodessa noin:

$$I * \eta * A = 1034 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 0,12 * 300 \text{ m}^2 = 37\,224 \text{ kWh} \quad (21)$$

I on insolaatio, eli Suomenlahdella vuotuinen Auringon säteilyenergian määrä vaakasuoralla pinnalla. (kWh/m^2)

η on ohutkalvopaneelin hyötysuhde (12 %)

A on aurinkosähköpaneeliston pinta-ala (m^2).

Kaavassa 22 on suhteutettu peräkansialueen aurinkosähköpotentiaalia aluksen vuotuisen energiakulutukseen (hypoteettisen esimerkkini mukaisesti), jolloin:

$$\begin{aligned} \text{Aurinkosähkön osuus kokonaiskulutuksesta} &= \frac{\text{Aurinkopaneeleilla tuotettu teho}}{\text{Aluksen vuoden energiakulutus}} \quad (22) \\ &= \frac{37\,224 \text{ kWh}}{25\,696\,000 \text{ kWh}} * 100 \% = 0,14 \% \end{aligned}$$

ja vastaavasti (kaava 23) satamakoneen vuotuisesta energiakulutuksesta:

$$\frac{37\,224 \text{ kWh}}{6\,643\,000 \text{ kWh}} * 100 \% = 0,56 \% \quad (23)$$

5.7 Aurinkoenergian kannattavuus

5.7.1 Energiakulutuksen osuus

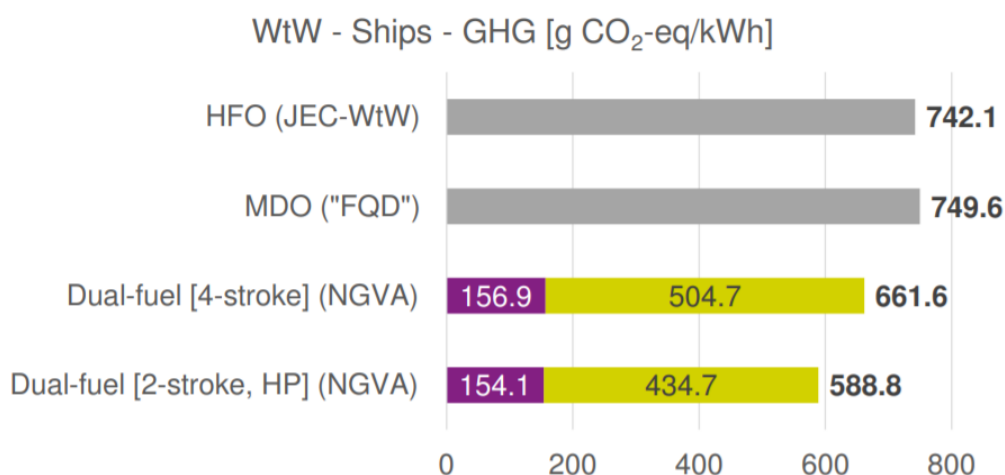
Jos vartiolaiva Turvalle asennettaisiin aurinkopaneeleita edellä mainituilla tavoilla, jossa paneeleita olisi liitteen 1 mukaisesti helikopterikannella, liitteen 2 mukaisesti molemmilla kyljillä ja lisäksi vielä peräkannella ohutkalvokennorulla, kattaisi se vuotuisesta kokonaisenergiakulutuksesta kaavan 24 mukaisesti noin:

$$\begin{aligned} \text{Helikopterikannen osuus} + \text{Kylkien osuus} + \text{Peräkannen osuus} & \quad (24) \\ &= 0,23 \% + (0,07 \% + 0,04 \%) + 0,14 \% = 0,48 \% \end{aligned}$$

Huomionarvoista on, että helikopterikannelle ei välttämättä voi asentaa semmoisenaan kiinteitä paneeleita, ja mikäli kiinteät paneelit korvattaisiin ohutkalvokennorullalla, olisi helikopterikannen sähköntuotto samassa suuruusluokassa peräkannen kanssa, eli 0,14 %.

5.7.2 Rahallinen kannattavuus

Hypoteettisen esimerkkini mukaisesti Turva kuluttaa vuodessa 25 696 000 kWh energiaa ja sen kattamiseksi alus tulee tankata 20,8 kertaa, jonka hinnaksi tulisi tämän hetken hinnoilla vuodessa noin 750 000 €. Aurinkopaneelien mahdollinen säästö kokonaisenergiakulutuksen kustannuksista vuodessa olisi noin 0,48 %, eli 3600 €/vuodessa. Kolmenkymmenen vuoden aikana LNG:tä säästyisi noin 270 tonnia, eli kolme Turvan täyttä tankillista ja kasvihuonepäästöissä se vastaisi kuvan 21 mukaisesti 2448 tonnia CO₂ ekvivalentti kasvihuonekaasuja.



Kuva 21. Laivojen polttoaineiden kasvihuonepäästöjen vaikutus. Well-to-Wake, eli luku huomioi koko prosessista aiheutuvat päästöt: porauksesta, käsittelystä ja lopuksi polttoaineen polttamisesta. [31.]

Pienten (alle 100 kW_p) aurinkosähköjärjestelmien keskihinta, jotka sisältävät koko järjestelmän *avaimet käteen periaatteella* maksavat tällä hetkellä Saksassa noin 1000 €/kW_p ja Suomessa vastaavasti noin 1200–1300 €/kW, sisältäen alv 24 % [37; 38]. Turvan esimerkkijärjestelmän nimellisteho on 129 kW_p, joka ylittää hieman 100 kW_p:n tehon, joten arvioidaan järjestelmän keskihinnaksi 1100 €/kW. Tällöin järjestelmän hinnaksi muodostuisi 141 350 €. Oletetaan myös, että järjestelmän vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannukset olisivat noin yhden prosentin verran alkuperäisinvestoinnista, eli 1400 €/vuodessa, jonka lisäksi sovelletaan neljän prosentin korkokantaa. Sekä laivan että aurinkopaneelien elinkaari on pitkä, noin 30 vuotta. Jos syötetään mainitsemani arvot LCOE-kaavan, joka on tämän opinnäytetyön 7 kaava, saadaan aurinkopaneelin tuottaman energian hinnaksi noin 0,08 €/kWh.

Jos sovelletaan tämän opinnäytetyön 6 kaavaa, joka antaa erittäin karkean arvion takaisinmaksuajasta ja sijoitetaan siihen arviot järjestelmän kustannuksista ja tuotosta, saadaan koko järjestelmän takaisinmaksuajaksi noin 40 vuotta. Ensimmäisen liitteen esimerkin takaisinmaksuaika on noin 36 vuotta. Takaisinmaksuaikaan vaikuttaa todellisuudessa merkittävästi LNG:n hintakehitys ja aurinkopaneelijärjestelmästä maksettu hinta sekä järjestelmän tehotuotto.

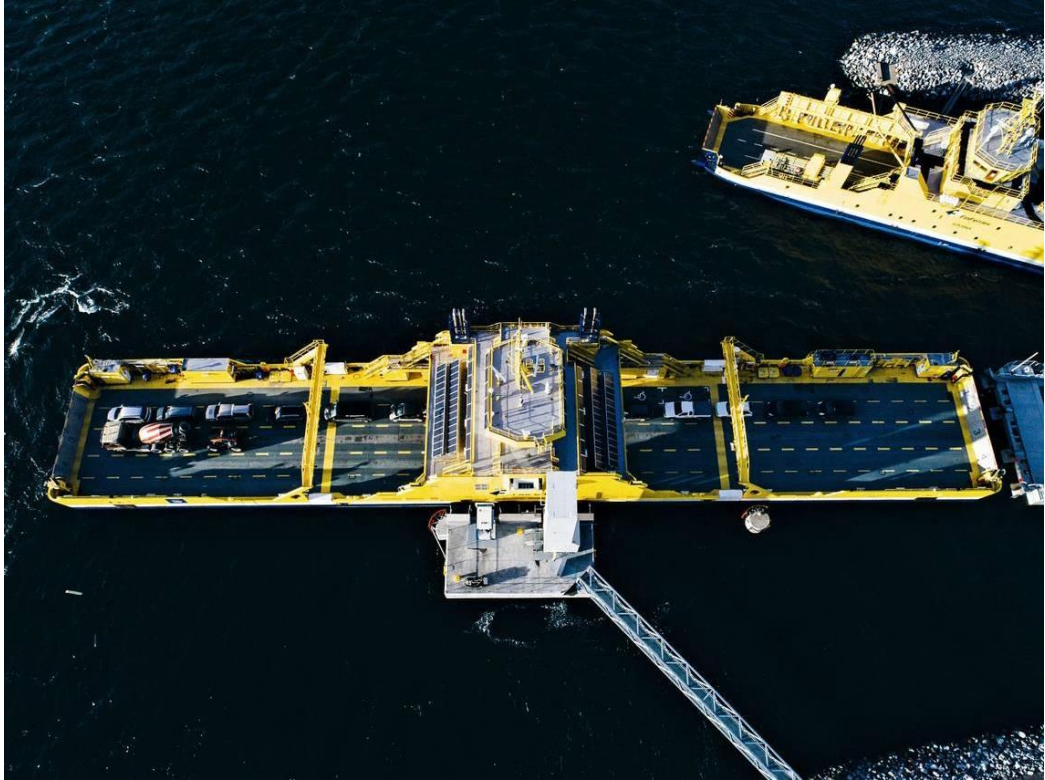
Vertailun vuoksi esitän kaavassa 25 nesteytetyn maakaasun hinnan karkeasti:

$$\frac{\text{Vuotuinen polttoainekustannus}}{\text{Vuotuinen energiakulutus}} = \frac{750\,000\text{€}}{25\,696\,000\text{ kWh}} = 0,03\text{ €/kWh} \quad (25)$$

Polttomoottoreilla kulutetun energian hinnaksi tulee todellisuudessa kuitenkin suurempi summa, sillä siihen on lisättävä arvonvähennys-, huolto-, henkilöstö- ja investointikulut. On syytä myös muistaa, että nämä luvut eivät huomioi aurinkopaneelien myönteisiä ympäristövaikutuksia.

6 Referenssialukset

6.1 Finferries Elektra (IMO 9806328)



Kuva 22. Elektra kulkee säännöllisesti samaa reittiä Parainen-Nauvo väliä [39].

6.1.1 Tekniset tiedot

Alla esitän Elektran avainlukuja, jotka auttavat hahmottamaan autolautan kokoluokkaa.

- Rakennusvuosi: 2017
- DWT: 525 t
- Pituus: 97,9 m
- Leveys: 15,2 m
- Propulsioteho: 2x900 kW
- Syväys: 3,55 m
- Akkukapasiteetti: 1 MWh

Elektra (kuva 22) kulkee sähköllä, ja ensisijaisena voimanlähteenä on lautan akusto. Akkuja ladataan aina lautan ollessa rannassa, mutta osittain myös aurinkopaneelien avustamana. Jos akkujen varaus uhkaa loppua, esimerkiksi hankalissa jääolosuhteissa, on aluksessa myös dieselgeneraattoreita, joilla akkuja voidaan ladata.

6.1.2 Aurinkosähköjärjestelmä



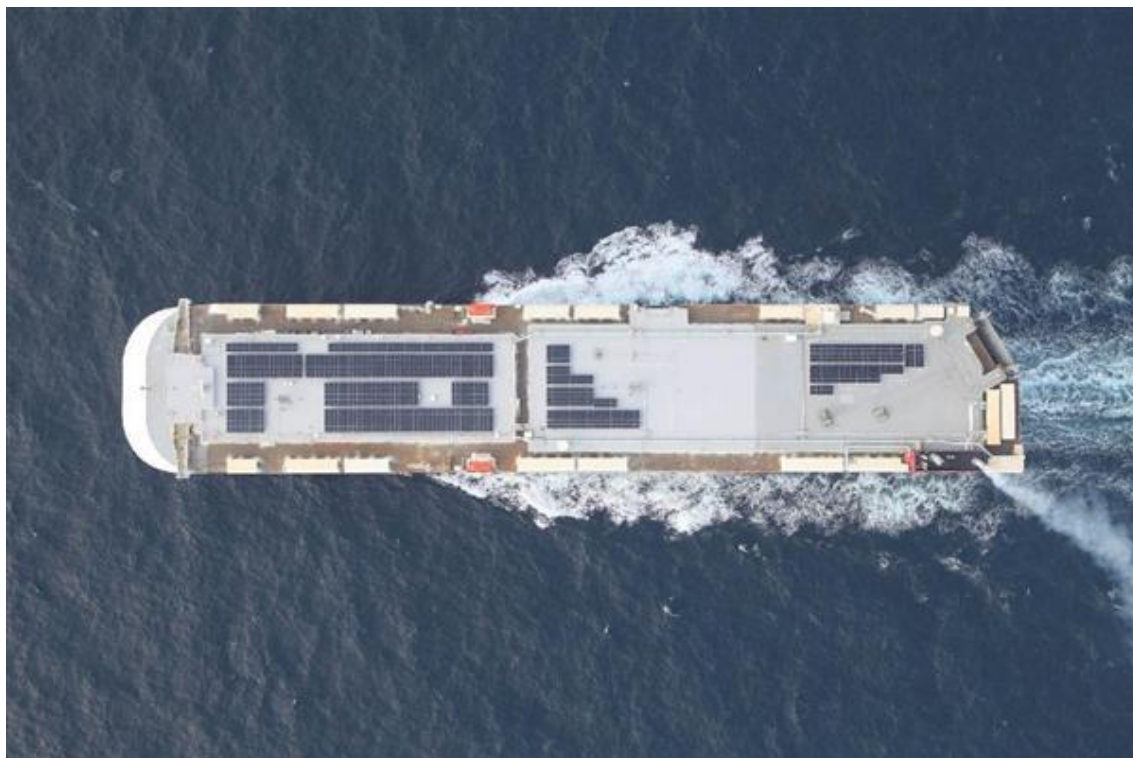
Kuva 23. Elektran aurinkopaneelisto [39].

Elektran aurinkopaneelit (kuva 23) ovat asennettu noin 45°:n kulmassa taivasta kohden. Aurinkopaneelit ovat Puolalaisen ActiveSol'in valmistamat ja niiden malli on ASOL-155P-AB, monikidepiipaneeli kymmenen vuoden takuulla ja noin 15 %:n hyötysuhteella. Niiden tehotuotto paneelia kohden on 155 W_p. Aurinkopaneelisto koostuu 41:stä

paneelista suunnattuna aluksen keulan suuntaan ja toiset 41 paneelia suunnattuna perää kohti, eli yhteensä 82 aurinkopaneelia. Järjestelmän tehontuotto on 12,71 kW_p. [39.]

Koska Elektra ajaa säännöllistä meno-paluu reittiä, joka on ilmansuunniltaan Lounas-Koillinen, on todennäköistä, että koilliseen osoittavat paneelit eivät yllä huipputuottoon ja lounaaseen osoittavat saattavat aurinkoisena päivänä ylittää ilmoitetun huipputuoton. Ilmatieteenlaitoksen mittausten perusteella, joiden tulokset ovat nähtävissä liitteessä kolme osoitetaan, kuinka 45° kallistetut ja koilliseen suunnatut aurinkopaneelit tuottavat 35 % vähemmän sähkötehoa verrattuna vaaka-asentoon asennettuihin paneeleihin ja, kuinka 45° kallistetut sekä lounaaseen suunnatut tuottavat noin 5–10 % enemmän sähkötehoa verrattuna samaan vaakasuoraan asennukseen. Luonnollisesti pitää myös huomioida, ettei asennonmuutos saa aiheuttaa uusia varjoja aurinkopaneeleiden päälle.

6.2 K-Line Drive Green Highway (IMO 9728069)



Kuva 24. Autolautan katolla on 912 aurinkopaneelin installaatio [41].

6.2.1 Tekniset tiedot

Alla esitän Drive Green Highwayn avainlukuja, jotka auttavat hahmottamaan aluksen koluokkaa.

- Rakennusvuosi: 2016
- DWT: 20034 t
- Pituus: 200 m
- Nopeus: 20 solmua
- Leveys: 37,5 m
- Koneteho: 16900 kW
- Syväys: 9,8 m

6.2.2 Aurinkosähköjärjestelmä

Drive Green Highwayn energiatehokkuutta parantaa kuvan 24 mittava aurinkosähköjärjestelmä aluksen katolla, joka on yksi maailman suurimmista järjestelmistä laiva-asennuksissa. Järjestelmän on toimittanut japanilainen yhtiö Solar Frontier, ja aurinkopaneelin tyyppi on ohutkalvopaneeli CIS. Yhden aurinkopaneelin pinta-ala on 1,23 m² ja maksimaalinen tehontuotto 180 W_p. Järjestelmän paneelit on asennettu vaaka-asentoon, ja se suunniteltiin tuottamaan kokonaisuudessaan 150 kW edestä sähkötehoa, jolla syötetään sähköä autokansien LED-valoille. K-Line valitsi Solar Frontierin aurinkopaneelit niiden kestävyys- ja laadun takia. [42.]

7 Laitevalmistajat

Aurinkopaneelivalinnan valinta ei ole helppo tehtävä, sillä valmistajia on satoja ja maallikon voi olla vaikea hahmottaa, mitä tekijöitä tulisi ottaa huomioon. Valintaan tulisi ensisijaisesti vaikuttaa paneelin suorituskyky, hyötysuhde, hinta ja laatu, jonka lisäksi julkisen sektorin intressissä saattaa olla kotimaisuusaste.

Laitevalintaa harkitessa kannattaa suosia nimekästä aurinkopaneelivalmistajaa, jolla on kokemuksia kokoluokaltaan merkittävistä hankkeista ja valmistuksen tuotanto on täysin automatisoitua [43]. Suurten aurinkopaneelivalmistajien tuotteilla on myös pääsääntöisesti laatusertifikaatit (esimerkiksi IEC 61730, 61215, 62716 sekä 61701), jotka osoittavat tuotteen olevan laadukas, turvallinen ja korroosion kestävä. Aurinkopaneelin IP-luokitukseen tulisi myös kiinnittää huomiota, sillä laiva-asennuksissa paneeleihin voi kohdistua vesisuihkuja. Monella laadukkaalla paneelilla on IP-67-luokitus, joka suojaa paneelia pölyltä, ja paneeli kestää myös hetkellisen upotuksen veteen. Useat valmistajat tarjoavat myös nykyään 25 vuoden tehontuottotakuun tuotteilleen. Hyötysuhdetta ja hintaa voi hahmotella tämän opinnäytetyön kaavoilla 3 ja 5, jotka mahdollistavat eri tuotteiden vertailun keskenään. Listaan taulukkoon 5 ja 6 muutaman esimerkin eri valmistajien laadukkaista tuotteista, joilla pääsee vertailussa alkuun. Huomionarvoista on, että yksikidepiikennopaneelilla tulisi päästä tänä päivänä vähintään 20 %:n hyötysuhteeseen.

Taulukko 5. Yksikidepiipaneeli markkinoiden suorituskyvyltään parhaimpia esimerkkejä.

Valmistaja & Malli	Teho (W_p)	Pinta-ala (m^2)	Hyötysuhde (%)	Takuu (vuotta)
Sun Power, SPR-A425-G-AC	425	2	22,8	25
LG, 365Q1C-A5	365	1,7	21,1	25
Panasonic, VBH340RA18N	340	1,7	20,3	25
CanadianSolar, HiDM CS1U-420MS	420	2,1	20,4	25
Q-Cells, DUO-G5 315-330	330	1,7	19,9	25
REC, REC400TP2SM 72	400	2,0	20,0	25
Salo Solar, SS-370W	370	1,9	19,4	24
VALOe, IBC-Chrystal	375	1,7	22	40

Kaksi viimeistä esimerkkiä taulukossa 5, ovat suomalaisvalmisteisia. Erityisen mielenkiintoinen on VALOe, joka kykenee valmistamaan yksikidepiipaneeleita erikoisvaatimuksilla, poikkeuksellisen pitkällä tehontuottotakuulla ja erinomaisella hyötysuhteella. Kuten taulukoista 5 ja 6 on nähtävissä, yksikidepiipaneelien suorituskyky on selkeästi parempi kuin ohutkalvokennojen.

Taulukko 6. Ohutkalvopaneeli markkinoiden suorituskyvyltään parhaimpia esimerkkejä.

Valmistaja & Malli	Teho (W_p)	Pinta-ala (m^2)	Hyötysuhde (%)	Takuu (vuotta)
First Solar, FS-6450A	450	2,5	18,2	25
Solar Frontier, SFK185-S	185	1,2	12,6	–
Avancis, Power Max	150	1,1	14,2	25

8 Yhteenveto

Opinnäytetyössä olen esitellyt aurinkoenergian hyödyntämisen toimintaperiaatetta, tekniikoita, säteilyanalyysiä, aurinkosähköön liittyviä laskelmia, laiva-asennusmahdollisuuksia sekä kaupallisia aurinkopaneelimalleja. Lisäksi laskelmiin perustuen olen arvioinut aurinkopaneeliston sähköntuottopotentiaalia. Olen pyrkinyt työssäni mahdollisimman ratkaisulähtöiseen, objektiiviseen ja tutkimuksellisesti kestävään näkökulmaan ottaen huomioon puoltavat ja vastustavat seikat, nojaten lisäksi mahdollisimman moneen lähteeseen. Maailmalla vallitsevan energiatuotannon trendin mukaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä tullaan vähentämään ja ne tullaan korvaamaan uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla, joista aurinkosähkö on nykytilanteen valossa globaalisti kaikista potentiaalisin lähes olemattomien ympäristövaikutusten ja edullisuutensa vuoksi.

Olosuhteet aurinkosähkön hyödyntämiselle ovat Suomenlahdella melko suotuisat, ja säteilyenergian määrä on vastaavalla tasolla kuin Pohjois-Saksassa. Työni johtopäätöksenä on, että laivoissa on ympäristön näkökulmasta kannattavaa hyödyntää aurinkopaneeleita osana sähköntuotantoa, mutta tällä hetkellä se kannattaa ensisijaisesti tehdä yksikidepiitä käyttävillä aurinkopaneeleilla, sillä laivoissa on kohtalaisen vähän pinta-alaa hyödynnettävissä aurinkopaneeliasennuksille. Näin ollen on suotavaa saada mahdollisimman suuri tuotto arvokkaalle pinta-alalle. Laivoissa, jotka eivät liikennöi säännöllistä reittiä, aurinkopaneelit kannattaa asentaa vaakasuoraan asentoon, sillä kallistetuissa asennuksissa ilmansuunnan vaikutus syö merkittävän osan tehontuotosta.

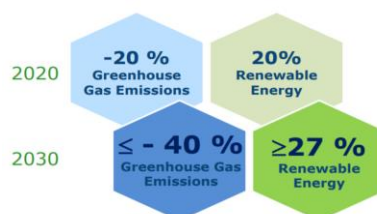
Vartiolaiva Turvan tapauksessa perinteisten yksikidepii aurinkopaneelien hyödyntäminen on kuitenkin haasteellista kiinteän rakenteensa ansiosta. Monitoimialuksen on pystyttävä mukautumaan moneen eri tilanteeseen, jolloin kiinteät paneelit eivät saa rajoittaa muuta toimintaa. Erikoisvalmisteiset yksikidepii aurinkopaneelit, kuten autoteillä käytössä olevat, voisivat mahdollisesti soveltua myös Turvalle. Teoriassa ohutkalvokennot voisivat myös soveltua, mutta käytännössä sekään ei ole täysin ongelmaton ratkaisu, sillä niiden hyötysuhde on edelleen verrattain heikko, joten ne kattaisivat ainoastaan erittäin marginaalisen osan kokonaisenergiakulutuksesta. On myös huomioitava mahdolliset rakennemuutokset, joita pitäisi tehdä, jotta aurinkopaneelirullan hyödyntäminen olisi mahdollista. Mikäli teräsrakenteita tulee laivaan lisää, vaikuttaa se myös epäsuorasti aluksen

hiilijalanjälkeen, sillä teräksen valmistukseen kuluu paljon energiaa ja lisärakenteet kasvattaisivat myös aluksen massaa.

Aurinkopaneelien tehontuotto on 2010-luvulla kasvanut noin viisi prosenttia vuodessa, joten on todennäköistä, että tehontuotto pinta-alaa kohden jatkaa kehittymistään myös tulevaisuudessa. Tämä saattaa tulevaisuudessa avata uusia mahdollisuuksia muun muassa ohutkalvokennorullan osalta.

Tämän työn laskelmia on hyvä pitää ainoastaan suuntaa-antavina, sillä kuten kaikkiin energiankannattavuus laskelmiin liittyy, myös tämän työn laskelmiin liittyy epävarmuustekijöitä, arvioita ja yksinkertaistuksia. Esimerkiksi, jos laskelmistani jättää pois aurinkopaneelit Turvan kyljestä, muuttuu järjestelmän hyötysuhde edullisemmaksi, sillä perä- ja helikopterikannelle säteilevät enemmän energiaa vuodessa. Turvan aurinkosähköpotentiaalianalyysissäni sain tulokseksi, että polttomoottorilla tuotettu sähkö on edullisempaa kuin aurinkopaneeleilla, eivätkä paneelit välttämättä ehdi maksaa itseään rahallisesti takaisin elinkaarensa aikana. Moni pieni asia vaikuttaa kuitenkin lopputulokseen, joka pienillä säädöillä voi muuttua huomattavastikin. Maailmalla aurinkoenergia on kuitenkin usein halvin sähköntuotantomuoto uusista asennuksista.

Riippumatta siitä, onko asennus taloudellisesti kannattava, on syytä myös miettiä, mikä on ympäristön kannalta kannattavaa. Tavoite on kuitenkin selvä. Euroopan neuvosto asetti kuvan 25 mukaisesti vuonna 2014 energiatavoitteita Euroopan unionille. Vuonna 2030 EU:n hiilidioksidipäästöt (CO₂) tulee olla 40 % pienemmät kuin vuonna 1990. Lisäksi vuonna 2030 sähköntuotannosta 27 % tulee olla uusiutuvaa. Tammikuussa 2020 voimaan astui lisäksi kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n uudet päästörajoitteet merenkululle, joka merkittävästi vähentää rikin määrää pakokaasuissa. Näin ollen on todennäköistä, etteivät nämä rajoitukset ja tavoitteet jää viimeisiksi.



Kuva 25. EU:n vuonna 2014 asettamat energiatavoitteet vuoteen 1990 verrattuna [44].

Lähteet

- 1 Our Sun in depth. 2019. Verkkoaineisto. North American Space Agency. <<https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/>>. Luettu 15.10.2019.
- 2 Aurinko. 2019. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/aurinko>>. Luettu 15.10.2019.
- 3 Sähkömagneettinen säteily. 2019. Verkkoaineisto. Wikipedia Commons, Derivative work: Yksitoinen. <https://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_s%C3%A4teily#/media/Tiedosto:EM_spectrum_fi.svg>. Luettu 15.10.2019.
- 4 Tsao Jeff, Lewis Nate, Crabtree George. 2006. Verkkoaineisto. Solar FAQs. Sandia National Laboratories. <<https://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf>>. Luettu 16.10.2019.
- 5 Vaclav Smil, Ritchie Hannah, Roser Max. 2018. Verkkoaineisto. Energy Production & Changing Energy Sources. Our World in Data. <<https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>; <http://vaclavsmil.com/2016/12/14/energy-transitions-global-and-national-perspectives-second-expanded-and-updated-edition/>; <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Luettu 16.10.2019.
- 6 Havaintojen lataus. 2019. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>>. Luettu 13.1.2020.
- 7 Suomenlahden kartta 2020. Verkkoaineisto. Google. <<https://www.google.com/maps>>. Luettu 31.1.2020.
- 8 Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2019. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>>. Luettu 14.1.2020.
- 9 Harvey, L. D. Danny. 2010. Carbon-Free Energy Supply.
- 10 Khartchenko, Nikolai V. & Khartchenko, Vadym M. 2014. Advanced Energy Systems. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group.
- 11 Solar Cell Array. 2020. Verkkoaineisto. Solar Resource application Forum. <https://www.renewable.pr.aist.go.jp/ent/en/app_glossary_en>. Luettu 16.1.2020.

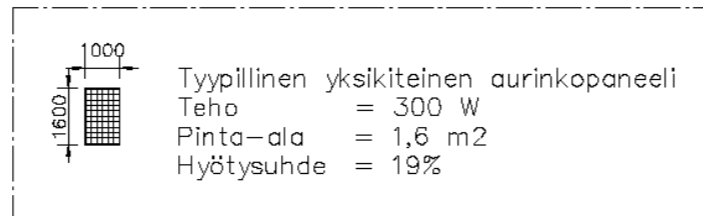
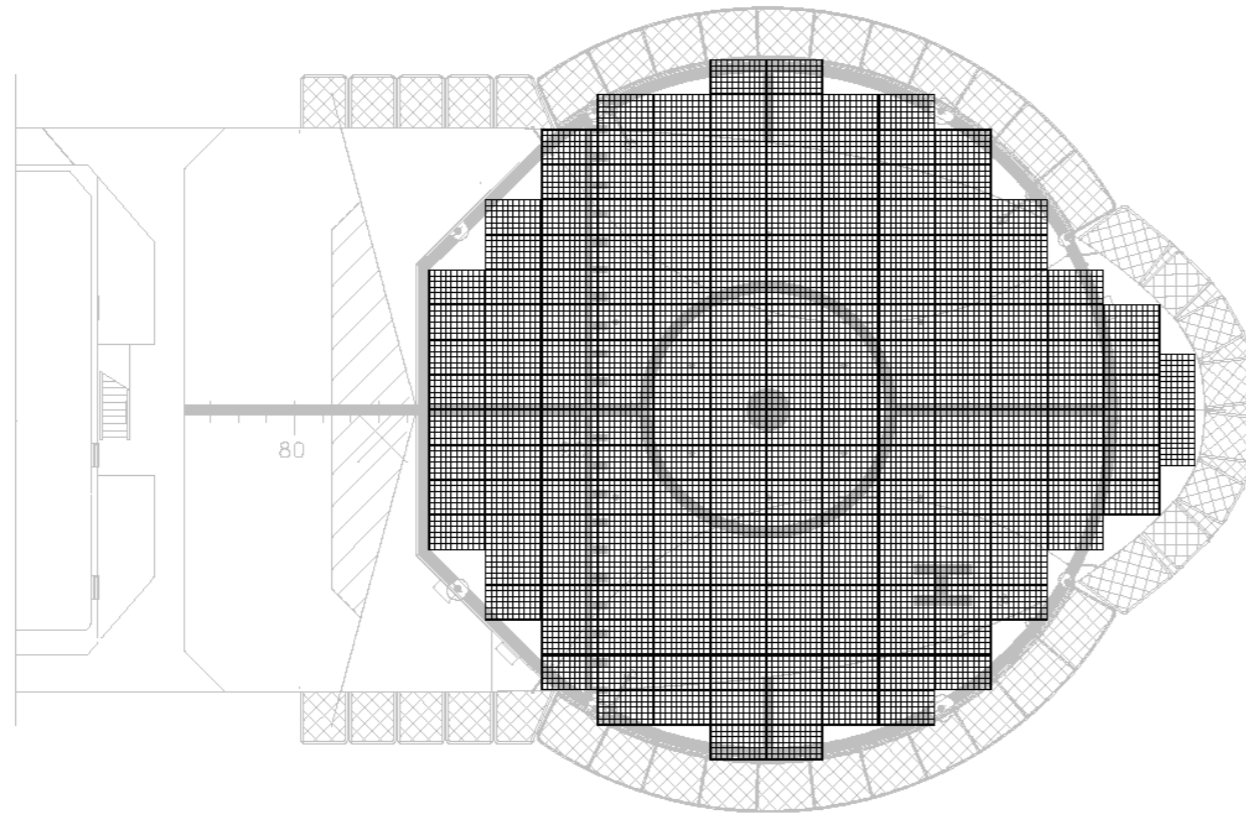
- 12 Wilkins, Mary-Jane. Kääntänyt Valjakka, Nina. 2012. Aurinkovoima. Perhemediat Oy.
- 13 Solar explained. 2019. Verkkoaineisto. The U.S. Energy Information Administration (EIA). <<https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>>. Luettu 10.11.2019.
- 14 CIGS aurinkokennotekniikka. 2019. Verkkoaineisto. DS New Energy. <<http://fi.dsnsolar.com/info/cigs-solar-cell-technology-32908679.html>>. Luettu 16.1.2020.
- 15 Solar Power Market Size. 2019. Verkkoaineisto. Fortune Business Insights. <<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/solar-power-market-100764>>. Luettu 17.1.2020.
- 16 10 Facts About Solar Power Information: Charging Battery With Solar Panel. 2019. Verkkoaineisto. Green Solar. <<https://www.solarpanel.wiki/solar-power-information/>>. Luettu 10.1.2020.
- 17 Mayfield Ryan. 2019. Photovoltaic Design and Installation For Dummies. For Dummies.
- 18 Best Research-Cell Efficiency Chart. 2019. Verkkoaineisto. NREL Transforming Energy. <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Luettu 10.1.2020.
- 19 What Is Multi-Junction Solar?. 2019. Verkkoaineisto. Alta Devices. <<https://www.altadevices.com/what-is-multi-junction-solar/>>. Luettu 17.1.2020.
- 20 Can Solar Panels Be Recycled?. 2018. Verkkoaineisto. CED GreenTech. <<https://www.civicsolar.com/article/can-solar-panels-be-recycled>>. Luettu 7.2.2020.
- 21 End-Of-Life Management. Solar Photovoltaic Panels. 2016. Verkkoaineisto. IEA International Energy Agency. <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>. Luettu 7.2.2020.
- 22 The first recycling plant in Europe for solar panels!. 2019. Verkkoaineisto. Veolia. <<https://www.livingcircular.veolia.com/en/industry/first-recycling-plant-europe-solar-panels>>. Luettu 7.2.2020.
- 23 Global market outlook for solar power / 2019-2023. 2019. Verkkoaineisto. Solar-Power Europe. <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/09/20190510_SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-for-Solar-Power-2019-2023.pdf?cf_id=4031>. Luettu 5.11.2019.

- 24 Näin aurinkoenergian hiilijalanjälki saadaan pienemmäksi. CO₂ Raportti. 2010. Verkkoaineisto. MayorsIndicators. <http://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastouutisia&news_id=2715>. Luettu 7.2.2020.
- 25 Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2018. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>>. Luettu 14.1.2020.
- 26 The Basic Economics of Photovoltaics. 2008. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/237515653_The_Basic_Economics_of_Photovoltaics>. Luettu 20.1.2020.
- 27 Price Index. 2020. Verkkoaineisto. PVXChange. <<https://www.pvxchange.com/en/news/price-index>>. Luettu 20.1.2020.
- 28 Levelized Cost of Energy (LCOE). 2015. Verkkoaineisto. U.S. Department of Energy. <<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf>>. Luettu 14.1.2020.
- 29 Rajavartiolaitoksen sisäinen esittelykuvakanta.
- 30 Arktisen alueen metaanipäästöt ennätyslukemissa. CO₂ Raportti. 2010. Verkkoaineisto. MayorsIndicators. <http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news_id=1912>. Luettu 5.2.2020.
- 31 Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas. 2017. Verkkoaineisto. European Natural & bio Gas Vehicle Association. <<https://www.thinkstep.com/content/report-greenhouse-gas-intensity-study-natural-gas>>. Luettu 27.1.2020.
- 32 Wärtsilä 34DF Product Guide. 2019. Verkkoaineisto. Wärtsilä. <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w34df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w34df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring>. Luettu 1.2.2020.
- 33 Wärtsilä 20 DF Product Guide. 2018. Verkkoaineisto. Wärtsilä. <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w20df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring>. Luettu 1.2.2020.
- 34 Helmen, Gunnar. Myyntijohtaja. Gasum. 2020. LNG supply in the Baltic Sea region. Sähköposti.

- 35 Rapid Roll Products. 2020. Verkkoaineisto. Renova Gen. <<http://www.renovagen.com/products/rapid-roll-t/>>. Luettu 7.2.2020.
- 36 Flexible Solar Cells. 2008. Verkkoaineisto. Research Gate. <https://www.researchgate.net/publication/236033053_Flexible_Solar_Cells>. Luettu 3.2.2020.
- 37 Faktoja Vuoden 2019 kampanjatarjouksista. 2020. Verkkoaineisto. Aurinkosähköä kotiin. <<https://aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkosahkoa-kotiin-kampanja/>>. Luettu 5.2.2020.
- 38 Recent Facts about Photovoltaics in Germany. 2020. Verkkoaineisto. Fraunhofer ISE. <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>>. Luettu 7.2.2020.
- 39 Suomen ensimmäinen sähkölautta - "Voi olla, ettei tarvitse hankkia kuulolaitetta...". 2017. Verkkoaineisto. Tekniikka & Talous. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomen-ensimmainen-sahkolautta-voi-olla-ettei-tarvitse-hankkia-kuulolaitetta/02b7227e-a2ff-32a6-b33f-39b7469a7987>>. Luettu 3.2.2020.
- 40 Nordvall, Marcus. Automaatioinsinööri. Suomen lauttaliikenne. 2020. Ingejör's examensarbete: Solpaneler på VI Turva. Sähköposti.
- 41 Drive Green Highway. 2020. Verkkoaineisto. MarineTraffic. <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:3888165/mmsi:374438000/imo:9728069/vessel:DRIVE_GREEN_HIGHWAY>. Luettu 15.1.2020.
- 42 Solar Frontier's CIS Solar Panels Installed on K-Line's New Environmentally Friendly Transport Ship. 2016. Verkkoaineisto. Solar Frontier. <<http://www.solar-frontier.com/eng/news/2016/C052772.html>>. Luettu 15.1.2020.
- 43 Energijärjestelmän haasteet (ABB). Verkkoaineisto. Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=lbYYNerObgM>>. Katsottu 9.2.2020.
- 44 Framework for Climate & Energy. 2014. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2030/docs/2030_euco_conclusions_en.pdf>. Luettu 5.11.2019.
- 45 Thin-Film Solar Cells Cheaper & 100 Times Thinner. 2017. Verkkoaineisto. Industry Tap. <<https://www.industrytap.com/thin-film-solar-cells-cheaper-100-times-thinner/41995>>. Luettu 5.2.2020.
- 46 Roll-Array Solar Carpet Can Be Installed Anywhere. 2016. Verkkoaineisto. Tetex. <<http://www.tetex.com/roll-array-solar-carpet/>>. Luettu 5.2.2020.

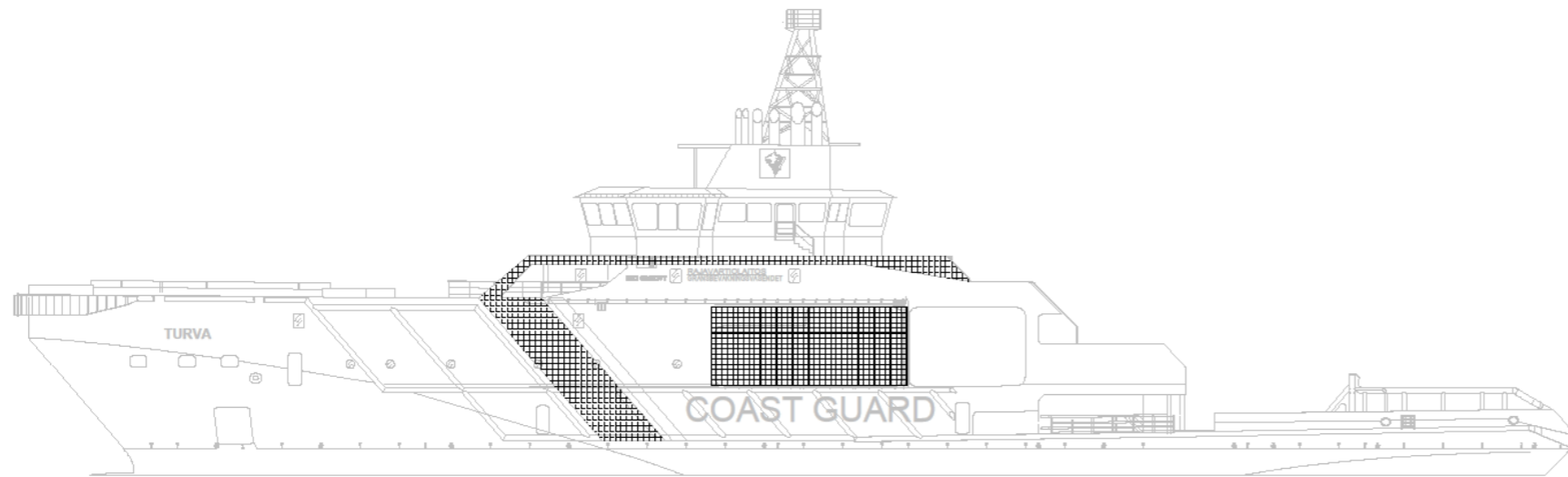
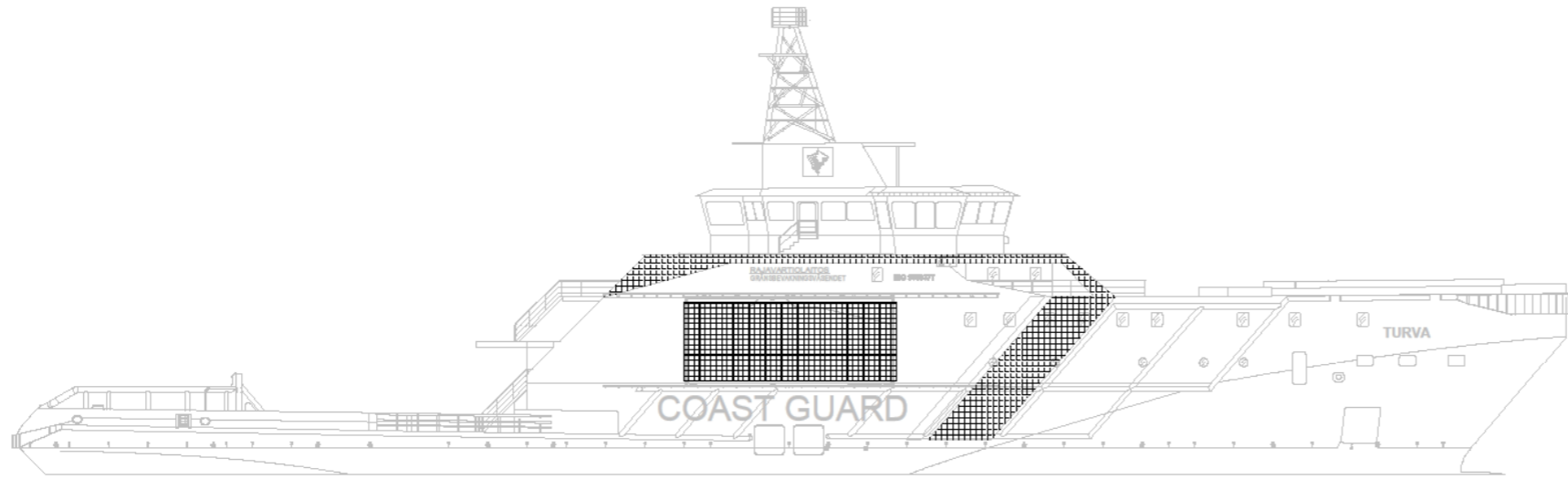
- 47 Roll out Solar Panels. 2006. Verkkoaineisto. ClimateVisuals. <<https://climatevisuals.org/node/850>>. Luettu 5.2.2020.
- 48 Rapid Roll "I" - Under Development. 2020. Verkkoaineisto. Renova Gen. <<http://www.renovagen.com/products/rapid-roll-i/>>. Luettu 10.2.2020.
- 49 Kaakkunen, Jarno. Senior Project Manager. VALOe. 2020. Sähkövoimatekniikan opinnäytetyö: Aurinkoenergian hyödyntäminen Rajavartiolaitoksen laivoissa. Sähköposti.
- 50 Maailman ensimmäinen aurinkopaneelitie avattiin Ranskassa. 2016. Verkkoaineisto. MTV uutiset. <<https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/maailman-ensimmainen-aurinkopaneelitie-avattiin-ranskassa/6238032#gs.wqwran>>. Luettu 17.2.2020.
- 51 Viherto, Jyrki. Principal Surveyor. DNV GL. 2020. Aurinkoenergian hyödyntäminen laivoissa. Sähköposti.

Vartiolaiva Turvan keula-/helikopterikansi



Tunn.	Lukum.	Muutos	Nimi, Pvm	
Kosa/Kyjä	Kortti/Tila	Tontti	Rno	Viranomaisen merkintä
VARTIOLAIVA TURVA			SÄHKÖPIIRUSTUS	
Insinöörin opinnäytetyö Tom Strandvall Rajavartiolaiva Ammattikorkeakoulu Metropolia			Aurinkopaneelin sijoituspiirustus Keulan helikopterikenttä	Mk: 1:100
Pvm 21.1.2020			Työnumero	Tilauksen numero
Pihk. T.S.				
Suunn. T.S.				
Terä.			Piirustuksen numero	
Yhlihti			Muutos	
Lehti			SÄH	

Vartiolaiva Turvan kyljet



	Tyypillinen yksikiteinen aurinkopaneeli Teho = 300 W Pinta-ala = 1,6 m ² Hyötysuhde = 19%
--	---

TÄMÄ YKSITTÄINEN PANEELI EI OLE MITTAKAAVASSA

Tunn.	Lukum.	Muutos	Kortti/Tila	Tantti	Rno	Viranomaisen merkintä	Rh:nr.	Pvm
VARTIOLAIVA TURVA			SÄHKÖPIIRUSTUS				MK:	
Insinöörin opinnäytetyö Tom Strandvall Rajavartiolaitos Ammattikorkeakoulu Metropolia			Aurinkopaneelin sijoituspiirustus Lalvan kyljet				1:200	
Pvm	21.1.2020	Työnumero	Tilaajan numero					
Piirt.	T.S.							
Suunn.	T.S.							
Tark.		Pitustuonumero						
Yhliht.		SÄH						
Luhti		Muutos						

Ilmatieteenlaitoksen mittaamat muunnoskerroimet [20].

Muunnoskerroin F_{suunta} , jolla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi eri ilmansuunnissa vyöhykkeillä I ja II (Vantaa)

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,841	0,841	1,003	1,727	2,098	1,719	1,011	0,841
Helmikuu	0,687	0,706	1,053	1,668	1,982	1,645	1,011	0,698
Maaliskuu	0,592	0,691	1,032	1,476	1,659	1,405	0,981	0,661
Huhtikuu	0,430	0,615	0,908	1,197	1,293	1,190	0,953	0,607
Toukokuu	0,434	0,646	0,900	1,078	1,106	1,038	0,890	0,606
Kesäkuu	0,545	0,683	0,878	0,970	0,994	0,999	0,926	0,713
Heinäkuu	0,459	0,649	0,863	1,015	1,049	1,037	0,935	0,650
Elokuu	0,474	0,688	0,975	1,188	1,201	1,081	0,898	0,622
Syyskuu	0,425	0,575	0,929	1,352	1,547	1,370	0,991	0,572
Lokakuu	0,654	0,692	0,977	1,423	1,692	1,479	1,026	0,706
Marraskuu	0,768	0,768	0,985	1,722	2,102	1,719	0,994	0,768
Joulukuu	0,785	0,785	0,938	1,940	2,473	2,009	1,027	0,785
Koko vuosi	0,491	0,657	0,918	1,162	1,242	1,148	0,937	0,644

Muunnoskerroin F_{suunta} , jonka avulla vaakatasolle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia muunnetaan erisuuntaisille pystypinnoille tulevaksi kokonaissäteilyenergiaksi vyöhykkeillä I ja II (Vantaa)

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	0,802	0,804	0,944	1,791	2,259	1,780	0,937	0,804
Helmikuu	0,631	0,640	0,927	1,571	1,957	1,558	0,919	0,639
Maaliskuu	0,630	0,667	0,938	1,340	1,521	1,254	0,865	0,651
Huhtikuu	0,346	0,478	0,721	0,891	0,918	0,896	0,729	0,485
Toukokuu	0,347	0,515	0,724	0,775	0,713	0,743	0,680	0,483
Kesäkuu	0,419	0,542	0,691	0,677	0,610	0,685	0,704	0,552
Heinäkuu	0,368	0,528	0,702	0,710	0,650	0,740	0,722	0,526
Elokuu	0,377	0,536	0,780	0,881	0,811	0,776	0,679	0,497
Syyskuu	0,354	0,452	0,754	1,085	1,257	1,122	0,784	0,457
Lokakuu	0,504	0,516	0,736	1,154	1,454	1,219	0,785	0,519
Marraskuu	0,635	0,635	0,830	1,675	2,159	1,673	0,828	0,635
Joulukuu	0,699	0,699	0,838	2,060	2,770	2,159	0,905	0,699
Koko vuosi	0,404	0,532	0,745	0,886	0,900	0,873	0,731	0,523

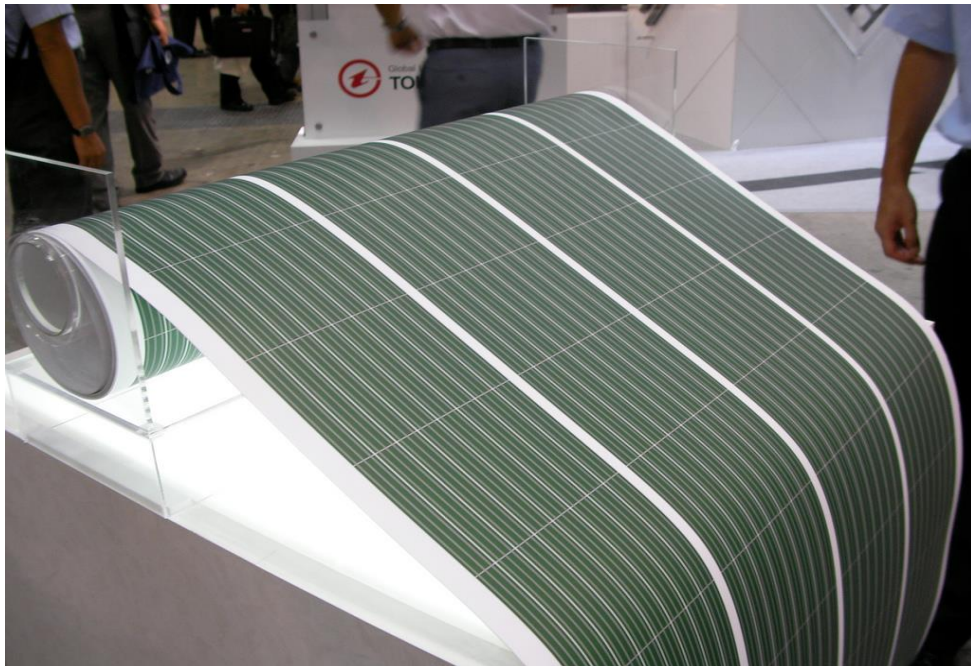
Auringon kokonaissäteilyenergia 45 astetta kallistetulle pinnalle eri ilmansuuntiin suunnattuna vyöhykkeillä I ja II (Vantaa), kWh/m²

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	5,2	5,2	6,2	10,7	13,1	10,7	6,3	5,2
Helmikuu	15,4	15,8	23,5	37,3	44,3	36,8	22,6	15,6
Maaliskuu	38,1	44,4	66,3	94,9	106,7	90,3	63,1	42,5
Huhtikuu	51,5	73,7	108,8	143,4	154,9	142,7	114,3	72,8
Toukokuu	71,8	106,9	148,9	178,3	183,0	171,8	147,3	100,3
Kesäkuu	91,9	115,2	148,0	163,6	167,6	168,4	156,1	120,2
Heinäkuu	83,0	117,4	156,1	183,6	189,8	187,5	169,1	117,6
Elokuu	60,0	87,2	123,5	150,5	152,1	136,9	113,7	78,7
Syyskuu	34,8	47,1	76,2	110,8	126,9	112,3	81,3	46,9
Lokakuu	17,1	18,1	25,6	37,2	44,3	38,7	26,9	18,5
Marraskuu	6,2	6,2	8,0	14,0	17,0	13,9	8,1	6,2
Joulukuu	3,6	3,6	4,2	8,8	11,2	9,1	4,6	3,6
Koko vuosi	478,5	640,8	895,4	1133,2	1210,9	1119,1	913,3	628,1

Auringon kokonaissäteilyenergia eri ilmansuuntiin osoittaville pystypinnoille vyöhykkeillä I ja II (Vantaa)
 $G_{säteily, pystypinta}$, kWh/m²

Kuukausi	P	Ko	I	Ka	E	Lo	L	Lu
Tammikuu	5,0	5,0	5,9	11,1	14,1	11,1	5,8	5,0
Helmikuu	14,1	14,3	20,7	35,1	43,8	34,8	20,6	14,3
Maaliskuu	40,5	42,9	60,3	86,1	97,8	80,6	55,6	41,9
Huhtikuu	41,5	57,4	86,4	106,8	110,1	107,4	87,4	58,1
Toukokuu	57,4	85,2	119,8	128,3	118,0	122,9	112,5	79,9
Kesäkuu	70,7	91,4	116,5	114,1	102,9	115,5	118,7	93,0
Heinäkuu	66,5	95,4	127,0	128,5	117,5	133,9	130,6	95,1
Elokuu	47,8	67,9	98,8	111,6	102,7	98,4	86,0	63,0
Syyskuu	29,0	37,1	61,8	89,0	103,1	92,0	64,3	37,5
Lokakuu	13,2	13,5	19,3	30,2	38,1	31,9	20,5	13,6
Marraskuu	5,1	5,1	6,7	13,6	17,5	13,6	6,7	5,1
Joulukuu	3,2	3,2	3,8	9,3	12,5	9,8	4,1	3,2
Koko vuosi	393,9	518,3	726,9	863,6	878,0	851,7	712,7	509,7

Kuvia ohutkalvopaneelirullista



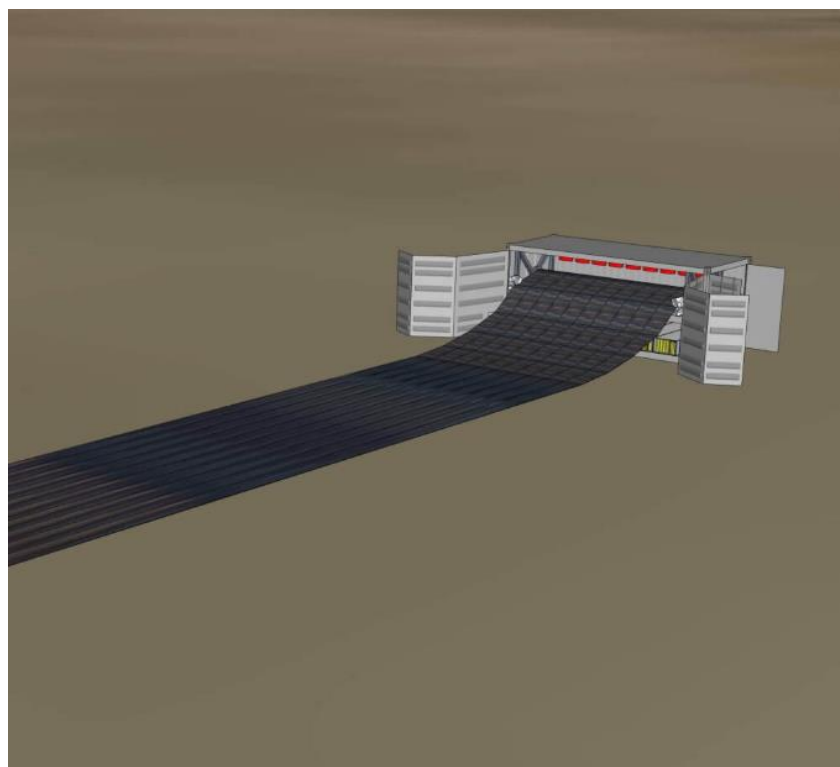
Kuva 26. Ohutkalvokennorulla [45].



Kuva 27. Ohutkalvokennorulla [46].



Kuva 28. Rulla-asennus [47].



Kuva 29. Aurinkopaneelirulla laivakontista [48].